

# INGENIERÍA AMBIENTAL

## Aplicaciones



Alba Beatriz Vázquez González  
Enrique César Valdez  
Vicente Fuentes Gea  
Cristian Emmanuel González Reyes  
Antonio Jacintos Nieves  
Rodrigo Takashi Sepúlveda Hirose

Facultad de Ingeniería  
Universidad Nacional Autónoma de México  
Proyecto patrocinado por la UNAM-DGAPA-PAPIME PE 104516

VÁZQUEZ GONZÁLEZ, Alba Beatriz, Enrique Cesar Valdez, Vicente Fuentes Gea, Cristian E. González Reyes, Antonio Jacintos Nieves, Rodrigo T. Sepulveda Hirose. *Ingeniería Ambiental - Aplicaciones*. México, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, 2020, 476p.

*Ingeniería Ambiental*  
*Aplicaciones*

Primera edición 11 de noviembre de 2020

Derechos reservados.  
©2020, Universidad Nacional Autónoma de México  
Facultad de Ingeniería  
Avenida Universidad 3000 Ciudad Universitaria,  
Alcaldía Coyoacán, C.P. 04510, México, CDMX.

<http://www.ingenieria.unam.mx/>

ISBN 978-607-30-3786-0

Prohibida la reproducción o transmisión total o parcial de esta obra por cualquier medio o sistema electrónico o mecánico (incluyendo el fotocopiado, la grabación o cualquier sistema de recuperación y almacenamiento de información), sin la autorización escrita del titular de los derechos patrimoniales.

Hecho en México

# Ingeniería Ambiental

## Aplicaciones

FACULTAD DE INGENIERÍA, UNAM

# Ingeniería Ambiental

## Aplicaciones

---

M. en I. Alba Beatriz Vázquez González  
*Profesora Titular C*

Dr. Enrique César Valdez  
*Profesor Titular C*

M. en C. Vicente Fuentes Gea  
*Profesor Titular C*

M. en I. Cristian Emmanuel González Reyes  
*Profesor Asociado C*

M. en G.A. Antonio Jacintos Nieves  
*Profesor de Asignatura*

M. en I. Rodrigo Takashi Sepúlveda Hirose  
*Profesor Asociado C*

Edición

Ing. Esp. Marco Antonio Luque García  
*Profesor de Asignatura*



**Agradecimientos:**

Trabajo realizado con el apoyo del Programa UNAM-DGAPA-PAPIME  
clave del proyecto PE104516

# Índice

## Prefacio

<b>1. Recursos geológicos y del suelo</b> .....	<b>12</b>
<b>1.1 Geología y mineralogía económica</b> .....	<b>18</b>
1.1.1 Metales y recursos minerales no metálicos .....	18
1.1.2 Metales y minerales estratégicos.....	20
<b>1.2 Efectos ambientales de la extracción de recursos</b> .....	<b>22</b>
1.2.1 Minería y beneficio .....	24
1.2.2 Normas oficiales mexicanas relativas a protección ambiental como parte de las actividades mineras.....	31
<b>1.3 Conservación de recursos geológicos</b> .....	<b>33</b>
<b>1.4 Peligro geológico</b> .....	<b>34</b>
<b>1.5 Características generales de los suelos</b> .....	<b>38</b>
1.5.1 Concepto de suelo y proceso de formación .....	38
1.5.2 Composición y propiedades físicas y químicas.....	39
1.5.3 Sistema de clasificación .....	48
<b>1.6 Degradación de los suelos</b> .....	<b>51</b>
1.6.1 Principales procesos erosivos.....	54
1.6.2 Desertificación.....	56
1.6.3 Contaminación de suelos .....	56
<b>1.7 Ecuación universal de pérdida de suelos</b> .....	<b>58</b>
<b>1.8 Normas oficiales mexicanas aplicables al factor suelo</b> .....	<b>61</b>
<b>1.9 Medidas de mitigación del impacto en el factor suelo</b> .....	<b>64</b>
1.9.1 Manejo de suelos .....	65
<b>1.10 Problemas y actividades propuestas</b> .....	<b>69</b>
<b>2. Manejo de residuos sólidos</b> .....	<b>87</b>
<b>2.1 Tipos de residuos y fuentes de generación</b> .....	<b>87</b>
2.1.1 Tipos de residuos y fuentes de generación .....	89
<b>2.2 Leyes y reglamentos en la materia</b> .....	<b>94</b>
2.2.1 Legislación .....	94
2.2.2 Normatividad.....	98
<b>2.3 Composición física. Normas oficiales mexicanas para la determinación de las características físicas</b> .....	<b>100</b>
2.3.1 Características físicas .....	101
2.3.2 Características biológicas .....	114
<b>2.4 Flujo de materiales en la sociedad</b> .....	<b>115</b>
2.4.1 Ciclo de vida en residuos.....	118
2.4.2 Análisis del costo del ciclo de vida .....	121
2.4.3 Metabolismo urbano .....	123
<b>2.5 Reducción, reúso y recuperación</b> .....	<b>127</b>
<b>2.6 Preguntas y actividades propuestas</b> .....	<b>130</b>

<b>3.</b>	<b>Almacenamiento, recolección, transporte, tratamiento y disposición final de residuos sólidos urbanos .....</b>	<b>137</b>
3.1	Elementos funcionales del sistema de manejo de residuos e interrelaciones .....	137
3.2	Generación de residuos .....	140
3.3	Manejo en el sitio, almacenamiento y procesamiento .....	145
3.3.1	Tipos de almacenamiento .....	145
3.3.2	Cálculo del volumen de almacenamiento .....	146
3.4	Recolección de residuos municipales .....	148
3.4.1	Métodos para la recolección de residuos .....	149
3.4.2	Vehículos de recolección .....	151
3.4.3	Frecuencia de recolección .....	152
3.5	Diseño de rutas de recolección .....	154
3.6	Transferencia y transporte .....	161
3.7	Clasificación de los sistemas de tratamiento Situación actual y tendencias mundiales ....	165
3.7.1	Composteo o compostaje .....	166
3.7.2	Degradación anaerobia .....	168
3.7.3	Compactación de alta densidad .....	170
3.7.4	Incineración .....	171
3.8	Rellenos sanitarios .....	176
3.8.1	Tipos de relleno sanitario .....	177
3.8.2	Componentes de un relleno sanitario .....	179
3.8.3	Normatividad relativa a proyectos de rellenos sanitarios .....	185
3.8.4	Ubicación del relleno sanitario .....	185
3.8.5	Estudios auxiliares multidisciplinarios .....	187
3.9	Ingeniería básica del proyecto de un relleno sanitario; diseño funcional .....	189
3.9.1	Diseño general .....	189
3.9.2	Características generales del relleno sanitario .....	189
3.9.3	Requerimientos volumétricos .....	192
3.9.4	Diseño de subsistemas .....	196
3.10	Operación y control de un relleno sanitario .....	204
3.10.1	Calendarización del llenado de las celdas .....	204
3.10.2	Dimensionamiento de la celda diaria .....	204
3.10.3	Determinación del método de confinamiento .....	207
3.11	Clausura del relleno sanitario .....	209
3.11.1	Consideraciones previas al proceso de clausura .....	210
3.11.2	Acciones durante la etapa final .....	211
3.11.3	Monitoreo y mantenimiento postclausura .....	213
3.11.4	Sistema de control de biogás .....	213
3.11.5	Sistema de drenaje de lixiviados .....	214
3.11.6	Sistema de monitoreo de biogás y lixiviados .....	214
3.11.7	Monitoreo de asentamientos .....	215
3.11.8	Cubierta final del relleno sanitario .....	216
3.11.9	Uso final del suelo .....	218
3.12	Preguntas y actividades propuestas .....	219
<b>4.</b>	<b>Contaminación del aire y control .....</b>	<b>224</b>
4.1	Principales contaminantes y sus fuentes .....	226
4.1.1	Compuestos que contienen nitrógeno .....	233

4.1.2	Compuestos que contienen azufre .....	234
4.1.3	Compuestos que contienen carbono .....	236
4.1.4	Oxidantes fotoquímicos .....	237
4.1.5	Partículas .....	241
4.1.6	Lluvia ácida .....	242
4.1.7	Criterios y normas de calidad del aire .....	244
4.1.8	Índice de calidad del aire .....	247
4.1.9	Obtención de emisiones .....	252
<b>4.2</b>	<b>Conceptos de meteorología .....</b>	<b>257</b>
4.2.1	Estructura vertical de la troposfera .....	257
4.2.2	Estabilidad atmosférica .....	261
4.2.3	Capa de mezcla .....	269
4.2.4	Vientos .....	271
<b>4.3</b>	<b>Métodos de simulación .....</b>	<b>272</b>
4.3.1	Modelos de pluma gaussiana .....	275
4.3.2	Ascenso de plumas .....	289
4.3.3	Obtención de concentraciones máximas .....	293
<b>4.4</b>	<b>Control de la contaminación del aire .....</b>	<b>296</b>
4.4.1	Cámara de sedimentación .....	297
4.4.2	Ciclón .....	298
4.4.3	Torre de aspersión .....	300
4.4.4	Precipitador electrostático .....	302
4.4.5	Filtro de tela .....	304
<b>4.5</b>	<b>Problemas y actividades propuestas .....</b>	<b>307</b>
<b>5.</b>	<b>Contaminación por ruido y control .....</b>	<b>312</b>
<b>5.1</b>	<b>Sonido y ruido .....</b>	<b>313</b>
5.1.1	Propiedades del sonido .....	314
5.1.2	Medición del sonido .....	317
5.1.3	Ruido .....	324
<b>5.2</b>	<b>Efectos del ruido en la salud humana .....</b>	<b>326</b>
5.2.1	Mecanismo de la audición .....	328
5.2.2	Daños a la salud ocasionados por el ruido .....	334
<b>5.3</b>	<b>Fuentes de emisión de ruido .....</b>	<b>338</b>
5.3.1	Maquinaria de construcción .....	339
5.3.2	Vehículos automotores .....	341
5.3.3	Aeronaves .....	342
<b>5.4</b>	<b>Evaluación y predicción del ruido .....</b>	<b>343</b>
5.4.1	Ruido generado por automotores en proyectos de vialidades .....	348
5.4.2	Modelos de predicción .....	348
5.4.3	Ruido generado en los proyectos de aeropuertos .....	351
<b>5.5</b>	<b>Control de ruido .....</b>	<b>353</b>
5.5.1	Barreras acústicas .....	360
5.5.2	Estrategias de control de ruido en carreteras .....	361
5.5.3	Mitigación del ruido producido por la construcción .....	363
<b>5.6</b>	<b>Problemas y actividades propuestas .....</b>	<b>365</b>
<b>6.</b>	<b>Evaluación de impacto ambiental .....</b>	<b>371</b>
6.1	Legislación aplicable en materia de impacto ambiental .....	374

6.1.1 Artículos constitucionales relativos a la preservación y restauración del equilibrio ecológico .....	374
6.1.2 Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente .....	377
6.1.3 Otras leyes relacionadas.....	380
6.1.4 Reglamentos de la LGEEPA .....	382
6.1.5 Reglamento en materia de Evaluación de Impacto Ambiental .....	382
<b>6.2 Metodología general para evaluar el impacto ambiental.....</b>	<b>386</b>
6.2.1 Etapa 1. Descripción de las alternativas del proyecto y sus acciones, e inventario ambiental .....	387
6.2.2 Etapa 2. Identificación, predicción y valoración de los impactos .....	388
6.2.3 Etapa 3. Medidas de prevención y mitigación.....	389
6.2.4 Etapa 4. Comunicación de resultados.....	390
<b>6.3 Técnicas para estudiar el impacto ambiental y su clasificación .....</b>	<b>390</b>
6.3.1 Clasificación de las técnicas usadas para la evaluación del impacto ambiental.....	392
6.3.2 Listados .....	393
6.3.3 Panel de expertos y método de Delphi .....	398
6.3.4 Técnica de Mc Harg. Sistemas de selección geográfica.....	398
6.3.5 Modelos .....	401
6.3.6 Valoración de los impactos .....	411
6.3.7 Matrices.....	414
6.3.8 Sistema de evaluación ambiental Batelle Columbus .....	423
6.3.9 Diagramas de redes de impacto .....	431
<b>6.4 Explicación de las técnicas más adecuadas a las condiciones nacionales .....</b>	<b>437</b>
<b>6.5 Estudio de caso.....</b>	<b>439</b>
6.5.1 Impactos ambientales potenciales de las carreteras.....	440
6.5.2 Ejemplos de impactos ambientales provocados por carreteras y algunas medidas de prevención y mitigación .....	448
<b>6.7 Preguntas y actividades propuestas.....</b>	<b>458</b>
<b>7. Bibliografía .....</b>	<b>472</b>

# Índice de objetos de aprendizaje

## 1 - Recursos geológicos y del suelo

1.1. Las fuerzas que dan forma a la Tierra - Diseñado por Enrique César .....	70
1.2. Influencia del factor geológico en un proyecto de ingeniería - Diseñado por Enrique César .....	71
1.3. Flujo de minerales en la economía- Diseñado por Enrique César .....	75
1.4. Cerro de San Pedro, SLP - Diseñado por Enrique César .....	76
1.5. Efectos ambientales de la extracción de minerales en el municipio de Zimapán, Hidalgo - Diseñado por Enrique César .....	78
1.6. Alteración de los suelos a causa de un proyecto de ingeniería - Diseñado por Enrique César.....	80
1.7. Cambio en la cobertura del suelo - Diseñado por Enrique César .....	85

## 2 - Manejo de residuos sólidos

2.1. Investigación fuentes de generación de residuos - Diseñado por Cristian González .....	131
2.2. Consulta y aplicación de la legislación y normatividad - Diseñado por Cristian González .....	131
2.3. Composición de los residuos de Cataluña - Diseñado por Cristian González .....	132
2.4. Planta de termo valorización de residuos sólidos urbanos en la CDMX - Diseñado por Cristian González .....	133
2.5. Flujo de materiales sociedad - Diseñado por Cristian González .....	134
2.6. Reducción, reúso y recuperación - Diseñado por Cristian González .....	135

## 3 - Almacenamiento, recolección, transporte, tratamiento y disposición final de residuos sólidos urbanos

3.1. Sistema intermunicipal de residuos sólidos urbanos - Diseñado por Antonio Jacintos .....	220
3.2. Análisis comparativo del manejo de residuos - Diseñado por Antonio Jacintos .....	220
3.3. Tratamiento de residuos orgánicos - Diseñado por Antonio Jacintos .....	221

## 4 - Contaminación del aire y control

4.1. Contaminación fotoquímica - Diseñado por Vicente Fuentes .....	309
4.2. Lluvia ácida - Diseñado por Vicente Fuentes .....	309
4.3. Fuentes de emisión - Diseñado por Vicente Fuentes .....	310
4.4. Elementos del problema de contaminación atmosférica - Diseñado por Vicente Fuentes .....	310

## 5 - Contaminación por ruido y control

5.1. Impactos de las actividades antrópicas en el paisaje sonoro - Diseñado por Rodrigo Takashi .....	366
5.2. Crucigrama “El ruido y su medición”- Diseñado por Rodrigo Takashi .....	367
5.3. “El ruido en nuestro entorno”- Diseñado por Rodrigo Takashi .....	369

## 6 - Evaluación de impacto ambiental

6.1. Vinculación con los instrumentos de planeación ambiental - Diseñado por Alba Vázquez .....	461
6.2. Fase de delimitación de la EIA - Diseñado por Alba Vázquez .....	462
6.3. Técnicas para estudiar el impacto ambiental - Diseñado por Alba Vázquez .....	463
6.4. Impacto ambiental de las carreteras - Diseñado por Alba Vázquez .....	471



# Prefacio

---

La ingeniería civil es una profesión que tiene como misión la satisfacción de diversas necesidades humanas. Desde el suministro de agua, la recolección y transporte de residuos líquidos y sólidos, su disposición y/o tratamiento, las obras de edificación que sirven como vivienda, para actividades institucionales, comerciales, industriales, de servicios, hospitalarias y otras; las vías de comunicación como carreteras, aeropuertos, puentes, ferrocarriles; las de generación energía, entre muchas otras. La ingeniería civil es una profesión de servicio, cuyo objetivo es satisfacer las necesidades de la sociedad, lo que ha permitido el incremento en la esperanza y calidad de vida. Las necesidades humanas tienen dos características; por un lado, son cambiantes en el tiempo y el espacio y por el otro, cada vez resulta más complejo satisfacerlas debido a las diversas restricciones que imponen el agotamiento y contaminación de los recursos naturales, la destrucción y aislamiento de ecosistemas, y fenómenos como el cambio climático mundial. Precisamente, estos problemas han sido causados en buena medida por el desarrollo de proyectos de ingeniería civil, los cuales utilizan los recursos de la naturaleza para llevar a cabo obras de servicio colectivo. Además, tiene el compromiso impostergable de encontrar soluciones a los problemas de contaminación a través del tratamiento y disposición adecuada de los desechos líquidos y sólidos; a la reducción y control de emisiones a la atmósfera para proteger la salud de las personas y mitigar el cambio climático, entre muchos otros. Es decir, la ingeniería civil no sólo debe proveer la infraestructura de servicios a la sociedad, también tiene que encontrar las mejores soluciones a la contaminación, al reciclaje de nuestros residuos y en general, a mantener un ambiente limpio. Este tema ha sido reconocido por los ingenieros civiles de todo el mundo a través del documento La Visión para la Ingeniería Civil en el 2025, basado en La Cumbre sobre el Futuro de la Ingeniería Civil en 2025 realizada en 2006, a la que asistieron ingenieros civiles de todo el mundo. A continuación, una de sus conclusiones:

*Los participantes en la Cumbre contemplan un mundo muy diferente para los ingenieros civiles en 2025. Una población mundial en permanente crecimiento y que continúa desplazándose hacia las zonas urbanas va a exigir la adopción generalizada de la sustentabilidad. Las demandas de energía, agua potable, aire limpio, eliminación segura de residuos y transporte van a impulsar la protección ambiental y el desarrollo de infraestructura. La sociedad se va a enfrentar a amenazas crecientes como resultado de los acontecimientos naturales, de los accidentes y, quizá, de otras causas, como el terrorismo.*

Para responder a estos retos, en el Plan de Estudios de la Licenciatura en Ingeniería Civil 2016, se propusieron dos nuevas asignaturas obligatorias de 6 créditos cada una: Ingeniería Ambiental I (5o semestre) e Ingeniería Ambiental II (6o semestre). En el curso de Ingeniería Ambiental I, se incluyen las bases de las ciencias de la ingeniería abarcando temas como: sustentabilidad, enfoque de sistemas, demografía, balances de materia y energía, ecología, microbiología y epidemiología, y evaluación de la calidad del agua. En el curso de Ingeniería Ambiental II, se incluyen los siguientes temas: recursos geológicos y del suelo, almacenamiento, recolección y transporte, tratamiento y disposición final de residuos sólidos urbanos, contaminación del aire y su control, contaminación por ruido y evaluación del impacto ambiental.

Para apoyar la enseñanza de las asignaturas mencionadas se desarrolló el proyecto académico *Libros digitales y estrategias de evaluación apoyadas en ambientes virtuales y objetos de aprendizaje para las asignaturas de Ingeniería*

*Ambiental I y II* bajo el patrocinio del Programa de Apoyo para la Innovación y Mejoramiento de la Enseñanza (PAPIME). Los libros y las estrategias apoyadas en ambientes virtuales y objetos de aprendizaje han sido preparados para formar a los futuros ingenieros civiles con orientación al desarrollo innovador de proyectos de ingeniería sustentables, para la solución de problemas relacionados con la sustentabilidad, el cuidado del ambiente y, en términos generales, para resolver problemas inherentes al crecimiento poblacional, y al bienestar social y económico.

El Libro de Ingeniería Ambiental - Fundamentos incluye 6 capítulos. El capítulo 1 “Recursos geológicos y del suelo” trata sobre los efectos más importantes de la actividad humana en general y de la ingeniería, en particular, como consecuencia de la explotación de recursos geológicos. Trata también sobre los peligros geológicos y su relación con los proyectos de ingeniería. Además, desarrolla los efectos de las obras de ingeniería civil sobre el factor suelo e incluye algunas medidas de control para la degradación de los suelos.

El capítulo 2 “Manejo de residuos sólidos” incluye temas relativos a los tipos de residuos de acuerdo con la legislación en la materia; las fuentes de generación y sus características; el flujo de residuos en la sociedad y los conceptos de reducción, reúso y recuperación.

El capítulo 3 “Almacenamiento, recolección, transporte, tratamiento y disposición final de residuos sólidos urbanos” trata sobre la gestión de los residuos sólidos urbanos incluyendo el diseño preliminar de los subsistemas de almacenamiento en sitio, recolección y transporte. Además, se estudian los sistemas de tratamiento y el diseño funcional del relleno sanitario que cumpla con las normas oficiales mexicanas.

El capítulo 4 “Contaminación del aire y control” trata las fuentes y efectos de los principales contaminantes atmosféricos; las normas de emisión y normas de calidad del aire y los sistemas de ingeniería para el control de la contaminación del aire. Se incluyen además los modelos matemáticos para la predicción de la concentración de algunos contaminantes emitidos por fuentes fijas.

Los efectos más importantes de la contaminación por ruido y la normatividad en la materia; el nivel de presión acústica y la aplicación de los principios de la física para la predicción del nivel de ruido. Además de las medidas de control correspondientes se presentan en el capítulo 5 “Contaminación por ruido y control”.

Finalmente, el capítulo 6 “Evaluación del impacto ambiental” incluye las disposiciones legales en materia de impacto ambiental para la autorización de obras o actividades, la metodología general para la evaluación del impacto ambiental, aplicando las técnicas más adecuadas a las condiciones nacionales y un estudio de caso.

## **Guía para el uso de este libro**

El grupo de académicos que hemos participado en el proyecto *Libros digitales y estrategias de evaluación apoyadas en ambientes virtuales y objetos de aprendizaje para las asignaturas de Ingeniería Ambiental I y II* constituido por 5 profesores de carrera y 1 profesor de asignatura hemos propuesto y discutido en grupo los recursos didácticos más convenientes para cada uno de los temas escritos, que incluyan fundamentalmente el contenido formativo. Seleccionamos y ordenamos las actividades pertinentes con base en los objetivos de aprendizaje. Como apoyo a los libros electrónicos se desarrollaron una serie de estrategias de evaluación apoyadas en ambientes virtuales y objetos de aprendizaje, los cuales tendrán como propósito principal el

autoaprendizaje, la enseñanza basada en la actividad formativa del estudiante, y que los alumnos se entusiasmen por aprender. Estas estrategias de evaluación y los objetos de aprendizaje se encuentran incluidos a lo largo del contenido de los libros con la siguiente simbología.



**Actividad 1.1**

**Las fuerzas que dan forma a la Tierra**

Ver el vídeo *Las fuerzas que dan forma a la Tierra* y responder las preguntas

Esta información es útil para el docente, ya que se le sugiere en dónde es pertinente encargar el desarrollo de la actividad. El alumno podrá consultar las instrucciones de cada actividad hacia el final de cada capítulo, con un recuadro como el que se muestra a continuación.

<p><b>Actividad 4.4</b> <b>Elementos del problema de contaminación atmosférica</b></p>
<p>Con base en el video “Elementos del problema de contaminación atmosférica” que puedes ver en el siguiente enlace: <a href="https://youtu.be/8G7ZDzk6A6A">https://youtu.be/8G7ZDzk6A6A</a></p> <p>contesta las siguientes preguntas.</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. ¿Cuáles son los factores que determinan que, a partir de una fuente de emisión de un contaminante específico, los receptores estén expuestos a niveles de calidad del aire variables en el tiempo?</li> <li>2. En el caso de que se presente una contingencia de contaminación en una zona urbana con millones de vehículos en circulación, ¿cómo podría la legislación ambiental contribuir a evitar el que no se alcancen niveles de contaminación perjudiciales a la salud?</li> <li>3. Menciona varias razones por las cuales las partículas PM<sub>2.5</sub> representan un riesgo mayor a la población que las partículas PST.</li> <li>4. En el video que presenta las concentraciones de partículas PM<sub>10</sub> en algunas ciudades de América, dos ciudades tienen una población similar a la Ciudad de México, sin embargo, la contaminación que se muestra la CDMX es mucho mayor. Menciona dos razones que podrían explicar este comportamiento.</li> </ol>







En el caso de los alumnos de la Facultad de Ingeniería podrán ingresar a la plataforma educativa EDUCAFI PLUS en donde se encuentran alojados los dos cursos en línea de Ingeniería Ambiental I e Ingeniería Ambiental II. Allí encontrarán todas las actividades que incluyen las instrucciones y la lista de cotejo. La lista de cotejo es información útil para el docente, ya que se le sugiere al profesor cómo evaluar la actividad y el alumno anticipadamente cómo será evaluado. Se incluye a continuación un ejemplo de lista de cotejo.

NUM	ASPECTO	PUNTAJE	OBTENIDO
1.	En la figura 1 escribe las letras mayúsculas que identifican a los 4 componentes del sistema.	10	
2.	En la Figura 1 escribe los símbolos que identifican a los flujos del sistema.	10	
3.	Describe la técnica de lixiviación por cianuración empleando los términos y símbolos de las preguntas 1 y 2.	20	
4.	Empleando la figura 1, identifica los sitios y las posibles causas de liberación de sustancias tóxicas	20	
5.	Investiga y cita la información existente sobre las consecuencias ambientales del proyecto Real de Ángeles, Zacatecas.	10	
6.	Investiga y cita la información sobre consecuencias ambientales y medidas de restauración del proyecto minero Summitville, en Colorado, E.U.	30	
<b>TOTAL</b>		<b>100</b>	

La plataforma educativa EDUCAFI PLUS le permitirá al estudiante de la Facultad de Ingeniería, tener toda la información de las actividades, videos, documentos en pdf, instrucciones, lista de cotejo, y otros. Además, podrá realizar algunas de las actividades en línea como por ejemplo cuestionarios, y subir sus tareas para que sean calificadas por el profesor. Se muestra a continuación ejemplos de pantalla de la plataforma.

The screenshot displays the user interface of the EDUCAFI PLUS platform. At the top, there is a navigation bar with links for 'Página Principal (home)', 'Mi Tablero de Instrumentos', and 'Mis Clases'. The user is logged in as 'Alba Beatriz Vázquez González (Salir)'. Below the navigation bar, the main content area shows 'MI HOGAR (ÁREA PERSONAL) / MIS CURSOS'. The course 'INGENIERÍA AMBIENTAL I' is highlighted, and below it, 'INGENIERÍA AMBIENTAL II' is listed. A notification indicates 'Usted tiene tareas que requieren su atención'. On the right side, there are two sidebars: 'NAVEGACIÓN' with links to 'Mi hogar (área personal)', 'Inicio (hogar) del sitio', 'Páginas del sitio', 'Mi perfil', and 'Mis cursos' (including IA 1 and IA 2); and 'ADMINISTRACIÓN' with links to 'Ajustes de mi perfil' (including 'Editar perfil' and 'Cambiar contraseña'), 'Mensajería', 'Blogs', and 'Insignias'. The footer contains the copyright information: '© 2018 UNICA Facultad de Ingeniería | UNAM' and the email address 'e-mail:educafi@ingenieria.unam.mx'.

## Actividades

-  [1.01. Las fuerzas que dan forma a la Tierra - Diseñado por Enrique César](#)
-  [1.02. Factor geológico - Diseñado por Enrique César](#)
-  [1.03. Flujo de minerales - Diseñado por Enrique César](#)
-  [1.04. Cerro de San Pedro - Diseñado por Enrique César](#)
-  [1.05. Zimapán, Hidalgo - Diseñado por Enrique César](#)
-  [1.06. Alteración de los suelos - Diseñado por Enrique César](#)

### 1.05. Zimapán, Hidalgo - Diseñado por Enrique César

#### Instrucciones de la actividad:

Ve el audiovisual Impacto ambiental de la actividad minera en Zimapán, Hidalgo, y realiza las siguientes actividades:



1. Investiga en la red sobre: a) ubicación del municipio, b) actividades agrícolas y pecuarias que se desarrollan, y c) cuerpos de agua superficial.
2. Localiza en una imagen satelital o fotografía aérea las zonas del municipio en las que se encuentran las plantas de beneficio de metales y presas de jales y, además, responde la siguiente pregunta: ¿cuál es el estado físico de los jales a lo largo del tiempo?
3. Investiga en la red sobre la dirección del viento preponderante en el municipio y comenta sobre la posibilidad de que la población esté expuesta a la inhalación de partículas tóxicas provenientes de la actividad minera.
4. Considerando la información presentada en el audiovisual y las respuestas a las preguntas anteriores, ¿cuáles pueden ser las vías de exposición a las sustancias tóxicas que tiene la población de la ciudad de Zimapán?
5. Completa el diagrama causa-efecto (o red de impactos) de la actividad *Trituración y concentrado*, correspondiente a la operación de una mina de

Los libros digitales incluyen ejemplos resueltos, además de *Recuadros de Información* que son temas de interés relacionados con los temas del libro, al final de cada capítulo se incluye una sección de *Preguntas y actividades propuestas*.

Sabemos que, a pesar del empeño y cuidado puesto en este proyecto, habrá oportunidad de mejorarlo. Invitamos a los docentes y estudiantes a hacernos llegar observaciones y sugerencias al siguiente correo [alba.vazquez@ingenieria.unam.edu](mailto:alba.vazquez@ingenieria.unam.edu)

Alba Beatriz Vázquez González  
Concepción, planeación y coordinación del proyecto.

**Capítulo****1**

## Objetivos de aprendizaje

---

Objetivo general: El alumno distinguirá los efectos más importantes de la actividad humana en general y de la ingeniería, en particular, como consecuencia de la explotación de recursos geológicos. También distinguirá los peligros geológicos y su relación con los proyectos de ingeniería, además de sus efectos sobre el factor suelo y recomendará medidas de control de la degradación de los suelos.

En este capítulo se pretende que analices información y realices algunas actividades con las que debes ser capaz de:

1. Comprender algunos principios básicos de la geología, incluyendo los que afectan las condiciones para la vida en la Tierra.
2. Explicar cómo se formaron los tres tipos principales de rocas y cómo funciona el ciclo de las rocas.
3. Resumir en qué consiste la mineralogía económica y qué son los minerales estratégicos.
4. Analizar los impactos ambientales de la minería y del procesamiento de minerales.
5. Identificar los peligros geológicos.
6. Examinar el papel de los organismos vivos, las fuerzas físicas y otros factores en la formación y el mantenimiento de suelo fértil.
7. Diferenciar entre las fuentes y los efectos de la degradación de suelos, incluyendo erosión, agotamiento de nutrientes, saturación de agua y salinización.



## Capítulo

## 1

# 1. Recursos geológicos y del suelo

*“La naturaleza tiene la clave a nuestras satisfacciones estéticas, intelectuales, cognitivas y aún espirituales”*

*Edward O. Wilson*

*Biólogo, investigador, naturalista y autor estadounidense*

Las rocas se componen de minerales y éstos a su vez de sustancias inorgánicas. Un **mineral** es un elemento o compuesto sólido con una composición química definida y una estructura cristalina interna regular. Algunos ejemplos de minerales son: caolinita, magnetita, calcita, feldespato, mica y cuarzo. Estos minerales se forman de elementos químicos fundamentales que incluyen, entre muchos otros: sílice, potasio, aluminio, hierro y oxígeno.

Las rocas **ígneas** forman la mayor parte de la corteza sólida del planeta, dichas rocas se enfriaron y solidificaron a partir de una masa de magma hirviendo y líquido. Un tipo común de roca ígnea es el *granito*, compuesto principalmente de minerales de cuarzo y feldespato

Las rocas ígneas de la superficie de la Tierra están sujetas al deterioro físico y degradación química. Los cambios de temperatura y la acción del viento, agua, bióxido de carbono y oxígeno causan cambios que ocurren constantemente. Este proceso gradual se denomina **meteorización**. La roca sólida formada de minerales consolidados se rompe en fragmentos relativamente pequeños no consolidados llamados *suelo*.

El viento o el agua mueven las partículas de suelo y se depositan en algún sitio formando *sedimentos*, los cuales son cubiertos con depósitos adicionales de material; eventualmente se compactan y consolidan bajo la carga de capas superiores. Al transcurrir el tiempo los fragmentos de roca pueden quedar cementados y de esta manera se forma el tipo de rocas **sedimentarias**. Un ejemplo de este tipo es la arenisca, formada de granos de arena cementados.

El tercer tipo corresponde a las rocas llamadas **metamórficas**; éstas se forman cuando las rocas ígneas y sedimentarias cambian sus formas originales y estructuras minerales bajo excesivo calor y presión a causa de condiciones ambientales. El mármol, ejemplo de este tipo de roca, se forma cuando la calcita contenida en la caliza recrystaliza debido al calor y a la presión.

Tanto las rocas sedimentarias como las metamórficas pueden ser sujetas otra vez al proceso de meteorización, transporte y depósito, en un ciclo continuo de formación de rocas (figura 1.1).

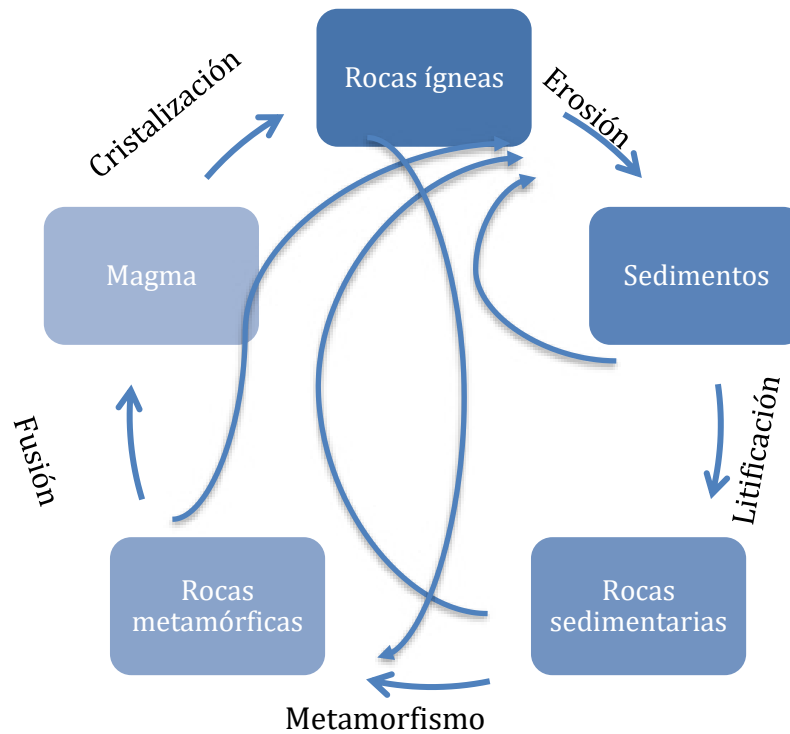


Figura 1.1 El ciclo de las rocas consiste en un proceso de creación, destrucción y metamorfosis. Cada uno de los tres principales tipos puede convertirse en cualquiera de los otros tipos.

Las rocas ígneas y metamórficas son impermeables, mientras que las rocas sedimentarias son generalmente porosas y relativamente permeables. Las rocas sedimentarias carbonatadas tienen cierta solubilidad, por ejemplo, la caliza. En este tipo de rocas pueden existir flujos de agua lentos a través de los poros, formando cavidades o *conductos de dilución*, y disolver la calcita. Los conductos de dilución incrementan la permeabilidad de las rocas.

Las formaciones rocosas tienen patrones estructurales característicos que también pueden influir en la permeabilidad. Por ejemplo, el patrón llamado *estratificación* está presente en las rocas sedimentarias, éste se debe a que las partículas de suelo no consolidadas se depositan como sedimentos en capas horizontales, debido a la acción del viento o del agua; estas capas pueden tener diferente tamaño de partícula o composición mineral. Por esta razón, en las rocas sedimentarias la permeabilidad es generalmente más alta en dirección paralela a las capas mencionadas.

Los cambios ambientales y movimientos de la corteza terrestre pueden causar que gradualmente las masas rocosas se curven y doblen. Las rocas se fracturan a causa de esfuerzos excesivos y a las fracturas o fisuras se les llama *juntas*. Cuando los movimientos de la corteza terrestre son de tal naturaleza que fracturan una masa de roca y desplazan las secciones separadas, se produce un rasgo estructural llamado *falla*. El desplazamiento que tiene lugar a lo largo de la mayoría de las fallas no se ve en la superficie (figura 1.2).

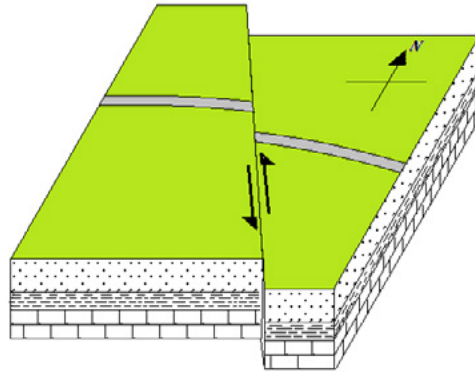


Figura 1.2 Esquema de una falla de rumbo de “mano derecha”, que representa el movimiento a lo largo de la falla de San Andrés, California, en 1906.



### Actividad 1.1

#### Las fuerzas que dan forma a la Tierra

Ver el vídeo *Las fuerzas que dan forma a la Tierra* y responder las preguntas

### Influencia de la geología en los efectos ambientales de algunas obras de ingeniería

Desde el punto de vista geológico, algunos de los efectos ambientales derivados de la construcción y operación de presas se manifiestan de manera directa e indirecta, y pueden ser locales o regionales.

Los efectos directos se presentan después de la construcción de la presa, por ejemplo: los asentamientos; éstos, a su vez, ocasionan agrietamientos con las consecuentes fugas de agua. Otros efectos directos son el oleaje y el cambio en el patrón de drenaje, que provocan socavamiento y derrumbes, lo cual afecta no sólo localmente en el área de la presa, sino también regionalmente, ya sea aguas arriba o en la zona beneficiada por el proyecto.

Los efectos indirectos se manifiestan cuando se inicia el manejo del embalse, dado que el peso de la cortina y su infraestructura, además de las variaciones en el manejo del agua, provocan los asentamientos, socavamientos, derrumbes, fugas de agua y los azolves que reducen la vida útil de las obras hidráulicas.

En el caso de la perforación de pozos para abastecimiento de agua potable, los efectos directos se presentan al inicio de la obra, y pueden ser: asentamientos del terreno, intrusión salina y se activan las fallas o fracturas existentes.

En este tipo de obras, al igual que en las presas, los efectos indirectos ocurren una vez que se inicia la extracción de agua. Si se perforó una cantidad de pozos, tal que el gasto extraído excede a la recarga por infiltración de agua de lluvia, se ocasionan problemas de asentamientos, intrusión salina, disminución de capacidad de recarga, entre otros, que afectan adversamente a la población que se pretendía beneficiar.

En los ejemplos anteriores no se mencionaron los efectos benéficos ya que generalmente están entre las intenciones o cambios esperados como consecuencia de los proyectos.

En la tabla 1.1 se muestran los factores geológicos que se deben considerar en los proyectos de obras hidráulicas y la tabla 1.2 presenta una matriz general de clasificación de efectos geológicos.

Tabla 1.1 Factores geológicos que se deben considerar en proyectos de obras hidráulicas

Proyectos	Factores que se deben considerar		Efectos geológicos
	Antes de la construcción	Después de la construcción	
I. Presas e infraestructura hidráulica.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Estabilidad de taludes.</li> <li>- Bancos de materiales.</li> <li>- Construcciones.</li> <li>- Zonas sísmicas.</li> <li>- Yacimientos.</li> <li>- Determinación (selección) de sitios susceptibles (zonas de pliegues o fallas) o zona sísmica.</li> <li>- Tipo de rocas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sísmicidad.</li> <li>- Peso de la cortina y del agua respecto al tipo de roca.</li> <li>- Características de la zona inundada.</li> <li>- Desplazamiento de taludes (CREEP).</li> <li>- Disminución del acuífero.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Asentamiento de terrenos.</li> <li>- Infiltración.</li> <li>- Socavamientos.</li> <li>- Derrumbes</li> <li>- Fugas de agua.</li> <li>- Cambio en el patrón de drenaje.</li> <li>- Azolves.</li> </ul>
II. Perforación de pozos para abastecimiento de agua potable.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Resistencia de rocas.</li> <li>- Potencia de capas.</li> <li>- Cortes estratigráficos.</li> <li>- Características de zonas de recarga.</li> <li>- Zonas de inestabilidad volcánica</li> <li>- Número de pozos y su profundidad.</li> <li>- Permeabilidad de las rocas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Disminución del volumen de extracción.</li> <li>- Capacidad de recarga en función del tipo de rocas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Asentamientos.</li> <li>- Intrusión salina.</li> <li>- Disminución de capacidad de recarga.</li> </ul>

Fuente: (Dirección General de Usos del Agua y Prevención de la Contaminación, 1982)

Proyectos		Efectos												
		Directos						Indirectos						
		Agrietamientos	Socavamientos	Derrumbes	Asentamientos de terreno	Intrusiones salinas	Activar fallas o fracturas	Asentamiento de terreno	Socavamiento	Derrumbes	Fuga de agua	Azolves	Intrusiones salinas	Disminución de capacidad de recarga
Presas	CONSTRUCCIÓN													
	PESO DE OBRA	X												
	PATRÓN DE DRENAJE		X	X										
	OPERACIÓN													
	PESO DE CORTINA E INFRAESTRUCTURA						X							
	PESO Y MANEJO DE EMBALSE						X	X	X	X	X			
	FLUCTUACIONES EN EL NIVEL							X			X			
Pozos	CONSTRUCCIÓN													
	PERFORACIÓN DESMEDIDA				X	X	X							
	OPERACIÓN SOBREPLOTACIÓN							X				X	X	

Tabla 1.2 Matriz de clasificación de efectos geológicos

Fuente: (Dirección General de Usos del Agua y Prevención de la Contaminación, 1982)

### Recuadro 1.1 Karst y cuevas de la península de Yucatán

Las lagunas en cámaras subterráneas iluminadas por rayos de sol en la Península de Yucatán, México, son paisajes excavados en rocas calizas. El tipo de topografía que se caracteriza visualmente por la presencia de cuevas, sumideros y sistemas de drenaje subterráneo que se forman en yeso, caliza y otras rocas, principalmente por disolución, se denomina karst.

Superficialmente el nivel de terreno relativamente constante, las pendientes son suaves, ello conlleva a que las elevaciones y depresiones sean casi nulas. Por otro lado, en el entorno subterráneo abundan las cuevas, karst, cenotes y pozos profundos formados a partir de la disolución de la caliza formando drenajes naturales de gran extensión.

Al norte de Yucatán se concentran amplios brotes calizos conocidos como *chaltuns* (piedra dura afilada) asentados sobre capas más blandas, pero de composición similar llamados *sahakab* (tierra blanca), en conjunto estos suelos tienen poca profundidad y son el resultado del proceso de erosión y transporte de los sedimentos marinos.

En esta zona, abundante de suelo joven y de poca profundidad, el agua de lluvia se infiltra en las fallas geológicas de la roca y la disuelve generando una gran cantidad de cavernas cubiertas de una delgada capa de roca. Finalmente, al paso del tiempo y a causa de la erosión, estas capas superficiales colapsaron y abrieron paso a los cenotes. La palabra cenote proviene del maya *dzonot* que significa profundidad o abismo y son estructuras cavernosas subterráneas capaces de albergar grandes volúmenes de agua. En dichas formaciones se almacena de manera natural el agua que ha abastecido a las poblaciones humanas por miles de años y que actualmente continúa distribuyéndose a toda la región a falta de fuentes superficiales.

Se conocen más de 3,000 cenotes en la península de Yucatán y en ellos abundan las formaciones de estalactitas, estalagmitas y pilares formados a partir del escurrimiento del agua dulce al interior de ellas.

Los cenotes, además de su función ecológica, también representan un papel importante en la cultura de los indígenas mayas. Para ellos, los cenotes eran sitios donde habitaban los dioses, por lo que allí se realizaban ritos ceremoniales y sacrificios humanos. Además, se creía que los cenotes eran las entradas al inframundo.

Fuente: (Coenraads R., 2008)



**Actividad 1.2**  
**Influencia del factor geológico en un proyecto de ingeniería**  
**Analiza la información proporcionada sobre un proyecto turístico en Quintana Roo y después realiza las actividades que se proponen.**



## 1.1 Geología y mineralogía económica

La mineralogía económica abarca el ámbito completo de la mineralogía en el estudio de la exploración y explotación de recursos minerales. Incluye la investigación y desarrollo de análogos sintéticos, biominerales y materiales industriales procedentes de la transformación de minerales, en menor o mayor grado.

La mayor parte de los minerales económicos son de origen metálico (Tabla 1.3).

Los minerales económicos no-metálicos son principalmente grafito, algunos feldespatos, cristales de cuarzo, diamantes y muchos otros cristales que se valorizan por su utilidad, belleza y/o rareza.

La minería, procesamiento y distribución de estos materiales tiene implicaciones amplias y variadas para el ambiente. La mayoría de los minerales económicamente valiosos existen en cualquier parte en pequeñas cantidades; sin embargo, desde el punto de vista económico, lo importante es encontrarlos concentrados en niveles recuperables.

### 1.1.1 Metales y recursos minerales no metálicos

La disponibilidad de metales y los métodos para extraerlos han propiciado desarrollos tecnológicos, así como poder económico y político para individuos y naciones. La humanidad depende en gran medida de la ligereza, resistencia y maleabilidad de los metales.

Los metales consumidos en gran cantidad por la industria en el mundo incluyen, en millones de toneladas anuales: hierro (740), aluminio (40), manganeso (22.4), cobre y cromo (8 cada uno), y níquel (0.7). La mayoría de estos metales es consumida en Estados Unidos, Japón y Europa, en ese orden. Los metales son producidos principalmente en América del Sur, Sudáfrica y en el territorio de lo que fuera la Unión Soviética. Es fácil darse cuenta de que estas circunstancias contribuyen al comercio global de minerales, crucial para la estabilidad económica y social de todas las naciones involucradas. De acuerdo con el informe anual 2016 de la Cámara Minera de México (Camimex), el país se mantiene como una potencia en la producción de minerales a nivel mundial, ya que de las 22 principales materias primas que se extraen del subsuelo nacional, excluyendo petróleo, en 19 se coloca entre los primeros 10 lugares a nivel mundial, destacando los cinco metales listados en la tabla 1.3.

Tabla 1.3 Principales metales en los que México destaca a nivel mundial

<b>Metal</b>	<b>Lugar en el mundo y producción en 2015</b>	<b>Algunos usos</b>
<b>Plata</b>	Mayor productor de plata a nivel mundial, con una producción de 191.5 millones de onzas en 2015, superando a naciones como China, Perú, Australia y Chile. Este nivel de producción es el mayor en la historia de la minería nacional.	Fotografía, electrónicos, joyería.
<b>Oro</b>	Octavo productor en el mundo, con una producción de 4.3 millones de onzas. China es el mayor productor de oro al concentrar el 16.1 por ciento a nivel mundial.	Medicina, aeroespacio, usos electrónicos.
<b>Cobre</b>	Está entre los 10 mayores productores, con 594 mil 451 toneladas. Los líderes son Chile, China y Perú, cuya producción concentra el 48.2 por ciento del suministro mundial.	Construcción de edificios, industria eléctrica y electrónica

<b>Zinc</b>	Sexto lugar mundial, con una de producción que superó las 780 mil toneladas, en un mercado que es dominado por China con un 36.6 por ciento de la producción nacional.	Cerca del 50 % del consumo anual es para el galvanizado del acero. Otros usos son: baterías de Zn-C usadas en la industria aeroespacial para misiles y cápsulas espaciales, y baterías zinc-aire para computadoras portátiles; piezas de fundición inyectada en la industria de automoción; metalurgia de metales preciosos y eliminación de la plata del plomo; aleaciones como latón, alpaca, cuproníquel-zinc, etc.
<b>Plomo</b>	Quinto mayor productor en el mundo, con una extracción de 263.8 millones de toneladas, en donde China es el líder con casi 40 por ciento del abastecimiento global.	Gasolina con plomo, baterías de automóvil, pinturas y municiones.

Fuente: elaboración propia con datos de la página web del periódico El Financiero (5 minerales en los que México brilla en el mundo, 2017).

Los minerales no metálicos son una clasificación amplia de recursos que abarca desde minerales de silicato (piedra preciosa, mica, talco y asbestos) hasta arena, grava, sales, caliza y suelos (tabla 1.4). La producción de arena y grava constituye el mayor volumen de todos los minerales no metálicos. La arena y grava se usa principalmente en la fabricación de tabiques y concreto, y en la construcción en general. La arena sílica de alta pureza se requiere para fabricar vidrio.

Las evaporitas (materiales depositados por evaporación de soluciones químicas) son minadas para obtener halita, yeso y potasa. Frecuentemente éstos se encuentran al 97% de pureza. La halita se usa para el ablandamiento del agua; ya refinada, es una fuente de sal de mesa. El sulfato de calcio o yeso se usa como pasta para el aplonado de muros. La potasa es una evaporita compuesta de una variedad de cloruros de potasio y sulfato de potasio. Estas sales de potasio altamente solubles se han usado por largo tiempo como fertilizantes.

Los depósitos de azufre son minados principalmente para la producción de ácido sulfúrico, debido a su uso en la industria, baterías de auto y algunos productos medicinales.

Tabla 1.4 Clasificación económica de los materiales no metálicos

<b>Grupos</b>	<b>Usos</b>
Minerales de precio bajo y volumen de producción grande.	Materiales para construcción: arena, grava, etc.
Minerales de precio mediano a alto y de volumen de producción grande.	Minerales químicos y fertilizantes: sal, azufre, potasio, etc.
Minerales de precio alto y de volumen de producción reducido.	Minerales para procesos industriales: fluorita, barita, talco, feldespato, etc.

Fuente: (Mines, 2012)

## 1.1.2 Metales y minerales estratégicos

Se considera que, de los aproximadamente 80 minerales y metales indispensables para la industria a nivel mundial, tres cuartas partes son lo suficientemente abundantes para satisfacer las necesidades o existen sustitutos, pero las fuentes de suministro son escasas para al menos 18 metales, entre ellos estaño, platino, oro, plata y plomo. En función de las necesidades humanas, una vez agotados los yacimientos de estos recursos, su desaparición es permanente al ser **no renovables**.

Entre los 80 indispensables, algunos son considerados **metales y minerales estratégicos**, debido a que son utilizados en la industria por sus particulares propiedades intrínsecas, lo cual determina que sus reservas sean muy codiciadas por los países industrializados, éstos los usan, pero no los pueden producir ellos mismos. Un mineral es también estratégico para el país productor cuando su exportación supone un gran ingreso. Los gobiernos de las naciones industrializadas ricas consideran que estos materiales son capaces de afectar su economía o poder militar si, debido a situaciones globales, económicas o políticas, se interrumpiera el suministro de dichos materiales. Por esta razón las naciones ricas industrializadas acumulan recursos estratégicos.

Se denomina **reserva mineral** a la masa de recursos identificados susceptibles de extraerse de manera rentable. Debido a que los consumidores pueden modificar su disposición a pagar y a que la tecnología de extracción continúa en desarrollo, la reserva puede variar no obstante que la masa de recursos se mantenga igual. La tabla 1.5 muestra las reservas mundiales de tres minerales.

Tabla 1.5 Producción anual y reservas mundiales estimadas de materiales (datos en 10<sup>6</sup> toneladas métricas)

Materiales	Producción mundial	Reserva mundial base	Tiempo de suministro
Mineral de hierro	620.0	160000 <sup>a</sup>	258
Cobre	13.0	650	50
Aluminio	30.1	6600 <sup>b</sup>	219
Plomo	6.0	130	22
Zinc	8.8	450	51
Estaño	0.3	11	37
Níquel	0.9	140	155
Silicio	4.5	Esencialmente ilimitado	
Potasa	25.0	17000	680
Fosfato	41.4	37000	894

Nota: Los datos de producción corresponden al 2000 y los de reservas mundiales para 2001/02)

<sup>a</sup> Las reservas mundiales base de mineral de hierro: 330000x10<sup>6</sup> t. Dos toneladas de mineral de hierro rinden aproximadamente una tonelada de hierro.

<sup>b</sup> Reserva mundial de bauxita 33000x10<sup>6</sup> t: la bauxita produce 1 t de aluminio a partir de 4 a 6 t de mineral.

Fuente: (McKinney, 1998)

Se pueden realizar diversos tipos de estimaciones acerca de cuánto tiempo durarán las reservas. Una manera de hacerlo es suponer que se mantendrá la demanda actual, que no se descubrirán nuevos yacimientos y que no habrá cambios en la tecnología de extracción, entonces se tiene:

$$t = \frac{R}{D} \tag{1.1}$$

en donde:

$t$  = tiempo transcurrido hasta el agotamiento (años)

$R$  = masa de reserva mineral (Tg)

$D$  = demanda anual (Tg/año)

O bien, se puede suponer cierto crecimiento de la demanda, pero que no se descubrirán nuevos yacimientos y que no habrá cambios en la tecnología de extracción:

$$R = D \frac{(1 + i)^n - 1}{i} \quad (1.2)$$

en donde:

$i$  = incremento anual de la demanda como fracción

$n$  = número de años para consumir la reserva

### Problema resuelto 1.1

#### Estimación de la roca de desperdicio (estéril) como resultado de una explotación

Sabiendo que durante el año 2000 la producción mundial de cobre fue de  $13 \times 10^6$  t, resolver los siguientes incisos:

- Corroborar la duración de las reservas mundiales considerando que la producción permanece constante hasta que se agote la reserva.
- Si la demanda crece a una tasa de 3% ¿Cuál será la duración de las reservas mundiales?
- Suponiendo que el mineral de donde se extrae contiene 0.5% de cobre calcular la cantidad de roca de desperdicio que generaría la explotación.

Solución

- A partir de la ecuación 1.1 se obtiene la duración de las reservas mundiales:

De la tabla 1.5, la masa de reserva mundial de cobre ( $R$ ) es de  $650 \times 10^6$  t, mientras que la demanda anual ( $D$ ) es de  $13 \times 10^6$  t/año.

Sustituyendo:

$$t = \frac{650 \times 10^6 \text{ t}}{13 \times 10^6 \frac{\text{t}}{\text{año}}} = 50 \text{ años}$$

- Duración de reservas mundiales con una tasa de crecimiento del 3%:

$$R = D \frac{(1 + i)^n - 1}{i}$$

**Problema resuelto 1.1**

Con los datos anteriores sólo hace falta despejar n, que representa el número de años para consumir la reserva.

$$n = \frac{\text{Log}\left(\frac{R * i}{D} + 1\right)}{\text{Log}(1 + i)}$$

Sustituyendo:

$$n = \frac{\text{Log}\left(\frac{(650 \times 10^6) * (0.03)}{13 \times 10^6} + 1\right)}{\text{Log}(1 + 0.03)} = 31 \text{ años}$$

c) Masa de desperdicio:

Suponiendo que el mineral de donde se extrae contiene únicamente el 0.5% de cobre entonces:

$$M_{\text{desperdicio}} = \frac{650 \times 10^6 \text{ t}}{0.005} * (0.995) = 1.2935 \times 10^{11} \text{ t}$$

**1.2 Efectos ambientales de la extracción de recursos**

Dado que la Tierra es un sistema cerrado para los materiales, el término *recursos no renovables* se refiere a materiales que han sido a tal grado transformados por su uso que no pueden emplearse otra vez por las sociedades humanas, pero que de una u otra manera están todavía presentes en nuestro planeta. Existen tres categorías principales: los que son consumidos en su uso, como el carbón, cuya estructura molecular compleja se rompe en componentes más simples; materiales recuperables, como los minerales, que son tecnológicamente recuperables después de su uso; y sustancias reciclables, como los metales y el vidrio, que pueden reusarse sin que se requiera reprocesamiento complicado.

Los recursos no renovables, en general, son productos de la litosfera que requieren un procesamiento complicado antes de usarlos; dicho procesamiento demanda energía y genera desechos. Se estima que cada año la producción de aluminio consume alrededor del 1% de los recursos energéticos mundiales, mientras que la del acero requiere más del 5% (McKinney, 1998).

El corazón de los recursos no renovables son los minerales, clasificados en combustibles (petróleo, gas natural y carbón) y no combustibles. Sólo la última categoría se tratará en este capítulo.

Los minerales son tomados de depósitos formados en una escala de tiempo geológico, totalmente diferente a la escala humana de su uso. Posiblemente 90% de la población humana depende de los minerales, no sólo por la actividad industrial, sino para su supervivencia. Un habitante de un país desarrollado puede consumir grandes cantidades de minerales durante una vida aproximada de 70 años: 460 t de arena y grava, 99 t de caliza, 39 t de acero, 1.4 t de aluminio y 1.0 t de cobre (estos datos se obtuvieron para Alemania, en los 1970s).

*El flujo de recursos*

Los minerales son recursos que ejemplifican plenamente la necesidad de entradas de capital para transformar materiales en bruto en sustancias útiles (figura 1.3). La arena y la grava son de los pocos casos de materiales naturales que pueden usarse más o menos en la forma en que se extraen. Otros minerales deben someterse a un proceso que inicia con la **minería**; después se realiza el **beneficio**, en el cual el mineral se reduce por medios mecánicos, generalmente trituración y clasificación; a continuación, se realiza el refinamiento, que consiste en remover las impurezas y mediante fundición, electrólisis o hidrometalurgia, se dotar al mineral de una forma en la que pueda comerciarse. La riqueza de la mena (contenido del metal en %, por peso) determina la cantidad de energía requerida para producir el mineral (figura 1.4). Como se observa en dicha figura, la demanda de energía se eleva desproporcionadamente al disminuir la calidad de la mena.

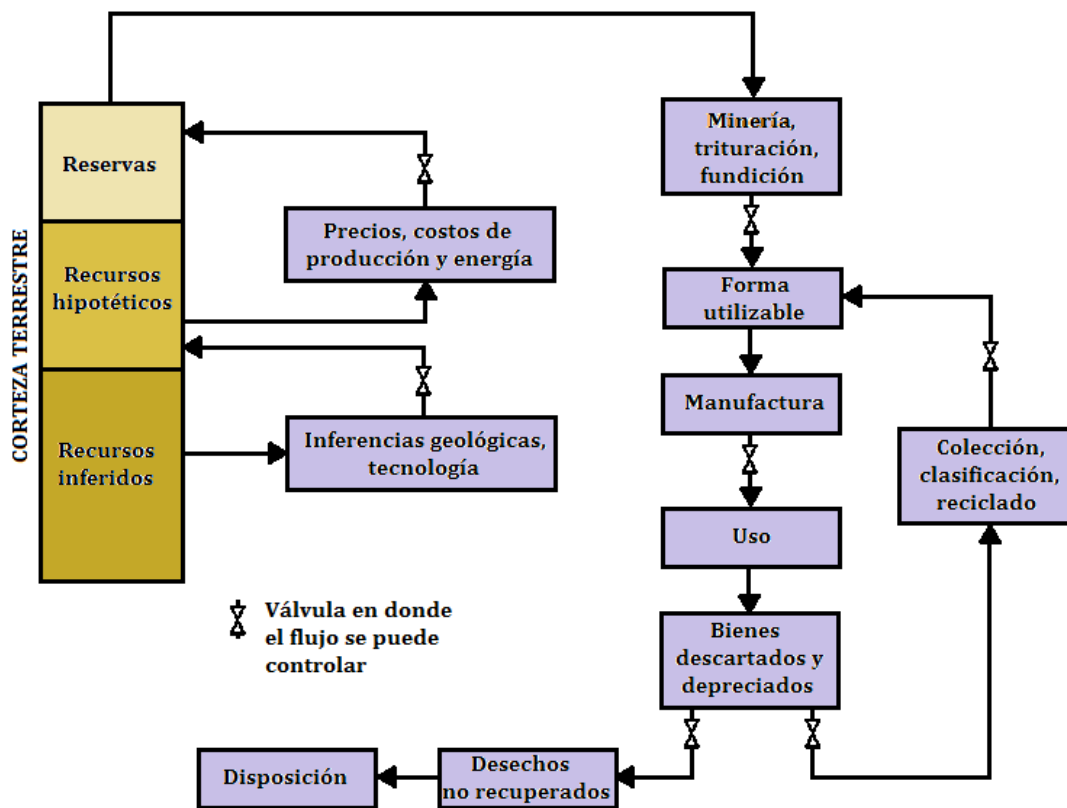


Figura 1.3 Flujo de minerales en la economía  
Fuente: (Simmons, 1991)



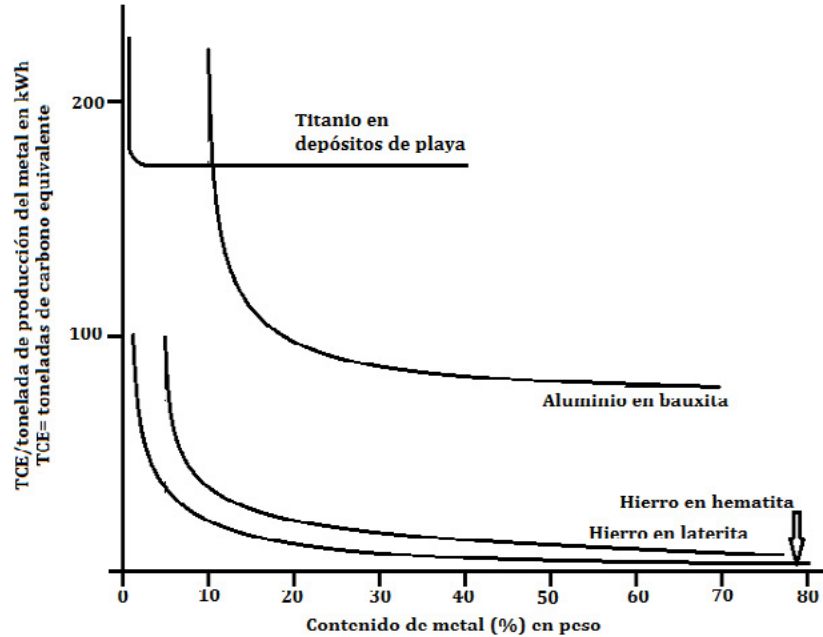


Figura 1.4 Consumo de energía en el beneficio de metales. Conforme disminuye el contenido de metal en la mena, se incrementa rápidamente el consumo de energía (como toneladas de carbón equivalente) para producir una tonelada de metal. Fuente: (Simmons, 1991)



**Actividad 1.3**  
**Flujo de minerales en la economía**  
**Analizar la Figura 1.3 y explicar el diagrama**

**1.2.1 Minería y beneficio**

Debido a los impactos ambientales que producen, los proyectos mineros requieren un control estricto con base en normas técnicas actualizadas y monitoreo constante. En México, considerando solamente las administraciones de los expresidentes Vicente Fox y Felipe Calderón, el total de hectáreas concesionadas a empresas mineras fue de 9 millones 615 mil 435.36 (Ver Recuadro 1.2), de aquí que las consecuencias de estas concesiones pueden ser desastrosas para el ambiente.

Los efectos de la minería y beneficio de minerales sobre el ambiente alrededor del mundo no deben ser menospreciados (figura 1.5). Se estima que, debido a la actividad minera, cada año se mueven 2 – 3 x10<sup>12</sup> t de roca y suelo (Simmons, 1991).

La accesibilidad del recurso y el contenido o concentración del material buscado son los principales factores de los que depende la técnica empleada para la extracción de materiales geológicos. Los estratos grandes y profundos de mineral se extraen mediante minería a cielo abierto, en la que el material suprayacente se remueve con maquinaria de movimiento de tierras. Los depósitos más profundos se alcanzan construyendo túneles, una práctica que ha sido extremadamente peligrosa para los trabajadores, por ejemplo: los túneles antiguos pueden colapsar o tener subsidencia (hundimientos); en minas de carbón existe peligro de explosión del gas natural. Los incendios no controlados producen humo y gases nocivos.

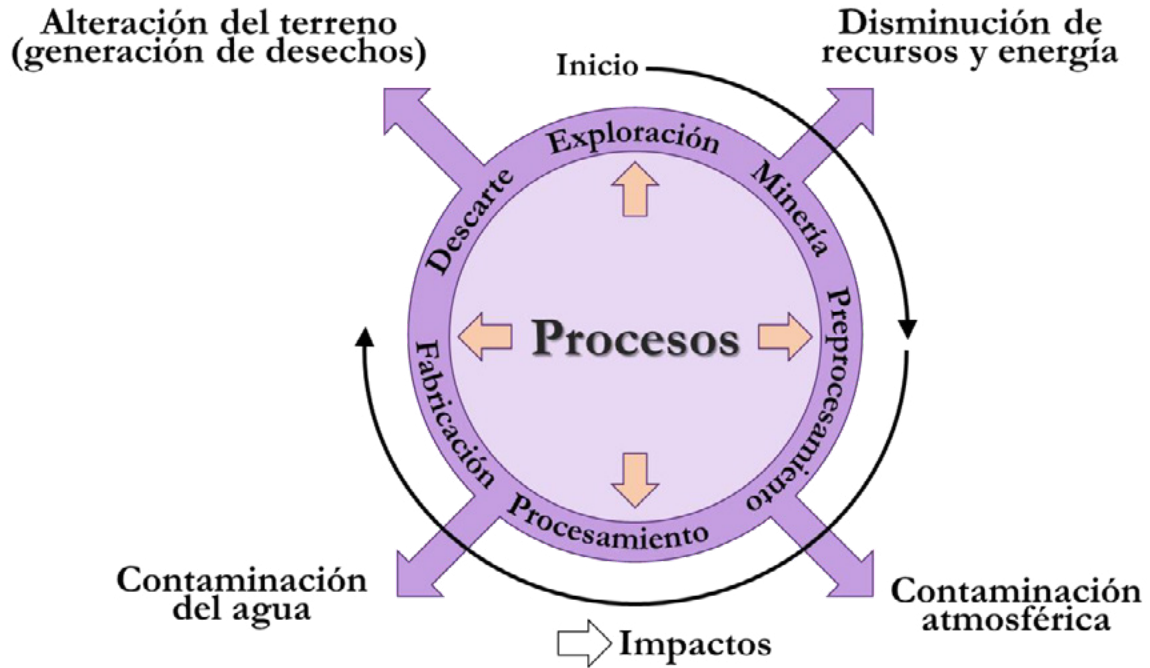


Figura 1.5 Impacto de la actividad minera y uso de minerales sobre los componentes ambientales

Para producir metales como: hierro, zinc, plomo, cobalto, oro y molibdeno, la minería requiere excavar estratos de roca con concentración baja del metal objetivo, dicho material se denomina ganga o estéril; una vez extraído el material estéril, se alcanza la roca con concentración alta de mineral, llamada mena. En las minas se remueven enormes volúmenes de material estéril de los tajos abiertos y se deposita sobre la superficie adyacente.

Los depósitos superficiales de estéril pueden ocasionar escurrimiento ácido o tóxico cuando el agua de lluvia se infiltra a través de las pilas o montones de material. Por otra parte, en los túneles ocurre infiltración de agua subterránea que disuelve metales y otros materiales tóxicos. Ya sea que se bombee esta agua para extraerla o se permita su infiltración, se contaminará el acuífero.



Figura 1.6 Trituración de la mena (izquierda) y molienda en molino de bolas (derecha). Cortesía de Compañía Minera y Beneficiadora Purísima, S de R. L., Zimapán, Hidalgo.



Figura 1.7 Circuito de flotación. En la fotografía de la derecha, el sobrenadante es el zinc que se desea obtener y se precipitan residuos minerales. Cortesía de Compañía Minera y Beneficiadora Purísima, S de R. L., Zimapán, Hidalgo.

Ya contando con la mena, ésta se tritura (figura 1.6) y se pasa al proceso de flotación para extraer el metal (figura 1.7); este proceso también produce residuos minerales, llamados jales (figura 1.8). Ambos materiales, estériles y jales, pueden contener concentraciones tóxicas de metales, aunque los jales son frecuentemente más tóxicos debido a que los metales tienden a volverse más reactivos químicamente durante el proceso de beneficio. Adicionalmente, los jales y los estériles comúnmente se vuelven ácidos, permitiendo a los metales infiltrarse en el área circundante, causando problemas severos de calidad del agua. La oxidación de la pirita (sulfuro de hierro) genera residuos sumamente ácidos. La minería del carbón también produce residuos de proceso que son formadores de ácido y pueden tener contenido alto de sodio y otras sales.



Figura 1.8 Los residuos minerales del proceso de flotación se conducen a la presa de jales, mostrada en ambas fotografías, por gravedad o mediante bomba centrífuga de lodos para su depósito y recuperación de una parte del agua que se utilizó en el proceso. Cortesía de Compañía Minera y Beneficiadora Purísima, S de R. L., Zimapán, Hidalgo.

Los ríos también pueden ser afectados por la extracción de minerales, esto sucede cuando se permite a la administración de la mina descargar materiales de desecho en corrientes o cuando el escurrimiento proveniente de montones de material estéril entra al flujo superficial. Algunos minerales pueden unirse a los sedimentos en ambientes de poca energía, como los estuarios y, debido al fenómeno de bioacumulación, causar la muerte a una amplia variedad de organismos. Si el río se desborda, entonces los metales tóxicos pueden esparcirse en el terreno (figura 1.9).

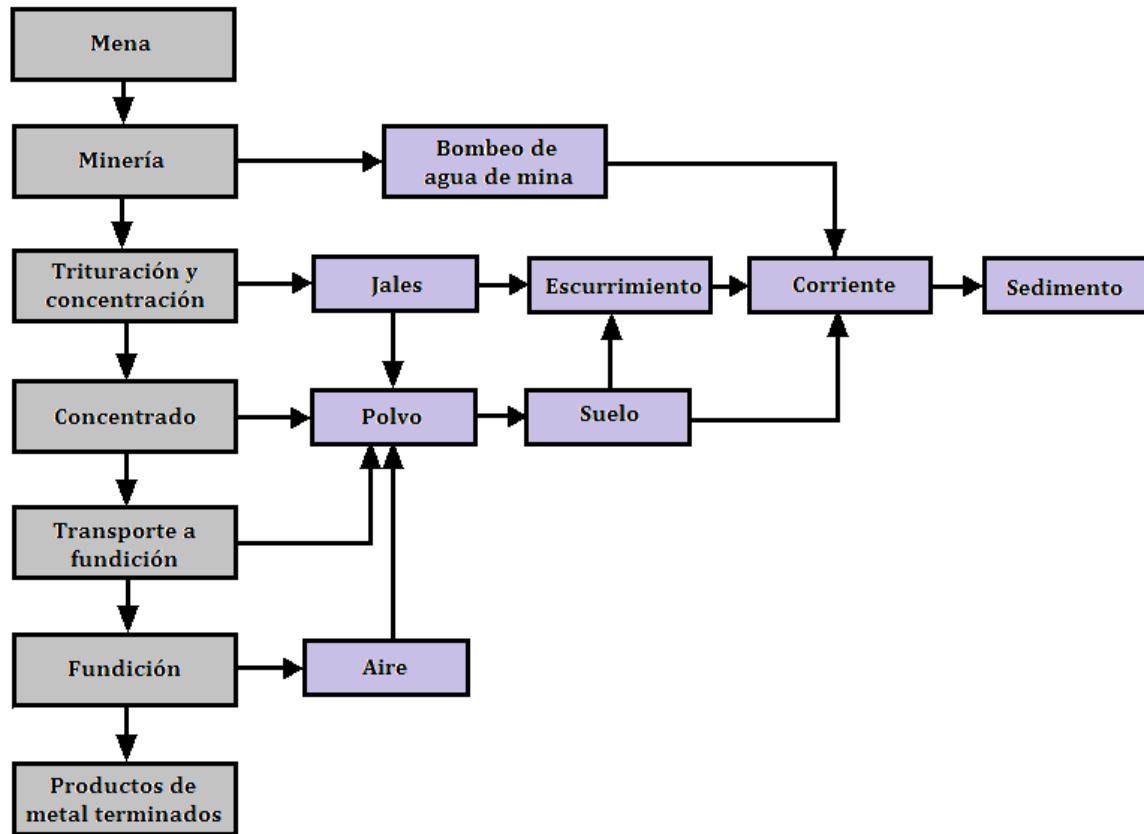


Figura 1.9 Transporte indirecto de contaminantes al ambiente acuático como resultado de las actividades mineras (Kelley, 1988).

La minería a cielo abierto implica la remoción de vegetación (desmonte), suelo (despalme) y estratos rocosos, se remueven los minerales y se reubica el material estéril. Con el material estéril se forma un bordo o cresta, llamado escombrera, debido a que es la manera más sencilla, económica y rápida de tenerlo. Las escombreras son muy susceptibles a la erosión y meteorización química. La lluvia lixivia sustancias químicas en concentraciones tóxicas y el agua rápidamente capta una pesada carga de sedimento. Uno de los principales problemas en la cuenca en donde se establece una mina es este escurrimiento que contiene sedimentos y sustancias químicas. El problema empeora debido a que el proceso para establecer vegetación en el talud es muy lento. En virtud de que las escombreras no tienen cubierta natural de suelo, ocurren muy lentamente la sucesión, la formación del suelo y el establecimiento de una comunidad natural.

El suelo se dispersa y frecuentemente queda cubierto o enterrado debido a la actividad de la maquinaria pesada. La compactación altera el flujo de aire y agua a través del suelo, restringe el crecimiento de raíces y dificulta el drenaje, haciendo que el suelo se sature sin que exista flujo.

La experiencia en E.U. ha mostrado que, de la superficie total del terreno perturbado, aproximadamente 60% se debe a la extracción del mineral, mientras que el porcentaje restante se usa para disponer los residuos y sólo 3% del terreno sufre subsidencia debido a operaciones subterráneas.



**Problema resuelto 1.2**

Calcular la cantidad de roca de desperdicio que genera la producción de 63 Tg de hierro a partir de un mineral con contenido de 63.2% del metal.

Solución

Si cada Tg de hierro corresponde al 63.2% del total del material, entonces la masa total es:

$$M_{total} = \frac{63 \text{ Tg}}{0.632} = 99.68 \text{ Tg}$$

El material de desperdicio sería el 36.8% del total del material, entonces:

$$M_{desperdicio} = 99.68 \text{ Tg} * (1 - 0.632) = 99.68 \text{ Tg} * (0.368) = 36.68 \text{ Tg}$$

Esta cantidad de roca de desperdicio no incluye la cubierta de suelo que se retira para tener acceso a la mena.

Las siguientes cantidades, correspondientes a la producción de cobre en E.U., pueden ser indicativas de la desproporción entre el beneficio económico y el deterioro ambiental, a consecuencia de la minería: la producción de  $5.5 \times 10^6$  t de concentrado de mineral de cobre significó la minería de  $245 \times 10^6$  t de mineral de cobre, lo que produjo  $240 \times 10^6$  t de jales (residuos). A su vez, producir  $1.6 \times 10^6$  t de cobre refinado generó  $2.7 \times 10^6$  t de desecho sólido en forma de escoria.



Figura 1.10 Mina de Cananea, Sonora. Foto Notimex.

En la etapa de beneficio, los metales son desprendidos de los minerales por calentamiento o tratamiento con solventes químicos. En el primer caso se requiere calor (suministrado por la quema de combustibles fósiles). Estos procesos liberan grandes cantidades de materiales tóxicos, por lo que pueden ser incluso más peligrosos al ambiente que la etapa de minería. Una fuente de contaminación atmosférica es el tostado. El tostado es un paso del proceso metalúrgico de ciertos minerales que consiste en el calentamiento de mineral de azufre a una temperatura alta en presencia de aire. Como consecuencia se producen dos tipos de residuos: material sólido residual, llamado escoria y  $\text{SO}_2$ . Por ejemplo: una fundidora grande de cobre puede emitir 7400 t/d de  $\text{SO}_2$ , si no existe tratamiento de los gases liberados a la atmósfera. Los gases se emiten desde chimeneas altas. Estas chimeneas evitan los problemas de contaminación en la vecindad inmediata de la fundición, pero la dispersan a través de un área más amplia. Debido a esta emisión, viento abajo se daña un área de vegetación equivalente a la proyección horizontal de la pluma de contaminación atmosférica, con pocos seres vivos en las áreas de mayor deposición.

Además de emitir a la atmósfera dióxido de azufre, la fundición emite metales pesados volátiles, como plomo y arsénico. Se estima que debido a esta actividad se genera 8% de las emisiones de azufre en el mundo (McKinney, 1998).

En algunos países, las emisiones de azufre se han reducido cambiando de carbón con contenido de azufre alto a bajo e instalando dispositivos de control llamados lavadores en las chimeneas. En un lavador, los gases pasan a través de lechada de roca caliza, que absorbe el azufre, antes de ser emitidos. La lixiviación en pilas es una técnica que permite separar el oro de minerales con un grado extremadamente bajo, pero tiene un alto potencial de contaminación del agua. El proceso consiste en apilar minerales triturados en grandes montones sobre los que se dispersa una solución de cianuro alcalino, el cual percola a través de la pila para disolver el oro. La solución se bombea a una planta de procesamiento donde se remueve el oro por electrólisis. El control de la contaminación del agua superficial o subterránea se efectúa instalando un grueso geotextil de arcilla y una geomembrana bajo los montones de minerales para evitar la salida de la solución venenosa de cianuro; sin embargo, es posible que existan fugas.

Una vez que todo el oro es recuperado, los operadores de la mina simplemente se marchan, dejando vastas cantidades de efluentes tóxicos en presas de jales.

En general, en las actividades de minería y beneficio de minerales, los metales se transportan al ecosistema acuático a través de muchos caminos (figura 1.9). Además, la formación de superficies de tierra (estériles y jales) con concentraciones altas de metales provoca contaminación atmosférica con partículas de muchos tamaños que se depositan. Una vez en el agua, la forma química del metal es muy importante en cuanto a su efecto en los organismos. La forma química puede variar desde iones metálicos libres hasta precipitados y obviamente causa una variedad de consecuencias, desde despreciables hasta el cubrimiento de la totalidad del lecho del río con óxidos metálicos rojos.

En los países desarrollados existe una fuerte intervención del gobierno en el procesamiento de minerales para asegurar hasta cierto punto la mitigación del impacto ambiental; sin embargo, en los

países en desarrollo la fuerza de sus gobiernos frente a la necesidad de inversión extranjera y el poder de las empresas mineras ha conducido a un manejo mediocre, en el mejor de los casos.

### **Recuadro 1.2** **Fox y Calderón cedieron casi 10 millones de hectáreas a mineras**

Los gobiernos de Vicente Fox Quesada y Felipe Calderón Hinojosa entregaron en concesión a empresas mineras nacionales y extranjeras 8 millones 336 mil 990 hectáreas en Baja California, Chiapas, Chihuahua, Guerrero, Oaxaca y Puebla.

Al número de hectáreas otorgadas por ambos presidentes en esas seis entidades del país se suman un millón 278 mil 445 cedidas en Michoacán para explotación minera en la sexta parte del territorio que ocupa este último estado.

En suma, tomando en consideración las autorizaciones otorgadas por Fox y Calderón en Baja California, Chiapas, Chihuahua, Guerrero, Michoacán, Oaxaca y Puebla, el total de hectáreas concesionadas es de 9 millones 615 mil 435.36.

Ese número se distribuyó en 4 mil 949 permisos otorgados por ambos gobiernos. La información obtenida de la Dirección de Minas de la Secretaría de Energía refiere que tan sólo en el municipio de Ensenada, Baja California –el más grande del país, con un total de 5 millones 248 mil 240 hectáreas de territorio–, Calderón y Fox cedieron a la iniciativa privada el uso de 2 millones 288 mil 887 hectáreas para explotación minera.

Felipe Calderón fue el presidente que más hectáreas de suelos nacionales ha concesionado para la explotación minera. Impulsó la ratificación del convenio entre los gobiernos de México y Canadá para evitar la doble tributación, que impide al fisco mexicano cobrar gravámenes a las empresas de aquel país que operan en suelo nacional.

En Baja California, el gobierno federal otorgó 708 permisos a empresas mexicanas y extranjeras, que sumaron un total de 2 millones 295 mil 63.8 hectáreas. A la fecha el gobierno de Enrique Peña Nieto ha concesionado, por medio de 69 convenios, 295 mil 281 hectáreas. En Chiapas se concesionaron 1 millón 78 mil 131.12 hectáreas mediante 90 permisos. La actual administración federal ha entregado 12 concesiones, que suman 54 mil 800 hectáreas.

También en Chihuahua Fox y Calderón autorizaron 2 mil 890 concesiones con la suma de 2 millones 734 mil 127 hectáreas. A la fecha, la administración federal ha otorgado 177 concesiones, con una superficie de 221 mil 661 hectáreas.

En Guerrero el área entregada en concesión por Fox y Calderón suma 1 millón 283 mil hectáreas, mediante 716 concesiones. El actual gobierno ha otorgado 28 concesiones, con la suma de 125 mil 655 hectáreas.

Por lo que hace a Oaxaca, el gobierno federal autorizó 698 mil 191 hectáreas, con 267 permisos. El gobierno de Peña Nieto ha otorgado 26 concesiones, con 47 mil 417 hectáreas. En Puebla tanto Fox como Calderón entregaron 278 permisos, con un total de 248 mil 323 hectáreas. Y el gobierno federal actual ha concesionado 34 mil 343 hectáreas en 29 convenios con empresas privadas.

Fuente: (Garduño, 2015)



#### Actividad 1.4

##### Cerro de San Pedro, San Luis Potosí

Después de ver el audiovisual *Cerro de San Pedro* realizar las actividades propuestas.



#### Actividad 1.5

##### Efectos ambientales de la extracción de minerales en el municipio de Zimapán, Hidalgo.

Ver el audiovisual *Impacto ambiental de la actividad minera en Zimapán, Hidalgo*, y realizar las actividades propuestas.

### 1.2.2 Normas oficiales mexicanas relativas a protección ambiental como parte de las actividades mineras

La normatividad aplicable en México para que las empresas mineras manejen sus residuos de forma ambientalmente adecuada está sustentada en las normas oficiales mexicanas que a continuación se mencionan:

- NOM-052-SEMARNAT-2005, Que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos.
- NOM-141-SEMARNAT-2003, Que establece el procedimiento para caracterizar los jales, así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y postoperación de presas de jales.
- NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio.
- NOM-155-SEMARNAT-2007, Que establece los requisitos de protección ambiental para los sistemas de lixiviación de minerales de oro y plata.
- NOM-157-SEMARNAT-2009, Que establece los elementos y procedimientos para instrumentar planes de manejo de residuos mineros.

Asimismo, el muestreo y el análisis en laboratorio para caracterización de suelos y otros materiales están sustentados en las normas mexicanas que a continuación se mencionan:

- NMX-AA-132-SCFI-2006, que lleva por título “Muestreo de suelos para la identificación y la cuantificación de metales y metaloides, y manejo de la muestra”.



- NMX-B-021-1982. Determinación de las formas de azufre en el carbón. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. Norma mexicana. Dirección General de Normas.
- NMX-B-400-1970. Método de análisis químico para la determinación gravimétrica de azufre en minerales de hierro. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. Norma mexicana. Dirección General de Normas.
- EPA. 1986. Method 9038 Sulfate (Turbidimetric), Environmental Protection Agency. Washington, DC. EEUU.

El principal peligro en el almacenamiento de los residuos mineros es la generación de drenaje ácido, lo que provoca la liberación de sustancias potencialmente tóxicas. Al ser liberadas estas sustancias, pueden afectar la calidad del suelo, agua, aire y a la biosfera.

El Drenaje Ácido de Minas (DAM) es un término usado para designar al escurrimiento provocado por la oxidación de los sulfuros metálicos que contienen los residuos de la minería, por lo que proviene de las presas de jales y actividades mineras, debido a la exposición al ambiente, es decir, por la presencia de agua y aire.

En virtud de lo anterior, es indispensable llevar a cabo revisiones periódicas que permitan advertir la posible movilidad de estos contaminantes, por lo que se requiere contar con programas de manejo y protección del agua y suelo en todo el proceso de la minería.

En México existen normas específicas para los residuos de la actividad minera. Así, el procedimiento para la estimación de drenaje ácido está considerado en la norma oficial mexicana NOM-141-SEMARNAT-2003, que establece el procedimiento para caracterizar los jales e indica cómo determinar si los jales son generadores de ácido mediante dos pruebas una estática y una cinética.

La prueba estática es de tipo predictivo del potencial para la producción de DAM de los jales, en el futuro. Los resultados de las pruebas estáticas permiten estimar el balance entre los minerales potencialmente generadores de ácido y aquellos potencialmente consumidores de ácido en una muestra. Dicha prueba se realiza por el método de Prueba Modificada de Balance Ácido Base, que a su vez se apoya en Normas Mexicanas establecidas en la NOM-141-SEMARNAT-2003.

El procedimiento inicia con determinación del Potencial de Neutralización (PN), seguido del potencial de acidez (PA), este último establecido en normas mexicanas. El potencial de acidez inicia con la determinación de azufre total, el cual se establece en la norma mexicana NMX-B-400-1970, continúa con el procedimiento para la extracción de los sulfatos establecido en la norma mexicana NMX-B-021-1982, el siguiente procedimiento es realizar la cuantificación de sulfatos por el método turbidimétrico EPA-9038. Por último, se realiza el balance de potencial de acidez y potencial de neutralización (PN/PA), si el cociente es tal que:  $1 > \text{PN/PA} \leq 3$ , el generador de los residuos mineros podrá optar por realizar la prueba cinética de laboratorio sobre intemperización de materiales sólidos.

Las pruebas cinéticas consisten en someter a intemperismo acelerado a las muestras, bajo condiciones controladas de laboratorio, dicho procedimiento está considerado en la NOM-157-SEMARNAT-

2009, que en su anexo normativo 2 describe el método estándar de prueba para la intemperización acelerada de materiales sólidos utilizando una celda húmeda modificada. Este método de prueba es realizado con diferentes muestras obtenidas de distintos puntos del almacenamiento de los residuos mineros y a diferentes profundidades, cada muestra se coloca en una celda cilíndrica. Este procedimiento de prueba requiere de ciclos semanales compuestos de tres días de aire seco (menos de 10% de humedad relativa) y tres días de aire saturado de agua (aproximadamente 95% de humedad relativa) bombeado a través de la muestra, seguido de una lixiviación con agua en el séptimo día con una duración mínima de 20 semanas. Al final de dicho procedimiento se analiza y evalúa la posible generación de drenaje ácido.

### **1.3 Conservación de recursos geológicos**

Los métodos de conservación de recursos son: reducción del consumo, sustitución del material y reciclaje. A continuación, se describe en qué consisten dichos métodos.

#### **Reducción del consumo**

Se considera que la reducción del consumo puede alcanzarse en la medida que las naciones que ya cuentan con infraestructura reduzcan sus necesidades de materias primas. Por otra parte, las economías de las naciones industrializadas están reorientándose hacia bienes y servicios de consumo de alta tecnología que requieren menos materias primas.

Se puede también reducir la cantidad de material de desperdicio al aumentar la eficacia de los procesos administrativos. Esta acción beneficia la economía de producción y reduce el consumo de materias primas.

Otra estrategia es reducir el tamaño del producto. Por ejemplo, una bomba para agua de menor tamaño que otra, puede suministrar el mismo gasto y altura, pero utiliza menor cantidad de recursos minerales.

#### **Sustitución del material**

Desde hace algunas décadas, la fabricación de tuberías de material plástico ha motivado que disminuya el consumo de tuberías de cobre y acero; la tecnología de fibra óptica y la comunicación satelital mejoró el servicio y redujo la demanda de cable telefónico de cobre; es decir, el mundo se está moviendo hacia el empleo de otros materiales.

En la producción de automóviles, el acero se está reemplazando con polímeros, que son moléculas orgánicas de cadena larga, similares a los plásticos, así como aluminio, cerámicos y nuevas aleaciones de alta tecnología.

En resumen, la sustitución del material como forma de atenuar la demanda de recursos minerales consiste en reemplazar un material con otro más durable y que realice la misma función con mayor eficacia.

## Reciclaje

Los residuos de algunos productos se están aprovechando actualmente, especialmente los que contienen metales escasos o valiosos; un ejemplo de estos metales es el aluminio. El aluminio se extrae de la bauxita por medio de electrólisis, un proceso que requiere energía intensiva. En contraste, el reciclaje de aluminio consume un veintavo de la energía requerida para producir aluminio nuevo. El requerimiento de energía para la producción de otros materiales se muestra en la tabla 1.6.

Tabla 1.6 Comparación de la energía requerida para producir varios materiales

Materiales	Requerimientos de energía (MJ/kg)	
	Producción a partir de minerales	Producción a partir de material reciclado
Vidrio	25	25
Acero	50	26
Plásticos	162	No disponible
Aluminio	250	8
Titanio	400	No disponible
Cobre	60	7
Papel	24	15

Fuente: (Hayes, 1997)

De acuerdo con estudios del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat), en México se consumen diariamente 15 millones 400 mil latas de aluminio, que representan una masa de 240 t, lo que anualmente representa 10 mil 348.8 millones de latas, con una masa de 80 mil 640 t. Un kilo de aluminio equivale a 65 latas, las cuales son pagadas según el valor del *commodity* en los mercados internacionales, entre los 18 y 15 pesos actualmente. En México se separa y recolecta más de 97 por ciento de las latas de aluminio que se usan en bebidas, alimentos y otros productos, sin embargo, el bajo desarrollo tecnológico en reciclaje provoca que más de 50 por ciento se exporte a Estados Unidos, donde las transforman en artículos diversos.

## 1.4 Peligro geológico

El planeta Tierra es dinámico y está sujeto a constantes modificaciones. Cuando los procesos normales de la Tierra, como: terremotos, volcanes, inundaciones y movimientos de masa, ocurren en la proximidad de poblaciones humanas, sus consecuencias están entre las peores y más temidas. Los humanos han observado y registrado estos peligros desde la antigüedad tratando de comprenderlos y aprender a evitarlos.

Cuando se utilizan terrenos en laderas con pendiente fuerte e inestable para la construcción de carreteras, explotación forestal, agricultura y construcción de casas, se incrementa la frecuencia y los daños provocados por los deslizamientos de tierra. En algunos casos las personas desconocen el peligro al que se exponen al asentarse sobre o debajo de laderas inestables. En otros casos simplemente se niegan a reconocer el peligro claro y obvio.

En este capítulo se analiza un caso de estudio hipotético sobre cómo las características geológicas del sitio de un proyecto deben ser consideradas en la planeación para proteger a la población.

Supóngase que se planea un nuevo asentamiento humano en el cual se reubicará a la población de varios pueblos y rancherías afectadas por la construcción de la cortina y el embalse de una presa.

### Antecedentes del sitio del proyecto

En la figura 1.11 se muestra una representación del sitio del proyecto de reubicación de la población, que incluye valles, montañas, colinas y tierras con alta productividad agrícola. En el sitio existe un pequeño poblado en el que operan algunos comercios, bodegas y oficinas, así como una escuela y una iglesia. El modesto desarrollo descrito se debe a que los productos agrícolas que se cultivan en la zona de estudio son de exportación.

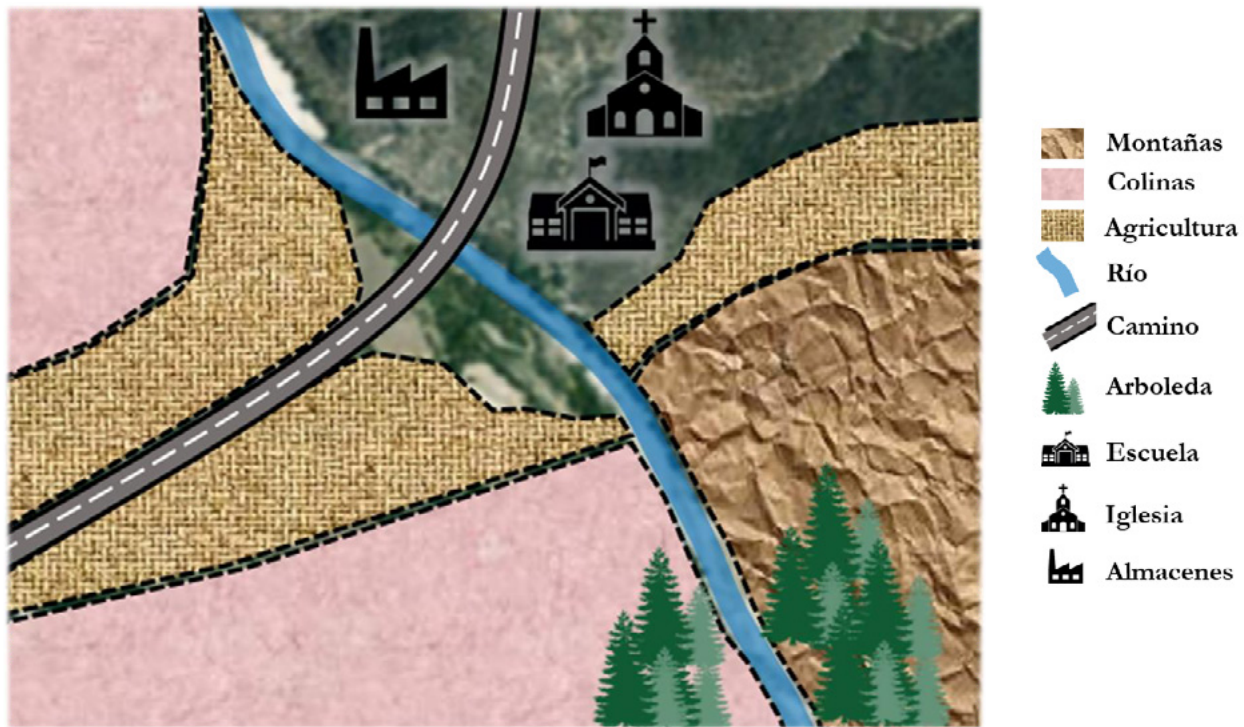


Figura 1.11 Representación gráfica del área de estudio para el proyecto (supuesto) de reubicación de varios poblados.

### Descripción del proyecto de reubicación

En la figura 1.12 se muestra el plan inicial (alternativa 1) en el cual se propone ubicar el área comercial a lo largo de la calle principal, así como el palacio municipal, escuelas, clínicas, etc., debido al buen acceso que representa la vía más importante. El área de colinas y montaña estará restringida a un área habitacional de baja densidad, por las dificultades que impone la topografía. Una parte del área de montaña será espacio abierto.

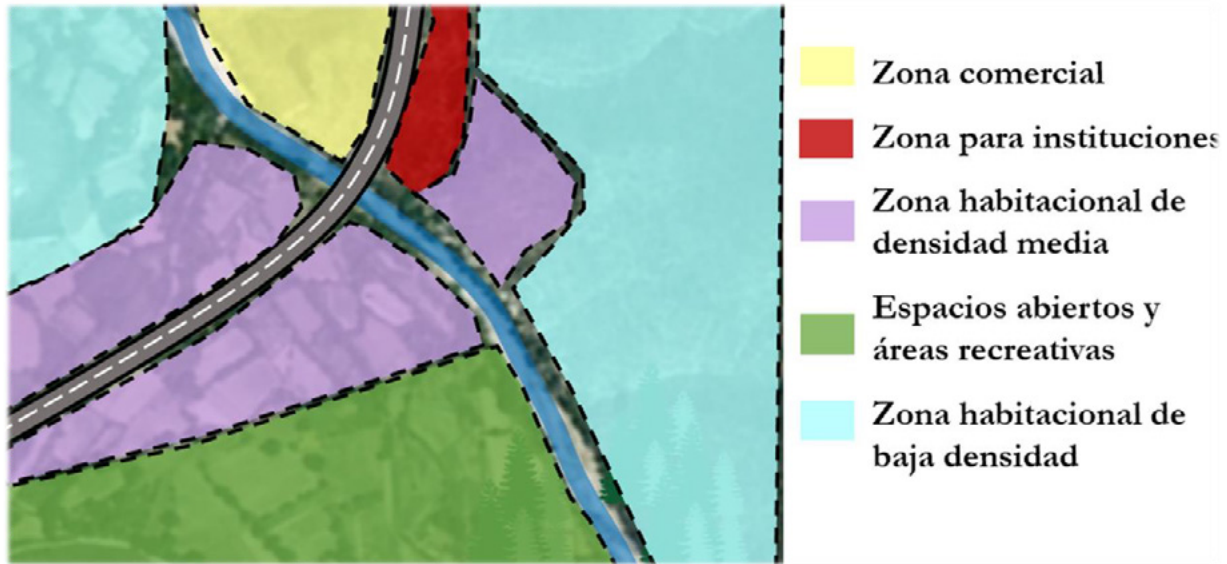


Figura 1.12 Alternativa 1 del proyecto (supuesto) de reubicación.

### Estudio sobre peligros geológicos en el sitio del proyecto

La gravedad constantemente jala hacia abajo los materiales en cualquier lugar de la Tierra, ocasionando diversos fenómenos conocidos en conjunto como **movimientos de masa**, que consisten en el movimiento pendiente abajo de los materiales geológicos. El movimiento puede ser lento y sutil o muy obvio y peligroso. El término **deslizamiento de tierra** se usa para referirse en general a los movimientos rápidos pendiente abajo de suelo y roca.

Debido a que en la zona de estudio han ocurrido en varias ocasiones deslizamientos de tierra, se realizó un estudio sobre los peligros geológicos de la zona.

En la figura 1.13 se representan los rasgos geológicos del sitio del proyecto. Se observó una falla que cruza el área de estudio y se ramifica en la parte norte. Evidencias geológicas suponen que la falla ha estado activa en un pasado reciente.

Se comprobó que una superficie importante de los valles es propensa a inundaciones. Por otra parte, en la zona de montaña se han detectado deslizamientos de tierra, algunos de los cuales son tan profundos que impiden la estabilización del terreno y en otros casos resultaría costoso.

Se encontraron suelos expansivos, que se contraen cuando secos y se expanden húmedos; estos suelos tendrían que removerse o emplear cimentaciones especiales antes de construir.



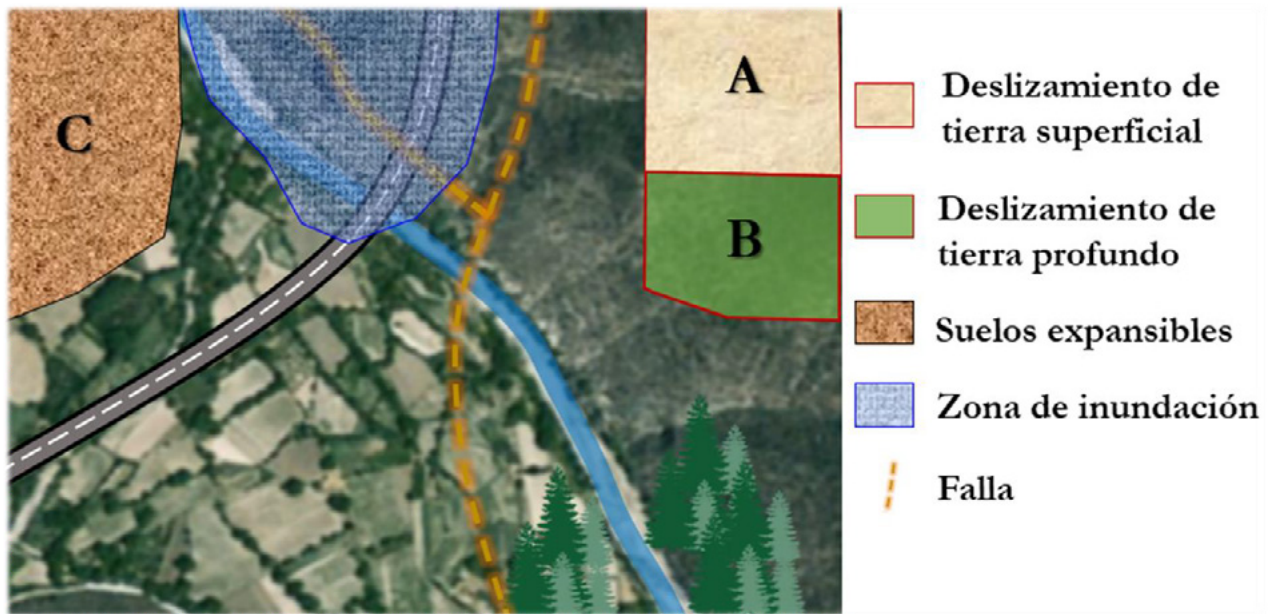


Figura 1.13 Resultados del estudio de peligro geológico en el sitio del proyecto

### Modificación del proyecto (alternativa 2)

De acuerdo con los resultados del estudio geológico, la alternativa 1 del proyecto expondría a la población a peligros para la vida. La figura 1.14 muestra una nueva alternativa que considera la falla activa, las inundaciones y los deslizamientos de tierra. Las áreas susceptibles de deslizamientos y los suelos expansibles se han localizado a un lado de las áreas comerciales e institucionales, estas áreas se ubicaron en terrenos con pendiente suave y sin peligro.

No obstante que el ejemplo analizado es hipotético, existen situaciones similares que involucran peligro geológico en muchos lugares. La etapa de planeación de los proyectos debe incluir el análisis minucioso para evitar errores que sean causantes no sólo de pérdidas económicas, sino de vidas humanas. Es pertinente mencionar que los impactos ambientales relacionados con la geología tienen un carácter irreversible.

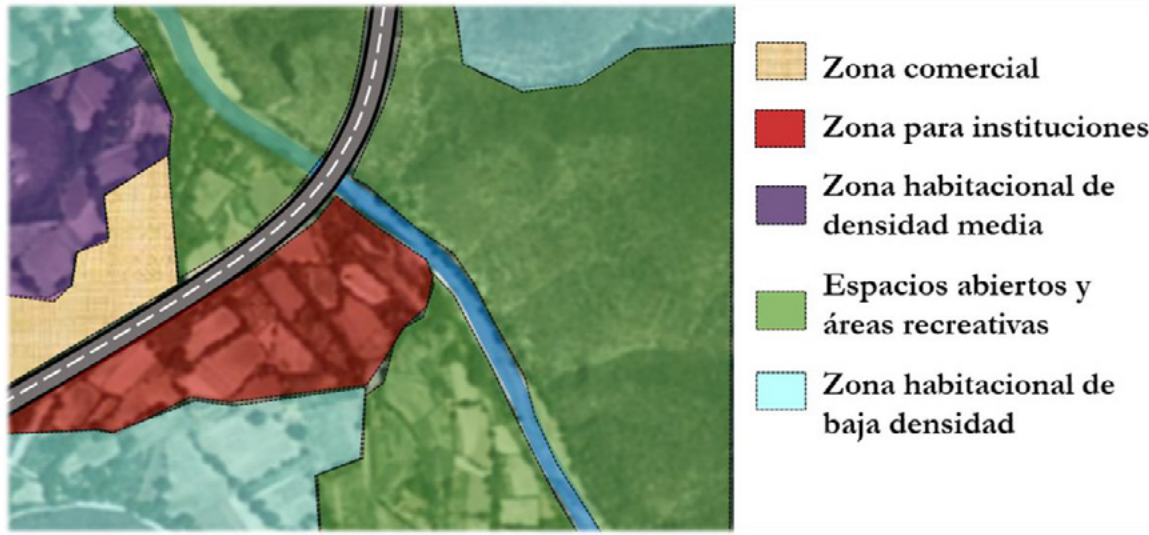


Figura 1.14 Alternativa 2 del proyecto, que toma en cuenta el peligro geológico en el sitio.

## 1.5 Características generales de los suelos

El suelo es el medio para el crecimiento de las plantas, el factor principal que controla el destino del agua en los ecosistemas terrestres, el sistema de reciclaje de la naturaleza en el que los residuos vegetales y animales se descomponen y se transforman en sus elementos básicos, y es el hábitat de una diversa vida animal, desde pequeños mamíferos a las innumerables formas de vida microbiana. El suelo es uno de los factores ambientales más afectados por las actividades humanas; en México sólo 17% del territorio es plano y por lo tanto con vocación para la actividad agrícola, esto hace que el problema de manejo de suelos sea complicado, tanto para su aprovechamiento como para su conservación.

### 1.5.1 Concepto de suelo y proceso de formación

El suelo es un sistema vivo debido a la interacción entre los elementos bióticos y abióticos del ecosistema. Se puede definir como la parte exterior de la corteza terrestre en donde las rocas se han desintegrado por efecto de la meteorización, formando una cubierta en la que vive una microbiota, una flora y una fauna microbianas que, actuando en conjunto, transforman la materia mineral en alimento de las plantas, para que puedan ser utilizadas posteriormente por los animales y los seres humanos (Doran, 1996). Las rocas expuestas se han desmenuzado formándose una capa de detritos no consolidados llamada **regolito** que cubre las rocas duras aún sin erosionar. Lo que forma el suelo es esta superficie de contacto entre las rocas y el aire, el agua y los organismos vivos que caracterizan el ambiente superficial (Doran, 1996).

Cada suelo tiene un ciclo de vida en términos del tiempo geológico; la formación de suelos plenamente desarrollados puede requerir entre 2 000 y 20 000 años. En promedio el suelo tarda en formarse de 100 a 400 años por centímetro de cubierta fértil, a través de la interacción del clima, la topografía, organismos (plantas, animales y el hombre) y minerales (Doran, 1996). La naturaleza evolutiva y

dinámica del suelo está relacionada con sus propiedades físicas y químicas, debidas al efecto del clima y los seres vivos, los cuales actúan sobre el material de origen (la roca) condicionados por el relieve (pendiente) a través del tiempo. En virtud de lo anterior, el principal proceso de formación de suelo es la meteorización de las rocas y los minerales, que son los cambios que éstos sufren cerca de la superficie de la tierra debidos a la influencia de la atmósfera, del agua de las plantas y de la vida animal. Existen dos tipos de meteorización: mecánica y química. La **meteorización mecánica** rompe las rocas y minerales en partículas más pequeñas; se produce debido a que la superficie de las rocas se desmenuza cuando está expuesta a la acción combinada del agua, el viento y la temperatura. El agua entra en las grietas (diaclasas), se congela, se expande y rompe la roca. Las partículas transportadas por el viento, como polvo y arena desgastan la superficie de la roca. Al crecer, las raíces de los árboles también resquebrajan las rocas. La **meteorización química** ocurre cuando las partículas modifican su composición de forma apreciable, a causa de la presencia del agua, el oxígeno y los ácidos que se producen como resultado de las actividades de los organismos del suelo y la adición permanente de materia orgánica, es decir, los tejidos muertos de plantas y animales. Al caer la lluvia se filtra en la materia orgánica y en el suelo mineral (lixiviación), lo que origina una cadena de reacciones químicas que transforma la composición de las rocas y minerales originales.

En síntesis, la formación del suelo inicia cuando la roca se desmenuza debido a la destrucción puramente mecánica; después comienzan a actuar las reacciones químicas y procesos biológicos, que producen cambios en los componentes originales de las rocas, especialmente en el grupo de los silicatos y de la materia orgánica, formándose nuevos compuestos, entre ellos la arcilla y el humus, ambos materiales son de la mayor importancia en los suelos.

### **1.5.2 Composición y propiedades físicas y químicas**

Al transcurrir el tiempo, a partir de la roca madre se producen transformaciones a consecuencia de la acumulación de materia orgánica en la superficie y el movimiento descendente de material. Como consecuencia, se forman capas horizontales, u **horizontes**, que presentan diferentes características físicas, químicas y biológicas. Se llama **perfil de suelo** a la secuencia de capas horizontales que se observa al hacer un corte vertical en el suelo (figura 1.15).



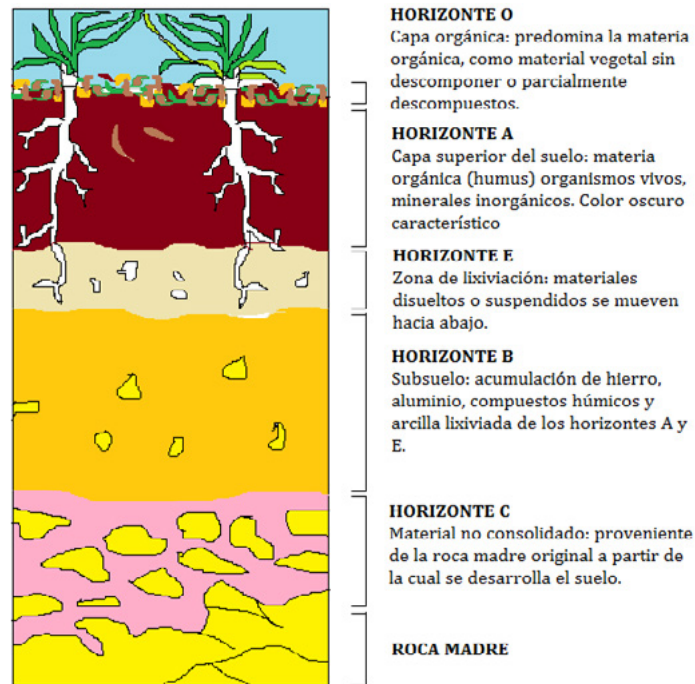


Figura 1.15 Perfil de suelo que muestra los posibles horizontes. El número, composición y espesor de estos estratos varía en los diferentes tipos de suelo.

La capa superficial es el horizonte O, constituido por materia orgánica fresca y o parcialmente descompuesta, acumulada principalmente bajo condiciones aerobias. Tiene un contenido mínimo de materia orgánica de 30% si la fracción mineral contiene más del 50% de arcilla, o 20% de materia orgánica si la fracción mineral no tiene arcilla. Para contenidos intermedios de arcilla, el contenido de materia orgánica es proporcional.

Debajo de la capa orgánica se encuentra el horizonte A, formado o en formación, constituido por una acumulación de materia orgánica humificada, finamente asociada con la fracción mineral; tiene un contenido de materia orgánica menor del 30% si la fracción mineral contiene más del 50% de arcilla, o menor del 20% de materia orgánica si la fracción mineral no tiene arcilla. Al igual que en el horizonte O, para contenidos intermedios de arcilla, el contenido de materia orgánica es proporcional.

El descenso de agua por el horizonte A transporta minerales y partículas de suelo más finas, como la arcilla, a las partes inferiores del perfil, lo que forma un horizonte E, donde la eluviación<sup>1</sup> de minerales es máxima. Se caracteriza por un color pálido y una acumulación relativa de cuarzo y/u otros minerales resistentes, del tamaño de la arena o el limo.

<sup>1</sup> Eluviación, del latín *ex*, hacia afuera, y *lavere*, lavar.

Debajo del horizonte A (o E si está presente) se encuentra el horizonte B, también llamado subsuelo, en el cual la estructura de la roca está destruida o apenas se aprecia. Se caracteriza por presentar acumulación de partículas minerales como la arcilla y las sales debido a la lixiviación de la capa superior del suelo. Este proceso se nombra *iluviación*<sup>2</sup>. En este horizonte es difícil que las plantas puedan extender sus raíces. Los horizontes B difieren por su color, la estructura y el tipo de material acumulado a consecuencia de la lixiviación de los horizontes superiores.

El horizonte C es el material no consolidado, compuesto del material original del que se desarrolla el suelo.

Los suelos presentan propiedades físicas y químicas que los caracterizan. A continuación, se mencionan las que se consideran más representativas.

### **Profundidad efectiva**

En general, la profundidad efectiva del suelo abarca los horizontes A y B. Varía de acuerdo con la pendiente, la meteorización, la roca madre y la vegetación. En los terrenos planos a pie de una pendiente y en los llanos aluviales, el suelo tiende a ser profundo; en contraste, en pendientes empinadas el lecho de roca está cerca de la superficie.

### **Textura**

La textura es la proporción de partículas de suelo de diferentes tamaños; se clasifican en arena, limo y arcilla.

La arena es la fracción de suelo en la que domina la sílice. Casi no tiene adherencia y casi no retiene agua, por lo que la infiltración y el drenaje son rápidos. Los suelos dominados por la arena son pobres debido a su bajo contenido de nutrientes necesarios para las plantas, así como a su retención de humedad baja. Se pueden mejorar sus condiciones agregando materia orgánica en cantidades adecuadas.

En la fracción de limo se presentan la sílice y los feldespatos de manera abundante. Tienen mayor capacidad para retener agua y minerales que la arena, por lo que los suelos limosos tienen buenas características agrícolas.

La arcilla controla las propiedades más importantes de los suelos, incluyendo la capacidad de retención de agua y el intercambio iónico entre las partículas y la solución del suelo. La arcilla es el producto resultante de la meteorización y está formada por compuestos secundarios de minerales producto del desmenuzamiento de las rocas; se les conoce con el nombre genérico de coloides y son menores a 0.002 milímetros. Las propiedades características de las arcillas son cohesión, adherencia y plasticidad.

---

<sup>2</sup> *Iluviación*, del latín *il*, hacia adentro, y *lavere*, lavar.

La textura del suelo es el porcentaje (por peso) de arena, limo y arcilla. Por lo tanto, para clasificar a los suelos según la textura, primero se define mediante un análisis la proporción de arena, limo y arcilla. El siguiente paso es emplear el triángulo de texturas (figura 1.16).

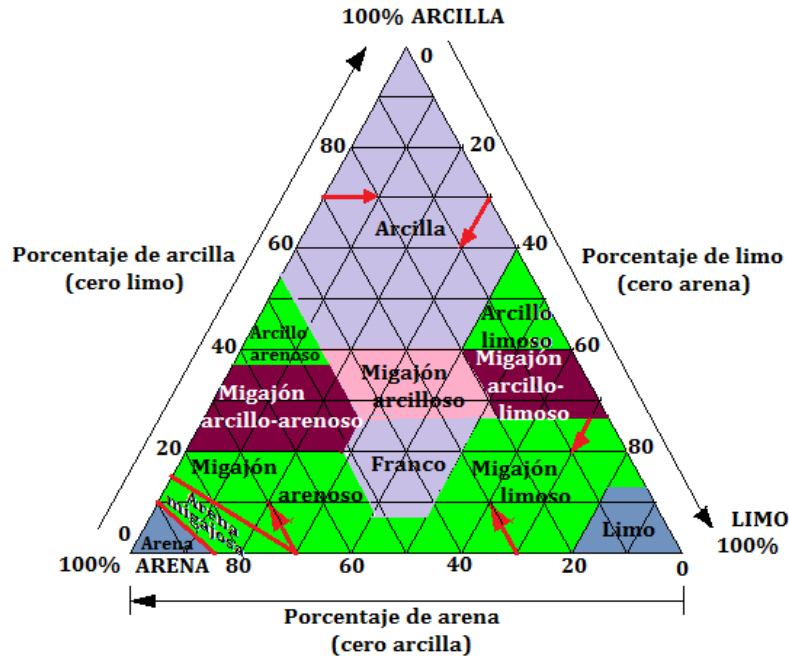


Figura 1.16 Diagrama triangular de clasificación de un suelo del Departamento de Agricultura de E.U. La textura del suelo está determinada por sus porcentajes de partículas de arcilla, limo y arena. Los suelos con la mejor textura para la mayoría de los cultivos son francos, ya que tienen suficientes partículas grandes (arena) para drenar, suficientes partículas muy pequeñas (limo y arcilla) para retener el agua y nutrientes minerales disueltos.

### Problema resuelto 1.3 Empleo del triángulo de texturas

Determinar la textura de un suelo que ha dado como resultado los siguientes valores: masa de la muestra, 300 g; arena, 150 g; limo, 82 g; y arcilla 68 gramos.

#### Solución

1. Determinar los porcentajes de arena, limo y arcilla

$$\text{Porcentaje de arena} = \frac{150g}{300g} 100 = 50$$

$$\text{Porcentaje de limo} = \frac{82g}{300g} 100 = 27.33$$

$$\text{Porcentaje de arcilla} = \frac{68g}{300g} 100 = 22.67$$

2. En la figura P1.3 se trazaron las líneas correspondientes a cada porcentaje y convergen en un punto que está en la textura migajón arcillo-arenoso.

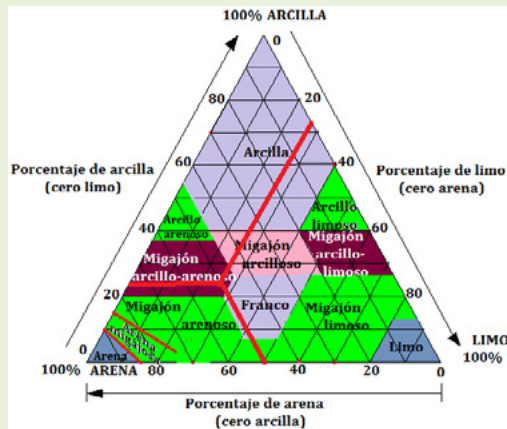


Figura P1.3

### Recuadro 1.3 Principales texturas de suelo

Con relación al triángulo de texturas (figura 1.16):

1. **Arena.** Esta textura incluye aquellos suelos que contienen entre 85 y 100% de arena y una cantidad variable de limo y arcilla que en conjunto no excede 15%. En esta textura los granos de arena se aprecian a simple vista, son ásperos al tacto, no presentan ninguna cohesión, ni tampoco son adherentes o plásticos. Su capacidad de retención de agua es mínima, así como su contenido de nutrientes. Por lo tanto, los suelos arenosos, en general son poco productivos.
2. **Arena migajosa.** Se caracteriza por contener una proporción un poco mayor de limo y arcilla que puede llegar en conjunto a 30% (15% de arcilla máximo). Cuando se humedecen estos suelos forman agregados al comprimirlos, los cuales se desbaratan a la menor presión que se les aplique. Su capacidad de retención del agua y su contenido de elementos fertilizantes son mejores que en el caso de las arenas.
3. **Migajón arenoso.** Esta textura incluye todos los suelos cuyo contenido de arena varía entre 50 y 70%, y en los cuales la proporción máxima de limo y arcilla es de 50% (20% de arcilla como máximo). Los suelos de migajón arenoso presentan cierta tendencia a formar agregados cuando se secan, y en ellos comienzan a manifestarse las propiedades de adherencia y plasticidad, aunque en forma incipiente. Todos los suelos arenosos son muy permeables, tanto al agua como al aire, debido a que las partículas individuales dejan espacios vacíos de considerable tamaño entre sí.
4. **Franco.** El suelo de textura franco presenta características que lo colocan en un punto intermedio entre los suelos arenosos y los arcillosos, por lo que se le considera ideal para la agricultura. En estos suelos, la proporción de arena varía entre 25 y 50%, limo entre 30 y 50% y arcilla entre 5 y 25%, aproximadamente. Estos suelos tienen una capacidad de retención de agua mayor, y su riqueza en elementos nutritivos es buena, bajo condiciones adecuadas de cultivo son de productividad elevada.
5. **Migajón limoso.** Es un suelo en el que dominan las características del limo en el cual el contenido de arena varía entre 10 y 50%, la arcilla entre cero y 20% y la de limo desde 50 hasta 90%. Estos suelos son de buena calidad agrícola y tienen una riqueza natural de nutrientes apreciable. Sus propiedades de cohesión, adherencia y plasticidad son también apreciables. La capacidad de retención de agua en estos suelos es buena.
6. **Limo.** Son aquellos en los que la proporción de esta partícula es absolutamente dominante, alcanzando valores que están en el ámbito de 90 a 100%. La cantidad de arena varía entre cero y 20% y la arcilla entre cero y 10%. Estos suelos presentan por regla general buenas condiciones agrícolas, aunque el movimiento del agua y del aire puede ser lento.
7. **Migajón arcillo arenoso.** Estos suelos tienen un contenido de arena que varía entre 45 y 80%, arcilla entre 20 y 35%, la proporción de limo puede variar entre cero y 28% aproximadamente. Dentro del grupo de los migajones arcillosos, éste es el más ligero desde el punto de vista agrícola.

Fuente: Adaptado de (Dirección General de Usos del Agua y Prevención de la Contaminación, 1982)

### Recuadro 1.3 Principales texturas del suelo (Continuación)

8. Migajón arcilloso. La proporción de arena se encuentra entre 20 y 45%, la de arcilla entre 28 y 40% y la de limo entre 15 y 55%, aproximadamente. En este suelo dominan las características de la arcilla, por lo que es más pesado desde el punto de vista agrícola.
9. Migajón arcillo limoso. En estos suelos la proporción de arena puede variar entre cero y 20%, la de limo entre 60 y 72%, y la de arcilla entre 28 y 40%. Las características físicas de estos suelos son muy semejantes a las del migajón arcilloso, aunque la menor proporción de arena puede hacer que los primeros presenten algunas dificultades con respecto a su manejo. En el grupo de los migajones arcillosos, todas las propiedades agrícolas, tanto desde el punto de vista físico como químico, están dominadas por la arcilla. La arena y el limo modifican estas propiedades al permitir una mayor o menor alteración, un movimiento más o menos rápido del agua; la formación de agregados más o menos grandes, etc. La capacidad de retención para el agua es elevada en estos suelos, y su riqueza en elementos nutritivos es también alta. Bajo condiciones de manejo adecuadas, son de productividad alta.
10. Arcilla arenosa. En los suelos de esta textura, todas las características están dominadas por la alta proporción de arcilla que contienen, la cual varía entre 35 y 55%. La proporción de arena, que atenúa las condiciones físicas originadas por la abundancia de arcilla, varía entre 40 y 70%, el limo tiene una proporción que varía entre cero y 20%.
11. Arcilla limosa. Los suelos de esta textura contienen una proporción muy abundante de arcilla que varía entre 40 y 60%, la arena entre cero y 20% y la limo entre 40 y 60%. En este suelo las características físicas y químicas están dominadas por la arcilla; el limo y la arena que contienen modifican favorablemente algunas de las condiciones físicas poco deseables en los suelos que contienen proporciones elevadas de arcilla.
12. Arcilla. Los suelos de textura arcillosa contienen proporciones de arcilla superiores al 40%. Estos suelos presentan generalmente características físicas indeseables desde el punto de vista agrícola, pues cuando se secan tienden a formar terrones grandes y duros debido al fenómeno de cohesión; se agrietan demasiado debido a la contracción de las arcillas. Cuando se humedecen se vuelven asimismo muy adherentes, lo que dificulta las labores agrícolas y los espacios entre las partículas se reducen considerablemente por la expansión de las arcillas, lo que ocasiona que el movimiento del agua y el aire sea lento. Estas condiciones son indeseables desde el punto de vista agrícola. El contenido de elementos nutritivos en estos suelos es generalmente bueno.

Fuente: Adaptado de (Dirección General de Usos del Agua y Prevención de la Contaminación, 1982)

### Color del suelo

El color puede utilizarse para relacionar propiedades químicas y físicas; por ejemplo: contenido de materia orgánica, condición de drenaje y aireación. Además, del color de los horizontes se deduce información acerca de las condiciones relacionadas con su formación y las fuerzas activas durante la formación del suelo. El color del suelo es un auxiliar para su clasificación.

Los minerales presentes en grandes cantidades en la mayoría de los suelos son de color claro, por ello, si los suelos estuvieran compuestos de minerales disgregados que hubieran sufrido poco cambio químico, serían de color gris claro. En contraste, si se presentan cambios químicos en los minerales

(principalmente hierro) y la adición de materia orgánica, se observarán colores gris oscuro, café, rojo y amarillo.

La materia orgánica muy descompuesta (humus) que contiene un suelo le confiere color gris, gris oscuro o café oscuro, a menos que otros constituyentes tales como el óxido de hierro y la acumulación de sales modifique el color.

En los suelos con drenaje deficiente se acumula materia orgánica en las capas superficiales, con color muy oscuro, mientras que las capas inferiores, que contienen muy poca materia orgánica, son de color gris claro. Si el drenaje es intermedio, el color del subsuelo comúnmente tiene manchas amarillas (moteado).

La actividad química es favorecida por buenas condiciones de drenaje; en dichos casos el hierro de los minerales se oxida e hidrata formando compuestos de color rojo y amarillo.

Los óxidos de hierro fuertemente hidratados son de color amarillo, pero al reducirse la hidratación se convierten en rojos. Son los colores característicos de las regiones de climas cálidos húmedos y semihúmedos. En estas regiones el bajo contenido de materia orgánica permite que se aprecien los colores brillantes (rojos y amarillos) de los óxidos de hierro; en aquellos suelos en los que el contenido de materia orgánica es mayor, los colores rojos se oscurecen dando un color parecido a la caoba.

### **Materia orgánica**

Es el conjunto de componentes orgánicos del suelo más o menos descompuestos, que proceden comúnmente de residuos vegetales y animales; constituye la fracción orgánica del suelo. Incluye los residuos de plantas y animales en diversos estados de descomposición, células y tejidos de los organismos del suelo y las sustancias sintetizadas por la población viva del propio suelo.

El ciclo del carbono (ver Tomo I, Capítulo 4, Ingeniería y principios de ecología) es el proceso de descomposición de la materia orgánica, en el que intervienen diferentes factores, tales como: microorganismos, compuestos orgánicos, temperatura y textura principalmente.

La materia orgánica así transformada debe ser renovada continuamente. Los productos finales de esa transformación pueden agruparse de la siguiente manera: a) energía absorbida por los microorganismos o liberada en forma de calor; b) productos finales simples ( $\text{CO}_2$ , Mg, K y los llamados microelementos); y c) humus.

La conservación de la materia orgánica es necesaria en la práctica, no solamente porque influye en el estado físico y químico del suelo y por su aportación de elementos nutritivos, sino también porque aporta energía al terreno.

La presencia de la materia orgánica en el suelo es indispensable para el mantenimiento de la actividad bioquímica, pues sin esta última el suelo no constituiría un soporte adecuado ni proporcionaría los elementos necesarios para el desarrollo de los microorganismos y plantas.

El humus puede definirse como una mezcla completa de sustancias amorfas al estado coloidal de color café, café oscuro o negro, bastante resistente a la descomposición, que se forma por síntesis debido a la acción de los diferentes organismos del suelo sobre la materia orgánica.

La plasticidad y la cohesión son muy bajas en el humus, propiedades muy importantes en la práctica de la agricultura, pues la presencia del humus en los suelos muy arcillosos corrige las características estructurales deficientes debidas a la proporción elevada de la arcilla. Un aumento pequeño de materia orgánica tiene una influencia física mucho mayor de la que podría esperarse de acuerdo con la cantidad agregada, la cual se debe al proceso de granulación cuya importancia en lo que concierne a la aereación y drenaje del suelo son fundamentales.

La relación del nitrógeno al carbono de la materia orgánica que se agrega al suelo, así como el humus, es muy importante para la actividad agrícola, debido a que el carbono proporciona la mayor parte de la energía necesaria para el desarrollo de los procesos vitales del suelo. El nitrógeno tiene valor como nutriente limitante. Es pues común que en la materia orgánica y en el humus se analicen principalmente estos dos elementos.

## pH

Una de las propiedades más fáciles de determinar es la reacción del suelo o pH, que es la capacidad de variación que tiene un suelo en su equilibrio dinámico. Al respecto, los suelos se clasifican en los siguientes grupos: ácidos, alcalinos y neutros.

Normalmente los suelos tienen pH de entre 4 y 10; si son ácidos la solución del suelo contiene más iones hidrógeno ( $H^+$ ) que oxhidrilos ( $OH^-$ ), mientras que si son alcalinos sucede lo contrario. En general, en las regiones húmedas los suelos son ácidos y en las regiones áridas son alcalinos.

Algunos organismos tienen poca tolerancia a las variaciones en el pH, pero otros toleran variaciones amplias. Quizá el efecto más importante del pH en el crecimiento de las plantas es en la asimilación de nutrientes. Las mejores condiciones de pH son entre 6 y 7, en este intervalo los nutrientes son más aprovechables y la disponibilidad del fósforo es máxima. A estos suelos se les llama neutros.

Cuando el pH desciende o asciende, la gama de cultivos disminuye debido a que suelen presentarse condiciones particulares que limitan el cultivo de algunas plantas. Es por ello que para la actividad agrícola los suelos neutros son los mejores.

Por otra parte, es pertinente mencionar el caso de los suelos salinos y sódicos, que en forma natural tienen poca humedad, condición característica de la mayoría de los suelos en México, por lo que existe tendencia a la alcalinidad. Lo mismo sucede con los suelos pesados o arcillosos de la zona agrícola del Bajío. En estos casos se recomienda aplicar técnicas de conservación de las condiciones naturales y de recuperación de dichas condiciones mediante prácticas de rehabilitación, como es el cultivo de alfalfa, remolacha azucarera, etcétera.



### 1.5.3 Sistema de clasificación

La clasificación de los suelos sirve para identificarlos y decidir sobre la mejor alternativa para aprovecharlos, que puede ser en los usos: agrícola, pecuario, forestal, silvícola, urbano, industrial, etcétera.

El muestreo de un suelo hace posible conocerlo superficial e internamente con el propósito de identificarlo. Dicha actividad consiste en excavar un pozo edafológico rectangular, de 2 m de largo, 1 m de ancho y 1.20 m de profundidad, o hasta encontrar roca dura. En caso de ser un suelo somero, el pozo puede ser de dimensiones menores. Una vez excavado el pozo, se analiza considerando dos aspectos: 1) condiciones superficiales del área donde se encuentra; y 2) perfil del suelo. En el primer aspecto se incluye información como: geoforma, material parental, pendiente, pedregosidad, drenaje externo, erosión, vegetación o tipo de cultivo; en el segundo, se identifican los horizontes, especificando: profundidad, color, textura, porosidad, gravas, piedras, fisuras, presencia de arcilla, etcétera.

Al terminar la descripción del perfil se toma una muestra de cada uno de los horizontes identificados. Las muestras deben ser de 2 kg y se toman de arriba hacia abajo cuidando que los terrones desprendidos de las capas superiores no se mezclen con las capas inferiores. Una vez terminada la toma de muestras e identificadas, se envían al laboratorio para conocer sus características físicas y químicas, tales como: color, textura, pH, contenido de materia orgánica, nitrógeno total y en general los minerales que sirven como nutrientes, así como el contenido de sales y sodio.

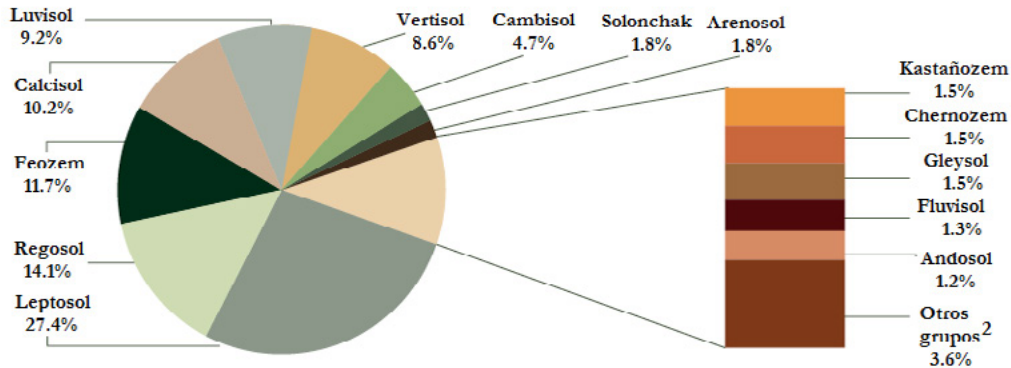
En México se han derivado 25 de las 28 unidades de suelos reconocidas por la FAO/UNESCO/ISRIC en 1988

Tabla 1.7 Unidades de suelos presentes en México reconocidas por la FAO/UNESCO/ISRIC

Unidad de suelos	Porcentaje del territorio nacional
Leptosol	27.4
Regosol	14.1
Feozem	11.7
Calcisol	10.2
Luvisol	9.2
Vertisol	8.6
Cambisol	4.7
Solonchak	1.8
Arenosol	1.8
Kastañozem	1.5
Chernozem	1.5
Gleysol	1.5
Fluvisol	1.3
Andosol	1.2
Otros	3.6

Fuente: (Semarnat, Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales Edición 2015, 2016)

El territorio nacional está dominado por seis unidades: Leptosoles (27.4% del territorio), Regosoles (14.1%), Feozems (11.7%), Calcisoles (10.2%), Luvisoles (9.2%) y Vertisoles (8.6%) que, en conjunto, cubren el 80.7% de la superficie del país (figura 1.17). Las restantes 19 unidades minoritarias cubren una superficie aproximada de 36 millones de hectáreas (Figura 1.18). Esta riqueza edáfica se puede explicar por las múltiples combinaciones de los factores que forman el suelo y que se presentan en el territorio nacional.



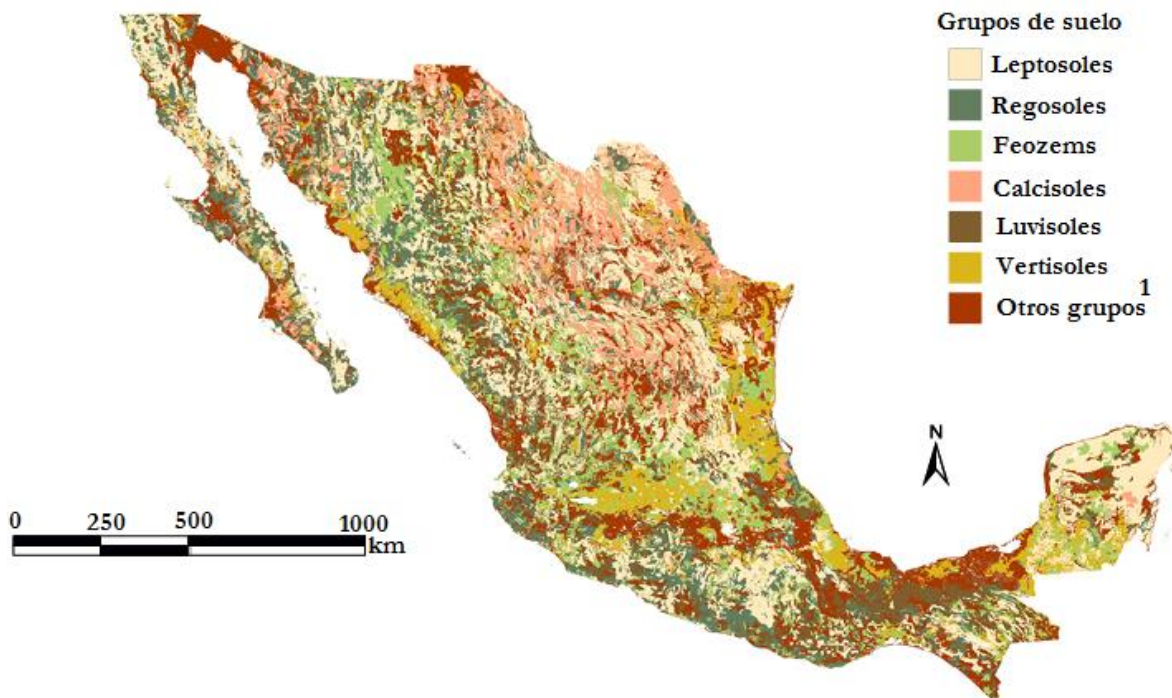
Notas:

<sup>1</sup> Los porcentajes pueden no sumar 100% debido al redondeo de las cifras.

<sup>2</sup> Incluye: Acrisol, Alisol, Durisol, Gypsisol, Histosol, Lixisol, Nitisol, Planosol, Plintisol, Solonetz y Umbrisol.

Figura 1.17 Distribución de las principales unidades de suelos en porcentaje de la superficie del territorio nacional.

Fuente: (Semarnat, Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales Edición 2015, 2016)



Nota: <sup>1</sup> Incluye Acrisol, Alisol, Andosol, Arenosol, Cambisol, Chernozem, Durisol, Fluvisol, Gleysol, Gypsisol, Histosol, Kastañozem, Lixisol, Nitisol, Planosol, Plintisol, Solonetz, Solonchak y Umbrisol.

Figura 1.18 Principales grupos de suelo en México. Fuente: (INEGI, 2007)

Las características de las principales unidades de suelo son las siguientes:

**Leptosoles.** De escasa profundidad (menor a 25 cm). Una proporción importante se clasifica como leptosoles líticos (profundidad de 10 cm o menos). Los leptosoles réndzicos se desarrollan sobre rocas calizas y son muy ricos en materia orgánica. En algunos casos son excelentes para la producción agrícola, en otros pueden resultar muy poco útiles ya que su escasa profundidad los vuelve muy áridos y el calcio que contienen puede llegar a inmovilizar los nutrientes minerales. Se pueden encontrar leptosoles en la S.M. Oriental, S.M. Occidental, S.M. del Sur y Desierto Chihuahuense. En las montañas, las pendientes y la consecuente erosión imponen una restricción a la formación del suelo, mientras que, en los desiertos, la escasez de agua ocasiona una formación lenta del suelo. En la península de Yucatán, un territorio que emergió del fondo oceánico en fecha relativamente reciente, sus suelos no han tenido tiempo suficiente para desarrollarse.

**Regosoles.** Suelos muy jóvenes, son el resultado del depósito reciente de roca y arena acarreadas por el agua; se encuentran en sierras, acumulados por los ríos que descienden cargados de sedimentos. Tienen dos variantes: regosoles éutricos y calcáricos, recubiertos por una capa conocida como ócrica que se vuelve dura y costrosa al ser retirada la vegetación, impidiendo la penetración de agua, factor adverso para las plantas. La poca cubierta vegetal y la dificultad de penetración del agua favorece la escorrentía y con ello la erosión. Las extensiones más vastas de estos suelos en el país se localizan cercanas a la Sierra Madre Occidental y del Sur.

**Calcisoles.** Presentan una capa dura de caliche a menos de un metro de profundidad, una gran cantidad de calcio y, a menudo, una capa ócrica, características que los convierten en suelos secos e infértiles. Los calcisoles se desarrollan bajo climas áridos, por lo que se les encuentra fundamentalmente en el Desierto Chihuahuense.

**Feozems.** Son muy fértiles y aptos para el cultivo, si bien son sumamente proclives a la erosión. Con frecuencia son suelos profundos y ricos en materia orgánica. Se desarrollan sobre todo en climas templados y húmedos. Se encuentran recubriendo el Eje Neovolcánico Transversal y porciones de la Sierra Madre Occidental.

**Vertisoles.** Sumamente arcillosos, se desarrollan en climas de subhúmedos a secos. Son profundos, muy duros cuando están secos y lodosos al mojarse (debido a su alto contenido de arcillas). Es difícil trabajarlos. No se consideran suelos fértiles, pero con prácticas tecnológicas adecuadas e insumos mantienen cultivos con alta productividad. Algunas de las zonas consideradas “graneros”, como el Bajío o Sinaloa, cuentan con grandes extensiones de vertisoles.

Para más información sobre las unidades de suelo existentes en México se recomienda visitar la página web de CONABIO, a través de la siguiente liga:

[http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=gis\\_root/edafo/tsuelo/eda251mgw](http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=gis_root/edafo/tsuelo/eda251mgw)



### **Actividad 1.6**

**Alteración de los suelos a causa de un proyecto de ingeniería**

**Analizar la información de un proyecto turístico en Quintana Roo que se proporciona, y después realizar las actividades propuestas.**

## 1.6 Degradación de los suelos

El suelo forma parte del capital estratégico natural de cualquier país. Sostiene a muchas de las economías agrícolas del mundo; no obstante, se encuentra bajo una creciente presión de deterioro a causa del crecimiento poblacional y de los patrones insostenibles de producción y consumo globales. Como sucede con el agua, los bosques e incluso los yacimientos minerales, el suelo es un recurso finito. Sin embargo, en virtud de que no es un bien directamente consumible y debido a la percepción errónea de que es un recurso renovable en la escala de tiempo humana, no se le considera aún en las políticas públicas como un recurso patrimonial ni ambiental de primer orden, lo que ha dado lugar a su degradación.

En todo el mundo están presentes los procesos de la degradación del suelo, con diferentes consecuencias en la sociedad. La degradación de los suelos es preocupante debido a la pérdida y deterioro de la calidad de los servicios ambientales que se obtienen de él, destacando la producción de alimentos y la captación de agua. Pero el problema va más allá de las afectaciones al suelo, por ejemplo, al transformar zonas con coberturas forestales o de otros ecosistemas naturales a campos de cultivo, se daña a la biodiversidad y se pierde carbono orgánico del suelo; por ende, se emiten gases de efecto invernadero a la atmósfera.

La degradación de los suelos consiste en la disminución de su capacidad actual o futura para sostener ecosistemas naturales o manejados. En la figura 1.19 se presentan los principales procesos de degradación de los suelos en el mundo. El deterioro puede ocurrir en varias formas, sin que exista necesariamente remoción física de las partículas minerales del suelo, de esta manera, se tienen los siguientes procesos: degradación química, degradación física y erosión.

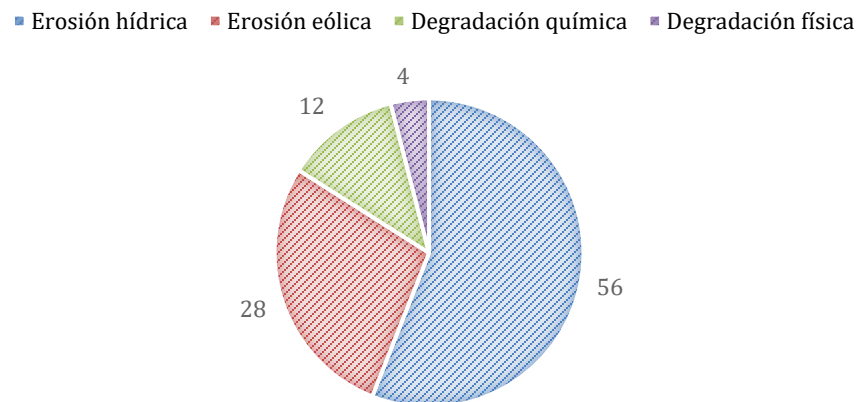


Figura 1.19 Distribución porcentual de los principales procesos de degradación de suelos en el mundo en función del área afectada, 1994. Fuente: (Semarnat, Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales Edición 2002, 2003)

En la figura 1.20 se muestran las principales causas de degradación de suelos en el mundo, y en la figura 1.21 se muestran los principales procesos de degradación de suelos en México en porcentaje de superficie del territorio, al año 2002.

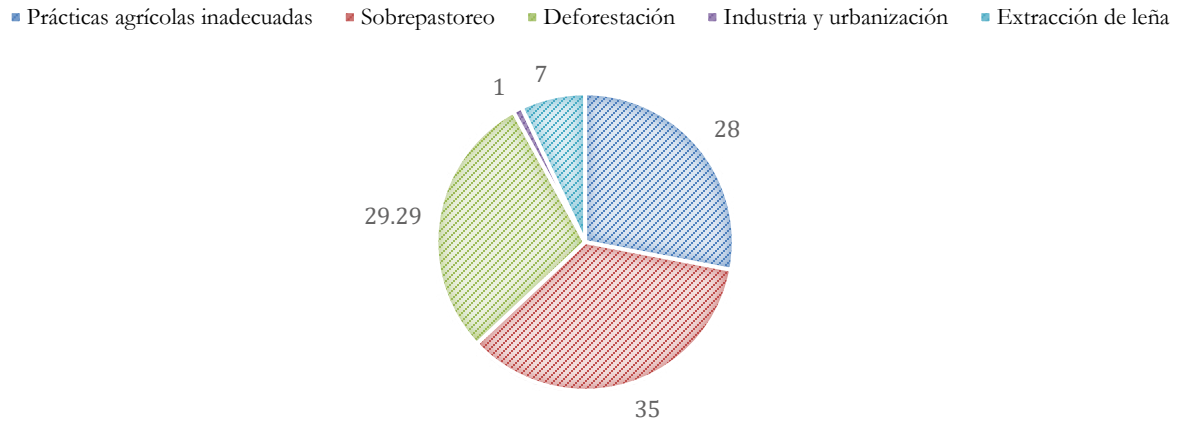


Figura 1.20 Principales causas de degradación de suelos en el mundo en función del área afectada, 1994. Fuente: (Semarnat, Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales Edición 2002, 2003)

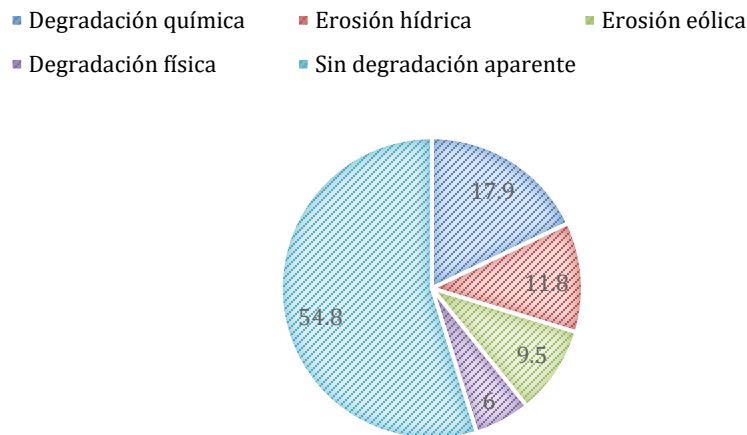


Figura 1.21 Principales procesos de degradación de suelos en México, en porcentaje de superficie del territorio al año 2002. Fuente: (Semarnat, Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales Edición 2015, 2016)

La degradación química del suelo es la reducción de su fertilidad por pérdida de nutrientes; se asocia a la intensificación de la agricultura. Como ejemplo de la ocurrencia de este tipo de degradación en México, se puede mencionar la Península de Yucatán y amplias zonas de Sinaloa y Tabasco. Otros casos de degradación química son la contaminación y la salinización.

La degradación física es la pérdida de la capacidad del sustrato para absorber y almacenar agua debido a: compactación, endurecimiento (encostramiento) y recubrimiento a causa de la urbanización.

En este libro se considera a la erosión como un proceso de pérdida progresiva de la capacidad original que tienen los suelos para ser el soporte de la vida silvestre, así como para su aprovechamiento en agricultura, ganadería y silvicultura.

La erosión se define, entonces, como la pérdida progresiva del suelo debida a la acción física y química del viento y de agentes biológicos. Existen dos clases de erosión: natural o geológica e inducida o acelerada. La primera se debe solamente a las fuerzas de la naturaleza, mientras que la segunda es el impacto acumulado de la primera más el resultado de la acción humana. La erosión inducida es consecuencia del manejo incorrecto del suelo y ocurre relativamente con mayor rapidez que la geológica.

A continuación, se enumeran los efectos de la erosión, algunos se resienten en lugares distantes al lugar donde se presentan:

- 1) Adelgazamiento gradual y pérdida paulatina de la fertilidad del suelo; esto se debe al desgaste del material que lo forma.
- 2) Endurecimiento del suelo y aparición de roca en la superficie. Dichas rocas y grava se encontraban en capas profundas.
- 3) Formación de grietas. El agua escurre por grietas que se van transformando en cárcavas profundas como parte del proceso de erosión.
- 4) Disminución de la productividad agrícola o del potencial del suelo para regenerar su vegetación natural original. Lo mismo sucede con la velocidad de regeneración de pastos para agostadero.
- 5) Compactación del suelo. Con este efecto la vegetación desaparece, el agua no se infiltra a capas más profundas y escurre por la superficie, lo que intensifica la erosión.
- 6) Disminución de la recarga de agua subterránea. Es una consecuencia del efecto anterior al no poder infiltrarse el agua; esto puede causar, a su vez, que los manantiales permanentes desaparezcan y que el caudal de los ríos se reduzca o incluso se sequen en época de estiaje.
- 7) Desertización gradual del terreno erosionado. Este efecto puede ocurrir sobre todo en zonas semiáridas, debido a la pérdida de capacidad de retención de agua por el suelo y a la desaparición de corrientes permanentes.
- 8) Aumento de la turbiedad del agua. Los sedimentos que transportan las corrientes en cuencas que sufren erosión acelerada, incrementan la turbiedad del agua, lo que afecta a la biota de los ríos. Desaparecen las plantas acuáticas por falta de luz y los peces característicos de aguas claras son desplazados por especies adaptadas a las aguas turbias. Algunas malezas acuáticas pueden verse favorecidas por el incremento en la cantidad de nutrientes acarreados por el agua.
- 9) Depósito de sedimentos. En las zonas de baja velocidad de la corriente, los sedimentos se depositan formando bancos que dificultan la navegación y aumentan la posibilidad de inundaciones en época de lluvias.
- 10) Azolvamiento de lagos. Los sedimentos acarreados por los ríos llegan a lagos o embalses de presas, disminuyendo su vida útil.
- 11) Contaminación atmosférica. En los terrenos desnudos, durante el estiaje, el viento produce contaminación atmosférica por partículas suspendidas, que pueden afectar a los habitantes de localidades próximas.



- 12) Pobreza y movimientos migratorios. Se trata de un efecto social; la disminución de la productividad de la tierra y de los cuerpos de agua causa pobreza y emigración a zonas que se verán, a su vez, afectadas por el mismo proceso. La población puede dirigirse a las ciudades y contribuir a aumentar los problemas del crecimiento demográfico explosivo.

La supervivencia de la humanidad depende del suelo fértil y su formación ha tomado mucho tiempo. Actualmente, uno de los procesos más graves es su destrucción acelerada, que ya ha causado hambrunas, miseria, desempleo, emigraciones masivas y otros males.

### **1.6.1 Principales procesos erosivos**

Los principales agentes erosivos son el agua, viento, cambios de temperatura y biológicos. La energía producida por el agua al precipitarse sobre la tierra y al escurrir sobre la superficie del suelo es el agente más importante.

Cuanto mayor sea la pendiente del terreno, su susceptibilidad a los agentes erosivos se incrementa. No obstante, los terrenos muy inclinados mantienen suelo suficiente para que se desarrollen comunidades naturales; sólo fenómenos orográficos y climáticos extremos han propiciado que el proceso de erosión prevalezca sobre el de formación de suelo, originando paisajes rocosos y acantilados.

Existe un equilibrio entre las fuerzas que intervienen en los procesos de formación de suelo y de erosión; en muchos sitios dicho equilibrio ha sido alterado, debido a la eliminación de la cubierta vegetal natural para destinar los terrenos a la agricultura o al pastoreo. Como consecuencia, el agua acarrea el suelo con mayor intensidad en los terrenos con pendiente, o es arrastrado por el viento en las planicies.

El viento, un agente físico, contribuye a la erosión y formación de los suelos al propiciar el desprendimiento, transporte, depósito y mezcla del suelo. Por sí mismo, el viento no erosiona las rocas, sino que las partículas de suelo que transporta provocan su abrasión y desgaste.

Las variaciones entre la temperatura del día y de la noche afectan la superficie de las rocas, provocando cuarteaduras superficiales y la exfoliación (descostramiento) de las mismas (granitos en zonas tropicales). En cambio, las variaciones de temperatura entre estaciones (verano e invierno) tienen mayor impacto en la masa de las rocas. Ambos tipos de cambios debidos a la temperatura se manifiestan después de largo tiempo.

La vegetación natural ha sido el factor regulador del proceso erosivo, pues la cubierta vegetal actúa como retenedora del suelo e impide que su acarreo a otro lugar ocurra a mayor velocidad que el tiempo que toma la formación de un nuevo suelo en el sitio. Como agente erosivo, el factor biológico puede ser directo o indirecto; el primero es una consecuencia del pisoteo sobre las rocas o el suelo para disgregarlo y hacerlo transportable por el agua y el viento. El factor biológico indirecto se debe a la ingesta parcial o total de la vegetación que lo protege, como sucede a causa del sobrepastoreo, lo que incrementa la susceptibilidad del suelo a la erosión.

Principales formas de la erosión

La erosión hídrica se clasifica de la siguiente manera: laminar, en surcos y en cárcavas (figura 1.22). A su vez, el agua da lugar a formas especiales de erosión: por pedestales, pináculos, tubular y caída.

En el caso de la erosión eólica, el movimiento de las partículas del suelo es producido por la energía del viento ejercida sobre la superficie del terreno. Las partículas del suelo son transportadas por saltación, deslizamiento superficial y suspensión, dependiendo del tamaño de las partículas y la duración, velocidad y turbulencia del viento.



Figura 1.22 Ejemplos de erosión hídrica laminar



Figura 1.23 Ejemplos de erosión hídrica en surcos



Figura 1.24 Ejemplos de erosión hídrica en cárcavas



## 1.6.2 Desertificación

La desertificación es un proceso dinámico que deteriora los ecosistemas productivos, principalmente por la degradación del suelo, ya que fácilmente puede hacerse irreversible y reducir en forma permanente su capacidad para sustentar cualquier forma de vida.

Las causas de la desertificación varían en las regiones afectadas, debido a diferencias en sus características ecológicas, sociales y económicas. Es necesario enfocar de manera especial los problemas de la desertificación en cada región ya que esto está en relación con las características y ordenación de los recursos de cada una de ellas.

Entre las principales causas de desertificación están las siguientes:

- a) Degradación física y biológica de los sistemas de producción provocada por el hombre y la naturaleza.
- b) Subdesarrollo de las condiciones socioeconómicas y deficientes sistemas tecnológicos.
- c) Un desequilibrio acentuado entre la densidad de población humana y animal sobre el potencial productivo de los factores agua, suelo y planta, y
- d) La localización en tierras fértiles de los asentamientos humanos.

El principal efecto de la desertificación es que disminuye la productividad en los sistemas de producción, ocasionando con ello movimientos migratorios hacia regiones con mejores condiciones de vida y ecológicas.

Algunos otros efectos en zonas áridas y semi-áridas son los siguientes:

- 1) Erosión del suelo por pérdida de la cubierta vegetal.
- 2) Deficiencia de agua por manejo irracional de los escurrimientos superficiales.
- 3) Deterioro de la calidad de suelos por el manejo inadecuado del agua de riego y de los sistemas de drenaje.
- 4) Disminución y/o agotamiento de los mantos acuíferos por la sobreexplotación.
- 5) Azolvamiento de los almacenamientos superficiales por erosión de las partes altas de las cuencas de captación.
- 6) Pérdidas de suelo superficial debido a sistemas ineficientes de labranza.

## 1.6.3 Contaminación de suelos

La presión demográfica ha provocado el incremento en el uso del suelo y su contaminación; esta última es consecuencia del manejo inadecuado de la tecnología. En esta sección se discuten algunos de los agentes contaminantes.

Salinidad y sodicidad

Los problemas de salinidad y sodicidad están asociados a las actividades agrícolas, principalmente por el uso inadecuado de las dosis y tipos de fertilizantes, ya que se acumulan residuos en las capas del

suelo. En este problema influyen las láminas de agua de riego, que son mal calculadas o mal aplicadas, así como la utilización de agua con alta concentración de sales. En algunos casos, la acumulación de sales y sodio se puede evitar por medio de un manejo adecuado del riego, con el conocimiento de la tolerancia de las plantas a las sales y al sodio, la concentración de sales del agua y las características del suelo que proporcionan un buen drenaje e infiltración.

#### Plaguicidas

Los plaguicidas representan uno de los más grandes avances tecnológicos, especialmente en términos de salud humana y en rendimientos de cultivos por la anulación de las pérdidas por insectos y malas hierbas. El principal problema de los plaguicidas es su persistencia en el ambiente, principalmente en el suelo, ya que quedan adsorbidos a las partículas del suelo y se depositan en las corrientes, entrando posteriormente a formar parte de la cadena alimenticia (incluyendo a los humanos).

Los plaguicidas se clasifican en clorados y organofosfatados. Los que presentan mayor problema de persistencia son los hidrocarburos clorados ya que su degradación es lenta y oscila entre algunos meses y varios años, como en el caso del DDT, del que se han encontrado residuos tanto en suelos como en plantas después de años de aplicación. En general, la aplicación de DDT está prohibida en la mayoría de los países incluido México.

Con respecto a los organofosfatados su persistencia es menor, ya que se degradan más fácilmente, por ello se considera que su influencia en la contaminación del suelo es menor. Sin embargo, es necesario controlar el uso de estas sustancias ya que se desconocen sus efectos a corto y mediano plazo.

#### Aguas residuales

El problema de la disposición de las aguas residuales se refiere a su calidad, dado que se utilizan para riego en algunas zonas, por ello es necesario considerarlas como agentes de contaminación de suelos. De acuerdo con el origen de las aguas residuales, éstas tendrán diferentes características que pueden afectar la calidad del suelo, entre las cuales están las siguientes: plomo, mercurio y cadmio (metales pesados); detergentes que aportan fósforo y que pueden causar problemas en la infiltración del agua en el suelo por su carácter de agente dispersante; y microorganismos patógenos.

#### Fertilizantes

Los fertilizantes son mejoradores de suelos y un medio de mantener y aumentar la productividad. Sólo se pueden considerar como contaminantes si se usan en exceso o se aplican en forma errónea.

En la aplicación excesiva de fertilizantes el problema principal es la acumulación de nitrógeno, tanto en plantas como en aguas subterráneas y superficiales (aguas de retorno agrícola) ya que éstas pueden acelerar el proceso de eutrofización de los cuerpos receptores.

Un uso elevado y continuo de los fertilizantes durante mucho tiempo podría quizá, contribuir significativamente a la radioactividad en los suelos. Lo anterior, si bien probablemente no está estudiado y se considera que el tratamiento de los elementos en forma aislada elimina en gran parte el problema.

## 1.7 Ecuación universal de pérdida de suelos

La energía cinética de las gotas de lluvia y el agua corriente efectúan un trabajo que altera la compactación del suelo y propicia el arrastre de partículas. La energía de las gotas de lluvia es al menos 200 veces mayor que la del agua corriente (White, 1979).

La energía de las gotas de lluvia se incrementa de acuerdo con la masa de la gota y el cuadrado de su velocidad terminal. Las dos características están en función de la intensidad de lluvia.

El trabajo realizado por las gotas de lluvia y el agua corriente es la causa de la erosión. La ecuación universal de pérdida de suelo considera los principales factores que influyen en la erosión acelerada.

Para evaluar impactos ambientales es importante considerar los patrones y las tasas la variación de la erosión y sedimentación de suelos, especialmente durante la etapa de construcción, en la cual prevalecen grandes extensiones de suelo expuesto a cielo abierto.

Para estimar las tasas de erosión se puede utilizar la ecuación universal de pérdida de suelos que se expresa como:

$$E = R * K * L * S * C * P \quad (1.3)$$

Donde:

- E = Erosión del suelo t/ha año
- R = Erosividad de la lluvia. MJ/ha mm/hr
- K = Erosionabilidad del suelo
- LS = Longitud (m) y grado de pendiente
- C = Factor de vegetación
- P = Factor de prácticas mecánicas

La **erosividad** (R) representa la energía potencial de la lluvia y su escurrimiento asociado; es el factor de tipo climático que indica el potencial erosivo de las precipitaciones. Se puede estimar usando la precipitación media anual de la región bajo estudio.

A partir de la precipitación media anual se aplican las ecuaciones de erosividad asociadas con las 14 diferentes regiones de la República Mexicana (Martínez, 2005).

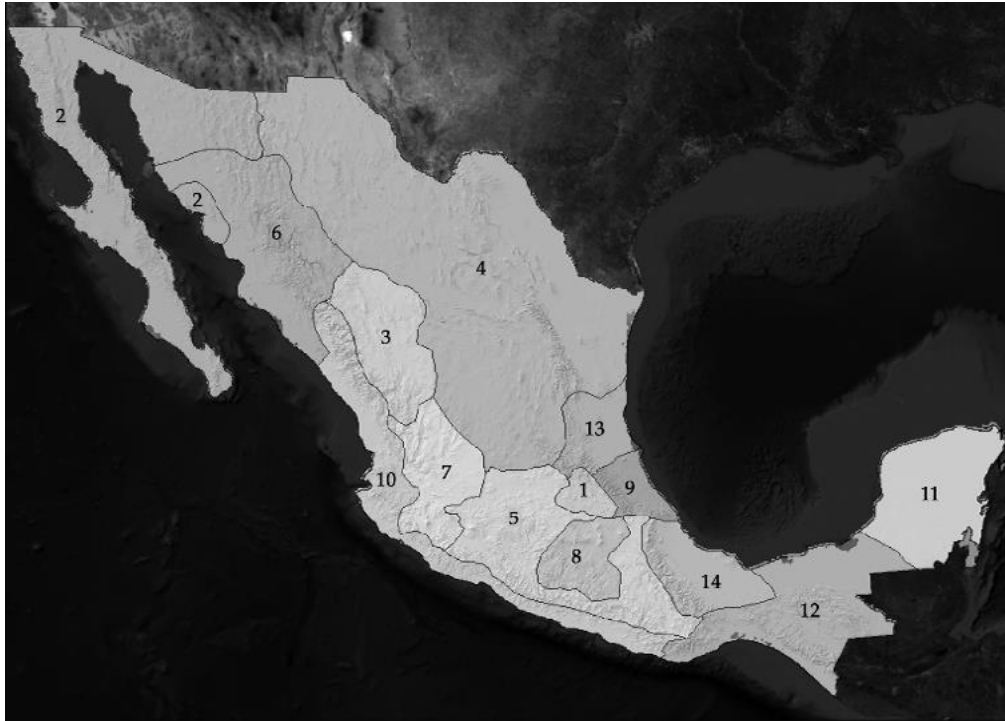


Figura 1.25 Regiones de la República Mexicana asociadas a las ecuaciones de erosividad. Fuente: (Montes, Uribe, & García, 2011)

Tabla 1.8 Ecuaciones de erosividad asociadas a las regiones de la República Mexicana

Región	Ecuación	R <sup>2</sup>
1	$1.2078*P + 0.002276*P^2$	0.92
2	$3.4555*P + 0.006470*P^2$	0.93
3	$3.6752*P - 0.001720*P^2$	0.94
4	$2.8959*P + 0.002983*P^2$	0.92
5	$3.4880*P - 0.000188*P^2$	0.94
6	$6.6847*P + 0.001680*P^2$	0.90
7	$-0.0334*P + 0.0061*P^2$	0.98
8	$1.9967*P + 0.003270*P^2$	0.98
9	$7.0458*P - 0.002096*P^2$	0.97
10	$6.8938*P + 0.000442*P^2$	0.95
11	$3.7745*P + 0.004540*P^2$	0.98
12	$2.4619*P + 0.006067*P^2$	0.96
13	$10.7427*P - 0.001008*P^2$	0.97
14	$1.5005*P + 0.002640*P^2$	0.95

Fuente: (Becerra, 1997)

El **factor de erosionabilidad (K)** está definido como la facilidad con la que es desprendido el suelo por: 1) el salpicado de las gotas durante un evento de lluvia, 2) el flujo superficial o 3) por la acción de ambos fenómenos (Montes, Uribe, & García, 2011).

Tabla 1.9 Factor de erosionabilidad de suelos (K) en función de la textura y contenido de materia orgánica

Textura	% de materia orgánica		
	0.0-0.5	0.5-2.0	2.0-4.0
Arena	0.005	0.003	0.002
Arena fina	0.016	0.014	0.010
Arena muy fina	0.042	0.036	0.028
Arena migajosa	0.012	0.010	0.008
Arena fina migajosa	0.024	0.020	0.016
Arena muy fina migajosa	0.044	0.038	0.030
Migajón arenoso	0.027	0.024	0.019
Migajón arenoso fino	0.035	0.030	0.024
Migajón arenoso muy fino	0.047	0.041	0.033
Migajón	0.038	0.034	0.029
Migajón limoso	0.048	0.042	0.033
Limo	0.060	0.052	0.042
Migajón arcillo arenosa	0.027	0.025	0.021
Migajón arcilloso	0.028	0.025	0.021
Migajón arcillo limosa	0.037	0.032	0.026
Arcillo arenosa	0.014	0.013	0.012
Arcillo limosa	0.025	0.023	0.019
Arcilla	0.013-0.029		

Fuente: (Martínez, 2005)

La longitud del factor de pendiente (L) se obtiene con la expresión:

$$L = (\lambda)^m(0.0138 + 0.00965 S + 0.00138 S^2) \quad (1.4)$$

Donde

LS = Factor de longitud y grado de la pendiente

$\lambda$  = longitud de la pendiente

S = Pendiente media del terreno

m = Parámetro de valor 0.5

El factor C tiene como función representar el efecto relativo que pueden tener la vegetación y las diversas prácticas de manejo en la erosión del suelo. Las condiciones favorables para la erosión se presentarían cuando no hay cobertura vegetal y con barbecho continuo, en esta situación el valor del factor C es 1.

Tabla 1.10 Valores del factor C para diferentes tipos de vegetación y tipo de suelo

Vegetación y/o uso de suelo	C	Vegetación y/o uso de suelo	C
Bosque de ayarín	0.01	Pastizal gipsófilo	0.25
Bosque de cedro	0.01	Pastizal halófilo	0.25
Bosque de encino	0.10	Pastizal inducido	0.02
Bosque de encino- pino	0.01	Pastizal natural	0.07
Bosque de galería	0.10	Popal	0.85
Bosque de oyamel	0.01	Pradera de alta montaña	0.05
Bosque de pino	0.01	Sabana	0.54
Bosque de pino-encino	0.01	Sabanoide	0.54

Bosque de táscate	0.01	Selva alta perennifolia	0.45
Bosque de mesófilo de montaña	0.01	Selva alta subperennifolia	0.45
Chaparral	0.65	Seva baja caducifolia	0.50
Manglar	0.10	Selva baja espinosa caducifolia	0.50
Matorral crasicaule	0.65	Selva baja espinosa subperennifolia	0.50
Matorral de coníferas	0.20	Selva mediana subcaducifolia	0.45
Matorral desértico micrófilo	0.25	Selva mediana perennifolia	0.45
Matorral desértico rosetófilo	0.25	Selva mediana subcaducifolia	0.45
Matorral espinoso tamaulipeco	0.45	Tular	0.10
Matorral rosetófilo costero	0.25	Vegetación de desiertos arenosos	0.85
Matorral sacrocaule	0.25	Vegetación de dunas costeras	0.85
Matorral sacro-crasicaule	0.25	Vegetación de galería	0.85
Matorral sacro-crasicaule de neblina	0.25	Vegetación de halófila	0.85
Matorral submontano	0.35	Zona urbana	0.005
Matorral subtropical	0.12	Cuerpos de agua	1.0
Mezquital	0.65	Agricultura en riego	0.55
Palmar inducido	0.75	Agricultura temporal	0.75
Palmar natural	0.75	Agricultura de humedad	0.25

Fuente: (Montes, Uribe, & García, 2011)

El factor de práctica de soporte (P) es la tasa relativa de pérdida de suelo con una práctica específica. Dichas prácticas y valores del factor P se pueden observar en la Tabla 1.11.

Tabla 1.11 Valores del factor de práctica de soporte (P)

Práctica	Valor de P
Surcado al contorno	0.75 – 0.90
Surcos rectos	0.80 – 0.95
Franjas al contorno	0.60 – 0.80
Terrazas (2 -7 % de pendiente)	0.50
Terrazas (7 – 13 % de pendiente)	0.60
Terrazas (mayor de 13 %)	0.80
Terrazas de Banco	0.10
Terrazas de Banco en contrapendiente	0.05

Fuente: (Martínez, 2005)

## 1.8 Normas oficiales mexicanas aplicables al factor suelo

La Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA) se refiere al aprovechamiento sustentable de los elementos naturales agua, suelo, y recursos naturales no renovables en su título tercero. El capítulo II de dicho título se refiere a los criterios para la preservación y aprovechamiento sustentable.

Por su parte, el artículo 98 de la LGEEPA establece los siguientes criterios para la preservación y aprovechamiento sustentable de los suelos:

- 1) El uso del suelo debe ser compatible con su vocación natural y no debe alterar el equilibrio de los ecosistemas;
- 2) El uso de los suelos debe hacerse de manera que éstos mantengan su integridad física y su capacidad productiva;

- 3) Los usos productivos del suelo deben evitar prácticas que favorezcan la erosión, degradación o modificación de las características topográficas, con efectos ecológicos adversos;
- 4) En las acciones de preservación y aprovechamiento sustentable del suelo, deberán considerarse las medidas necesarias para prevenir o reducir su erosión, deterioro de las propiedades físicas, químicas o biológicas del suelo y la pérdida duradera de la vegetación natural;
- 5) En las zonas afectadas por fenómenos de degradación o desertificación, deberán llevarse a cabo las acciones de regeneración, recuperación y rehabilitación necesarias, a fin de restaurarlas, y
- 6) La realización de las obras públicas o privadas que por sí mismas puedan provocar deterioro severo de los suelos, deben incluir acciones equivalentes de regeneración, recuperación y restablecimiento de su vocación natural.

Además de lo anterior, el artículo 99 de la LGEEPA establece una vinculación precisa entre las políticas específicas sobre suelos y un conjunto de actos de las autoridades que tienen que ver con los suelos, al disponer, que los criterios ecológicos citados serán considerados en:

- 1) Los apoyos a las actividades agrícolas que otorgue el Gobierno Federal, de manera directa o indirecta, sean de naturaleza crediticia, técnica o de inversión, para que promuevan la progresiva incorporación de cultivos compatibles con la preservación del equilibrio ecológico y la restauración de los ecosistemas;
- 2) La fundación de centros de población y la radicación de asentamientos humanos;
- 3) El establecimiento de usos, reservas y destinos, en los planes de desarrollo urbano, así como en las acciones de mejoramiento y conservación de los centros de población;
- 4) La determinación de usos, reservas y destinos en predios forestales;
- 5) El establecimiento de zonas y reservas forestales;
- 6) La determinación o modificación de los límites establecidos en los coeficientes de agostadero;
- 7) Las disposiciones, lineamientos técnicos y programas de protección y restauración de suelos en las actividades agropecuarias, forestales e hidráulicas;
- 8) El establecimiento de distritos de conservación del suelo;
- 9) La ordenación forestal de las cuencas hidrográficas del territorio nacional;
- 10) El otorgamiento y la modificación, suspensión o revocación de permisos de aprovechamiento forestal;
- 11) Las actividades de extracción de materias del subsuelo; la exploración, explotación, beneficio y aprovechamiento de sustancias minerales; las excavaciones y todas aquellas acciones que alteren la cubierta y suelos forestales; y

12) La formulación de los programas de ordenamiento ecológico a que se refiere esta Ley.

Las zonas áridas son materia de especial preocupación de la LGEEPA, que destina dos preceptos a este tema. El primero de ellos dispone que en la realización de actividades en zonas áridas deberán observarse los criterios que para la preservación y aprovechamiento sostenible del suelo se establecen en la propia LGEEPA y las demás disposiciones que resulten aplicables (artículo 101 bis) y el segundo, que todas las autorizaciones que afecten el uso de suelo en las zonas áridas, así como el equilibrio ecológico de sus ecosistemas, quedan sujetas a los criterios y disposiciones que establecen la misma LGEEPA y demás aplicables (artículo 102) (Brañes, 2000). Las disposiciones de la LGEEPA sobre la preservación y aprovechamiento sustentable del suelo y sus recursos se encuentran complementadas por diversas Normas Oficiales Mexicanas (tabla 1.12).

<b>Tabla 1.12 Normas Oficiales Mexicanas en materia de suelos</b>		
<b>Título</b>	<b>Autor</b>	<b>Temas</b>
Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000, Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis.	México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Especificaciones de los suelos</li> <li>• Determinaciones de suelos por propósito</li> <li>• Evaluación de la conformidad en el muestreo de suelos</li> <li>• Evaluación de la conformidad en los análisis de suelos</li> </ul>
Norma Oficial Mexicana NOM-020-SEMARNAT-2001, Que establece los procedimientos y lineamientos que se deberán observar para la rehabilitación, mejoramiento y conservación de los terrenos forestales de pastoreo.	México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Procedimientos generales</li> <li>• Evaluación de la conformidad</li> <li>• Observancia de la Norma</li> </ul>
Norma Oficial Mexicana NOM-023-SEMARNAT-2001, Que establece las especificaciones técnicas que deberá contener la cartografía y la clasificación para la elaboración de los inventarios de suelos. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales	México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Especificaciones de los procedimientos cartográficos</li> </ul>
Norma Oficial Mexicana NOM-062-SEMARNAT-1994, que establece las especificaciones para mitigar los efectos adversos sobre la biodiversidad que se ocasionen por el cambio de uso del suelo de terrenos forestales a agropecuarios.	México. Secretaría de Desarrollo Social.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Especificaciones</li> <li>• Vigilancia</li> <li>• Sanciones</li> </ul>
Norma Oficial Mexicana NOM-060-SEMARNAT-1994, que establece las especificaciones para mitigar los efectos adversos ocasionados en los suelos y cuerpos de agua por el aprovechamiento forestal.	México. Secretaría de Desarrollo Social.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Especificaciones</li> <li>• Vigilancia</li> <li>• Sanciones</li> </ul>
Fuente: <b>(Semarnat, NOMS en Materia de Suelos, s.f.)</b>		



## 1.9 Medidas de mitigación del impacto en el factor suelo

Las superficies de terrenos de las cuales se ha removido la cubierta de suelo debido a actividades de movimiento de tierras o minería son lugares hostiles para la biota del suelo y vegetación (Galatowitsch, 2012). El subsuelo expuesto carece de nutrientes y materia orgánica. En ausencia de vegetación, las temperaturas pueden ser extremas y propensas a fluctuaciones. Además, la pedacería de roca y subsuelo (por ejemplo, el material estéril) puede ser de tamaño basto o fino. Una textura fina de los substratos combinada con carencia de materia orgánica da como resultado pocos intersticios y una limitada infiltración y aireación; por otra parte, un suelo con textura gruesa combinada con carencia de materia orgánica da como resultado una posibilidad limitada para acumular agua. Incluso los usos de suelo que no remueven la cubierta de suelo pueden hacer que disminuya la actividad biológica del suelo. Si la degradación del suelo está en una condición reversible, puede requerir sólo revegetación y tiempo. Sin embargo, sobre sitios altamente degradados puede ser necesaria la corrección de los substratos superficiales para sostener el crecimiento de plantas y microbiano (Galatowitsch, 2012).

### Recuperación del suelo y revegetación

La rapidez de la recuperación del suelo varía de acuerdo con la severidad y escala de la alteración, así como de las condiciones ambientales que prevalecen en el sitio. Para dar una idea del tiempo necesario, la recuperación no asistida puede demandar pocos años en algunos ecosistemas, pero en otros debe transcurrir más de un siglo, como es el caso de los líquenes sucesionales en desiertos cálidos. Si los problemas no son severos, es posible establecer vegetación usando especies de plantas tolerantes al estrés ambiental y baja fertilidad del suelo. Al paso del tiempo, dicha vegetación reconstruirá las fuentes de carbono orgánico en el suelo y sostendrá la actividad microbiana.

Incluso cuando las condiciones son severas y el suministro de nutrientes es mínimo, como en el caso de los residuos mineros, se pueden establecer plantas. Las especies de plantas capaces de crecer sobre sitios empobrecidos de nutrientes dependen de al menos una de tres estrategias. La primera es que podrían tener baja rapidez de crecimiento y consecuentemente bajos requerimientos de nitrógeno; la segunda es que podrían tener un sistema largo de raíces y estar espaciadas ampliamente, lo cual les permitirá obtener nitrógeno de áreas grandes. Finalmente, estos primeros colonizadores pueden hospedar bacterias fijadoras de nitrógeno. Las plantas no fijadoras de nitrógeno plantadas entre las fijadoras se benefician del nitrógeno suministrado por sus vecinas. Es obvio que una estrategia común es incluir especies fijadoras de nitrógeno (como aquellas asociadas con *Rhizobium* o *Frankia*), tales como alisos o legumbres (un tipo de leguminosas que se cosechan únicamente para obtener la semilla seca) en plantaciones de suelos estériles.

Mientras que los productores primarios son cruciales para formar el almacén de materia orgánica en el suelo, también es importante que los nutrientes dentro de esa materia orgánica sean cedidos, o sea, que no sean secuestrados y no disponibles a otros organismos. Los invertebrados del suelo contribuyen a reciclar nutrientes pastando, desintegrando los desechos de manera que los microbios puedan actuar sobre ellos y redistribuir los materiales en el suelo. Los vertebrados que pastan también añaden al nitrógeno disponible en el suelo, contribuyendo con heces y orina.

### Manejo y aplicación de la cubierta de suelo

Las operaciones de minería y construcción pueden retirar la cubierta de suelo, cargar y transportar el material para almacenarlo en grandes montones por meses e incluso años antes de volver a tenderlo. Después de pocos meses, los suelos apilados pueden perder mucho de su actividad biológica. En el interior de los montones, los suelos se tornan anaerobios, lo cual aniquila muchos microbios (especialmente hongos) y semillas, pero no sólo eso, sino que moviliza nutrientes permitiendo su lixiviación hacia afuera de la pila. La cubierta de suelo que se vuelve a tender es de menor calidad, de ahí que su capacidad para sostener el desarrollo de vegetación es baja.



### **Actividad 1.7**

#### **Cambio en la cobertura del suelo**

**Entrar en la página de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad e identificar los cambios de suelo asociados a la ingeniería civil.**

## **1.9.1 Manejo de suelos**

El manejo de la cubierta de suelo en las operaciones de minería y construcción para conservar sus propiedades bióticas, físicas y químicas tiende a aumentar. Con el fin de conservar la calidad de la cubierta de suelo se deben considerar las prácticas involucradas en su retiro, almacenamiento y re-aplicación. El retiro por separado de la cubierta de suelo y de los estratos del subsuelo ofrece las siguientes ventajas: si es necesario el almacenamiento, los equipos pueden amontonar el menor volumen de cubierta de suelo con una pequeña altura de la pila para maximizar la superficie aireada; por otra parte, el proceso no diluye la biota del suelo dentro del mayor volumen excavado, una vez que se realice la re-aplicación la cubierta de suelo biológicamente activa se concentra en la superficie en lugar de enterrarla en la profundidad.

En la medida de lo posible, la cubierta de suelo recién retirada debe tenderse inmediatamente en un área en espera de restauración, lo cual evita el almacenamiento. Sin embargo, cumplir con esta recomendación en la práctica puede ser un reto debido a que diferentes cuadrillas de operación minera deben coordinar su trabajo, para asegurar que las primeras áreas explotadas están listas para recibir la cubierta de suelo, mientras se abren nuevos frentes de explotación. Si es necesario almacenar el suelo, idealmente debe ser por no más de unos cuantos meses, y los montones de suelo deben ser de no más de un metro de profundidad, para mantener la actividad biológica. La cubierta de suelo debe re-aplicarse manteniendo un espesor razonable; tender una cubierta muy delgada causará su dilución y reducirá su habilidad para sostener la acumulación de biomasa.

Existen vastas áreas de terrenos que fueron usadas en actividades mineras y otros paisajes industriales que carecen de cubierta de suelo para restauración. Como alternativa, se pueden remediar estos terrenos con fuentes de materia orgánica que no provienen del suelo, fertilizantes e incluso inóculos microbianos. Este enfoque para reconstituir suelos tiene menor probabilidad de ser efectivo que el uso de cubierta de suelo fresco, pero en muchos casos podría ser la única opción. La selección del tipo de corrección es específica para cada sitio y depende de los problemas que se tienen que resolver.

Los productos orgánicos que se usan para restaurar incluyen a los biosólidos (lodos de aguas residuales), estiércoles, compost, mulch<sup>3</sup> y residuos de aserradero.

Se tienen que analizar las características de los materiales disponibles para determinar si contienen metales pesados o herbicidas, así como para establecer su contenido de nutrientes. Los estiércoles y biosólidos comúnmente contienen alta concentración de nitrógeno y otros nutrientes por lo que son potencialmente efectivos para mejorar la productividad de las plantas en sitios empobrecidos. Estos materiales se esparcen a través del sitio y se incorporan dentro del sustrato.

Los materiales orgánicos usados para corregir un suelo varían en su relación C:N. Los mulches con relación C:N menor a 25, tales como los preparados con estiércol y alfalfa o residuos de poda de pasto, son la mejor elección cuando la fertilidad del suelo limita la productividad de las plantas.

Los fertilizantes aplicados para establecer vegetación pueden aportar los nutrientes a las plantas a corto plazo, pero no son efectivos como remedio primario al empobrecimiento de nutrientes. A diferencia de la materia orgánica, que libera nutrientes a lo largo del tiempo a través de la mineralización, los fertilizantes sintéticos aportan nutrientes en un pulso.

En regiones con agricultura intensiva, el problema puede ser un alto contenido de nutrientes en el suelo ligado al uso intensivo de fertilizantes. Cuando es posible establecer con certeza que existe sobre-enriquecimiento de nutrientes, se pueden emplear dos estrategias para reducir el suministro de nutrientes al suelo: incrementar las pérdidas de nutrientes con relación a las entradas, o reducir la disponibilidad de nutrientes para las plantas.

La remoción de la cubierta de suelo, aunque drástica, reduce el nivel de nutrientes instantáneamente y no requiere repetirse frecuentemente. El recorte de una delgada capa (unos cuantos centímetros) de cubierta de suelo, remueve la porción que tiene las mayores concentraciones de nitrógeno, fósforo y materia orgánica; consecuentemente, puede alterar significativamente el estatus de los nutrientes en el sitio. Debido a que la vegetación también se pierde en el proceso, se dejan algunos parches sin perturbar para que se lleve a cabo la colonización.

Otra técnica tiene el propósito de hacer no disponibles a los nutrientes para el crecimiento de las plantas en lugar de removerlos del suelo. En donde los horizontes más profundos sean pobres en nutrientes, se puede reducir el suministro de nutrientes mezclando la capa superficial rica en nutrientes con estos materiales sub-superficiales. También se ha sugerido el uso de correctores de suelo con relación C:N muy alta, tal como aserrín, para reducir la disponibilidad de nitrógeno para las plantas. El aserrín estimula el crecimiento de los microbios, los cuales secuestran el nitrógeno en sus tejidos hasta que los materiales correctores se vuelven ricos ellos mismos con adiciones de microbios en

---

<sup>3</sup> Mulch es la mezcla de materiales secos como hojas, hierba, ramitas, residuos del cultivo, paja etc., con la cual se cubre el suelo. Una cobertura de mulch realza la actividad de los organismos del suelo.

decaimiento. Desafortunadamente, esta ventana de tiempo puede ser muy corta, incluso menor que un crecimiento estacional.

### **Remediación de suelos tóxicos**

Las toxinas en los suelos presentan dos diferentes tipos de problemas. Primero, la composición química del suelo anómala puede causar estrés o mortalidad en vegetación establecida o colonizante. Segundo, el suelo puede tener concentraciones de sustancias químicas que directamente constituyen riesgos a la salud de los vertebrados (incluidos los humanos) o que se pueden acumular en las redes tróficas, y de ahí constituyen riesgo a la salud. Este capítulo considera ambos aspectos de la toxicidad de un suelo.

Existe una amplia variedad de actividades humanas que generan residuos y contaminantes. Entre éstas, las operaciones industriales –minería, manufactura y producción de energía- son frecuentemente el foco de la remediación del suelo debido a que ellas generan grandes cantidades de múltiples contaminantes con gran potencial de efectos ecológicos extensivos. En la sección 1.2.1 se describió la minería de roca dura para metales como hierro, zinc, plomo, cobalto, oro y molibdeno, por lo que el lector puede remitirse a dicha sección.

Los derrames de aceite sobre el terreno y agua ocurren durante la exploración, producción y transporte, liberando una variedad de contaminantes orgánicos, particularmente hidrocarburos de petróleo, así como otras toxinas. Al aceite que no es recuperado se le deja decaer. Mientras que algunos componentes del aceite se degradan en días o semanas (dependiendo de las condiciones del sitio y de la composición química del aceite), a otros les toma mucho tiempo, ya sea años o décadas. Un tipo de contaminante orgánico, hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH, por sus siglas en inglés), es especialmente problemático debido a que estas sustancias persisten en el ambiente y son cancerígenas. La contaminación con PAH también se extiende en áreas urbanas, donde se libera por vertido o fuga de aceites lubricantes y otros productos del petróleo, por procesamiento y disposición de residuos, y en el escurrimiento.

Muchas operaciones de manufactura e industriales que producen o usan sustancias químicas tóxicas contaminan el suelo, el agua y el aire. Además de los PHA, los suelos de terrenos industriales con altos niveles de toxinas tienen agentes desengrasantes para maquinaria (por ejemplo: tricloroetileno), PCB's, creosota, asbestos, plomo, cadmio, cromo y arsénico.

El exceso de sodio y otras sales y residuos de plaguicidas y herbicidas son algunos de los contaminantes más comunes asociados con el uso de suelo agrícola (además de nutrientes y sedimentos). El exceso de sodio y de otras sales es común en paisajes áridos y semiáridos donde se riegan los cultivos. Las altas concentraciones de sales, como cloruros y sulfatos, interfieren con la toma de agua y de nutrientes por las plantas desde el suelo. Las concentraciones altas de sodio son también tóxicas para las plantas y reducen la infiltración de agua y aireación del suelo.

Los plaguicidas y herbicidas empleados en la agricultura pueden ser contaminantes orgánicos del suelo y del agua si no se degradan rápidamente o si son altamente solubles en agua (y en consecuencia móviles). El DDT (diclorodifeniltricloroetano), un plaguicida, es de las sustancias químicas más

notorias formuladas antes de los estándares más exigentes. El DDT ha sido prohibido para el uso agrícola en 136 países, aunque se sigue usando para el control del mosquito de la malaria.

## **Tratamientos para acidez y salinidad del suelo**

Aunque tanto la acidez como la alcalinidad en los suelos pueden afectar las plantas que pueden crecer allí, los suelos fuertemente ácidos (por ejemplo,  $\text{pH} < 3.5$ ) con alta probabilidad son tóxicos a las plantas. Los suelos fuertemente ácidos están comúnmente asociados con desechos mineros, emisiones de fundición y drenaje de humedales, y típicamente contienen altos niveles de metales y sulfatos. Al elevarse el pH del suelo los metales se vuelven menos móviles; incluso si permanecen en el suelo, es menos probable que se muevan dentro de él o dañen plantas y animales.

Para tratar suelos acidificados lo más común es agregar alguna forma de carbonato de calcio, o cal. Junto con la caliza, se pueden usar fertilizantes (nitrógeno, fósforo y potasio) y sembrarlos con pastos de crecimiento rápido y especies de plantas fijadoras de nitrógeno para desencadenar el proceso de recuperación natural.

Además de la roca caliza, se usan varios subproductos de procesos industriales para disminuir la acidez, incluyendo cenizas volantes (un subproducto de la combustión de carbón), cal de azúcar amarga (un subproducto de la refinación).

## 1.10 Problemas y actividades propuestas

- 1) ¿Cómo podría minimizarse la destrucción causada por peligros geológicos?
- 2) ¿Qué es una mena? Explicar por qué se puede agotar un depósito mineral. ¿En qué forma se podría aumentar?
- 3) Analizar en forma concisa cinco factores que rijan las reservas futuras de los metales.
- 4) A menudo resulta antieconómico reciclar ciertos metales. Discutir si sería necesario reordenar las prioridades económicas para alentar el reciclaje y de qué manera se podrían cambiar las prioridades.
- 5) ¿Con el reciclaje de automóviles realmente se conserva el hierro o sólo se conserva la energía? Fundamentar la respuesta.
- 6) La arena y la bauxita, materias primas para los vidrios y el aluminio, respectivamente, son abundantes en la corteza terrestre. Si no existe peligro de agotar estos recursos en un futuro cercano, ¿por qué debemos preocuparnos por reciclar las botellas de vidrio y las latas de aluminio?
- 7) ¿Cómo se vería afectada la vida de los mexicanos si se agotaran los minerales estratégicos?
- 8) ¿Cuánto tiempo falta para agotar la reserva mundial de cobre si el que todavía queda está reciclado en un 50%? Suponer que la demanda mundial permanece constante ( $13.7 \text{ Tg año}^{-1}$  correspondiente al año 2001).
- 9) Mencionar los cinco factores principales que afectan la formación de suelos.
- 10) ¿Cómo influye la meteorización en la formación de suelos? ¿De qué factores depende el proceso de meteorización?
- 11) ¿Cuál es la principal diferencia entre los horizontes O y A?
- 12) ¿Por qué los suelos de arcilla comúnmente cuentan con una mayor capacidad de intercambio catiónico que los de arena?
- 13) ¿Cómo afecta el pH a la saturación básica de un suelo?
- 14) ¿Por qué el proceso de salinización predomina en las zonas áridas? ¿Cómo aumenta la irrigación el proceso de salinización en las zonas agrícolas?
- 15) ¿Qué proceso de formación de suelos predomina en las regiones tropicales húmedas? ¿Cómo afecta este proceso a la disponibilidad de nutrientes para las raíces de plantas en el horizonte A?
- 16) Se determinó que una muestra de suelo contiene 25% de arena, 20% de limo y 55% de arcilla. Usando el diagrama triangular de clasificación de un suelo del Departamento de Agricultura de E.U. (Figura 1.16), ¿cómo sería clasificado este suelo? ¿considera que su permeabilidad es alta o baja?
- 17) Un suelo está compuesto por 24% de arena, 52% de limo y 24% de arcilla en peso.
  - a) Determinar la cantidad de arena que sería necesario añadir a 500kg de este suelo para conseguir que el contenido de arena alcance 35%
  - b) ¿Cuáles son los porcentajes de limo y arcilla en peso resultantes?
- 18) Se construirá un fraccionamiento residencial unifamiliar en un predio cuadrado de 50 ha localizado en el estado de Morelos. El suelo es migajón con la siguiente composición: arcilla 20%, limo 35% (limo + arena fina, 55%), arena fina 20%, arena gruesa y grava 25%. El contenido de materia orgánica del suelo es 1.5%

El predio tiene una zanja para drenar en el centro, que será sustituida por una alcantarilla como parte del proyecto. La pendiente promedio del terreno hacia la zanja es de 2.4%.

Determinar la pérdida de suelo (erosión potencial) en dos condiciones: a) durante la construcción, considerando que se removerá toda la vegetación; y b) posterior a la construcción, cuando 25% del área será impermeable.



**Actividad 1.1**  
**Las fuerzas que dan forma a la Tierra**

Indicaciones

Después de ver el vídeo Las fuerzas que dan forma a la Tierra, responder las siguientes preguntas:

Vídeo: <https://youtu.be/LCXfvV8ou0U>

1. ¿Cómo se denomina al conjunto de fuerzas que obran sobre la corteza terrestre?
2. Con respecto a la pregunta 1, ¿cuáles son los tipos de dichas fuerzas?
3. ¿Qué es la flexión y cuáles son los tipos más comunes?
4. ¿Qué es una falla?
5. Elabora un esquema de los bloques de techo y de piso en una falla.
6. Elabora los esquemas correspondientes a: 1) falla normal; 2) falla inversa; y 3) falla de desgarre.
7. ¿Qué se entiende por movimiento de masas?
8. Describe los principales tipos de movimiento de masas.
9. ¿En qué consiste el proceso de erosión y cuál es la causa principal?
10. Considerando los ejemplos descritos en el video, clasifica los casos en dos listas que consideren: a) impactos de la geología en las actividades humanas y; b) impactos de las actividades humanas en la geología. ¿Qué concluyes acerca de los ejemplos?

**Actividad 1.2**  
**Influencia del factor geológico en un proyecto de ingeniería**

Indicaciones

Analiza la información del proyecto que se presenta a continuación, y después realiza las actividades que se proponen.

Proyecto propuesto: Desarrollo con carácter turístico y residencial de alto nivel económico.

Breve descripción:

El sitio del proyecto se encuentra en el Estado de Quintana Roo, Municipio de Cozumel, con acceso por la carretera federal No. 307, a 7 km al norte de la localidad de Playa del Carmen (figura 1).

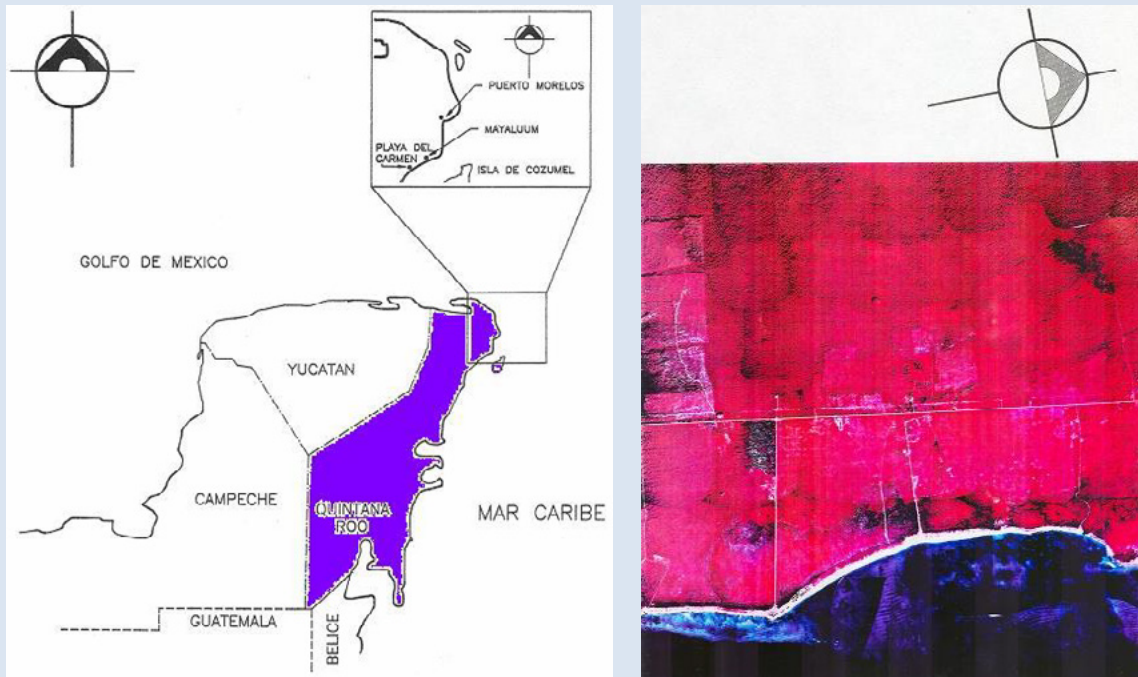


Figura 1. Sitio del proyecto

El predio está formado por dos parcelas localizadas a ambos lados de la carretera federal No. 307. El área total del predio es 649.7 hectáreas. En la figura 2 se muestra la localización de las obras del proyecto en el predio.



**Actividad 1.2**  
**Influencia del factor geológico en un proyecto de ingeniería**

En la tabla 1 se incluye la superficie que ocuparán las obras en el predio. Algunas de ellas se construirían en la zona de manglar.

Tabla 1. Distribución del uso de suelo en el predio

Concepto	Área ocupada en zona de manglar (m2)	Área ocupada en la zona de selva (m2)	Superficie total (m2)
<b>Parcela Este</b>			
Marina	79,345	6,655	86,000
Lagunas	221,923	59,077	281,000
Edificios	673,000	291,000	964,000
Campo de golf	0	510,000	510,000
Suma	974,258	866,732	1,841,000
Área sin desmontar			536,000
<b>Total de parcela Este</b>			<b>2,377,000</b>
<b>Parcela Oeste</b>			
Laguna	0	47,000	47,000
Edificios	0	436,000	436,000
Campo de golf	0	487,000	487,000
Suma	0	970,000	970,000
Área sin desmontar	0		3,150,000
<b>Total de parcela Oeste</b>	0		<b>4,120,000</b>

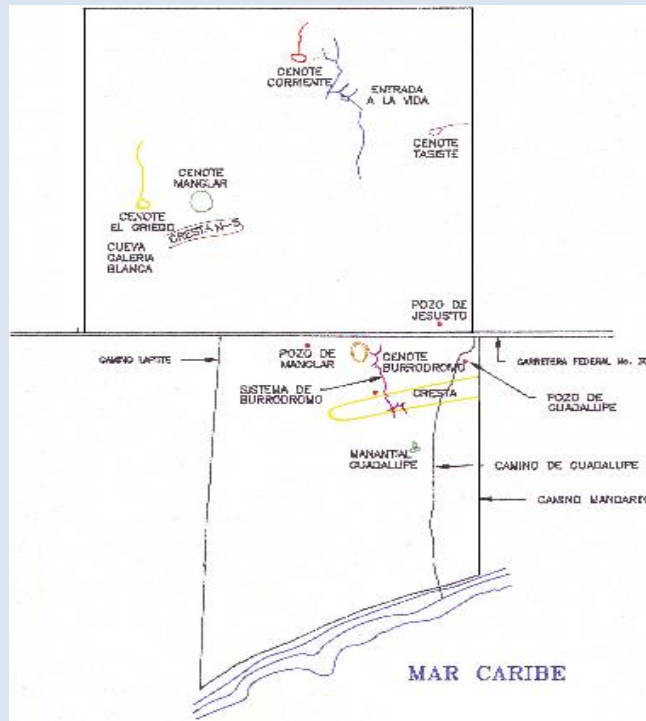


Figura 3. Rasgos geológicos del predio

**Actividad 1.2**

**Influencia del factor geológico en un proyecto de ingeniería**

La figura 3 muestra los rasgos geológicos del predio, como son las dolinas inundadas (cenotes), sistemas de cavernas y manantiales.

Actividades:

Investiga en la red sobre la geología del sitio y describe las características de la roca que subyace. Según el proyecto de que se trate, y siempre y cuando sean relevantes, es útil conocer características del tipo de roca, tales como: la capacidad portante, el potencial acuífero y la erosionabilidad

El potencial acuífero se refiere a la capacidad que tienen las rocas subyacentes de almacenar agua. Considerando la construcción del vaso de la marina, ¿de qué manera la excavación hasta una profundidad de -3.0 m bajo el nivel medio del mar alteraría el potencial acuífero y cuáles pueden ser las consecuencias?

La capacidad portante hace referencia a la capacidad que tiene el sustrato de soportar el peso de una estructura. ¿De qué manera las características geológicas pueden influir adversamente en la construcción de edificios y cuáles pueden ser las consecuencias?

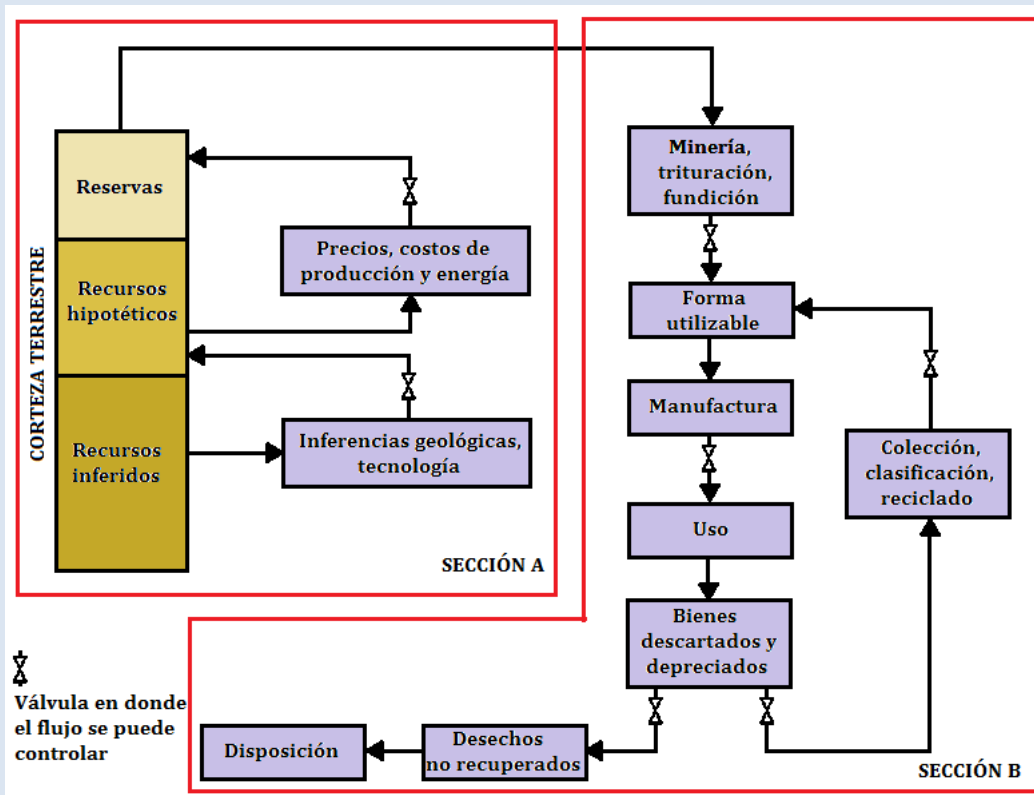
Tomando en cuenta que el proyecto incluye la construcción de dos campos de golf, ¿cómo influiría la operación de dichos campos en la calidad del agua dulce y del mar?



**Actividad 1.3**  
**Flujo de minerales en la economía**

Indicaciones

1. Investigar en la red y definir los siguientes términos: a) reservas, b) recursos hipotéticos y c) recursos inferidos.
2. Analizar la Figura 1.3 del tema 1.2. Efectos ambientales de la extracción de recursos, misma que se reproduce a continuación, y explicar el diagrama de la sección A.



3. Explicar de qué manera pueden controlarse los flujos de minerales mostrados en la sección B con el fin de prolongar el tiempo de los recursos vírgenes hasta su agotamiento.



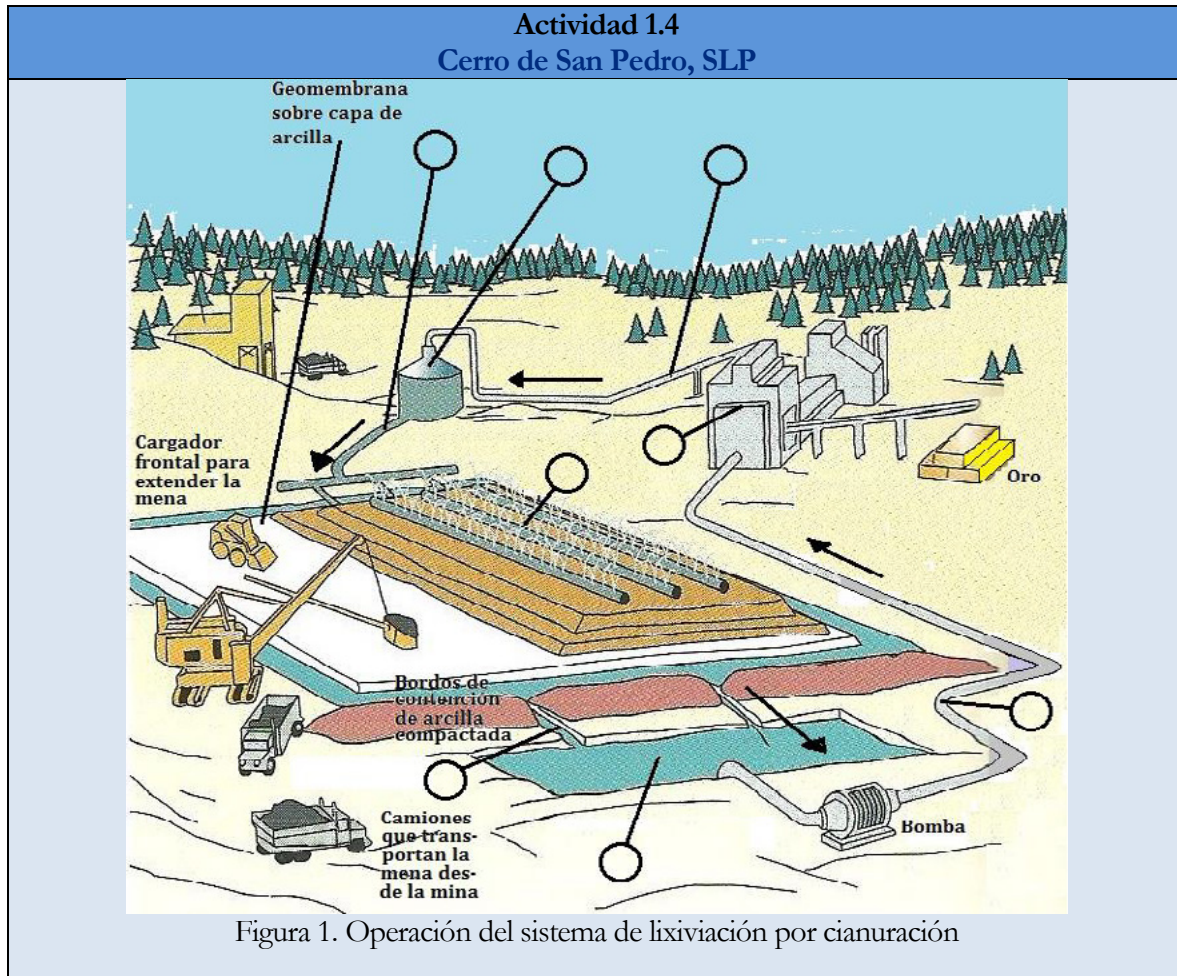
### Actividad 1.4 Cerro de San Pedro, SLP

#### Indicaciones

Ve el audiovisual Cerro de San Pedro, que trata acerca del proyecto de explotación de oro a cargo de la empresa Minera San Xavier, en el Estado de San Luis Potosí, y después realiza las siguientes actividades.

Vídeo: [https://youtu.be/p\\_O79xg8JRA](https://youtu.be/p_O79xg8JRA)

1. Empleando las letras mayúsculas A a D, en la figura 1 identifica los siguientes componentes del sistema de lixiviación por cianuración, que se menciona en el audiovisual:
  - A.- Tanque para preparar la solución de cianuro.
  - B.- Aspersores para aplicar la solución.
  - C.- Estanque del efluente de solución preñada.
  - D.- Planta de procesamiento.
  
2. En la figura 1, identifica los siguientes flujos, empleando el símbolo  $Q_x$  que corresponda:
  - $Q_1$ .- Influyente de solución de cianuro.
  - $Q_2$ .- Drenaje de solución de cianuro que percola el material triturado con la mena.
  - $Q_3$ .- Efluente bombeado de solución preñada.
  - $Q_4$ .- Flujo recirculado al tanque de la solución de cianuro.
  
3. En el minuto 4:24 del audiovisual, el Sr. Mario Martínez explica en qué consiste la técnica de lixiviación por cianuración. Empleando los componentes y flujos que identificaste en los numerales 1 y 2, así como la explicación de Mario Martínez, describe la técnica.
  
4. Como se observa en la figura 1, la técnica de lixiviación por cianuración para la recuperación de oro y plata supone que se trata de un sistema cerrado y que, por lo tanto, no existe liberación de sustancias tóxicas al ambiente. Analiza la figura 1 e identifica las partes del sistema y las causas por las que se podrían liberar sustancias tóxicas al ambiente.
  
5. Como se menciona en el audiovisual, en el proyecto minero Real de Ángeles, Zacatecas, se empleó la misma técnica de explotación de oro. Investiga en la red si a la fecha se ha publicado información sobre las consecuencias ambientales del proyecto Real de Ángeles.
  
6. Investiga en la red el caso del proyecto Summitville mine, cerca de Alamosa, Colorado, E.U. Explica las consecuencias ambientales de dicho proyecto y las acciones de restauración que se han emprendido.



**Actividad 1.5****Efectos ambientales de la extracción de minerales en el municipio de Zimapán, Hidalgo**

## Indicaciones

Ve el audiovisual Impacto ambiental de la actividad minera en Zimapán, Hidalgo, y realiza las siguientes actividades:

Vídeo: <https://youtu.be/LrnfrUsM3d8>

1. Investiga en la red sobre: a) ubicación del municipio; b) actividades agrícolas y pecuarias que se desarrollan; y c) cuerpos de agua superficial.
2. Localiza en una imagen satelital o fotografía aérea las zonas del municipio en las que se encuentran las plantas de beneficio de metales y presas de jales y, además, responde la siguiente pregunta: ¿cuál es el estado físico de los jales a lo largo del tiempo?
3. Investiga en la red sobre la dirección del viento preponderante en el municipio y comenta sobre la posibilidad de que la población esté expuesta a la inhalación de partículas tóxicas provenientes de la actividad minera.
4. Considerando la información presentada en el audiovisual y las respuestas a las preguntas anteriores ¿cuáles pueden ser las vías de exposición a las sustancias tóxicas que tiene la población de la ciudad de Zimapán?
5. Completa el diagrama causa-efecto (o red de impactos) de la actividad *Trituración y concentrado*, correspondiente a la operación de una mina de plomo en el municipio de Zimapán.

Actividad 1.5					
Efectos ambientales de la extracción de minerales en el municipio de Zimapán, Hidalgo					
Actividad del proyecto	Componente de la actividad	Impacto primario	Impacto secundario	Impacto terciario	Impacto cuaternario
Minería	→ Desmante				
	→ Despalme				
	→ Barrenación				
	→ Voladuras				
Trituración y concentración	→ Generación y depósito de residuos (jales)	→ Dispersión de polvo			
		→ Drenaje ácido por lluvia y escurrimiento			

### Actividad 1.6

#### Alteración de los suelos a causa de un proyecto de ingeniería

Indicaciones:

Analiza la información del proyecto que se presenta a continuación, y después realiza las actividades que se proponen.

Proyecto propuesto: Desarrollo con carácter turístico y residencial de alto nivel económico.

Breve descripción:

El sitio del proyecto se encuentra en el Estado de Quintana Roo, Municipio de Cozumel, con acceso por la carretera federal No. 307, a 7 km al norte de la localidad de Playa del Carmen (figura 1).

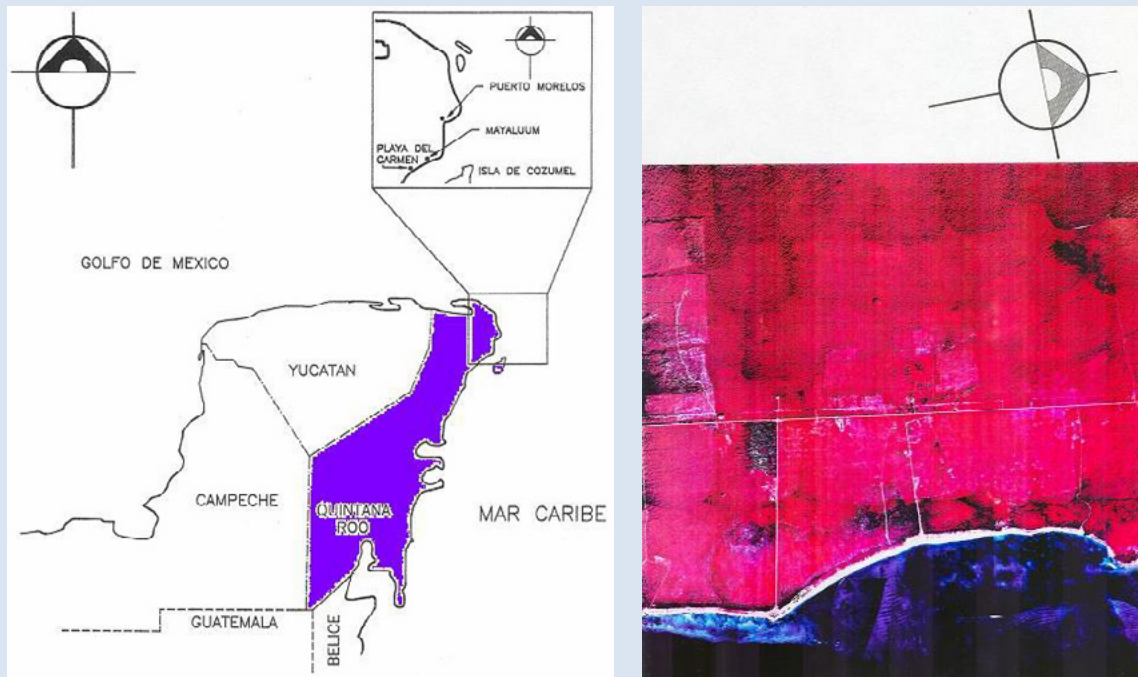


Figura 1. Sitio del proyecto

El predio está formado por dos parcelas localizadas a ambos lados de la carretera federal No. 307. El área total del predio es 649.7 hectáreas. En la figura 2 se muestra la localización de las obras del proyecto en el predio.



**Actividad 1.6**  
**Alteración de los suelos a causa de un proyecto de ingeniería**



Figura 2. Obras que integran el proyecto

En la tabla 1 se incluye la superficie que ocuparán las obras en el predio. Algunas de ellas se construirían en la zona de manglar.



**Actividad 1.6**  
**Alteración de los suelos a causa de un proyecto de ingeniería**

Tabla 1. Distribución del uso de suelo en el predio

Concepto	Área ocupada en zona de manglar (m <sup>2</sup> )	Área ocupada en la zona de selva (m <sup>2</sup> )	Superficie total (m <sup>2</sup> )
<b>Parcela Este</b>			
Marina	79,345	6,655	86,000
Lagunas	221,923	59,077	281,000
Edificios	673,000	291,000	964,000
Campo de golf	0	510,000	510,000
Suma	974,258	866,732	1,841,000
Área sin desmontar			536,000
Total de parcela Este			2,377,000
<b>Parcela Oeste</b>			
Laguna	0	47,000	47,000
Edificios	0	436,000	436,000
Campo de golf	0	487,000	487,000
Suma	0	970,000	970,000
Área sin desmontar	0		3,150,000
Total de parcela Oeste	0		4,120,000

**Actividad 1.6**  
**Alteración de los suelos a causa de un proyecto de ingeniería**

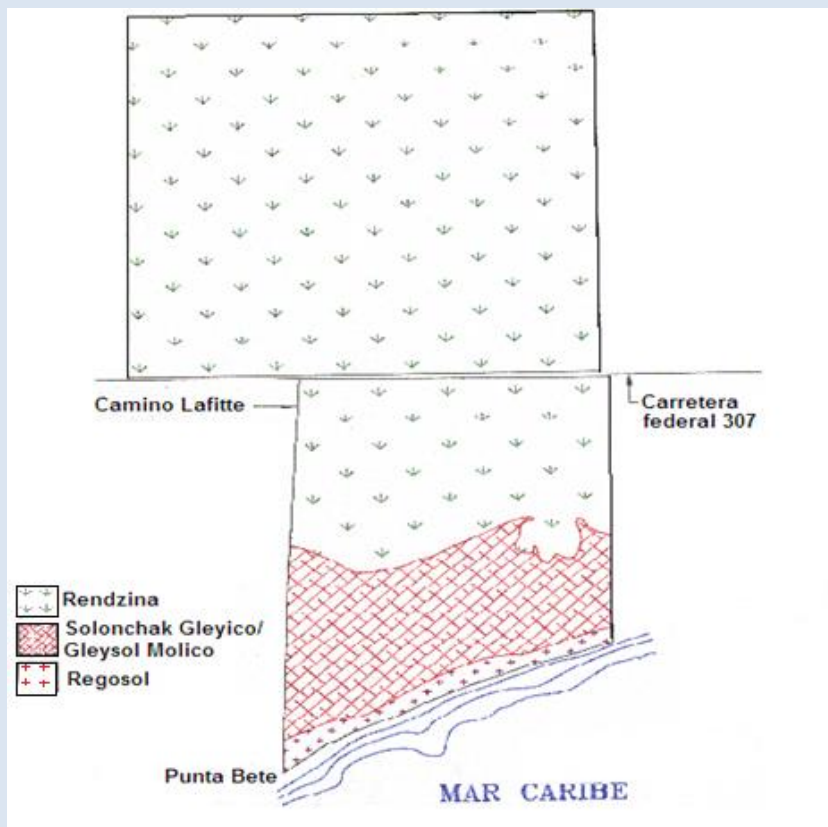


Figura 3. Tipos de suelo en el predio

La figura 3 muestra los tipos de suelo existentes en el predio y la figura 4 muestra el tipo de vegetación.

**Actividad 1.6**  
**Alteración de los suelos a causa de un proyecto de ingeniería**

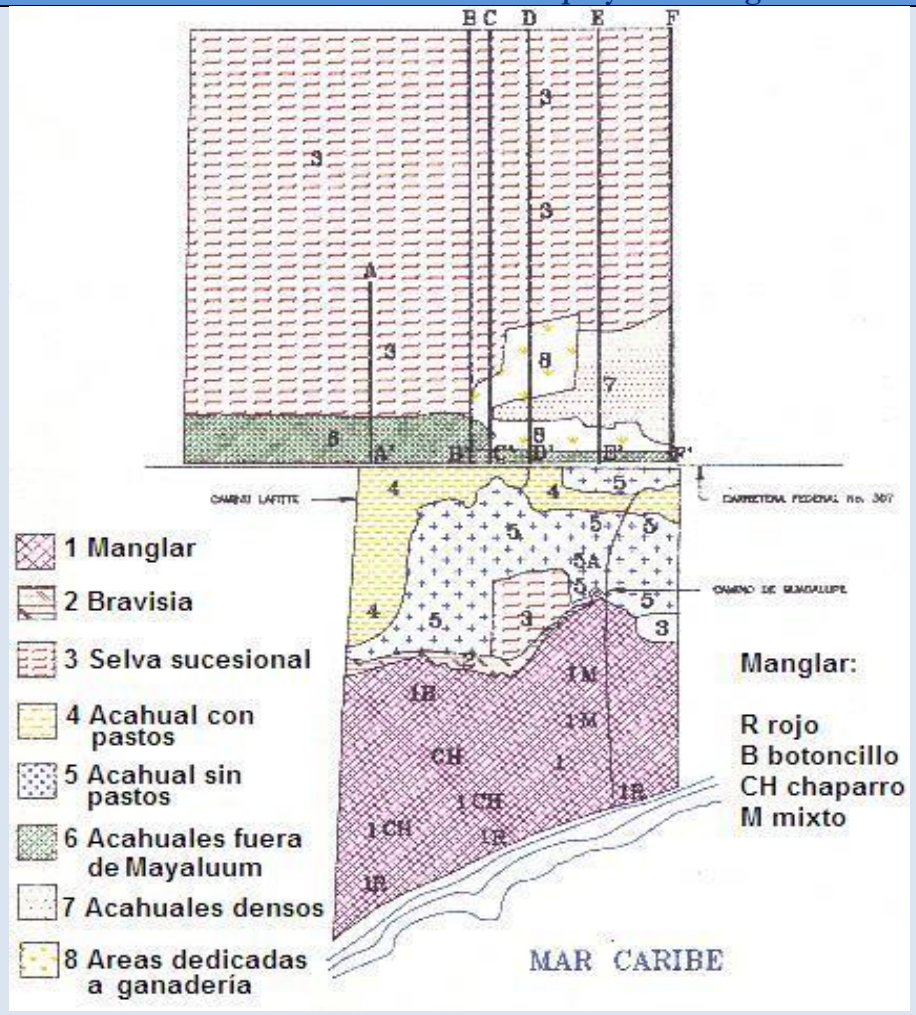


Figura 4. Comunidades vegetales existentes en el predio

Actividades:

1. Investiga en la red sobre los tipos de suelo existentes en el predio (figura 3) y describe sus características.
2. Analiza las figuras 3 y 4 y explica la relación entre el tipo de suelo y el tipo de vegetación que sostiene.
3. Calcula el área de cada tipo de suelo afectada debido al desmonte y despalme durante la etapa de construcción del proyecto.
4. Menciona al menos dos impactos sobre el suelo debidos a la operación del proyecto
5. Propón al menos una medida de mitigación por cada impacto mencionado en la pregunta 3.

**Actividad 1.7**  
**Cambio en la cobertura del suelo**

Indicaciones

1. Entra en la página de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad a través de la liga que se te proporciona.  
[http://www.biodiversidad.gob.mx/pais/cobertura\\_suelo/](http://www.biodiversidad.gob.mx/pais/cobertura_suelo/)  
Contesta las preguntas 1.1 a 1.2 con base en la información de la página.
  - 1.1 ¿A qué se refiere el término cobertura del suelo? ¿Por qué es importante conocer la cobertura del país
  - 1.2 ¿A qué se refiere el término uso de suelo?
2. Una vez realizado lo anterior revisa la gráfica *Ganancias y pérdidas para cada transición de clases* a la cuál puedes acceder a través de la siguiente liga y contesta las preguntas.  
[http://www.biodiversidad.gob.mx/pais/cobertura\\_suelo/ganancias.html](http://www.biodiversidad.gob.mx/pais/cobertura_suelo/ganancias.html)
  - 2.1 De acuerdo con el gráfico, ¿Qué representan las dos primeras barras para cada clase?, ¿a qué año corresponde cada una?
  - 2.2 ¿Qué representa la tercera barra?
  - 2.3 ¿Cuáles son las coberturas del suelo que han cambiado por actividades humanas o para dar lugar a los asentamientos humanos?
  - 2.4 ¿Cuáles son las coberturas que más sufrieron pérdidas en el balance general?
3. Visita el apartado *Sistema de Monitoreo del Cambio en la Cobertura de Suelo de América del Norte* a la cual puedes acceder en la siguiente liga.  
[http://speck.conabio.gob.mx/NALCMS/2005\\_2010/es/index.html](http://speck.conabio.gob.mx/NALCMS/2005_2010/es/index.html)

Revisa los once casos que se te presentan y clasificalos en la siguiente tabla. Identifica cuáles de ellos puedes ser causados o relacionados con la ingeniería civil.

Número	Lugar	Cambio de cobertura de suelo	Causa o relación con la ingeniería civil
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			

**Capítulo****2**

## Objetivos de aprendizaje

---

**Objetivo general:** El alumno distinguirá los tipos de residuos de acuerdo con la legislación en la materia; las fuentes de generación y sus características; el flujo de residuos en la sociedad y los conceptos de reducción, reúso y recuperación.

En este capítulo aprenderás acerca de:

1. Los diferentes tipos de residuos que generamos por las actividades humanas: domésticas y económicas.
2. Las fuentes generadoras de residuos y las características de los residuos dependiendo dónde y cómo se producen.
3. La reglamentación en el país y una comparativa con otros países respecto al manejo de los residuos.
4. Las características físicas y químicas de los residuos, que permiten identificar su potencial aprovechamiento.
5. Una visión de gestión sostenible de los residuos enfocada en el aprovechamiento de los materiales y energía existentes en los residuos.
6. Los ciclos productivos y cómo los residuos pueden re-incorporarse para reducir la cantidad de materiales y energía de primer uso que se utilizan en actividades humanas y económicas.

**Capítulo****2**

## 2. Manejo de residuos sólidos

*El hombre, caminante en busca de sí mismo, actúa sobre la naturaleza y crea cultura. Al paso del tiempo, señala su camino con testimonios de sus aspiraciones superiores y, a la vez, deja huellas desechables de su acción: basura. La basura se convierte así, en pista elocuente. Responde a qué consumimos, dónde compramos, qué desperdiciamos.*

*Ivan Restrepo y David Phillips*

### 2.1 Tipos de residuos y fuentes de generación

Los residuos son materiales y energía aprovechable. El residuo es el concepto utilizado para transformar el valor otorgado a un producto. El término toma diferentes acepciones, desde algo muy general como: “parte o porción que queda de un todo”, hasta algo más específico: “material que queda como inservible después de haber realizado un trabajo u operación” (Real Academia Española, 2017). De acuerdo a lo establecido en la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos residuo es: “material o producto cuyo propietario o poseedor desecha y que se encuentra en estado sólido o semisólido, o es un líquido o gas contenido en recipientes o depósitos, y que puede ser susceptible de ser valorizado o requiere sujetarse a tratamiento o disposición final” (Cámara de Diputados, 2015). El valor del residuo depende de la percepción del generador y del potencial usuario respecto al valor que tienen estos materiales y/o energía en ese contexto y momento. Es por esto que lo que es considerado por alguien como residuo, para otra persona (o en otro momento) es susceptible de aprovechamiento. La tabla 2.1 presenta diferentes definiciones del concepto de residuo.



Tabla 2.1 Definiciones de residuo

Autor	Año	Definición
Worrell	2010	Considera los siguientes tipos o flujos: Residuos sólidos generados por los hogares, incluidos los residuos mixtos no clasificados Reciclables (recogidos o no por separado) Residuos domésticos peligrosos si no se recogen por separado Residuos de jardín (o verdes) originarios de hogares individuales Basura de comunidades, porque el material es producido por individuos Residuos comerciales, ya que con frecuencia contiene muchos de los mismos residuos
Directiva sobre los residuos de la Unión Europea	2008	Cualquier sustancia u objeto del cual su poseedor se desprenda o tenga la intención o la obligación de desprenderse
Masters	2008	Son residuos que no son líquidos o gaseosos, tales como bienes duraderos y no duraderos, envases, paquetes, papeles, instrumentos averiados y residuos orgánicos misceláneos
Pinchtel	2005	Un material sólido posee un valor económico negativo, lo que sugiere que es más barato descartarlo que utilizarlo
Glynn Gary	1999	Aquellos desperdicios que no son transportados por agua y que han sido rechazados porque ya no se van a utilizar
Tchobanoglous	1994	Comprende todos los residuos que provienen de actividades animales y humanas, normalmente son sólidos y se desechan por ser inútiles o superfluos
Agenda 21, Organización de Naciones Unidas (ONU)	1992	Comprende todos los residuos domésticos y los residuos no peligrosos comerciales, institucionales y de la calle y los escombros de la construcción
Acta de Recuperación y Conservación de Recursos de Estados Unidos de América	1976	Cualquier residuo, desecho o lodos procedentes de las plantas de tratamiento de agua, o de una instalación de depuración de aire, y cualquier otro material abandonado, incluyendo los materiales sólidos, semisólidos, líquidos o materiales gaseosos que se encuentren en contenedores cerrados, que sean el resultado de actividades industriales, comerciales, mineras o de la agricultura

Fuente: (Tchobanoglous, 2002), (Masters, 2008) (McKinney, 1998)

Los residuos son originados como resultado del desarrollo de alguna actividad humana. Por ejemplo, en casa para la elaboración de alimentos se consumen productos que no son utilizados en su totalidad y por lo tanto se generan residuos orgánicos, además de los empaques utilizados

para la protección en el transporte de los productos, lo que después de utilizarlo genera residuos inorgánicos. Otro ejemplo, en la elaboración de cualquier producto se utilizan insumos (materiales) y energía, y regularmente existen partes de los insumos que no son aprovechados, también los insumos fueron empacados para su traslado, por lo que, tanto los insumos que ya no se utilizaron como los materiales de empaque que ya cumplieron su función, se convierten en residuos. El tipo de residuos, la cantidad generada y los materiales en específico que se desechan, dependen del origen de la actividad humana, también llamada fuente de generación. La siguiente sección profundiza la relación entre tipo de residuo y fuente de generación.

### **2.1.1 Tipos de residuos y fuentes de generación**

Los residuos generados en las casas son muy diferentes a los generados en comercios, y ambos son diferentes a los generados en la industria de construcción o farmacéutica. Las diferencias se refieren a cuatro aspectos: a) cantidad, b) composición, c) proporción y d) peligrosidad. La cantidad se refiere al peso o volumen generado, para residuos generados en casas regularmente se mide en kilogramos por persona en un día, para otro tipo de residuos las unidades de medida son diversas, pueden ser: toneladas al día por obra, para construcción; toneladas al mes por fábrica, para manufactura; toneladas a la semana por inmueble, para comercio u oficina; o kilogramos por habitación por día, para hospitales o centros turísticos. La composición se refiere a los materiales específicos que son generados por esa fuente o actividad, como ejemplos: alimentos, jardinería, cartón, vidrio, aluminio, plásticos (PET, PEAD, PEBD), sanitarios, textiles, madera, papel, uncel, metales, cementantes, porcelanatos, lodos, esquilmos, vísceras de animal, llantas, refacciones para vehículos, entre muchos otros. La proporción está relacionada con la cantidad de cada material identificado en la composición, es decir, qué porcentaje de cada material está en el total generado por la fuente o actividad generadora. Finalmente, la peligrosidad implica que tenga alguna característica de corrosividad, reactividad química, explosividad, toxicidad, inflamabilidad, o que sea biológico infeccioso.

La cantidad, la composición y la proporción identifican con mayor claridad el origen de los residuos, además de conocer cuántos y de qué tipo son, lo que permite seleccionar las mejores opciones de aprovechamiento. Para ilustrar este punto, los residuos generados en la casa pudieran ser parecidos respecto a la composición de los generados en un pequeño restaurante, ya que se generan residuos de alimentos, plásticos, papel, sanitarios, cartón, latas, envases de seis capas, principalmente; sin embargo, al analizar con detalle, la cantidad y las proporciones tienen un comportamiento diferente, ya que en el pequeño restaurante se tendrá en general una mayor cantidad de los residuos y mayor proporción de materiales muy específicos (orgánicos, plásticos, envases de seis capas, cartón y latas), por lo que los hace diferentes. Otro ejemplo, son dos fuentes de generación similares, supóngase un consultorio particular y una torre de consultorios, en este caso, la composición y probablemente la proporción serán muy similares, sin embargo, la cantidad de residuos es significativamente diferente, por lo que se requieren medidas específicas en cada caso para el aprovechamiento de los residuos. La cantidad, composición y proporción están asociados con la fuente de generación y determinan el tipo de residuo.

La legislación federal en México define los siguientes tipos de residuos (Cámara de Diputados , 2015):

**Residuos de manejo especial:** Son aquellos generados en los procesos productivos, que no reúnen las características para ser considerados como peligrosos o como residuos sólidos urbanos, o que son producidos por grandes generadores de residuos sólidos urbanos.

**Residuos incompatibles:** Aquellos que al entrar en contacto o al ser mezclados con agua u otros materiales o residuos, reaccionan produciendo calor, presión, fuego, partículas, gases o vapores dañinos.

**Residuos peligrosos:** Son aquellos que posean alguna de las características de corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad, o que contengan agentes infecciosos que les confieran peligrosidad, así como envases, recipientes, embalajes y suelos que hayan sido contaminados cuando se transfieran a otro sitio.

**Residuos sólidos urbanos:** Los generados en las casas habitación, que resultan de la eliminación de los materiales que utilizan en sus actividades domésticas, de los productos que consumen y de sus envases, embalajes o empaques; los residuos que provienen de cualquier otra actividad dentro de establecimientos o en la vía pública que genere residuos con características domiciliarias, y los resultantes de la limpieza de las vías y lugares públicos, siempre que no sean considerados por la Ley como residuos de otra índole.

Esta clasificación difiere de la empleada en otros países, por ejemplo, en un estudio comparativo realizado para Australia, España e Inglaterra, se comenta que: El análisis comparativo de la generación y manejo, muestra que Australia e Inglaterra comparten el enfoque con el cual manejan los residuos de Comercio e Industria, siendo este de tipo sectorial. España reconoce la fuente de generación por sectores de Comercio e Industria, sin embargo, la generación y manejo la realiza por flujo o corriente de residuos, lo que no permite tener el detalle por sector generador de Comercio e Industria (Jacintos, 2015). La clasificación en otros países se enfoca de manera directa con el origen de la actividad humana o fuente de generación. Algo parecido se intentó especificar para el caso de los residuos de manejo especial (se reconocerán por las siglas: RME), ya que la ley mexicana propone la clasificación siguiente (Cámara de Diputados , 2015):

- I. Residuos de las rocas o los productos de su descomposición que sólo puedan utilizarse para la fabricación de materiales de construcción o se destinen para este fin, así como los productos derivados de la descomposición de las rocas, excluidos de la competencia federal conforme a la Ley Minera.
- II. Residuos de servicios de salud, generados por los establecimientos que realicen actividades médico-asistenciales a las poblaciones humanas o animales, centros de investigación, con excepción de los biológico-infecciosos.
- III. Residuos generados por las actividades pesqueras, agrícolas, silvícolas, forestales, avícolas, ganaderas, incluyendo los residuos de los insumos utilizados en esas actividades.
- IV. Residuos de los servicios de transporte, así como los generados a consecuencia de las actividades que se realizan en puertos, aeropuertos, terminales ferroviarias y portuarias y en las aduanas.
- V. Lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales.

- VI. Residuos de tiendas departamentales o centros comerciales generados en grandes volúmenes.
- VII. Residuos de la construcción, mantenimiento y demolición en general.
- VIII. Residuos tecnológicos provenientes de las industrias de la informática, fabricantes de productos electrónicos o de vehículos automotores y otros que, al transcurrir su vida útil, por sus características, requieren de un manejo específico.
- IX. Pilas que contengan litio, níquel, mercurio, cadmio, manganeso, plomo, zinc, o cualquier otro elemento que permita la generación de energía en las mismas, en los niveles que no sean considerados como residuos peligrosos en la norma oficial mexicana correspondiente.
- X. Los neumáticos usados, y
- XI. Otros que determine la SEMARNAT de común acuerdo con las entidades federativas y municipios, que así lo convengan para facilitar su gestión integral<sup>4</sup>.

Para fines operativos esta clasificación resulta difícil de aplicar, ya que en algunos casos se traslapan tipos de residuos con fuentes de generación. La clasificación utilizada en Australia e Inglaterra, por tipos de sectores económicos generadores, se considera más clara y de mayor eficiencia operativa (Jacintos, 2015). Los temas legales y normativos se detallarán en la sección 2.2 Leyes y reglamentos en la materia.

La tabla 2.2 muestra los tipos de residuos definidos por la legislación mexicana, con sus respectivas fuentes de generación primaria y secundaria. Las fuentes de generación han sido identificadas considerando el origen de la actividad humana, la cual está dividida en dos grandes tipos: doméstica y económica. La doméstica se integra por vivienda unifamiliar y plurifamiliar. Las actividades económicas integran todas aquellas que se consideran para estudios de estadística nacional: primarias, secundarias y terciarias, conforme la clasificación de INEGI.

---

<sup>4</sup> Conjunto articulado e interrelacionado de acciones normativas, operativas, financieras, de planeación, administrativas, sociales, educativas, de monitoreo, supervisión y evaluación, para el manejo de residuos, desde su generación hasta la disposición final, a fin de lograr beneficios ambientales, la optimización económica de su manejo y su aceptación social, respondiendo a las necesidades y circunstancias de cada localidad o región (Cámara de Diputados, 2015).

Tabla 2.2 Tipo de residuos y fuentes de generación

Tipo de residuo	Principal fuente de generación <sup>2</sup>	Fuentes de generación secundaria
Residuos de manejo especial <sup>1</sup> (RME)	Comercio al por menor Industrias manufactureras Comercio al por mayor Generación, transmisión y distribución de energía eléctrica, suministro de agua y de gas por ductos al consumidor final Servicios de alojamiento temporal y de preparación de alimentos y bebidas Servicios de apoyo a los negocios y manejo de desechos y servicios de remediación Transportes, correos y almacenamiento Servicios de salud y de asistencia social Construcción Agricultura, cría y explotación de animales Minería	Servicios educativos Servicios gubernamentales Servicios financieros y de seguros Servicios profesionales, científicos y técnicos Información en medios masivos Servicios inmobiliarios y de alquiler de bienes muebles e intangibles Servicios de esparcimiento culturales y deportivos, y otros servicios recreativos Otros servicios excepto actividades gubernamentales
Residuos incompatibles (RI)	Industrias manufactureras Generación, transmisión y distribución de energía eléctrica, suministro de agua y de gas por ductos al consumidor final Minería	Servicios profesionales, científicos y técnicos Servicios de salud y de asistencia social Construcción
Residuos peligrosos (RP)	Industrias manufactureras Generación, transmisión y distribución de energía eléctrica, suministro de agua y de gas por ductos al consumidor final Minería Servicios profesionales, científicos y técnicos Servicios de salud y de asistencia social Construcción	Servicios educativos Información en medios masivos Servicios de apoyo a los negocios y manejo de desechos y servicios de remediación Transportes, correos y almacenamiento
Residuos sólidos urbanos (RSU)	Vivienda unifamiliar y plurifamiliar	Comercio al por menor Servicios de alojamiento temporal y de preparación de alimentos y bebidas

Notas: 1. Para los RME la NOM-161-SEMARNAT-2011 establece que deben ser gestionados conforme los flujos de residuos para aquellas actividades económicas estatales que sean más representativas. 2. La definición de los sectores generadores está basada en la de INEGI, que a su vez se basa en la Clasificación Internacional Uniforme de Todas las Actividades Económicas (CIU). 3. Los residuos del sector minero tiene una clasificación y normativa adicional a la expuesta, en esta tabla solamente se listan, pero su análisis queda fuera del alcance del libro.

Fuente: adaptación basada en (Universidad Autónoma de Aguascalientes, 2010) y (UNAM, 2014).

Los RSU son aquellos que tienen características domiciliarias. Esto se define como la caracterización de los residuos considerando una fuente de generación domiciliaria. Es decir, la cantidad, la composición y la proporción promedio generadora por actividades de la población en vivienda unifamiliar y plurifamiliar. Conforme la información más reciente respecto a caracterización en el país (SEMARNAT, 2012), las características domiciliarias se presentan en la figura 2.1, la cual está integrada por tres principales grupos de residuos: a) susceptibles de aprovechamiento (39.57%), b) orgánicos (37.97%) y c) otros (22.46%). Debe entenderse que estas características tendrán variaciones en cada país, estado, región, municipio y localidad, por lo que para mayor precisión se recomienda la realización del *Estudio de generación*, como se detalla en el Capítulo 3 de este libro.

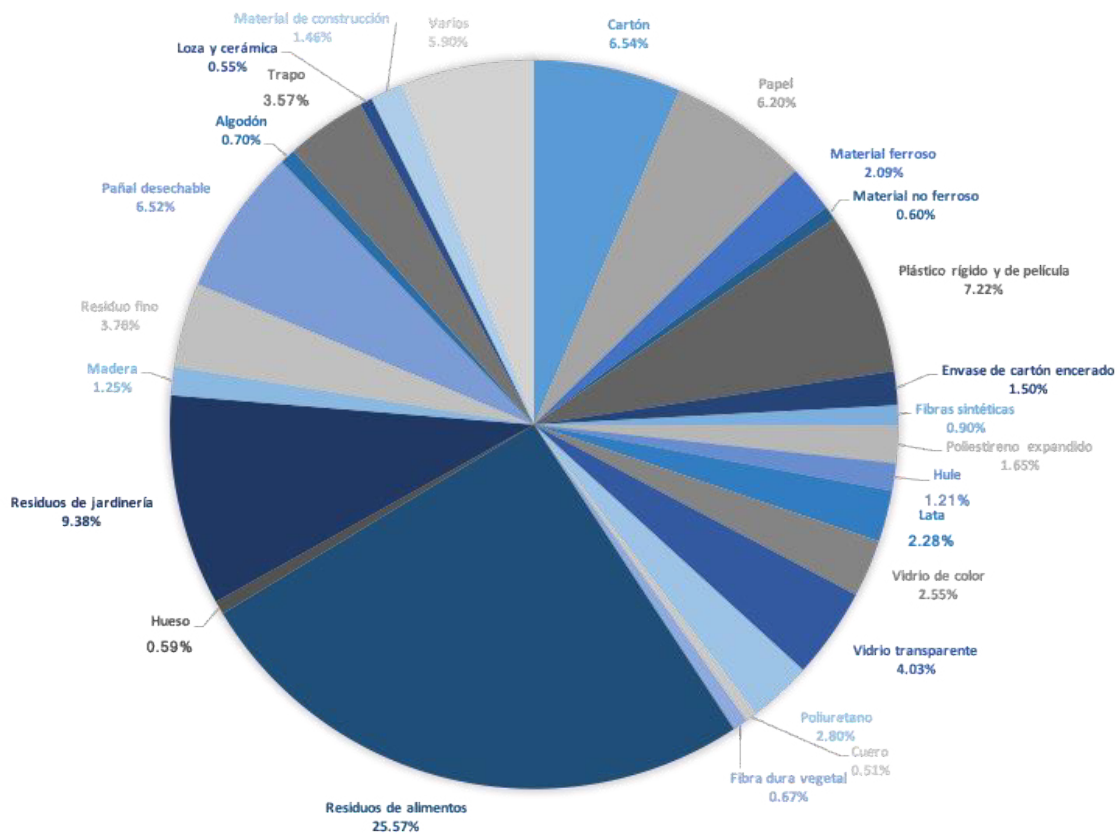


Figura 2.1 Características domiciliarias de RSU, promedio en México  
Fuente: adaptado de (SEMARNAT, 2012)

Los estudios de generación de residuos en municipios o localidades permiten su identificación en el momento en que se realizan. Cada localidad genera RSU en diferente cantidad, composición y proporción, dependiendo de factores económicos, de consumo, sociales y culturales, sin embargo, por su origen domiciliario (viviendas, hogares y pequeños negocios) las características de los residuos son similares. Con mucha frecuencia, cuando se realizan los estudios de generación locales, se ha encontrado que en los RSU se llegan a mezclar otros tipos de residuos como RME, RI y RP, lo cual implica un manejo no adecuado de los RSU. Los tipos de residuos deben ser



gestionados por diferentes autoridades, la legislación define las competencias de los tres niveles de gobierno para realizar estas actividades. La siguiente sección del capítulo hace una revisión de la legislación mexicana en el tema de residuos.



### Actividad 2.1

#### *Investigación de fuentes de generación y tipos de residuos.*

**Realiza una investigación de campo en la cual documentes de manera gráfica y escrita las fuentes de generación y los tipos de residuos identificados.**

## 2.2 Leyes y reglamentos en la materia

La labor del ingeniero civil se orienta y ajusta a lo establecido en documentos oficiales, que dictan la distribución de competencias, obligaciones, procedimientos y límites máximos permisibles. Las distintas etapas de un proyecto de un sistema de manejo de residuos sólidos urbanos están consideradas en la legislación y normatividad nacional, por ende, el conocimiento de su existencia y contenidos es primordial.

Los documentos oficiales a los que se refiere este libro se encuentran en distintos niveles jurídicos. Estos niveles obedecen a una categorización por la especificidad de la información más que a su importancia. Con el fin de estructurar esta información, se establece que el término legislación se refiere a las constituciones, leyes y reglamentos; el término normatividad, a las normas oficiales mexicanas (NOM) y a las normas mexicanas (NMX).

### 2.2.1 Legislación

Toda ley, reglamento o norma tiene su origen en lo establecido en la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. Ésta, en el contexto del equilibrio ecológico, establece en su Art. 4º que: “toda persona tiene derecho a un medio ambiente sano para su desarrollo y bienestar (...). El daño y deterioro ambiental generará responsabilidad para quien lo provoque en términos de lo dispuesto por la ley. Por otra parte, establece que es facultad del Congreso la emisión de Leyes que establezcan la concurrencia de los tres órdenes de gobierno en el ámbito de sus respectivas competencias en materia de protección al ambiente y de preservación y restauración del equilibrio ecológico. En ese sentido existen dos leyes que regulan lo referente al manejo de RSU: la Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) y la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR). A continuación, se describe brevemente su contenido.

#### **Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente**

La LGEEPA es una ley federal que establece políticas ambientales y distribuye competencias entre los distintos órdenes de gobierno.

Una de las políticas ambientales está declarada en el Art. 134, el cual establece que, como medida para evitar la contaminación de suelos, es necesario prevenir y reducir la generación de residuos sólidos,

municipales e industriales; incorporar técnicas y procedimientos para su reúso y reciclaje, así como regular su manejo y disposición final eficientes.

Esta ley establece, en su Art. 8º, que los municipios son los encargados de la aplicación de las disposiciones jurídicas relativas a la prevención y control de los efectos sobre el ambiente ocasionados por la generación, transporte, almacenamiento, manejo, tratamiento y disposición final de los residuos sólidos e industriales que no estén considerados como peligrosos.

Además, establece en su Art. 137 que queda sujeto a la autorización de los Municipios o del Distrito Federal, conforme a sus leyes locales en la materia y a las Normas Oficiales Mexicanas que resulten aplicables, el funcionamiento de los sistemas de recolección, almacenamiento, transporte, alojamiento, reúso, tratamiento y disposición final de residuos sólidos municipales. La SEMARNAT expedirá las normas a que deberán sujetarse los sitios, el diseño, la construcción y la operación de las instalaciones destinadas a la disposición final de residuos sólidos municipales.

### **Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos**

Su acrónimo es LGPGIR. Establece toda la política en materia de gestión integral de residuos sólidos y su manejo. Se estructura como se muestra en la figura 2.2.

Su objetivo y ámbito de aplicación está establecido en el artículo 1. Principalmente se orienta hacia la reglamentación de las disposiciones de la Constitución que tienen que ver con la protección del ambiente en materia de prevención y gestión integral de residuos. Principalmente lo necesario para garantizar un ambiente adecuado y propiciar el desarrollo sustentable a través de la prevención de la generación de residuos y la posible contaminación de sitios. En caso de generación, el adecuado manejo integral que incluya la valorización, la creación de mercados de subproductos y la remediación de los sitios afectados.

Esta ley establece los criterios que rigen la política ambiental necesaria para formular los distintos instrumentos para establecer el manejo de los residuos, tales como los planes y programas de manejo; establece las competencias y concurrencias de los distintos órdenes de gobierno en esta materia, además de las responsabilidades de los distintos actores en la generación y manejo de residuos. Establece las características clasificatorias de los distintos tipos de residuos, su exportación e importación; regula la generación y manejo integral de los residuos peligrosos. Finalmente incluye las medidas para garantizar el cumplimiento y aplicación de la ley, así como la imposición de sanciones correspondientes.

**T.1 Disposiciones Generales**

- Capítulo único: Objeto y ámbito de aplicación de la ley

**T.2 Distribución de competencias y coordinación**

- Capítulo único: Atribuciones de los tres órdenes y coordinación entre dependencias

**T.3 Clasificación de los residuos**

- Capítulo único: Fines, criterios y bases generales

**T.4 Instrumentos de la política de prevención y gestión integral de los residuos**

- Capítulo I: Programas para la prevención y gestión integral de los residuos
- Capítulo II: Planes de Manejo
- Capítulo III: Participación social
- Capítulo IV: Derecho a la Información

**T.5 Manejo de residuos peligrosos**

- Capítulo I: Disposiciones generales
- Capítulo II: Generación de residuos peligrosos
- Capítulo III: De las autorizaciones
- Capítulo IV: Manejo integral de los residuos peligrosos
- Capítulo V: Responsabilidad acerca de la contaminación y remediación de sitios
- Capítulo VI: La prestación de servicios en materia de residuos peligrosos
- Capítulo VII: Importación y exportación de residuos peligrosos

**T.6 Prevención y manejo integral de RSU y RME**

- Capítulo único

**T.7 Medidas de control y de seguridad, infracciones y sanciones**

- Capítulo I: Visitas de inspección
- Capítulo II: Medidas de seguridad
- Capítulo III: Infracciones y sanciones administrativas
- Capítulo IV: Recursos de revisión y denuncia popular

Figura 2.2. Estructura de la LGPGIR. Fuente: (Cámara de Diputados , 2015)

La LGPGIR cuenta con un reglamento, el cual establece con mayor especificidad información relacionada con los criterios para la generación de planes de manejo de residuos; criterios y procedimientos para los residuos del sector hidrocarburos; criterios, disposiciones y procedimientos para el manejo de los residuos peligrosos, así como la remediación de los sitios contaminados con los mismos.

También existen las leyes estatales, las cuales siempre serán más estrictas y más específicas que las leyes federales, a fin de que ningún orden jurídico sea pasado por alto. Haciendo un análisis de la cantidad de leyes estatales en México, se observa un rezago en las mismas. Pocas son las entidades federativas que han tenido la iniciativa de establecer los lineamientos propios de su entidad mediante un reglamento que surja de las leyes estatales. La legislación en este nivel es importante, ya que detallan el manejo de los residuos de manejo especial.

Tabla 2.3 Listado de leyes estatales y su respectivo reglamento por orden alfabético.

LEY / ESTADO	REGLAMENTO
Ley de Protección Ambiental para el Estado de Aguascalientes	En la ley dentro del CAPÍTULO IV Prevención y Control de la Contaminación del Suelo SECCIÓN I y SECCIÓN II se habla de los residuos sólidos no peligrosos
Ley de Prevención y Gestión Integral de Residuos Sólidos para el Estado de Baja California	sin reglamento
Ley de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente de Baja California Sur	sin reglamento
Ley para la Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos y de Manejo Especial para el Estado de Campeche	sin reglamento
Ley Ambiental para el Estado de Chiapas	sin reglamento
Ley Ecológica del Estado de Chihuahua	sin reglamento
Ley de Residuos del Estado de Coahuila	sin reglamento
Ley de Residuos Sólidos para el Estado de Colima	sin reglamento
Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal	Reglamento de la Ley de Residuos
Ley de Prevención y Gestión Integral del Estado de Durango	SIN REGLAMENTO
Código Administrativo del Estado de México	NORMA TÉCNICA ESTATAL AMBIENTAL NTEA-010-SMA-RS 2008. Que establece los requisitos y especificaciones para la instalación, operación y mantenimiento de infraestructura para el acopio, transferencia, separación y tratamiento de residuos sólidos urbanos y de manejo especial, para el Estado de México.
	NORMA TÉCNICA ESTATAL AMBIENTAL NTEA-011-SMA-RA-2008 Que establece los requisitos para el manejo de los residuos de la construcción para el Estado de México.
Ley de Gestión Integral de Residuos del Estado y Municipios de Guanajuato	Reglamento de la Ley de Gestión Integral de Residuos para el Estado y Municipios de Guanajuato
Ley No. 878 del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente del Estado de Guerrero	SIN REGLAMENTO
Ley de Protección Ambiental del Estado de Hidalgo	Reglamento Municipal de Protección Ambiental de Tula Reglamento de Protección Ambiental de Cuauhtepic Reglamento de Protección Ambiental de Tepehuacan
Ley de Gestión Integral de los Residuos del Estado de Jalisco	SIN REGLAMENTO
Ley Ambiental y de Protección al Patrimonio Natural del Estado de Michoacán	SIN REGLAMENTO
Ley de Residuos de Morelos	SIN REGLAMENTO
Ley Estatal de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente de Nayarit	SIN REGLAMENTO
Ley Ambiental de Nuevo León	Reglamento de la Ley Ambiental de Nuevo León
Anteproyecto de la Ley de Gestión Integral de Residuos del Estado de Oaxaca	SIN REGLAMENTO
Ley de Residuos de Puebla	SIN REGLAMENTO
Ley de Prevención y Gestión Integral de Quintana Roo	SIN REGLAMENTO
Ley de Residuos de Querétaro	SIN REGLAMENTO
Ley de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente del Estado de Sinaloa	SIN REGLAMENTO
Ley Ambiental del Estado de San Luis Potosí	Reglamento de la Ley Ambiental del Estado de San Luis Potosí en Materia de Residuos Industriales No Peligrosos
Ley del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente del Estado de Sonora	SIN REGLAMENTO
Ley de Protección Ambiental del Estado de Tabasco	Reglamento de la Ley de Protección Ambiental del Estado de Tabasco
Ley de Protección Ambiental del Estado del Tamaulipas	SIN REGLAMENTO
Ley de Ecología y Protección Ambiental del Estado de Tlaxcala	Reglamento de Residuos Sólidos No Peligrosos del Estado de Tlaxcala
Ley 847 de Residuos Sólidos Urbanos para el Estado de Veracruz	SIN REGLAMENTO
Ley de Protección Ambiental del Estado de Yucatán	Reglamento de Protección Ambiental del Estado de Yucatán Reglamento de Limpia y Residuos Sólidos no peligrosos en Conkal, Yucatán Reglamento de Manejo Integral de Residuos Sólidos de Sacalum, Yucatán
Ley de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en el Estado de Zacatecas	SIN REGLAMENTO

## 2.2.2 Normatividad

### Normas oficiales mexicanas (NOM)

En México existen varias normas oficiales mexicanas en materia de residuos emitidas por SEMARNAT y por la Secretaría de Comercio y Fomento Industrial (SECOFI). Aquellas emitidas por SEMARNAT abundan en los temas de los residuos de manejo especial (RME) y residuos peligrosos (RP). Recuérdese que los RME y RP, debido a su volumen, características y composición, no pueden manejarse como los RSU, y en el caso particular de los RP, tendrán que someterse a tratamiento y, en su caso, valorización para su posterior disposición.

Las normas establecidas por SEMARNAT en materia de residuos se enlistan en la tabla 2.4.

Tabla 2.4 Normas oficiales mexicanas en materia de disposición final de residuos

NORMA OFICIAL MEXICANA/SEMARNAT	DESCRIPCIÓN
NOM-004-SEMARNAT-2002	Protección ambiental-lodos y biosólidos-especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final
NOM-O52-SEMARNAT-2005	Que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos
NOM-O53-SEMARNAT-1993	Que establece el procedimiento para llevar a cabo la prueba de extracción para determinar los constituyentes que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente
NOM-O54-SEMARNAT-1993	Que establece el procedimiento para determinar la incompatibilidad entre dos o más residuos considerados como peligrosos por la Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005
NOM-O55-SEMARNAT-2003	Que establece los requisitos que deben reunir los sitios que se destinarán para un confinamiento controlado de residuos peligrosos previamente estabilizados
NOM-O56-SEMARNAT-1993	Que establece los requisitos para el diseño y construcción de las obras complementarias de un confinamiento controlado de residuos peligrosos
NOM-O57-SEMARNAT-1993	Que establece los requisitos que deben observarse en el diseño, construcción y operación de celdas de un confinamiento controlado para residuos peligrosos
NOM-O58-SEMARNAT-1993	Que establece los requisitos para la operación de un confinamiento controlado de residuos peligrosos
NOM-083-SEMARNAT-2003	Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial
NOM-087-SEMARNAT-SSA1-2002	Protección ambiental-salud ambiental residuos peligrosos biológico-infecciosos-clasificación y especificaciones de manejo
NOM-098-SEMARNAT-SSA1-2002	Protección ambiental-Incineración de residuos, especificaciones de operación y límites de emisión de contaminantes
NOM-133-SEMARNAT-SSA1-2000	Protección ambiental-Bifenilos policlorados (BPC's)-Especificaciones de manejo
NOM-141-SEMARNAT-2003	Que establece el procedimiento para caracterizar los jales, así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y postoperación de presas de jales
NOM-145-SEMARNAT-2003	Confinamiento de residuos en cavidades construidas por disoluciones en domos salinos geológicamente estables
NOM-157-SEMARNAT-2009	Que establece los elementos y procedimientos para instrumentar planes de manejo de residuos mineros
NOM-159-SEMARNAT-2009	Que establece los requisitos de protección ambiental de los sistemas de lixiviación de cobre
NOM-161-SEMARNAT-2011	Que establece los criterios para clasificar a los Residuos de Manejo Especial y determinar cuáles están sujetos a Plan de Manejo.

Tomada de (SEMARNAT, 2016)

### Normas mexicanas (NMX)

Por otra parte, las normas establecidas por SECOFI primordialmente establecen procedimientos de pruebas físicas y químicas. La tabla 2.5 enlista las normas establecidas por SECOFI en materia de residuos.

Tabla 2.5 Normas mexicanas emitidas por SECOFI en materia de disposición de residuos.

NORMA MEXICANA/SECOFI	DESCRIPCIÓN
NMX-AA-015-1985	Protección al ambiente - Contaminación del suelo – Residuos sólidos municipales – Muestreo-Método de cuarteo
NMX-AA-016-1984	Protección al ambiente - Contaminación del suelo - Residuos sólidos municipales - Determinación de humedad.
NMX-AA-18-1984	Protección al ambiente-Contaminación de suelo- Residuos sólidos, municipales- Determinación de cenizas
NMX-AA-019-1985	Protección al ambiente -Contaminación del suelo-Residuos sólidos municipales - Peso volumétrico "In situ"
NMX-AA-021-1985	Protección al ambiente -Contaminación del suelo-Residuos sólidos municipales- Determinación de materia orgánica
NMX-AA-022-1985	Protección al ambiente -Contaminación del suelo-Residuos sólidos municipales-Selección y cuantificación de subproductos
NMX-AA-24-1984	Protección al ambiente -Contaminación del suelo-Residuos sólidos municipales - Determinación de nitrógeno total
NMX-AA-25-1984	Protección al ambiente -Contaminación del suelo-Residuos sólidos-Determinación del pH método potenciométrico
NMX-AA-31-1976	Determinación de azufre en desechos sólidos
NMX-AA-32-1976	Determinación de fósforo total en desechos sólidos (método del fosfavanadomolibdato)
NMX-AA-033-1985	Protección al ambiente - Contaminación del suelo-Residuos sólidos municipales- Determinación del poder calorífico superior
NMX-AA-052-1985	Protección al ambiente -Contaminación del suelo-Residuos sólidos municipales - Preparación de muestras en el laboratorio para su análisis
NMX-AA-061-1985	Protección al ambiente - Contaminación del suelo-Residuos sólidos municipales - Determinación de la generación
NMX-AA-067-1985	Protección al ambiente -Contaminación del suelo-Residuos sólidos municipales- Determinación de la relación carbono / nitrógeno
NMX-AA-068-1986	Protección al ambiente -Contaminación del suelo-Residuos sólidos municipales- Determinación de hidrógeno a partir de materia orgánica
NMX-AA-080-1986	Contaminación del suelo - Residuos sólidos municipales-Determinación del porcentaje de oxígeno en materia orgánica
NMX-AA-091-1987	Calidad del suelo – Terminología.
NMX-AA-092-1984	Protección al ambiente -Contaminación del suelo-Residuos sólidos municipales- Determinación de azufre.
NMX-AA-094-1985	Protección al ambiente -Contaminación del suelo-Residuos sólidos municipales - Determinación de fósforo total.

(SEMARNAT, [www.gob.mx](http://www.gob.mx), 2019)





**Actividad 2.2.**

***Consulta y aplicación de la legislación y normatividad***

Con base en la información propuesta de dos casos reales indique la legislación y normatividad que deberán consultarse.

## **2.3 Composición física. Normas oficiales mexicanas para la determinación de las características físicas**

Las características físicas, químicas y biológicas de los residuos sólidos municipales (RSM) dependen del tipo de residuo y de la fuente que los genera (ver apartado 2.1). La caracterización es el punto de partida para la planeación y diseño de los elementos que integran a un sistema de manejo de RSM. Además, permite identificar las transformaciones que los residuos tendrán durante el manejo, sobre todo la cantidad y características de los productos que se generarán durante la vida útil del relleno sanitario (RS), principalmente el biogás y lixiviados.

De forma muy similar al agua, la caracterización de los residuos se subdivide en la determinación de las características físicas, químicas y biológicas (ver figura 2.3). Cada una de las propiedades de los residuos se describe en los siguientes apartados.

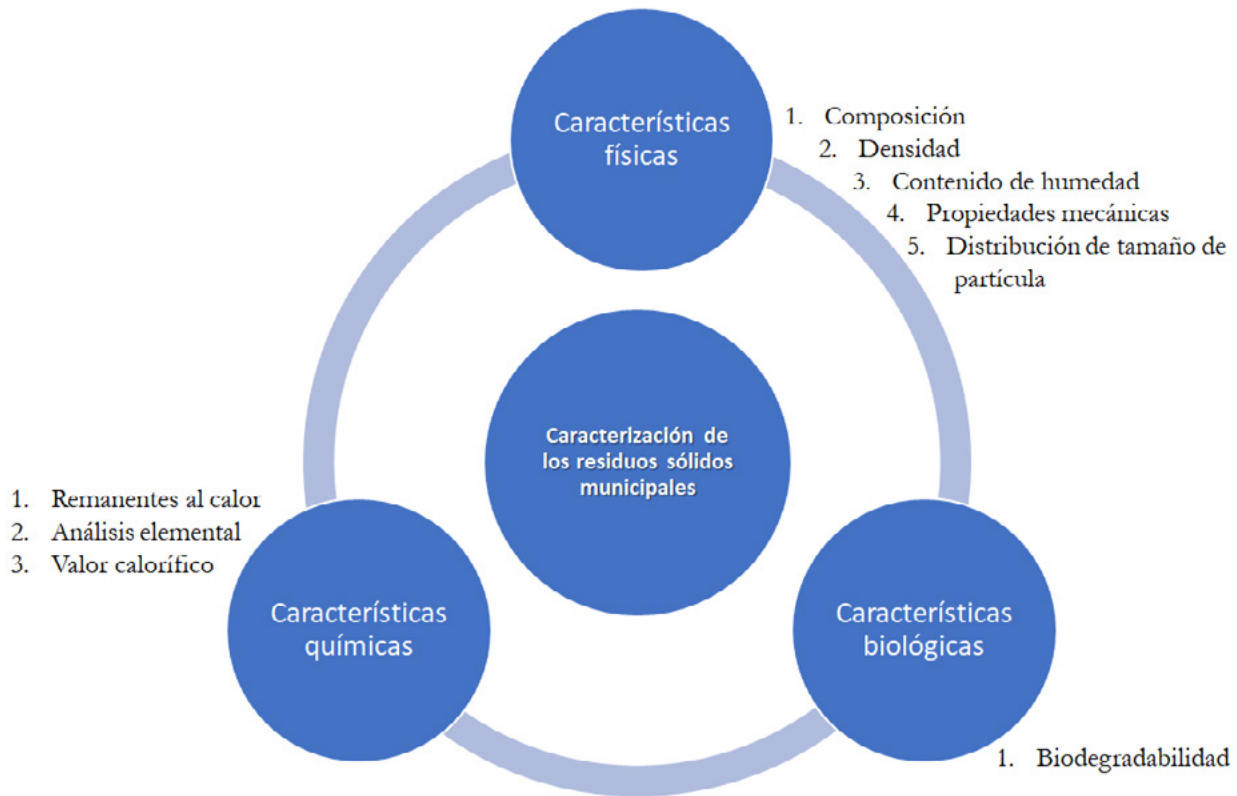


Figura 2.3. Características de los RSM

## 2.3.1 Características físicas

Se basan en la determinación del tipo de materiales que integran a los RSM y sus propiedades (densidad, proporción, tamaño y resistencia). Estas corresponden a las de una mezcla ideal homogénea de residuos y que es representativa de los residuos generados por la población en estudio. Cada una de las características físicas de los RSM se describe en los siguientes apartados.

### Composición

Se refiere a la determinación de los materiales que integran a los residuos y sus proporciones. En el contexto de los residuos, a estos componentes se les suele llamar de distintas formas; en México la normatividad establece el término **subproducto**, y lo define como: “*Los diversos componentes físicos de los residuos sólidos municipales, susceptibles de ser recuperados*”.

Los subproductos que integran a los RSM son diversos, tanto como lo son los materiales de los productos en el mercado. Además, las proporciones de éstos en la mezcla evolucionan con el mismo dinamismo que lo hacen los materiales y productos que la sociedad utiliza. Esto obedece a tendencias del mercado y al modelo y capacidad económica del momento. Otro factor de evolución en la composición es la industrialización y una variación estacional en la composición, que obedece a hábitos y festividades.

Si con el fin de identificar las proporciones de los subproductos que integran a los RSM se optara por un análisis exhaustivo, se integraría una larga lista de componentes (decenas), tan extensa que haría impráctica y costosa su determinación, y no justificable en términos económicos. Para hacer más ágil este proceso, se puede agrupar a los subproductos en una clasificación más compacta, por ejemplo, el listado de subproductos establecido en el epígrafe 5 de la NMX AA 022 1985. El listado incluye los siguientes subproductos:

1 Algodón, 2 Cartón, 3 Cuero, 4 Residuo fino que pase la criba M 200, 5 Envase en cartón encerado, 6 Fibra dura, vegetal (esclerénquima), 7 Fibras sintéticas, 8 Hueso, 9 Hule, 10 Lata, 11 Loza y cerámica, 12 Madera, 13 Material, de construcción, 14 Material ferroso, 15 Material no-ferroso, 16 Papel, 17 Pañal desechable, 18 Plástico de película, 19 Plástico rígido, 20 Poliuretano, 21 Poliestireno expandido, 22 Residuos alimenticios, 23 Residuos de jardinería, 24 Trapo, 25 Vidrio de color, 26 Vidrio transparente, 27 Otros.

En México, dada las características de la población y los hábitos de disposición de residuos, se presenta la composición promedio que se muestra en la figura 2.4. Ésta ha variado en las últimas décadas, siendo notable la disminución en un 70% de la cantidad de residuos orgánicos producidos, alcanzando para el 2012 un porcentaje de 52.4% (SEMARNAT, Programa Nacional para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos 2009-2012, 2008)

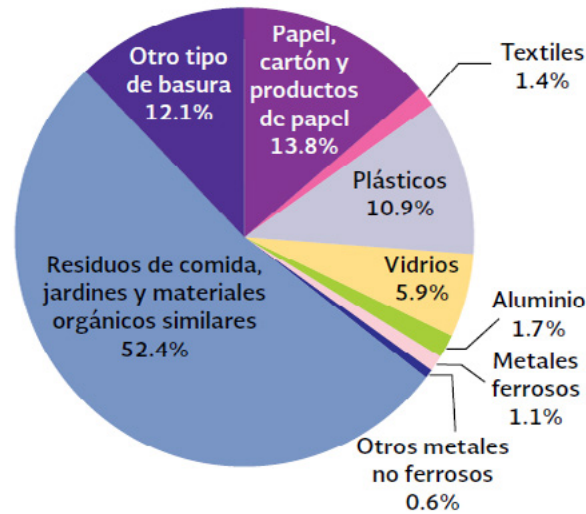


Figura 2.4 Composición promedio de RSM en México. Fuente: Dirección General de Equipamiento e Infraestructura en Zonas Urbano-Marginadas. (SEMARNAT, Programa Nacional para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos 2009-2012, 2008)

Para efectuar la determinación de las proporciones de cada tipo de residuo se deberá atender lo establecido en las normas NMX-AA-15-1985 (Muestreo – Método de cuarteo) y la NMX-AA-22-1985 (Selección y cuantificación de subproductos). Dichas normas son secuenciales y establecen los procedimientos para integrar una mezcla homogénea y representativa de los RSM generados por la población.

A continuación, se resumen los pasos a seguir para la determinación de la composición física, acorde con la normatividad citada.

### **Integración de la muestra representativa**

NMX-AA-15-1985 (Muestreo – Método de cuarteo)

1. Con base en lo establecido en la NMX-AA-61-1985, realizar la recolección de muestras que forman parte del estudio de generación (ver apartado 3.2).
2. Al menos tres personas deberán extraer el contenido de no más de 250 bolsas producto del estudio de generación.
3. El contenido de dichas bolsas se vacía, formando un solo montículo sobre un área plana horizontal de 4 m x 4 m de cemento pulido o similar, en un lugar cerrado y bajo techo.
4. El montón formado se patea hasta integrar una mezcla homogénea.
5. Alcanzada esta situación el montón formado se divide en cuatro partes iguales y se separan formando un cuadrado (cada montículo es una esquina). A continuación, deberán eliminarse del ensayo dos montículos en esquinas contrarias.
6. Los montículos que quedan se reintegran en un solo, y se repiten los pasos 4 y 5 de esta lista hasta que el montículo final tenga un peso mínimo de 50 kg, la que será entonces la muestra homogénea representativa, que se separará en los subproductos establecidos.

**Integración de la muestra representativa**

NMX-AA-22-1985 (Selección y cuantificación de subproductos)

---

1. Se separan los residuos por tipo de subproducto y se depositan en bolsas de polietileno, acorde con la clasificación de 27 subproductos listada previamente.
  2. Se registra el peso de cada subproducto.
  3. Se calcula el porcentaje de cada subproducto como la fracción del peso de cada bolsa sobre el peso total de la muestra (suma de todos los pesos).
  4. Se reportan los datos en el formato oficial establecido en el apéndice de dicha norma.
- 

Hasta el momento el muestreo manual sigue siendo el método más exacto y económico para la determinación de la composición. Se estima que en el futuro la fotogrametría podría representar una alternativa competitiva en ese sentido.

**Actividad 2.3.*****Cuestionario del video “Composición de residuos de Cataluña”***

**Con base en el análisis del video y las fuentes de información sugeridas, contestas las preguntas.**

**Densidad de los RSM**

Para la adecuada elección del equipo de recolección, dimensionamiento de las estaciones de transferencia, determinación de la frecuencia de la recolección, predicción de la vida útil o dimensionamiento del RS, se requerirá conocer la densidad que tendrán los RSM en cada etapa del sistema de manejo.

La densidad de los RSM depende del elemento del sistema en el que estos se encuentren. Desde que se originan y se colocan en el almacenamiento *in situ* adquieren una densidad, que principalmente depende de la composición y de los hábitos de vertido (compactación manual). Acorde con (Worrell, 2010), durante el almacenamiento *in situ* los RSM adquieren densidades que oscilan entre los 90 kg/m<sup>3</sup> a los 150 kg/m<sup>3</sup>. Posteriormente, durante la recolección, la densidad aumenta a cerca de 400 kg/m<sup>3</sup>, en mayor medida si el vehículo recolector posee mecanismos de compactación. Finalmente, cuando el residuo es dispuesto en un relleno sanitario (RS) y es compactado, previo a la colocación del material de cobertura, alcanzará densidades cercanas a los 700 kg/m<sup>3</sup>.

### Recuadro 2.1

#### Aplicación de la fotogrametría para la determinación de la composición física

La dificultad (por no decir la naturaleza poco atractiva del trabajo) del muestreo manual, ha impulsado durante algún tiempo, la necesidad de una mejor y más segura forma de obtener datos de la composición de desechos sólidos. Uno de los procedimientos candidatos como sustituto del muestreo manual es una técnica fotogramétrica, la que implica fotografiar una porción representativa de basura y el posterior análisis de la fotografía. La fotografía debe tomarse directamente de la basura (ángulo de 90°) con una lente gran angular. La imagen se proyecta en una pantalla dividida en una malla aproximada de 10 x 10 bloques. Los componentes en cada intersección de la cuadrícula son identificados y tabulados. Usando densidades aparentes predeterminadas (que incluyen espacio interior, por ejemplo, la de una lata de bebida), se calcula entonces la fracción en peso.

La técnica fotogramétrica tiene dos desventajas. La primera, su precisión depende de las densidades aparentes, que deben ser ajustadas. Sin embargo, se ha encontrado que esta técnica es bastante precisa. La segunda desventaja es que el tiempo requerido para analizar una imagen es sustancial, y puede ser más rápido simplemente clasificar los materiales manualmente y pesar las muestras. La técnica tiene una ventaja importante: los desechos no necesitan ser tocados ni oídos, y, por lo tanto, no hay problemas con la transmisión de enfermedades.

La fotogrametría también puede ser útil para los residuos de manejo especial. Por ejemplo, los de la construcción y demolición, que tienen un número limitado de componentes, tomando fotos de grandes cantidades de desechos de estos residuos puede ser mucho más efectivo (por no decir más seguro) que seleccionar a mano.

Adaptado de (Worrell, 2010)

La determinación de la densidad ocurre de forma secuencial y en ocasiones paralela al procedimiento de cuantificación de subproductos. El procedimiento para la determinación de la densidad de los residuos inicia con la cuantificación del peso de un volumen establecido, mediante dinamómetros o básculas. El procedimiento establecido en la NMX-AA-19-1985, la cual puede consultarse en el sitio web de la Secretaría de Comercio y Fomento Industrial (SECOFI). Finalmente, la densidad puede obtenerse del peso volumétrico, al dividirlo entre el valor de la aceleración de la gravedad local. Cabe destacar que a lo largo de este texto se utilizará indistintamente a la densidad y al peso volumétrico, que aunque no tienen el mismo valor son equivalentes, en tanto no cambie el valor de la gravedad.

Los pasos para la determinación del peso volumétrico *in situ*, se resumen en el siguiente listado:

1. Con base en lo establecido en la NMX AA 15 1985, se realiza el método de cuarteo. El primer conjunto de residuos eliminados del primer cuarteo son los que se utilizarán.
2. Se pesa un tambo metálico limpio y libre de abolladuras (tara).

3. Se llena el tambo hasta el tope.
  4. Entre dos personas se eleva el tambo lleno a una altura de 10 cm y se deja caer 3 veces.
  5. Dado que en el procedimiento anterior los residuos se compactan, se rellena el tambo hasta el tope.
  6. Se pesa el tambo lleno. A este valor se le resta la tara. El resultado se divide entre el volumen del tambo (casi siempre 200 litros), obteniéndose así el peso volumétrico.
- 

### Contenido de humedad

Se refiere a la cantidad de agua, medida en porcentaje, que poseen los RSM. La determinación de la humedad es de interés en la mezcla de RSM y de cada subproducto, sobre todo de aquellos que son susceptibles de una valorización, particularmente la térmica, ya que el agua que poseen demandaría energía adicional para su aprovechamiento.

El contenido de humedad de los RSM depende de su composición, la humedad propia del material que integra a cada subproducto y de factores externos, tales como las condiciones climáticas del sitio y de exposición al medio. Cada subproducto presenta un rango de valores de contenido de humedad (ver tabla 2.6).

Un factor externo que afecta al contenido de humedad de los RSM es la precipitación pluvial, inclusive ésta puede duplicarla. Durante el manejo también se puede modificar el contenido de humedad, ya que cualquier parte del sistema que involucre un tiempo de permanencia conllevará reacciones físicas en las que estarán involucrados los residuos, tales como la decantación de líquidos, transferencia de humedad entre subproductos, interacción con la atmósfera, entre otros, lo que modifica constantemente esta característica.

Para determinar el contenido de humedad será necesaria la separación de los RSM del agua que contienen. Para tal efecto, se realiza un procedimiento de secado mediante el ingreso de una muestra a un horno a 77°C durante 24 horas, esto asegura la completa deshidratación y el cambio de fase de los materiales volátiles. La razón por la cual no se eleva la temperatura hasta el punto de ebullición del agua, es que esto puede provocar el derretimiento de algunos plásticos y generar un cambio en la estructura de los residuos.

Posterior al secado se podrá comparar la masa original y la masa desecada. El contenido de humedad se puede expresar en base seca o en base húmeda. La primera, corresponde con la proporción de humedad con respecto al residuo seco; la segunda a la proporción de humedad con respecto al peso original del residuo. La expresión numérica para el cálculo del contenido de humedad en base seca es la ecuación 2.1 y en base húmeda la 2.2.

$$C.H.s \% = \frac{W_h - W_s}{W_s} * 100\% \quad 2.1$$



$$C.H._h \% = \frac{W_h - W_s}{W_h} * 100\% \tag{2.2}$$

Donde:

- C.H.<sub>s</sub> \_ Contenido de humedad en base seca [%]
- C.H.<sub>s</sub> \_ Contenido de humedad en base húmeda [%]
- W<sub>h</sub>\_ peso de los residuos húmedos [kg]
- W<sub>s</sub>\_ peso de los residuos secos [kg]

Tabla 2.6 Contenido de humedad como porcentaje en masa de algunos subproductos

Subproducto	Contenido de humedad	
	Rango	Valor típico
Latas de aluminio	2 – 4	3
cartón	4 – 8	5
Finos	6 – 12	8
Residuos de comida	50 – 80	70
Vidrio	1 – 4	2
Pasto	40 – 80	60
Cuero	8 – 12	10
Follaje de plantas	20 – 40	30
Papel	4 – 10	6
Plástico	1 – 4	2
Caucho	1 – 4	2
Latas de acero	2 – 4	3
Textil	6 – 15	10
Madera	15 – 40	20
Residuos de jardinería	30 – 80	60
Residuos de la construcción	2 -15	8

Fuente (Worrell, 2010)

### Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas de los materiales se refieren a las capacidades que tienen éstos de comportarse y responder ante esfuerzos externos. En el contexto del diseño de sistemas de manejo de residuos sólidos municipales, este concepto es relevante, ya que será necesario conocer la respuesta de los residuos ante distintos esfuerzos que suceden en algunos elementos del sistema.

Evidentemente la heterogeneidad de los residuos involucra una variación en la respuesta que cada subproducto tendrá. Entre más resistente sea el material que lo constituye, menor será la reducción de su volumen.

Esta información será útil para conocer la cantidad de energía que se deberá invertir para hacer más eficiente el sistema de manejo, ya que algunos elementos reducen sus costos o presentan una vida útil mayor, si existe un aumento en la densidad de los residuos. Además, tiene relevancia durante la elección de equipo y el dimensionamiento, por ejemplo, con esta información se podrá estimar la cobertura en el servicio de un vehículo recolector que posee mecanismos para aumentar la densidad de los residuos. Se podrá identificar el aumento o disminución en la vida útil de un sitio de disposición final si se conoce la reducción del volumen al incrementar el esfuerzo durante la compactación.

Por otra parte, para el reúso o reciclaje de los residuos se requiere transportarlos con la mayor densidad posible, siempre y cuando la energía para lograr esto represente una alternativa viable, en términos ambientales y financieros.

Para conocer la respuesta que tendrán los residuos ante un esfuerzo se hacen necesarios ensayos que involucren la medición del esfuerzo al que se someten los residuos para generar una reducción de su volumen. Ejemplos de comportamiento de la reducción de volumen ante esfuerzos de compresión se muestran en la figura 2.5. Observe que estos corresponden con algunos de los subproductos más comunes en los RSM.

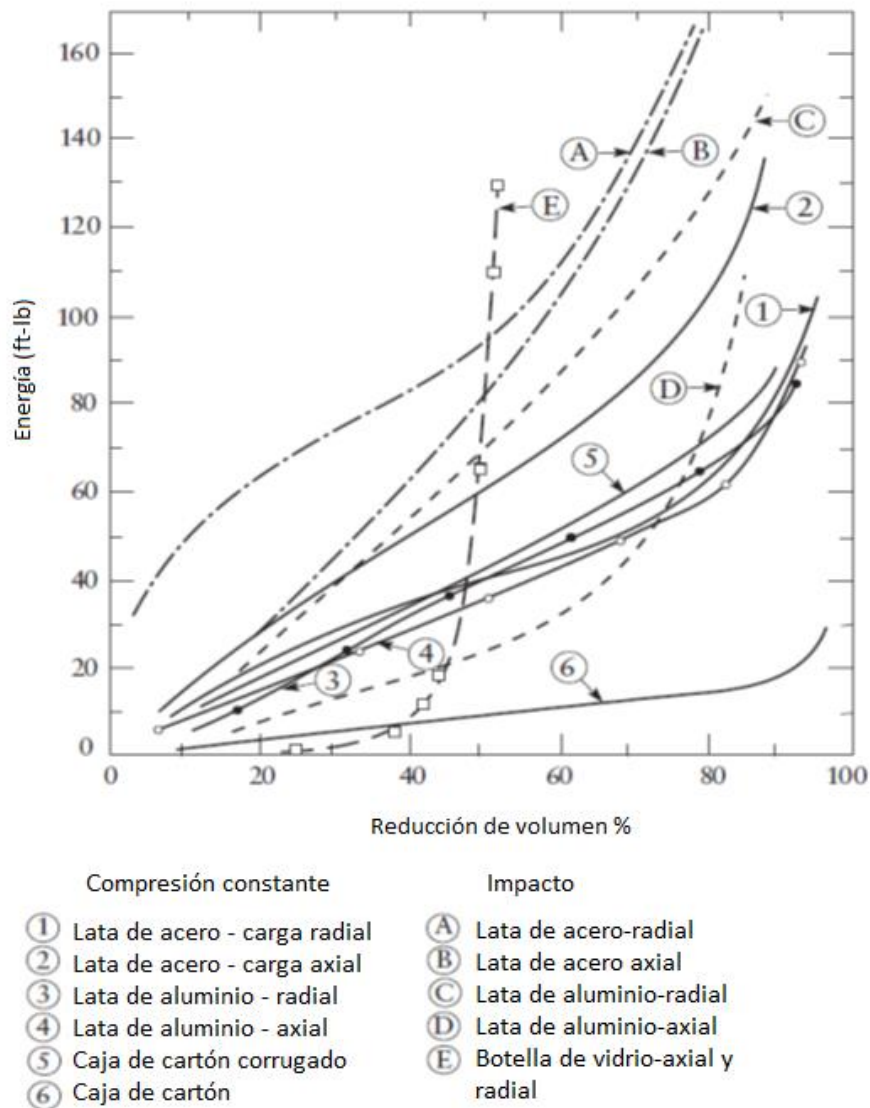


Figura 2.5 Módulo de Young de distintos subproductos. Fuente: (Worrell, 2010)

## Tamaño de partícula

Esta característica de los RSM se refiere a la identificación de tamaños y el análisis de su frecuencia. En la bibliografía especializada también se le denomina análisis de la distribución de tamaño de partícula. Es muy similar al análisis que se realiza para la caracterización de los suelos.

Es evidente, dada la heterogeneidad de los residuos, que existirá una inmensa variedad de tamaños, además cada residuo posee distintas proporciones. Hay que considerar que un solo tamaño es representativo de todos los RSM conllevaría un sesgo.

El análisis del tamaño de partícula es relevante durante la elección y dimensionamiento del sistema para la selección y posterior aprovechamiento de los residuos. Dado que este tipo de sistemas utilizan cribas, bandas transportadoras y elementos mecánicos que segregan a los residuos gracias a las distintas propiedades de estos.

Una forma de representar el análisis de frecuencia de tamaños es mediante una gráfica que expresa el porcentaje de residuos que presentan cierto rango de tamaño. Conocer esta distribución permitirá identificar la variación en el tamaño que presentan los residuos y calificarlos como uniformes o poco uniformes. Esta misma característica se puede establecer mediante la determinación del coeficiente de uniformidad (C.U), el cual se obtiene mediante la ecuación 2.3.

$$C.U. = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad 2.3$$

Donde:

- C.U.\_ coeficiente de uniformidad
- $D_{60}$ \_ Tamaño de partícula que se encuentra entre el 60 % de masa que es más pequeña y el resto
- $D_{10}$ \_ Tamaño de partícula que se encuentra entre el 10 % de masa que es más pequeña y el resto

Para conocer la distribución de tamaños con respecto a la masa es necesaria la realización de ensayos en una muestra representativa de los residuos, que consiste en cribar los residuos e identificar la masa, tanto de los residuos que pasan como de los que se retienen en cada rango de tamaño de abertura de mallas. Uno de los valores que se obtienen de este ensayo es el **tamaño promedio de partículas**, que se define como el tamaño de partícula que se encuentra entre el 50 % de la masa más grande y el resto. Este valor, que en términos estadísticos es similar a la mediana, no es representativo del valor más común. Es más útil contar con un análisis de frecuencia e identificar el tamaño de residuo que más se repite (moda). La distribución de tamaño de partículas obtenida de este ensayo se podrá expresar mediante una gráfica que incluya el porcentaje de partículas que corresponden con cierto rango de tamaños, o bien, por la relación del tamaño de la partícula y el porcentaje en masa de partículas más finas, o bien por la cantidad de partículas que corresponden a cada tamaño.

### 2.3.2. Características químicas

La caracterización química consiste en tres determinaciones fundamentales:

1. Análisis de las reacciones de los residuos ante un aumento progresivo de la temperatura (remanentes al calor)
2. El desglose de los elementos químicos que integran a los RSM (composición elemental)
3. La determinación del potencial de aprovechamiento térmico (valor calorífico)

La caracterización química es un dato básico para el procesamiento y para proyectos destinados al aprovechamiento de algunos subproductos que fungen, por sí solos, como combustibles, o bien, sometiéndolos a un tratamiento. Además, es útil para identificar el tipo y cantidad de productos que se generarán en las reacciones que suceden en los distintos elementos del SMRSM. Por ejemplo, la composición y cantidad de biogás que se liberará de los pozos de venteo en un RS.

#### Remanentes al calor

También llamado **análisis inmediato**. Esta determinación permite establecer la proporción orgánica e inorgánica. Inicia con la remoción del agua y termina con la determinación de cenizas, vidrio y metal.

La prueba inicia al establecer el peso de una muestra de residuos provenientes del primer cuarteo (ver apartado 2.3.1.). Posteriormente, se coloca en un horno a 105°C durante 60 min. Esto provocará que la humedad se libere de la mezcla. La muestra se vuelve a pesar para identificar el contenido de humedad. El remanente es una mezcla de material volátil y la fracción inorgánica. Éste se introduce nuevamente al horno, a 950 °C, lo que provoca que los elementos volátiles cambien de fase y se liberen en forma de gas. El remanente se pesa y se compara con el peso previo, obteniendo así los volátiles. Finalmente, el resto se somete nuevamente a incineración, el remanente de este último proceso es el material inerte, que se integra por ceniza, vidrio y metal. La proporción de las cenizas se pesa y se compara con el peso anterior, la diferencia entre estos dos últimos es el carbón fijo.

De una muestra de RSM en Estados Unidos se establecen los resultados del análisis inmediato

Tabla 2.7 Análisis inmediato típico para RSM.

Componente	Valor % de masa	
	Rango	Típico
Humedad	15 – 20	20
Material volátil	40 - 60	53
Carbón fijo	5 – 12	7
Vidrio, metal y ceniza	15 - 30	20

Fuente: (Tchobanoglous, 2002)

## Composición elemental

Los elementos químicos que principalmente integran a los RSM son el carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y azufre, estos se denotan en la bibliografía por el acrónimo CHONS. Por otra parte, en la ceniza se encuentran cantidades más pequeñas de otros elementos. El desglose de los elementos es de importancia en los residuos combustibles, tanto para identificar su potencial de valorización inmediato como para el potencial de aprovechamiento de biogás en el RS.

Uno de los resultados del análisis químico que se le realizan a los RSM es el desglose por elemento químico. La tabla 2.8 muestra los datos típicos de la composición química de los subproductos más comunes en los RSM.

Tabla 2.8 Composición elemental de los residuos combustibles en los RSM

Componente	Porcentaje de cada elemento en peso en base seca					
	Carbón	Hidrógeno	Oxígeno	Nitrógeno	Azufre	Cenizas
Residuo de alimentos	48	6.4	37.6	2.6	0.4	5
Papel	43.5	6	44	0.3	0.2	6
Cartón	44	5.9	44.6	0.3	0.2	5
Plásticos	60	7.2	22.8	0	0	10
Textiles	55	6.6	31.2	4.6	0.15	2.5
Caucho	78	10	0	2	0	10
Cuero	60	8	11.6	10	0.4	10
Residuos de jardinería	47.8	6	38	3.4	0.3	4.5
Madera	49.5	6	42.7	0.2	0.1	1.5
Tierra, ceniza, ladrillo, etc.	26.3	3	2	0.5	0.2	68

Fuente: (Tchobanoglous, 2002)

Finalmente, conocer la cantidad de cenizas que generarán los residuos, posterior a su incineración, permitirá dimensionar el sistema de manejo de estas.

## Valor calorífico

Esta característica, también llamada poder calorífico, se refiere a la cantidad de energía contenida y aprovechable en los RSM o de algún subproducto particular. Se expresa en unidades de energía (Btu, caloría o joule) por unidad de masa. Es un parámetro útil cuando se desea conocer el potencial de aprovechamiento energético.

Ejemplos de valores caloríficos de algunos combustibles obtenidos de los RSM se muestran en la tabla 2.9. Nótese que las unidades son Btu por libra. Un Btu es la cantidad de energía necesaria para elevar un grado Fahrenheit una libra de agua.

Tabla 2.9 Valores caloríficos típicos de los subproductos

Subproducto	Valor calorífico [Btu/lb], base seca
Residuos alimenticios	2000
Papel	7200
Cartón	7000
Plásticos	14000
Textiles	7500
Caucho	10000
Piel	7500
Residuos de jardinería	2800
Madera	8000
Vidrio	60
Materiales no ferrosos	300
Metales ferrosos	300
Polvo, cenizas y otros finos	3000

Fuente (Tchobanoglous, 2002)

El valor calorífico está relacionado con la composición elemental de los residuos. Conociendo la proporción de cada elemento se puede aproximar el valor calorífico mediante la ecuación 2.4 (Worrell, 2010).

$$\text{valor calorífico} \frac{Btu}{lb} = 144C + 672H + 6.2O + 41.4S - 10.8N \quad (2.4)$$

Donde C, H, O, N y S, son los símbolos de los elementos que indican la proporción de éstos en base seca. Se tendrán que expresar en porcentaje.

Adicional a la ec. 2.4, existen métodos para identificar el valor calorífico que se basan en la composición física, o bien, otros que se basan en los resultados de la prueba de los remanentes al calor.

El potencial calorífico de los residuos también se puede representar mediante el valor de calor más alto (HHV, por sus siglas en inglés). Este se refiere a la cantidad de calor liberado cuando el material es quemado y los productos de esta reacción regresan a la temperatura de 25°C. El calor de condensación del agua se incluye en el total de calor medido.

La energía contenida en una muestra de residuos primordialmente se encuentra en la fracción orgánica, tanto por cantidad de masa como por el poder calorífico que ésta representa. Algunos autores expresan el valor calorífico de los residuos en ausencia de humedad; algunos otros, además, ajustan el valor calorífico al sustraer la masa de la fracción inorgánica medida como la cantidad de cenizas después de la combustión.

Para identificar el potencial calórico en base seca, o bien descontando la masa de la fracción inerte, se puede optar por el uso de las ecuaciones 2.5 y 2.6, respectivamente.



$$\text{valor calorífico } \frac{\text{Btu}}{\text{lb}} (\text{base seca}) = \frac{\text{Btu con humedad} * 100}{100 - \% \text{humedad}} \quad (2.5)$$

$$\begin{aligned} \text{valor calorífico } \frac{\text{Btu}}{\text{lb}} (\text{base seca y libre de cenizas,}) \\ = \frac{\text{Btu con humedad} * 100}{100 - (\% \text{humedad} + \% \text{cenizas})} \end{aligned} \quad (2.6)$$

**Problema resuelto 2.1. Cálculo del potencial calorífico de una muestra de residuos**

Determine el poder calorífico en unidades: Btu/lb, kJ/kg y cal/kg, contenido en los residuos generados por una localidad, cuya composición se muestra en la tabla E2.1. Considere que el contenido de humedad es del 9 % y que el porcentaje de cenizas es del 6%.

Subproducto	Proporción [%]
Residuos alimenticios	36
Papel	6
Cartón	7
Plásticos	20
Textiles	5
Madera	10
Vidrio	10
Metales ferrosos	2
Polvo, cenizas y otros finos	4

**Solución:**

El cálculo se realizará suponiendo una masa de 100 lb de residuos. Con base en la tabla anterior se genera la tabla E2.2.

Subproducto	masa [lb]	Energía [Btu/lb]	Energía total Btu
Residuos alimenticios	36	2000	72000
Papel	6	7200	43200
Cartón	7	7000	49000
Plásticos	20	14000	280000
Textiles	5	7500	37500
Madera	10	8000	80000
Vidrio	10	60	600
Metales ferrosos	2	300	600
Polvo, cenizas y otros finos	4	3000	12000
Total	100		574900

Ello equivale a un poder calorífico de 574900 Btu/100 lb, o bien 5749 Btu/lb. En unidades del sistema métrico decimal, se tiene:

$$5749 \frac{Btu}{lb} \times \frac{0.252 \text{ kcal}}{1 \text{ Btu}} \times \frac{1 \text{ lb}}{0.4536 \text{ kg}} = 3193.89 \frac{kcal}{kg}$$

Si se considera el contenido de humedad y de cenizas, se puede estimar el poder calorífico en base seca y libre de cenizas, como se muestra a continuación.

En base seca:

$$valor \text{ calorífico} \frac{Btu}{lb} = \frac{5749 \frac{Btu}{lb} * 100\%}{100\% - 9\%} = 6317.58 \frac{Btu}{lb} = 3509.77 \frac{kcal}{kg}$$

En base seca y libre de cenizas

$$valor \text{ calorífico} \frac{Btu}{lb} = \frac{5749 \frac{Btu}{lb} * 100\%}{100 - (9\% + 6\%)} = 6763.53 \frac{Btu}{lb} = 3757.52 \frac{kcal}{kg}$$



#### Actividad 2.4.

*Video: Planta de termovalorización de residuos sólidos urbanos en la CDMX*  
Con base en el análisis del video realiza las actividades sugeridas.

## 2.3.2 Características biológicas

### Biodegradabilidad

La caracterización de los residuos sólidos como parte de los datos fundamentales para la adecuada planeación y diseño de un sistema innovador de manejo de residuos sólidos deberá incluir, como parte de sus resultados, el análisis de la biodegradabilidad de sus subproductos. Es evidente que la fracción orgánica de los residuos será la que en mayor medida contenga a los residuos biodegradables, sin embargo, esto podría no ser así, ya que algunos inorgánicos como los textiles pueden degradarse mediante este sistema de tratamiento.

Durante el proceso de planeación y diseño del sistema de tratamiento de residuos, particularmente de la fracción biodegradable, se deberá contar con la proporción exacta de los residuos que son susceptibles de degradarse por estos medios, esto permitirá dimensionar la capacidad de la planta y la elección de equipos.

Algunos ejemplos de la proporción biodegradable de cada subproducto se muestran en la tabla 2.10.

Tabla 2.10 Biodegradabilidad de algunos subproductos

Tipo de residuo	Porcentaje del subproducto en México	Porcentaje del subproducto que es biodegradable
Residuos de comida, de jardines y materiales orgánicos similares	52.4	82
Papel, cartón, productos de papel	13.8	50
Otro tipo de residuo (residuos finos, pañal desechable, etc.)	12.1	80
Plásticos	10.9	0
Vidrios	5.9	0
Aluminio	1.7	0
Textiles	1.4	50
Metales ferrosos	1.1	0
Otros metales no ferrosos (incluye cobre, plomo, estaño y níquel)	0.6	0

Adaptado de (Worrell, 2010)

Así con la información mostrada en la tabla 2.10, multiplicando el porcentaje de subproductos por la proporción que es biodegradable, se establece que el 60.25 % de la masa de los RSM en México es biodegradable. Este porcentaje es relativamente alto; diferente al que presentan países como Estados Unidos, cuya fracción biodegradable es cercana a 45% (Worrell, 2010), lo cual se puede explicar a que en México la proporción de residuos orgánicos generados es muy alta, además de que en EUA la disposición de este tipo de residuos es conjunta con el agua residual.

## 2.4 Flujo de materiales en la sociedad

Los residuos son materiales que pueden ser aprovechados, como insumos para productos o como fuente de energía calorífica y para producir electricidad. El origen de los productos que utilizamos en la sociedad está en los recursos naturales, algunos son renovables, sin embargo, otros no lo son, ya que han sido formados durante millones de años. Existen materiales que pueden ser utilizados y reutilizados de manera indefinida, sin que existan cambios significativos en su composición, de manera similar la energía puede utilizarse en diferentes formas y en momentos distintos, considerando las pérdidas por entropía. Los materiales y energía en la sociedad pasan por diferentes usos y transformaciones, aunque existe una gran complejidad en los flujos por los que pueden transitar, la figura 2.5 muestra un flujo representativo del ciclo de un material o energía desde la extracción hasta su reincorporación en otros procesos productivos o disposición final.

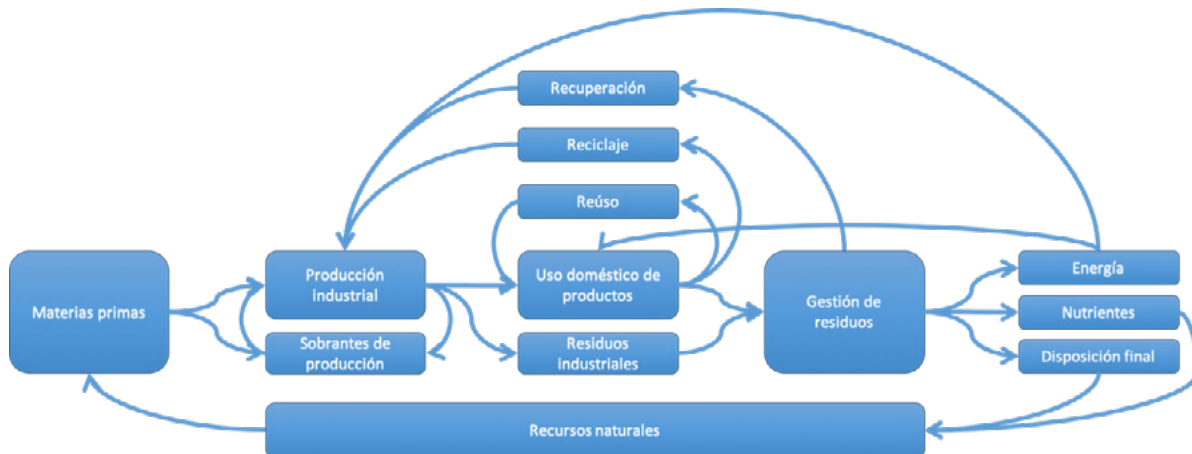


Figura 2.5. Flujo general de materiales y energía en la sociedad  
Fuente: adaptado de (Worrell, 2010).

Los materiales vírgenes se encuentran en estado natural, pudiendo ser materiales inertes (minerales o no minerales) y materiales/fuente de energía (madera, algodón, hidrocarburos). La obtención de materiales se realiza en el lugar donde está el recurso con técnicas propias de la industria extractiva, la mayoría de ellas con consecuencias devastadoras para el ambiente, generando importantes volúmenes de residuos y contaminantes, este tema se abordó con detalle en el Capítulo 1 de este libro. El transporte de los materiales se realiza desde el lugar de la extracción hasta el lugar de utilización o adecuación, es decir, el material puede usarse directamente como es extraído o requiere de algún proceso previo a su transformación en un producto de consumo. El transporte de los materiales tiene diferentes escalas geográficas, ya que puede ser llevado a la industria local o a otros países para su manufactura, por lo que se requieren grandes cantidades de energía para trasladar los materiales.

Los sectores de la economía dedicados a la manufactura transforman los diferentes materiales en productos, utilizando también energía para la elaboración de productos. Los procesos productivos no aprovechan completamente los materiales, además, el incumplimiento con estándares de calidad hace que se rechacen productos. Tanto los restos de materiales no aprovechados en la producción como los productos rechazados se convierten en residuos, parte

de éstos pueden ser reincorporados al proceso productivo de la misma industria o en otras, sin embargo, existen productos rechazados o materiales que por normativas comerciales tienen que ser destruidos y manejados como residuos. Es muy común, que en una fábrica o planta industrial se generen de todos los tipos de residuos vistos en el apartado 2.1, es decir, que existan residuos sólidos urbanos, de manejo especial, incompatibles y peligrosos.

El consumo es lo que impulsa gran parte de las acciones en el sistema socioeconómico predominante. Los productos se elaboran para ser comprados y posteriormente utilizados, el consumo es la transferencia de la propiedad que autoriza el uso de los productos. Gran cantidad de los residuos son generados en esta etapa del flujo, ya que una vez utilizado el producto y que ya no es considerado de valor por el propietario o poseedor se desecha. También son desechados los materiales que sirvieron para el traslado del producto y para su contención durante el periodo de uso. Por ejemplo, los materiales como plástico, cartón, cinta de fleje, unicel, entre otros, son usados para que no se dañen los productos durante su traslado, y también los envases de plástico, vidrio, cartón, cartón encerado, metales y otros que son usados como recipientes mientras se consume el producto. El consumo es una etapa importante para el flujo de residuos, ya que es un nodo en el que confluyen acciones de *reducción* de residuos, previo al consumo, y acciones de *reuso* del producto o *reciclaje* de materiales una vez utilizado el producto, estos aspectos se detallarán en el apartado 2.4.

Como se ha explicado, los residuos pueden generarse en cualquier etapa del flujo, sin embargo, aquellos generados después del consumo son de mayor visibilidad para la mayoría de las personas. Aunque el manejo de residuos se requiera en cualquier etapa del flujo, para simplificar su análisis se considera que inicia una vez generado el residuo, es decir, posterior al consumo. Los procesos del manejo de residuos se formalizarán en el Capítulo 3 de este libro, por lo que ahora solamente se enuncian, siendo éstos: generación, almacenamiento, recolección, acopio, tratamiento, aprovechamiento, valorización, transferencia, transporte y disposición final. Cada uno de estos procesos forma parte del flujo de materiales y fuente de energía, cumpliendo diferentes objetivos para el manejo de los residuos. Por ejemplo, el almacenamiento debe evitar que los residuos se conviertan en fuente de contaminación y/o focos de infección; por su parte, el tratamiento busca transformar los materiales y fuente de energía para su posterior aprovechamiento y valorización. El grado de complejidad relacionado con la gestión y manejo de los residuos es muy alto, ya que implica la interacción de aspectos técnicos, legales, ambientales, administrativos, sociales, culturales, financieros y económicos, principalmente.



### **Actividad 2.5**

#### ***Flujo de materiales en la sociedad.***

**Realiza un esquema que ejemplifique el flujo de residuos en la Ciudad de México.**

**Problema resuelto 2.2. Potencial de aprovechamiento de residuos: nutrientes y energía**

Un municipio de México genera 120 ton/día de residuos. Los principales residuos generados se detallan en la tabla P.2.2.1 Si los residuos de éste municipio son llevados directamente al relleno sanitario, determina para 30 días: a) ¿cuánta energía se está perdiendo?, b) ¿cuánto carbono se está dejando de utilizar?, c) si existiera una planta de composta que aprovechara el 60% de los residuos orgánicos, ¿cuánto carbono y nitrógeno se aprovecharía?, y d) si existiera una planta de incineración certificada (que cumpla con los estándares ambientales), ¿cuánta energía se aprovecharía considerando los 5 tipos de residuos de mayor poder calorífico por unidad de masa?

Tabla P.2.2.1. Porcentajes de la composición de residuos

Tipo de residuos	Residuos %	Poder calorífico Btu/lb	Carbono %	Nitrógeno %
Papel	8.5	7,200	43.5	0.30
Cartón	5.5	7,000	44.0	0.38
Pañales	10	14,000	60.0	0
Plástico rígido	18.5	19,677	84.54	0.86
Poliestireno expandido	6	16,400	87.1	0.21
Orgánicos alimenticios	37	2,000	40.0	2.6
Orgánicos de jardín	12	2,000	47.0	3.4
Vidrio de color	2.5	60	0.52	0.03
Totales	100			

**Solución:**

Primero se debe calcular la cantidad total de residuos generados durante el periodo de 30 días.

Generación total de residuos = (120 ton/día) x (30 días) = 3,600 ton

Esta cantidad se debe distribuir en los porcentajes para cada tipo de residuo, por ejemplo, para el papel se tiene que es el 8.5%, que corresponde a 306 t; así para cada tipo de residuo.

Tabla P.2.2.2. Cálculo de la cantidad de residuos para el periodo de 30 días

Tipo de residuos	Residuos %	Residuos en 30 días ton
Papel	8.5	306
Cartón	5.5	198
Pañales	10	360
Plástico rígido	18.5	666
Poliestireno expandido	6	216
Orgánicos alimenticios	37	1,332
Orgánicos de jardín	12	432
Vidrio de color	2.5	90
Totales	100	3,600

Se determina a continuación el poder calorífico para cada tipo de residuos. Considerando que el poder calorífico del papel es de 7,000 Btu/lb, y que 1 Btu/lb es equivalente a 2.326 kJ/kg, se tiene en el caso del papel que:



$$E_{\text{papel}} = (306 \times 1,000) / (7,200 \times 2.326) / 1,000,000 = 5124.6432 \text{ GJ}$$

Ahora se determinará el % de carbono (% C) y % de nitrógeno (% N) para cada residuo, considerando las proporciones de la tabla de referencia. En el caso del papel, se tiene que:

$$\% \text{ C papel} = 306 \times (43.5/100) = 133.11 \text{ t}$$

$$\% \text{ N papel} = 306 \times (0.30/100) = 0.918 \text{ t}$$

Nótese que estos valores se obtienen como ejemplo, ya que se deben realizar los cálculos para aquellos tipos de residuos que sean requeridos para responder al problema. La tabla muestra los resultados de los cálculos.

Tipo de residuos	Residuos (%)	Residuos (t)	Energía (GJ) GJ=10 <sup>9</sup> Joules	Carbono (t)	Nitrógeno (t)
Papel	8.5	306	5124.64	133.11	
Cartón	5.5	198	3223.83	87.12	
Pañales	10	360	11723.04	216.00	
Plástico rígido	18.5	666	30481.96	563.04	
Poliestireno expandido	6	216	8239.62	188.14	
Orgánicos alimenticios	37	1332	6196.46	532.80	34.63
Orgánicos de jardín	12	432	2009.66	203.04	14.69
Vidrio de color	2.5	90	12.56	0.47	
<b>Totales</b>	<b>100</b>	<b>3600</b>	<b>67011.79</b>	<b>1923.71</b>	<b>49.32</b>

Finalmente, se responden las preguntas:

a) ¿Cuánta energía se está perdiendo?

Energía perdida 67,011.7855 GJ

b) ¿Cuánto carbono se está dejando de utilizar?

Carbono no utilizado 1,923.71 t

c) Si existiera una planta de composta que aprovechara el 60% de los residuos orgánicos, ¿cuánto carbono y nitrógeno se aprovecharía?

$$C + N (60\% \text{ orgánicos}) = 785.16 \times 0.6 = 471.096 \text{ t}$$

d) Sin considerar la eficiencia de una planta de incineración certificada, ¿cuánta energía se podría disponer considerando los 5 tipos de residuos de mayor poder calorífico?

Energía 5 residuos con mayor poder calorífico (papel, cartón, pañales, plástico rígido y Poliestireno expandido) = 58,793.097 GJ.

## 2.4.1 Ciclo de vida en residuos

Una herramienta para calcular los impactos al ambiente por el manejo de los residuos es el Análisis del Ciclo de Vida (ACV). El ACV considera como entradas las cantidades físicas requeridas de materiales y energía en distintas etapas de análisis del producto, dependiendo los procesos de transformación que ocurren, se obtiene como resultado las salidas: emisiones a la atmósfera, agua residual y residuos sólidos. La definición de las etapas que se incluyen para realizar el ACV de un producto, pueden variar desde las materias primas hasta los residuos generados posteriores al uso. El alcance del ACV puede ser tan complejo como se requiera, ya que podría considerar los materiales y energía que se utilizaron en la elaboración de las materias primas, los recursos

utilizados para producir el equipo y maquinaria que se utiliza en la producción y transporte del producto, así como los requerimientos para disponer, controlar o tratar los residuos post-consumo.

El análisis del ciclo de vida se realiza por varias razones, incluida la comparación de productos para compras y una comparación de productos por industria. En el primer caso, el efecto ambiental total de las botellas retornables de vidrio, por ejemplo, podría compararse con el efecto ambiental de las botellas de plástico no reciclables. Si se consideran todos los factores que intervienen en la fabricación, distribución y eliminación de ambos tipos de botellas, se puede demostrar que un contenedor es claramente superior. Otro ejemplo sería comparar los productos de una industria, para determinar si el uso de fosfatos en los detergentes es más perjudicial que el uso de sustitutos que tienen sus propios problemas en el tratamiento y la eliminación. El primer paso en una evaluación del ciclo de vida es recopilar datos sobre el flujo de un material en una sociedad en particular. La figura 2.6, por ejemplo, muestra el flujo de papel en Suiza. Una vez que se conocen las cantidades de varios componentes de dicho flujo, se estima el efecto ambiental de cada paso en la producción, fabricación, uso y recuperación / eliminación.

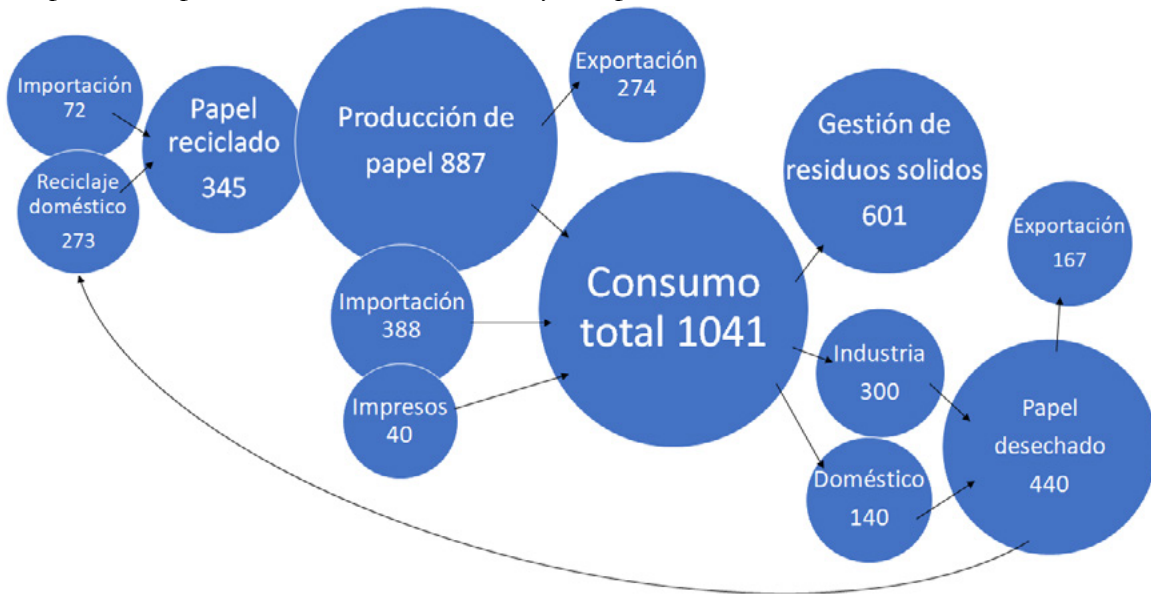


Figura 2.6 Flujo de papel en Suiza (ton/año)  
Fuente: adaptado de (Worrell, 2010)

El ACV requiere de información detallada con respecto al producto que se esté analizando. En muchas ocasiones, uno de los retos para hacer el análisis es encontrar la información específica y actualizada. El análisis, los resultados y la interpretación en el ACV deben considerar la información con la que fue realizado o, en su caso, la falta de información. Por ejemplo, algo tan simple como la cantidad de residuos sólidos recolectados en el país no es fácilmente calculable ni medible con precisión. Incluso si se contara con los datos, el procedimiento de integración de la información podría variar de acuerdo con las organizaciones o dependencias que participen en el proceso, es decir, podría no utilizarse un sistema único.

Un ejemplo presentado por (Worrell, 2010), plantea las dificultades en la aplicación del ACV para encontrar la solución sobre el debate del vaso para café: *si usar un vaso de papel o un vaso de unigel*. La respuesta de la mayoría de las personas sería no usar ninguna de las dos opciones, sino usar una taza no desechable. Sin embargo, en algunas situaciones los vasos desechables son necesarios, y se debe tomar una decisión sobre cuál elegir: papel o unigel. Utilizando conceptualmente el ACV para este ejemplo, se tendría el planteamiento siguiente.

El vaso de papel proviene de los árboles, pero el acto de cortar árboles produce una degradación ambiental. El vaso de espuma proviene de hidrocarburos como el petróleo y el gas, y esto también resulta en un impacto ambiental adverso, incluido el uso de recursos no renovables. La producción del vaso de papel da como resultado una importante contaminación del agua, mientras que la producción del vaso de unigel no contribuye esencialmente a la contaminación del agua. La producción del vaso de papel da como resultado la emisión de cloro, dióxido de cloro, sulfuros reducidos y partículas, mientras que la producción del vaso de unigel no da como resultado ninguno de estos. El vaso de papel no requiere clorofluorocarbonos (CFC), pero tampoco lo hacen los vasos de unigel más nuevos desde que se eliminaron los CFC en el poliestireno. Los vasos de unigel, sin embargo, dan como resultado la emisión de pentano, mientras que el vaso de papel no aporta ninguna. Desde la perspectiva de la separación de materiales, la reciclabilidad del vaso de unigel es mucho más alta que el vaso de papel, ya que este último está hecho de varios materiales, incluido el recubrimiento de plástico del papel. Ambos se quemar bien, aunque el vaso de unigel produce 40,000 kJ / kg, mientras que el vaso de papel produce solo 20,000 kJ / kg. En el relleno sanitario, el vaso de papel se degrada en CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> (ambos gases de efecto invernadero) mientras que el vaso de unigel es inerte. Dado que es inerte, permanecerá en el relleno sanitario durante un tiempo muy largo, mientras que el vaso de papel se descompondrá muy lentamente. Si el relleno sanitario se considera un depósito de almacenamiento de desechos, entonces el vaso de espuma es superior, ya que no participa en la reacción, mientras que el vaso de papel produce gases y, probablemente, lixiviados. Si, por otro lado, se considera que el relleno sanitario es una instalación de tratamiento, entonces el vaso de unigel es altamente perjudicial, ya que no se biodegrada (Worrell, 2010).

La decisión final seguirá siendo del consumidor de café. El ACV aporta información en aspectos ambientales para cada caso: papel o unigel. La complejidad del problema podría ser mayor, sin embargo, el análisis lo podemos aislar o fraccionar para comprenderlo mejor. El acumulado de las partes en las que se divide el problema será el resultado obtenido con el ACV. Por ejemplo, la tabla 2.11 presenta los datos de otro ACV en el que se consideraron: materias primas, energía necesaria, agua efluente, emisiones a la atmósfera, óxidos nitrosos, potencial de reciclaje y eliminación.

Tabla 2.11. Análisis de ciclo de vida de vasos desechables (1,000 vasos)

Aspecto analizado	Vaso de papel (8.3 g)	Vaso unigel (1.9 g)
<b>Materias primas</b>		
Madera y corteza (kg)	21	0
Petróleo crudo (kg)	0	2.4
Otras sustancias químicas (kg)	1.2	0.08
<b>Energía necesaria</b>		
Calor de proceso (kg petróleo)	1.8	1.9

Electricidad (kg petróleo)	2	0.15
<b>Agua residual</b>		
Volumen (m <sup>3</sup> )	1	0.05
Sólidos en suspensión (g)	80	1
DBO (g)	90	0.4
Organoclorados (g)	20	0
Sales inorgánicas (g)	500	30
Fibra (g)	10	0
<b>Emisiones a la atmósfera</b>		
Cloro (g)	2	0
Dióxido de cloro (g)	2	0
Óxido de azufre (g)	10	0
Partículas (g)	20	0.8
Monóxido de carbono (g)	30	0.2
Óxido de nitrógeno (g)	50	0.8
Dióxido de azufre (g)	100	7
Pentano (g)	0	80
Etilbenceno, estireno (g)	0	5
<b>Potencial de reciclaje/reutilización</b>		
Reutilización	Posible	Fácil
Reciclaje	Aceptable	Bueno
<b>Disposición final</b>		
Incineración	Limpia	Limpia
Recuperación de calor (MJ)	170	80
Masa a relleno sanitario (kg)	8.3	1.9
Volumen en relleno sanitario (m <sup>3</sup> )	0.0175	0.0178
Biodegradabilidad (relleno sanitario)	Sí	No

Fuente: (Masters, 2008)

## 2.4.2 Análisis del costo del ciclo de vida

El ACV solo considera aspectos ambientales, por lo que se han desarrollado análisis complementarios como el del costo del ciclo de vida (ACC) (Tchobanoglous, 2002). El ACC es utilizado para comparar aspectos económicos de diferentes alternativas de proyectos para la gestión de los residuos. El ACC considera los costos relevantes a lo largo del tiempo, incluida la inversión inicial del proyecto, los costos por depreciación de maquinaria y equipo, los costos de operación y mantenimiento, los ingresos del proyecto y los valores de rescate. Todos los costos e ingresos durante el ciclo de vida del proyecto se ajustan a un tiempo constante y se combinan para contabilizar el valor del dinero en el tiempo. El ACC proporciona una forma de valorar el costo-efectividad, facilitando la comparación económica de las alternativas de proyectos. La combinación del ACV con el ACC es una práctica común para tener mayores y mejores elementos en la toma de decisiones respecto a un proyecto para la mejora en la gestión de los residuos.

### Valor en el tiempo del dinero

El valor del dinero en el tiempo es variable, con una misma cantidad monetaria se pueden comprar cosas diferentes en periodos de tiempo distintos. Las principales razones de que esto ocurra son la inflación y el costo de oportunidad del dinero. La inflación es el aumento generalizado y sostenido de los precios de bienes y servicios en un país. Para medir el crecimiento de la inflación se utilizan índices, que reflejan el crecimiento porcentual de una canasta de bienes ponderada. El índice de medición de la inflación es el Índice de Precios al Consumidor (IPC) que en México se le llama INPC (Índice Nacional de Precios al Consumidor). Este índice mide el porcentaje de incremento en los precios de una canasta básica de productos y servicios que adquiere un consumidor típico en el país. Existen cuatro tipos de inflación:

*Inflación por consumo o demanda.* Esta inflación obedece a la ley de la oferta y la demanda. Si la demanda de bienes excede la capacidad de producción o importación de bienes, los precios tienden a aumentar.

*Inflación por costos.* Esta inflación ocurre cuando el precio de las materias primas (cobre, petróleo, energía, etc.) aumenta, lo que hace que el productor, buscando mantener su margen de ganancia, incremente sus precios.

*Inflación autoconstruida.* Esta inflación ocurre cuando se prevé un fuerte incremento futuro de precios, y entonces se comienzan a ajustar éstos desde antes para que el aumento sea gradual.

*Inflación generada por expectativas de inflación (círculo vicioso).* Esto es típico en países con alta inflación donde los trabajadores piden aumentos de salarios para contrarrestar los efectos inflacionarios, lo cual da pie al aumento en los precios por parte de los empresarios, originando un círculo vicioso de inflación.

El costo de oportunidad refleja el hecho de que el dinero invertido tiene la oportunidad de generar un rendimiento en el tiempo, incluso en ausencia de inflación. El costo de oportunidad se puede entender como el costo de la inversión de los recursos disponibles actuales en una oportunidad económica, en lugar de invertir en la mejor alternativa actual disponible. Es decir, el costo de lo que dejaríamos de ganar al no haber elegido la mejor alternativa.

Dado que el valor del dinero cambia con el tiempo, para el ACC los flujos de efectivo de un año  $X$  no se pueden combinar directamente con los flujos de otro ( $Y$ ), sino que primero se debe descontar o actualizar a un año común ( $Z$ ), se sugiere que el año base sea igual al primero en el que operaría el proyecto para la gestión de los residuos. Estos valores descontados pueden sumarse para obtener el costo total del ciclo de vida, que puede compararse con el costo total del ciclo de vida de un proyecto alternativo.

### Factores de descuento

La fórmula para descontar un valor futuro  $F$  a un valor presente  $P$  es

$$P = F \times \frac{1}{\left[1 + \frac{td}{100}\right]^n}$$

donde  $td$  es la tasa de descuento expresada en porcentaje y  $n$  es la cantidad de años en el futuro. El efecto del descuento es reducir los costos del futuro a los valores actuales.

Si todas las inversiones arrojaran la misma tasa de rendimiento, todos los flujos de efectivo futuros se descontarían a esa tasa. Sin embargo, dado que las diferentes inversiones producen tasas diferentes, la elección de la tasa de uso a veces es difícil de determinar. La tasa de descuento comúnmente utilizada es el costo del capital, que es la tasa promedio ponderada a la cual se financia la institución que prestaría el dinero para el proyecto.

#### Factores de recuperación de capital

El costo de un sistema de gestión de residuos generalmente se compone de dos partes: el capital requerido para comprar terrenos, edificios y equipo y los costos anuales para operar el sistema. Las inversiones de capital son costos incurridos al comienzo del proyecto. Estos costos se financian con frecuencia con fondos prestados. El dinero prestado y el interés acumulado se reembolsan con los ingresos recibidos más adelante en el proyecto de la venta de energía o materiales, del cobro por los servicios o de los impuestos. El pago anual constante requerido para reembolsar el monto financiado se determina multiplicando el monto prestado por un factor de recuperación de capital  $CRF(d, n)$ , que se calcula mediante

$$CRF = \frac{ti}{1 - (1 + ti)^{-n}}$$

donde  $ti$  es la tasa de interés expresada como decimal y  $n$  es el número de años de análisis.

### **2.4.3 Metabolismo urbano**

El metabolismo urbano tiene sus orígenes empíricos en el trabajo de Wolman (1965) quien, tras analizar flujos de entrada y salida de energía y materiales de una ciudad, concluye que, llegada una cierta intensidad metabólica, son inevitables los problemas ambientales: contaminación atmosférica, aguas residuales y residuos sólidos, ver ejemplo en figura 2.7.



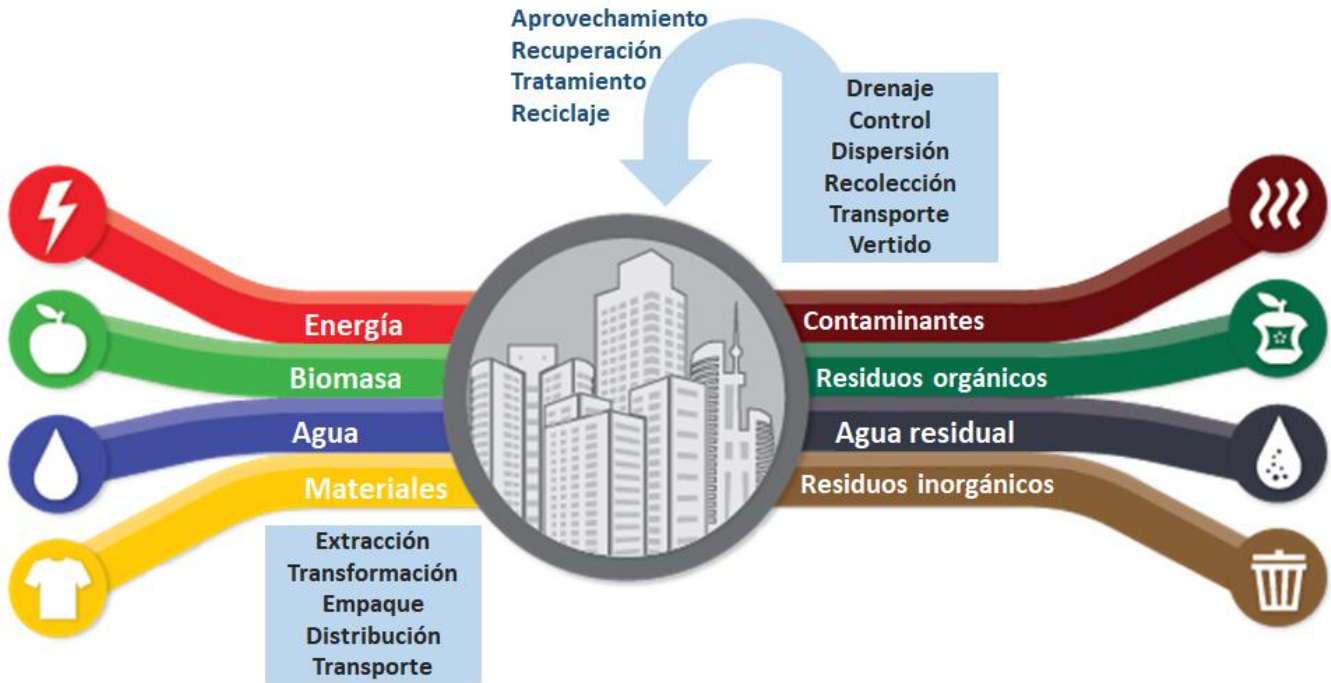


Figura 2.7 Flujos de entrada y salida de energía y materiales de una ciudad

Recordando que en la naturaleza los seres vivos gestionan sus recursos basándose en un metabolismo circular, en donde la luz solar, el agua o los nutrientes (entradas) son transformados en calor, energía y biomasa y, en estricto sentido, no se genera un residuo, para mayor detalle ver Capítulo 4. Ingeniería y principios de ecología del libro Ingeniería Ambiental - fundamentos. En cambio, aquellas sustancias que ya no son necesarias (salidas) regresarán al circuito y cumplirán otra función en el ecosistema. Tal y como ocurre en la naturaleza, las ciudades demandan recursos y productos como son: alimentos, agua y energía para poder “vivir”, es decir, desarrollar sus actividades cotidianas. De hecho, la especie humana ha hecho que la mayoría de los recursos de la Tierra sean destinados al suministro de las ciudades. El metabolismo urbano ofrece un marco de trabajo holístico con el cual poder analizar todas las entradas (importaciones) y las salidas (exportaciones) respecto al medio biofísico que rodea a una ciudad.

Los procesos extractivos y productivos, en conjunto con los patrones de consumo de la sociedad actual, han hecho que las ciudades actuales estén basadas en modelos de metabolismo lineal. Entendiendo por esto, que el flujo inicia y termina en puntos diferentes, sin que necesariamente se toquen, desde la extracción de materias primas, fabricación de los productos, distribución a los mercados, consumo y/o uso, y finalmente desechándolos. El metabolismo lineal ha causado el agotamiento de los recursos naturales o la alta dependencia sobre los no renovables, además de contaminación en aspectos ambientales: agua, aire, suelo, flora y fauna. Una alternativa propuesta para reducir la problemática ante la situación comentada es el metabolismo urbano circular, es decir, flujos de materiales y energía predominantemente circulares, semejantes a los que se tienen en la naturaleza. La aplicación del metabolismo urbano al manejo de los residuos sólidos se continúa detallando en los párrafos siguientes.



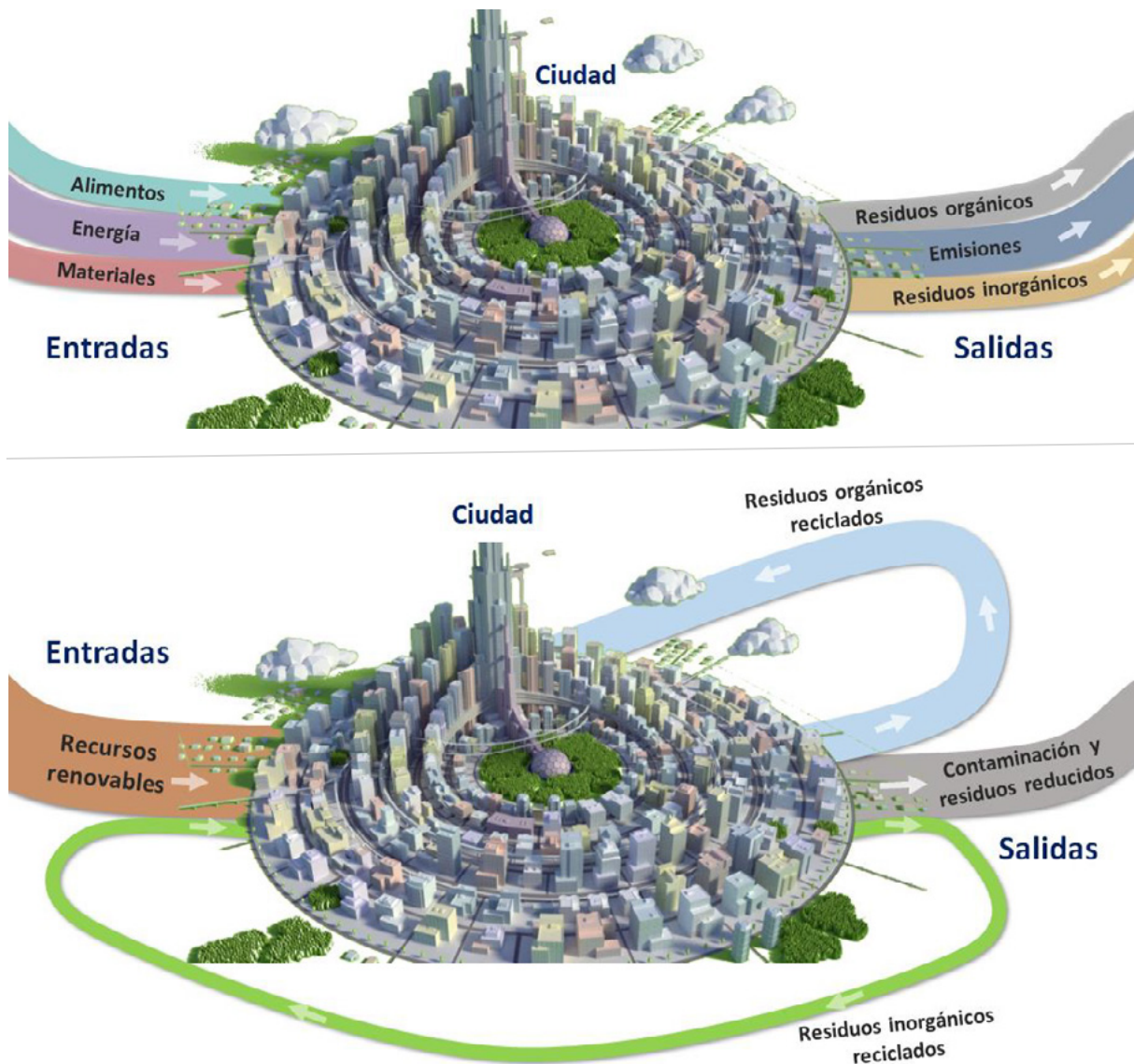


Figura 2.8 Metabolismo lineal vs circular

La cantidad y flujo de los residuos sólidos tienen directa correspondencia con la capacidad de poder adquisitivo, de ahí que haya una correlación proporcional entre el incremento del PIB, el consumo de materiales y energía y la generación de residuos. Dicho de otro modo, el incremento del metabolismo urbano o del consumo de materiales y energía se refleja tanto en el aumento del uso total de recursos naturales como en la generación de residuos de todo tipo. En el último siglo, mientras la economía aumentó más de 20 veces y la población sólo cuatro veces, el consumo promedio de energía lo hizo 12 veces, el de metales 19 veces y el de materiales de construcción hasta 34 veces (caso del cemento). El flujo de residuos también aumentó, la información más completa corresponde a los residuos sólidos urbanos en comparación con los otros tipos de residuos, indica que sólo en medio siglo casi se cuadruplicó su generación, al pasar de 360 millones de toneladas en 1960, a 1.16 - 1.3 mil millones de toneladas en 2010-2011. El incremento continuará en los próximos años, la cantidad del año 2011 se espera se duplique en 2025, puesto

que se calculan para entonces 2.2 mil millones de toneladas anuales. La tabla 2.12 muestra la composición actual de los residuos por región del mundo.

Tabla 2.12 Composición de los flujos de residuos a nivel mundial y regional (porcentajes por tipo de material)

Material	Europa central	EUA	China	India	África	América latina	Mundial
Papel	22.88	28.00	9.00	8.00	7.63	15.91	15.24
Plástico (promedio)	10.50	12.40	13.00	9.00	5.75	13.18	10.64
Aluminio	2.60	6.00	0.60	0.60	1.46	1.57	2.14
Acero	1.30	3.00	0.40	0.40	0.73	0.78	1.10
Vidrio	8.75	4.60	2.00	1.00	2.07	3.73	3.69
Biomasa (alimentos y jardín)	34.88	27.00	65.00	48.00	63.41	49.27	47.93
Otros	19.09	19.00	10.00	33.00	18.95	15.56	19.26

Fuente: ISWA, 2009; Hoornweg y Bhada-Tata, 2012, y datos oficiales de EPA (E.U.A) y NSWAI (India)

Los espacios urbanos, principales emisores de residuos y contaminantes, en general, pueden analizarse como sistemas abiertos a los flujos de materiales y energía, esto es, que toman energía y materiales fuera del sistema urbano y que desechan energía disipada y materiales degradados. El metabolismo urbano es un proceso entrópico –de transformación de la energía y la materia– que se manifiesta en el deterioro de la infraestructura y que se acelera conforme se extiende la capa urbana, pero también a causa de la existencia de infraestructura que no se requiere o que no satisface las necesidades actuales para las que fue construida. Todo ello ocurre en un contexto en el que además los flujos (materia, energía y residuos) se retroalimentan en el tiempo y en el espacio, haciendo complejo y, a veces, hasta imposibilitando los mecanismos de obtención de materiales y energía y de expulsión de residuos.

Por mencionar un ejemplo, el caso de Hong Kong, en particular, ofrece interesantes resultados sobre los patrones metabólicos de dicho asentamiento urbano a lo largo del tiempo. La ciudad sólo produce 5% de sus alimentos, mientras que sus importaciones, entre 1971 y 1997, aumentaron para el caso de los plásticos 400%; para el cemento, 300%; y para el acero/hierro y papel, 275%. Asimismo, la cantidad de residuos generada aumentó de 1.28 kg per cápita, en 1991, a 1.36 kg, en 2007, al alcanzar el total de 6.5 millones de toneladas métricas de residuos en ese último año. El consumo energético y las emisiones de GEI también aumentaron, en 1990, la ciudad usó 240 TJ de energía final y emitió 34 mil 200 Gg de CO<sub>2</sub>, situación que para 2005 cambió, ya que esas cantidades ascendieron a 286 TJ y 38 mil 100 Gg de CO<sub>2</sub>, respectivamente.

El metabolismo urbano es fundamental para la planeación del desarrollo, ya que permite modelar rutas más o menos eficientes en el uso de los recursos y en la generación de residuos, para así destinar esfuerzos, por ejemplo, en el diseño de la infraestructura, en la definición de políticas para incentivos o, incluso, en medidas restrictivas o coercitivas. El reto es encontrar mejores formas de organización y modalidades más eficientes e integradas de desarrollo urbano, de tal suerte que se tienda a minimizar su metabolismo biofísico, tanto en términos per cápita como absolutos. En el caso de la generación de residuos, uno de los principales retos es la disminución de los patrones de consumo, no sólo porque se corrobora que mientras más grande es la población, mayor es el valor de generación per cápita de residuos, sino también porque en

términos climáticos la disminución del consumo de productos y, por tanto, de generación de residuos se convierten en la principal medida de mitigación, esto es, en términos de residuos y emisiones evitadas. Además de la reducción de los residuos por un menor consumo, deben realizarse acciones adecuadas de manejo, implementado de manera predominante el reúso y la recuperación.

## **2.5 Reducción, reúso y recuperación**

La planificación de políticas, lineamientos y acciones para los residuos sólidos deben considerar el cumplimiento de la jerarquía del manejo de residuos, siendo tres los principios de gestión y manejo de residuos, los cuales en orden de prioridad son:

1. Prevención,
2. Recuperación y
3. Eliminación segura.

La prevención incluye aquellas acciones de minimización, reducción, producción de bienes de consumo limpios y de larga duración. La recuperación establece lineamientos para la separación, valorización, aprovechamiento, recuperación de residuos considerados como materias primas o energéticos que sean incorporados al ciclo productivo. La eliminación segura implica la disminución de la mayor cantidad de residuos que sean llevados a disposición final y que está última sea en sitios que cumplan la normativa. Los aspectos normativos se detallaron en el apartado 2.2 Leyes y reglamentos en la materia.

La política para la prevención, gestión y manejo de los residuos, en general, debería ser: prevenir, minimizar y aprovechar los residuos, bajo lineamientos de gestión y manejo sustentable, fomento de investigación y difusión de tecnologías/prácticas sectoriales eficientes, así como, incentivar mercados de recuperación, tratamiento y valorización de residuos en los cuales interactúen los sectores generadores y los proveedores de servicios con la finalidad de reducir la disposición final, y que en su caso, exista una eliminación segura para los residuos no aprovechables.

La planificación de las políticas por sectores generadores permite establecer prioridades respecto a la gestión y el manejo de los residuos. Como se ha desarrollado, existen diferentes tipos de residuos cuyas fuentes de generación son particulares, por ello, se han realizado sugerencias de políticas sectoriales para los principales generadores (Tabla 2.13). Los RME incluyen a los sectores: i) industrial, ii) comercial, iii) servicios, iv) construcción y demolición, y v) agroalimentario. Los RSU a los residuos domésticos o con características domiciliarias, y los RP para todos aquellos que cumplan con alguna característica CRETIB.

Tabla 2.13 Sugerencias de políticas sectoriales para los principales generadores

Sectores generadores	Política del sector	Sensibilización	Regulación	Inspección	Control
<b>Industrial</b>	Prevenir la generación y promover el aprovechamiento de los residuos a través de iniciativas de producción y tecnologías limpias, reducción de empaques y embalajes, análisis de ciclo de vida, programas de separación y valorización, mercados de aprovechamiento que reduzcan el envío de residuos a sitios de disposición final.		✓	✓	✓
<b>Agroalimentario</b>	Aprovechar los residuos promoviendo la infraestructura y mercados de valorización, que eviten una inadecuada disposición final de los residuos y reduciendo la contaminación de la atmósfera, el suelo y los recursos hídricos.	✓	✓		
<b>Construcción y demolición</b>	Disminuir y aprovechar los residuos de la construcción, fomentando lineamientos normativos para su registro y manejo sustentable.	✓	✓	✓	✓
<b>Servicios</b>	Prevenir, disminuir y aprovechar los residuos, fomentando mercados de reciclaje que reduzcan al mínimo los residuos enviados a disposición final.		✓		✓
<b>Comercio</b>	Minimizar la generación y fomentar la recuperación y aprovechamiento de los residuos comerciales, que reduzcan su envío a disposición final en rellenos sanitarios.		✓		✓
<b>Residuos sólidos urbanos</b>	Disminuir la cantidad de RSU que ingresan a los sitios de disposición final, promoviendo infraestructura para la generación de energía, reciclaje y aprovechamiento de biomasa.	✓	✓	✓	
<b>Residuos peligrosos de micro-generadores</b>	Eliminación segura de todos los residuos peligrosos de micro-generadores, mediante la formalización, control, verificación y sanción de los puntos de generación.		✓	✓	✓



### Actividad 2.6

#### *Reducción, reúso y recuperación.*

**Realizar una matriz comparativa de políticas internacionales de reducción, reúso y recuperación**

La tabla 2.14 se puede utilizar para clasificar los residuos en diferentes fracciones que permitan su aprovechamiento. Las fracciones de RSU deben ser gestionadas por los municipios del país, los aspectos específicos del diseño son tratados en el siguiente capítulo.

Tabla 2.14. Propuesta de separación y clasificación de RSU

Grupo de residuos	Definición	Clasificación	Identificación
<b>Residuos para eliminación segura</b>	Se refiere a todos los residuos que no puedan ser tratados o aprovechados y que requieran ser llevados a eliminación segura en un relleno sanitario, incluye los residuos sanitarios.	Orgánicos no aprovechables	<b>Anaranjado</b>
		Inorgánicos no aprovechables	
		Papel sanitario usado	
		Pañales	
		Residuos finos (pasan malla No. 200)	
	Productos de cuidado personal (no peligrosos)		
<b>Residuos biodegradables</b>	Se consideran los residuos cuyo tiempo de degradación no excede los 4 meses y que se pueden reintegrar al suelo mediante procesos de degradación biológica.	Residuos de alimentos	<b>Verde</b>
		Residuos de poda	
<b>Materiales aprovechables</b>	Son aquellos residuos que después de desechados conservan un valor económico, y/o mediante un tratamiento pueden reinsertarse a un ciclo productivo: reutilizables, reciclables y energéticos. Color Café, aprovechable con procesos sencillos. Color Gris, aprovechable con procesos intensivos en recursos.	Cuero	<b>Café</b>
		Papel	
		Cartón	
		Madera	<b>Gris</b>
		Metales	
		Vidrio	
		Plásticos	
Telas			
Caucho			

Nota: Los ejemplos de tipos de residuos por grupo, se presentan de forma enunciativa más no limitativa.

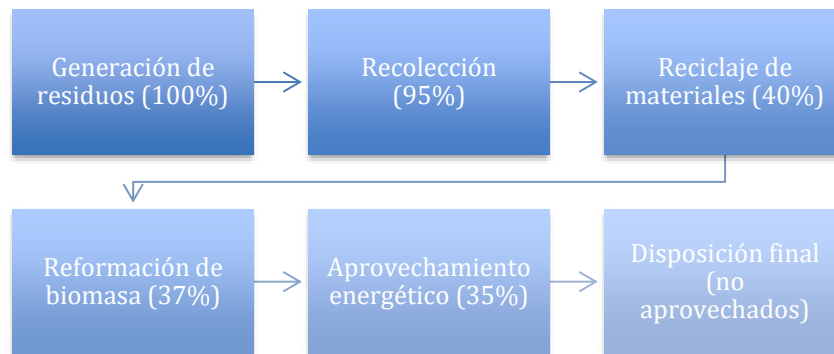
## 2.6 Preguntas y actividades propuestas

1. Un municipio de México genera 245 t/día de residuos. Los principales residuos generados se detallan en la tabla. Si los residuos de este municipio son llevados directamente al relleno sanitario, determinar para 30 días: a) ¿cuánta energía se está perdiendo?, b) ¿cuánto carbono se está dejando de utilizar?, c) si existiera una planta de composta que aprovechara el 60% de los residuos orgánicos, ¿cuánto carbono y nitrógeno se aprovecharía?, y d) si existiera una planta de incineración certificada, ¿cuánta energía se aprovecharía considerando los 5 tipos de residuos de mayor poder calorífico por unidad de masa?

Tipo de residuos	%
Papel	7.5
Cartón	6.5
Pañales	14.0
Plástico rígido	20.5
Poliestireno expandido	4.0
Orgánicos alimenticios	35.0
Orgánicos de jardín	12.0
Vidrio de color	0.5
<b>Totales</b>	<b>100</b>

2. Considerando la composición de los flujos de residuos por región en el mundo (tabla 2.12), calcular la cantidad de energía, carbono y metales que cada una genera. Con base en la información estimada, determinar las regiones que tienen mayor potencial de aprovechamiento en: a) energía, b) carbono y c) metales. Tomar en cuenta que en el mundo se generan 3,561.64 millones de t/año.

3. Tomando en cuenta los datos de residuos en el mundo del ejercicio 2 y el diagrama siguiente, especificar el aprovechamiento de reciclables, carbono/nitrógeno y energía, además de la cantidad de residuos que no se logran aprovechar. Los materiales reciclables son: papel, plásticos, aluminio, acero y vidrio. Los materiales con aprovechamiento energético son papel y plásticos. Tomar en cuenta que el flujo de los residuos no es totalmente lineal, el diagrama es una simplificación del proceso.





**Actividad 2.1**  
**Investigación de fuentes de generación y tipos de residuos**

Realiza una investigación de campo en la cual documentes de manera gráfica y escrita las fuentes de generación y los tipos de residuos identificados. Para realizar lo anterior sigue los pasos siguientes:

1. Visita por lo menos los siguientes lugares: escuela, mercado, centro comercial, construcción y casa.
2. Con tu celular o alguna cámara digital toma por lo menos dos fotografías de la zona donde se encuentran los residuos en cada sitio, la foto debe ser clara respecto a la identificación de los residuos existentes.
3. En cada uno de los sitios visitados registra el lugar, el día, la hora; esta información de identificación del sitio deberá estar integrada en tu informe.
4. Elabora el informe de investigación de campo, documentando con las imágenes y un párrafo descriptivo los hallazgos que obtuviste en cada sitio visitado.

**Actividad 2.2**  
**Consulta y aplicación de la legislación y normatividad**

**Introducción**  
La labor del ingeniero civil se orienta y ajusta a lo establecido en documentos oficiales que determinan la distribución de competencias, obligaciones, procedimientos y límites máximos permisibles. Las distintas etapas de un proyecto de un SMRSU están consideradas en la legislación y normatividad nacional, por ende, el conocimiento de su existencia y contenidos es primordial.  
Para hacer más realista el proceso de consulta de documentos oficiales, se propone la simulación de la participación del estudiante en dos casos reales, que incluyen alguna o algunas de las etapas de un proyecto de un sistema de manejo de residuos.

**Instrucciones**  
En forma de tabla, establece un listado de los documentos oficiales que deberán de ser consultados para fundamentar la etapa o conjunto de etapas de los proyectos de cada caso. Adiciona una columna en la que se exprese de forma muy resumida, de cada documento, la información obtenida. Como ejemplo, se muestra la tabla 1.

Tabla 1. Ejemplo de listado de legislación y normatividad y la información obtenida

Documento consultado	Aplicación
LGPGIR	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Política ambiental referente al manejo de residuos peligrosos</li> <li>• Características clasificatorias de los tipos de residuos</li> <li>• Competencias entre los órdenes de gobierno</li> </ul>
NMX 061 AA	Determinación del tamaño de la muestra
NOM-052-SEMARNAT-SSA1-2002	Características que hacen a un residuo peligroso

**CASO 1.**  
**CLAUSURA PROFEPA RELLENO SANITARIO, EN CHIHUAHUA**



<b>Actividad 2.2</b> <b>Consulta y aplicación de la legislación y normatividad</b>
<p>Quien llevará a cabo la consulta de la legislación y normatividad es un ingeniero especialista en el área de la ingeniería sanitaria, quien labora como gerente de operaciones del relleno sanitario afectado y deberá realizar un informe al gerente general al respecto de las faltas e incumplimientos legales que han tenido lugar. La información del caso la podrás consultar en el sitio web de la PROFEPA, ingresando a la siguiente liga:  <a href="https://www.gob.mx/profepa/prensa/clusura-profepa-relleno-sanitario-en-chihuahua">https://www.gob.mx/profepa/prensa/clusura-profepa-relleno-sanitario-en-chihuahua</a></p> <p><b>CASO 2</b></p> <p><b>PLANEACIÓN DE UN RELLENO SANITARIO INTERMUNICIPAL EN EL ESTADO DE ZACATECAS</b></p> <p>Quien llevará a cabo la consulta de la legislación y normatividad es un ingeniero civil, que forma parte del equipo multidisciplinario que elabora la manifestación de impacto ambiental del “Proyecto Integral para la construcción del relleno sanitario Intermunicipal Zacatecas, en su primera etapa. Este proyecto incluye la participación de los municipios de Zacatecas, Guadalupe, Morelos y Vetagrande. Toma en cuenta que durante las labores de construcción se podrían generar residuos peligrosos, lo que deberá considerarse en la MIA. La versión final del documento es pública, la puedes consultar en el sitio web de la SEMARNAT ingresando a la siguiente liga:</p> <p style="text-align: center;"><a href="http://bit.ly/3aCErze">http://bit.ly/3aCErze</a></p>

<b>Actividad 2.3</b> <b>Composición de los residuos de Cataluña</b>
<p><b>Introducción</b></p> <p>Como sabes las características físicas de los residuos dependen del tipo de desecho y de la fuente de generación. Caracterizar físicamente los residuos que genera una población es fundamental para una adecuada planeación y diseño de los sistemas de manejo de residuos sólidos municipales.</p> <p>El video sugerido muestra el proceso de obtención de la composición de los residuos generados en la provincia de Cataluña en España. En éste se muestran similitudes y diferencias entre el procedimiento normado en nuestro país que vale la pena reflexionar. El video lo podrás encontrar en el siguiente enlace:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <a href="https://youtu.be/ZvW0sqN1Cps">https://youtu.be/ZvW0sqN1Cps</a></li> </ul> <p>Adicionalmente se sugiere la consulta de publicaciones oficiales, tanto de la Agencia Europea del Medio Ambiente como de México, cuyos accesos son:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <a href="https://www.eea.europa.eu/publications/managing-municipal-solid-waste">https://www.eea.europa.eu/publications/managing-municipal-solid-waste</a></li> <li>- <a href="http://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/-/DDN-20170130-1">http://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/-/DDN-20170130-1</a></li> <li>- <a href="http://bit.ly/30TURZ1">http://bit.ly/30TURZ1</a></li> <li>- <a href="http://bit.ly/2GnOycZ">http://bit.ly/2GnOycZ</a></li> </ul>

### Actividad 2.3

#### Composición de los residuos de Cataluña

##### Instrucciones

A partir de la reproducción del video y de la consulta de la información sugerida, responde las siguientes preguntas:

1. ¿Cuál es la media de generación de RSU en la unión europea?
2. Compara los valores de la generación de RSU en Cataluña y en México. Concluye al respecto.
3. ¿A qué se refiere el concepto de recogida selectiva que se menciona en el video?
4. En la Unión Europea, ¿cuáles son los 10 países que encabezan la lista con mayor porcentaje de recolección selectiva? Genera una tabla con los valores por país y compáralos con el que sucede en México. Explica las posibles causas.
5. ¿Cuáles son los subproductos que el video nombra como “resto”?
6. Si en Cataluña ya se cuenta con información precisa de los residuos de la recogida selectiva, ¿para qué se desea conocer la composición de la fracción resto?
7. Explica la metodología utilizada para que los resultados de los ensayos de composición fueran estadísticamente representativos.
8. Explica con tus palabras el procedimiento para la determinación de la composición de los residuos.
9. ¿Cuál fue el ajuste que se realizó a la fracción de papel y cartón, plástico film, textil y envases ligeros domésticos?
10. Realiza una tabla comparativa entre los resultados de la suma de los porcentajes de la recogida selectiva con los de la fracción resto obtenida del análisis de la composición con la composición de los residuos en México. Considera solo aquellos subproductos que sean directamente comparables y concluye con base en lo observado.

### Actividad 2.4

#### Planta de termo valorización de residuos sólidos urbanos en la CDMX

##### Introducción

El manejo de RSM conlleva impactos a distintos factores del ambiente. Una estrategia para minimizar las afectaciones debe iniciar con la disminución de la masa de residuos generados, seguido de la inclusión de reciclaje, compostaje y la incorporación hacia nuevas cadenas productivas. El restante se deberá tratar, lo que permite disminuir al máximo la cantidad de residuos que se destinan a la disposición final en relleno sanitario. Una de las alternativas de tratamiento es la valorización de esta fracción por su potencial calorífico.

En la CDMX se ha considerado el tratamiento de los residuos no reciclables ni compostables mediante el aprovechamiento energético en una planta de termovalorización. La información general del proyecto es pública y la podrás consultar accediendo a las ligas propuestas.

- Descripción del proyecto
  - <https://youtu.be/byrTUrNJ02w>
- Presentación del proyecto por parte del Jefe de Gobierno
  - [https://youtu.be/VL6DML\\_S3-Y](https://youtu.be/VL6DML_S3-Y)

### Actividad 2.4

#### Planta de termo valorización de residuos sólidos urbanos en la CDMX

Por otra parte, como una forma de analizar la aplicación de esta tecnología en otras partes del mundo, se sugiere observar un video que muestra un sistema integral de manejo de residuos sólidos municipales en Barcelona. Este sistema incluye, como uno de los elementos finales, una planta de termovalorización.

- Ejemplo de termovalorización en Barcelona
  - <https://youtu.be/RUmPsKoQRQ8>

#### Instrucciones

Con base en la búsqueda de información y en el análisis de los videos sugeridos, responde lo siguiente:

1. ¿Cuál es la mitigación del impacto ambiental que se tendrá por la incorporación de la planta de termovalorización en la CDMX? Incluye en tu respuesta cantidades.
2. Representa como un sistema a la planta de termovalorización. Incluye en éste un cuadro que representa a las fronteras (planta) y con flechas las entradas y salidas. Indica las transformaciones que suceden en la planta.
3. ¿Qué mecanismos considera la planta de termovalorización para la mitigación de los impactos ambientales a la atmósfera? En el caso de la planta de Barcelona, ¿cuáles son los gases que se monitorean en la salida de la chimenea de la planta de termovalorización?
4. Elabora un diagrama de flujo del proceso de termovalorización incluido en el proyecto para la CDMX.
5. ¿Cuál es la cantidad de energía que se estará obteniendo de los residuos? ¿Qué destino tiene?
6. Investiga qué características tiene el producto residual sólido de la combustión. ¿Qué destino se le ha dado en otras partes del mundo?
7. Con excepción de la fracción “resto”, ¿cómo se manejan los distintos subproductos en la ciudad de Barcelona? En CDMX, ¿qué se hace con estos subproductos?
8. Elabora un diagrama de flujo del proceso de tratamiento de la fracción resto en la ciudad de Barcelona.
9. Al analizar el sistema de manejo de residuos municipales de la ciudad de Barcelona, ¿qué complementos o mejoras sugieres al sistema de termovalorización de RSM en la CDMX?
10. ¿Por qué el reciclaje y compostaje, previo a la termovalorización, son una alternativa más conveniente que la termovalorización directa?

### Actividad 2.5

#### Flujo de materiales en la sociedad

Considerando los conceptos vistos en clase de ciclo de vida, flujo de materiales-energía y metabolismo urbano, además de analizar la información del documento “Inventario de Residuos Sólidos, Ciudad de México 2015” y algunas otras referencias oficiales que tú consideres importantes, realiza un esquema que ejemplifique el flujo de desechos en la Ciudad de México.

El esquema debe considerar por lo menos tres fases:

1. Las diferentes entradas de materiales y energía.
2. Los procesos socioeconómicos más relevantes que consideres se desarrollan en la ciudad.
3. Las principales salidas de desechos en cualquiera de sus tres estados: sólidos, líquidos y gaseosos.

Vínculo al documento: <http://bit.ly/2NUtnDB>

**Actividad 2.6**  
**Reducción, reúso y recuperación**

Realiza una investigación documental en la que consultes las políticas de gestión de residuos de cinco países, respecto a las acciones y estrategias que realizan para la reducción, reúso y recuperación de los residuos. La selección de los países queda abierta a tu elección, pero deben estar distribuidos en tres continentes, considera uno de los cinco países a México. Una sugerencia de países es: México, Estados Unidos en el continente Americano; Alemania y Bélgica del continente Europeo y Japón de Asia. Para cada uno de estos deberás:

1. Buscar en internet las políticas de gestión de residuos.
2. Hacer una lectura general para identificar las secciones que hacen referencia a las acciones y estrategias de reducción, reúso y recuperación.
3. En caso necesario, elaborar un resumen por cada una.
4. Presentar lo investigado en una matriz, como la que se ejemplifica.
5. Con la información obtenida, realiza un comentario para cada país respecto a la viabilidad de las acciones y estrategias propuestas, escríbelo en la matriz.

**Matriz comparativa de políticas internacionales de reducción, reúso y recuperación**

País	Reducción	Reúso	Recuperación	Comentario
P1				
...				
P5				

## Capítulo

# 3

## Objetivos de aprendizaje

---

Objetivo: El alumno diseñará de manera preliminar los subsistemas de almacenamiento en sitio, recolección y transporte. Además, diferenciará los sistemas de tratamiento y diseñará funcionalmente y de manera preliminar el relleno sanitario que se adapte al sitio seleccionado, de acuerdo con las normas oficiales mexicanas.

**Capítulo****3**

## **3. Almacenamiento, recolección, transporte, tratamiento y disposición final de residuos sólidos urbanos**

*Los residuos contienen el trabajo de la acción humana en materiales y en energía (exergía), por lo cual deben aprovecharse y reincorporarse a los ciclos productivos para reducir la pérdida de energía y recursos naturales ocasionadas por actividades antrópicas.*

### **3.1 Elementos funcionales del sistema de manejo de residuos e interrelaciones**

A diferencia de las necesidades individuales de los seres humanos, las necesidades del ser humano en sociedad son más grandes y complejas, basta imaginarse qué hace un individuo con sus residuos y lo que se hace con ellos en la ciudad donde vive. La problemática de los residuos sólidos va más allá de la existencia de una gran cantidad de elementos orgánicos e inorgánicos ajenos al medio que alteran el equilibrio ecológico, también representan una extracción masiva de materias primas que originalmente fueron recursos naturales, algunos inclusive, no renovables. Durante el ejercicio profesional del ingeniero civil constantemente le surgirá la necesidad del manejo adecuado de residuos sólidos, por ello es importante que en principio sepa identificar a los elementos que integran un sistema de manejo, y que aplique la normatividad con el adecuado conocimiento de causa.

Un sistema integral de manejo de residuos sólidos técnica, económica y ambientalmente viable, deberá de ser flexible, orientado al mercado y tendrá la capacidad de incluir cualquier tipo de residuo generado por la población a la que sirva. Además, dentro de los elementos que le dan origen, considerará la dinámica poblacional y las posibles modificaciones de hábitos de consumo.

En general un sistema integral de manejo de residuos sólidos deberá estar integrado por las etapas mostradas en la figura 3.1. A continuación se detallan dichas etapas.

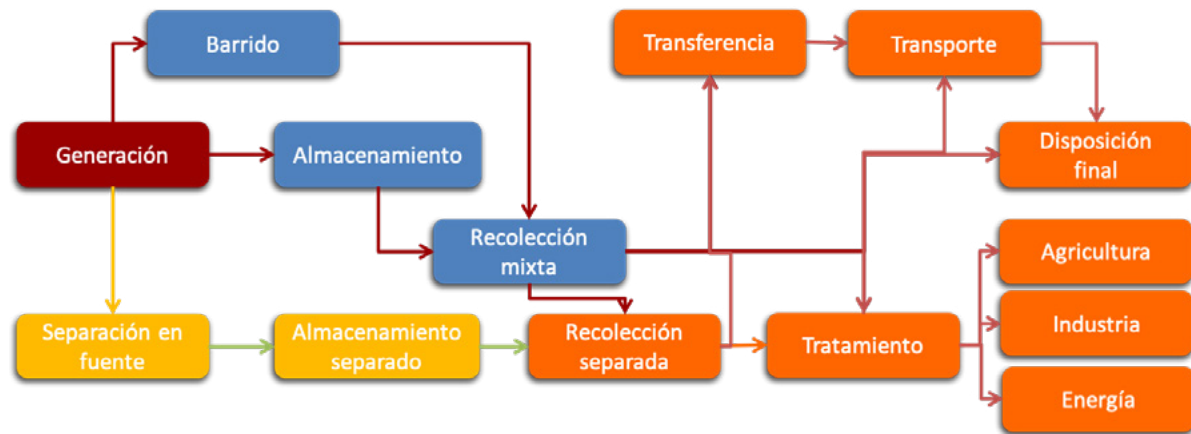


Figura 3.1 Esquema del sistema de manejo integral de residuos sólidos.

Para dimensionar los elementos de los que consta un sistema de manejo de residuos sólidos será necesario conocer la cantidad y calidad de los residuos que genera la población, información que se establecerá más adelante, se obtiene a partir de un estudio de generación. Dado que el proceso de generación de residuos es continuo, a diferencia de la recolección cuya ocurrencia es intermitente, los residuos tendrán que contenerse cierto tiempo hasta que se efectúe la recolección nuevamente, aquí es donde entra el almacenamiento *in situ*. Se debe de evitar, en la medida de lo posible, la descomposición de los RS durante el almacenamiento, ya que al ocurrir este proceso se generan malos olores, razón por la cual es recomendable que el almacenamiento *in situ* se lleve a cabo en un contenedor cuyas características eviten la proliferación de vectores. Más adelante se establecen las características de los distintos recipientes y contenedores utilizados para el proceso de almacenamiento, además de las variables involucradas en la determinación del volumen de almacenamiento necesario.

Otro proceso importante del manejo de los residuos sólidos generados en las localidades es el barrido, acción con la cual son limpiadas las calles principales y los espacios públicos. En todos los municipios debe llevarse a cabo este proceso, desde municipios pequeños hasta ciudades más urbanizadas, por ello se considera una prioridad. El barrido asegura, en principio, la estética de la localidad, además, las condiciones sanitarias son favorables y se evita la proliferación de vectores. También se evita la obstrucción con residuos de la infraestructura del alcantarillado, disminuyendo el riesgo de inundaciones. El barrido puede ser manual o en conjunto con elementos mecánicos, esto dependerá de la capacidad económica del municipio. La eficiencia del barrido por un trabajador está en torno a los 2 km por día, a diferencia de una máquina barredora, que suele tener rendimientos mayores a los 30 km diarios.

Dentro del sistema integral de manejo de residuos sólidos, el subsistema de recolección es el que conlleva más recursos económicos para su operación, ya que para esta actividad se requiere de equipo especializado y personal calificado. La recolección es el proceso de colecta y transporte de los residuos generados diariamente por los generados, la recolección debe ser realizada de manera



continua y constante para que el sistema integral de manejo sea eficiente, también deben ser recolectados los residuos de todas las localidades que conforman el municipio o ciudad.

Una vez conocida la cantidad de residuos generados por cada habitante en cada día (generación *per cápita*), con esta información y con elementos cartográficos fundamentalmente se pueden diseñar las rutas de recolección y la frecuencia de esta. Si bien la generación *per cápita* es un dato importante para la determinación de la frecuencia de la recolección, lo es más el clima de la localidad. La razón de lo anterior es que conforme es más alta la temperatura y humedad relativa del medio, lo es también la rapidez del proceso de descomposición y, por ende, los olores y los gases resultantes, presentándose incomodidad en la población. En el subcapítulo 3.5, se explican los elementos y aspectos involucrados en el diseño de las rutas de recolección, además se presentan los vehículos más utilizados y sus características.

El transporte, en el contexto de un sistema de manejo de residuos sólidos, consiste en el traslado de residuos desde el sitio de generación hasta su destino. El transporte, primordialmente es llevado a cabo por el mismo vehículo recolector, sin embargo, por cuestiones económicas que se detallarán en los siguientes apartados, en ocasiones es conveniente contar con infraestructura que lo haga más eficiente, para reducir los costos de transporte entre la localidad y el aprovechamiento y/o disposición final, la infraestructura requerida es la estación de transferencia (EdT). En la EdT los vehículos recolectores de menor volumen descargan los residuos y éstos se vierten en un vehículo más grande, por ejemplo, un tracto camión, también llamado *transfer*. El volumen que puede transportar un tracto camión equivale a 5 o más veces lo que puede transportar un vehículo recolector estándar, hecho que representa un ahorro en tiempo y energía, y por consiguiente en dinero. A la estación de transferencia llegarán los vehículos recolectores y descargarán los residuos para regresar nuevamente a sus labores de recolección. Los residuos recibidos en la EdT son vaciados en el tracto camión por los métodos directo o indirecto, que se describen más adelante. Es importante que el *transfer* opere en condiciones sanitarias adecuadas, como limpieza en las paredes externas del contenedor, cubrir la superficie superior con una lona limpia e inspeccionar las posibles fugas de lixiviados.

Desafortunadamente en México el destino final de la mayoría de los residuos sólidos es un sitio de disposición controlado, sin embargo, algunos residuos en las grandes ciudades son llevados a plantas de selección, en las cuales se lleva a cabo la selección de subproductos para su posterior empaquetamiento y venta a la industria como materia prima.

El diseño de un sistema integral de manejo de RS debe considerar la recolección separada con lo que se favorece el aprovechamiento de los residuos. La forma de aprovechar los residuos sólidos orgánicos (RSO) es mediante su mezcla con suelo en condiciones específicas de temperatura y movimiento. Estas condiciones hacen que la degradación de la materia orgánica sea acelerada y controlada, hecho que conlleva que los componentes de la materia orgánica sean biodisponibles, enriqueciendo el suelo convirtiéndolo en más fértil y útil para la agricultura. Los principales materiales que la industria compra separados son: aluminio de construcción, chatarra, perfiles de acero, bote aluminio, bote ferroso, fierro, lámina metálica, cobre, alambre, botellas de vidrio, vidrio ámbar, transparente y verde, cartón, todo tipo de papel, periódico, PVC, PET, plástico rígido o nylon, entre otros.

El destino de los residuos que no son susceptibles de incorporarse como materia prima en algún proceso industrial es la disposición final en condiciones controladas, lo que obedece a la necesidad de mitigar los impactos ambientales durante su proceso de degradación. El confinar los residuos supone que los residuos tendrán un proceso de descomposición en ausencia de oxígeno, controlada y continua, que hará que los residuos sean cada vez menos impactantes, es decir, que después de muchos años los residuos serán degradados a elementos más sencillos, por ejemplo, nitratos y fosfatos, susceptibles de ser utilizados por los organismos autótrofos como nutrientes.

El hecho de confinar los residuos y esperar su degradación hace necesarios diseñar y construir estructuras para controlar procesos, tales como la recolección, canalización y tratamiento de lixiviados, así como la captación, conducción y aprovechamiento del biogás producido. El biogás es un resultado de la descomposición de residuos orgánico en condiciones anaerobias, y está formado principalmente por dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y metano ( $\text{CH}_4$ ). A este respecto es importante que se considere el efecto negativo que produce el metano en la atmósfera, en términos de efecto invernadero, es 20 veces más contaminante que el  $\text{CO}_2$ . En los siguientes subcapítulos se establecen los criterios de diseño, así como las metodologías para el diseño de los elementos que integran a un sistema integral de manejo de residuos sólidos.



### Actividad 3.1

#### *Sistema intermunicipal de residuos sólidos urbanos*

Ver el video “Sistema intermunicipal de manejo de residuos”, para poder contestar el cuestionario propuesto y realizar un balance de residuos

## 3.2 Generación de residuos

### Estudio de generación de residuos sólidos urbanos

La generación per cápita, la composición y el peso volumétrico de los residuos se obtienen realizando un estudio de generación de residuos sólidos urbanos. El diseño de un sistema de manejo integral de residuos sólidos debe contar con un diagnóstico básico en el cual se incluyan los datos de las tres variables mencionadas: generación per cápita, composición y peso volumétrico. La generación per cápita es la cantidad en peso de residuos sólidos que una persona en promedio genera en un periodo de un día, comúnmente se expresa en  $\text{kg}/\text{hab}/\text{día}$ . La composición está formada de los promedios en peso de las diferentes fracciones o materiales de residuos sólidos que se obtiene de una muestra, es decir, son las porciones que en promedio forman el total de los tipos de residuos generados, se expresan como porcentajes (%). El peso volumétrico se refiere a la cantidad en peso por una unidad de volumen para cada fracción de residuos o para la mezcla de los residuos, las unidades comunes en las que se expresa son  $\text{kg}/\text{m}^3$  o  $\text{t}/\text{m}^3$ . La realización de un estudio de generación de residuos debe seguir las siguientes etapas:

**Distribución de la muestra.** La muestra debe distribuirse en tres estratos poblacionales: bajo, medio y alto. La generación de residuos, entre otros aspectos, está asociada con el poder adquisitivo de las personas, por ello, deben determinarse los estratos del lugar donde se realice el estudio con una variable

socioeconómica y otra poblacional, ambas independientes a la información del estudio. La confiabilidad de la muestra debe ser de  $95\% \pm 5\%$ , por estrato. La distribución de la muestra debe incluir todas las zonas poblacionales del lugar donde se realice el estudio. Las especificaciones para determinar la muestra están en la norma mexicana NMX-AA-061-1985 - Determinación de la generación.

**Planeación del trabajo de campo.** La planeación en gabinete del trabajo de campo es una etapa fundamental para realizar un estudio de generación de residuos sólidos eficiente. Los recursos materiales y humanos para la investigación de campo son cuantiosos, por lo que se requiere analizar y programar las actividades específicas que se necesitan. También, en esta etapa se realizan los materiales escritos y la adquisición de equipo que serán utilizados posteriormente. El trabajo realizado deberá concluir con una reunión con el personal del gobierno local relacionado con el tema de residuos sólidos urbanos, para conocer las sugerencias que puedan contribuir a una mejor planeación del estudio, además, en la sesión deben plantearse los requerimientos de apoyo por los funcionarios locales en actividades puntuales, como la relación con las personas del lugar y los datos de contacto local para resolver dudas durante el estudio.

**Campaña de difusión con la población.** La campaña de difusión es la primera actividad masiva en campo. Las brigadas asignadas para el trabajo deberán estar distribuidas en el lugar, con el material y equipo necesario. Es importante que en las brigadas esté presente un representante de la autoridad local, para resolver cualquier inquietud de la población. La campaña consiste en visitar las zonas de la muestra y seleccionar de manera aleatoria el número de casas hasta completar el total para cada estrato. Los brigadistas deben visitar cada casa, solicitar hablar con una persona adulta que pueda tomar decisiones, explicar el objetivo y desarrollo del estudio, acordar con la persona el horario y forma de recolección de los residuos por al menos 11 días (2 previos + 7 efectivos + 2 posteriores). El mes cuando se realiza el estudio es determinante para calcular el total de residuos del año, por lo que deberá ser anotado, la manera para determinar la generación anual de residuos se desarrolla en el ejemplo 2.1.

**Campaña de recolección y pesaje.** La campaña de recolección y pesaje es la segunda actividad masiva en campo. Es importante aclarar que la recolección de los residuos sólidos en los domicilios que ya fueron registrados como participantes durante la campaña de difusión con la población, deberán ser recolectados el día acordado. La recolección debe realizarse domicilio por domicilio, identificando cada domicilio y estrato. El número de brigadas para la recolección debe considerar el tamaño del lugar y la distribución geográfica de la muestra, además, debe considerarse que la recolección no deberá durar más de 8 horas al día, para continuar con el proceso de pesaje para ese mismo día.

El proceso de pesaje inicia al recibir las muestras recolectadas en la jornada diaria. El lugar donde se hará el trabajo debe contar con un piso impermeable y preferentemente un techo, para evitar el contacto de los residuos con el suelo y la posible insolación de los brigadistas. El procedimiento debe realizarse por separado para cada estrato y consiste en las siguientes cuatro actividades:

1. *Pesaje de cada muestra.* Cada muestra debe ser pesada y registrado el valor en las hojas de control. El pesaje puede realizarse con báscula o dinamómetro. La relación entre el promedio de la cantidad de residuos diarios por muestra entre el número de pobladores que generaron esos residuos es la generación per cápita o la generación diaria de residuos por habitante.

$$GPC = \frac{\text{cantidad de residuos por muestra}}{\text{número de habitantes del domicilio}}$$

2. *Aplicación del método de cuarteo.* Las muestras de un mismo estrato se juntarán para hacer el método de cuarteo. El método está especificado en la norma mexicana NMX-AA-015-1985 - Muestreo - Método de cuarteo. Los cuartos de residuos obtenidos por este método serán utilizados en las actividades 3 y 4.
3. *Determinación del peso volumétrico.* El procedimiento deberá seguir lo establecido en la norma mexicana NMX-AA-019-1985 - Peso volumétrico “in situ”. Diariamente se debe obtener el peso volumétrico in situ por estrato, por lo que al final del estudio se podrá obtener un promedio del peso volumétrico considerando los días del estudio.

$$PV = \frac{\text{peso de los residuos}}{\text{volumen de control}}$$

4. *Selección y cuantificación de subproductos.* Los subproductos, fracciones de residuos o materiales, serán utilizados para determinar la composición. La forma en la que se obtienen se establece en la norma mexicana NMX-AA-022-1985 - Selección y cuantificación de subproductos. La composición es la información básica para identificar métodos de tratamiento y aprovechamiento de los residuos sólidos. El detalle y la representatividad con los que se obtengan estos valores determinarán los valores de diseño para procesos posteriores del manejo de residuos. La fracción por cada residuo se determinará como:

$$\% \text{ Fracción } X = \frac{\text{peso del residuo } X}{\text{peso total de los residuos}} \times 100$$

**Procesamiento y análisis de resultados.** El procesamiento de la información debe realizarse de manera diaria, para que sirva como mecanismo de supervisión de los procedimientos. Los datos que parezcan atípicos deberán ser revisados con la o las brigadas responsables, para hacer los ajustes o explicaciones respectivas. Es importante comentar que el trabajo de las brigadas como el procesamiento y revisión de los datos es determinante para la calidad del estudio, por lo que la supervisión deberá ser visual en el trabajo de campo y analítica con los datos que se están obteniendo. El procesamiento y análisis de resultados la debe realizar el ingeniero o especialista en residuos a cargo de toda la investigación.

**Elaboración del informe.** El informe es la etapa final del estudio de generación de residuos sólidos urbanos. El informe debe considerar una parte analítica, una parte escrita y una de comunicación oral. El análisis y la interpretación de los resultados obtenidos del estudio requieren basarse en todas las etapas, ya que los números deben ser explicados desde los hechos encontrados durante todo el trabajo de campo. El informe escrito es una sistematización y documentación de todo el estudio, desde la primera etapa de *Distribución de la muestra* hasta el *Procesamiento y análisis de resultados*. El documento debe incluir una descripción de la metodología utilizada, detallando particularidades en la aplicación de los métodos o consideraciones operativas en las que se haya incurrido, así como alguna modificación a las normas mexicanas. Documentar lo ocurrido durante el estudio, permite tener una mejor interpretación de los resultados y entender las experiencias de aprendizaje para futuros estudios. La comunicación hacia los actores interesados es el cierre del trabajo, ya que, si bien deben dejarse los materiales escritos,

durante la comunicación directa de los resultados del estudio podrá existir retroalimentación de los actores locales, con lo que podrá mejorar el entendimiento y la utilización de los resultados de estudio.

**Problema resuelto 3.1. Cálculo de la generación anual de residuos sólidos urbanos**

En el año 2018, en un municipio se realizó un estudio de generación de residuos sólidos urbanos durante el mes de junio. Los datos obtenidos del estudio determinaron que la generación per cápita es de 1.115 kg/hab/día. Además, de los registros municipales de recolección se obtuvo la tabla P3.1.1 que muestra la variación mensual de los residuos. Información adicional se obtuvo de fuentes oficiales, por lo que la tasa de crecimiento poblacional es de 1.4% (tp) y la de crecimiento del Producto Interno Bruto es de 5%. El municipio para el año 2018 tuvo una población de 119,500 habitantes. Determine: a) la generación anual para el año en que se realizó el estudio de generación de RSU, b) la generación de residuos 5 años después, y c) la generación de residuos 10 años después, ambos cálculos deben considerar la variación poblacional y de la generación.

Tabla P3.1.1. Variación mensual de los residuos, año 2018

Mes	Variación porcentual (%)
Enero	120
Febrero	100
Marzo	110
Abril	100
Mayo	110
Junio	90
Julio	120
Agosto	110
Septiembre	110
Octubre	100
Noviembre	110
Diciembre	120

**Solución**

Inciso a)

Considerando la tabla de variación mensual para el año de referencia (2018), se agrega una columna con la generación per cápita ajustada al mes cuando se realizó el estudio de generación de residuos sólidos urbanos, tabla P3.1.2 (formato de problema). Tomando como base el dato obtenido de generación per cápita se determina el valor para cada mes, considerando la variación porcentual para cada uno. Posteriormente, se consideran los días por mes y se obtiene el valor de generación de residuos para cada uno. La generación mensual se obtiene con:

$$G_m = \frac{P \times GPC \times D}{1000}$$

Donde:

G<sub>m</sub> – generación mensual (t/mes)

P – población (hab)

GPC – generación per cápita (kg/hab/día)

D – días del mes (día)

Los resultados se presentan en la tabla P3.1.2.

Tabla P3.1.2. Cálculo de la generación del año 2018

Mes	Variación porcentual (%)	GPC ajustada (kg/hab/día)	Días del mes (día)	Generación mensual (t/mes)
Enero	120	1.487	31	5,507
Febrero	100	1.239	28	4,145
Marzo	110	1.363	31	5,048
Abril	100	1.239	30	4,441
Mayo	110	1.363	31	5,048
Junio	90	1.115	30	3,997
Julio	120	1.487	31	5,507
Agosto	110	1.363	31	5,048
Septiembre	110	1.363	30	4,886
Octubre	100	1.239	31	4,589
Noviembre	110	1.363	30	4,886
Diciembre	120	1.487	31	5,507
Anual		1.344	365	58,612

Nótese que, si bien el promedio aritmético del GPC es de 1.342 kg/hab/día, la obtención del valor representativo del GPC del año corresponde a la cantidad de residuos generada durante el año entre el número de días y la población, por lo que el valor preciso es  $GPC_{2018} = 1.344$  kg/hab/día. La variación se debe a que no todos los meses del año tienen la misma cantidad de días, por lo que la distribución no puede ser equitativa. Es importante obtener los datos precisos del  $GPC_{2018}$ , ya que será utilizado para estimar las proyecciones de la generación de residuos para los próximos 5 y 10 años ( $n=5$  y  $n=10$ ), para revisar el modelo aritmético ver el Capítulo 2, del libro Ingeniería Ambiental - Fundamentos.

Inciso b)

La proyección se realizará aplicando un modelo de crecimiento aritmético para la población y para el GPC. Es decir, se aplicará un doble efecto de crecimiento debido a los habitantes y a la generación de residuos. En el caso de la generación de residuos, debe considerarse que la tasa de crecimiento de la generación per cápita es de la mitad del crecimiento del PIB, es decir, para este ejemplo la tasa de crecimiento del GPC es 2.5% (tg). El cálculo se presenta a continuación.

$$G_n = ((P \times (1+tp)^n) (GPC \times (1+tg)^n) \times 365 / 1000$$

La generación anual para el año 2023, es decir, con  $n = 5$  años es

$$G_{2023} = ((119,500 \times (1+0.014)^5) (1.344 \times (1+0.025)^5) \times 365 / 1000$$

$$G_{2023} = 71,099.92 \text{ t/año}$$

Inciso c)

De manera análoga para  $n = 10$  años, se tiene:

$$G_{2028} = ((119,500 \times (1+0.014)^{10}) (1.344 \times (1+0.025)^{10}) \times 365 / 1000$$

$$G_{2028} = 86,233.94 \text{ t/año}$$

### 3.3 Manejo en el sitio, almacenamiento y procesamiento

Las fuentes de generación de residuos sólidos tienen diversas formas en las que se almacenan. El manejo en el sitio depende del cumplimiento de la normativa para el tipo de residuo del que se trate, es decir, los residuos sólidos urbanos (residuos domiciliarios) se manejan en el sitio de generación (viviendas) de forma diferente a los residuos de manejo especial (por actividades económicas), aún más específico puede ser el manejo de residuos generados por actividades de construcción y por actividades del comercio o transporte. Sin embargo, existen factores comunes que intervienen en el establecimiento del manejo, temporalidad y procesamiento del almacenamiento de los residuos sólidos, los cuales son: biodegradabilidad, volumen, área disponible y frecuencia de recolección.

**Biodegradabilidad**, se refiere a la acción metabólica de microorganismos al consumir residuos de materia orgánica. Los microorganismos consumen la materia orgánica de los residuos y la digieren, desechando compuestos más simples, y además gases, agua y en algunos casos calor. El proceso de degradación de la materia orgánica puede ser en presencia de oxígeno (aerobio) o en su ausencia (anaerobio). Aunque existen materiales como papel, tela de algodón, cartón, entre otros, la característica de biodegradabilidad se atribuye a aquellos cuyo tiempo de degradación no excede los 4 meses y que se pueden reintegrar al suelo mediante procesos biológicos aerobio y/o anaerobio, como los residuos de alimentos y de jardín.

**Volumen**, se refiere a una medida de la cantidad de residuos, la cual es la relación entre la generación y el peso volumétrico en un determinado tiempo. Como se comenta el volumen está relacionado de manera directa con la generación de residuos, por ello, se le puede denominar como *volumen de generación*. Más adelante se definirá el *volumen de almacenamiento*, que es diferente al que se explica en este párrafo.

**Área disponible**, se refiere al espacio destinado para el almacenamiento en la fuente de generación de los residuos. Para los residuos que se generan en una cantidad menor, el área disponible no es significativa, sin embargo, para residuos de mayor generación como es el caso de unidades habitacionales, conjuntos residenciales o en general multifamiliares, el espacio destinado para el almacenamiento puede llegar a ser importante, por lo que en muchos de estos casos debe ser considerado desde el diseño arquitectónico. También, el área disponible para residuos generados en centros comerciales, industrias, mercados, escuelas, oficinas, entre otros, es un espacio importante que debe ser dimensionado.

**Frecuencia de recolección**, se refiere al periodo entre los días de recolección de los residuos del sitio de almacenamiento y su transporte hacia el siguiente proceso del sistema de manejo integral. La frecuencia de recolección depende del método de recolección que esté considerado en el sistema de manejo integral (parada fija, acera, intradomiciliario o contenedores), este aspecto se detallará en el apartado 3.4 de este libro. La frecuencia de recolección también debe tomar en cuenta el tipo de residuo, su separación, la cobertura del servicio y la asequibilidad social, es decir, la recolección debe brindarse a toda la población sin importar los aspectos socioeconómicos o políticos.

#### 3.3.1 Tipos de almacenamiento

El almacenamiento de los residuos en la fuente de generación puede realizarse de dos formas: a) contenedores, y b) no contenido. La forma más convencional en la que los residuos sólidos urbanos son almacenados es con la utilización de contenedores. Los contenedores son recipientes en los que



de manera temporal son almacenados los residuos, existen tres diferentes: abiertos, semiabiertos y cerrados.

Los abiertos son recipientes en los que la cara superior está totalmente descubierta. Los semiabiertos son contenedores con una o varias de sus caras ranuradas, es decir que no toda la superficie está expuesta. Estos contenedores pueden construirse de distintos materiales como: metal, madera e inclusive de plástico rígido, para almacenar residuos de gran volumen, por ejemplo: llantas usadas, madera, plásticos, etcétera. Los cerrados son contenedores que cuentan con una tapa para cubrir el recipiente que tiene una sola abertura, normalmente en la parte superior por donde se depositan los residuos. La tapa puede ser de cierre simple o hermético. Estos recipientes son adecuados para almacenar residuos biodegradables como los de las viviendas, restaurantes y mercados, pero en general son útiles para almacenar residuos que sea necesario mantener cerrados. Recordando que los residuos orgánicos almacenados por largos periodos de tiempo en contenedores cerrados simularán las reacciones de un biorreactor, por lo que se iniciará con un proceso de degradación aerobio, pero una vez que se consuma todo el oxígeno del contenedor dará paso a la fase anaerobia, por lo que se generarán gases con olores característicos que pudieran ser molestos al abrir el contenedor. También los contenedores cerrados son utilizados cuando el precio en el mercado del residuo es importante, actualmente los residuos con un mejor valor son cobre, metal, aluminio, lata, PET, plástico rígido, vidrio, papel y cartón.

Los factores que deben considerarse para el diseño y selección de los contenedores son:

- Capacidad suficiente
- Resistencia
- Durabilidad
- Higiénicos
- Estéticos
- De fácil limpieza
- Maniobrables
- Materiales para su construcción
- Costos

El almacenamiento de tipo no contenido es todo aquel que no requiere de un recipiente. Los residuos de manejo especial tienen características diferentes a los residuos sólidos urbanos, por lo que en muchos casos requiere de un almacenamiento no contenido. Algunos ejemplos son residuos de grandes generadores, como los que provienen de los siguientes sectores: construcción, industria, manufactura, transporte y derivados pétreos.

### **3.3.2 Cálculo del volumen de almacenamiento**

El volumen de almacenamiento es el requerido para tener el espacio suficiente en el que los residuos deberán esperar de acuerdo con la frecuencia para ser recolectados. La fórmula siguiente establece las variables que intervienen en su cálculo:

$$V = \frac{G \times P}{PV} \times Fr \times Fc \tag{3.1}$$

Donde:

$V$  = volumen de almacenamiento (m<sup>3</sup>)

$G$  = generación per cápita (kg/hab/día)

$P$  = población (hab)

$PV$  = peso volumétrico (kg/m<sup>3</sup>)

$Fr$  = factor de recolección.  $Fr = \frac{7}{\# \text{ días recolección semanal}}$

$Fc$  = factor de corrección. Varía en un rango de 1.15 a 1.45, dependiendo la incertidumbre en la regularidad del servicio de recolección, de acuerdo con la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Incertidumbre de regularidad del servicio de recolección

Continuidad del servicio de recolección	Fc
El servicio de recolección no falla con una probabilidad mayor o igual al 90%.	1.15
El servicio de recolección no falla con una probabilidad menor al 90% y mayor al 70%.	1.30
El servicio de recolección no falla con una probabilidad menor al 70%.	1.45

El peso volumétrico (PV) de cada tipo de residuo influye en el volumen de almacenamiento. Los residuos con mayor peso volumétrico requieren un menor volumen de almacenamiento, por ejemplo, los residuos de alimentos con mayor PV requieren menor volumen para ser almacenados que otros como PET o poliestireno expandido que tienen menores valores de PV. Algunos valores representativos de diferentes tipos de residuos se presentan en la tabla 3.2. Es importante destacar, que el almacenamiento de los residuos debe ser separado, es decir, los residuos no deben estar mezclados. En el apartado 2.5 de este libro se presenta una tabla en la que se especifica la separación y clasificación de los RSU.

Tabla 3.2 Valores de peso volumétrico de diferentes tipos de residuos

Componentes	Rango del PV (kg/m <sup>3</sup> )	Promedio o típico (kg/m <sup>3</sup> )
<b>Residuos de alimentos</b>		
En viviendas	131-481	291
En mercados	475-950	540
<b>Residuos de jardinería</b>	59-225	101
<b>Madera</b>	131-320	237
<b>Papel y cartón</b>	42-131	50
<b>Plásticos</b>	42-131	65
<b>Textiles</b>	42-101	65

Vidrio	160-481	196
Latas	50-160	89
Otros metales	65-1,151	280

Fuente: adaptado de <http://www.ambientum.com/enciclopedia/residuo/1.26.31.06r.html>.

### Problema resuelto 3.2. Determinación del volumen necesario para el almacenamiento de residuos

En una vivienda en la que habitan 6 personas se requiere conocer el volumen necesario para almacenar los residuos sólidos generados. La generación per cápita o de cada habitante es de 0.905 kg/hab/día, y la densidad o peso volumétrico de los residuos es de 140 kg/m<sup>3</sup>. Además, la frecuencia de recolección en el lugar es de tres veces a la semana, con probabilidad de no falla mayor al 90%.

#### Solución

Primero se debe calcular la cantidad de residuos generados por día:

$$G = 0.905 \times 6 = 5.43 \text{ kg/día}$$

Considerando que la recolección se realiza con una probabilidad mayor al 90% , y con base en los datos de la tabla 3.1, se tiene que  $F_c = 1.15$ .

Recordando la fórmula para determinar el volumen de almacenamiento:

$$V = \frac{G \times P}{PV} \times Fr \times Fc$$

Sustituyendo

$$V = \frac{5.43}{140} \times \frac{7}{3} \times 1.15 = 0.1041 \text{ m}^3 = 104.1 \text{ l}$$

El volumen obtenido deberá buscarse en un catálogo de contenedores comerciales, por lo que el volumen final podría variar, preferentemente hacia el inmediato superior.



#### Actividad 3.2

##### *Análisis comparativo del manejo de residuos.*

Utilizando la metodología de análisis comparativo, muestra los resultados totales del manejo de residuos de cinco países del mundo y escribe un documento a partir de los resultados consultados.

## 3.4 Recolección de residuos municipales

El proceso de recolección de residuos es uno de los más importantes dentro del sistema de manejo, ya que evita que la ciudadanía pudiera dejar los residuos en las calles de la localidad y además es el que tiene los mayores costos operativos y de mantenimiento. La recolección es la acción de recoger los residuos generados desde el punto de almacenamiento temporal hasta el equipo destinado para su transporte a las distintas instalaciones como: transferencia, tratamiento, reúso o al sitio de disposición final. El servicio de recolección debe ser administrado por la autoridad municipal de manera directa o

mediante el otorgamiento de concesión a algún privado. La cobertura de la recolección debe brindarse en todas las zonas habitacionales de la localidad, con un diseño de las rutas que sea socialmente asequible y económicamente eficiente, predominando el enfoque de servicio público hacia la ciudadanía. Algunos aspectos destacables en la recolección son:

- Es el único proceso del sistema de manejo que tiene contacto directo con la ciudadanía.
- Es la etapa más cara del manejo de residuos sólidos urbanos, por lo que presenta las mejores oportunidades de reducción de costos.
- El criterio predominante para la selección del tipo de recolección y el diseño de rutas debe ser el servicio público a la ciudadanía.
- La cobertura y frecuencia de recolección es un factor clave del sistema de manejo.
- El tiempo desde la generación hasta la recolección de RSU no debe exceder el ciclo de reproducción de la mosca, el cual, dependiendo del clima puede estar entre los 7 a los 10 días.

Existen cuatro métodos de recolección: de parada fija o de esquina, el de acera, el intradomiciliario o de “llevar y traer” y el de contenedores. A continuación, se explicarán los cuatro métodos, los elementos para el diseño de las rutas con alguno de los métodos se presenta en el apartado 3.5 de este libro. Los métodos pueden utilizarse de manera independiente o combinados, de hecho, en algunos sistemas de manejo de residuos considerados eficientes se utilizan dos o más métodos dependiendo de las condiciones y necesidades específicas de la localidad.

### 3.4.1 Métodos para la recolección de residuos

**El método de parada fija** es el más común, sin embargo, es el más ineficiente. La parada fija hace referencia a que se tienen lugares específicos en los cuales el camión recolector se detendrá para recibir los recipientes con los residuos sólidos directamente de la ciudadanía. Las paradas son lugares definidos de acuerdo con el diseño de las rutas de recolección, para tener una mayor cobertura. En cada parada, debe recibirse una cantidad similar de residuos, para que las paradas estén balanceadas, es cierto, que en residuos siempre existen variaciones respecto a la generación que no pueden estimarse completamente. La incertidumbre respecto a la recepción de los residuos en cada parada puede reducirse con información histórica del sistema de manejo de residuos, si por alguna razón no existiera esta información, se deberá considerar una alta incertidumbre al realizar el diseño del proceso de recolección, y deberá plantearse una actividad de monitoreo con la que posteriormente se pueda optimizar la operación del proceso de recolección. Para este método debe considerarse una brigada conformada por dos personas: un chofer de camión y un ayudante para recibir los residuos. La ineficiencia del método de parada fija consiste en que pueden existir una gran cantidad de paradas en la ruta, y en cada una el camión puede detenerse un tiempo prolongado, por lo que el tiempo de la ruta puede ser muy largo. Además, en algunos casos el número de ayudantes es mayor al sugerido, por lo que el costo del personal aumenta.

**El método de acera** implica que los ciudadanos dejan los recipientes con residuos fuera de su domicilio y la recolección es programada en algún momento del día, sin que exista contacto con la

ciudadanía. El camión recolector durante la ruta debe conservar una velocidad constante en el rango de 5 a 10 km/h, los ayudantes son los encargados de ir recorriendo las calles y vaciando los recipientes con residuos a la caja del camión, el movimiento continuo hace que este método sea más eficiente que el de parada fija. La brigada de trabajo se integra por un chofer y por lo menos dos ayudantes. En algunos casos se sugiere instalar pedestales sobre la banqueta en los que deben dejarse los recipientes con los residuos, la finalidad de ello es evitar que animales se acerquen a los recipientes y derramen los residuos, lo que dificultaría la labor de los ayudantes y haría lento el recorrido. El trazo de las rutas con el método de acera debe considerar todas las calles de la localidad, recordando que los residuos son recolectados solamente en los lugares por donde pasa el camión. La programación de la recolección puede hacerse en horarios en los que la ciudadanía está descansando para evitar molestias y para hacer más eficiente los recorridos, ya que no existiría tránsito en las calles. Existe una variante del método en la que el camión recolector en los costados tiene un sistema de pinzas hidráulicas que permite levantar de la acera recipientes, sin que existan ayudantes que los vacíen, ya que la acción se realiza mediante un sistema electromecánico que el chofer manipula desde la cabina.

**El método intradomiciliario** requiere mayor trabajo para el personal. Los ayudantes deben ir directamente al lugar de almacenamiento de los residuos para que retiren los recipientes llenos, los lleven al camión para ser vaciados y regresen a dejarlos en su sitio, por la acción de “entrar” en el lugar donde se almacenan los residuos se le denomina intradomiciliario. También el método es conocido como de “llevar y traer” por el procedimiento explicado. En algunos casos, si el lugar donde están almacenados los residuos lo permite, el camión recolector puede acercarse hasta los recipientes, sin embargo, no en todos los lugares esto es posible. La variante en la que el camión recolector se acerca a los recipientes con residuos puede tener un sistema de pinzas hidráulicas como el mencionado al final del método de acera, y el chofer desde su cabina realiza el vaciado del recipiente. La maniobra del método implicaría entrar en cada uno de los domicilios de la ciudadanía, por lo que en algunas localidades es más recomendable utilizar este método en escuelas, oficinas, unidades habitacionales, conjuntos residenciales, centros comerciales, hospitales, mercados y otros lugares que no sean viviendas unifamiliares. Dependiendo la variante del método intradomiciliario el personal puede ser un chofer con al menos dos ayudantes o solamente un chofer.

**El método de contenedores** es el más eficiente de los cuatro. Los contenedores se distribuyen en la localidad en función de dos criterios: disponibilidad de espacio y cercanía a la ciudadanía. Las zonas donde se ubiquen las estaciones de recolección con contenedores (también conocidas como islas de contenedores) deben ser espacios que no obstruyan la movilidad peatonal o de vehículos, tampoco deben representar un problema de seguridad o accesibilidad hacia algún lugar preexistente. La cercanía a la ciudadanía está asociada con la disponibilidad de las personas para caminar desde sus domicilios hacia la estación de recolección que se ubique a la menor distancia o de zonas en las que puedan llevar en sus vehículos los recipientes con residuos. Para el caso de que lo hagan caminando, el rango sugerido para ubicar una estación de contenedores es de 200-250 metros, mayor a esta distancia, es muy probable que la ciudadanía deje los recipientes antes del lugar especificado, lo que podría crear acumulación de residuos en las calles. Respecto al uso de vehículos, las zonas donde se establezca una estación de contenedores deberán estar acondicionadas con espacio de estacionamiento, de lo contrario también se tendrá el riesgo de que en el camino puedan las personas arrojar los recipientes en lugares no autorizados, es común que sean ubicadas en lugares con otras actividades cotidianas para la ciudadanía como parques, iglesias, centros comerciales, clubes deportivos, mercados, entre otros.

El proceso de recolección también debe considerar la separación de los residuos. La continuidad de la separación en los procesos del sistema de manejo es muy importante para aprovechar la mayor cantidad de materiales y energía, además de motivar a la ciudadanía a que separe en su casa y que vean que la recolección también es diferenciada. Existen dos maneras de hacer diferenciado el proceso de recolección: cajas de camiones separadas o recolección terciada. El primer caso es el más sencillo, ya que solamente se requiere que los camiones tengan cajas separadas para los diferentes tipos de residuos, sin embargo, las diferentes cajas implican un costo adicional en la inversión inicial para la adquisición de los camiones. La recolección terciada requiere una planeación de los días en que se recolectan de manera diferenciada los residuos, regularmente serán más días destinados a la recolección de residuos orgánicos y menos para la recolección de inorgánicos, también se puede tener un día a la semana para recolectar solamente residuos reciclables. Un ejemplo de recolección terciada es: a) lunes, miércoles y sábados se reciben residuos orgánicos, b) martes, jueves y domingos solamente residuos inorgánicos no aprovechables, y c) viernes los residuos reciclables. La recolección terciada debe tomar en cuenta las características climáticas de la localidad y la biodegradabilidad de los residuos, para garantizar que la frecuencia de recolección planificada no genere problemas en el almacenamiento por la degradación de residuos orgánicos.

### 3.4.2 Vehículos de recolección

Los vehículos de recolección son fundamentales para el manejo de los residuos. La selección del método de recolección y los vehículos determinan los costos de operación y mantenimiento. Además, la eficiencia y la cobertura están relacionadas con el tipo de vehículo seleccionado, por lo que debe tenerse en cuenta los aspectos de diseño del método de recolección y las condiciones topográficas y de trazo de vialidad en la localidad. El vehículo debe ser particular para cada localidad y puede ser diferenciado por ruta de recolección, ya que aún en la misma localidad las condiciones y las necesidades son diferentes, ver algunos ejemplos en la figura 3.2. Existen dos tipos generales de vehículos:

- Mecanizados (compactación; en zonas urbanas)
- Semi-mecanizados (camión de volteo; en zonas urbanas, semi-rurales y rurales)

En algunos casos particulares, en zonas de difícil acceso podrían requerirse vehículos de tipo manual, es decir, movidos por animales de carga, sin embargo, no es la generalidad de las grandes concentraciones humanas. Las principales características para la determinación del vehículo más conveniente son:

- Selección con base en las características geográficas y de población de la localidad (cobertura del servicio de recolección).
- Tipo de caja o carrocería, ya que existen para vehículos recolectores de carga lateral, trasera y frontal.
- Tipo de mecanismos de compactación o placa de empuje de residuos, con la finalidad de aumentar el peso volumétrico ( $t/m^3$ ) o los vehículos incluyen un mecanismo tipo volteo.
- Capacidad volumétrica requerida, la cual puede variar entre 6 y  $30 m^3$ .



Figura 3.2 Ejemplos de vehículos recolectores de residuos.

### 3.4.3 Frecuencia de recolección

La frecuencia de recolección determina el nivel de servicio. También influye de manera directa en la eficiencia y costos del sistema, por lo que la planeación adecuada de la frecuencia de recolección deberá tomar en cuenta lo siguiente:

- La cantidad de residuos generados en la localidad
- La composición de los residuos (orgánicos e inorgánicos)
- El clima
- Las estaciones del año y días festivos
- Las características geográficas del lugar

Dado que el proceso de recolección es el que genera mayores costos operativos (combustible, personal, depreciación de los vehículos, mantenimiento, etc.), la frecuencia con la que los camiones deben salir a recolectar en las rutas es un factor que influye directamente en los costos, por lo que realizar un diseño eficiente permitirá tener mejores oportunidades para la reducción de costos. Es importante destacar que la generación de residuos es diaria, por lo que, si la frecuencia no es diaria, deberá considerar que por cada día que no se pase a recolectar los residuos, el acumulado es del 100% por día. Un ejemplo de frecuencia diaria con excepción de los domingos se presenta en la figura 3.3.





Figura 3.3 Ejemplo acumulación de residuos por de frecuencia diaria excepto un día

La eficiencia del proceso de recolección puede analizarse de diferentes formas. Una de las formas para analizar la eficiencia es con el índice de recolección, el cual expresa la cantidad de toneladas recolectadas en una hora, los valores son el total recolectado de residuos sólidos urbanos durante una jornada de trabajo, regularmente de ocho horas por un camión recolector. Los valores de varios días son analizados y el promedio es el valor de índice de recolección. Otra métrica para conocer la eficiencia de la recolección es el factor de efectividad, que significa que tanto de los residuos que se esperaban recolectar fueron recolectados, o expresado de otra forma es la cantidad de residuos realmente recolectados de los que se espera recolectar. Esta métrica permite identificar las “pérdidas” de residuos o la falta de atención de algunas zonas, se entiende que el total de residuos realmente recolectados debe ser igual a los residuos que se espera recolectar, es decir, que no existen pérdidas, por lo que el total de la población asignada al camión recolector fue atendida, en estos casos el factor de efectividad es de 1.0, en el caso contrario sería cuando no se recolectó nada o que todo se perdió, es cuyo caso el valor sería de 0.

**Problema resuelto 3.3. Obtención del número de vehículos de recolección**

Cálculo del número de camiones suponiendo camiones compactadores de carga trasera de 15 m<sup>3</sup> de capacidad. Premisas:

- 2 turnos de trabajo de 8 horas c/u.
- Índice de recolección de 1.25 t/h
- Factor de efectividad = 0.9

Considere dos casos de generación de residuos a) 250 t/día, y b) 500 t/día

**Solución**

Cálculo de la recolección por camión =  $8 \times 2 \times 1.25 \times 0.9 = 18$  t/día

Se obtiene el número de vehículos para cada caso:

a) Para 250 t/día

$250/18 = 13.9$  por lo que se requieren 14 vehículos

ajuste de la cantidad de residuos a recolectar con 14 unidades:  $18 \times 14 = 252$  t/día

b) Para 500 t/día

$500/18 = 27.8$  por lo que se requieren 28 vehículos

ajuste de la cantidad de residuos a recolectar con 28 unidades:  $18 \times 28 = 504$  t/día

### 3.5 Diseño de rutas de recolección

El diseño de rutas de recolección se divide en macro-ruteo y micro-ruteo. La micro-ruta es el recorrido específico que debe cumplir cada vehículo donde ha sido asignado. La macro-ruta es el área o superficie que es atendida diariamente por todos los vehículos de recolección, y que está integrada por las micro-rutas; por ejemplo, en la figura 3.3 se observan 6 macro-rutas.

Los principales requerimientos de información para delimitar las macro-rutas son:

- Estudio de generación de residuos sólidos que incluye:
  - Estratos socioeconómicos, con su generación por día, semana y mes
  - Generación y localización de otras fuentes.
- Datos de la densidad poblacional por cada una de las macro-rutas en que se planea efectuar el servicio de recolección.
- Mapa actualizado y detallado de la ciudad, que contenga información de:
  - Barreras naturales que delimiten zonas en las que se prestará el servicio.
  - Zonas por tipo de servicio y la frecuencia de recolección propuesta.

#### Diseño de Macro-rutas

La determinación de macro-rutas debe tomar en cuenta:

- Las fronteras naturales como son ferrocarriles, carreteras o calles muy transitadas y los ríos o canales que atraviesan la ciudad.
- Las diferentes densidades de población y tipo de residuos de la ciudad.
- El tiempo y la distancia empleadas para un viaje redondo hasta el sitio de disposición final.

La figura 3.4 es una representación conceptual de las macro rutas para una localidad.

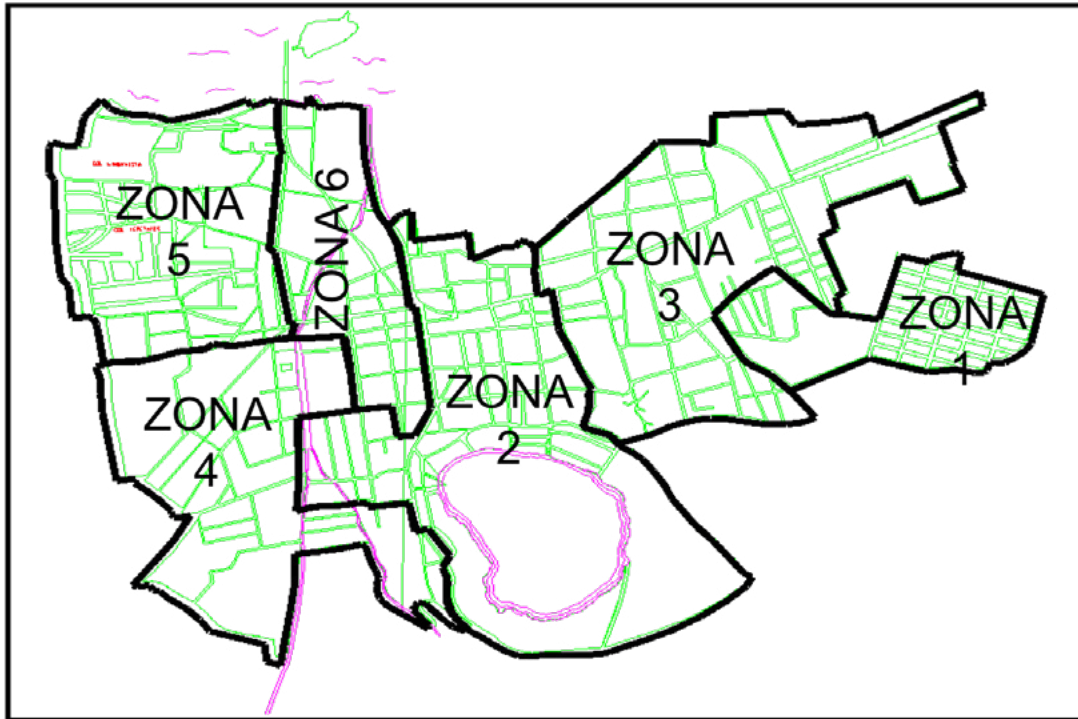


Figura 3.4. Macro rutas o zonas de atención de una localidad

Es deseable en el rediseño de rutas de recolección de los residuos el uso de Sistemas de Información Geográfica para el monitoreo y optimización continua.

### Diseño de micro-rutas

Las micro-rutas regularmente existen en una localidad, los problemas de ingeniería son principalmente de rediseño u optimización de las micro-rutas que operan. Para realizar el diseño de micro-rutas se requiere considerar los siguientes lineamientos heurísticos:

- Identificar políticas y regulaciones existentes relacionadas con elementos tales como los puntos de recolección y la frecuencia de recolección.
- Cantidad de personal y los tipos de vehículos en el caso de los sistemas en operación.
- Siempre que sea posible, las rutas deben estar diseñadas para que comiencen y terminen cerca de una vialidad principal, tomando en cuenta barreras topográficas y físicas como límites de la ruta.
- En las zonas montañosas, las rutas deben comenzar en la parte superior de la pendiente y avanzar cuesta abajo a medida que el vehículo se carga.
- Las rutas deben estar diseñadas de manera que el último punto de recolección o contenedor en la ruta se encuentre más cercano al sitio de disposición final o estación de transferencia.

- Los residuos generados en las ubicaciones congestionadas por el tráfico deberían recogerse lo más temprano posible.
- Las fuentes en las que se generan cantidades extremadamente grandes de residuos (mercados, escuelas, centros comerciales, etc.) deben ser atendidas durante la primera parte del día.
- Los puntos de recolección dispersos donde se generan pequeñas cantidades de residuos deberían, si es posible, recibir servicio durante un solo viaje o el mismo día.

### **Cálculo del Tiempo total de ruta, para el análisis de eficiencia de micro rutas.**

El tiempo total de la micro ruta está determinado por la fórmula siguiente:

$$\mathbf{TTR = TRFR + TRR + TVDF + TM} \quad (3.2)$$

La cual está formada por los tiempos:

**TTR** – tiempo total de ruta

**TRFR** – Tiempo de recorrido fuera de ruta

**TRR** – Tiempo de recorrido en ruta.

**Para el método de parada fija, intradomiciliario y contenedores:**

$$\mathbf{TRR = TRSR + TVC}$$

**TRSR** – Tiempo de recorrido sin recolección

**TVC** – Tiempo de vaciado de contenedores

**Para el método de acera:**

$$\mathbf{TRR = d_R / V_R}$$

**d<sub>R</sub>** – distancia total de la microruta

**V<sub>R</sub>** – velocidad promedio del vehículo recolector en la ruta por el método de acera, que debe estar entre 5 a 10 km/h

**TVDF** – Tiempo de vaciado en sitio de disposición final o estación de transferencia

**TM** – Tiempo muerto

**Problema resuelto 3.4. Cálculo del tiempo para micro ruta por los métodos de parada fija y de acera.**

Una localidad en la que se generan 57 t/día de RSU tiene un sistema de recolección basado en el método de parada fija, con 10 rutas de recolección distribuidas de forma equitativa en la localidad. La nueva administración de la localidad quiere realizar un análisis del tiempo de recolección y considerar como alternativa el método de acera. Los camiones recolectores tienen una capacidad de 20 m<sup>3</sup>, con una caja trasera de 1.25 m<sup>3</sup> con desplazamiento hidráulico (3 minutos por ciclo), además, se determinó que el PV = 150 kg/m<sup>3</sup>. La tabla P3.4.1 muestra el total de paradas en la localidad y la estimación de la cantidad de RSU en cada parada. Determinar para una micro-ruta el tiempo total de ruta para ambos métodos: parada fija y acera, con base en los resultados sugerir el más adecuado.

Considérese además los siguientes datos: distancia entre el sitio de estacionamiento de los camiones a la ruta son 3.5 km, de la ruta a la estación de transferencia (EdT) son 5 km y de la EdT al estacionamiento son 7.5 km, además, el TVDF = 35.0 min y el TM = 45.0 min. La velocidad promedio del camión entre paradas es de 15 km/h y fuera de ruta es de 50 km/h.

Tabla P3.4.1 Paradas con distancia y cantidad de RSU

Parada	Distancia entre paradas (m)	Cantidad de RSU (t/día)
1	250	0.29
2	170	0.18
3	210	0.26
4	350	0.35
5	150	0.15
6	100	0.11
7	100	0.12
8	175	0.17
9	160	0.17
10	220	0.23
11	250	0.27
12	380	0.42
13	180	0.18
14	210	0.23
15	230	0.21
16	205	0.21
17	320	0.33
18	270	0.29
19	450	0.53
20	100	0.14
21	130	0.14
22	180	0.21
23	250	0.27
24	265	0.30

**Solución**

Método de parada fija

Para cada parada se debe determinar el tiempo de recorrido en ruta (TRR) = tiempo de recorrido sin recolección (TRSR) + Tiempo de vaciado de contenedores (TVC). El TRSR se obtiene despejando el tiempo del concepto de velocidad, por lo que  $t = d / v$ . El TVC se obtiene determinando el número de ciclos completos que se requieren en cada parada, considerando las características volumétricas del camión y la caja. Los resultados se muestran en la tabla P3.4.2. Nótese que por la capacidad volumétrica del camión (20 m<sup>3</sup>), se requiere hacer un viaje intermedio hacia la EdT al finalizar la parada 13, por lo que camión regresa de vaciar en la EdT para continuar con la parada 14.

Para cada parada

$$TRR = TRSR + TVC$$

Tabla P3.4.2 Cálculo de Tiempo de recorrido en ruta (TRR), método parada fija

Parada	Distancia entre paradas (m)	Cantidad de RSU (t/día)	Cantidad de RSU (m <sup>3</sup> /día)	Cálculo de ciclos de compactación	Ciclos completos de compactación	TRSR (min)	TVC (min)	TRR (min)
1	250	0.29	1.9	1.52	2	1.00	6	7.00
2	170	0.18	1.2	0.96	1	0.68	3	3.68
3	210	0.26	1.7	1.36	2	0.84	6	6.84
4	350	0.35	2.3	1.84	2	1.40	6	7.40
5	150	0.15	1.0	0.80	1	0.60	3	3.60
6	100	0.11	0.7	0.56	1	0.40	3	3.40
7	100	0.12	0.8	0.64	1	0.40	3	3.40
8	175	0.17	1.1	0.88	1	0.70	3	3.70
9	160	0.17	1.1	0.88	1	0.64	3	3.64
10	220	0.23	1.5	1.20	2	0.88	6	6.88
11	250	0.27	1.8	1.44	2	1.00	6	7.00
12	380	0.42	2.8	2.24	3	1.52	9	10.52
13	180	0.18	1.2	0.96	1	0.72	3	3.72
Viaje a EdT			19.1			10.78	60	70.78
14	210	0.23	1.5	1.20	2	0.84	6	6.84
15	230	0.21	1.4	1.12	2	0.92	6	6.92
16	205	0.21	1.4	1.12	2	0.82	6	6.82
17	320	0.33	2.2	1.76	2	1.28	6	7.28
18	270	0.29	1.9	1.52	2	1.08	6	7.08
19	450	0.53	3.5	2.80	3	1.80	9	10.80
20	100	0.14	0.9	0.72	1	0.40	3	3.40
21	130	0.14	0.9	0.72	1	0.52	3	3.52
22	180	0.21	1.4	1.12	2	0.72	6	6.72
23	250	0.27	1.8	1.44	2	1.00	6	7.00
24	265	0.30	2.0	1.60	2	1.06	6	7.06
Viaje a EdT			18.9			10.44	63	73.44

Ahora, para calcular el tiempo de recorrido fuera de ruta (TRFR), se deben considerar los trayectos:

- a) Del estacionamiento de camiones a la ruta
- b) De la ruta a la EdT (primera descarga)
- c) De la EdT a la ruta (continuar recolección)
- d) De la ruta a la EdT (segunda descarga), y finalmente

e) De la EdT al estacionamiento de camiones.

El trayecto total fuera de ruta es de 26 km, por lo que  $TRFR = 31.2$  min.

Para determinar el tiempo de vaciado en sitio de disposición final o estación de transferencia (TVDF), se debe considerar que el camión recolector debe hacer dos vaciados en la EdT, por lo que  $TVDF = 70.0$  min.

Finalmente, se calcula el tiempo total de ruta

$$TTR = TRFR + TRR + TVDF + TM$$

$$TTR = 31.2 + 144.22 + 70.0 + 45.0$$

$$TTR = 290.42 \text{ min} = 4 \text{ h } 50 \text{ min}$$

#### Método de acera

El método de acera considera una velocidad constante del camión, que está en el rango de 5 – 10 km/h, se considerará la velocidad promedio de 7.5 km/h. La distancia total de las primeras 13 paradas es de 2,695 m y la complementaria de la parada 14 a la 24 es de 2,610 m. Para este método se tienen los siguientes cálculos:

$$TRR = d_R / V_R = (2.695+2.610) / 7.5 = 42.44 \text{ min}$$

Los otros tiempos son los mismos que para el método de parada fija, por lo que el tiempo total de ruta es:

$$TTR = TRFR + TRR + TVDF + TM$$

$$TTR = 31.2 + 42.44 + 70.0 + 45.0$$

$$TTR = 188.64 \text{ min} = 3 \text{ h } 9 \text{ min}$$

Con base en los resultados, se observa que el método de acera requiere menor tiempo que el de parada fija, por lo que la sugerencia para la autoridad local es que inicie esfuerzos para implementar el método de acera.

#### **Problema resuelto 3.5. Cálculo del tiempo total de recorrido por el método de contenedores**

Para la misma localidad del problema resuelto 3.4. se propone poner un sistema de recolección de contenedores, las especificaciones para las islas de contenedores propuestas para cubrir una ruta se muestran en la tabla P3.5.1. En este caso, se tiene un camión con mayor capacidad volumétrica 40 m<sup>3</sup>, y se deberá considerar el vaciado de tres contenedores de una capacidad de 2.5 m<sup>3</sup>, es decir, cada isla tiene una capacidad máxima de 7.5 m<sup>3</sup>. La maniobra del camión para vaciar cada contenedor se estima en un tiempo de 5 min. Los datos de velocidades, distancias y otros tiempos serán los mismos del problema resuelto 3.4., excepto para el TM, que para este problema será de 15 min.

Tabla P3.5.1. Islas de contenedores con distancias y cantidad de RSU

Isla de contenedores	Distancia entre islas (m)	Cantidad de RSU (t/día)



A	980	1.07
B	905	0.93
C	1020	1.1
D	1025	1.04
E	860	1.01
F	515	0.57

**Solución**

De manera similar a lo realizado en cada parada del problema 3.4, se calcula el tiempo de recorrido en ruta para cada isla de contenedores. Los resultados se presentan en la tabla P3.5.2.

Tabla P3.5.2. Cálculo de Tiempo de recorrido en ruta (TRR), método de contenedores

Isla de contenedores	Distancia entre islas (m)	Cantidad de RSU (t/día)	Cantidad de RSU (m <sup>3</sup> /día)	Cálculo de ciclos de vaciado	Ciclos completos de vaciado	TRSR (min)	TVC (min)	TRR (min)
A	980	1.07	7.1	2.84	3	3.92	15	18.92
B	905	0.93	6.2	2.48	3	3.62	15	18.62
C	1020	1.1	7.3	2.92	3	4.08	15	19.08
D	1025	1.04	6.9	2.76	3	4.1	15	19.1
E	860	1.01	6.7	2.68	3	3.44	15	18.44
F	515	0.57	3.8	1.52	2	2.06	10	12.06
Total			38		17	21.22	85	106.22

El cambio en la capacidad volumétrica del camión para contenedores requiere recalcular TRFR y TVDR. En el TRFR se deben considerar solamente los trayectos:

- a) Del estacionamiento de camiones a la ruta
- b) De la ruta a la EdT
- c) De la EdT al estacionamiento de camiones

1 trayecto total fuera de ruta es de 16 km, por lo que TRFR = 19.2 min. Para el TVDF se hace en una sola ocasión, por lo que, TVDF = 35.0 min.

Para el método de contenedores, se tiene un tiempo total de recolección:

$$TTR = TRFR + TRR + TVDF + TM$$

$$TTR = 19.2 + 106.22 + 35.0 + 15.0$$

$$TTR = 175.42 \text{ min} = 2 \text{ h } 55 \text{ min}$$

Conclusión

El método de contenedores requiere un menor tiempo para la recolección, conforme a la información y consideraciones de los problemas P3.4 y P3.5. Este comportamiento se puede generalizar: el método de parada fija es el que mayor TTR requiere, le sigue el de acera y el que menor TTR necesita es el de contenedores. Lo que puede expresarse como:

$$TTR_{\text{parada fija}} \gg TTR_{\text{acera}} > TTR_{\text{contenedores}}$$

La implementación de cada uno de los métodos requiere de analizar aspectos adicionales a los de ingeniería que no se abordan en este libro.

## 3.6 Transferencia y transporte

Se aplica el término estación de transferencia (EdT) a las instalaciones donde se hace el traslado de residuos de un vehículo recolector a otro con mucha mayor capacidad de carga, el segundo transporte lleva los residuos a su destino final. La lejanía de los sitios de disposición final obliga a establecer estaciones de transferencia de residuos sólidos, para dar una mayor eficiencia al sistema de manejo de residuos. El objetivo básico de las estaciones de transferencia es incrementar la eficiencia global del servicio de recolección a través de la economía del sistema de transporte y de la disminución del tiempo ocioso de la mano de obra empleada para la recolección.

### Características por considerar para la selección del sitio para la ubicación de una EdT:

- Distancia de amortiguamiento a zonas de colindancias
- Dirección e incidencia de vientos
- Pendientes de acceso a las instalaciones
- Accesos viales al sitio destinado para un relleno sanitario
- Superficie disponible

### Aspectos por considerar para el diseño de la EdT:

- Separar la circulación de tráileres, camiones recolectores y peatones
- No permitir cruces en la circulación de vehículos dentro de la EdT
- Observar radios de giro de camiones recolectores y de tráileres, para dimensionamiento y concordancia de caminos internos
- Ubicar la caseta de control del patio de descarga en una posición que posibilite también la observación del patio
- Ubicar la caseta de control de la balanza para que tenga máximo cuatro camiones recolectores en espera fuera de la EdT
- Concentrar en un bloque de la edificación los sectores para administración, oficinas (control), talleres de mantenimiento, sanitarios y vestidores
- Dotar el patio de descarga de amplia iluminación y ventilación natural

### Tipos de EdT

EdT de descarga directa. Consiste en el transbordo de los residuos sólidos de los vehículos recolectores mediante vaciado por gravedad a un tráiler descubierto (figura 3.5), con una capacidad de 20 a 25 toneladas. Recibe los vehículos recolectores, los registra y los pesa, se dirigen a la rampa de acceso al patio de maniobras en las líneas de servicio, se colocan en las tolvas, que descargan en los tráileres. No almacena residuos, siempre debe tener un tráiler/transfer.



Figura 3.5 Ejemplo de EdT directa

EdT de descarga indirecta. La descarga de residuos de los vehículos de recolección se realiza a una fosa de almacenamiento o sobre la plataforma donde posteriormente los residuos son cargados por equipos auxiliares en los camiones de transferencia. Los vehículos recolectores son registrados y pesados, se dirigen a la plataforma para verter los residuos a la fosa. Los residuos son removidos de la fosa con grúas de almeja o cargadores frontales, después son movidos por un montacargas, llenando los tráileres/transfer (figura 3.6).

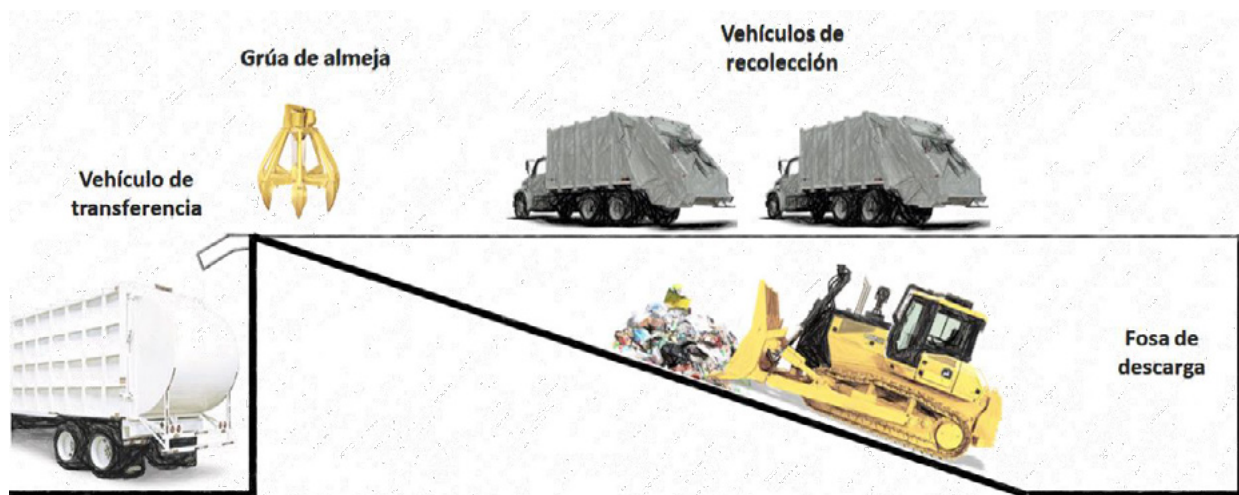


Figura 3.6. Proceso de descarga de vehículos recolectores y carga de tráileres en EdT indirecta

Fuente: (Instituto Nacional de Ecología, 1996)

## Justificación económica de la EdT

La EdT debe implementarse en el sistema de manejo integral de residuos sólidos si está justificada. El análisis para determinar la necesidad de una EdT o no, se denomina: justificación económica de la EdT. El análisis consiste en comparar dos escenarios operativos: a) operación solamente con camiones recolectores, y b) operación con la EdT. Las tablas 3.3 a 3.7, muestran un ejemplo de la justificación económica de una EdT.

Tabla 3.3 Costos de inversión para la EdT  
Costos de inversión para la estación de transferencia

Concepto	\$
<b>Estudios preliminares</b>	
Estudio de factibilidad técnico-económica	223,079.70
Impacto vial	83,142.50
Levantamiento topográfico	8,234.08
Mecánica de suelos	40,061.90
Impacto ambiental	132,738.77
Subtotal	487,256.95
<b>Proyecto ejecutivo</b>	
Proyecto arquitectónico	292,800.00
Proyecto estructural	12,536.05
Proyecto eléctrico	5,939.34
Proyecto hidráulico	6,183.47
Proyecto sanitario y pluvial	6,066.72
Proyecto de controles ambientales	6,066.35
Elaboración de catálogo de conceptos	7,137.77
Ante-presupuesto	5,134.36
Subtotal	341,864.06
<b>Construcción (obra civil)</b>	9,016,800.00
Subtotal	9,016,800.00
<b>Total</b>	9,845,921.01

Tabla 3.4 Costos operativos de la EdT

Concepto	\$	
<b>Operación</b>		
Personal operativo de la EdT	37,618.2	
Cargos administrativos 33% del personal	12,414.0	
Subtotal	50,032.2	
<b>Equipo</b>		
Vehículos de transferencia	362,232.0	13 vehículos 116.1 4/h
Hidrolavadoras	6,825.6	
Subtotal	369,057.6	
<b>Total</b>	419,089.8	

Tabla 3.5 Cálculo del costo unitario por transferencia de los residuos sólidos

Concepto	\$
Total de inversión	9,845,921.01
Vida útil	20 años
Tonelaje transferido	1,963 t/día
Tonelaje transferido durante vida útil	14,329,900
Costo por tonelada	0.69 \$/t
Costos operativos	419089.8 \$/mes
Tonelaje transferido mensual	58,890 t/mes
Costo por tonelada	7.12 \$/t
<b>Costo total de transferencia</b>	<b>7.80 \$/t</b>

Tabla 3.6 Cálculo de costo horario por transporte para ambos escenarios: recolección y transferencia

<b>Costo horario de recolección</b>	
Capacidad del vehículo recolector	6 t/turno
Costo horario	104.37 \$/h
Costo horario por tonelada	2261.35 \$/t/h
# de vehículos recolectores	130
<b>Costo horario de transferencia</b>	
Capacidad del vehículo de transferencia	60 t/turno
Costo horario	116.13 \$/h
Costo horario por tonelada	25.1615 \$/ton/h
# de vehículos de transferencia	13

La figura 3.7 muestra el resultado de graficar para diferentes distancias los costos horarios por recolección y por transferencia. La línea en azul representa el comportamiento del costo operativo de recolección, la línea en verde muestra el comportamiento del costo operativo de la transferencia (inversión inicial y operación). El cruce de las líneas delimita la zona que justifica económicamente la construcción y operación de la EdT contra el sistema de recolección. Es decir, antes del cruce de las líneas es más barato utilizar los camiones recolectores para todo el transporte de los residuos sólidos, desde los lugares de generación hasta el siguiente proceso (tratamiento o disposición final), una vez, que las líneas cruzan se invierte la situación, por lo que es conveniente la instalación de la EdT.

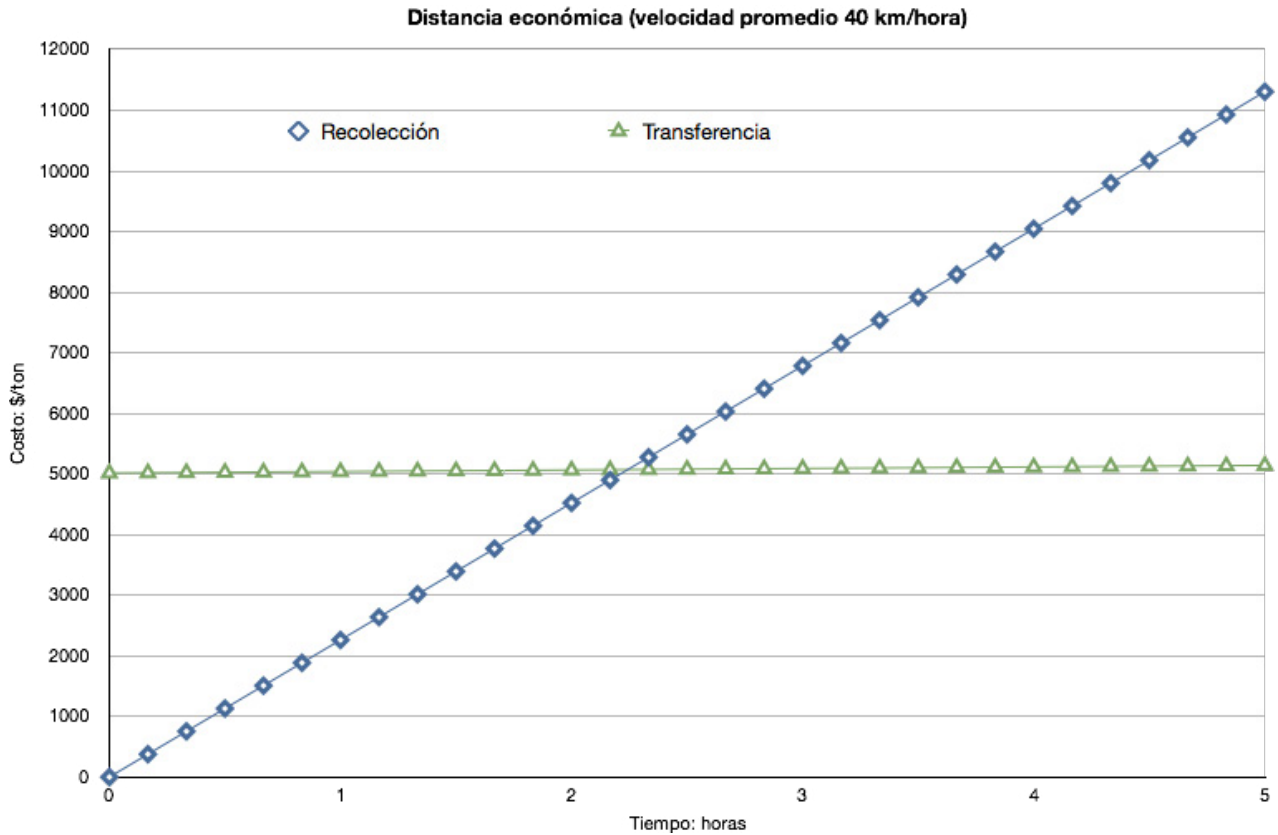


Figura 3.7. Gráfica del resultado del análisis de la justificación económica de la EdT.

### 3.7 Clasificación de los sistemas de tratamiento

#### Situación actual y tendencias mundiales

El tratamiento de los residuos sólidos tiene varias ventajas en el sistema de manejo integral: reducción del espacio necesario para la disposición final o aumento de la vida útil del sitio, reducción de generación de biogás, reducción de lixiviados y reducción de malos olores. Existen diferentes métodos de tratamiento de residuos sólidos, una manera de clasificarlos es por proceso, la tabla 3.7 presenta los más representativos.

Tabla 3.7 Ejemplos de métodos de tratamiento clasificados por proceso

Tipo de proceso	Método de tratamiento de residuos sólidos
Físicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Compactación de alta densidad</li> <li>• Separación de materiales reciclables</li> </ul>
Biológicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Compostaje</li> <li>• Degradación anaerobia</li> </ul>
Termoquímicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Incineración</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pirólisis</li> <li>• Gasificación</li> <li>• Hidrólisis</li> </ul>
Mixto	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tratamiento mecánico-biológico (TMB), combinación de físico con biológico</li> </ul>

### 3.7.1 Composteo o compostaje

Es la descomposición biológica y estabilización de un sustrato orgánico, bajo condiciones que permitan el desarrollo de temperaturas en el rango termófilo como resultado del proceso biológico aerobio exotérmico, para producir un producto final estable, libre de patógenos y semillas de plantas, y que pueda ser aplicado al suelo de forma beneficiosa. También puede definirse como una técnica (biológica, aerobia y controlada) de estabilización y tratamiento de los residuos orgánicos biodegradables, para los sólidos y semisólidos; que destruye por temperatura, gérmenes y parásitos, vectores de enfermedades y semillas de malas hierbas. Genera un producto llamado compost que es un factor de estabilidad y fertilidad de los suelos.

#### Condiciones para el proceso de compostaje

- Humedad máxima permisible entre 50-60% en material vegetal fresco, y de entre 75-90% en material fibroso o forestal grueso.
- Relación C/N entre 30-35, o menor. La relación C/N es la proporción de carbono respecto al nitrógeno, lo cual es un valor de referencia en los procesos de degradación biológica.
- Estructura que permita que exista una fracción de la masa ocupada por aire, para lo cual se añaden restos vegetales triturados que mejoran la aireación y son fuente de carbono.

El proceso de compostaje se compone de dos fases: de descomposición y de maduración. En la primera, diferentes poblaciones de microorganismos descomponen los constituyentes de la materia orgánica, que incluye a los hidratos de carbono, proteínas y lípidos. Se producen reacciones exotérmicas que alcanzan los 70°C durante el día, suficiente para la destrucción de semillas de malas hierbas, huevos y larvas de insectos y patógenos. En la fase de maduración, se forman moléculas complejas y estables que, conjuntamente a los microorganismos mesófilos y diversa microfauna, colonizan el material para obtener, en pocos meses, un compost estabilizado y parcialmente humidificado.

Existe diferentes aplicaciones de la composta, siendo las más utilizadas:

- Como mejorador del suelo, interesa que el compost sea abundante, muy estable y tenga un elevado contenido de materia orgánica, con bajos niveles de nitrógeno en forma mineral y orgánico.
- Como fuente de nutrientes, se deberán determinar los niveles de nitrógenos mineral y orgánico y tener idea de la velocidad de mineralización. Un compost mal estabilizado produce problemas de inmovilización del nitrógeno.



### Procedimientos para el composteo

La técnica de hileras volteadas inicia con la trituración de los residuos que posteriormente se depositan en una zona al aire libre para su descomposición. Deberán ser volteados periódicamente para facilitar su aireación y la actividad microbiana. La distribución más habitual es en hileras o andenes con una altura de entre 1.7 y 2 metros y un ancho entre los 2.7 a los 3 metros. La frecuencia de volteo depende de la humedad de la pila, se recomienda considerar los parámetros de la tabla 3.8.

Tabla 3.8. Frecuencia de volteo sugerida considerando la humedad

Humedad	Frecuencia de volteo
60-70%	Cada dos días. Número de volteos: 5.
40-60%	Cada tres días. Número de volteos: 4.
Por debajo del 40%	Aumentar la humedad.

Fuente: (UNAM, 2012)

Otra técnica de composteo es mediante reactores o recipientes cerrados que consiste en la descomposición acelerada que se realiza en estos, donde se controlan los factores que influyen en el proceso, los que se indican en la tabla 3.9. Dicha técnica provoca una reducción del ciclo de descomposición (acelerando la fase termófila) y se asegura, al mismo tiempo, la autoesterilización del producto.

Tabla 3.9 Periodo de fermentación por tipo de sistema de composta con reactores

Sistema	Duración de la fermentación acelerada	Periodo de fermentación al aire libre (sin volteo)
Digestor	6 días.	1 mes
Higienizador	4 días.	1 a 2 meses
Bioestabilizador	3 a 5 días.	2 a 3 meses

Fuente: (UNAM, 2012)



#### Actividad 3.3

#### *Mapa conceptual “Tratamiento de orgánicos”*

Con base en el análisis de los videos sugeridos y en la búsqueda de información complementaria, elabore un mapa conceptual que permita explicar el proceso de tratamiento de los residuos orgánicos.

#### Problema resuelto 3.7. Dimensionamiento de una planta de composta

En una localidad se quiere aprovechar la fracción orgánica de los RSU, por lo que se propuso construir una planta de composta. Los RSU generados diariamente son 167 t/día, con un porcentaje de orgánicos de 58% y un PV de 195 kg/m<sup>3</sup>. Las pruebas con los RSU orgánicos para hacer las pilas de composta determinaron que el periodo estimado del proceso es de 2.5 meses, considerando una altura de 1.2 m, un ancho de 2.0 m y largo de 6.0 m, con la técnica de hileras volteadas. Determine la superficie de terreno necesaria para que las pilas de composta se puedan realizar.

#### Solución

Considerando la cantidad de RSU orgánicos, se determina el volumen diario

$$V = (167 \times 0.58 \times 1,000) / 195 = 496.72 \text{ m}^3/\text{d}$$

El volumen de cada pila de composta es

$$V \text{ pila} = 1.2 \times 2.0 \times 6.0 = 14.4 \text{ m}^3$$

Por lo que, el número de pilas de composta diarias es de

$$\text{Pilas diarias} = V / V \text{ pila} = 496.72 / 14.4$$

$$\text{Pilas diarias} = 34.49 \text{ pilas}$$

Considerando 30 días por mes, se debe tomar en cuenta que el proceso dura 75 días para un ciclo de composta, resultando un total de pilas en el periodo de

$$\text{Pilas ciclo composta} = \# \text{ días del ciclo} * \text{Pilas diarias} = 75 * 34.49$$

$$\text{Pilas ciclo composta} = 2,587.07 \text{ pilas}$$

Finalmente, se obtiene la superficie total requerida para realizar las pilas de composta

$$\text{Superficie requerida} = \text{Pilas ciclo composta} * \text{Ancho} * \text{Largo} = (2,587.07 * 2.0 * 6.0) / 10,000$$

$$\text{Superficie requerida} = 3.10 \text{ ha}$$

Comentario. La superficie calculada solamente considera el espacio necesario para las pilas de composta, suponiendo que todas estuvieran juntas, lo cual, operativamente no es viable. Para el diseño completo de la planta de composta, deberán considerarse pasillos entre las pilas para realizar las maniobras operativas, además de las instalaciones para servicios y oficinas.

### 3.7.2 Degradación anaerobia

La digestión anaerobia es un proceso biológico que se lleva a cabo en ausencia de oxígeno, y en el cual participan diferentes comunidades microbianas, donde la fracción biodegradable de la materia orgánica se convierte en una mezcla de gases constituida principalmente por dióxido de carbono y metano (biogás) y se genera un residuo sólido (digestato), ver tabla 3.10.

Tabla 3.10. Características del biogás

Propiedad	Cantidad
Composición	55-70% metano (CH <sub>4</sub> )
	30-45% dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )
	Trazas de otros gases
Contenido energético	6.0 – 6.5 kWh/m <sup>3</sup>

Equivalente de combustible	0.60 – 0.65 L petróleo crudo/m <sup>3</sup> biogás
Límite de explosión	6- 12 % de biogás en aire
Temperatura de ignición	650 – 750 °C (con el contenido de CH <sub>4</sub> reportado)
Presión crítica	74 – 88 atm.
Temperatura crítica	-82.5 °C
Densidad normal	1.2 kg/m <sup>3</sup>
Olor	Huevo podrido (el olor del gas desulfurado es imperceptible)

Fuente: (UNAM, 2012)

### Etapas de la digestión anaerobia

**Hidrólisis.** Consiste en que las moléculas orgánicas complejas y no disueltas (carbohidratos, grasas y proteínas) se rompen en compuestos más simples (aminoácidos, azúcares, ácidos grasos y algunos alcoholes), mediante la acción de enzimas extracelulares secretadas por algunos microorganismos como las celulasas, amilasas, proteasas y lipasas (figura 3.8).

**Acidogénesis.** Se metabolizan los productos de hidrólisis en el interior de la célula y se obtienen compuestos de peso molecular intermedio, como ácidos orgánicos (acetato, propionato, butirato, lactato) y alcoholes, además de otros subproductos importantes para etapas posteriores (amoníaco, hidrógeno, dióxido de carbono).

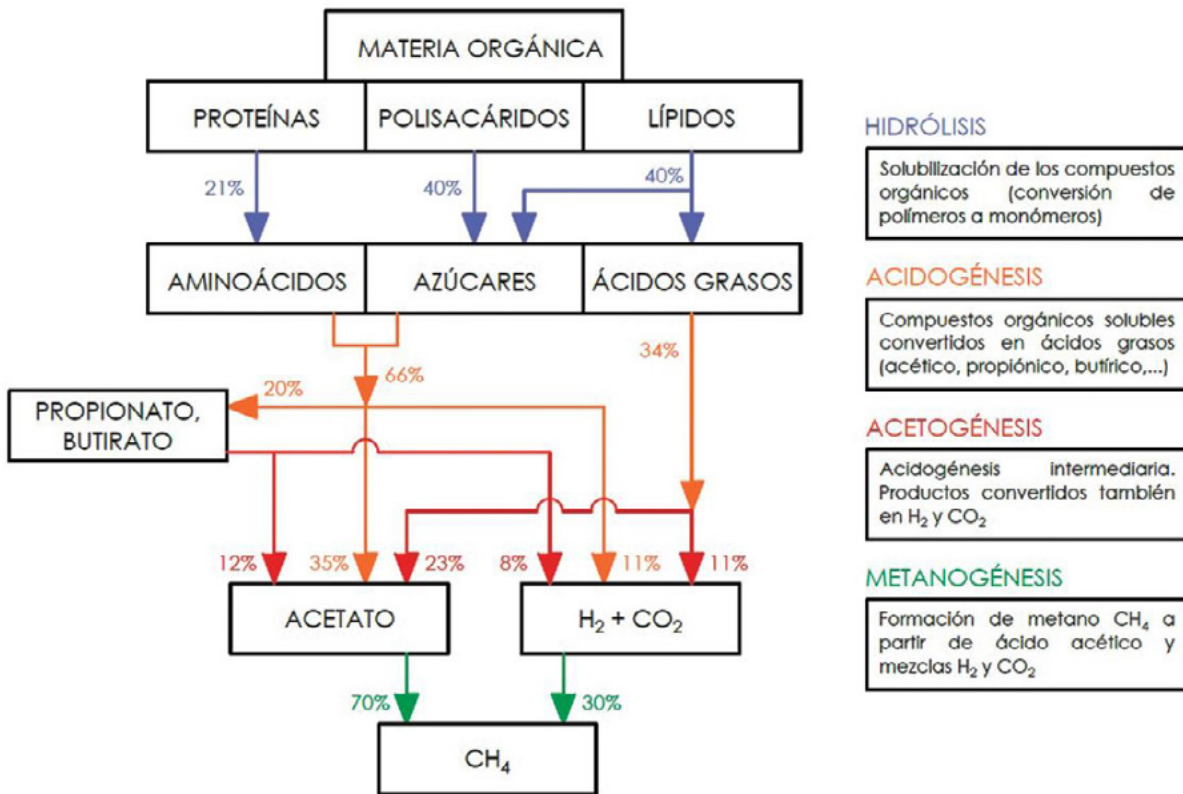


Figura 3.8. Etapas de la digestión anaerobia. Tomada de (Procycla S.L., 2016)

Acetogénesis. Los productos finales de la etapa acidogénica se transforman en acetato, así la actividad principal de los microorganismos presentes proporciona donadores de hidrógeno, dióxido de carbono y acetato a las arqueas metanogénicas. Estos microorganismos convierten los productos por dos rutas diferentes, como puede verse en la figura 3.8.

Metanogénesis. Es el último paso del proceso de descomposición anaerobia de la materia orgánica. La degradación de cada sustrato depende tanto de la naturaleza de este como de la ruta metabólica seleccionada por los microorganismos para su degradación.

### 3.7.3 Compactación de alta densidad

El tratamiento de alta compactación es conocido también como la tecnología del “relleno seco” y puede competir económicamente con el relleno sanitario tradicional. El relleno seco tiene su mayor ventaja en la reducción del volumen de residuos que se puede realizar independiente del sitio de disposición. Puede ser combinado con plantas de transferencia. Aumenta el tiempo de control de post-clausura (véase apartado 3.11) por el proceso más lento de degradación del material. La compactación de alta densidad consiste en someter a presión una cantidad de residuos hasta que tengan un PV entre los 1,500 a 2,000 kg/m<sup>3</sup>, formando bultos o líneas compactadas de residuos.

Las ventajas que se obtienen al compactar los residuos sólidos son:

- La vida del relleno sanitario se extiende, aumentando aproximadamente 50% la capacidad respecto a un sistema convencional.
- Un relleno conformado con pacas (“relleno seco”) tiene menos problemas que un convencional ante condiciones climáticas extremas (temporada de lluvias) debido a la menor área expuesta.

#### Problema resuelto 3.8. Estimación de la superficie requerida para un relleno sanitario seco

Una ciudad en el año 2018 genera 775.0 t/día de RSU, y se proyecta que para el año 2038 generará 864.90 t/día. El 50% de los RSU se consideran no aprovechables y se propone hacer un relleno sanitario seco para su disposición final. El equipo de compactación a utilizar podrá dejar los RSU con un PV = 1,500 kg/m<sup>3</sup>. Las autoridades locales permitirán que los RSU en el relleno sanitario seco alcancen una altura máxima de 21.6 m. Se requiere conocer la superficie anual para 2018 y 2038, y la superficie total máxima que se requiere para el sitio de disposición final.

#### Solución

Los RSU que se compactarán para hacer el relleno sanitario seco son los no aprovechables, para cada año son:

$$RSU_{2018} = 775.0 * 0.5$$

$$RSU_{2018} = 387.5 \text{ ton/día}$$

$$RSU_{2038} = 864.9 * 0.5$$

$$RSU_{2038} = 432.45 \text{ ton/día}$$

El proceso de compactación permitirá tener bloques o pacas de RSU con mayor aprovechamiento del espacio, considerando la maquinaria a utilizar, el volumen de RSU por día para cada año es de

$$V_{2018} = \text{RSU} / \text{PV} = (387.5 * 1,000) / 1,500$$

$$V_{2018} = 258.33 \text{ m}^3/\text{día}$$

$$V_{2038} = (432.45 * 1,000) / 1,500$$

$$V_{2038} = 288.30 \text{ m}^3/\text{día}$$

Considerando que los RSU se generan diariamente, para todo el año se deben tomar en cuenta los 365 días, por lo que la superficie anual en hectáreas, para cada año es de

$$S_{2018} = (V * 365) / (\text{Alt}_{\text{max}} * 10,000) = (258.33 * 365) / (21.6 * 10,000)$$

$$S_{2018} = 0.44 \text{ ha}$$

$$S_{2038} = (288.30 * 365) / (21.6 * 10,000)$$

$$S_{2038} = 0.49 \text{ ha}$$

Finalmente, pensando que la mayor cantidad de RSU se generarán en el año 2038, se propone la superficie de ese año para utilizarse en la determinación de la superficie total requerida para los 20 años de vida útil del relleno sanitario seco, por lo que

$$S_{20 \text{ años}} = S_{2038} * 20 = 0.49 * 20$$

$$S_{20 \text{ años}} = 9.74 \text{ ha}$$

### 3.7.4 Incineración

Los sistemas de gestión denominados “todo en uno” (todos los tipos de residuos se meten al mismo método de tratamiento, sin selección previa) ocupan los últimos lugares en la jerarquía que debe adoptarse para el tratamiento y eliminación de los residuos, después de la minimización y el fomento del reciclaje y la reutilización. La incineración (denominada valorización energética) es un proceso de combustión controlada que finaliza al transformarse la fracción combustible de los residuos sólidos urbanos en materiales inertes y gases. Su función principal es reaprovechar fracciones de residuos y reducir el volumen requerido para su disposición final. La **incineración** es un proceso que se utiliza para reducir el volumen y descomponer o cambiar la composición física, química o biológica de un residuo sólido, líquido o gaseoso, mediante oxidación térmica, en la cual los factores de combustión y gases generados pueden ser controlados, ver tabla 3.11. Existen, en general, dos tipos de incineradores: con recuperación de calor (figura 3.9), y sin recuperación de calor (figura 3.10).

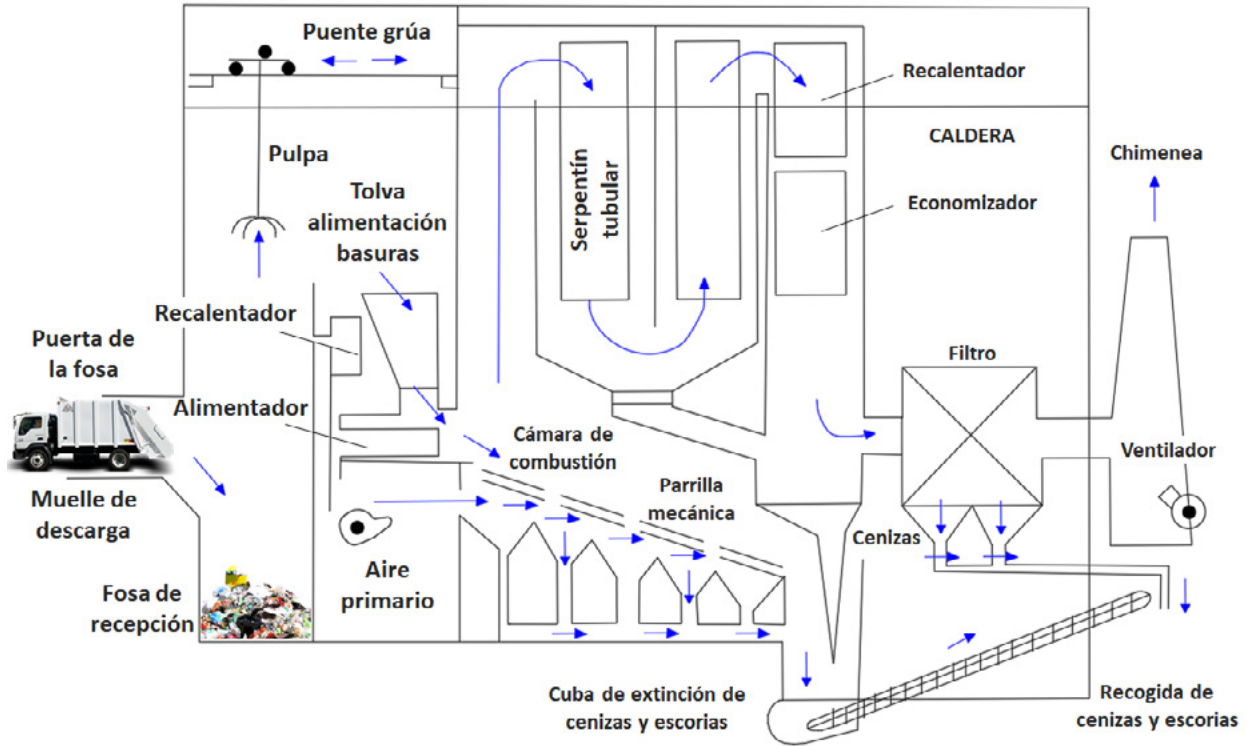


Figura 3.9 Incinerador con recuperación de calor. Fuente: (FUNIBER, 2015)

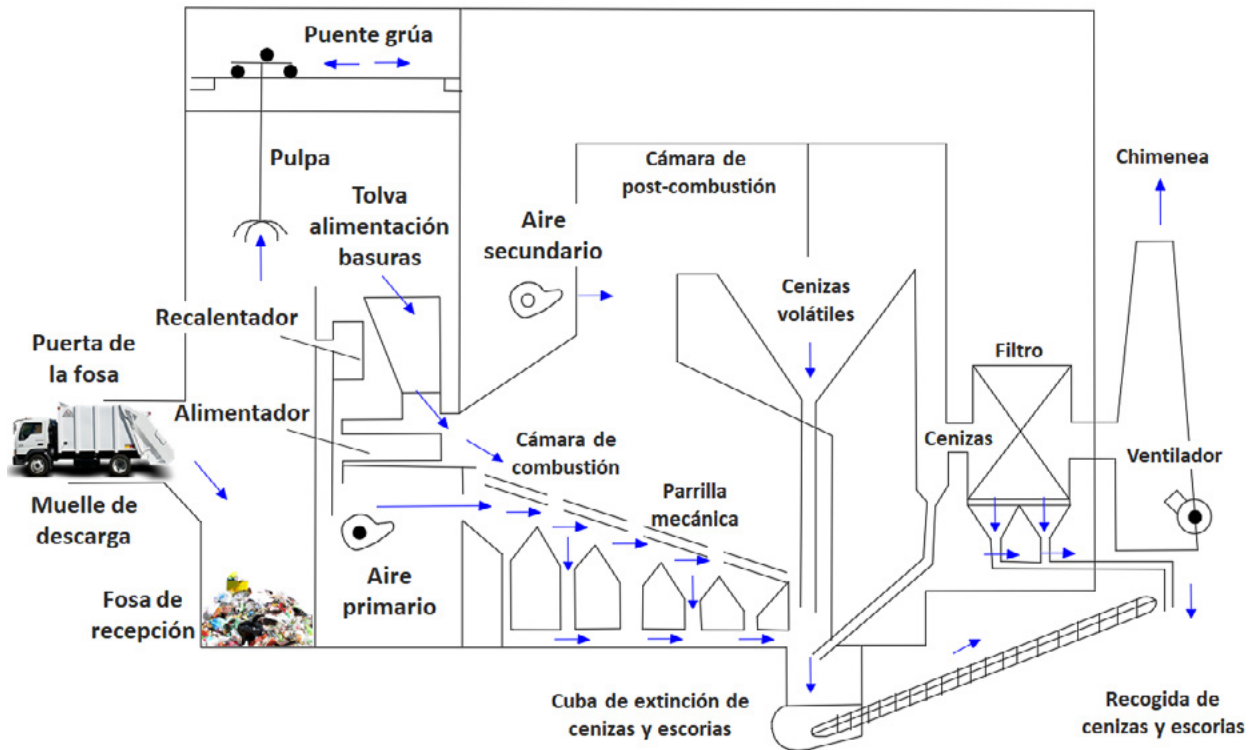


Figura 3.10 Incinerador sin recuperación de calor. Fuente: (FUNIBER, 2015)

Tabla 3.11. Ventajas y desventajas del método de incineración

Ventajas	Desventajas
Reducción en peso (75-80%) y en volumen de los residuos (80-90%)	Elevada inversión para la instalación de la planta incineradora.
Eliminación prácticamente de toda la materia degradable de una manera higiénica y controlada.	Potenciales problemas de contaminación atmosférica.
Ahorro en transporte y posibilidad de utilizar el calor generado.	Elevados costos de operación (con inadecuada selección de residuos).

Fuente: (FUNIBER, 2015)

Los factores que deben tenerse en cuenta para la selección de un sistema de incineración de residuos sólidos son:

- La superficie necesaria para la instalación: por ejemplo, para 150,000 habitantes, se necesitan 15,000 m<sup>2</sup> (1.5 ha), de los cuales 20% para el incinerador, 40% para espacios verdes, áreas de circulación y estacionamiento y 40% para oficina, almacén, zona de descarga y servicios generales.
- El volumen de los residuos a incinerar es rentable a partir de una capacidad de tratamiento de residuos de 500 t/día.
- El poder calorífico de los residuos debe ser mayor a 1,000 kcal/kg. Conforme al diagrama de Tanner (figura 3.11) se puede establecer la viabilidad de los residuos para incinerar: i) humedad inferior a 50%, ii) materias combustibles superior a 25% y iii) cenizas inferiores a 60%.

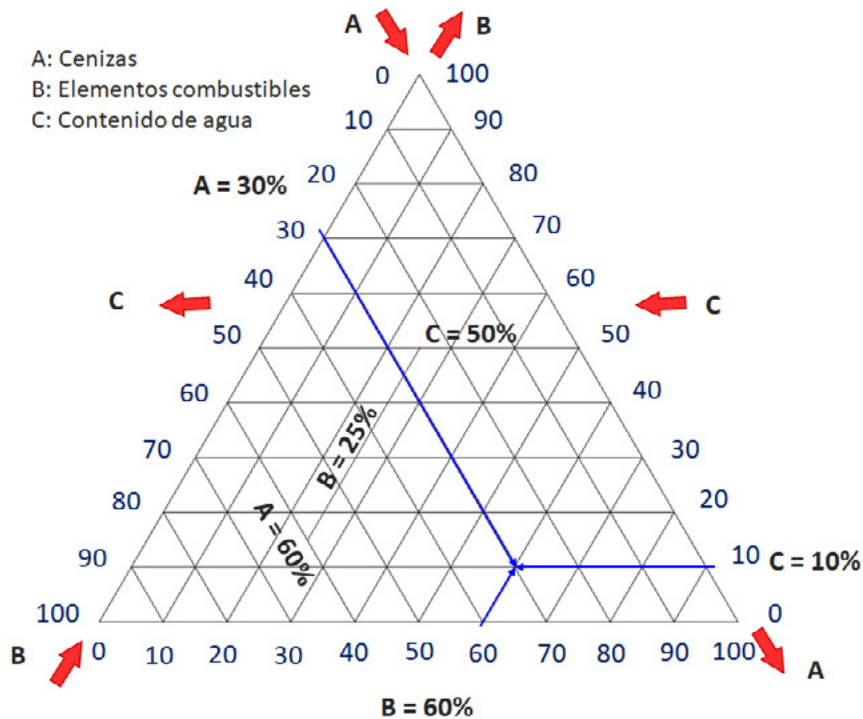


Figura 3.11 Diagrama de Tanner. Fuente: (FUNIBER, 2015)



**Problema resuelto 3.9. Selección de RSU para el tratamiento por incineración**

La ciudad más importante del país está analizando la posibilidad de instalar una planta de incineración para el aprovechamiento energético de los RSU. Como parte de los estudios previos para determinar la viabilidad de la planta de incineración deben identificar los RSU más convenientes para el proceso de tratamiento. El estudio de generación de RSU realizado, permitió sectorizar la ciudad en tres zonas, para cada una de las cuales se determinaron por fracción de RSU sus características físico-químicas, que se especifican en la tabla P3.9.1. Determinar la zona cuyos RSU tiene las mejores condiciones para ser incinerados.

Tabla P3.9.1. Características físico-químicas de los RSU por zona de la Ciudad

Zona	Fraciones de RSU (%)	Poder calorífico (kcal/kg)	Humedad (%)	Materiales combustibles (%)	Producción de cenizas (%)
<b>A</b>					
Orgánicos	40	1,111.11	65	5	40
Papel y cartón	5	4,000.00	10	100	15
Sanitarios	14	4,166.67	10	100	10
Plásticos	28	10,000.00	15	100	10
Otros	13	166.67	30	8	30
<b>B</b>					
Orgánicos	50	1,111.11	85	4	50
Papel y cartón	7	4,000.00	12	100	25
Sanitarios	10	4,166.67	12	100	15
Plásticos	12	10,000.00	18	100	15
Otros	21	166.67	35	10	35
<b>C</b>					
Orgánicos	55	1,111.11	70	2	85
Papel y cartón	6	4,000.00	9	100	35
Sanitarios	8	4,166.67	9	100	25
Plásticos	20	10,000.00	12	100	25
Otros	11	166.67	33	6	70

**Solución**

Para cada una de las tres zonas (A, B y C) se deben de obtener los valores promedio ponderados en función de las fracciones de las características de los RSU, se realizará para la primera zona, siendo el mismo procedimiento para las otras dos.

Zona A, poder calorífico

$$PC_A = \frac{(1,111.11 \times 0.4) + (4,000 \times 0.05) + (4,166.67 \times 0.14) + (10,000 \times 0.28) + (166.67 \times 0.13)}{1}$$

$$PC_A = 4,049.44 \text{ kcal/kg}$$

Zona A, humedad

$$H_A = \frac{(65 \times 0.4) + (10 \times 0.05) + (10 \times 0.14) + (15 \times 0.28) + (30 \times 0.13)}{1}$$

$H_A = 36\%$

Zona A, materiales combustibles

$$MC_A = \frac{(5 \times 0.4) + (100 \times 0.05) + (100 \times 0.14) + (100 \times 0.28) + (8 \times 0.13)}{1}$$

$MC_A = 50.04\%$

Zona A, producción de cenizas

$$C_A = \frac{(40 \times 0.4) + (15 \times 0.05) + (10 \times 0.14) + (10 \times 0.28) + (30 \times 0.13)}{1}$$

$C_A = 24.85\%$

Los resultados para las tres zonas se muestran en la tabla P3.9.2.

Tabla P3.9.2. Resultado de los promedios ponderados de las características físico-químicas

Zona	Poder calorífico (kcal/kg)	Humedad (%)	Materiales combustibles (%)	Producción de cenizas (%)
A	4,049.44	36.00	50.04	24.85
B	2,487.22	54.05	33.10	37.40
C	3,202.78	45.79	35.76	64.55

Las tres zonas cumplen con el mínimo energético de 1,000 kcal/kg, por lo que deben revisarse las otras características. La zona B sobrepasa la humedad aceptable, la zona C sobrepasa la producción de cenizas, solamente la zona A cumple con todos los aspectos requeridos para el óptimo funcionamiento de la planta de incineración. La tabla P3.9.3, muestra el análisis comparativo de las tres zonas.

Tabla P3.9.3. Análisis comparativo del cumplimiento de los RSU para incineración por zona

Zona	Poder calorífico (kcal/kg) > 1,000	Humedad (%) < 50%	Materiales combustibles (%) > 25%	Producción de cenizas (%) < 60%
A	Sí	Sí	Sí	Sí
B	Sí	No	Sí	Sí
C	Sí	Sí	Sí	No

Por tanto, la Zona cuyos RSU cumplen con las características físico-químicas consideradas es la A.

Comentario. Aunque los residuos mezclados pueden dar un resultado aceptable para el aprovechamiento energético mediante una planta de incineración, la eficiencia del proceso incrementaría si existiera la separación de los RSU dejando únicamente aquellos con mejores características físico-químicas para la incineración, es decir, aquellos RSU que tuvieran: mayor poder calorífico, mayores materiales combustibles, menor humedad y menor producción de cenizas.

### 3.8 Rellenos sanitarios

Un relleno sanitario es una obra de ingeniería que permite la disposición final de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial. El término disposición final está definido en la NOM 083 SEMARNAT, como: *“acción de depositar o confinar permanentemente residuos en sitios e instalaciones cuyas características permitan prevenir su liberación al ambiente y las consecuentes afectaciones a la salud de la población y a los ecosistemas y sus elementos”*. Un RS consiste en un conjunto de métodos y obras de ingeniería, que además de confinar residuos, permite que durante estas acciones se manejen adecuadamente los subproductos generados (biogás y lixiviados), evitando que éstos se liberen y se provoque un desequilibrio ecológico.

Como ya se explicó en el apartado 2.2 de este libro, para el diseño de un sistema de manejo integral de RSU es prioritario considerar la jerarquía del manejo de residuos, representada por los principios de gestión y manejo los cuales involucran, en primera instancia, la prevención de la generación seguida de la recuperación y como última alternativa la eliminación segura de los residuos. Este último principio involucra la disminución de los residuos que llegan al sitio de disposición final y su adecuado manejo. Esta alternativa es la que menos se aproxima al desarrollo sustentable, aunque actualmente se sigue utilizando, ya que involucra los costos más bajos en el corto plazo.

Por otra parte, considerar el uso de un RS conlleva ventajas operativas, como la posibilidad de la recepción de grandes cantidades de residuos y la necesidad de pocos recursos materiales (maquinaria, personal, material de compactación, etc.) y económicos.

En un RS, los residuos dispuestos son compactados acorde con los lineamientos técnicos establecidos y cubiertos con un material específico, integrando así un conjunto de volúmenes de residuos llamados celdas diarias encapsuladas. Los residuos de naturaleza orgánica así dispuestos se degradarán. Las moléculas complejas que los componen reaccionarán química, física o biológicamente produciendo compuestos más sencillos, los que se reintegrarán al ambiente, en mayor o menor tiempo, en función de su constitución.

Durante toda la vida útil de un RS se generan fluidos producto de las reacciones arriba mencionadas. Estas sustancias tienden a migrar del relleno, ya que son de naturaleza líquida o gaseosa. Dada esta circunstancia un RS deberá incluir los procedimientos y sistemas adecuados para el manejo correcto de dichas sustancias a fin de que sean de captadas, canalizadas y, en su caso, tratadas.

Para llevar a cabo el confinamiento de residuos en un RS, es deseable contar con elementos auxiliares que permitan controlar adecuadamente el ingreso de vehículos y de residuos. Otros elementos necesarios en un RS son los sistemas para la captación, liberación controlada y, en determinados casos, quema o aprovechamiento de los gases producidos durante el proceso de degradación de la fracción orgánica. Uno de los gases de gran relevancia ambiental producido en un RS es el metano, a éste en conjunto con otros gases se le denomina biogás.

A pesar de que en el diseño y operación de un RS se consideran medidas para minimizar los impactos ambientales negativos, en países desarrollados existe una tendencia favorable en la disminución de los residuos destinados a un RS, ya que se han privilegiado los principios de prevención y recuperación.

### 3.8.1 Tipos de relleno sanitario

**Relleno tradicional con compactación mecanizada.** La disposición final de los RSU se realiza de tal forma que disminuye el perjuicio al medio ambiente y molestias o peligros para la salud pública. En éste se colocan los residuos compactados en celdas, que alineadas forman pilas y capas estibadas. Sobre cada celda se coloca una cubierta de material poco permeable, como la arcilla o tepetate, que se le suele llamar material de cobertura. Se utiliza maquinaria pesada para el acomodo, homogeneización, compactación y cierre de la celda. Incluye tres sistemas, los cuales previenen y mitigan los impactos negativos al ambiente:

- Sistema de impermeabilización debajo de las celdas
- Sistemas de captación y tratamiento de lixiviados
- Sistema de conducción y aprovechamiento de biogás



Figura 3.12 Relleno tradicional con compactación mecanizada. Tomado de (Pixabay, 2016)

**Relleno manual.** Cuenta con los mismos elementos que el RS tradicional, la diferencia está en la operación, ya que, para esta actividad se utilizan instrumentos de tipo manual, no así para la preparación del sitio: excavaciones de zanjas, material de cobertura y vialidades, para lo cual sí se utiliza maquinaria pesada.





Figura 3.13 Relleno manual. Tomado de (El Herlado 2015)

**Relleno seco con pre-tratamiento y compactación.** Este requiere la reducción del volumen de los RSU, compactándolos con una prensa mecánica. Con este procedimiento se aumenta el peso volumétrico de RSU, por ende, se incrementa la cantidad de los RSU depositados en el RS. Este sistema reduce los problemas ambientales y mejora el manejo de la disposición final. Además, requiere un pre-tratamiento, es decir, una modificación de las características de los RSU antes de ser dispuestos, tal como la selección manual, separación automatizada o el encapsulamiento de las pacas de RSU con plástico.



Figura 3.14 Relleno seco con pre-tratamiento y compactación. Tomado de (México, 2002)

**Relleno con tratamiento mecánico-biológico.** Previo a la disposición final, se realiza la separación de la mayor cantidad de componentes orgánicos de los RSU, obteniendo un remanente de material inerte, es decir, material que no reacciona biológicamente con el paso del tiempo. El tratamiento mecánico-biológico consiste en dos etapas de tratamiento. En principio, tratamiento mecánico, para acondicionar los RSU a su tratamiento posterior, seguido del biológico, mediante una fermentación controlada o digestión aerobia. El pre-tratamiento acelera y facilita el control de los RSU a través de la reducción del volumen, tiempo de estabilización, cantidad de lixiviados y la emisión de biogás.

### 3.8.2 Componentes de un relleno sanitario

Además de las celdas y los sistemas para el manejo de lixiviados y biogás, un RS requerirá obras complementarias, en mayor o menor medida dependiendo de la cantidad de residuos a disponer por día. La ubicación de los componentes de un RS obedece a la funcionalidad y a las características topográficas. La normatividad en materia de disposición de residuos establece cuatro tipos de RS (A, B, C y D), esta clasificación obedece a la cantidad de residuos dispuestos por día (t/día). Los valores correspondientes a cada categoría se muestran en la tabla 3.12. La figura 3.15 muestra un esquema básico de un RS.

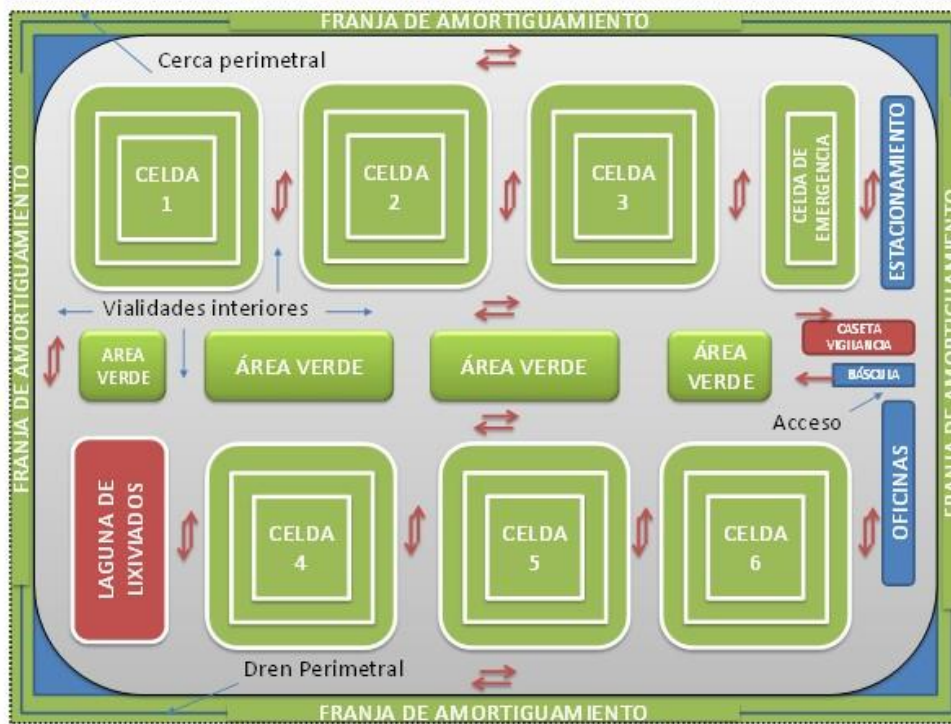


Figura 3.15 Esquema básico de un RS.

Tabla 3.12 Clasificación de RS

Clasificación de RS		Cantidad de RSU a recibir (t/d)
A	A1	Mayor de 750
	A2	100-750
B		50-100
C		10-50
D		Menor a 10

Tomado de (SEMARNAT, NOM 083 , 2003)

Una vez definido el tipo de RS, con base en la clasificación indicada en la normatividad, se pueden definir las obras complementarias necesarias, las cuales se especifican en la tabla 3.13.

Tabla 3.13 Obras complementarias requeridas de acuerdo al tipo de disposición final.

Obra complementaria	A	B	C
Caminos de acceso	✓	✓	✓
Caminos interiores	✓	✓	
Cerca perimetral	✓	✓	✓
Caseta de vigilancia y control de acceso	✓	✓	✓
Báscula	✓	✓	
Agua potable, electricidad, drenaje	✓	✓	
Vestidores y servicios sanitarios	✓	✓	✓
Franja de amortiguamiento (mínimo 10 metros)	✓	✓	✓
Oficinas	✓		
Servicio, médico y seguridad personal	✓		

Requisitos mínimos que deben cumplir los Sitios de Disposición Final de Residuos Sólidos Urbanos y de Manejo Especial, tipo D (menos de 10 toneladas diarias)

Garantizar un coeficiente de conductividad hidráulica de  $1 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ , con un espesor mínimo de un metro, o su equivalente, por condiciones naturales del terreno, o bien, mediante la impermeabilización del sitio con barreras naturales o artificiales.

Una compactación mínima de la basura, de  $300 \text{ kg/m}^3$ .

Cobertura de los residuos, por lo menos cada semana.

Evitar el ingreso de residuos peligrosos en general.

Control de fauna nociva y evitar el ingreso de animales.

Cercar en su totalidad el sitio de disposición final.

Tomada de (SEMARNAT, NOM 083 , 2003)

A continuación, se hace una breve descripción de cada uno de los componentes que integran a un RS, considerando los elementos generales, subsistemas y obras complementarias.

### Celdas

Son espacios confinados por material de cobertura (suelo excavado del lugar o traído de otros sitios), acomodados uno inmediatamente al siguiente hasta formar una franja. Cada celda está aislada de las demás, contiene y representa la cantidad de residuos diarios que se generan en la localidad (celda diaria). Los conjuntos de celdas diarias conforman, al término de la vida útil, una celda final, también llamada “pila”.



### **Celda de emergencia**

Es una zona en el interior del predio que se destina para la disposición de RSU cuando, por condiciones climáticas adversas o por cualquier otra eventualidad, no sea posible el confinamiento en las celdas. Esta celda se diseña para contener los RSU de hasta tres días. Cabe aclarar que el sitio de disposición final adoptará medidas para que los residuos peligrosos no sean admitidos en ningún caso, aun contando con celda de emergencia.

### **Sistema de captación, escurrimiento, almacenamiento y tratamiento de lixiviados**

Los lixiviados son los productos líquidos de la degradación de los residuos, sobre todo de la fracción orgánica, éstos presentan una coloración oscura y una alta concentración de contaminantes.

El material de cobertura que envuelve a las celdas no es totalmente impermeable, debido a ello parte de la lluvia que cae sobre la celda se infiltra hacia el interior de la misma e hidrata a los residuos. Este líquido, los producidos en los procesos de degradación y la humedad natural de los residuos, se conjuntan para escurrir al fondo de la celda. Para evitar que estos líquidos escurran hacia el subsuelo y se genere un problema de contaminación de aguas subterráneas, es necesario captarlos y conducirlos. Esto se lleva a cabo en un conjunto de tuberías plásticas perforadas que se cubren con materiales pétreos (grava gruesa), que reciben a los lixiviados y los conducen (los tubos presentan cierta inclinación para provocar el movimiento del agua) hacia el siguiente sistema.

Para ilustrar los subsistemas para el manejo de lixiviados se muestra la figura 3.16.

Los líquidos recolectados son conducidos hacia un contenedor llamado laguna de lixiviados, diseñada para su almacenamiento temporal. Una vez ahí una gran parte de los lixiviados se evapora. En algunos RS los lixiviados son conducidos a una planta de tratamiento en donde se modifican sus características físico-químicas, lo que permite verterlos en el sistema municipal de drenaje o utilizarlos para el riego de áreas verdes dentro del mismo predio.

Es importante destacar que, aunque todos los RS cuentan con una laguna de lixiviados, también llamada “balsa de lixiviados”, no todos cuentan con un sistema de tratamiento, algunos únicamente los recirculan hacia las celdas con el objetivo de hidratar el material de cobertura y evitar su agrietamiento. Además, con esta acción se incrementa la cantidad de microorganismos, lo que acelera el proceso de degradación de residuos y se aumenta la cantidad de biogás generado. Algunos RS utilizan el biogás para la generación de energía eléctrica.

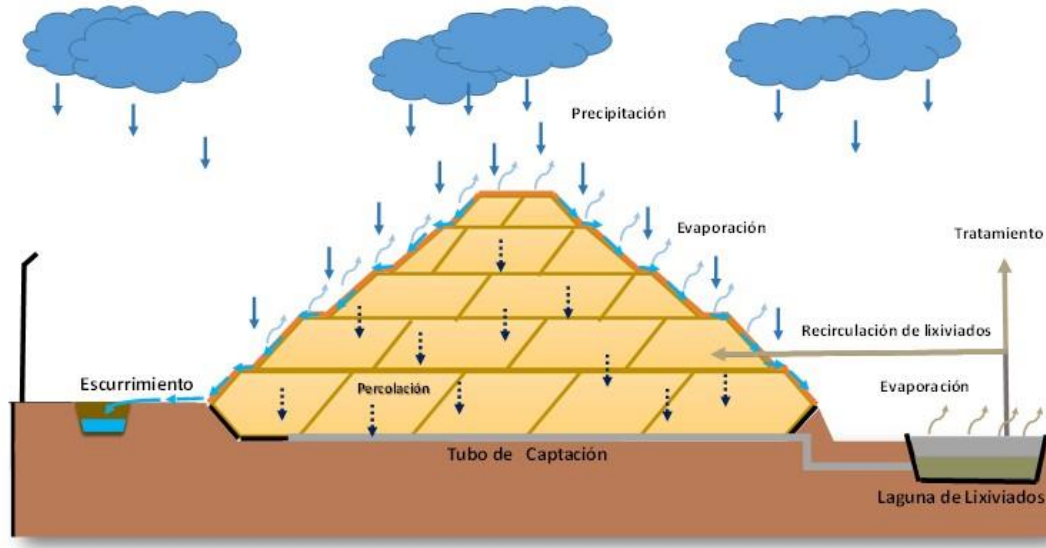


Figura 3.16. Subsistema de captación, escurrimiento, almacenamiento y tratamiento de lixiviados.

### Sistemas de captación, quema o aprovechamiento de biogás

Lo integran los elementos necesarios para captar el producto gaseoso de la degradación de la materia orgánica llamado biogás. Este sistema consta de tuberías verticales perforadas, colocadas a lo alto de la celda, para captar el biogás y permitir su ascenso hacia la superficie, en donde es quemado previo a su liberación a la atmósfera, o bien, a un sistema para su aprovechamiento. El metano, de no ser quemado, contribuiría más de 20 veces como gas de efecto invernadero comparado con el CO<sub>2</sub>. Cabe destacar que uno de los componentes predominantes del biogás es el metano (del 40% al 60% en volumen), gas que posee poder calorífico que lo hace susceptible de aprovechamiento como fuente de energía (ver tabla 3.10).

La figura 3.17 ilustra los componentes de un sistema de manejo de biogás.

### Cerca Perimetral

Debido al riesgo que existe durante la constante manipulación de maquinaria pesada (utilizada durante el proceso de compactación y confinamiento), además del constante tránsito de vehículos pesados, no es conveniente el libre acceso al predio por parte de personal no autorizado. Es por ello que se restringe el ingreso mediante una barrera física, la cual también evita la entrada de animales que pudieran actuar como vectores de enfermedades transmisibles o fauna nociva.

En general se opta por una malla ciclónica que permita el paso del aire y luz. Este tipo de materiales son de fácil instalación y su adquisición es económicamente viable. La altura recomendada es de 2.5m (SEDESOL, 2009)

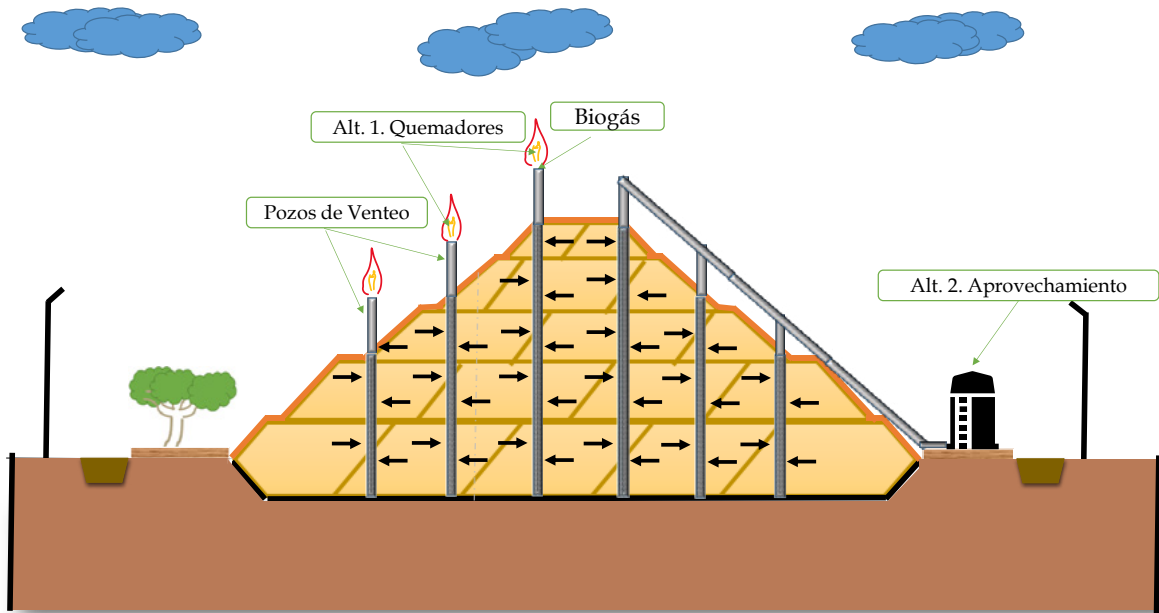


Figura 3.17 Sistema de captación, quema o aprovechamiento de biogás.

### Dren perimetral

Contiguo a la cerca perimetral en el interior del RS se requiere exista un elemento que permita captar el agua de lluvia que escurre de las zonas altas y se dirige hacia el predio. Este consiste en un dren que capta el agua y permite que escurra por el perímetro del predio, evitando así la erosión de las celdas, aumento excesivo en la humedad de los residuos dispuestos, y los anegamientos en las celdas (en caso de que se opte por el método de trinchera<sup>5</sup>). Además, las aguas que escurren no tendrán contacto con los residuos, lo que evita que exista contaminación de las aguas superficiales aledañas.

El dren utilizado es un canal excavado y recubierto con concreto, usualmente es de forma trapezoidal. La figura 3.18 muestra la configuración perimetral de un RS.

### Franja de amortiguamiento

La normatividad mexicana establece que todo RS debe de incluir una superficie entre las zonas de confinamiento y el lindero del predio. Esta área es llamada “franja de amortiguamiento”. Sirve para tener un espacio adecuado para dar mantenimiento a los sistemas de drenaje de lixiviados y manejo de biogás. Además, representa un espacio susceptible para colocar vegetación que disminuya el impacto visual de las celdas y funcione como pantalla para los olores ofensivos de los gases producidos.

<sup>5</sup> Método de confinamiento de RSU en un RS que consiste en excavar en el predio cierta cantidad de suelo o roca para aumentar el volumen útil y contar con material de compactación que es el producto de la excavación.

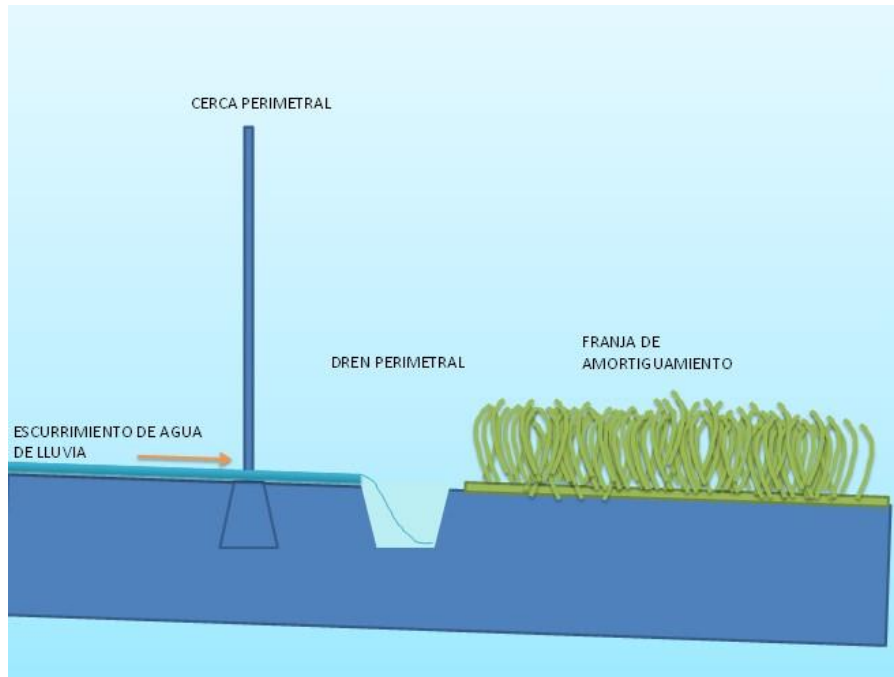


Figura 3.18 Configuración de cerca y dren perimetral.

### Vialidades interiores

Es necesario que el RS cuente con los caminos de entrada y de movimiento interno que permitan la comunicación entre las vías municipales (carreteras, vías primarias y secundarias) y las celdas. El diseño de estas vialidades se rige por reglas urbanas establecidas que permiten la correcta maniobrabilidad de los vehículos que ingresan. Es importante destacar que es necesaria la existencia de señalizaciones viales pertinentes para indicar sentidos, velocidades máximas e indicaciones generales.

Cabe destacar que en el acceso al RS es necesaria la existencia de una caseta de vigilancia en donde el personal garantizará el acceso exclusivo a vehículos autorizados.

### Báscula

Es necesario tener un control de la masa de residuos que ingresa al RS, para ello se utiliza una báscula que se coloca muy cerca del acceso al predio. Para el pesaje no es necesario el vaciado del vehículo, la báscula está equipada para soportar su peso. El vehículo es pesado a la salida y la diferencia de pesos significa la masa de residuos dispuestos.

Llevar un control diario de la masa dispuesta permite evaluar la eficiencia de la recolección e identificar el aumento en la producción de residuos de la localidad, además se puede prever la vida útil del RS y cuantificar costos de operación.

### **3.8.3 Normatividad relativa a proyectos de rellenos sanitarios**

La NOM-083-SEMARNAT-2003 (NOM 083) dicta la planeación, diseño, operación y clausura de un RS. Tiene el objetivo de establecer las especificaciones de selección del sitio. Así también, establece criterios para la construcción, operación, monitoreo, clausura y diseño de las obras complementarias de un sitio de disposición final de RSU y RME.

En su epígrafe 4 establece las definiciones de 48 conceptos en materia de disposición de residuos sólidos. Es importante leer, comprender y analizar cada una de estas definiciones para integrarlas como parte del lenguaje durante el ejercicio profesional de la ingeniería civil. Un ingeniero civil debe de tener la habilidad de comunicar sus ideas de forma oral dentro de un equipo multidisciplinario.

En el epígrafe 5, Disposiciones Generales, se indica que aquellos RSU o RME que no sean aprovechados o tratados, deben disponerse en sitios que cumplan con lo establecido en la norma. Además, como se mencionó anteriormente, clasifica a los sitios de disposición final en función de la cantidad de residuos a disponer por día.

En el epígrafe 6.1 se incluye un listado de restricciones a cumplir por cualquier sitio de disposición final, tales como distancias mínimas a aeropuertos, uso del suelo necesario, distancias mínimas a los centros urbanos, entre otros criterios. En los siguientes apartados se abordarán con mayor detalle dichos lineamientos.

Se establecen los estudios previos, en el sitio y auxiliares, que deberán acompañar en todo momento el proceso de planeación y diseño de un RS. Es importante comprender el fundamento y la aplicación de cada estudio y que durante el ejercicio profesional de la ingeniería civil exista colaboración con expertos de otros campos de conocimiento lo que generará proyectos integrales.

En los apartados finales de dicha norma se establecen criterios para el proceso de clausura, las características de la conformación final (configuración de elementos al final de la vida útil) y su uso, además de aspectos para el monitoreo postclausura, lo que garantizará la protección al ambiente por un tiempo mínimo de 20 años posterior al cierre.

Contiene, además, una guía para el procedimiento de evaluación de calidad, que establece la metodología para facilitar y orientar a quienes operan un RS y a quienes verifican el acatamiento de la normatividad (PROFEPA), del cumplimiento de los requisitos técnicos establecidos.

### **3.8.4 Ubicación del relleno sanitario**

La elección del sitio para la ubicación de un RS representa una tarea ardua que consiste en una serie de pasos que requieren la participación de expertos en distintas áreas del conocimiento (ingenieros ambientales, geólogos, hidrólogos, sociólogos, ingenieros civiles, entre otros). Una de las primeras actividades consiste en investigar las características del entorno físico, lo que es llamado análisis regional, integrado por el clima, geología, hidrología, geohidrología, etc. Además, se indagan las condiciones geográficas de la localidad a la que servirá el RS.

Una vez analizado el entorno físico, será necesaria la búsqueda de sitios cercanos al centro geométrico de la localidad o, en su caso, a una distancia cercana a la estación de transferencia. Las posibles ubicaciones deben cumplir con todos los criterios restrictivos establecidos en la NOM-083.

Ya identificadas alternativas viables, será necesario recurrir a una comparación de las mismas, considerando criterios financieros, sociales y ambientales, lo que asegura que el sitio así elegido es el más conveniente.

Son siete los criterios para la elección de la zona considerada para la ubicación del sitio de disposición final. Los criterios son dictados por la NOM-083 y su fundamento se basa en la protección del ambiente; además, limita la distancia a los centros urbanos y primordialmente prevé la contaminación del agua.

Las pautas indicadas por dicha norma son:

1. *“Cuando un sitio de disposición final se pretenda ubicar a una distancia menor de 13 kilómetros del centro de la(s) pista(s) de un aeródromo de servicio al público o aeropuerto, la distancia elegida se determinará mediante un estudio de riesgo aviario”.*

El porqué de esta indicación obedece a la proliferación de aves en torno al RS por la atracción que conlleva la acumulación de residuos orgánicos que, de cierta forma, les sirve de alimento. Es prioritario conocer la especie y número de especímenes y evaluar el posible impacto (estudio realizado por un biólogo), no sólo por el riesgo que conlleva a la integridad de las mismas, sino por el que genera el choque constante de aves con las aeronaves, hecho que arriesga a la población civil circundante.

2. *“No se deben ubicar sitios de disposición final dentro de áreas naturales protegidas, a excepción de aquellos que estén contemplados en el Plan de manejo de éstas”.*

En ese sentido, y dado que un RS requiere de actividades invasivas y contaminantes, no se vislumbra conveniente considerar dichas áreas como susceptibles de albergar un RS.

3. *“En localidades mayores de 2500 habitantes, el límite del sitio de disposición final debe estar a una distancia mínima de 500 m (quinientos metros) contados a partir del límite de la traza urbana existente o contemplada en el plan de desarrollo urbano”.*

Esta recomendación prevé la contaminación visual y disminuye el riesgo de proliferación de enfermedades transmisibles por medio de vectores.

4. *“No debe ubicarse en zonas de: marismas, manglares, esteros, pantanos, humedales, estuarios, planicies aluviales, fluviales, recarga de acuíferos, arqueológicas; ni sobre cavernas, fracturas o fallas geológicas”.*

Estos sitios son el medio para la existencia de especies vulnerables susceptibles a modificar sus características por la alteración del medio. Es por ello que debe limitarse la existencia de elementos contaminantes, como los presentes en un RS.

5. *“El sitio de disposición final se debe localizar fuera de zonas de inundación con periodos de retorno de 100 años. En caso de no cumplir lo anterior, se debe demostrar que no existirá obstrucción del flujo en el área de inundación”.*

*o posibilidad de deslaves o erosión que afecten la estabilidad física de las obras que integren el sitio de disposición final”.*

Las zonas de inundación son aquellas que presentan características geomorfológicas de permeabilidad y confinamiento que le confieren estanqueidad al agua de lluvia, tal que se provoque la formación de cuerpos de agua superficiales, como en el caso de los lagos. No es deseable que el RS se ubique en zonas en las que habrá acumulación de agua, ya que existirá un mayor riesgo de contaminación de otras fuentes, como la subterránea, ríos y, en todo caso, contaminación del suelo.

6. *“La distancia de ubicación del sitio de disposición final, con respecto a cuerpos de agua superficiales con caudal continuo, lagos y lagunas, debe ser de 500 m como mínimo”.*

Es muy probable que el agua de lluvia que escurre sobre la superficie elegida para el RS tenga como destino los cuerpos de agua superficial cercanos. Se debe evitar, alejando el predio de los mismos, el riesgo de contaminación por los productos generados por las reacciones anaerobias, mismas que comprenden ácidos, y además contener metales pesados y compuestos carcinogénicos que, si son llevados a los cuerpos de agua, es probable que incidan en la población aledaña.

7. *“La ubicación entre el límite del sitio de disposición final y cualquier pozo de extracción de agua para uso doméstico, industrial, riego y ganadero, tanto en operación como abandonados, será de 100 metros adicionales a la proyección horizontal de la mayor circunferencia del cono de abatimiento. Cuando no se pueda determinar el cono de abatimiento, la distancia al pozo no será menor de 500 metros”.*

Es conveniente analizar las condiciones de extracción de agua subterránea en la vecindad del predio para establecer la distancia adecuada a los pozos, a fin de disminuir al máximo la probabilidad de contaminación del agua subterránea por la disposición de residuos. Estas condiciones se establecen a partir del análisis del radio de influencia que tiene la extracción de agua.

### **3.8.5 Estudios auxiliares multidisciplinarios**

La NOM 083 establece los estudios y análisis previos que se deberán considerar para la correcta ubicación de un RS, éstos son a nivel regional, es decir, que sólo se analizan las condiciones en el predio y en los alrededores.

la NOM-083, establece:

*“Se deberá determinar el marco geológico regional con el fin de obtener su descripción estratigráfica, así como su geometría y distribución, considerando también la identificación de discontinuidades, tales como fallas y fracturas. Asimismo, se debe incluir todo tipo de información existente que ayude a un mejor conocimiento de las condiciones del sitio; esta información puede ser de cortes litológicos de pozos perforados en la zona e informes realizados por alguna institución particular u oficial”.*

#### **Evidencias y uso del agua subterránea**

Se deberá definir la ubicación de las evidencias de agua subterránea en la zona de influencia, tales como manantiales, tipo de vegetación, pozos y norias, para conocer el gradiente hidráulico. Asimismo, se



debe determinar el volumen de extracción, tendencias de la explotación y planes de desarrollo en la zona de estudio.

### Identificación del tipo de acuífero

Identificar las unidades hidrogeológicas<sup>6</sup> y sus interrelaciones, así como el tipo de acuífero (libre, confinado o semiconfinado).

### Análisis del sistema de flujo

La determinación de la dirección del flujo subterráneo regional es realizada por un geólogo y un hidrólogo, profesionales que formarán parte del equipo multidisciplinario que planeará el RS. Los resultados que arrojen dichos estudios serán la información base, para la ubicación del RS.

La NOM 083, recomienda la realización de otros estudios, sin embargo, el uso de estos corresponde con la fase de diseño. La relevancia y uso de éstos se abordará con detalle en el apartado 3.9. Éstos, en conjunto con los estudios previos, se muestran en la tabla 3.14. La obligatoriedad de dichos estudios está en función de la clasificación correspondiente a la cantidad de residuos a disponer (A, B, C o D).

Una vez que se ha integrado toda la información ya descrita y a fin de elegir la ubicación más conveniente de un RS, se puede optar por algún método de evaluación de alternativas, en este caso se sugiere el método de la matriz de decisión, mismo que involucra ponderación de criterios en función de su importancia.

Tabla 3.14 Estudios locales necesarios en función de la clasificación de RS.

Estudio y análisis	A	B	C
Geológico y geohidrológico regionales	X		
Evaluación geológica y geohidrológica	X	X	
Hidrológico	X	X	
Topográfico	X	X	X
Geotécnico	X	X	X
Generación y composición de los RSU y RME	X	X	X
Generación de biogás	X	X	
Generación de lixiviado	X	X	

Tomada de (SEMARNAT, NOM 083 , 2003)

<sup>6</sup> Uno o varios acuíferos agrupados a efectos de conseguir una racional y eficaz administración del agua.

## 3.9 Ingeniería básica del proyecto de un relleno sanitario; diseño funcional

En el diseño de un RS se requiere del trabajo de ingenieros especialistas en diferentes disciplinas, entre las que destacan: geotecnia, hidrología, ingeniería sanitaria, construcción, hidráulica, vías terrestres y, de manera importante, ingeniería ambiental.

Existen dos aspectos iniciales que se deben considerar para el diseño de un RS: las características del sitio y las características de los residuos sólidos, de éstas últimas principalmente la cantidad y la composición. En los apartados anteriores se explicaron los procedimientos para llevar a cabo un estudio de generación y una caracterización de los residuos que se generan en una localidad. Información relevante que, en conjunto con la adecuada elección del sitio, permiten dar inicio a la ingeniería básica de un RS.

El contenido de este subcapítulo está estructurado con base en los pasos que se consideran para el diseño de un RS, que inician con la identificación, con base en especificaciones de la NOM 083, de los sistemas y subsistemas requeridos en función del correspondiente tipo de RS, la forma de operar y la cantidad de RSU que serán dispuestos.

### 3.9.1 Diseño general

Una vez definido el tipo de RS (tradicional, manual o seco), el cual precisa la forma en que serán confinados los residuos, se da pie a delimitar los requerimientos de diseño. El RS tradicional es el que principalmente se ha construido en México, aun cuando no es la mejor opción en cuanto a la protección al ambiente. Cabe aclarar que las especificaciones contenidas en la NOM 083 están basadas en este tipo de mecanismo de disposición final, razón por la cual los apartados siguientes describen su diseño.

La tabla 3.16 permite identificar los requisitos y especificaciones generales de un RS. Hay que recordar que la clasificación A, B, C, y D la define la cantidad en toneladas diarias que serán confinadas.

### 3.9.2 Características generales del relleno sanitario

Antes de iniciar con el dimensionamiento de los elementos que integran a un RS es pertinente definir los requerimientos constructivos que todo RS debe cumplir, los cuales han sido descritos en el apartado 3.8.

**Nivel de compactación.** Es un aspecto que se procura durante el confinamiento de los residuos, ya que entre mayor sea el nivel de compactación, los requerimientos volumétricos disminuyen y con ello aumenta la vida útil del RS. También este aspecto influye en la cantidad de subproductos generados, como el lixiviado y el metano: entre mayor es la compactación menor su producción.

La NOM 083 especifica los valores mínimos de compactación correspondientes con cada categoría de RS (véase tabla 3.15).

Tabla 3.15 Compactación requerida por la NOM 083.

Sitio	Compactación (kg/m <sup>3</sup> )
<b>A</b>	A1 Mayor de 700
	A2 Mayor de 600
<b>B</b>	Mayor de 500
<b>C</b>	Mayor de 400

Tomada de (SEMARNAT, NOM 083 , 2003)

**Cubierta diaria.** Los residuos recién confinados deben cubrirse en un lapso no mayor a 24 horas, a la capa utilizada se le denomina cubierta diaria. Ésta sirve para retener los materiales ligeros, evitar la proliferación de fauna nociva y reducir la infiltración de la lluvia.

**Control de ingreso de residuos.** En el RS no pueden ser dispuestos residuos líquidos, como agua residual, líquidos industriales de proceso, o cualquier otro residuo líquido con contenido de humedad mayor al 85% en peso. Tampoco se pueden confinar aceites minerales, ni residuos peligrosos. Para evitar su ingreso se deben establecer medidas de control en el acceso al RS.

**Sistema de lodos.** Los lodos procedentes de las plantas de tratamiento de agua residual pueden ser utilizados como material para cobertura o dispuestos en la celda diaria, para ello deben haber sido tratados o acondicionados previamente.

**Sistema de impermeabilización.** Para evitar contaminación de suelos y acuíferos, el RS debe tener una barrera natural o construida cuyo coeficiente de conductividad hidráulica sea no mayor a  $1 \times 10^{-7}$  cm/s en la superficie de desplante de las celdas de confinamiento. El coeficiente de conductividad hidráulica se refiere a la permeabilidad, es decir, a la capacidad que tendrá la superficie para permitir el paso de un fluido. Muy importante en el terreno que soportará al RS, ya que una baja permeabilidad evitará que los lixiviados se infiltren. Si naturalmente no se cuenta con la permeabilidad establecida en la normatividad, entonces tendrán que colocarse capas de material compactado, tal como el tepetate, sobre el que se suele colocar una geomembrana termofusionada de polietileno de alta densidad. Los estudios de geología y geotecnia aportarán los coeficientes de conductividad hidráulica y las características de porosidad de las capas del suelo, para determinar la permeabilidad del sitio. La figura 3.19 muestra un corte de la configuración del confinamiento de residuos y las capas que aumentan la impermeabilidad.

Tabla 3.16 Requisitos por tipo de RS.

Requisitos	Tipo de sitio de disposición final			
	A	B	C	D
<b>A. Especificaciones de selección del sitio.</b>	R	R	R	R
<b>A.1. Restricciones</b>	R			
<b>A.2. Estudios y análisis previos a la selección del sitio</b>				
<b>A.3. Estudios y análisis previos a la construcción</b>				
<b>A.3.1. Topográfico</b>	R	R		
<b>A.3.2. Geotécnico</b>	R	R	R	
<b>A.3.3. Geológico / Hidrogeológico</b>	R	R		
<b>A.3.4. Generación y composición de los RSU</b>	R	R	R	
<b>A.3.5. Generación de biogás</b>	R	R		
<b>A.3.6. Generación de lixiviados</b>	R	R		
<b>B. Características constructivas y operativas</b>				
<b>B.1. Barrera impermeable</b>	$1 \times 10^{-7}$ cm/s	$1 \times 10^{-7}$ cm/s	$1 \times 10^{-7}$ cm/s	$1 \times 10^{-5}$ cm/s

B.2. Extracción, captación, conducción y control del biogás	R	R	R	
B.3. Captación y extracción de lixiviados	R	R	R	
B.4. Drenaje pluvial	R	R	R	
B.5. Área de emergencia	R	R	R	
B.6. Compactación de los RSU (kg/m <sup>3</sup> )	600 a 700	mayor de 500	mayor de 400	mayor de 300
B.7. Cobertura	Diaria	Diaria	Diaria	Semanal
B.8. Control de entrada de RSU	R	R	R	R
B.9. Obras complementarias	Listadas en NOM-083	Listadas en NOM-083	Listadas en NOM-083	Cerca perimetral
B.10. Manual de operaciones	R	R	R	
B.11. Programa de monitoreo ambiental	R	R	R	
<b>C. Clausura del sitio</b>				
C.1. Cubierta final	Especificada en NOM-083	Especificada en NOM-083	Especificada en NOM-083	Especificada en NOM-083
C.2. Conformación final	R	R	R	R
C.3. Mantenimiento	R	R	R	R
C.4. Programa de monitoreo	R	R	R	R
C.5. Uso final	R	R	R	R

NOTA: R-Requisito indispensable que debe ser cubierto para el tipo de sitio

Basada en la (SEMARNAT, NOM 083 , 2003)

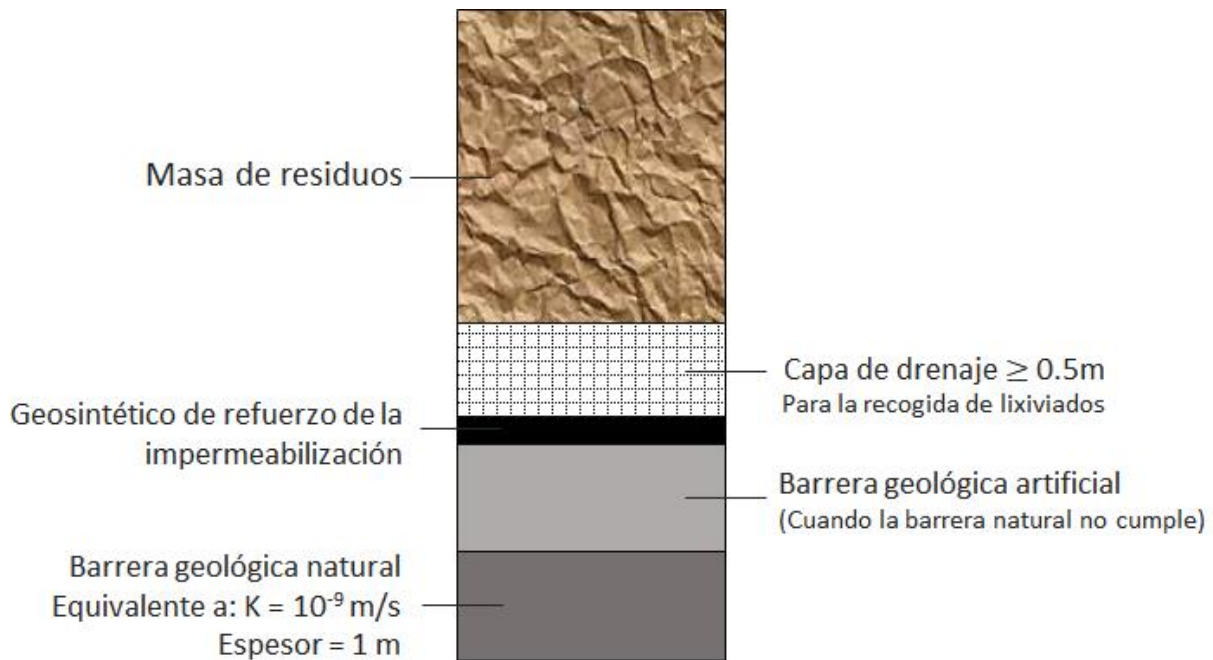


Figura 3.19 Esquema general de impermeabilización.  
Tomado (SEDESOL, 2009)

### 3.9.3 Requerimientos volumétricos

El diseño de un RS está relacionado con su capacidad de recepción de residuos, el cálculo se basa en aspectos geométricos y volumétricos. El análisis geométrico está determinado por la topografía del sitio y el método de confinamiento seleccionado (véase apartado 3.10.2), por otra parte, el aspecto volumétrico lo determina la cantidad, composición y nivel de compactación de los residuos que serán confinados. El cálculo de la capacidad o vida útil de un RS se basa en conocer el volumen de residuos que pueden ser confinados desde el inicio de operaciones hasta la clausura, lo que se traduce a capacidad y tiempo.

La vida útil calculada de un RS es un dato considerado como preliminar, ya que el valor real dependerá de la evolución cualitativa y cuantitativa de la generación de residuos en la localidad, de su caracterización, nivel de la compactación, de la evolución de los centros urbanos; parámetros difíciles de predecir con exactitud en la etapa de diseño del RS.

Los parámetros básicos por considerar en el cálculo de la vida útil de un RS integran las características geométricas, volumétricas de los materiales, además, de los datos para estimar la cantidad de RSU que serán recibidos diariamente y hasta completar la vida útil del RS. Los parámetros sugeridos para realizar estos análisis volumétricos se listan a continuación:

- Población atendida
- Generación per cápita
- Método de confinamiento
- Volumen disponible del sitio
- Altura de relleno de cada capa/celda
- Capas de material de cubierta diaria y final
- Altura máxima de RSU en el relleno
- Densidad de RSU posterior a la compactación

Para determinar la cantidad de RSU que se generarán en un año se aplica la siguiente ecuación:

$$P_n \text{ (t/año)} = H \text{ (hab)} \times RS \text{ (kg/hab/d)} \times 0.365 \quad (3.3)$$

Donde:

- $P_n$  = Cantidad de residuos generados (t/año)
- $H$  = Población atendida (hab)
- $RS$  = RSU por habitante al día (kg/hab/día)
- 0.365 = Factor de conversión de unidades

Los requerimientos volumétricos para el diseño del RS se obtendrán para los años estimados mediante los volúmenes totales anuales y acumulados, tanto de los residuos como del material de cobertura, empleando para ello una proyección de la generación de residuos y su peso volumétrico estimado.

El cálculo de la vida útil del RS se realiza involucrando la capacidad volumétrica total del sitio, la cantidad de residuos a disponer y el volumen de material de cobertura requerido, como lo establece la ecuación (3.2):

$$U = \frac{V}{(365 \times Gt)} \quad (3.4)$$

Donde:

U= Vida útil del RS, en años

V= Volumen del sitio seleccionado, en m<sup>3</sup>

Gt=Volumen ocupado por la cantidad total diaria de RSU a disponer más el del material de cubierta, en m<sup>3</sup>/día

La vida útil de un RS será el número de años durante los cuales podrá recibir los residuos generados de una determinada población.

La capacidad o vida útil del RS se realiza mediante la comparación volumétrica de los RSU a ser confinados y el volumen disponible del sitio. A fin de mecanizar el cálculo se sintetizan cuatro pasos, los cuales se basan en la experiencia y datos del Manual de operación del RS (SEDESOL, 2009)

1. **Determinar el volumen disponible en el sitio seleccionado.** El volumen disponible es la suma de los espacios para confinar los residuos en el sitio. Esto depende de las condiciones topográficas y del método de confinamiento seleccionado.
2. **Con base en una proyección de la generación de residuos, estimar los requerimientos volumétricos anuales.** La población atendida, la generación por habitante, así como las variaciones de ambas en el tiempo, son los factores a considerar para obtener la proyección. Se recomienda que la proyección sea para 20 años.
3. **Para cada año de la proyección de generación de RSU, calcular el volumen acumulado.** La suma acumulada de los requerimientos volumétricos anuales durante el total de años que se espera opere el RS definen el total de RSU a ser confinados.
4. **Comparar el volumen requerido acumulado en el año con respecto al volumen disponible.** Cuando el volumen acumulado sea igual al volumen disponible, la vida útil concluye.

Para ilustrar estos procedimientos se muestra el problema resuelto 3.2.

La estimación realizada en el problema resuelto 3.1 permite determinar si el volumen disponible es suficiente, si se requiere de un terreno más amplio, o bien, de otro tipo de confinamiento para lograr un mayor volumen en el mismo sitio.

La compactación en sitio de los residuos produce también asentamientos de la masa, estos significan un aumento en la densidad de la masa confinada que reduce la altura de las celdas. La disposición de capas superiores produce un asentamiento. Los asentamientos a largo plazo son efecto de la degradación bioquímica de los RSU. Este proceso se prolonga por al menos diez años.

El volumen disponible del sitio se puede determinar mediante cálculos geométricos, a partir de los planos topográficos del sitio y la altura (cota) hasta la cual se realizarán las celdas. La autorización de la altura del RS está relacionada con el uso de suelo y la normativa local.

Los años que aún se podrá utilizar el RS se obtiene mediante la ecuación 3.3, obtenida del Manual de especificaciones técnicas para la construcción de RS para RSU y RME (SEMARNAT, 2009):

$$A \text{ (años)} = V_d \text{ (m}^3\text{)} / V_{\text{req}} \text{ (m}^3\text{/año)} \quad (3.5)$$

Donde:

- $A$  = Vida útil (años)
- $V_d$  = Volumen disponible ( $\text{m}^3$ )
- $V_{\text{req}}$  = Volumen de RSU generado anualmente ( $\text{m}^3/\text{año}$ )

Una vez que se ha determinado la vida útil del RS, se requiere una programación de llenado de las celdas, es decir, cuándo serán llenadas cuántas y cuáles celdas, esto se conoce como calendarización del llenado de celdas, su fundamento se encuentra detallado en el apartado 3.10 de este libro.



### Problema resuelto 3.2. Cálculo de la vida útil de un RS

Estime la vida útil de un RS que da servicio a una población que para el año 1 de servicio será de 250,000 habitantes, con una tasa anual de crecimiento poblacional de 2.5% (crecimiento geométrico). La generación per cápita es de 1.5 kg/hab/día, con un crecimiento del 1% anual. El nivel de compactación se supone de 600 kg/m<sup>3</sup>, constante durante la operación del RS. Estos datos corresponden a un RS tipo A2, conforme a lo establecido en la NOM 083. El volumen disponible, determinado a partir de estudios topográficos, es de 5 millones de metros cúbicos.

#### Solución:

En la tabla E3.2. se muestra el ejemplo de la estimación de la vida útil. Nótese que para el año 1 se multiplica la población de ese año (250, 000 hab) por la generación *per cápita* (1.5 kg/hab/d), lo que resulta en la generación diaria (375 t/d). Para determinar el valor del volumen diario de ese año, se divide la generación diaria entre el valor del nivel de compactación (600kg/m<sup>3</sup>= 0.6t/ m<sup>3</sup>), lo que resulta en 625 m<sup>3</sup>/d, lo que, multiplicado por el número de días en un año, resulta en 228, 125 m<sup>3</sup>/año. La siguiente columna acumula los volúmenes para cada año, valor que restado al volumen disponible total que es de 5 millones de metros cúbicos resulta en el volumen disponible al final de ese año. Aplicando la ecuación 4.3, se obtiene la vida útil restante.

Tabla E3.2. Análisis de la vida útil de un RS

Año	Población hab	Generación <i>per cápita</i> kg/hab/d	Generación diaria t/día	Nivel de compactación kg/m <sup>3</sup>	Volumen diario m <sup>3</sup> /día	Volumen anual m <sup>3</sup> /año	Volumen acumulado m <sup>3</sup> /año	Volumen disponible m <sup>3</sup>	Vida útil años
1	250,000	1.5	375	600	625	228,125	228,125	4,771,875	21.9
2	256,250	1.515	388.22	600	647.03	236,166	464,291	4,535,709	20.2
3	262,656	1.53	401.9	600	669.84	244,491	708,783	4,291,217	18.6
4	269,223	1.545	416.07	600	693.45	253,110	961,892	4,038,108	17.0
5	275,953	1.561	430.74	600	717.9	262,032	1,223,924	3,776,076	15.4
6	282,852	1.577	445.92	600	743.2	271,268	1,495,192	3,504,808	13.9
7	289,923	1.592	461.64	600	769.4	280,831	1,776,023	3,223,977	12.5
8	297,171	1.608	477.91	600	796.52	290,730	2,066,753	2,933,247	11.1
9	304,601	1.624	494.76	600	824.6	300,978	2,367,731	2,632,269	9.7
10	312,216	1.641	512.2	600	853.66	311,588	2,679,318	2,320,682	8.4
11	320,021	1.657	530.25	600	883.76	322,571	3,001,889	1,998,111	7.2
12	328,022	1.674	548.95	600	914.91	333,942	3,335,831	1,664,169	6.0
13	336,222	1.69	568.3	600	947.16	345,713	3,681,544	1,318,456	4.8
14	344,628	1.707	588.33	600	980.55	357,899	4,039,443	960,557	3.7
15	353,243	1.724	609.07	600	1015.11	370,515	4,409,959	590,041	2.6
16	362,075	1.741	630.54	600	1050.89	383,576	4,793,535	206,465	1.5
17	371,126	1.759	652.76	600	1087.94	397,097	5,190,632	0	0.5
18	380,405	1.776	675.77	600	1126.29	411,095	5,601,726	0	0.0
19	389,915	1.794	699.59	600	1165.99	425,586	6,027,312	0	0.0
20	399,663	1.812	724.25	600	1207.09	440,588	6,467,900	0	0.0

Se observa que, en el año 17, el volumen disponible en el sitio es menor al generado en ese mismo año, por lo que durante ese año se alcanzará la vida útil.

### 3.9.4 Diseño de subsistemas

El diseño del RS, además del dimensionamiento de las celdas para el confinamiento de los RSU, incluye definir la ubicación y dimensionamiento de los subsistemas, tanto para el manejo de biogás como de lixiviados.

Para poder establecer las dimensiones de los subsistemas es necesario conocer la cantidad de subproductos que se van a generar. Para calcular la cantidad de lixiviados que se generan en un RS se puede aplicar un balance de agua.

A partir de la evaluación de las ganancias y las pérdidas de agua que la cubierta de los RSU tendrá por efecto principalmente de la precipitación pluvial y la evaporación, se realiza un balance de agua, que tiene por objeto conocer, entre otras cosas, la cantidad de lixiviados que se van a generar, expresados como lámina de agua por unidad de tiempo.

La figura 3.20 muestra la interacción de una celda con el agua, se incluye la lluvia y su infiltración, la interacción con los RSU, con las aguas subterráneas, entre otras fuentes.

La expresión generalizada del balance de agua expresa la igualdad entre los aportes y las pérdidas de humedad, como se indica a continuación.

$$L_V = P - E - R - I \quad (3.6)$$

Donde:

- $L_V$ = Altura del volumen de lixiviados [mm]
- $P$ = Precipitación pluvial [mm]
- $E$ = Volumen perdido por evapotranspiración [mm]
- $R$ = Esguerrimiento sobre la superficie del sitio [mm]
- $I$ = Infiltración efectiva en el sitio [mm]

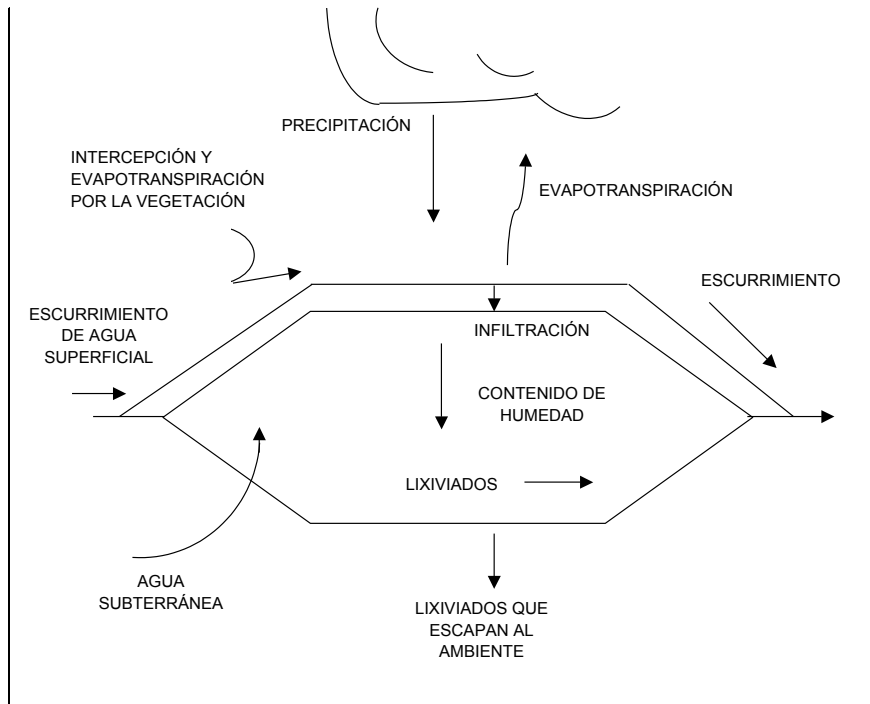


Figura 3.20 Balance de agua en un RS. Tomada de, (SEDESOL, 2009)

La infiltración por ingreso al subsuelo y la evapotranspiración se consideran salidas del sistema. La precipitación puede obtenerse mediante el análisis de los datos de una estación meteorológica cercana, o bien registros previos que publica el Servicio Meteorológico Nacional; el escurrimiento, puede ser propuesto a partir del tipo y características de la superficie del suelo, mediante el coeficiente de escurrimiento; la infiltración, aunque en ocasiones se puede medir con el empleo de lisímetros, es normalmente la incógnita; la evapotranspiración, se calcula mediante fórmulas empíricas, que involucran las condiciones de la zona donde se ubique el sitio de disposición final.

Para ilustrar el proceso de cálculo de la posible infiltración de agua de lluvia y la consecuente generación de lixiviados, se muestra el proceso de cálculo mediante las ecuaciones de Thorthwite, Castenn. Los resultados obtenidos sirven de base para el dimensionamiento del sistema de drenes para los lixiviados, así como de la laguna de lixiviados. En este caso se considera que la cubierta final del relleno será de un material limoso de 40 cm de espesor y que puede retener una humedad de 200 mm/m.

Para la solución se requieren datos meteorológicos del sitio tales como la temperatura media mensual y la precipitación mensual. Para este caso se trata de un RS ubicado en la ciudad de Villahermosa Tabasco, cuya latitud es de 17°59'13" Norte. Los datos meteorológicos del sitio se muestran en la tabla 3.17.

Inicialmente, se realiza el cálculo de la evapotranspiración mensual potencial corregida, con el método de Thorthwaite, el cual se basa en las ecuaciones 3.7 y 3.8, que se muestran a continuación:

$$EP_j = 1.6 \left( \frac{10T_j}{I} \right)^\alpha \tag{3.7}$$

$$I_j = \left( \frac{T_j}{5} \right)^{1.514} \tag{3.8}$$

Donde:

- EP=Evapotranspiración potencial mensual [cm/mes]
- I=índice de calor anual =  $\sum ij$  (suma de las temperaturas)
- $\alpha = 0.49239 + 1.792 \times 10^{-3}I - 7.71 \times 10^{-5}I^2 + 6.75 \times 10^{-7}I^3$
- Tj=Temperatura media mensual [°C]
- Ij=Índice mensual de calor
- $\alpha$  = Coeficiente adimensional en función de la suma de los índices mensuales de calor
- j= Número de meses considerados

Tabla 3.17 Datos meteorológicos de Villahermosa, Tabasco

Mes	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Precipitación media [mm]	125.6	79	50.1	44.6	95.9	208.5	178.9	216.8	323.9	303.3	187.3	147
Temperatura media [°C]	23.6	24.5	26.6	28.5	29.6	29.3	28.9	28.9	28.4	27.1	25.7	24.1

Fuente: Servicio meteorológico nacional.

La evaporación potencial mensual obtenida con la ecuación 3.7, se deberá de corregir con los datos mostrados en la tabla 3.18 para cada mes, los cuales están en función de la latitud del sitio de estudio.

Tabla 3.18. Factor de corrección de EP para cada mes

Longitud en grados	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
0	1.04	0.94	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04	1.04	1.01	1.04	1.01	1.01
10	1.00	0.91	1.03	1.03	1.08	1.06	1.08	1.07	1.02	1.02	0.98	0.99
20	0.95	0.90	1.03	1.05	1.13	1.11	1.14	1.11	1.02	1.00	0.93	0.91
30	0.90	0.87	1.03	1.08	1.18	1.17	1.20	1.14	1.03	0.98	0.89	0.88
35	0.87	0.85	1.03	1.09	1.21	1.21	1.23	1.16	1.03	0.97	0.86	0.85
40	0.84	0.83	1.03	1.11	1.24	1.25	1.27	1.18	1.04	0.96	0.83	0.81
45	0.80	0.81	1.02	1.13	1.28	1.29	1.31	1.21	1.04	0.94	0.79	0.75
50	0.74	0.78	1.02	1.15	1.33	1.36	1.37	1.25	1.06	0.92	0.76	0.70

Fuente: (Aparicio Mijares, 2009)

Calculando la EP para cada mes y afectándola por el factor de corrección obtenido de la tabla 3.19, se obtiene la evaporación potencial ajustada, mostrada en la tabla 3.20.

Tabla 3.19. Valores de EP corregidos para cada mes

Mes	Temperatura (°C)	Indice Ij	Evapo. Pot. Mensual [mm]	Factor de Correccion	Evapo. Pot. Ajustada (mm)
Enero	23.6	10.480	83.292	1.13	94.29
Febrero	24.5	11.091	96.556	0.99	95.78
Marzo	26.6	12.561	133.596	1.05	140.28
Abril	28.5	13.944	175.428	0.97	170.87
Mayo	29.6	14.767	203.722	0.97	197.20
Junio	29.3	14.541	195.690	0.92	180.43
Julio	28.9	14.242	185.353	0.96	177.57
Agosto	28.9	14.242	185.353	0.99	184.24
Septiembre	28.4	13.870	173.011	1.00	173.01
Octubre	27.1	12.920	143.790	1.08	154.72
Noviembre	25.7	11.923	116.620	1.08	126.18
Diciembre	24.1	10.818	90.480	1.14	102.97
	i =	155.399			
	α =	3.94832865			

El siguiente paso, consiste en el cálculo de la unidad potencial de infiltración mensual, para cada uno de los meses del año, con la expresión 3.9, cuyo proceso y resultados se muestran en la tabla 3.20. Para establecer la cantidad de agua que no se infiltrará, sino que escurrirá superficialmente, se deberá consultar bibliografía especializada para proponer un coeficiente de escurrimiento, el cual se encuentra en función del tipo e inclinación del material de cobertura. Para este caso, nótese en la tabla 3.20, que el coeficiente de escurrimiento cambia en los meses que se espera haya un crecimiento de la vegetación.

$$IP_j = (P_j - (CE_j \times P_j)) - EP_j \tag{3.9}$$

Donde:

- IP = Unidad potencial de infiltrado
- Pj = Precipitación media anual
- CEj = Coeficiente de escurrimiento

Conocida la infiltración y elegido el material de cobertura, será necesario establecer la interacción entre el agua infiltrada y el agua que retiene dicho material, lo cual depende de su composición y espesor. Lo anterior permitirá establecer la percolación real de agua que llegará al sistema de drenaje y laguna de lixiviados.

Tabla 3.20. Unidad potencial de infiltración mensual

Mes	Precipitación Media Mensual (mm)	Coefficiente de Escorrimento	Escorrimento (mm)	Infiltración (mm)	EP	I - ET
Enero	125.6	0.13	16.328	109.272	94.286	15
Febrero	79	0.13	10.270	68.730	95.783	-27
Marzo	50.1	0.13	6.513	43.587	140.276	-97
Abril	44.6	0.13	5.798	38.802	170.867	-132
Mayo	95.9	0.17	16.303	79.597	197.203	-118
Junio	208.5	0.17	35.445	173.055	180.427	-7
Julio	178.9	0.17	30.413	148.487	177.568	-29
Agosto	216.8	0.17	36.856	179.944	184.241	-4
Septiembre	323.9	0.17	55.063	268.837	173.011	96
Octubre	303.3	0.13	39.429	263.871	154.718	109
Noviembre	187.3	0.13	24.349	162.951	126.183	37
Diciembre	147	0.13	19.110	127.890	102.966	25

### Generación de biogás

La generación de biogás es sensible al medio; los organismos microbianos involucrados en las reacciones bioquímicas responden rápidamente a los cambios en las condiciones propicias para su reproducción.

Existe un rango de producción de biogás de entre 0.05 y 0.40 m<sup>3</sup> por kilogramo de RSU confinados en un RS, la variación obedece a la fracción orgánica. La masa de RSU incluye los materiales sólidos (75-80% por masa) y la humedad (20-25% por masa) (SEDESOL, 2010).

La composición física y elemental de los RSU son los factores más importantes para la evaluación del potencial de generación de biogás. Además, depende de:

- Contenido de humedad;
- Contenido de nutrientes;
- Concentración de bacterias;
- pH;
- Temperatura.

Una metodología para caracterizar un sitio con base en su potencial de producción de biogás inicia con la determinación del factor de ajuste del tonelaje, con base en la composición del RSU. Este factor de corrección representa la proporción de RSU inertes en el RS que no producen biogás, y la proporción de RSU industriales/comerciales/institucionales (ICI) que producen menos biogás que un residuo doméstico típico. El factor de ajuste es determinado con base en la proporción de los tipos de residuos que están ya depositados o que se prevé van a ser recibidos en el RS. La capacidad del RS se multiplica por el factor de ajuste de tonelaje, lo que resulta en una capacidad ajustada del sitio.

La precipitación pluvial sobre los sitios y la subsecuente infiltración en las celdas de confinamiento de los RSU puede hacer que el RS se clasifique como seco o húmedo. Los sitios localizados en áreas con precipitaciones menores de 500 mm/año se clasifican como sitios secos; más de 500 pero menos de 1000 mm/año, como sitios relativamente húmedos; y los sitios ubicados en áreas con más de 1000 mm/año, como sitios húmedos (SEDESOL, 2010).

La descomposición de la fracción orgánica de RSU en un RS seco es lenta, ello implica que la producción de biogás será más baja y más largo el tiempo de producción. Existen factores que afectan la humedad de los RSU, siendo los más relevantes: precipitación y temperatura del sitio, cobertura del RS, el sistema de recolección y recirculación de los lixiviados y el sistema de impermeabilización.

En la bibliografía especializada se indican varias metodologías y modelos que se han desarrollado para el análisis y cuantificación de la generación de biogás en un RS. Uno de los métodos más convenientes, desde el punto de vista práctico y por los resultados obtenidos, es el Modelo Mexicano del Biogás, mismo que cumple con lo establecido en la NOM 083. Este modelo es de dominio público, la vía de acceso es el sitio web de la Agencia de Protección del Ambiente de Estados Unidos (USEPA, por sus siglas en inglés).

La extracción del biogás se relaciona con la cantidad generada y la capacidad de captación, es decir, con la eficiencia de recolección. La eficiencia de un sistema de captación y extracción del biogás es la relación entre la generación proyectada de biogás y la cantidad de biogás capturado. Aunque la captura de gas en los RS puede ser cuantificada, la generación de biogás actual en el RS no, por ello la determinación de la eficiencia de recolección es supuesta, ya que dependerá de la presencia de subsistemas y su adecuado funcionamiento.

### Captación de lixiviados

Para el desalojo del agua de lluvia captada sobre el RS, junto con los lixiviados producidos en el interior de las celdas, se dispondrá de una red de tubos perforados en el fondo del RS. Las tuberías deberán de tener pendientes que propicien el escurrimiento de los lixiviados (valor mínimo del 2% transversal y 1% longitudinal). Incluye un tubo central al que se conectan varios tubos secundarios. El tubo principal descarga en el punto más bajo del RS. Los diámetros de los tubos se determinan mediante el cálculo del caudal máximo de lixiviados para cada zona de influencia.

Las tuberías están embebidas en una zanja rellena de material pétreo para el drenaje, integrada por rocas con diámetro promedio de entre 20 a 40 mm, que poseen una permeabilidad de al menos  $10^{-3}$  m/s. El espesor de dicha capa debe ser de al menos 0.5 m.

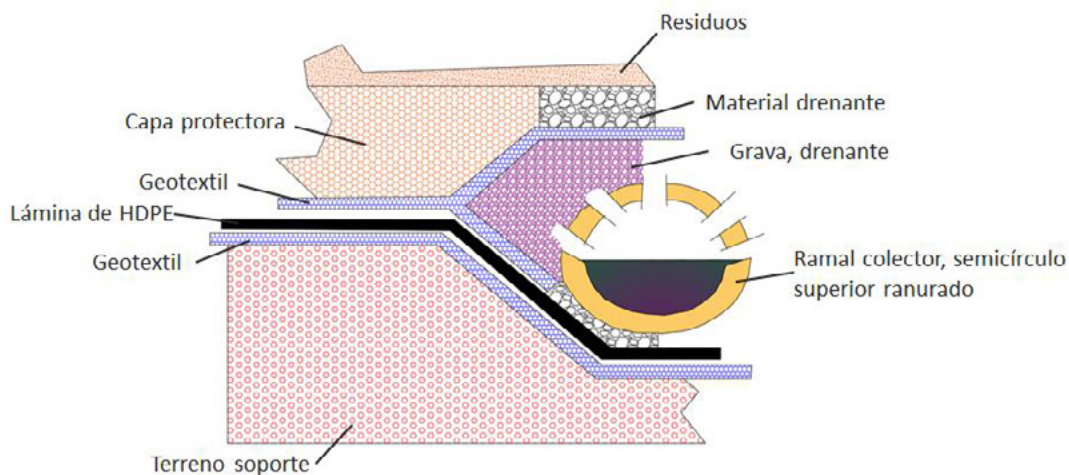


Figura 3.21 Detalle de colocación de red de captación de lixiviados.  
Fuente: Tomado del (SEDESOL, 2009).



Los lixiviados deberán ser conducidos hacia la laguna de lixiviados, cuyo volumen se determina a partir del análisis de su producción, como se detalló en el apartado 3.9.7. Las funciones de ésta son:

- a. Recoger los lixiviados del fondo del RS.
- b. Recoger el agua de lluvia precipitada sobre el RS, en caso de lluvias fuertes.
- c. Almacenar lixiviados y permitir su evaporación.

La capacidad mínima de la laguna de lixiviados para que ésta sea capaz de contener el volumen generado por cierta lluvia que presenta un periodo de retorno dado, se basa en las siguientes consideraciones (SEMARNAT, Manual de Especificaciones Técnicas para la Construcción de Rellenos Sanitarios para Residuos Sólidos Urbanos y de Residuos de Manejo Especial, 2009)

1. Toda el agua que cae sobre la superficie de las celdas traspasa la masa de residuos depositados y es recolectada por la red. No se considera la absorción de agua por los RSU depositados.
2. El área tributaria de la laguna de lixiviados será la proyección horizontal del área total de las celdas de confinamiento ocupadas por residuos, ya sea en algún momento específico o a lo largo de la vida útil del RS.
3. Se considerará un periodo de retorno de 500 años para el cálculo del volumen de la laguna de lixiviados, lo que representa un factor de seguridad ante desbordes y fugas al exterior, superficialmente o hacia el subsuelo.

El volumen mínimo de la laguna de lixiviados se determina por la expresión:

$$V = Pd * Av \quad (3.10)$$

donde:

V= Volumen de la laguna de lixiviados.

Pd= Precipitación máxima diaria para el periodo de retorno considerado.

Av= Área del RS en proyección horizontal.

Una vez obtenidos estos valores, se puede determinar el volumen de almacenamiento necesario de la laguna de lixiviados, evitando así desbordes que generen contaminación del suelo adyacente y/o cauces de agua superficial y/o subterránea.

Si bien es importante el manejo de subproductos como una medida de protección ambiental, uno de los conocimientos necesarios para la correcta operación de un RS es el equipo de movimiento de tierras y confinamiento de RSU. A continuación, se describen aspectos fundamentales para la selección del equipo para maniobras de confinamiento.

### **Selección de equipo para maniobras de confinamiento**

La construcción y operación del RS requiere de equipo especializado cuya selección considera el método de confinamiento (área y trinchera), las condiciones de trabajo para el adecuado movimiento y compactación de los RSU y el material de cobertura. Cualquier RS con operación mecánica necesita máquinas para:

- Preparación de terreno, incluyendo desmonte y despalme.
- Compactación y manejo de RSU
- Excavación, transporte y aplicación de la cubierta diaria.
- Esparcimiento y compactación de la cubierta final.
- Trabajos generales y de limpieza.

Para la selección del equipo a utilizar durante las operaciones diarias del RS se consideran los siguientes aspectos:

- Tonelaje por disponer y su proyección.
- Cantidad y tipo de material de cobertura.
- Distancia de acarreo del material de cobertura.
- Método de confinamiento del RS.
- Nivel de compactación.
- Tareas complementarias.
- Recursos económicos.

La versatilidad del equipo es otro factor importante en la selección de la maquinaria. Mientras más aplicaciones tenga menos necesidad hay de adquirir otros equipos.

## 3.10 Operación y control de un relleno sanitario

### 3.10.1 Calendarización del llenado de las celdas

La calendarización del llenado de las celdas se apega a lo establecido en el análisis de la vida útil del RS, particularmente el valor de la generación diaria y anual, a su distribución en la superficie del RS y el dimensionamiento de la celda diaria, tema que se describirá en el siguiente apartado.

El llenado de las celdas se establece conforme a las características geométricas del terreno y las necesidades de recepción de RSU. La tabla 3.21 muestra un ejemplo de calendarización del llenado de celdas.

Tabla 3.21. Ejemplo de formato de calendarización de llenado de celdas

# celda	Ubicación (nivel, fila, columna)	Fecha inicio	Fecha cierre	RSU recibidos (m <sup>3</sup> )
1	1,1,1	5/nov/2013	12/nov/2013	6,025
2	1,1,2	13/nov/2013	20/nov/2013	6,085
3	1,1,3	21/nov/2013	28/nov/2013	6,057
n	x,y,z	día/mes/año	día/mes/año	Vol. semanal

El volumen de RSU recibidos debe ser consistente con el volumen y el dimensionamiento de la celda diaria. La tabla anterior es un ejemplo de cómo realizar la calendarización, obsérvese que no se establece un volumen diario sino semanal. Lo recomendable es que se tenga una celda para la cantidad de RSU que se reciban por día, sin embargo, en ocasiones se puede dimensionar la celda para un ciclo mayor de recepción, considerando una capa diaria de material de cobertura, acorde a lo establecido en los requerimientos operativos de la NOM 083.

### 3.10.2 Dimensionamiento de la celda diaria

La celda diaria en la unidad básica de construcción en un RS; es un espacio específicamente diseñado para recibir, compactar y confinar los RSU de un día de operación. Esta debe tener las dimensiones necesarias para el volumen diario de RSU ya compactados. La celda diaria incluye a los RSU vertidos más el material de cubierta, considerando la reducción volumétrica por la compactación con equipo mecánico.

Se considera a la celda diaria como la unidad mínima del RS. Al grupo de celdas diarias alineadas secuencialmente en un mismo nivel topográfico se le conoce como franja. A la suma de franjas se le llama capa. El total de capas apiladas hasta llegar a la máxima cota autorizada es la capacidad total del RS.

Las dimensiones y volumen de las celdas dependerán del área total del RS, del volumen diario de RSU por recibir (este volumen se ha calculado en la tabla de vida útil para cada año de trabajo), del equipo empleado y del material de cubierta (SEDESOL, 2009). Se sugiere el siguiente conjunto de pasos para la determinación del volumen y geometría de la celda diaria.

**Paso 1.** Altura de la celda. La altura máxima deberá ser de 3.00 m, incluyendo el material de cubierta requerido.

**Paso 2.** Ancho de la celda. El ancho de la celda (frente de trabajo) deberá estar determinado por la longitud necesaria para el funcionamiento adecuado y ejecución de maniobras del equipo, tanto de compactación como de transporte. Para poblaciones mayores de 250,000 habitantes, el ancho mínimo del frente de trabajo se calcula con la siguiente ecuación:

$$F = \sum_{i=1}^n (X_i)^2 \quad (3.11)$$

Donde:

- F= Longitud del frente de trabajo [m].
- Xi= Ancho de la hoja topadora de cada una de las máquinas que se utilizarán simultáneamente [m].

**Paso 3.** Volumen de la celda. El volumen de la celda se determina empleando la siguiente ecuación:

$$V = \left(\frac{Ds}{D}\right) Mc \quad (3.12)$$

Donde:

- V=Volumen de la celda diaria [m<sup>3</sup>]
- Ds= Cantidad media de RSU que llegan al RS [kg]
- D= Densidad de los RSU
- Mc= Factor de material de cobertura (1.2 a 1.25)

**Paso 4.** Largo de la celda. Se calcula en función de la altura y el ancho previamente determinados, de acuerdo con la configuración trapezoidal de la celda diaria:

$$L = \frac{V}{W \times A} \quad (3.13)$$

Donde:

- L= Largo de la celda [m]
- V= Volumen de la celda [m<sup>3</sup>]
- W= Ancho de la celda [m]
- A= Altura de la celda [m]

En la figura 3.22 se presenta un esquema general de la conformación de una celda diaria. Como se observa, la celda tiene una configuración geométrica trapezoidal, esto responde al ángulo de reposo del material de las paredes de la celda, la proporción sugerida es 3:1.

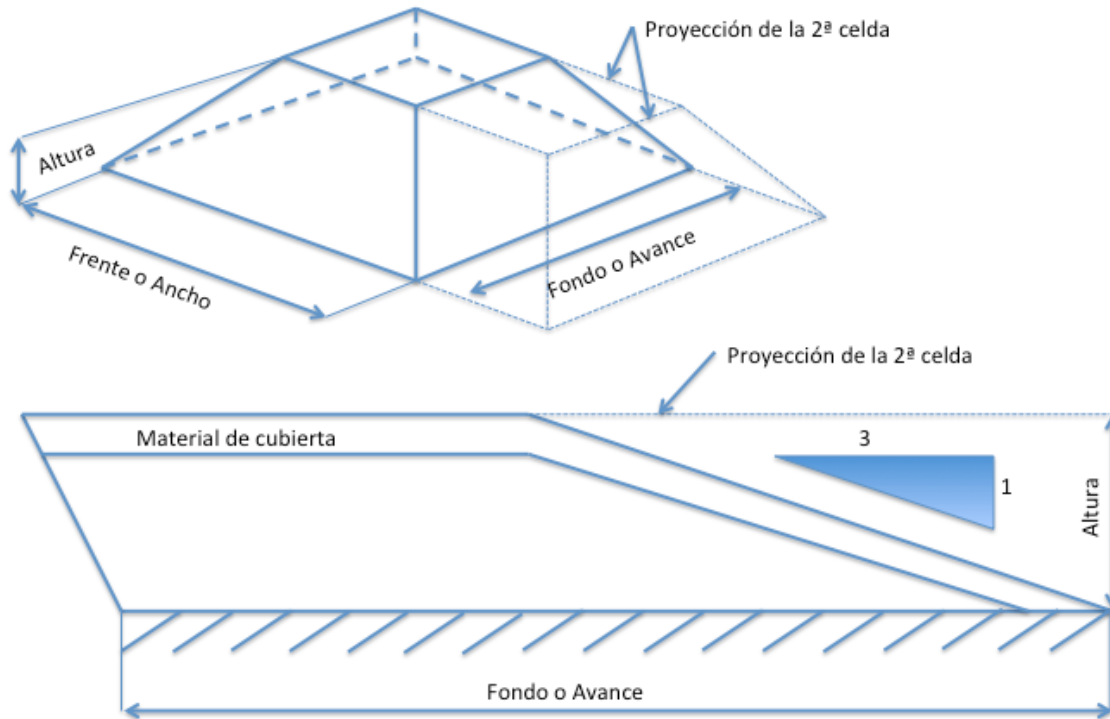


Figura 3.22 Características geométricas propuestas para una celda diaria.  
Adaptado de SEMARNAT (2009).

Las celdas se construyen inicialmente en un extremo del sitio y se avanza hasta terminar en el otro extremo. Cuando existan ondulaciones y depresiones en el terreno, éstas deberán ser utilizadas como respaldo de las primeras celdas de una determinada capa constructiva.

Se prepara el terreno para trabajarlo a base de terrazas y al mismo tiempo se extrae material para la cubierta. Los cortes al terreno se hacen siguiendo la topografía del sitio para formar terrazas y aprovechar al máximo el terreno. El talud de la celda tendrá una relación de 3:1, con ángulo de  $18^\circ$ . Cada celda del RS será contigua con la del día anterior hasta formar una franja. Las franjas al irse juntando forman capas, estas se construirán considerando la altura del sitio disponible para el RS.

Las cubiertas intermedias que sirven de separación de las celdas diarias serán de 20 cm de espesor y la cubierta final será de 60 cm.

Para el drenado adecuado del agua de lluvia las cubiertas tendrán una pendiente del 2%, reduciendo así la infiltración. Para evitar la erosión en la capa final, se cubrirá con especies vegetales propias de la región.

### 3.10.3 Determinación del método de confinamiento

Existen tres mecanismos de confinamiento de RSU en un RS: el método de área, método de trinchera y método combinado. Su selección depende de las condiciones topográficas y geológicas del sitio en donde se vaya a construir el RS. Las características principales de cada uno de estos métodos se describen a continuación:

#### Método de área

El método de área es recomendable para aquellos terrenos en los que resulta imposible o muy caro realizar excavaciones, ya sea por la poca profundidad del nivel freático o por la dificultad de excavación por el tipo de suelo. Por otra parte, es deseable que el terreno cuente con depresiones naturales que puedan ser rellenadas, como colinas o depresiones.

Los sitios que tienen una mejor vocación para el uso de este método son canteras abandonadas, secciones de cañadas, depresiones en terrenos, o cualquier otro en donde el material para la cubierta sea económico y fácilmente transportable de lugares cercanos.

El método es muy sencillo, consiste en verter los RSU sobre un talud inclinado (sin realizar excavación), compactándolos en capas inclinadas para formar la celda, cuyo talud recomendado es 3:1, que después se viste con material de cobertura. Las celdas se construyen inicialmente en un extremo del área a rellenar y se avanza hasta terminar en el otro extremo, como se muestra en la figura 3.23.

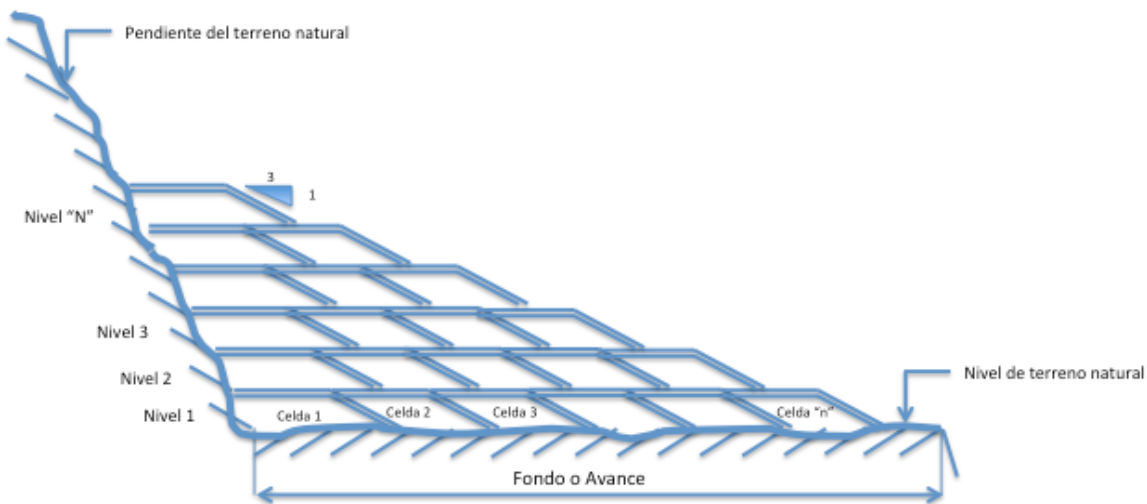


Figura 3.23 Método de área.

#### Método de trinchera

El método de trinchera se recomienda para suelos con características propicias para la excavación, que involucren costos bajos por este concepto, además, se debe cumplir que el nivel freático sea profundo tal que no interfiera con la excavación.

Para dar inicio, el sitio deberá ser desmontado. Posteriormente se realiza la excavación y se extrae el material del suelo, éste mismo podría ser utilizado como material para la cubierta. Esta excavación debe llegar a una distancia no menor al metro y medio del nivel freático. Requiere un sistema de impermeabilización y de sistemas de captación y desalojo de lixiviados, como los mencionados en el apartado 3.9.4.

El método de trinchera se utiliza principalmente cuando el nivel de aguas freáticas es profundo, las pendientes del terreno son moderadas o suaves y es sencilla la excavación de trincheras, lo que significa que con equipos convencionales de movimiento de tierras se pueden realizar.

Realizada la excavación se disponen los RSU sobre el talud inclinado de la trinchera, en donde son esparcidos y compactados en capas, formando taludes con pendiente 3:1, mediante el uso del equipo y/o maquinaria adecuada. Se continúa este proceso hasta formar una celda, que después será cubierta diariamente, esparciendo y compactando el material de cubierta sobre los RSU. La figura 3.24 muestra un esquema de la conformación de las celdas de disposición de RSU con el método de trinchera.

Método de trinchera.

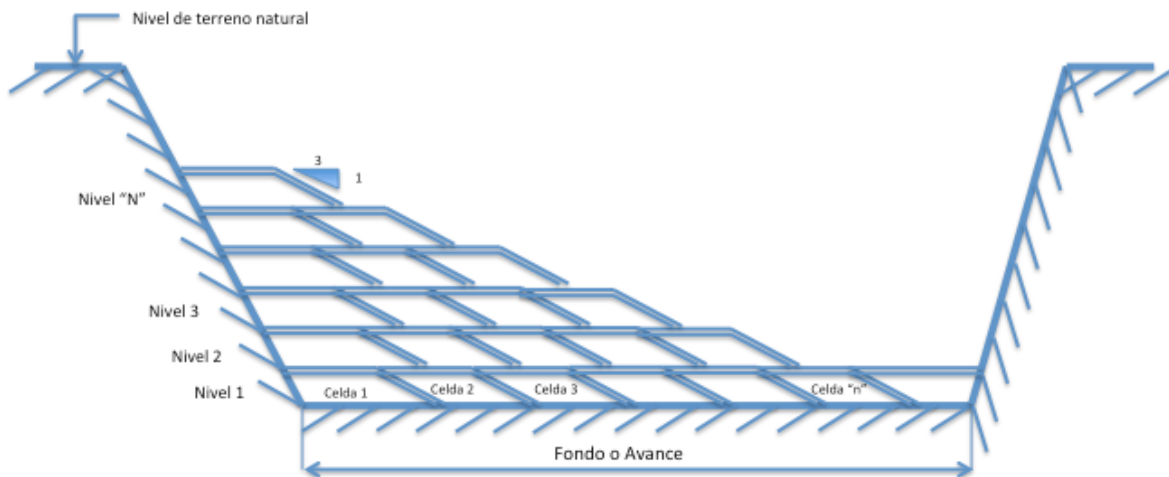


Figura 3.24 Método de trinchera.

### Método combinado

Cuando las condiciones geohidrológicas y topográficas del sitio elegido para llevar a cabo el RS son apropiadas, se pueden combinar los dos métodos anteriores, con la finalidad de tener mayores volúmenes para disposición final de los RSU y aumentar la vida útil del sitio. Es decir, se inicia con el método de trinchera para aprovechar el material que sea fácilmente y económicamente viable de excavar, una vez cubierta esta zona de RSU, se continúa con el método de área en la parte superior. Otra variación del método combinado consiste en iniciar con un método de área, excavando el material de cubierta de la base de la rampa, formándose una trinchera, la cual servirá también para ser rellenada. Los métodos combinados son considerados los más eficientes, ya que permiten ahorrar el transporte del material de cubierta (siempre y cuando exista éste en el sitio) y aumentan la vida útil del sitio.



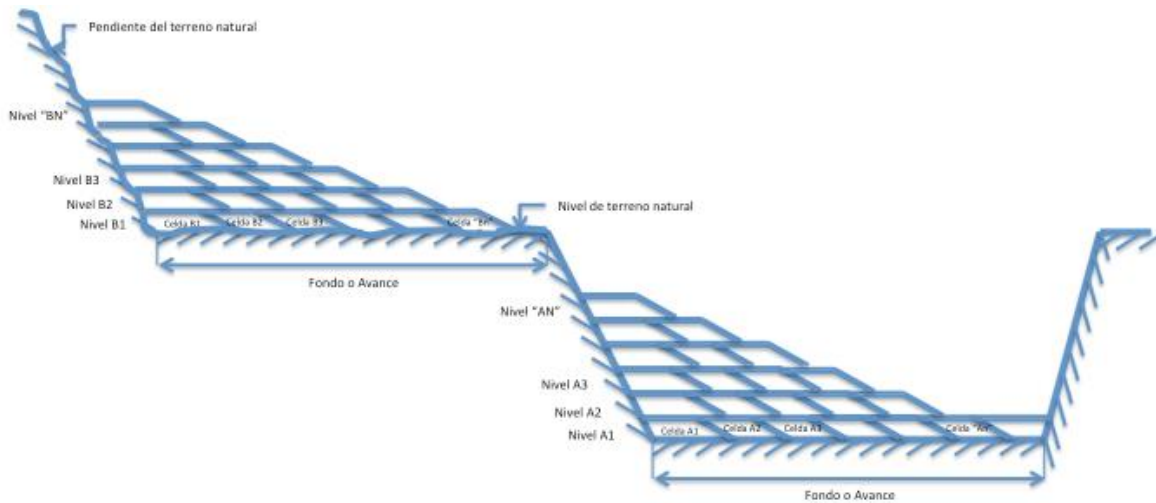


Figura 3.25 Método combinado.

En el sitio de disposición final llamado bordo de Xochiaca, por ubicarse sobre una superficie predominantemente plana, se empleó el método de confinamiento de área, utilizando material para cubierta del mismo terreno y empleando residuos de excavaciones de construcciones. Fue cerrado el 19 de diciembre de 2011 al alcanzar su capacidad límite de 72 millones de toneladas durante 26 años de operación. La superficie final es de 375 hectáreas y una altura de 17 metros.

### 3.11 Clausura del relleno sanitario

En este apartado se describen las actividades requeridas para llevar a buen término los sistemas que integran a un RS. Dichas acciones deberán quedar plasmadas en un proyecto de clausura, que se genera cuando está próximo el fin de la vida útil del RS. También se definen las características de la cubierta final, a fin de que ésta mitigue la posible liberación de contaminantes al medio, lo que conlleva un área controlable y susceptible de aprovechamiento para distintos usos, tal como áreas verdes o de recreación.

Cuando el volumen que representan los residuos dispuestos junto con el material de cobertura han alcanzado la altura y la extensión establecidas en el proyecto ejecutivo de un RS, es pertinente llevar a cabo, con cierto tiempo de anticipación, un plan de acción que considere las actividades previas, durante y posteriores al cierre del RS. Por otra parte, la NOM 083 establece que un RS deberá ser clausurado cuando alcance su altura final y tenga una extensión de al menos dos hectáreas.

Debido a que durante la elaboración del proyecto ejecutivo se dificulta predecir con certeza algunos aspectos que sucederán durante el periodo de operación del RS, es entonces necesario que cerca del término de la vida útil el RS se analice lo previsto en el proyecto ejecutivo y, en su caso, se actualice el contenido.

Según la NOM 083, posterior al cierre del sitio de disposición final, la cubierta generada debe de corresponder con el uso de suelo establecido por la autoridad competente. Los usos de suelo que existen en el país son el industrial, comercial, habitacional, agrícola y de recreación. Evidentemente,

debido a las características de la cubierta final y a la constante salida de gases, es poco conveniente optar por el uso habitacional o industrial en dicha superficie.

Las características de soporte que ofrece la cubierta de un RS no son las adecuadas para considerar una alta capacidad de carga. Además, los RSU mantienen (aún después de 8 años) reacciones físicas, químicas y bioquímicas, lo que afecta su composición y, por ende, su densidad. Dichos cambios provocan que el volumen que ocupan los residuos disminuya paulatinamente, lo que conlleva a que las capas más altas tengan asentamientos y, eventualmente, esto pueda afectar la integridad de la infraestructura que se supone fija. Por otra parte, las reacciones químicas y bioquímicas que se siguen llevando a cabo dentro de las celdas continúan produciendo lixiviados y biogás, los que tienden a migrar de la celda y a liberarse en el medio, razón por la cual es necesario se consideren los sistemas que mitiguen los posibles impactos. Solo se recomienda que la cubierta final sea utilizada como área verde o instalaciones deportivas (SEMARNAT, Manual de Especificaciones Técnicas para la Construcción de Rellenos Sanitarios para Resodios Sólidos Urbanos y de Residuos de Manejo Especial, 2009)

El RS clausurado debe incluir un sistema para prevenir la infiltración de agua, tanto pluvial como superficial, hacia el interior de las capas inferiores. Consiste en la colocación de drenes que mitigan la infiltración del agua de lluvia hacia el interior de las celdas. La última capa contiene una subcapa (capa de sello) de material que ofrece una permeabilidad muy baja pero que aun así conlleva un riesgo de infiltración.

Además, la última capa del relleno clausurado debe contener los elementos suficientes para evitar que las capas más expuestas de material de cobertura se erosionen por acción del viento y de la lluvia. El agua que escurre por la superficie de la cubierta puede promover que las partículas de suelo sean arrastradas. Esto conlleva el riesgo de que los residuos pierdan su cobertura y se generen serios problemas de contaminación.

Una forma sencilla y económica de evitar la erosión del suelo consiste en la colocación de vegetación sobre el suelo desnudo, generando en esta mayor estructura y, por ende, mayor resistencia a la erosión.

Así como se controla la entrada de agua y la erosión del suelo que integra la última capa, será necesario que el RS clausurado contenga los sistemas para el monitoreo y control de los productos de la degradación de la fracción orgánica, tal como el biogás y los lixiviados.

### **3.11.1 Consideraciones previas al proceso de clausura**

Los dos objetivos que persigue la clausura del RS son: a) reducir la necesidad de mantenimiento a largo plazo y b) disminuir los efectos adversos al ambiente por los subproductos generados (SEMARNAT, Manual de Especificaciones Técnicas para la Construcción de Rellenos Sanitarios para Resodios Sólidos Urbanos y de Residuos de Manejo Especial, 2009)

Debe de entenderse que cuando el RS ha alcanzado su vida útil y algunos segmentos del relleno o su totalidad han sido clausurados, por ninguna razón podrá considerarse una readaptación o incremento en el tamaño, es decir, no es posible disponer más residuos sobre la cubierta final. Llegada esa situación la autoridad competente, en este caso el municipio, tendrá la obligación de prever el término de la vida útil de los sitios de disposición final y contar con los programas de acción para la continuidad en el servicio de limpia y recolección.

La actualización del proyecto ejecutivo orientada a la clausura del RS debe considerar la posible evolución en la generación de los RSU, o bien, que por alguna razón se haya modificado la secuencia de llenado o la geometría general del RS. A este proceso se le suele llamar “**Planeación Preliminar**” que es independiente de la planeación que da lugar al RS. La planeación preliminar consiste en tres acciones llevadas a cabo por la autoridad ambiental estatal (AAE), la empresa contratada o por el municipio mismo (SEMARNAT, Manual de Especificaciones Técnicas para la Construcción de Rellenos Sanitarios para Resodios Sólidos Urbanos y de Residuos de Manejo Especial, 2009).

- La revisión de los planos relativos a la topografía final del sitio
- Elaboración o modificación del proyecto de clausura
- Especificación de fuentes y tipo de material de cobertura.

La tabla 3.22 muestra la distribución de competencias entre los actores involucrados con respecto a las acciones que integran a la planeación preliminar.

Tabla 3.22. Supervisión y control de la Planeación preliminar de la clausura en un RS.

Requisitos	Entidad responsable				Frecuencia	Forma de control
	AAE	Municipio	Empresa	Otros		
Revisión de los planos relativos a la topografía final del sitio			X		Cada vez que se realice una cobertura final de clausura	Levantamiento topográfico
Elaboración o modificación del proyecto de clausura (de áreas y final)		X	X		Cada vez que se realice una cobertura final de clausura	Supervisión de avance de proyecto
Especificar el tipo y las fuentes del material de cobertura		X	X		Cada vez que se realice una cobertura final de clausura	Visita a campo al banco de materiales

Tomada de (SEMARNAT, Manual de Especificaciones Técnicas para la Construcción de Rellenos Sanitarios para Resodios Sólidos Urbanos y de Residuos de Manejo Especial, 2009)

Las acciones establecidas son necesarias y pertinentes antes de iniciar la etapa final. Estas se especifican en el siguiente apartado.

### 3.11.2 Acciones durante la etapa final

La etapa final del RS consiste en un periodo en el cual los actores involucrados (municipio, empresa consultora, estado y población) se organizan para dar por concluido el servicio de un RS. Cada uno de los involucrados tendrá cierto campo de acción que le permitirá interactuar para finalizar el uso de un sitio de disposición final y, en su caso, dar pie a otros mecanismos de manejo de RSU.

Tres meses antes de la fecha de cierre es conveniente llevar a cabo acciones preventivas y de cierre, mismas que se detallan a continuación (SEMARNAT, Manual de Especificaciones Técnicas para la Construcción de Rellenos Sanitarios para Resodios Sólidos Urbanos y de Residuos de Manejo Especial, 2009)

**Revisar y aprobar el proyecto de clausura.** Las autoridades competentes, en este caso la autoridad ambiental estatal y el ayuntamiento, revisarán los documentos generados durante la planeación

preliminar, mismos que consisten en el proyecto de clausura, el cual es un documento en donde se especifica la secuencia de acciones para dar por concluida la vida útil del RSU. Una vez revisados deberán de aprobarse para su ejecución. La autoridad se basará en lineamientos estatales, federales y municipales para determinar la viabilidad de las acciones. La autoridad, en su caso, hará las recomendaciones pertinentes.

**Preparar y aprobar la calendarización de registro de cierre.** El equipo de trabajo especializado generará un cronograma de las acciones de cierre, es decir, un calendario de recepción de los últimos RSU y su posterior encapsulamiento. También se establecen las características finales a la cubierta.

**Notificación a la institución reguladora y a los usuarios del sitio.** Así como las autoridades estatales y municipales han sido involucradas, las instituciones reguladoras propias del sitio deben dar su visto bueno de las acciones que se llevarán a cabo. Asimismo, los usuarios deberán de estar notificados de las acciones de cierre, ya que como se detalló en apartados anteriores, no todos los generadores de RSU tienen acceso al servicio de recolección y estos se ven obligados a transportar y disponer por sí mismos sus residuos, razón por la cual es prudente avisar del cierre y de las acciones provisionales previas a la apertura de otro sitio de disposición final.

Terminado el periodo de tres meses no se recibirán más RSU y se da paso a otro tipo de acciones que se detallan a continuación.

**Cercado o estructura para fijar límites y delimitar acceso al sitio.** Dado que ya no es posible la recepción de más residuos y que el uso de maquinaria pesada conlleva riesgos, es necesario se restrinja el paso de terceros al interior del predio. Es por ello que se recomienda colocar una malla ciclónica en el exterior.

**Revisión de cobertura y conformación final del sitio según proyecto aprobado.** Las características de la última capa evitan infiltraciones, salida indiscriminada de gases y la pérdida de suelo, es por ello que deberá de supervisarse que la conformación de ésta corresponda con lo establecido en el proyecto de clausura.

**Avisos de clausura del sitio e información del nuevo sitio de disposición final.** Deberán colocarse sobre las estructuras periféricas avisos de clausura del sitio, a fin de que la población esté enterada. Además, se le debe de informar de la ubicación y características del nuevo sitio de disposición de RSU, que en ese momento ya debe de operar.

**Asegurar la limpieza del sitio y de zonas aledañas.** Es pertinente verificar que no existan residuos dispersos en el predio. Los residuos deberán de estar cubiertos con el material adecuado para mitigar la liberación de contaminantes. Se recomienda hacer una supervisión en todo el sitio para verificar que todos los residuos estén perfectamente cubiertos con la capa final.

Una vez que se han llevado a cabo las acciones anteriores, en los tres meses posteriores debe de verificarse que se haya conformado correctamente la cubierta final. Asimismo, que se hayan considerado los elementos y sistemas para el monitoreo y control postclausura y, finalmente, que se haya cumplido lo establecido en la NOM 083 en lo relativo a la clausura.

### 3.11.3 Monitoreo y mantenimiento postclausura

Distintas acciones son necesarias para garantizar la integridad del RS y su cubierta final. Estas consisten en monitoreo y mantenimiento postclausura. En el caso del monitoreo, las acciones están encaminadas a verificar los cambios que en la geometría del RS se puedan suscitar; verificar la cantidad y características del biogás generado; conocer la existencia de infiltración de lixiviados a las aguas subterráneas, entre otras. El monitoreo permitirá tomar medidas preventivas y, en su caso, correctivas.

En el caso del mantenimiento las acciones tienen el objetivo de conservar en los sistemas las condiciones adecuadas para su funcionamiento, por ejemplo, el lavado periódico del interior de la tubería, o bien, el engrasado de los elementos electromecánicos.

Además de monitorear cambios en la geometría, la postclausura involucra el manejo adecuado de los subproductos que aún se siguen generando en las celdas con el paso de tiempo, tal como el biogás, que se deberá de extraer de forma pasiva o activa, es decir, libre o mecánicamente.

### 3.11.4 Sistema de control de biogás

La necesidad de un sistema de control de biogás se fundamenta en lo establecido en la NOM 083, la cual establece que:

*“la conformación final que se debe dar al sitio de disposición final debe contemplar las restricciones relacionadas con el uso del sitio, estabilidad de taludes, límites del predio, características de la cobertura final de clausura, drenajes superficiales y la infraestructura para control del lixiviado y biogás”.*

*“Se debe elaborar y operar un programa de mantenimiento de postclausura para todas las instalaciones del sitio de disposición final, por un periodo de al menos 20 años. Este periodo puede ser reducido cuando se demuestre que ya no existe riesgo para la salud y el ambiente”.*

Así, debe entenderse que las labores que requiere un RS no son particulares del confinamiento de residuos, sino que éstas se extienden a futuro, inclusive más allá que la vida útil del RS.

Además de los malos olores, el biogás tiene concentraciones importantes de metano, razón por la cual es prudente desalojarlo y disponerlo correctamente. La figura 3.26 muestra dos ejemplos de pozos de venteo que permiten la salida del biogás hacia la atmósfera (SEDESOL, 2009)



Figura 3.26 Ejemplo de pozos de venteo. Fuente: (SEDESOL, 2009)

Inmersos en las celdas se encuentran canales de material pétreo que, dada su alta permeabilidad, permiten el flujo del biogás hacia los pozos y de ahí se eleva a la superficie, en donde se deberán colocar los elementos para su venteo o quema.

El tipo de control del biogás está en función de la capacidad económica del municipio; si existe capacidad financiera es posible considerar como parte del proyecto elementos activos, tal como extractores para la succión del biogás, lo que conlleva el uso de sistemas más complejos como redes de tuberías inmersas y perforadas, sopladores, bombas y quemadores. Por otra parte, si la capacidad económica es limitada, entonces al menos se deberán considerar sistemas pasivos, como los pozos de venteo con sus respectivos quemadores.

### **3.11.5 Sistema de drenaje de lixiviados**

Una vez clausurado el RS, éste requerirá que los sistemas que tienen el objetivo de drenar los lixiviados mantengan su funcionamiento correcto durante el periodo posterior al cierre establecido en la normatividad (20 años). Para ello es necesario que se sometan a un adecuado programa de mantenimiento, que queda establecido en el proyecto de clausura. Cada año deberá efectuarse una limpieza profunda de las tuberías de conducción de lixiviados y un lavado de los tanques de almacenamiento y de todos los elementos que en general integran al sistema de manejo de lixiviados.

De los elementos de una obra civil, uno de los más susceptibles de deterioro por acción del medio es el equipo electromecánico, es decir, las bombas y equipos dinámicos (poleas, flechas, engranes, etc.). Ello requiere tener especial cuidado en verificar que la eficacia de estas corresponda con lo establecido en el proyecto ejecutivo.

Es necesario que posterior al cierre se siga registrando la cantidad de lixiviado removido del RS, esto permitirá intuir la evolución en el proceso de degradación de la fracción orgánica, además de identificar posibles fugas de este que pudieran afectar al medio.

Una forma de identificar que el sistema es eficaz y que el mantenimiento ha sido el correcto es el monitoreo de la calidad del agua subterránea y de las fuentes superficiales cercanas, que al presentar concentraciones de contaminantes o alteraciones en su volumen pueden sugerir el ingreso de lixiviados y, por ende, contaminación.

### **3.11.6 Sistema de monitoreo de biogás y lixiviados**

El monitoreo de las concentraciones de biogás en la atmósfera exterior del RS permite identificar la eficacia del sistema de desalojo de biogás. Es importante verificar que el biogás sea expulsado exclusivamente por los pozos de venteo en donde se encuentran los quemadores o extractores. Conocer semanalmente las concentraciones de biogás en puntos fijos sobre la superficie de la cubierta final permitirá identificar posibles escapes no controlados (SEMARNAT, Manual de Especificaciones Técnicas para la Construcción de Rellenos Sanitarios para Resodios Sólidos Urbanos y de Residuos de Manejo Especial, 2009). Por otra parte, el monitoreo permite identificar cuándo el sistema no se está *desgasificando*, es decir, que existe acumulación de gases en el interior de las celdas. La falta de desgasificación conlleva un riesgo de explosión.



La elección de los puntos de monitoreo de biogás en la atmósfera exterior del RS obedece a la disponibilidad de personal del RS, el paso habitual de pobladores, la ubicación de centros urbanos, entre otras. Con base en el análisis de las mediciones, la ubicación de los puntos podría modificarse.

Dado que se encuentran inmersos en las celdas, es imposible observar el funcionamiento e integridad de los elementos para el control de lixiviados. La efectividad en el sistema de manejo de lixiviados solo puede ser evaluada mediante el monitoreo del agua subterránea. En caso de identificar la alteración en algún parámetro del agua subterránea, tal como concentraciones de metales pesados, pH, demanda bioquímica de oxígeno, entre otros, será necesario un análisis más detallado del funcionamiento, ya que existe una alta probabilidad de que exista infiltración de lixiviados.

La forma de identificar la posible contaminación de aguas subterráneas por infiltración de lixiviados es mediante la perforación de pozos de monitoreo, uno a la entrada y al menos dos a la salida. Para tal efecto, es necesario contar con información obtenida de estudios hidrogeológicos, que permitirán conocer el sentido del flujo de las aguas subterráneas y espesores. Si se identifican las características de calidad de agua subterránea antes de su paso por debajo del RS y posterior al mismo, es posible inferir la posible contaminación subterránea.

La frecuencia en la toma de muestras debe de ser semestral, tanto para identificar alteraciones en el nivel estático como en la calidad del agua subterránea. Los parámetros por medir en las muestras de agua subterránea se indica en la tabla 3.23. Un análisis similar deberá realizarse para identificar alteraciones en los cuerpos de agua superficial.

Tabla 3.23. Características de calidad a identificar en el agua subterránea debajo del RS.

Parámetros	Sustancias
Físico-químicos	pH, conductividad, DQO, DBO <sub>5</sub> , COT
Elementos mayoritarios	Cloruros, sulfatos, Nitratos, Nitritos, Fluoruros, Amonio, Boro y Fósforo.
Metales pesados y otros	Plomo, Cadmio, Cromo, Níquel, Mercurio, Zinc, Cobre, Plata, Selenio, Arsénico, Vanadio, Bario, Berilio, Estaño.
Compuestos orgánicos	Hidrocarburos, Grasas, Fenoles, Cianuros, Organohalogenados, Disolventes, pesticidas, organofosforados, PCB's.
Otros parámetros	Compuestos orgánicos

Tomada de (SEMARNAT, Manual de Especificaciones Técnicas para la Construcción de Rellenos Sanitarios para Resodios Sólidos Urbanos y de Residuos de Manejo Especial, 2009)

### 3.11.7 Monitoreo de asentamientos

Un asentamiento sucede cuando con el paso del tiempo la masa de los residuos dispuestos modifica su composición, lo que ocasiona un cambio en la geometría de la superficie. Es necesario que, con una frecuencia anual, se efectúe un estudio topográfico en la superficie del RS, que permita conocer la evolución de la geometría superficial y con ello inferir posibles afectaciones a los sistemas, tal como el de drenaje de aguas superficiales o de lixiviados.

Parte de los sistemas para el desalojo de lixiviados está soportada por la superficie del RS, razón por la cual es necesario que se identifiquen los asentamientos presentados para corroborar la inclinación de



los tubos y verificar que mantengan el flujo de diseño. Si los lixiviados no se evacúan adecuadamente se pueden generar problemas serios de contaminación del suelo y el agua subterránea.

### 3.11.8 Cubierta final del relleno sanitario

Debido a la heterogeneidad de los residuos y los productos nocivos que durante el proceso de degradación se pueden generar, es necesario su encapsulamiento. La última celda, además del material de cobertura normal que conlleva, requerirá un recubrimiento con capas adicionales.

La cubierta final persigue el objetivo de impedir la infiltración del agua de lluvia hacia el interior de las celdas y la liberación incontrolada de los productos de reacciones (SEMARNAT, Manual de Especificaciones Técnicas para la Construcción de Rellenos Sanitarios para Residuos Sólidos Urbanos y de Residuos de Manejo Especial, 2009). Para ello es necesario que las capas ofrezcan resistencia a los agentes erosivos, tal como la lluvia y el viento, así como resistir el peso propio y los posibles movimientos naturales, como los sismos. Además, al menos uno de los materiales que la componen deberá impedir la infiltración.

La figura 3.27 muestra las capas que deberán integrar a la cubierta final y que en conjunto cumplan con el objetivo establecido.

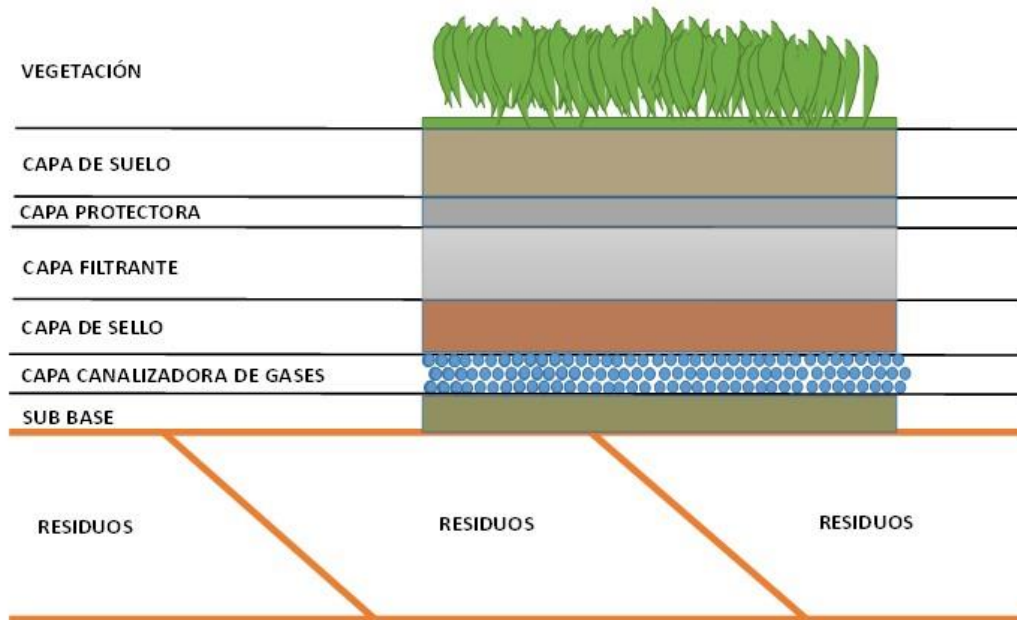


Figura 3.27 Capas que conforman a la cubierta final de un RS. Adaptado de (SEMARNAT, Manual de Especificaciones Técnicas para la Construcción de Rellenos Sanitarios para Residuos Sólidos Urbanos y de Residuos de Manejo Especial, 2009)

Los objetivos de cada capa que integra a la cubierta final son diversos. A continuación, se describe brevemente cada una.

**Sub base.** Tiene la función de incrementar la firmeza de la que carecen los residuos compactados, lo que permitirá que las capas superiores puedan tener el soporte necesario para poderse compactar. El material que compone la subbase puede ser el mismo material de cobertura de la celda diaria. Se recomienda que el espesor que tenga esta capa sea de entre 0.30 m a 0.45 m.

**Capa canalizadora de gases.** Su objetivo es permitir el flujo del biogás y su canalización hacia los elementos de venteo. Esta capa se integra por material granulado grueso, tal como grava con arena, o simplemente material residual de la construcción (escombros). Debe de compactarse para ofrecer una superficie firme, como la que necesitan las capas superiores. Esta capa se recomienda para zonas del RS que han alcanzado una altura mínima de 6m. Debe de tener un espesor mínimo de 30 cm.

**Capa de sello.** Es la capa más importante de toda la cubierta final. Su presencia evita el paso de sustancias en los dos sentidos: el ingreso del agua infiltrada en las capas superiores y la salida de gases de forma incontrolada. Puede componerse de arcillas montmorilloníticas compactadas, o bien, de algún material geosintético, como una lona de polietileno unida por termofusión. La permeabilidad que debe de ofrecer debe de ser no mayor a  $1 \times 10^{-7}$  cm/s.

**Capa filtrante.** Sobre la capa de sello se coloca una capa llamada filtrante, que permite que todo el líquido no infiltrado escurra a través de ella. Esta capa se compone de material pétreo relativamente grueso, como las arenas. Esta capa protege a la capa de sello del posible ingreso de raíces de la capa de suelo y de la acción de algunas especies animales, que suelen penetrar hasta capas muy profundas de suelo. Se recomienda que su espesor sea mínimo de 30 cm. Dentro de esta capa, si las condiciones del sitio así lo determinan, será necesaria la colocación del sistema de tuberías para el desalajo de agua de lluvia.

**Capa protectora.** Su función es evitar que la composición de las capas superior e inferior varíe con el paso del tiempo. Consiste en una capa de geotextil que promueve el paso de fluidos (aire y agua) y evita el paso de sólidos (arenas y limos), lo que genera que la capa filtrante no se sature de los finos de la capa superior, permitiendo que el agua escurra hasta la capa filtrante para ser desalajada.

**Capa de suelo.** El suelo es una mezcla de material mineral, materia orgánica, aire y agua. Esta composición lo hace ideal para soportar a la vegetación. Si se planea que la cubierta final permita el uso de suelo recreativo, es deseable que la capa de suelo presente las características para ofrecer a la vegetación la humedad, nutrientes y el soporte mecánico adecuado.

El espesor de la capa de suelo depende del tipo de vegetación. Si se considera la plantación de arbustos, se requiere un espesor mínimo de 0.8 m; en el caso de raíces más profundas se requiere como mínimo 1 m de espesor. En caso de que se consideren árboles, el espesor mínimo será de 3m. En todo caso esta capa no deberá de compactarse, ya que esto promueve un bajo desarrollo radicular.

**Vegetación.** Esta capa ofrece al suelo la estructura necesaria para asirse a sí mismo. Las raíces que penetran la capa de suelo incrementan la resistencia al movimiento de la matriz de suelo. Esto reduce el riesgo de arrastre de partículas y se genere el fenómeno de erosión. Además, la capa de vegetación incrementa la estética del sitio y brinda un medio adecuado para considerar a la superficie para un uso de suelo recreativo. No existe un solo tipo de planta conveniente para la cubierta final, su conveniencia está en función de las condiciones particulares del sitio, tal como el clima, altitud, tipo de suelo elegido, etc. La figura 3.28 muestra la colocación de vegetación como última capa de la cubierta en un RS.

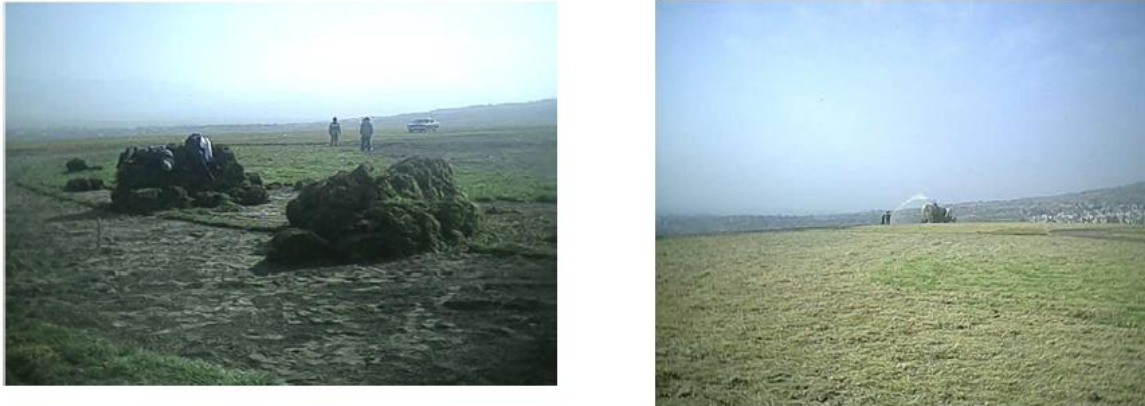


Figura 3.28. Trabajos de colocación y riego de la cubierta vegetal  
Tomada de (SEDESOL, 2009)

### 3.11.9 Uso final del suelo

Una forma de obtener los recursos económicos para el llevar a cabo el proceso de clausura de un RS es mediante la negociación con el ayuntamiento para destinar a la cubierta final a cierto uso de suelo.

Al elegir el uso final del suelo es recomendable que se consideren algunas características que condicionan el uso, tal como la baja capacidad de carga del terreno, la inminente presencia de asentamientos diferenciales, la producción de metano liberado de forma continua y gradual hacia la atmósfera, la posibilidad de una falta de desgasificación que involucre un riesgo de explosión, la presencia de elementos ácidos y sulfatos que son relacionados con corrosividad.

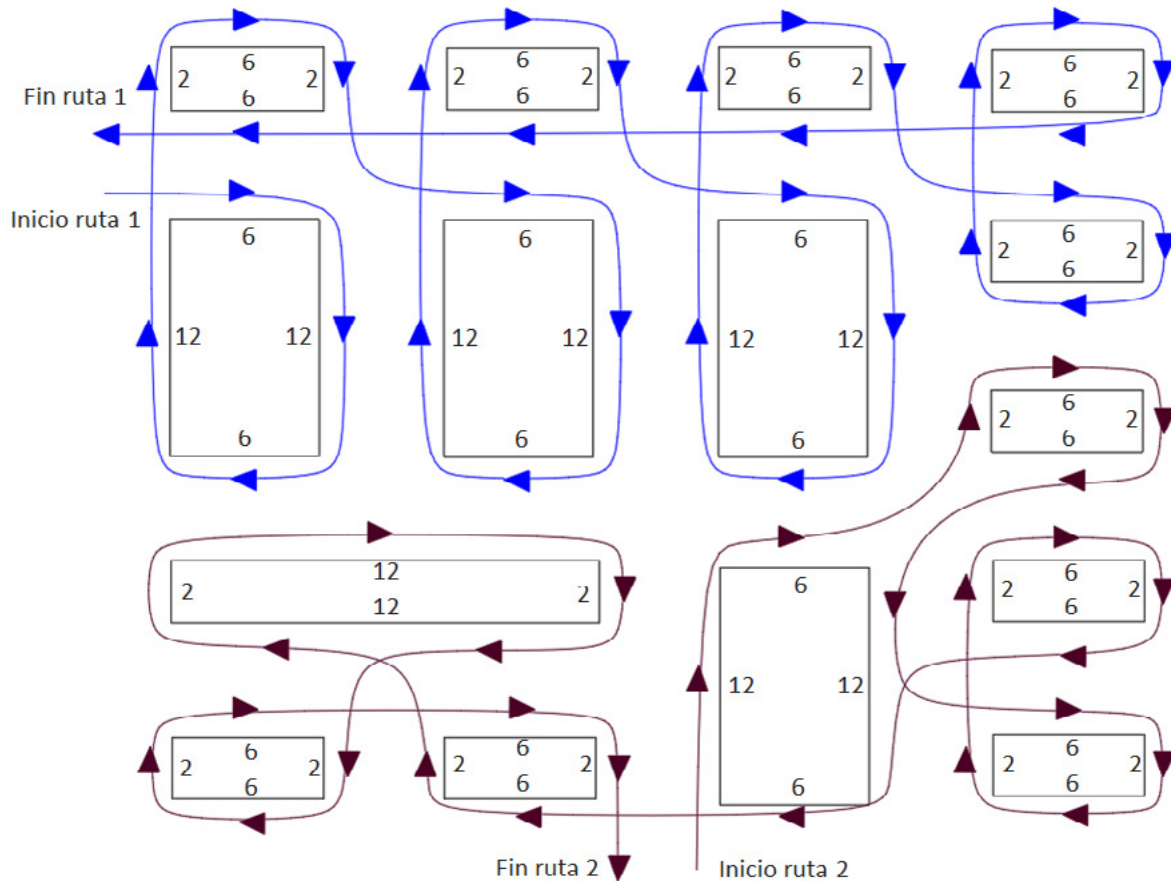
Otro aspecto importante es considerar que durante varios años se tendrá la generación de olores ofensivos en la periferia del RS, hecho que puede alterar de forma significativa la calidad de vida los habitantes.

Por otra parte, aun cuando la generación de olores haya disminuido y el riesgo sanitario se haya eliminado, la población suele presentar rechazo al uso del suelo.

Si el uso de suelo elegido es agrícola deben de considerarse las limitaciones que representa la capa de suelo, ya que las raíces no deben penetrar a las capas inferiores y mucho menos entrar en contacto con los residuos. Los usos de la cubierta recomendados son los de recreación al aire libre, tal como deportivos, canchas de fútbol, parques, campos de golf y áreas verdes. Algo que debe observarse es la cantidad de agua requerida para el riego, ya que siempre existirá el riesgo de incrementar la generación de lixiviados. Una alternativa es el riego por goteo.

### 3.12 Preguntas y actividades propuestas

1. En una vivienda en la que habitan 10 personas se requiere conocer el volumen necesario para almacenar los residuos sólidos generados. La generación per cápita o de cada habitante es de 1.205 kg/hab/día, y la densidad o peso volumétrico de los residuos es de 185 kg/m<sup>3</sup>. Además, la frecuencia de recolección en el lugar es de cuatro veces a la semana sin ninguna desviación.
2. Una unidad habitacional tiene seis edificios de diez niveles cada uno, por cada nivel existen cuatro departamentos, en promedio viven 3.5 personas por departamento. En la unidad habitacional se quiere implementar un sistema de recolección separada de residuos. La generación por persona es de 1.3 kg/hab/día y la composición de los residuos es: 35% orgánica (200 kg/m<sup>3</sup>), 10% PET (65 kg/m<sup>3</sup>), 8% aluminio (160 kg/m<sup>3</sup>), 15% cartón y papel (80 kg/m<sup>3</sup>), 15% sanitarios (90 kg/m<sup>3</sup>) y 17% otros inorgánicos (110 kg/m<sup>3</sup>). La recolección de orgánicos es tres veces a la semana, la de otros inorgánicos y sanitarios es dos veces a la semana y el resto de los residuos una vez por semana. Se ha confirmado que la regularidad del servicio de recolección falla al menos 10 días por mes.
3. Calcular el TTR de las 2 microrutas de la figura por los métodos de parada fija, acera y de contenedores.



<b>Actividad 3.1</b> <b>Sistema intermunicipal de residuos sólidos urbanos</b>
<p>Ve con atención el video “Sistema intermunicipal de manejo de residuos”, busca información actualizada del SIMAR Sureste de Jalisco y Michoacán en internet, te recomiendo consultar la página oficial, y realiza las siguientes dos actividades.</p> <p>Actividad 1, responde las siguientes preguntas.</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. ¿Qué es el SIMAR Sureste y qué significa la sustentabilidad para ellos?</li> <li>2. ¿Cuáles son los principios rectores del SIMAR Sureste?</li> <li>3. ¿Cuál es la Misión y Valores del SIMAR Sureste?</li> <li>4. ¿Cuál es el área de influencia, los municipios que integran el SIMAR Sureste y cuál su relevancia ambiental?</li> <li>5. ¿Cuáles son los servicios que brinda el SIMAR Sureste y cuántos tiraderos a cielo abierto han sido cerrados por su operación?</li> </ol> <p>Actividad 2, realiza un balance de materia de los residuos que maneja el SIMAR Sureste, puedes utilizar un diagrama de flujo para representar la información que analices.</p> <p>Enlace del video: <a href="https://youtu.be/rjD8qj6vKic">https://youtu.be/rjD8qj6vKic</a>                      Enlace de la página SIMAR SURESTE: <a href="http://simarsureste.org">http://simarsureste.org</a></p>

<b>Actividad 3.2</b> <b>Análisis comparativo del manejo de residuos</b>
<p>Utilizando la metodología de análisis comparativo, muestra los resultados totales del manejo de residuos (sólidos urbanos, de manejo especial y peligrosos) de cinco países del mundo y escribe un documento analítico a partir de los resultados consultados. La selección de los países queda abierta a tu elección, pero deben estar distribuidos en tres continentes, considera uno de los cinco países a México. Una sugerencia de países es: México, Estados Unidos en el continente Americano; Alemania y Bélgica del continente Europeo y Japón de Asia. Para cada uno de estos deberás:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Buscar en internet documentos que contengan información del manejo de residuos en los países seleccionados. Considera que debes tener información de los tres tipos de residuos: sólidos urbanos, de manejo especial y peligrosos. Para el caso de México te recomiendo el documento “Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos” que puedes encontrar en el enlace: <a href="http://bit.ly/3b6sQbK">http://bit.ly/3b6sQbK</a>. También la información relacionada con el tema de residuos que tiene SEMARNAT te puede ser de utilidad.</li> <li>2. Revisa la información obtenida, identificando los datos relevantes para hacer el análisis comparativo, es decir, información que sea equivalente en los cinco países que estás comparando. Si los datos no son totalmente equivalentes, propón una manera en la que pudieran ser comparables.</li> <li>3. Estructura una tabla o matriz que muestre los principales resultados del análisis que estas realizando. Considera que debes referirte a cada uno de los procesos de manejo en cada país, para los tres tipos de residuos.</li> <li>4. Revisa y analiza la información de la matriz que has realizado y de los documentos de consulta.</li> <li>5. Elabora un documento escrito de no más de cinco cuartillas (incluyendo la matriz del análisis comparativo y las referencias consultadas) en el que desarrolles un reporte del análisis comparativo que hiciste. Deberás incluir en tu análisis tres aspectos: eficiencia económica del manejo de residuos, impactos positivos al ambiente y beneficios hacia la sociedad.</li> </ol>

### Actividad 3.3 Tratamiento de residuos orgánicos

#### Introducción

Una de las fracciones de los RSU más fáciles de identificar por parte de la población es la orgánica. En México cerca del 50% de los residuos generados corresponden con esta clasificación. Su segregación, desde la generación, permite que estos residuos se destinen a procesos que permitan, en primer lugar, disminuir el impacto ambiental por su manejo y disposición y, como fin último, la valorización de estos.

Para el tratamiento de la fracción orgánica existen alternativas que se fundamentan en el tratamiento anaerobio, que permite la generación de biogás y su posterior aprovechamiento con fines de producción de energía eléctrica, o bien el tratamiento aerobio, que tiene como producto final la composta, la cual puede utilizarse como mejorador de suelo con fines agrícolas.

La presente actividad tiene como objetivo mostrar al alumno un ejemplo de sistema de manejo de residuos orgánicos en Europa. El video es público, lo podrá consultar accediendo a la siguiente liga:

#### Video: “In Vessel Composting- What happens to my food and garden recycling?”

Autor: Recycle for Greater Manchester.

Publicado el 01/04/2011

<https://youtu.be/kogP7TcDroU>

#### Instrucciones

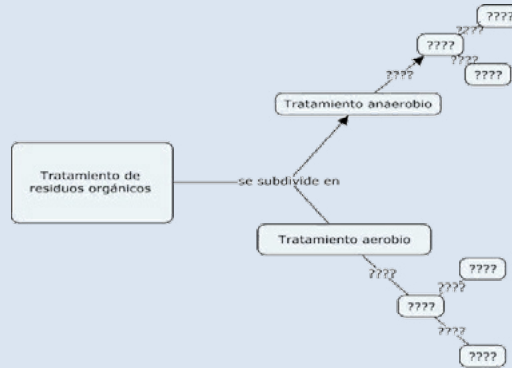
Con base en el análisis de los videos sugeridos y en la búsqueda de información complementaria, elabore un mapa conceptual que permita explicar el proceso de tratamiento de los residuos orgánicos. Éste debe de incluir las tecnologías para el tratamiento anaerobio y aerobio; los procedimientos y sus características; los insumos y productos finales.

Para elaborar el mapa conceptual se sugiere seguir la siguiente guía:

- Paso 1. Analizar los videos sugeridos, hasta que el nivel de comprensión permita explicar su contenido.
- Paso 2. Sintetizar la información de los videos mediante conceptos. Estos deberán de ser representativos de la información de los videos. Por ejemplo: “materia orgánica”, “triturado”, “temperatura óptima”
- Paso 3. Ordenar de forma categórica los conceptos, de los más generales o incluyentes a los más específicos o particulares. Generar una lista.
- Paso 4. Iniciar el mapa conceptual colocando en el centro el concepto más incluyente o general. Por ejemplo: “Tratamiento de residuos orgánicos”.

**Actividad 3.3**  
**Tratamiento de residuos orgánicos**

- Paso 5. Unir, mediante un conector, el concepto más general con el o los conceptos que se encuentren en el siguiente nivel. El conector es una flecha que tiene una dirección lógica que permite relacionar, con ayuda de una frase muy sintética, los conceptos involucrados, por ejemplo:



- Paso 6. Continuar la unión de conceptos mediante conectores hasta llegar a los conceptos más particulares.
- Paso 7. En su caso, identificar y expresar la conexión de conceptos de órdenes no consecutivos, inclusive desde niveles particulares hacia generales.
- Paso 8. Una vez concluido el mapa conceptual revisar la lógica y asertividad de las frases que se generan e identificar posibilidades de mejora. Elaborar una segunda versión del mapa conceptual considerando las correcciones sugeridas.

Nota: Se sugiere el uso de software libre especializado en la generación de mapas conceptuales, por ejemplo: Cmap Tools, el cual podrás descargar en la siguiente liga: <https://cmaptools.softonic.com/>



**Capítulo****4**

## **Objetivos de aprendizaje**

---

Objetivo general: El alumno aprenderá acerca de los principales contaminantes del aire, sus fuentes de emisión, los aspectos meteorológicos que determinan el transporte y dispersión de contaminantes en el aire, los métodos de simulación exploratorios que se utilizan para predecir su comportamiento y las técnicas que se emplean para controlar la contaminación atmosférica.

En este capítulo aprenderás acerca de:

1. Los principales contaminantes del aire y sus fuentes de emisión.
2. Los conceptos de meteorología necesarios para predecir el transporte y dispersión de los contaminantes en la atmósfera.
3. Los métodos y dispositivos que se emplean para controlar la contaminación del aire.

## Capítulo

## 4

## 4. Contaminación del aire y control

El aire contiguo a la superficie terrestre es una mezcla de gases con abundancia de oxígeno y nitrógeno. Estos dos gases forman casi la totalidad de la atmósfera como se aprecia en la tabla 4.1.

Tabla 4.1 Composición de la atmósfera terrestre a nivel del mar

Gases	% en volumen de aire seco
Nitrógeno (N <sub>2</sub> )	78.08
Oxígeno (O <sub>2</sub> )	20.95
Argón (Ar)	0.93
Neón (Ne), Helio (He) y Criptón (Kr)	0.0001
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	0.03

Es interesante notar en esta tabla la fracción tan pequeña que ocupa el dióxido de carbono, principal gas causante del efecto de invernadero y del cambio climático global que sufre nuestro planeta<sup>7</sup>. También obsérvese que no se incluye en la tabla aludida el vapor de agua. Este es un gas con una concentración en la atmósfera sumamente variable, tanto espacialmente como temporalmente, que fluctúa entre 1 - 4 % en volumen; sin embargo, desde el punto de vista meteorológico, el vapor de agua juega un papel central en la baja atmósfera, debido a que participa en todos los procesos termodinámicos que causan su gran dinamismo como consecuencia de la energía que se transfiere al presentarse los cambios de fase del agua. Es conveniente recordar que el agua líquida al evaporarse absorbe energía y la cede al condensarse. Lo mismo sucede entre el

---

<sup>7</sup> El efecto de invernadero consiste en el calentamiento de la atmósfera terrestre debido al incremento del CO<sub>2</sub> atmosférico. El CO<sub>2</sub> permite el paso de la radiación solar, como lo hacen los cristales del invernadero, pero absorbe la radiación infrarroja que emite la Tierra impidiendo que escape hacia el espacio. Esto provoca el incremento de la temperatura de la atmósfera. Todos los procesos que queman combustibles fósiles, es decir, el carbón, gas y los derivados del petróleo, generan inevitablemente grandes cantidades de CO<sub>2</sub> porque los átomos de carbono que contienen estos combustibles son oxidados durante el proceso de la combustión. Desde hace varios siglos, pero particularmente de manera creciente en los últimos 100 años, casi toda la energía que utiliza el hombre se obtiene quemando grandes cantidades de estos combustibles.

agua líquida y el hielo y la nieve: absorbe energía al licuarse y la cede al solidificarse. Este intercambio de energía, aunado a la energía proveniente del sol y a la interacción que tiene la atmósfera con el océano, constituyen los motores fundamentales responsables de movilizar tanto a la atmósfera como al océano. Adicionalmente, y como se verá más adelante, el vapor de agua participa en reacciones químicas que involucran a varios contaminantes atmosféricos.

La atmósfera puede dividirse en estratos o capas de altura variable. La capa más próxima a la superficie de la Tierra y que asciende hasta alturas de entre 10 y 15 km, se denomina la *troposfera*. La tendencia general que sigue la temperatura en esta capa de la atmósfera es a disminuir con la altura, como se ilustra a en la figura 4.1.

En la troposfera se vierten la mayor parte de los contaminantes, tanto naturales como de origen antropogénico, y es por tanto la capa de aire que más interesa estudiar desde el punto de vista del fenómeno de la contaminación atmosférica.

A medida que se asciende desde aproximadamente los 15 km de la superficie terrestre, inicia la *estratosfera*. Esta capa de la atmósfera se extiende hasta cerca de 50 kilómetros de altitud y tiene una gran importancia para la preservación de la vida del planeta, tanto desde el punto de vista de la historia de su evolución, como de su desarrollo actual. La formación de la capa de ozono en la estratosfera hace varios miles de millones de años favoreció el viaje evolutivo que dio lugar a las formas de vida que actualmente conocemos, debido a su efecto protector de la radiación ultravioleta proveniente del sol, como se explica brevemente a continuación.

En contraste con el perfil de temperatura que caracteriza a la troposfera, en la estratosfera la temperatura se incrementa con la altura (véase la figura 4.1). Es importante aclarar que dicho incremento de temperatura se debe fundamentalmente a que en esta capa de la atmósfera existen cantidades importantes de ozono ( $O_3$ ) que participan en reacciones fotoquímicas absorbiendo radiación ultravioleta y liberando energía en forma de calor. Como ya se mencionó, la existencia de este compuesto en la estratosfera resulta fundamental para proteger la vida al absorber radiación ultravioleta que proviene del sol. La incidencia excesiva de radiación ultravioleta en la superficie terrestre podría tener efectos desastrosos, como perturbar el proceso fotosintético, que opera con luz visible, y alterar los ciclos que caracterizan a las cosechas, así como producir mutaciones y cáncer de piel; sin embargo, paradójicamente la presencia de ozono en la troposfera, particularmente dentro de las zonas urbanas, se considera un contaminante, ya que la exposición al ozono de origen urbano es dañina para la salud de la población que vive dentro de ellas, pudiendo causar, en el corto plazo, irritación de las mucosas de los ojos y fosas nasales y disminución de la función pulmonar en el largo plazo.

Es importante mencionar que una serie de compuestos denominados *clorofluorocarbonos* (CFC), que fueron liberados a la atmósfera por muchos años, principalmente al usarlos como expulsores de aerosoles y en sistemas de refrigeración, lograron alcanzar la estratosfera al ser poco reactivos dentro de la troposfera. Paradójicamente, es precisamente debido a esta característica, es decir, su estabilidad desde el punto de vista químico, que fueron incorporados a los mecanismos y sistemas arriba mencionados. Una vez en la estratosfera se descomponen por la luz ultravioleta, proporcionando radicales de cloro muy reactivos que tienden a eliminar el ozono y provocar lo que suele denominarse el *agujero de ozono*, que se aprecia principalmente en la región polar de la antártica.

En la actualidad y en virtud del carácter catastrófico que tendría sobre la vida en la tierra la disminución de la capa de ozono, el agujero de ozono tiende a disminuir como consecuencia del establecimiento de políticas tendientes a controlar las emisiones de dichos compuestos.

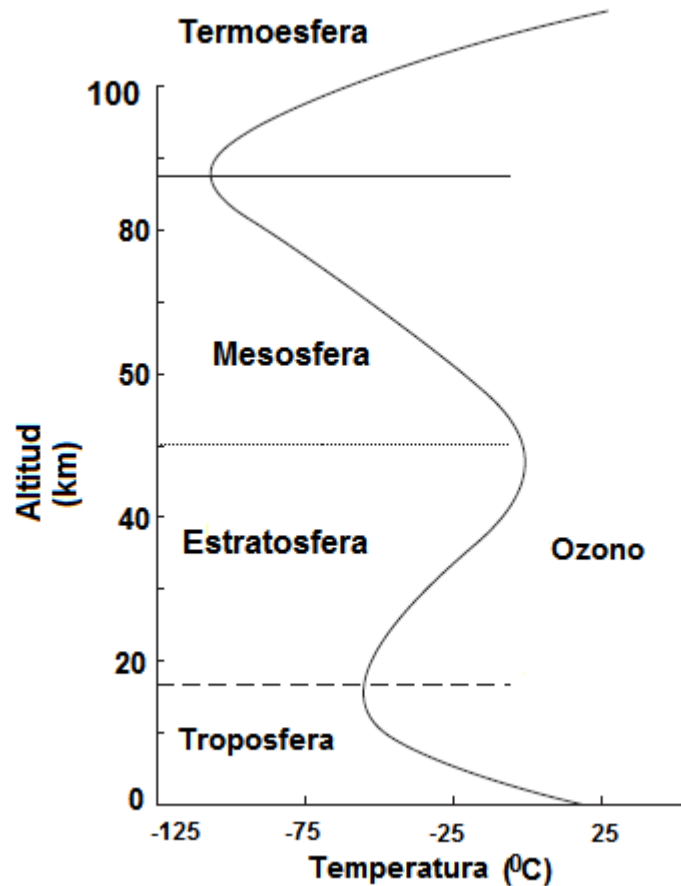


Figura 4.1 Perfil térmico vertical de la atmósfera

## 4.1 Principales contaminantes y sus fuentes

Los contaminantes del aire suelen clasificarse empleando diferentes criterios. Los criterios más usados son por su estado físico, su composición química y su origen. Si se toma como criterio el estado físico de los contaminantes, éstos se clasifican en *gases* y *partículas*. En contraste con los gases, las partículas constituyen sólidos o líquidos dispersos en el aire cuyos diámetros son mayores a las dimensiones de conglomerados de moléculas, es decir, cerca de 0.005 micrómetros (1 micrómetro, abreviado  $\mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$ ) y menores de aproximadamente 100  $\mu\text{m}$  (0.1 milímetros). Conviene señalar que la concentración de partículas se expresa en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y nunca en ppm, porque como se explica más adelante, una concentración expresada en ppm se refiere a una fracción volumétrica que solo tiene sentido para mezclas de gases. Por consiguiente, siempre deberán especificarse las condiciones de presión y temperatura a las que se reporta la concentración de partículas.

Los gases que contaminan el aire se clasifican por su composición química. No obstante que este criterio también se aplica a las partículas, es más común clasificarlas por su tamaño, ya que el tamaño de las mismas determina en gran medida sus efectos adversos. Tómese en cuenta que solamente las partículas pequeñas, de menos de 10 micras, alcanzan a penetrar el aparato respiratorio superior. Estas partículas reciben el nombre de *partículas respirables* y son tan importantes que en la actualidad se utilizan para establecer normas de calidad del aire, como se explica más adelante. La clasificación de los contaminantes gaseosos por su composición química se muestra en la tabla 4.2 y la clasificación de las partículas por su tamaño se presenta en la tabla 4.3.

Tabla 4.2 Principales contaminantes gaseosos de acuerdo con su composición química

Tipo de contaminantes	Compuestos
Compuestos conteniendo nitrógeno	NO, NO <sub>2</sub> , NH <sub>3</sub>
Compuestos conteniendo azufre	SO <sub>2</sub> , SO <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> S, H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , mercaptanos
Compuestos conteniendo carbono	CO, CO <sub>2</sub> , HC*
Oxidantes fotoquímicos	O <sub>3</sub> , PAN
Compuestos halogenados	HF, HCl

\* La expresión HC se refiere al grupo de compuestos conocidos como hidrocarburos, tanto reactivos como no reactivos

Tabla 4.3 Clasificación de las partículas de acuerdo con su tamaño

Categoría	Tamaño (µm)
Partículas suspendidas totales (PST)	< 100
Partículas respirables (PM <sub>10</sub> )	< 10
Partículas respirables gruesas	10 - 2.5
Partículas respirables finas (PM <sub>2.5</sub> )	< 2.5
Partículas ultra finas (PUF)	< 0.1

Otra forma de clasificar los contaminantes es por su origen. Si los contaminantes son emitidos directamente por fuentes específicas se dice que estos son *contaminantes primarios*. En cambio, si son producto de reacciones químicas o fotoquímicas involucrando a los contaminantes primarios, se denominan *contaminantes secundarios*. Como ejemplos de los primeros destacan el monóxido de carbono, el bióxido de azufre y los polvos originados por arrastre eólico. En el caso de los contaminantes secundarios, el ozono y los oxidantes fotoquímicos constituyen ejemplos bien conocidos.

Las unidades típicas para expresar concentraciones de compuestos en el aire son el *microgramo por metro cúbico* (c<sub>µg/m<sup>3</sup></sub>) y la *parte por millón* (c<sub>ppm</sub>). La primera se define como sigue:

$$c_{\mu\text{g}/\text{m}^3} = m_s 10^6 / V \tag{4.1}$$

En donde  $m_s$  es la masa de la sustancia expresada en gramos ( $1 \text{ g} = 10^6 \mu\text{g}$ ) y  $V$  el volumen de aire en  $\text{m}^3$ . La segunda es una concentración volumétrica y, por consiguiente, no debe confundirse con la unidad de concentración en ppm que se utiliza para expresar cantidades de compuestos presentes en el agua que, como se explicó en el capítulo 3 del libro Ingeniería Ambiental - Fundamentos, constituye una concentración másica. La definición de parte por millón (ppm) para compuestos gaseosos es la siguiente:

$$C_{\text{ppm}} = V_s 10^6 / V \quad (4.2)$$

En donde  $V_s$ <sup>8</sup> es el volumen parcial del compuesto gaseoso. Como los volúmenes parciales de los gases presentes en el aire son sumamente pequeños comparados con el volumen de aire  $V$ , el factor de  $10^6$  que aparece en la ecuación 4.2 tiene la finalidad de simplificar el manejo de cantidades pequeñas.

Además de la unidad de concentración mencionada, cuando las concentraciones son sumamente pequeñas, es común el empleo del término *parte por billón (ppb)*. El problema que presenta esta forma de expresar la concentración es que, en muchos países, particularmente en países de habla inglesa, billón no quiere decir un millón de millones ( $10^{12}$ ), sino mil millones ( $10^9$ ), lo cual significa que en esos países la concentración en ppb está definida como sigue:

$$C_{\text{ppb}} = V_s 10^9 / V$$

A diferencia de las concentraciones expresadas en ppm, las que se expresan en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  se ven influenciadas por variaciones de la temperatura y la presión del aire. Por ejemplo, si un globo de  $1 \text{ m}^3$  de volumen se sitúa al nivel del mar y se le introduce  $1 \mu\text{g}$  de monóxido de carbono (CO), obviamente la concentración de CO dentro del globo será de  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Si ahora se lleva el globo a una altura considerable sobre el nivel del mar, como el volumen del globo se incrementa al reducirse la presión atmosférica, la concentración de CO disminuye proporcionalmente. Es obvio que el mismo efecto puede lograrse incrementando la temperatura del globo; al hacerlo, se incrementa su volumen y por consiguiente disminuye la concentración del CO dentro de él.

En otras palabras, se requiere especificar tanto la presión como la temperatura del aire cuando las concentraciones se expresan en términos de  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para impedir ambigüedades. Este problema se elimina expresando las concentraciones en ppm, ya que tanto el volumen del contaminante como el del aire se ven influenciados de la misma manera por la temperatura y la presión. Lamentablemente esta unidad de concentración, que casi siempre se emplea para expresar concentraciones de contaminantes gaseosos, no puede usarse en el caso de la concentración de

---

<sup>8</sup> El volumen parcial de un componente de una mezcla de gases es el que permanecería si se extraen los demás gases que constituyen la mezcla manteniendo la presión constante.

partículas, que es otro contaminante común del aire, por lo que en este caso debe recurrirse al empleo de  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

En lo que respecta a los compuestos gaseosos, la relación entre la concentración expresada en ppm,  $C_{\text{ppm}}$ , y en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $C_{\mu\text{g}/\text{m}^3}$ , se puede obtener empleando las ecuaciones 4.1, 4.2 y la ecuación de los gases ideales. En el caso de una mezcla de gases, la ecuación de los gases ideales para un compuesto gaseoso de volumen parcial  $V_s$ , es:

$$PV_s = m_sRT / M_s \quad (4.3)$$

En donde  $M_s$  es la masa molecular del compuesto gaseoso,  $R$  la constante universal de los gases,  $T$  la temperatura absoluta y  $P$  la presión. Si ahora se sustituye el volumen parcial del contaminante que aparece en la ecuación 4.2, por el volumen parcial que interviene en la ecuación 4.3 se obtiene:

$$C_{\text{ppm}} = V_s 10^6 / V = 10^6 m_s RT / (V P M_s) = C_{\mu\text{g}/\text{m}^3} RT / (P M_s)$$

Sustituyendo el valor de la constante universal de los gases  $R$ , de modo que la presión  $P$  esté expresada en milibares ( $R = 0.08314 \text{ mbar m}^3 / \text{mol K}$ ,  $1013 \text{ mbar} = 1 \text{ atm}$ ) y  $T$  en K, se tiene que:

$$C_{\text{ppm}} = C_{\mu\text{g}/\text{m}^3} 0.08314 T / (P M_s) \quad (4.4)$$

Esta ecuación permite convertir concentraciones de compuestos gaseosos expresadas en partes por millón a microgramos por metro cúbico y viceversa, en función de la temperatura y la presión del aire.

En las siguientes secciones se presenta una descripción de los principales contaminantes y sus fuentes, la forma de calcular sus emisiones, los conceptos de meteorología requeridos para entender e interpretar el fenómeno de la contaminación atmosférica y los métodos de simulación más frecuentemente empleados para cuantificar el transporte y la dispersión de contaminantes que se emiten a la atmósfera.

Las fuentes de contaminación del aire incluyen tanto a las *naturales* como a las *artificiales*. Obviamente estas últimas son ocasionadas por el hombre, es decir su origen es antropogénico. Las fuentes naturales tienen un lugar importante en la actualidad y también en la historia de la Tierra. De ser cierto que hace 65 millones de años un meteorito se impactó con la Tierra en la península de Yucatán, México, y originó la extinción de los dinosaurios, probablemente fue la contaminación del aire, a nivel global, la causante de este acontecimiento; el choque del meteorito gigante (de unos 15 kilómetros de longitud), desprendió grandes cantidades de materiales que se dispersaron en la atmósfera y originó a su vez que grandes extensiones de bosques y selvas se incendiaran. Las cenizas que causaron estos incendios también se dispersaron en el aire, produciendo el oscurecimiento de la Tierra, seguramente por muchos meses. Esto a su vez impidió que se efectuara la fotosíntesis y por consiguiente la producción de carbohidratos, muy demandados por los dinosaurios debido a su gran tamaño.



**Problema resuelto 4.1 Expresión de concentraciones de contaminantes del aire**

Un globo de 1 m<sup>3</sup> de volumen se sitúa al nivel del mar y se le introduce 10<sup>-3</sup> g de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>). La temperatura del aire es de 25 °C. Si el globo se lleva a una altura sobre el nivel del mar en donde la presión atmosférica es de 650 mm de mercurio:

- Determine la concentración de SO<sub>2</sub> en el globo considerando la misma temperatura que al nivel del mar.
- Expresa el resultado en ppm.

**Solución.**

a) A nivel del mar la concentración de SO<sub>2</sub>  $c_1 = 10^{-3} \times 10^6 \mu\text{g} / 1 \text{ m}^3 = 1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Para conocer la concentración a 650 mm de Hg se usará la ecuación de los gases ideales manteniendo la temperatura constante. Entonces, de la ecuación 4.3, como los términos del lado derecho permanecen constantes

$$PV = \text{cte}$$

en donde V es el volumen parcial del SO<sub>2</sub>.

La anterior ecuación implica que

$$P_1V_1 = P_2V_2$$

Obsérvese que el estado 1 representa las condiciones originales, o sea las que existían al nivel del mar y el estado 2, las nuevas condiciones. Por consiguiente, el volumen del globo a 650 mm de Hg es

$$V_2 = P_1V_1 / P_2 = 760 \times 1 / 650 = 1.17 \text{ m}^3$$

y la nueva concentración será

$$c_2 = m_s / V_2 = 10^{-3} \times 10^6 \mu\text{g} / 1.17 \text{ m}^3 = 854.7 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{ a } 25 \text{ }^\circ\text{C y } 650 \text{ mm de Hg}$$

b) Para obtener la concentración en ppm se empleará la ecuación 4.4 y se considerarán los valores de temperatura y presión del estado 1. Primero será necesario convertir la temperatura de °C a Kelvin, por lo que  $T = 273.15 + 25 = 298.15 \text{ K}$ , y como la masa atómica del azufre es 32 g/mol y el del oxígeno 16 g/mol, la masa molecular del SO<sub>2</sub> es

$$M_{\text{SO}_2} = 32 + 16 \times 2 = 64 \text{ g/mol}$$

Sustituyendo estas cantidades en la ecuación 4.4 se obtiene

$$c_{\text{ppm}} = 1000 \times 0.08314 \times 298.15 / (1013 \times 64) = 0.382 \text{ ppm}$$

Como se explicó arriba, este resultado es independiente de la altura del globo, es decir de la presión atmosférica. Por ejemplo, en el estado 2, a la presión de 650 mm de Hg se tiene que  $P = 866.6 \text{ milibares}$ , y, por consiguiente, al aplicar la misma ecuación a la nueva concentración (854.7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), resulta

$$c_{\text{ppm}} = 854.7 \times 0.08314 \times 298.15 / (866.6 \times 64) = 0.382 \text{ ppm}$$

Que es igual al resultado alcanzado a 1013 milibares

Evidentemente este suceso no ocurre frecuentemente, sin embargo, otros fenómenos naturales que contaminan el aire son bien conocidos porque suceden habitualmente, como las erupciones volcánicas, los incendios forestales, el arrastre eólico, también llamado tolvanera, y el espray marino. Como ejemplo, esta última fuente de contaminación del aire propicia que en las ciudades costeras los materiales tiendan a corroerse más fácilmente que en zonas urbanas alejadas de la costa. La sal, proveniente del espray marino generado por el oleaje y los vientos al soplar sobre el mar, se deposita en superficies favoreciendo la corrosión de materiales expuestos. Las tablas 4.4 y 4.5 presentan en forma resumida las principales fuentes naturales y antropogénicas que impactan la calidad del aire.

Tabla 4.4 Fuentes y contaminantes más significativas de origen natural

<b>Fuente</b>	<b>Contaminante</b>
Erupciones volcánicas	SO <sub>x</sub> , H <sub>2</sub> S, partículas
Incendios forestales	CO, SO <sub>x</sub> , NO <sub>x</sub> , partículas y CO <sub>2</sub>
Arrastre eólico	Partículas de polvo
Materia orgánica en descomposición	CH <sub>4</sub> , H <sub>2</sub> S, NH <sub>3</sub>
Espray marino	Partículas de sal

Tabla 4.5 Fuentes y contaminantes más significativos de origen antropogénico

<b>Fuente</b>	<b>Contaminante</b>
Transporte	CO, CO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , HC
Procesos industriales	CO, NO <sub>x</sub> , SO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S, Partículas
Generación de energía eléctrica	CO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , SO <sub>2</sub> , Partículas
Quema de combustibles en industria y comercios	CO, NO <sub>x</sub> , SO <sub>2</sub> , Partículas
Actividades agrícolas	CO, NO, Partículas
Extracción de recursos	Partículas, H <sub>x</sub> C <sub>y</sub> , H <sub>2</sub> S

**Problema resuelto 4.2 Expresión de concentraciones en condiciones diferentes.**

Se toma una muestra de aire en el puerto de Veracruz, México, y se determina que la concentración de monóxido de carbono (CO) es de 9 ppm. Determine la concentración de CO de la muestra en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en el puerto de Veracruz y en la Ciudad de México situada a 2240 m sobre el nivel del mar a una temperatura de 25 °C

**Solución.**

La concentración en ppm de CO de la muestra tomada en la Ciudad de México será la misma que en el puerto de Veracruz. Para expresar esta concentración en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , se emplea la ecuación 4.4

$$c_{\mu\text{g}/\text{m}^3} = c_{\text{ppm}} M_s / (0.08314T) \quad (\text{P4.1})$$

La temperatura absoluta es

$$T = 273.15 + 25 = 298.15 \text{ K}$$

y la masa molecular del CO es

$$M_{\text{co}} = 12 + 16 = 28 \text{ g/mol}$$

ya que la masa atómica del carbono es 12 g/mol y del oxígeno 16 g/mol.

En el puerto de Veracruz la presión atmosférica  $P = 1013$  mbar. Sustituyendo estos valores en la ecuación P4.1:

$$c_{\mu\text{g}/\text{m}^3} = 9 \times 1013 \times 28 / (0.08314 \times 298.15) = 10,300 \mu\text{g}/\text{m}^3$$

La presión atmosférica en la Ciudad de México es de aproximadamente 800 mbar, por tanto:

$$c_{\mu\text{g}/\text{m}^3} = 9 \times 800 \times 28 / (0.08314 \times 298.15) = 8133 \mu\text{g}/\text{m}^3$$

Las fuentes de contaminación suelen también clasificarse en *móviles* y *fijas*. Las primeras se refieren a las emisiones provenientes de los vehículos de todo tipo que utilizan combustibles fósiles, es decir automóviles, camiones, trenes, barcos y aviones. Las fuentes fijas o estacionarias son muy diversas, pero su característica es que permanecen en un lugar. Las emisiones procedentes de chimeneas son un ejemplo de lo anterior. Aunque existen muchos procesos que contaminan el aire, sin lugar a duda, son los procesos de combustión los responsables de generar la mayoría de las emisiones antropogénicas. En la tabla 4.5 se presentan las fuentes antropogénicas más importantes.

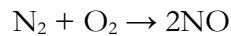
Otra forma común de clasificar a las fuentes de contaminación es atendiendo a su distribución espacial. En este sentido las fuentes se clasifican en *puntuales*, de *línea* y de *área*. Las primeras emiten contaminantes que aparentan, debido a su lejanía, proceder de un punto; una chimenea que emana gases o partículas constituye una fuente puntual. Las fuentes de línea están constituidas por calles o tramos de carreteras en donde existe movimiento vehicular. Las fuentes de área se integran por superficies que emiten contaminantes, como, por ejemplo, plantaciones o zonas boscosas incendiadas, terrenos sujetos a la acción del viento que forman tolvaneras y emisiones originadas en el movimiento vehicular dentro de estacionamientos.

Las fuentes de contaminación que no se encausan utilizando un ducto, se denominan fuentes *fugitivas*. Evidentemente todas las fuentes naturales constituyen fuentes fugitivas; sin embargo, algunas fuentes artificiales también lo son, como, por ejemplo, un camino sin pavimentar en donde transitan vehículos forma una fuente de partículas fugitiva de línea, o la quema provocada de un plantío después de su cosecha, como, por ejemplo, cuando se realiza la zafra de la caña de azúcar, forma una fuente fugitiva de área.

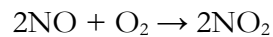
### 4.1.1 Compuestos que contienen nitrógeno

Como se mencionó anteriormente el compuesto más abundante en la atmósfera terrestre es el nitrógeno. Este gas, una vez convertido químicamente a formas utilizables por organismos vivos, es un nutriente esencial para todos los seres vivos que habitan la Tierra; sin embargo, el nitrógeno también participa en la formación de compuestos que contaminan la atmósfera.

Los dos principales compuestos nitrogenados que contaminan el aire son el *monóxido de nitrógeno* (NO) y el *dióxido de nitrógeno* (NO<sub>2</sub>). La mezcla de ambos se conoce con el nombre de *óxidos de nitrógeno* (NO<sub>x</sub>). La fuente antropogénica principal de NO es la combustión que se realiza a altas temperaturas, es decir a más de 1000 K, como por ejemplo la quema de gasolina que se efectúa en la cámara de combustión del motor de gasolina o la combustión de gas natural o combustóleo que se realiza en la caldera de una central termoeléctrica. En estos casos el NO se fija a partir del nitrógeno y el oxígeno atmosférico así



Posteriormente el NO emitido a la atmósfera se oxida rápidamente formando NO<sub>2</sub> al reaccionar con el oxígeno atmosférico, como sigue



Como el NO<sub>2</sub> es un gas rojizo y el NO es incoloro, en ocasiones es posible observar este proceso de oxidación; muy cerca de la chimenea no se aprecia la emisión o se observa una nube de vapor de agua, pero al alejarse de la fuente comienza a ser notoria la presencia rojiza de la pluma contaminante formada principalmente por NO<sub>2</sub>.

Además del fenómeno de formación de óxidos de nitrógeno señalado arriba, también se pueden generar cantidades importantes de NO<sub>x</sub> como consecuencia de la oxidación del nitrógeno contenido en las moléculas que forman el combustible. Este proceso no requiere de las altas temperaturas que caracterizan al primero. Lo anterior significa que la emisión de NO<sub>x</sub> también dependerá del contenido de nitrógeno en el combustible.

Por ejemplo, en el caso de la combustión de gas natural en una central termoeléctrica, cómo éste prácticamente no contiene nitrógeno, las emisiones de NO tienen su origen en el nitrógeno atmosférico mencionado arriba y no en el combustible. Sin embargo, si la central termoeléctrica quema combustóleo o carbón, dado que éstos pueden contener cantidades importantes de

nitrógeno asociado a sus moléculas, ambas fuentes de óxido de nitrógeno son significativas. Según lo anterior, son usuales los términos  $NO_x$  *térmico* y  $NO_x$  *de combustión*, para distinguir su origen; el primero proviene del nitrógeno atmosférico que se fija, junto con el oxígeno atmosférico, a altas temperaturas, como se explicó previamente, y el segundo del nitrógeno contenido en los combustibles.

Los efectos adversos de los óxidos de nitrógeno se derivan principalmente de las consecuencias que tienen directamente en la salud y de su participación en la generación de lo que se denomina *contaminación fotoquímica*. Esta forma de contaminación se describe detalladamente más adelante. Sin embargo, también logran tener efectos perjudiciales al formarse en la atmósfera ácido nítrico ( $HNO_3$ ), lo que genera lluvia ácida, la cual puede ocasionar impactos significativos en los ecosistemas terrestres y acuáticos.

Desde el punto de vista de la salud pública, se sabe que a las concentraciones típicas a la que se encuentra el NO en la atmósfera urbana no tiene efectos negativos; sin embargo, se conoce que el  $NO_2$  produce síntomas parecidos al enfisema pulmonar cuando se respira a concentraciones mayores de 1 ppm durante periodos prolongados. También se sabe que puede propiciar enfermedades como la bronquitis. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), el  $NO_2$  es un gas tóxico que causa una importante inflamación de las vías respiratorias cuando se respira en periodos cortos a concentraciones superiores a los  $200 \mu g/m^3$ . Por tal motivo la OMS ha fijado los siguientes valores límites en sus directrices:

40  $\mu g/m^3$  como promedio anual  
200  $\mu g/m^3$  como promedio en 1h

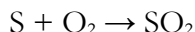
Las directrices sobre calidad del aire de la OMS señalan los valores máximos recomendados para reducir de modo significativo los riesgos a la salud. En este sentido dichas directrices forman la base para el establecimiento de las normas de calidad del aire, cuyo concepto se discute más adelante.

Además de los óxidos de nitrógeno, es importante mencionar dos gases de origen primordialmente natural que también contaminan el aire. El óxido nitroso ( $N_2O$ ) y el amoníaco ( $NH_3$ ). El primero es un gas incoloro que se emite principalmente por la intervención de bacterias que actúan sobre compuestos nitrogenados existentes en el suelo. Al igual que el  $CO_2$  y el metano ( $CH_4$ ), el óxido nitroso es un gas de efecto invernadero, aunque mucho más potente que el primero. Por otra parte, el amoníaco se genera al descomponerse compuestos orgánicos nitrogenados debido a la acción de bacterias que liberan nitrógeno en la forma de amoníaco. Además, es importante mencionar a las emisiones antropogénicas de amoníaco procedentes de procesos industriales específicos. El amoníaco figura en las listas de las sustancias peligrosas por ser altamente tóxico a concentraciones industriales; es un gas irritante que se absorbe en la parte superior de las vías respiratorias.

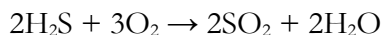
### **4.1.2 Compuestos que contienen azufre**

Como se aprecia en la tabla 4.2 hay una gran variedad de compuestos que contienen azufre en la atmósfera contaminada. El más importante, tanto por el gran número de fuentes existentes como

por su abundancia en la atmósfera, es el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>). La fuente principal de este contaminante es la combustión de combustibles conteniendo azufre, especialmente combustóleo, carbón y diésel, aunque también deben mencionarse algunos procesos industriales como la fundición de minerales ricos en sulfatos. El azufre contenido en los combustibles mencionados se oxida fácilmente al quemarlos, como sigue



El dióxido de azufre es principalmente un contaminante primario; sin embargo, también puede generarse como contaminante secundario al oxidarse en la atmósfera el ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S).



El ácido sulfhídrico es otro compuesto de azufre que frecuentemente contamina el aire, pero que tiende a oxidarse como se expuso arriba formando dióxido de azufre. Es interesante mencionar que, debido a su alta toxicidad, el H<sub>2</sub>S suele oxidarse a SO<sub>2</sub> en forma controlada para evitar verterlo a la atmósfera en países que lo permiten; en otras palabras, se transforma un contaminante muy tóxico en otro menos tóxico, pero que igualmente contamina el aire y por consiguiente también debería controlarse. El ácido sulfhídrico se caracteriza por su olor a huevo podrido. Su fuente antropogénica más común es el agua residual doméstica sin tratar y la extracción y procesamiento de petróleo y gas, pero también se origina en procesos naturales por descomposición anaerobia de materia orgánica, principalmente en suelos costeros y sedimentos.

La vida media en la atmósfera del SO<sub>2</sub> es del orden de días; casi la mitad vuelve a depositarse en la superficie, ya sea en forma húmeda o seca, y el resto se convierte en iones sulfato que participan en la formación de lluvia ácida.

A nivel global, aproximadamente la mitad del dióxido de azufre es de origen antropogénico y el resto es emitido en forma natural principalmente por erupciones volcánicas.

Otro compuesto de azufre que vale la pena mencionar lo constituye el trióxido de azufre (SO<sub>3</sub>). Este es un contaminante secundario que se forma cuando el SO<sub>2</sub> reacciona con el oxígeno en la atmósfera. Sin embargo, esta reacción sólo es importante cuando se realiza en presencia de partículas que participan como catalizadores de la reacción. Estas partículas también sirven como núcleos de condensación para formar gotas de agua. Una vez formado el trióxido de azufre, éste reacciona rápidamente con agua para formar ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), como sigue



El ácido sulfúrico formado se dispersa en la atmósfera como partículas, contribuyendo, junto con el ácido nítrico mencionado arriba, a la formación de lluvia ácida. Esta forma de contaminación es responsable de acidificar suelos y cuerpos de agua, impactando negativamente en sus sistemas ecológicos. Además de dichos impactos, la lluvia ácida tiene efectos directos sobre los materiales, provocando la corrosión de metales y desgastando prematuramente monumentos y construcciones de piedra.

El dióxido de azufre es causante de enfermedades respiratorias que afectan los bronquios y la tráquea. Estos efectos sobre la salud pública se incrementan en personas sensibles, como por ejemplo los asmáticos, particularmente en niños y ancianos y en aquellos con enfermedades pulmonares crónicas como la bronquitis y el enfisema.

De acuerdo con la OMS, la concentración de  $\text{SO}_2$  en períodos promedio de 10 minutos no debería superar los  $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Los estudios indican que un porcentaje de las personas con asma experimentan cambios en la función pulmonar y síntomas respiratorios tras períodos de exposición al  $\text{SO}_2$  de tan sólo 10 minutos. Las directrices fijadas por la OMS para preservar la salud pública recomiendan no exceder los siguientes valores:

$20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  como promedio en 24 horas

$500 \mu\text{g}/\text{m}^3$  como promedio en 10 minutos

Es importante mencionar también los efectos sinérgicos producto de la combinación del  $\text{SO}_2$  y las partículas suspendidas. Esto significa que la mezcla de ambos contaminantes incrementa, de manera multiplicativa, los efectos negativos que tiene individualmente cada contaminante en la salud de la población expuesta. Aunque seguramente también opera la sinergia entre otros contaminantes del aire, el caso mencionado ha sido bien estudiado y merece ser tomado en consideración al establecerse medidas para evitar la ocurrencia de episodios y contingencias ambientales.

### 4.1.3 Compuestos que contienen carbono

El dióxido de carbono  $\text{CO}_2$ , el monóxido de carbono  $\text{CO}$  y el grupo de compuestos denominados hidrocarburos (HC), que incluye tanto a los reactivos como a los no reactivos, constituyen los principales contaminantes del aire conteniendo carbono.

El dióxido de carbono es el principal gas causante del efecto de invernadero explicado brevemente en la introducción al presente capítulo. Si no fuera por su participación en el calentamiento global de la atmósfera terrestre no sería considerado como contaminante del aire; sin embargo, debido a que también es un gas indispensable para la vida, al ser uno de los protagonistas del proceso de la fotosíntesis, ha tenido un papel dual muy controversial en los últimos 40 años. El  $\text{CO}_2$  es el gas más abundante liberado por los procesos de combustión. Como ya se mencionó, la utilización de los combustibles fósiles, es decir carbón, petróleo y gas, necesariamente originan  $\text{CO}_2$ , como producto de la oxidación del carbono asociado a sus moléculas. Sin embargo, cuando la combustión no se realiza de manera completa, la oxidación del carbono origina la producción de monóxido de carbono  $\text{CO}$ , un gas tóxico que se libera en prácticamente todos los procesos de combustión; su generación es un indicativo de una combustión incompleta.

En la atmósfera urbana el  $\text{CO}$  es emitido de manera importante por el tránsito vehicular. La cantidad de  $\text{CO}$  que emiten los vehículos depende de varios factores, entre los cuales destacan: el tipo de vehículo y combustible utilizado, el estado del motor y el modo de manejo del vehículo. Por ejemplo, el  $\text{CO}$  se emite en grandes cantidades cuando el vehículo está frío y se maneja a baja velocidad. Estas emisiones se reducen significativamente al aumentar la velocidad del vehículo.



En una calle con tránsito vehicular considerable, se pueden detectar concentraciones típicas de aproximadamente 40 ppm de CO promedio en 8 horas, que se reducen considerablemente a menos de 15 ppm en la dirección perpendicular a la calle en sitios alejados unas cuantas decenas de metros de la arteria principal. El nivel de fondo urbano típico se encuentra en el intervalo de 1- 2 ppm.

El CO es un gas poco reactivo en la atmósfera, que al ser inhalado reemplaza al oxígeno que las células necesitan para su funcionamiento formando un compuesto denominado carboxihemoglobina (COHb). La creación de este compuesto en la sangre impide captar el oxígeno necesario para las funciones vitales del organismo, ya que la afinidad de la hemoglobina por el CO es aproximadamente 250 veces mayor que por el O<sub>2</sub>. Los síntomas de intoxicación por monóxido de carbono son la jaqueca, fatiga, náuseas, mareos, estado de confusión e irritabilidad. Las personas que sufren de problemas cardíacos son particularmente sensibles a las altas concentraciones de CO, pudiendo experimentar dolor en el pecho si lo inhalan al realizar ejercicio. Los niños, los ancianos y las personas con problemas respiratorios son también especialmente sensibles. El monóxido de carbono produce trastornos en individuos sanos, afectando las funciones motoras, la vista, la destreza manual, la capacidad de aprendizaje y la realización de tareas complejas.

Según la Organización Mundial de la Salud, el nivel máximo permitido de monóxido de carbono en el aire es de 9 ppm durante una exposición de ocho horas y un nivel promedio de saturación de carboxihemoglobina de aproximadamente 2%.

#### **4.1.4 Oxidantes fotoquímicos**

Los oxidantes fotoquímicos son contaminantes secundarios que se forman debido a reacciones químicas inducidas por la luz solar. Están constituidos por un conjunto grande de compuestos orgánicos e inorgánicos que actúan como agentes oxidantes, cuya principal característica es la presencia abundante de ozono. El ozono es un compuesto muy reactivo que tiene efectos dañinos a la salud y a los materiales como se explica más adelante.

La generación de oxidantes fotoquímicos es un sistema de reacciones complejo en donde participa la radiación ultravioleta proveniente del sol y las emisiones de contaminantes generadas principalmente por grandes volúmenes de tránsito vehicular que caracterizan a zonas urbanas de gran tamaño. Adicionalmente a dichas fuentes, es importante mencionar a las emisiones provenientes del almacenamiento de combustibles, como la gasolina, así como las que se originan en industrias que utilizan calderas de gran capacidad. Estos contaminantes primarios, también denominados *precursores de los oxidantes fotoquímicos*, son los hidrocarburos reactivos y los óxidos de nitrógeno. El proceso completo de formación de los oxidantes puede simplificarse en dos fases:

En la primera etapa se forma ozono (O<sub>3</sub>) a través de lo que se denomina el *ciclo fotolítico* que involucra a los óxidos de nitrógeno NO<sub>x</sub>. El ozono es un oxidante potente que caracteriza de manera sobresaliente a esta forma de contaminación. El ciclo fotolítico se constituye por las siguientes reacciones:

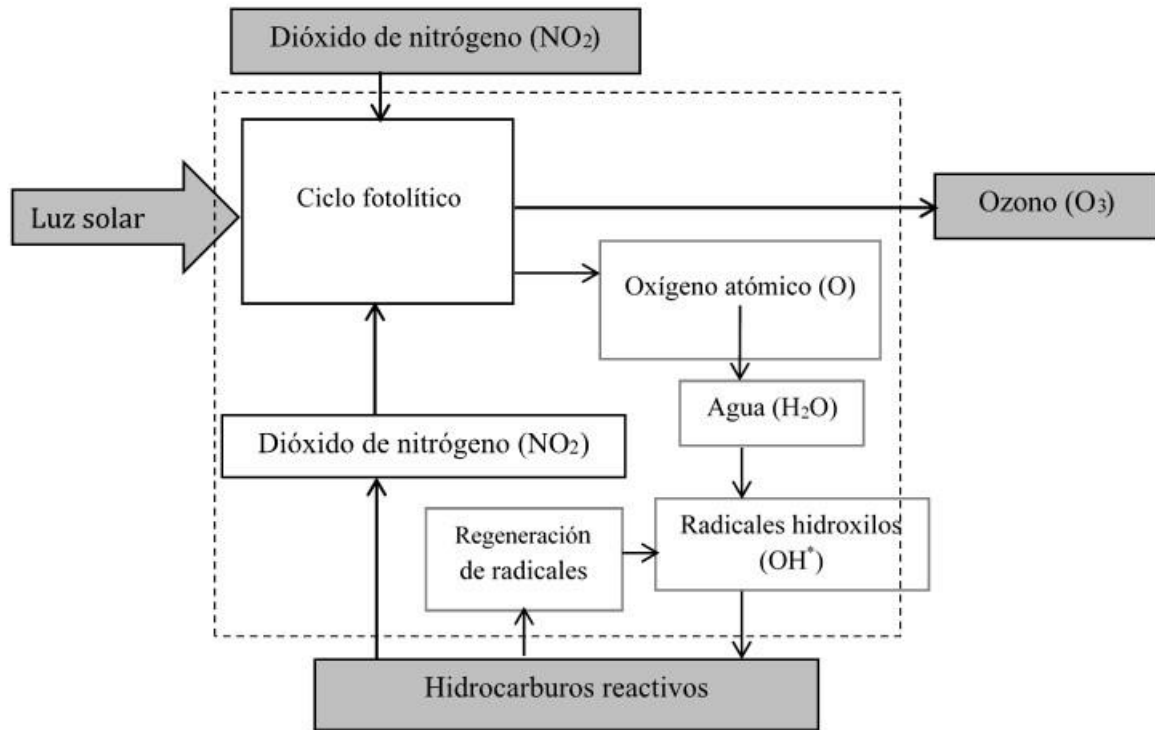
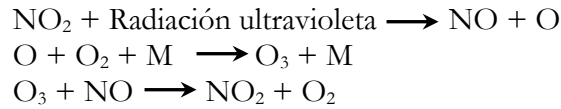
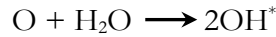


Figura 4.2 Diagrama simplificado que muestra la generación de contaminación fotoquímica

En donde M representa un tercer cuerpo compuesto por una molécula de  $\text{O}_2$  o  $\text{N}_2$ , ambas abundantes en la atmósfera, que absorbe el exceso de energía de la reacción y estabiliza la molécula de ozono formado. Obsérvese cómo el ozono creado en la segunda reacción tiende a ser eliminado en la tercera, al reaccionar con el monóxido de nitrógeno, formando nuevamente dióxido de nitrógeno. El efecto neto de esta serie de reacciones es la formación de ozono a concentraciones muy inferiores a las que se observan en las zonas urbanas que padecen de este tipo de contaminación. También es importante tomar en consideración que la mayor parte del  $\text{NO}_x$  emitido es en forma de NO y no  $\text{NO}_2$ , lo cual impide explicar, como único responsable de la formación del ozono urbano, al ciclo fotolítico mencionado.

La segunda etapa inicia con la presencia de ciertos hidrocarburos, particularmente de los que se conoce como *hidrocarburos reactivos*, procedentes principalmente de las emisiones de compuestos volátiles y la combustión incompleta de combustibles, que irrumpen en el equilibrio de formación y destrucción del ozono, permitiendo que éste crezca a niveles muy superiores a las concentraciones implicadas en el ciclo fotolítico; la presencia de los hidrocarburos reactivos propicia, como se verá enseguida, la transformación del NO emitido por los vehículos en  $\text{NO}_2$ , de manera que se dispone de mayores cantidades del segundo contaminante, que constituye la materia prima del ciclo fotolítico, y menores del primero, que participa eliminando al ozono.

Se han propuesto varios mecanismos para explicar los altos niveles de ozono encontrados en la atmósfera urbana a través del incremento del NO<sub>2</sub> y decremento del NO expuesto arriba. La clave para explicar estos mecanismos es la participación que tienen los radicales hidroxilos OH\*. En presencia de oxígeno atómico, que también se forma en el ciclo fotolítico, el agua reacciona formando estos radicales, así



Una característica importante de los radicales hidroxilos es que son sumamente reactivos, pudiendo reaccionar con los hidrocarburos y el CO.

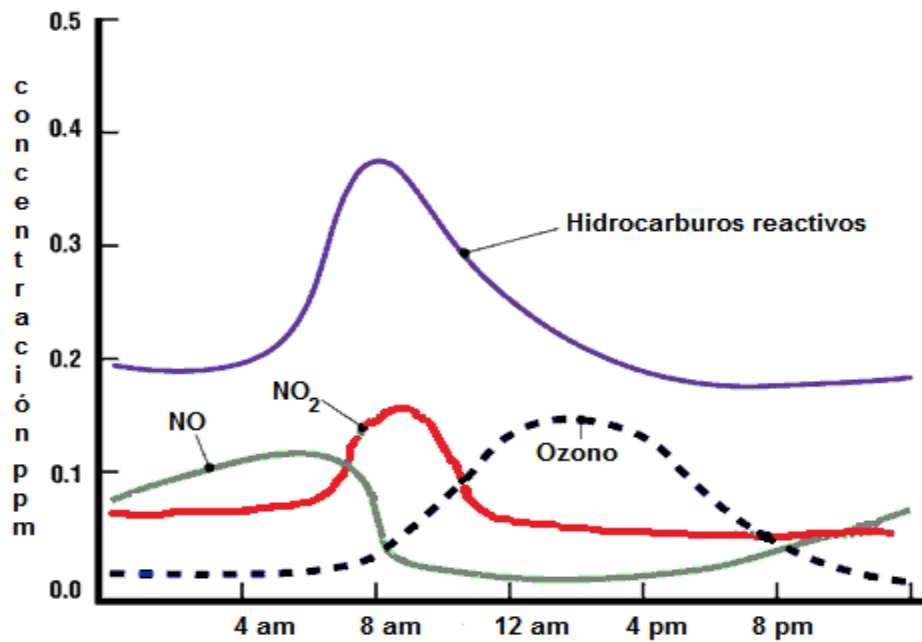
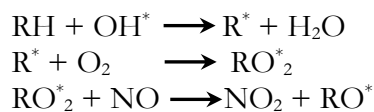


Figura 4.3 Evolución de los precursores de la contaminación fotoquímica y del ozono.

A manera de ejemplo y de forma simplificada, considérese un hidrocarburo reactivo RH. Entonces, los radicales hidroxilos formados por la reacción anterior desencadenan las siguientes reacciones:



Es decir, se ha utilizado el NO para oxidarlo a NO<sub>2</sub> propiciando la generación de O<sub>3</sub> a través del ciclo fotolítico explicado arriba. Esto se ilustra en la figura 4.2

Debe mencionarse que los conjuntos de reacciones descritas no completan el ciclo de participación de los compuestos mencionados, puesto que como se puede observar, hay una eliminación neta de los radicales OH\* que de alguna manera deben regenerarse para mantener el

ciclo en funcionamiento. Estas reacciones adicionales se omiten aquí para simplificar la explicación del fenómeno estudiado.

La figura 4.3 muestra lo que sucede con los compuestos aludidos anteriormente en la atmósfera urbana típica. Por la mañana empiezan paulatinamente las emisiones de  $\text{NO}_x$  e HC reactivos al iniciarse las actividades vehiculares. Obsérvese como, un poco después de salir el sol, comienza, de manera incipiente, a generarse  $\text{O}_3$  y rápidamente el  $\text{NO}_2$  incrementa su concentración, debido fundamentalmente a la oxidación del NO por el oxígeno molecular y sobre todo por la serie de reacciones con los hidrocarburos reactivos descritas arriba. Posteriormente, alrededor del mediodía, el ozono alcanza su clímax, para después reducir su concentración al disminuir la cantidad de radiación ultravioleta disponible para mantener las reacciones fotoquímicas que lo sustentan.

Desde el punto de vista de su capacidad como contaminante de la atmósfera urbana, el ozono y en general los oxidantes fotoquímicos, tienen efectos indeseables en la salud y los materiales. En el corto plazo el ozono es un irritante potente de las membranas nasales y oculares y para el sistema respiratorio en general. Además, como el ozono es menos soluble que otros gases, puede penetrar a regiones pulmonares profundas del sistema respiratorio, induciendo lesiones e inflamación en células pulmonares. La exposición del ozono a 0.11 ppm o mayores durante periodos de 1 hora puede incrementar episodios de asma en personas susceptibles, particularmente en niños asmáticos.

En el largo plazo, el ozono puede agravar las enfermedades crónicas del pulmón tales como el enfisema y bronquitis, así como reducir la capacidad del sistema inmunitario para combatir las infecciones bacterianas en el sistema respiratorio. Asimismo, repetidos daños a corto plazo en niños pueden ocasionar que la función pulmonar se reduzca en la edad adulta. En los adultos, la exposición al ozono puede acelerar el declive natural de la función pulmonar que ocurre como parte normal del proceso de envejecimiento.

Las directrices fijadas por la OMS para preservar la salud pública recomiendan no exceder el valor de  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de  $\text{O}_3$  como promedio en 8 horas. Véase la tabla 4.6.

Los efectos del ozono sobre la vegetación consisten en daños visibles en las hojas, reducción en el crecimiento de las plantas y disminución en el rendimiento de las cosechas.

Por otra parte, en el caso de los materiales, el ozono favorece y potencia en general los procesos de corrosión, especialmente se ha observado la degradación acelerada de las gomas, pinturas y textiles sintéticos.



#### **Actividad 4.1.**

#### **Estudio del video “Contaminación fotoquímica”**

**Con base en el video indicado y los temas expuestos en el libro contesta las preguntas planteadas al final de capítulo**

## 4.1.5 Partículas

Las partículas constituyen uno de los principales contaminantes del aire. Según se expuso anteriormente, las partículas pueden ser tanto sólidos como líquidos dispersos en el aire, cuyos efectos adversos se originan debido a su tamaño y a su composición química.

Las fuentes naturales de partículas son muy diversas como se puede apreciar en la tabla 4.4; sin embargo, a nivel global, las erupciones volcánicas juegan un papel preponderante, pudiendo reducir la penetración de la luz solar en regiones considerables del globo terrestre. Por ejemplo, las erupciones del volcán Chichonal en 1982 situado en el sureste mexicano, lograron disminuir la radiación solar hasta en un 20% en regiones tan alejadas como Hawái.

Las principales fuentes antropogénicas de partículas incluyen una gran variedad de procesos industriales, pero deben enfatizarse los procesos de combustión de todo tipo que contribuyen a formar cantidades importantes de humo a nivel local; el humo está constituido por partículas de combustibles parcialmente quemados. Sin embargo, los orígenes fotoquímicos de las partículas, es decir, como contaminantes secundarios, también son importantes en zonas urbanas que padecen de este tipo de contaminación, provocando reducción de la visibilidad y el consiguiente efecto estético desagradable que caracteriza a esta forma de contaminación.

Las partículas suspendidas totales (PST) engloban el espectro completo de tamaños presentado en la tabla 4.3; en otras palabras, están integradas por las partículas sedimentables ( $10 \mu\text{m} < \text{diámetro} < 100 \mu\text{m}$ ), las partículas respirables (diámetro  $< 10 \mu\text{m}$ ), tanto las gruesas  $\text{PM}_{10}$  como las finas  $\text{PM}_{2.5}$ , y las partículas ultrafinas (diámetro  $< 0.1 \mu\text{m}$ ). Según se mencionó anteriormente el tamaño de las partículas determina si éstas logran o no penetrar el aparato respiratorio superior y por consiguiente sus efectos adversos a la salud.

La figura 4.4 muestra la eficiencia de retención de partículas en el aparato respiratorio; la eficiencia de retención en el pulmón disminuye al aumentar el tamaño de las partículas, primero hasta aproximadamente  $0.5 \mu\text{m}$ , en donde alcanza su valor mínimo. Posteriormente, a partir de ese valor, se incrementa hasta alcanzar su valor máximo cuando las partículas tienen aproximadamente 2 micras de diámetro y posteriormente disminuye nuevamente en forma gradual. Obviamente esta disminución se compensa con una mayor eficiencia de retención de partículas en el sistema respiratorio superior, particularmente el conducto nasofaríngeo, constituido por la nariz y la garganta que atrapa eficientemente las partículas mayores.

Por otra parte, y adicionalmente a los efectos en la salud, el tamaño de las partículas establece el tiempo que estas permanecen en la atmósfera, ya que las partículas grandes tienden a sedimentarse y a ser removidas más fácilmente por procesos de impacto e inercia en superficies de todo tipo. En contraste las partículas pequeñas permanecen más tiempo en la atmósfera y son responsables, principalmente las que tienen diámetros que se corresponden con el espectro de la luz visible, de provocar la disminución de visibilidad.

Es interesante mencionar que estas características asociadas a su tamaño, también se utilizan ampliamente en dispositivos para controlar sus emisiones a la atmósfera. Por ejemplo, en sistemas constituidos por filtros, lavadores y precipitadores electrostáticos que emplea la industria para

evitar su descarga a la atmósfera, las partículas pequeñas se capturan con menos eficiencia que las grandes, en forma análoga a como el sistema respiratorio las remueve al ir penetrándolo como se explicó arriba.

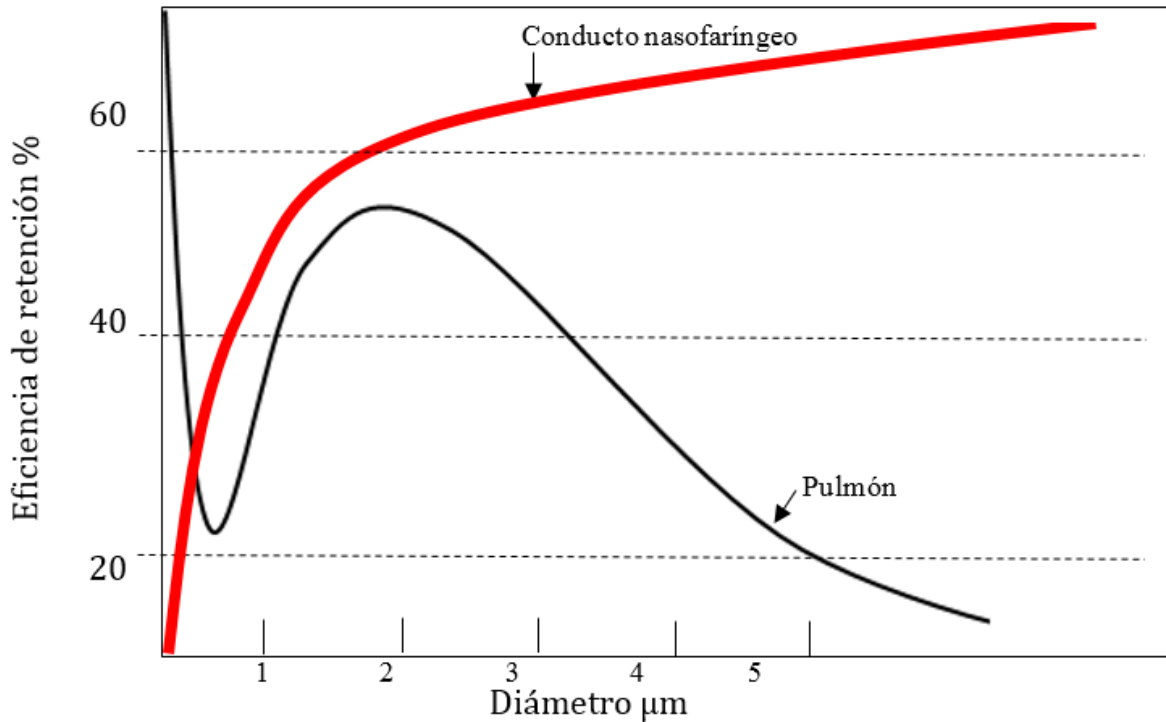


Figura 4.4 Retención de partículas en el aparato respiratorio

La OMS ha fijado directrices en cuanto a las concentraciones de partículas para preservar la salud pública. Estos valores se presentan en la tabla 4.6. Obsérvese en esta tabla que se incluyen concentraciones con cantidades promedio anuales y diarias, tanto para  $PM_{10}$  como  $PM_{2.5}$ .

Por otra parte, también se adicionan en dicha tabla lo que se denomina *objetivos intermedios*. Estos constituyen criterios que pueden utilizarse para establecer normas de calidad del aire, como se explica más adelante.

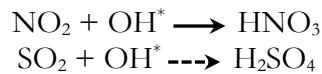
### 4.1.6 Lluvia ácida

Se mencionó anteriormente que un aspecto importante de la contaminación generada por los compuestos que contienen nitrógeno y azufre, particularmente por los óxidos de nitrógeno y óxidos de azufre, es la producción de lluvia ácida. La lluvia se considera ácida cuando el pH es inferior a 5.6, dado el nivel actual del  $CO_2$  atmosférico y su conversión a ácido carbónico. Sin embargo, este valor ha sido cuestionado debido a la presencia adicional de compuestos de azufre de origen natural,

que también contribuirían a acidificar aún más la lluvia. Tomando en cuenta lo anterior y valores de pH de lluvia medidos a nivel mundial que indican cantidades de fondo de alrededor de pH = 5, se considera lluvia ácida aquella con un pH inferior a esta cantidad. (Domínguez Reiboras, 2008)

En la sección 4.1.4 se expuso la formación de la contaminación fotoquímica propiciada por la radiación solar y la emisión a la atmósfera de los óxidos de nitrógeno y los hidrocarburos reactivos. Ahí se explica que esta combinación de factores ambientales y compuestos participantes generan radicales libres llamados radicales hidroxilos OH\*.

Estos radicales, al ser sumamente reactivos también participan en la formación de lluvia ácida, ya sea, como ácido nítrico al reaccionar con el dióxido de nitrógeno, o en forma de ácido sulfúrico al reaccionar con el dióxido de azufre, así:



La segunda reacción en realidad se lleva a cabo en varios pasos, en donde finalmente el SO<sub>2</sub> es oxidado a trióxido de azufre (SO<sub>3</sub>) el cual reacciona con vapor de agua para formar ácido sulfúrico, como se expuso anteriormente; el SO<sub>3</sub> es un gas sumamente higroscópico, de manera que una vez que se produce, reacciona rápidamente con el vapor de agua presente en la atmósfera.

Es obvio por lo hasta aquí estudiado que los precursores de la lluvia ácida tienen su origen primordialmente en la quema de combustibles fósiles, principalmente en centrales termoeléctricas y otros procesos industriales, como la fundición de metales y la refinación de petróleo.

La lluvia ácida es un fenómeno de trascendencia global que traspone fronteras, ya que los precursores de este tipo de contaminación y las gotas de agua ácida formadas pueden ser transportados por los vientos dominantes grandes distancias y afectar regiones situadas a cientos de kilómetros de su lugar de origen. Un ejemplo de lo anterior son los problemas por lluvia ácida existentes en algunos de los países europeos, sujetos a la importación y exportación de esta forma de contaminación.

La afectación por lluvia ácida incluye principalmente la acidificación de cuerpos de agua y el suelo, así como la disminución de la productividad de cultivos y la degradación de bosques constantemente expuestos a esta forma de lluvia. A nivel urbano la deposición húmeda<sup>9</sup> afecta directamente a los materiales, tanto en edificios como en monumentos, corroyendo metales y pinturas cuyo mantenimiento puede implicar la erogación de recursos económicos considerables.

---

<sup>9</sup> Material que cae de la atmósfera como lluvia, aguanieve, nieve o niebla





#### Actividad 4.2.

#### Estudio del video “Lluvia ácida”

Después de ver el video señalado contesta las preguntas planteadas al final del capítulo

### 4.1.7 Criterios y normas de calidad del aire

Los criterios de calidad del aire constituyen los resultados de estudios científicos, principalmente *toxicológicos* y *epidemiológicos*<sup>10</sup>, que relacionan las concentraciones de los contaminantes con sus efectos adversos. En general los criterios establecen la correspondencia entre los niveles de contaminación y el daño causado por ellos, en términos de la salud pública, los recursos naturales particularmente plantas y animales y materiales. Estos criterios forman la base para el diseño de las normas de calidad del aire, que a su vez sustentan el establecimiento de las normas de emisión. (Véase la figura 4.5).

Una norma de calidad del aire determina la máxima concentración de contaminante que puede estar presente en el aire ambiente sin que cause efectos adversos. Para establecer los criterios de calidad del aire, así como dichas normas y vigilar la calidad del aire, se requiere de un sistema de monitoreo continuo que permita evaluar el grado de contaminación existente; en la actualidad estos sistemas conforman una red de monitoreo automática, mediciones meteorológicas y un sistema de cómputo que permite el procesamiento de los datos en tiempo real.

Es importante hacer notar que en virtud de que las normas de calidad del aire se constituyen en metas u objetivos que puedan alcanzarse en periodos cortos y medios, estas se elaboran tomando en consideración no únicamente los criterios de calidad del aire mencionados arriba, sino también aspectos socioeconómicos y la disponibilidad de tecnología que permita controlar la contaminación. Esto explica por qué diferentes países cuentan con normas de calidad del aire distintas; por ejemplo, en general los países desarrollados tienden a promulgar normas de calidad del aire más restrictivas que los países en desarrollo.

De nada sirve disponer de una norma restrictiva que se excede constantemente. De lo anterior se deduce que, a la par del establecimiento de las normas de calidad del aire, deberá legislarse imponiendo normas de emisión y simultáneamente implantar un plan que permita controlar las emisiones, tanto en el corto como en el mediano plazo. La figura 4.5 muestra los elementos que conforman el establecimiento de los criterios y las normas para controlar la contaminación atmosférica.

---

<sup>10</sup> La toxicología es el estudio de los factores físicos y químicos que ocasionan respuestas adversas en los seres vivos al entrar en contacto con ellos. De acuerdo con la OMS, la epidemiología es el estudio de la distribución y los determinantes de estados o eventos (en particular de enfermedades) relacionados con la salud y la aplicación de esos estudios al control de enfermedades y otros problemas de salud.

La OMS ha establecido lo que denomina *Guías de Calidad del Aire*. Estas guías, relativas a partículas suspendidas, ozono, dióxido de nitrógeno, dióxido de azufre y monóxido de carbono, tienen la finalidad de orientar sobre la manera de reducir los efectos de la contaminación del aire en la salud. Es decir, se han elaborado para respaldar medidas encaminadas a conseguir una calidad del aire que proteja la salud pública, basándose en estudios toxicológicos y epidemiológicos publicados en Europa y Estados Unidos. Por lo anterior, dichas guías tienen un papel semejante a los criterios de calidad del aire antes mencionados.

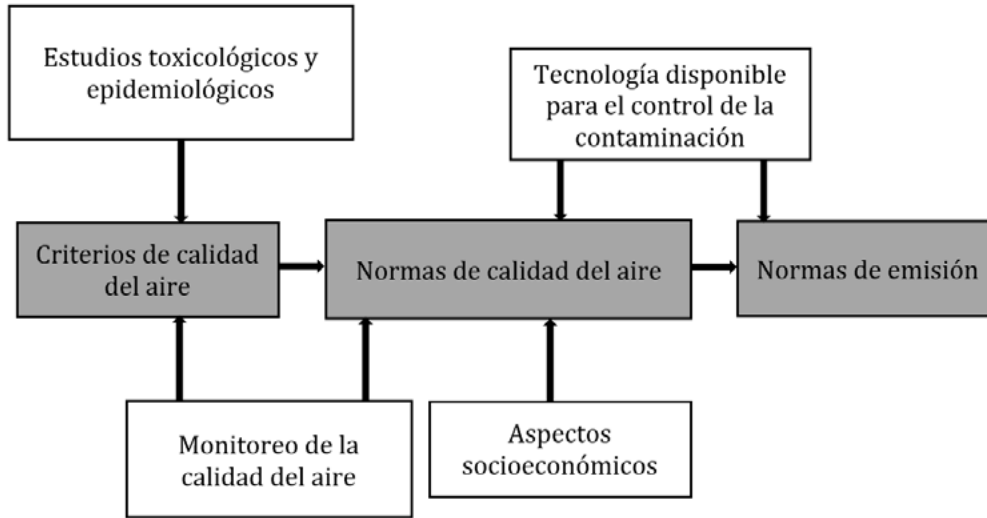


Figura 4.5 Elementos que conforman los criterios y normas de calidad del aire y las normas de emisión

Además de los valores guía, la OMS proporciona objetivos intermedios para varios contaminantes. Según la OMS, estos objetivos se han propuesto como pasos para una reducción progresiva de la contaminación del aire, de manera que sirvan como posibles pautas para el establecimiento de las normas de calidad del aire. Tanto las guías como los objetivos intermedios mencionados se presentan en la tabla 4.6.

Una característica importante de las normas de calidad del aire que se aprecia en la tabla 4.6, es que, además de especificar las concentraciones de los contaminantes, se establece el tiempo de exposición a las mismas. Lo anterior se debe a que los efectos nocivos de los contaminantes del aire, por ejemplo, los referentes a la salud de la población son función de la dosis que recibe el receptor. Esto involucra tanto a la concentración como al tiempo de exposición a ella. Por ejemplo, la norma de calidad del aire de ozono correspondiente a una localidad se expresa así:

Concentración: 0.095 ppm

Periodo: 1 hora

Ambas cantidades son indispensables para especificar dicha norma, y significan que, en un lapso de 1 hora, la concentración promedio de 0.095 ppm no debe excederse. Obviamente, no sería válido contrastar concentraciones promediadas en periodos diferentes al que establece la norma con su valor de concentración correspondiente. En otras palabras, solo son comparables las concentraciones caracterizadas por el mismo periodo.

Tabla 4.6 Valores guía y objetivos intermedios de la OMS

Contaminante	Guía* OMS $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Periodo	Objetivos intermedios $\mu\text{g}/\text{m}^3$
PM <sub>2.5</sub>	10	1 año	35
PM <sub>2.5</sub>	25	24 h	75
PM <sub>10</sub>	20	1 año	70
PM <sub>10</sub>	50	24 h	150
O <sub>3</sub>	100	8 h	160
NO <sub>2</sub>	40	1 año	-
NO <sub>2</sub>	200	1 h	-
SO <sub>2</sub>	20	24 h	125
SO <sub>2</sub>	500	10 min	-
CO	10	8 h	-
CO	30	1 h	-

\* Concentraciones expresadas a 25 °C y 1 atmósfera de presión

Fuente: Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre (WHO, SDE, PHE, & OEH, 2005)

En México, la Secretaría de Salud es el órgano responsable de establecer los límites permisibles de concentración de los contaminantes en la atmósfera. La tabla 4.7 resume dichos valores con respecto a cada uno de los contaminantes criterio

Tabla 4.7 Normas de calidad del aire mexicanas

Contaminante	Norma Oficial Mexicana (NOM)	Descripción
Dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> )	<u>NOM-022-SSA1-2010</u> Publicada el 8 de septiembre de 2010	0.110 ppm, máximo promedio de 24 horas
		0.200 ppm, segundo máximo anual como promedio móvil de 8 horas
		0.025 ppm, promedio anual
Monóxido de carbono (CO)	<u>NOM-021-SSA1-1993</u> Publicada el 23 de diciembre de 1994	11.0 ppm, máximo anual como promedio móvil de 8 horas
Dióxido de nitrógeno (NO <sub>2</sub> )	<u>NOM-023-SSA1-1993</u> Publicada el 23 de diciembre de 1994	0.210 ppm, promedio horario
Ozono (O <sub>3</sub> )	<u>NOM-020-SSA1-2014</u> Publicada el 19 de agosto de 2014	0.095 ppm, promedio horario
		0.070 ppm, máximo anual del promedio móvil de 8 horas
Partículas suspendidas totales (PST)	<b>Derogada</b>	
Partículas menores a 10 micrómetros (PM <sub>10</sub> )	<u>NOM-025-SSA1-2014</u> Publicada el 20 de agosto de 2014	75 µg/m <sup>3</sup> , promedio 24 horas
		40 µg/m <sup>3</sup> , promedio anual
Partículas menores a 2.5 micrómetros (PM <sub>2.5</sub> )	<u>NOM-025-SSA1-2014</u> Publicada el 20 de agosto de 2014	45 µg/m <sup>3</sup> , promedio 24 horas
		12 µg/m <sup>3</sup> , promedio anual
Plomo (Pb)	<u>NOM-026-SSA1-1993</u> Publicada el 23 de diciembre de 1994	1.5 µg/m <sup>3</sup> , en un periodo de tres meses como promedio aritmético

## 4.1.8 Índice de calidad del aire

Las autoridades encargadas de administrar la calidad del aire de las zonas urbanas requieren proporcionar información al público sobre los niveles de contaminación del aire existentes por dos motivos fundamentales; por una parte, la implantación de un sistema de alerta ante una contingencia ambiental, en donde la tendencia creciente de los niveles de contaminación puede originar niveles de contaminación peligrosos a la salud de la población, depende de la respuesta de la ciudadanía ante dicho acontecimiento, y por consiguiente, se requiere de un método eficiente de comunicar al público los niveles de contaminación existentes. Por otra parte, el ciudadano tiene derecho a conocer la calidad del aire que respira, y de esta manera tomar decisiones de índole personal, por ejemplo, si le conviene o no ejercitarse, si debe vivir en alguna zona específica dentro de la ciudad o si le conviene vivir en otra localidad con menores niveles de contaminación.

El problema de comunicar niveles de contaminación al público es complejo debido al número de contaminantes que se monitorean y a la necesidad de comparar sus concentraciones con las normas de calidad del aire que, como se vio en la sección 4.2, se especifican por periodos distintos. Por otra parte, la calidad del aire no es uniforme dentro de la zona urbana ni estacionaria. Sin embargo, la autoridad necesita informar al público en un lenguaje no técnico los niveles de contaminación existentes, de preferencia mediante un número que funja como indicador de la calidad del aire. Esto se consigue mediante un índice de calidad del aire.

Aunque es abundante la literatura sobre índices de calidad ambiental, el índice denominado PSI, que en español significa *Índice Estándar de Polución*, se utiliza extensamente por muchos sistemas de administración de la calidad del aire como base para reportar niveles de contaminación en diferentes países. Por ejemplo, en México se emplea el Índice Metropolitano de Calidad del Aire, mejor conocido por sus siglas IMECA y en Estados Unidos, que es en donde se originó el PSI, se utiliza el AQI cuyas siglas en español significan Índice de Calidad del Aire. Este índice constituyó el remplazo del PSI, al modificarse las normas Estadunidenses de calidad del aire de ozono y partículas suspendidas, cuando se incorporó la norma para partículas suspendidas con diámetros menores de 2.5 micras o  $PM_{2.5}$ .

El PSI fue desarrollado por la agencia Norteamericana de Protección Ambiental, EPA, incorporando cinco contaminantes criterio, a saber: partículas suspendidas,  $O_3$ ,  $SO_2$ ,  $NO_2$  y CO. Para cada uno de estos contaminantes se calcula un subíndice utilizando funciones linealmente segmentadas que transforman sus concentraciones a una escala entre 0 y 500 unidades. Una función linealmente segmentada está constituida por segmentos de línea recta en donde los puntos de quiebre de cada segmento se obtienen tomando en consideración la norma y los criterios de calidad del aire. La figura 4.6 muestra la función linealmente segmentada que emplea el PSI correspondiente al CO.

Para generar las funciones linealmente segmentadas de los contaminantes mencionados se emplean los puntos de quiebre que se presentan en la tabla 4.9 y la siguiente ecuación

$$I_p = \frac{I_{Hi} - I_{L0}}{BP_{Hi} - BP_{L0}} (C_p - BP_{L0}) + I_{L0} \quad (4.5)$$

En donde

$I_p$	Índice del contaminante p
$C_p$	Concentración del contaminante p
$BP_{Hi}$	Punto de quiebre mayor o igual a $C_p$
$BP_{L0}$	Punto de quiebre menor o igual a $C_p$
$I_{Hi}$	Valor del índice correspondiente a $BP_{Hi}$
$I_{L0}$	Valor del índice correspondiente a $BP_{L0}$

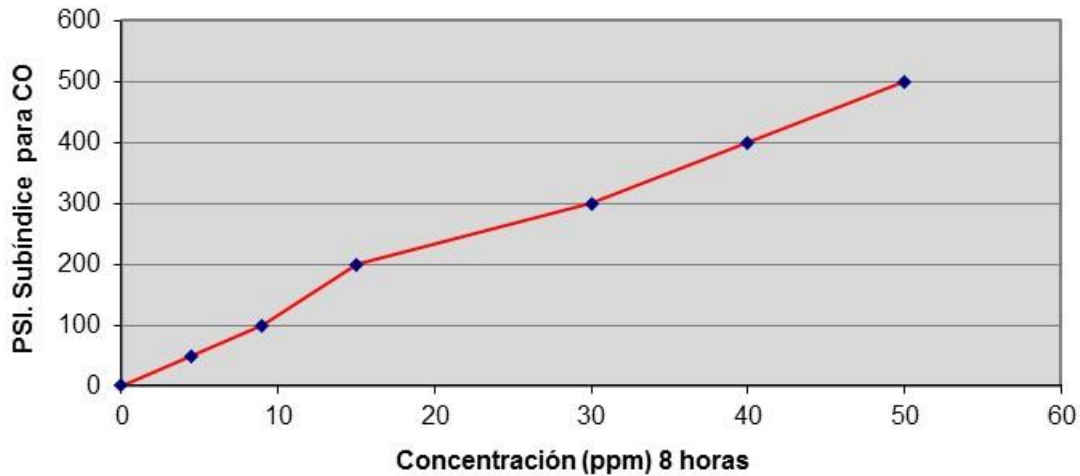


Figura 4.6 Función linealmente segmentada correspondiente a monóxido de carbono utilizada por el PSI

Una vez obtenidos los subíndices correspondientes a cada contaminante, el algoritmo que utiliza el PSI consiste en seleccionar el valor del subíndice dominante o mayor, lo cual tiende a evitar problemas de ambigüedad y ocultamiento típicos de índices que aglutinan los valores de dichos subíndices, por ejemplo, mediante el cálculo de cantidades promedio. El valor del subíndice dominante se reporta indicándose el nombre del contaminante responsable. Es decir, el PSI se obtiene como sigue:

$$PSI = \text{máximo}\{I_{O_3}, I_{PM}, I_{CO}, I_{SO_2}, I_{NO_2}\} \quad (4.6)$$

Conviene aclarar que la escala del PSI, que va de 0 a 500, es totalmente arbitraria; sin embargo, es importante mencionar que al valor de 100 le corresponden los valores de las normas de calidad del aire, y al valor de 500, los niveles de contaminación que causan daños significativos a la salud. De acuerdo con la anterior, un valor inferior a 100 implica la no excedencia de las normas de calidad del aire y por tanto la calidad del aire se considera aceptable, mientras que un valor cercano a 500 resulta peligroso para la salud.

Tabla 4.8 Escala y clasificación del PSI

PSI	Categoría
0 - 50	Buena
51 - 100	Moderada
101 - 200	Dañina a la salud
201 - 300	Muy Dañina a la salud
301 - 500	Peligrosa

A fin de reportar al público el índice, el PSI se divide en las cinco categorías mostradas en la tabla 4.8. Se puede observar en esta tabla que la descripción de cada categoría corresponde a una clasificación basada en los efectos nocivos de los contaminantes en la salud de la población. Nótese que los valores del PSI superiores a 300 ya se consideran como niveles peligrosos.

Tabla 4.9 Puntos de quiebre del PSI

Categoría	Buena	Moderada	Dañina a la salud	Muy dañina a la salud	Peligrosa	
Valor del índice	0 - 50	51 - 100	101 - 200	201 - 300	301 - 400	401 - 500
Contaminante	Concentraciones					
CO 8-h (ppm)	0 - 4.5	4.5 - 9*	9 - 15	15 - 30	30 - 40	40 - 50
NO <sub>2</sub> 1-h (ppm)	--	--	--	0.6 - 1.2	1.2 - 1.6	1.6 - 2.0
O <sub>3</sub> 1-h (ppm)	0 - 0.06	0.06 - 0.12*	0.12 - 0.20	0.20 - 0.40	0.40 - 0.50	0.50 - 0.60
PM <sub>10</sub> 24-h (µg/m <sup>3</sup> )	0 - 50	50 - 150*	150 - 350	350 - 420	420 - 500	500 - 600
SO <sub>2</sub> 24-h (ppm)	0 - 0.03	0.03 - 0.14*	0.14 - .030	0.30 - 0.60	0.60 - 0.80	0.80 - 1.0

\* Norma Norteamericana de calidad del aire.

Obsérvese en la tabla 4.9 que no están definidos los puntos de quiebre del NO<sub>2</sub> para valores del PSI menores de 200 puntos, ya que cuando se promulgó el índice, la EPA no disponía de una norma de corto plazo para este contaminante, por consiguiente, el subíndice correspondiente solo se obtiene a partir de los 201 puntos.



**Problema resuelto 4.3 Obtención del índice de calidad del aire PSI**

Obtenga el valor del PSI cuando únicamente se dispone de las siguientes concentraciones de ozono, partículas suspendidas y monóxido de carbono:

O <sub>3</sub> :	0.077 ppm durante 1 hora
PM <sub>10</sub> :	54.4 µg/m <sup>3</sup> durante 24 horas
CO:	8.4 ppm durante 8 horas

**Solución**

Nótese en la tabla 4.9 que las concentraciones de dichos contaminantes se encuentran entre los siguientes valores:

O <sub>3</sub> :	0.06 < 0.077 < 0.12 ppm
PM <sub>10</sub> :	50 < 54.4 < 150 µg/m <sup>3</sup>
CO:	4.5 < 8.4 < 9 ppm

Por tanto, se tienen los siguientes puntos de quiebre

O <sub>3</sub> :	BP <sub>Lo</sub> = 0.06 y BP <sub>Hi</sub> = 0.12
	<b>I<sub>Lo</sub> = 51 y I<sub>Hi</sub> = 100</b>
PM <sub>10</sub> :	BP <sub>Lo</sub> = 50 y BP <sub>Hi</sub> = 150
	<b>I<sub>Lo</sub> = 51 y I<sub>Hi</sub> = 100</b>
CO:	BP <sub>Lo</sub> = 4.5 y BP <sub>Hi</sub> = 9
	<b>I<sub>Lo</sub> = 51 y I<sub>Hi</sub> = 100</b>

De la ecuación 4.5 los subíndices correspondientes a los puntos de quiebre anteriores son los siguientes:

$$I_{O_3} = \frac{100 - 51}{0.012 - 0.06} (0.077 - 0.06) + 51 = 65$$

$$I_{PM_{10}} = \frac{100 - 51}{150 - 50} (54.4 - 50) + 51 = 53$$

$$I_{CO} = \frac{100 - 51}{9.0 - 4.5} (8.4 - 4.5) + 51 = 93$$

Utilizando la expresión 4.6 se calcula el índice como sigue:

$$PSI = \text{máximo}\{I_{O_3}, I_{PM_{10}}, I_{CO}\} = \text{máximo}\{65, 53, 93\} = 93$$

Este valor del PSI se corresponde con la clasificación “calidad del aire moderada”, siendo el monóxido de carbono el contaminante responsable.

Se dijo anteriormente que el PSI ha sido utilizado a nivel internacional como base para elaborar índices similares en diversos países. Obviamente, las diferentes implementaciones del índice se logran modificando la descripción de las categorías utilizadas para reportarlo y los puntos de quiebre de las funciones linealmente segmentadas, adaptándolos a las normas y criterios de calidad del aire de cada país. Por ejemplo, el índice de calidad del aire que se utiliza en México emplea cinco contaminantes criterio: dióxido de azufre, monóxido de carbono, dióxido de nitrógeno, ozono y partículas PM<sub>10</sub>. Este se representa con una escala que va de 0 a 500, donde el valor de 100 se asigna al valor indicado por la Norma Oficial Mexicana para cada contaminante. Un valor menor a 100 se considera satisfactorio y con un bajo riesgo para la salud. Cualquier nivel superior

a 100 implica riesgo para la salud, entre más grande es el valor del índice, mayor es el nivel de contaminación y riesgo. El índice se divide en cinco categorías, cada una corresponde a un intervalo y señala el nivel de riesgo para la salud. Lo anterior se muestra en la tabla 4.10.

Tabla 4.10 Categorías y descripción de niveles de riesgo a la salud del Índice de Calidad del Aire de México

Categoría	Intervalo	Mensaje	Significado
BUENA	<b>0-50</b>	<b>Sin riesgo</b>	La calidad del aire es satisfactoria y existe poco o ningún riesgo para la salud.
REGULAR	<b>51-100</b>	<b>Aceptable</b>	La calidad del aire es aceptable, sin embargo, en el caso de algunos contaminantes, las personas que son inusualmente sensibles pueden presentar síntomas moderados.
MALA	<b>101-150</b>	<b>Dañina a la salud de los grupos sensibles</b>	Quienes pertenecen a los grupos sensibles pueden experimentar efectos en la salud. El público en general usualmente no es afectado.
MUY MALA	<b>151-200</b>	<b>Dañina a la salud</b>	Todos pueden experimentar efectos en la salud; quienes pertenecen a los grupos sensibles pueden experimentar efectos graves en la salud.
EXTREMADAMENTE MALA	<b>&gt;200</b>	<b>Muy dañina a la salud</b>	Representa una condición de emergencia. Toda la población tiene probabilidades de ser afectada.

Fuente: Gaceta oficial del Distrito Federal. Norma Ambiental para el Distrito Federal, NADF-009-AIRE-2006 que establece los requisitos para elaborar el IMECA, noviembre 2006 (Gaceta, noviembre 2006)

## 4.1.9 Obtención de emisiones

Dada una fuente de contaminación, resulta esencial poder evaluar la cantidad de material emanado en términos de lo que se denomina la *emisión*, es decir, la cantidad de masa por unidad de tiempo emitida. La emisión puede evaluarse mediante cualquiera de los siguientes tres procedimientos:

Medición directa

Balance de masa

Empleo de factores de emisión

Indudablemente la forma ideal de cuantificar una emisión es midiéndola directamente. Sin embargo, el procedimiento para llevar a cabo lo anterior puede ser complicado y costoso, sobre todo tratándose de fuentes elevadas en donde es difícil su acceso y también en el caso de las *emisiones fugitivas*, es decir las emanaciones que no están contenidas dentro de un ducto como, por ejemplo, cualquiera de las fuentes naturales anteriormente mencionadas. Sin embargo, es importante destacar que la medición directa es el único método válido para verificar si se cumple con una *norma de emisión*.

Por otra parte, realizar un balance de masa considerando el proceso que origina la contaminación, es un método válido que suele utilizarse en situaciones específicas, particularmente en el caso de procesos industriales, pero que resulta impráctico si se tiene que evaluar una cantidad importante de fuentes para formar un inventario de emisiones, como, por ejemplo, las fuentes situadas en una zona urbana que suelen ser múltiples y muy diversas.

## Factores de emisión

El empleo de factores de emisión es un procedimiento habitual para estimar emisiones cuando no se pretende valorar el cumplimiento de la legislación ambiental, porque permite aplicarse a una variedad importante de fuentes diferentes de manera rápida y económica. Por ejemplo, una aplicación común del uso de factores de emisión es en la elaboración de un inventario de emisiones.

En términos generales, un factor de emisión es una cantidad que expresa el monto de material liberado durante un proceso en función de actividades fácilmente cuantificables asociadas a la emisión del contaminante. Estas actividades pueden ser el consumo de un combustible en una industria o la materia prima que ésta utiliza y que está asociada al proceso que da lugar a la emanación de contaminantes, el movimiento de un vehículo en términos de la distancia que recorre y su velocidad, etc. Para ejemplificar lo anterior la tabla 4.11 es una porción de la tabla 1.3.1 tomada de la AP- 42 de la EPA, que proporciona factores de emisión para la quema de combustóleo en fuentes de combustión externas, es decir en plantas termoeléctricas, calderas industriales y unidades de combustión domésticas e industriales.

En general, dado un factor de emisión FE, la emisión se calcula mediante la siguiente relación.

$$E = A \times FE \times (1 - ERE / 100) \quad (4.7)$$

en donde:

E = Emisión

A = Tasa de actividad

FE = Factor de emisión

ERE = Eficiencia de reducción de la emisión, %

La mayoría de los factores de emisión publicados se obtuvieron a partir de estudios en donde se llevaron a cabo balances de masa, simulaciones y pruebas y mediciones directas en campo, promediándose los resultados de manera que pudiera generalizarse lo más posible el proceso responsable de la emisión del contaminante. La generalización tiene su virtud: permite aplicarlo a condiciones y situaciones diversas; pero también tiene su debilidad; se trata sólo de una estimación y no de una medición directa en la fuente considerada.

Los factores de emisión publicados por la EPA han sido clasificados de acuerdo con el grado de confiabilidad que tienen, considerando que fueron obtenidos durante pruebas con condiciones muy diversas. Por ejemplo, la EPA califica a sus factores de emisión en el rango A–D. La clase A proporciona un factor de emisión relativamente confiable y la clase D un valor que puede utilizarse solo para dar una estimación del orden de magnitud de la emisión.

Una de las aplicaciones más valiosas de los factores de emisión es su utilización para estimar emisiones fugitivas, debido a que este tipo de estimaciones generalmente son muy costosas y difíciles de determinar; tómesese en cuenta que una emisión fugitiva no está encaminada dentro de un ducto que permita medir el flujo de gases asociado a la masa del contaminante evacuado. Por ejemplo, existen factores de emisión para actividades agrícolas, incendios forestales, la industria de la construcción y el movimiento vehicular en caminos con o sin pavimento que generan polvos. Sin embargo, como se dijo arriba estos factores de emisión deben utilizarse con precaución, debido a que gran parte de ellos han sido clasificados por la EPA con una baja valoración. El siguiente ejemplo ilustra el cálculo de la emisión mediante un factor de emisión.

**Problema resuelto 4.4 Obtención de emisiones utilizando factores de emisión**

Una central termoeléctrica de 1000 MW de capacidad de generación, quema combustóleo del N<sub>o</sub> 6 en quemadores con alimentación normal. El combustible tiene una densidad de 8 lb/gal, un poder calorífico de 150,000 BTU/gal y un contenido de azufre del 1.4%. Asumiendo que la eficiencia térmica de la planta es de 34% y que no se está utilizando equipo de control para limitar la emanación de dióxido de azufre

- a) Determine la emisión de este contaminante empleando un factor de emisión
- b) Compare el resultado obtenido en a) con el que se alcanzaría suponiendo que todo el azufre contenido en el combustible se oxida a SO<sub>2</sub>.

**Solución**

a) En este problema ERE = 0 y el proceso de contaminación corresponde a la combustión de combustóleo en calderas de más de 100 MBTU/h. Consultando el factor de emisión que proporciona la EPA para esta actividad y que se reproduce parcialmente en la tabla 4.11, el factor de emisión de SO<sub>2</sub> es: FE = 157S lb/10<sup>3</sup> gal  
 En donde S es el porcentaje de azufre en el combustible.

Dimensionalmente se puede observar que, de acuerdo con este factor de emisión, la tasa de actividad A corresponde al volumen de combustóleo en miles de galones por unidad de tiempo que se alimenta a la caldera. Este se obtiene calculando primero la potencia de entrada de la central:

Potencia de entrada = Potencia de salida / eficiencia  
 Potencia de entrada = 1000 MW / 0.34 = 2941 MW = 2.788 x 10<sup>6</sup> BTU/s  
 De modo que la tasa de actividad es

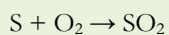
$A = \text{Potencia de entrada} / \text{Poder calorífico}$

$A = 2.778 \times 10^6 / 150000 = 18.52 \text{ gal/s} = 0.01852 \times 10^3 \text{ gal/s}$

y de la expresión 4.7 se obtiene la emisión siguiente

$E = A \times FE = 0.01852 \times 157 \times 1.4 = 4.0707 \text{ lb/s} = 1846.1 \text{ g/s}$

b) Se supondrá que todo el azufre contenido en el combustible se oxida a dióxido de azufre, así



lo que significa que por cada mol de azufre se genera un mol de dióxido de azufre. Como la masa molecular del S es 32 g/mol y el del SO<sub>2</sub> es 64 g/mol, se tiene que por cada gramo de azufre quemado se obtienen 2 gramos de SO<sub>2</sub>.

Ahora, utilizando el dato respecto a la densidad del combustóleo (8.0 lb/gal), la masa de azufre asociada a la tasa de inyección del combustible es

Azufre:  $18.52 \times 8.0 \times 0.014 = 2.07 \text{ lb/s} = 938 \text{ g/s}$

Dióxido de azufre:  $2 \times 938 = 1876 \text{ g/s}$

Aunque en general la emisión de SO<sub>2</sub> calculada empleando el factor de emisión es menor que la obtenida mediante estequiometría, debido a que el factor de emisión considera que no todo el azufre es oxidado a SO<sub>2</sub>, sino que una parte del azufre es oxidado a trióxido de azufre (SO<sub>3</sub>) y otra parte se emite en forma de sulfatos integrados a las partículas liberadas, la densidad del combustible juega un papel importante al hacer el cálculo estequiométrico. El valor de la densidad del combustóleo utilizado arriba corresponde con combustible sumamente pesado.

Tabla 4.11 Factores de emisión para la combustión de combustóleo en calderas con capacidad superior a los 100 millones de BTU/h.

Configuración de los quemadores (CCF) <sup>a</sup>	SO <sub>2</sub> <sup>b</sup>		SO <sub>3</sub> <sup>c</sup>		NO <sub>x</sub> <sup>d</sup>		CO <sup>e</sup>		Partículas filtrables <sup>f</sup>	
	FE Lb / 10 <sup>3</sup> gal	Calif.	FE Lb / 10 <sup>3</sup> gal	Calif.	FE Lb / 10 <sup>3</sup> gal	Calif.	FE Lb / 10 <sup>3</sup> gal	Calif.	FE Lb / 10 <sup>3</sup> gal	Calif.
Alimentación normal con aceite No. 6. (1-01-004-01), (1-02-004-01), (1-03-004-01)	157S	A	5.7S	C	47	B	5	A	9.19(S)+3.22	A
Alimentación normal con aceite No. 6. Quemador de bajo NO <sub>x</sub> (1-01-004-01), (1-02-004-01)	157S	A	5.7S	C	40	B	5	A	9.19(S)+3.22	A
Alimentación tangencial con aceite No. 6. (1-01-004-04)	157S	A	5.7S	C	32	B	5	A	9.19(S)+3.22	A
Alimentación tangencial con aceite No. 6. Quemador de bajo NO <sub>x</sub> (1-01-004-04)	157S	A	5.7S	C	26	E	5	A	9.19(S)+3.22	A
Alimentación normal con aceite No. 5. (1-01-004-05), (1-02-004-04)	157S	A	5.7S	C	47	B	5	A	10	B
Alimentación tangencial con aceite No. 5. (1-01-004-04)	150S	A	5.7S	C	32	B	5	A	10	B
Alimentación normal con aceite No. 4. (1-01-004-04), (1-02-004-04)	150S	A	5.7S	C	47	B	5	A	7	B
Alimentación tangencial con aceite No. 4. (1-01-005-05)	150S	A	5.7S	C	32	B	5	A	7	B
Alimentación con aceite No. 2. (1-01-005-01), (1-02-005-01), (1-03-005-01)	142S <sup>h</sup>	A	5.7S	C	24	D	5	A	2	A
Alimentación con aceite No. 2. LNB/FGR. (1-01-005-01), (1-02-005-01), (1-03-005-01)	142S <sup>h</sup>	A	5.7S	C	10	D	5	A	2	A

Fuente: AP-42. Compilation of Air Emission Factors, US EPA. Fifth Edition (AP-42, US EPA)

A continuación, se propone la realización de dos actividades que mejorarán la comprensión de los temas expuestos, mismas que se enuncian a continuación y que se detallan al final del capítulo.



**Actividad 4.3.**

**Estudio del video “Fuentes de emisión”**

**Después de ver el video mencionado contesta las preguntas planteadas**



**Actividad 4.4.**

**Estudio del video “Elementos del problema de contaminación atmosférica”**

**Con base en lo aprendido hasta ahora y el contenido del video propuesto, responde el cuestionario planteado**

## 4.2 Conceptos de meteorología

La atmósfera tiene un gran dinamismo; los flujos energéticos que provienen del sol y los que se intercambian entre la superficie de la tierra y la atmósfera tienen variaciones diurnas y espaciales considerables. Como consecuencia de lo anterior, los campos de temperatura de la atmósfera no son estacionarios ni homogéneos y dan como resultado la generación de patrones de vientos complejos y estructuras térmicas formadas por masas de aire estratificadas durante la noche y que tienden a disiparse durante el día.

En meteorología, la escala espacial y temporal de los fenómenos es de gran importancia. Dichos criterios permiten clasificarlos en *micro-escala*, *meso-escala* y *macro-escala* o *escala sinóptica*. Los fenómenos meteorológicos que se desarrollan a micro-escala abarcan hasta unos cuantos cientos de metros, como, por ejemplo, la formación de nubes y tornados. Por otra parte, los fenómenos a meso-escala comprenden desde decenas a unos cuantos cientos de kilómetros. Ejemplos típicos de fenómenos meteorológicos que se desarrollan a esta escala espacial son el establecimiento del *terral*<sup>11</sup>, las brisas marinas, los vientos valle–montaña y las inversiones térmicas que se describen más adelante. En contraste, la meteorología sinóptica engloba fenómenos del orden de cientos a miles de kilómetros, como el movimiento de sistemas climáticos que caracterizan a las zonas ciclónicas extra tropicales y frontales.

### 4.2.1 Estructura vertical de la troposfera

Según se explicó anteriormente, en la troposfera, que es la capa de aire más próxima a la superficie de la tierra, y que tiene una profundidad de entre 10 y 15 km, la temperatura tiende a decrecer con la altura. En promedio el ritmo de decrecimiento es de unos 6 °C/km. Sin embargo, existen porciones dentro de esta capa de aire en donde se invierte dicho comportamiento, tendiendo la temperatura a incrementarse con la altura y, por lo tanto, a mantener la atmósfera una estructura estratificada caracterizada por aire caliente arriba y frío abajo que inhibe los movimientos de convección, y por consiguiente la turbulencia atmosférica. Estos estratos se denominan *inversiones térmicas*. Desde el punto de vista del problema de contaminación del aire las inversiones térmicas son importantes porque impiden el mezclado y la dilución de los contaminantes. La figura 4.7 muestra una inversión térmica. En este caso obsérvese que el aire se encuentra más frío abajo que arriba de la capa de aire mostrada, por lo que la tendencia al mezclado del aire se encuentra

---

<sup>11</sup> El *terral* es el viento que se establece en zonas costeras durante la noche desde tierra adentro hacia el mar. En contraste, la brisa es el viento que ocurre durante el día, desde el mar hacia tierra adentro. Ambos patrones de viento, *terral* y brisa, se originan en zonas costeras debido al calentamiento diferencial entre tierra y mar.



impedida, propiciando que los contaminantes emitidos a nivel del suelo no se mezclen verticalmente.

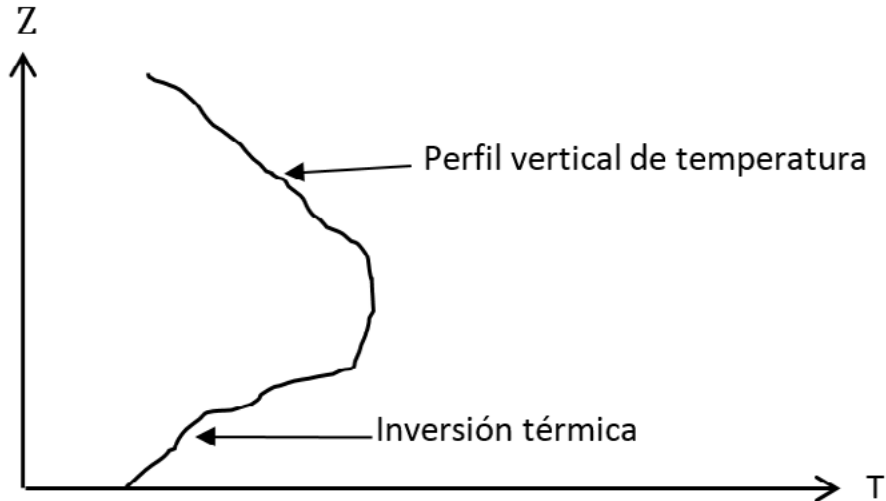


Figura 4.7 Perfil vertical de temperaturas de una inversión térmica

De acuerdo con el origen de las inversiones térmicas se les puede clasificar en inversiones *por radiación*, *por hundimiento* e inversiones *por penetración*.

De estas tres, la más común es la inversión térmica por radiación. Se trata de un fenómeno local originado por el enfriamiento, durante la noche, de la capa de aire más próxima a la superficie del suelo como consecuencia de la pérdida de energía radiante del suelo. Al enfriarse el suelo durante la noche, se enfría la capa de aire más próxima a éste, de manera que permanece aire relativamente caliente en la parte superior del estrato. Este tipo de inversión térmica, que comienza en la superficie del suelo, se denomina *inversión térmica superficial* y tiende a evolucionar al amanecer, ascendiendo paulatinamente, a medida que se calienta la superficie de la Tierra y se transfiere energía térmica a la masa de aire pegada al suelo, convirtiéndose en una *inversión térmica elevada*. Posteriormente, en el caso de que la temperatura de la superficie del suelo se incremente suficientemente durante el día, la inversión térmica se desvanecerá. Esta evolución de la inversión térmica por radiación se ilustra en la figura 4.8.

Adviértase que, si este fenómeno se da dentro de una zona urbana, en la madrugada, una vez que inicie la actividad industrial y vehicular, los contaminantes se verán atrapados, primero dentro de la inversión térmica superficial. Más adelante, en la mañana, al elevarse la inversión térmica, y con ella también la capa inicial de contaminación, se formará una capa de mezcla entre la base de la inversión térmica y la superficie del suelo, que también tenderá a atrapar a los contaminantes, porque la base de la inversión térmica que se ha elevado impide que los contaminantes la penetren. Posteriormente, al romperse la inversión térmica, cuando los rayos solares logren calentar suficientemente el aire más próximo a la superficie del suelo, los contaminantes podrán mezclarse vigorosamente, propiciándose la reducción de los niveles de contaminación.

Los lugares más propicios para que se generen este tipo de inversiones térmicas, son los sitios con temperaturas extremosas, con menores contenidos de vapor de agua, tales como los lugares

de gran altitud y las zonas desérticas. Es importante notar que el vapor de agua en la atmósfera juega un papel amortiguador de cambios bruscos de temperatura, debido a que absorbe la radiación infrarroja que emite, tanto la superficie terrestre como la atmósfera.

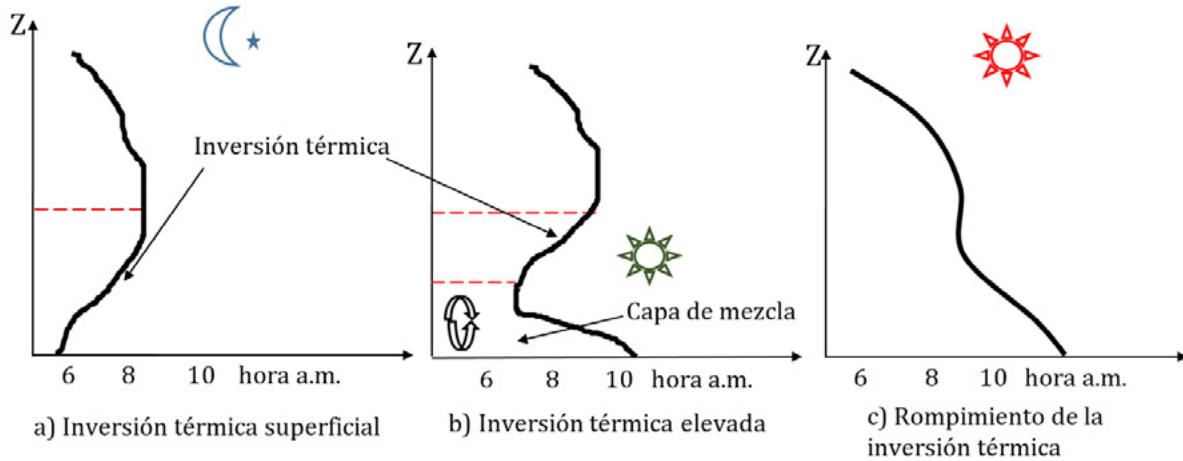


Figura 4.8 Inversión térmica por radiación y su evolución típica. En a) se presenta una inversión térmica superficial durante la madrugada. En b) la inversión térmica se eleva al amanecer y en c) se desvanece alrededor del mediodía.

Desde este punto de vista de la clasificación de la escala de los fenómenos meteorológicos que se describió anteriormente, las inversiones térmicas por radiación son sucesos locales que interesa estudiar a la meso-meteorología.

Como se explicó arriba, las inversiones térmicas también pueden originarse debido a la presencia de fenómenos de origen sinóptico, tal como, por ejemplo, la presencia semipermanente de las regiones de alta presión que residen sobre las franjas desérticas de la Tierra, alrededor de los 30 grados de latitud.

En estas zonas las corrientes de aire tienden a bajar y a calentarse por compresión adiabática, permaneciendo capas de aire relativamente frías cerca de la superficie del suelo y constituyéndose en una inversión térmica por hundimiento. En la figura 4.9 se ilustra el patrón general de circulación de los vientos y las celdas que se generan como consecuencia del calentamiento diferencial de la superficie terrestre; en latitudes cercanas al ecuador el aire tiende a subir, enfriándose al ascender, propiciando el desarrollo de nubes y lluvias; las zonas selváticas de la Tierra se encuentran en esta franja. En contraste, alrededor de los 30° el aire desciende, y como se mencionó arriba, éste se calienta provocando que el vapor de agua no se condense, originándose cielos despejados y climas secos, constituyéndose en un sistema subtropical de alta presión semipermanente; las zonas desérticas de la Tierra coinciden aproximadamente con estas latitudes.

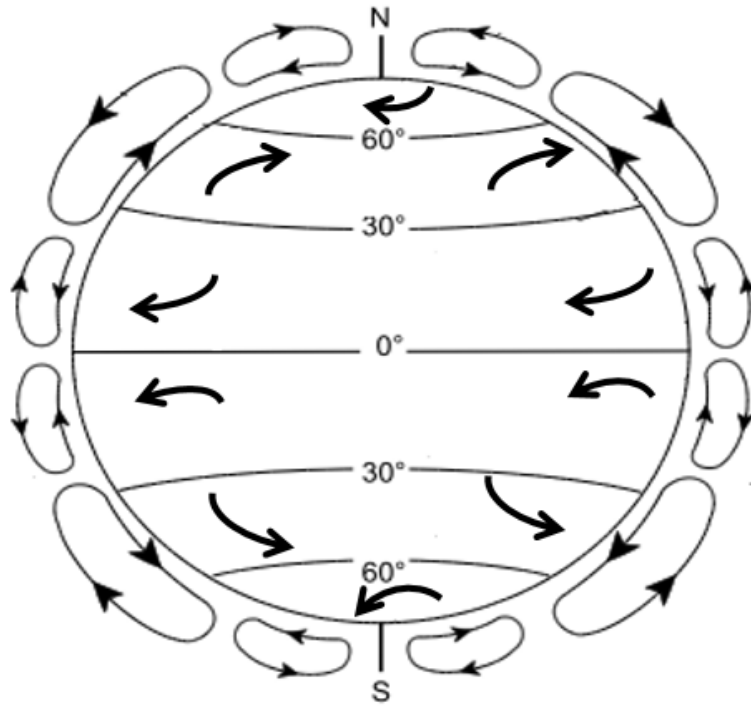


Figura 4.9 Patrón de circulación global de los vientos y formación de celdas

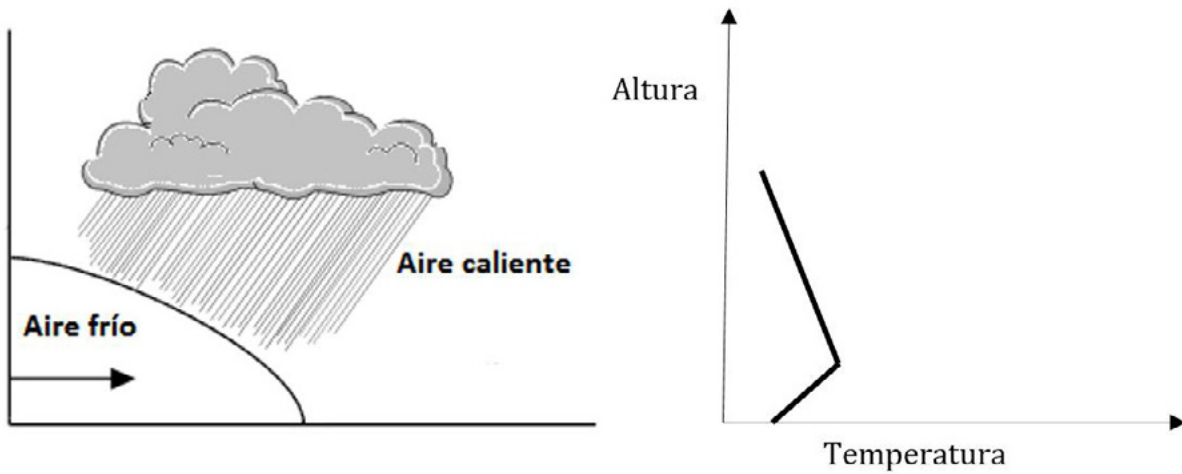


Figura 4.10 Desplazamiento de un frente frío y formación de una inversión térmica superficial por penetración. El aire frío ingresa empujando hacia arriba el aire caliente que al enfriarse propicia la condensación de agua y la formación de nubes homogenizar letras y nombrar ejes

Otros fenómenos, con escalas de influencia menor, del orden de los  $10^2$  km, que se mencionó anteriormente son designados con el nombre de meso-escala, por ejemplo, la migración hacia una región de un *frente frío*, también pueden propiciar la formación de las inversiones térmicas. El aire frío asociado al frente frío penetra deslizándose, debido a su mayor densidad, pegado a la superficie del suelo, permaneciendo el aire caliente en la parte superior de la masa de aire. Cuando esto sucede la masa de aire caliente que es desplazada hacia arriba se enfría dando lugar a la formación de nubes y precipitación. Este tipo de inversiones térmicas reciben el nombre de inversiones térmicas por penetración. La figura 4.10 muestra cómo se forma una inversión térmica del tipo superficial, cuando el aire frío penetra escurriéndose cerca de la superficie del suelo.

## 4.2.2 Estabilidad atmosférica

El concepto de *estabilidad atmosférica* se refiere a la capacidad que tiene la atmósfera de propiciar o inhibir movimientos de convección. Estos movimientos son los responsables de mezclar los contaminantes del aire y tienen su origen en el perfil vertical de temperaturas de la atmósfera. Como se explicó anteriormente, si la atmósfera cerca de la superficie del suelo presenta temperaturas más altas en su parte inferior que en la superior, ésta tenderá a mezclarse porque el aire caliente ascenderá y el frío descenderá. En otras palabras, la atmósfera será inestable. Por el contrario, si la temperatura es mayor en el estrato superior que en el inferior, dichos movimientos se inhibirán, de manera que el mezclado se restringirá y la atmósfera será estable.

Visto de una manera simplificada, las fuerzas que actúan sobre una *parcela de aire*<sup>12</sup> que se mueve verticalmente en la atmósfera, son la fuerza de gravedad y la fuerza de flotación o de Arquímedes (véase la figura 4.11). Si  $g$  representa la aceleración de la gravedad,  $a_p$  la aceleración vertical de la parcela de aire,  $\rho_p$  su densidad y  $\rho$  la densidad del aire circundante, entonces, de acuerdo con la Segunda Ley de Newton el balance de estas fuerzas es

$$\rho_p a_p = g(\rho - \rho_p)$$

Empleando la ecuación de los gases ideales, tanto para la parcela como para el aire circundante, en la forma siguiente

$$P = \rho R_p T$$

---

<sup>12</sup> Una parcela de aire es una masa de aire hipotética pequeña representativa de la atmósfera que actúa como un todo. El concepto de parcela de aire tiene por objeto estudiar su comportamiento al interactuar con otros elementos de la atmósfera en donde se mueve.

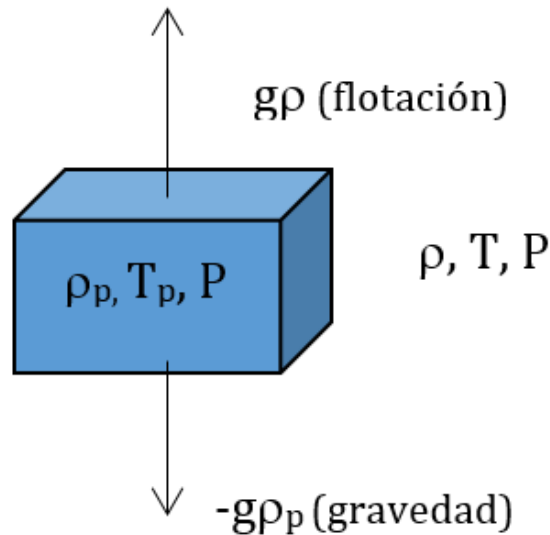


Figura 4.11 Fuerzas actuando sobre una parcela de aire

y si se considera que la presión de la parcela de aire es la misma que la de la atmósfera que la rodea, la ecuación anterior implica que

$$a_p = g \frac{T_p - T}{T} \quad (4.8)$$

Es decir, mientras que la temperatura de la parcela de aire sea diferente a la del aire que la rodea, ésta tenderá a acelerarse. Debido a que, como se dijo anteriormente, la temperatura varía con la altura, conviene expresar la ecuación anterior en función del gradiente térmico de la atmósfera  $dT/dz$ .

El problema que surge ahora es cómo representar la variación de la temperatura que sufre la parcela de aire al moverse verticalmente. Para ello se asumirá que el proceso de ascenso y descenso es *adiabático*, es decir, que la parcela al moverse permanece aislada térmicamente del exterior. Conviene percatarse que lo anteriormente dicho no significa que su temperatura permanezca constante, puesto que esta tenderá a variar al comprimirse o descomprimirse el aire dentro de ella por el trabajo realizado. El proceso de ascenso y descenso adiabático puede justificarse presumiendo que se trata de una parcela de *aire seco* que se desplaza suficientemente rápido para poder despreciar el intercambio de calor con sus alrededores. También se supondrá que la distribución de la presión de la atmósfera en la vertical sigue aproximadamente la relación aerostática ( $dP/dz = -\rho g$ ).

Al aplicar la primera ley de la termodinámica a la parcela de aire (constituida por un gas ideal seco) bajo condiciones adiabáticas, en la forma

$$c_{ev}dT_p = -Pdv_p$$

después de derivar ambos lados de la ecuación se obtiene

$$c_{ev} \frac{dT_p}{dz} = -P \frac{dv_p}{dz}$$

en donde  $c_{ev}$  es el calor específico a volumen constante y  $v_p$  el volumen específico de la parcela de aire ( $v_p = 1 / \rho_p$ ). Por otra parte, si ahora se deriva la ecuación de los gases ideales ( $Pv_p = R_p T_p$ ) con respecto a  $z$ , resulta que

$$P \frac{dv_p}{dz} + v_p \frac{dp}{dz} = R_p \frac{dT_p}{dz}$$

Combinando estas dos expresiones con la ayuda de la ecuación aerostática y la relación entre el calor específico a volumen y presión constante de un gas ideal ( $c_{ep} - c_{ev} = R_p$ ), se obtiene el siguiente resultado

$$\frac{dT_p}{dz} = - \frac{g}{c_{ep}} \tag{4.9}$$

La cantidad  $\Gamma \equiv g / c_{ep}$  es una constante meteorológica importante y tiene para la atmósfera terrestre el siguiente valor

$$\Gamma \equiv g / c_{ep} = 0.99 \text{ } ^\circ\text{C} / 100 \text{ m}$$

Integrando la expresión 4.9, de modo que en  $z = 0$ ,  $T_p = T_o$ , se obtiene la siguiente relación lineal entre la temperatura de la parcela de aire y la altura

$$T_p = T_o - \Gamma z \tag{4.10}$$

Por otra parte, si se designa por  $\Lambda$  a la variación vertical de la temperatura de la atmosfera, es decir:

$$\frac{dT}{dz} = -\Lambda$$

Entonces, integrando la ecuación anterior de modo que  $T = T_o$  en  $z = 0$

$$T = T_o - \Lambda z$$

Sustituyendo este resultado y la ecuación 4.10 en la ecuación 4.8 se llega a la expresión buscada

$$a_p = g(\Lambda - \Gamma) \frac{z}{T} \tag{4.11}$$

Nótese que se ha supuesto que en la superficie del suelo:  $T_o = T_p = T$

La expresión 4.11 es de fundamental importancia en meteorología. Esta indica que si la atmósfera presenta un gradiente  $\Lambda > \Gamma$ , entonces, una parcela que es empujada ya sea hacia arriba o hacia abajo, tenderá a acelerarse en la dirección correspondiente. En cambio, si  $\Lambda < \Gamma$ , en ambas situaciones se presentará una tendencia a desacelerarse. En el caso específico en el que  $\Lambda = \Gamma$ , como la parcela de aire no se acelera, ésta permanecerá con su velocidad inicial. Lo anterior permite definir el concepto de estabilidad atmosférica como se indica en la tabla 4.12 y se representa gráficamente en la figura 4.12

Tabla 4.12 Concepto de estabilidad atmosférica

Gradiente térmico	Condición de la atmósfera
$dT / dz > \Gamma$	Inestable
$dT / dz = \Gamma$	Neutral
$dT / dz < \Gamma$	Estable

Es interesante notar que, a una atmósfera isotérmica, que en la figura 4.12 estaría representada por una línea vertical, le corresponde una situación estable y no neutral, como podría suponerse en el caso de una columna de agua; es decir, una parcela de agua no estaría sujeta a aceleraciones en estas condiciones. Recuérdese que el aire es compresible, de manera que cambios pequeños de presión implican un enfriamiento o calentamiento de la parcela de aire al expandirse o contraerse, respectivamente. En el caso del agua, se puede suponer que es prácticamente incompresible, y por lo tanto, una parcela de agua no cambia su temperatura apreciablemente por éste concepto, a no ser que se desplace a profundidades considerables.

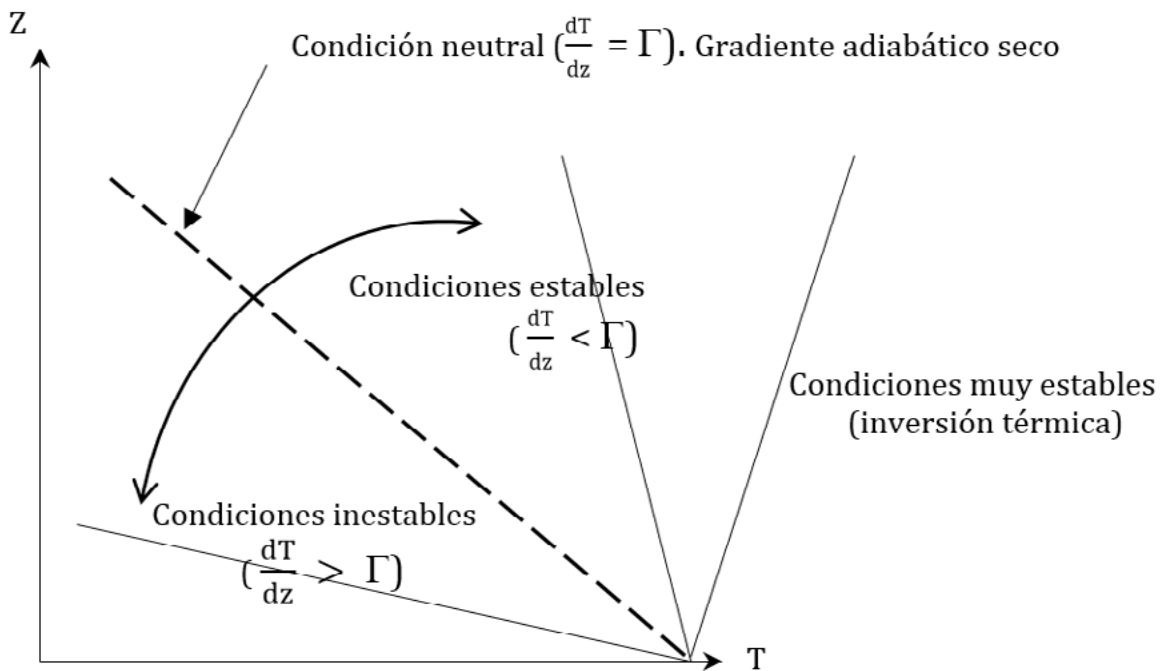


Figura 4.12 Representación gráfica del concepto de estabilidad atmosférica.



Para poder incorporar el concepto de estabilidad atmosférica cuantitativamente en el proceso de simulación de la contaminación, se le ha clasificado en seis categorías, denominadas *categorías de Pasquill*, las cuales se muestran gráficamente en la figura 4.13. Obsérvese que, de acuerdo con esta clasificación, la categoría A es la más inestable y la F la más estable.

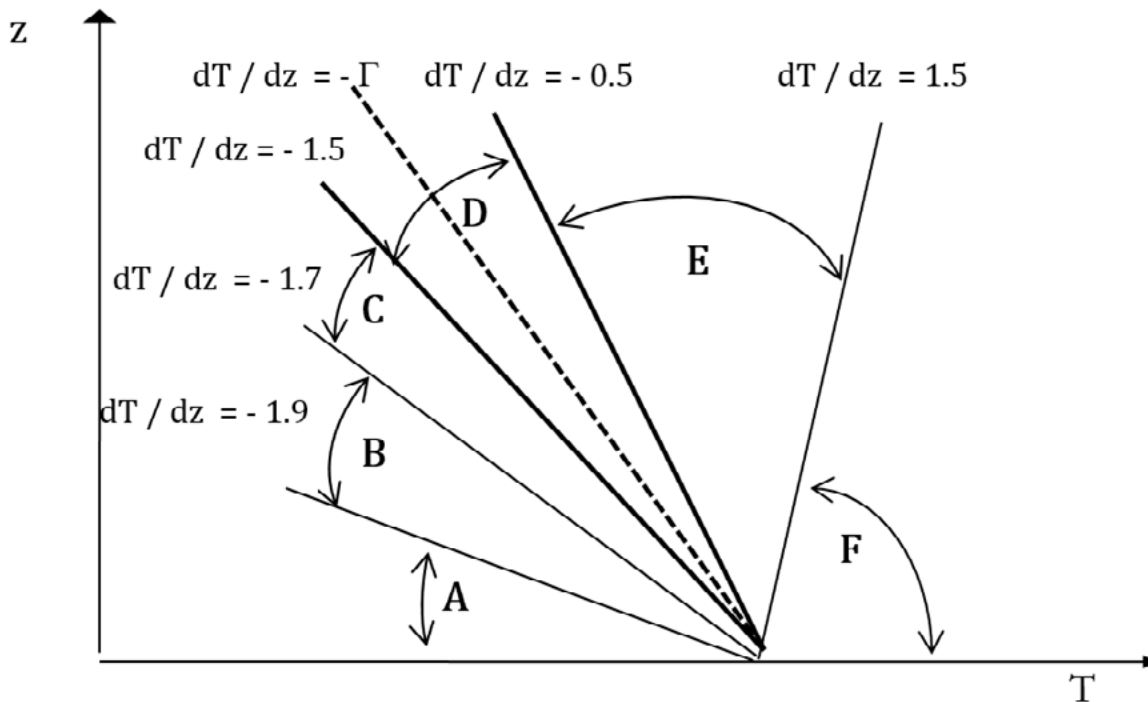


Figura 4.13 Representación gráfica de las categorías de estabilidad atmosférica de Pasquill

Tabla 4.13 Determinación de las clases de estabilidad atmosférica

Velocidad del viento superficial en m/s	Periodo diurno				Periodo nocturno <sup>b</sup>	
	Radiación solar incidente <sup>a</sup>				Fracción de cielo cubierto <sup>c</sup>	
	Fuerte	Moderada	Ligera	Débil		
	Índice de Radiación Neta					
	4	3	2	1	>1/2	≤1/2
< 0.7	A	A	B	C	F	F
0.8 - 1.8	A	B	B	C	F	F
1.9 - 2.8	A	B	C	D	E	F
2.9 - 3.3	B	B	C	D	E	F
3.4 - 3.8	B	B	C	D	D	E
3.9 - 4.8	B	C	C	D	D	E
4.9 - 5.4	C	C	D	D	D	E
5.5 - 5.9	C	C	D	D	D	D
≥ 6	C	D	D	D	D	D

<sup>a</sup> Véase la tabla 4.14 para la clasificación de la radiación solar.

<sup>b</sup> La noche se refiere al periodo comprendido entre una hora antes de la puesta del sol y una hora después de su salida.

<sup>c</sup> Con cielo totalmente cubierto y nubes bajas se debe de asumir la categoría D, día o noche.

Fuente: Meteorological Monitoring Guidance for Regulatory Modeling Applications (U.S.EPA, 2000)

En la práctica, medir el perfil térmico de la atmósfera es una tarea tardada y costosa. Debido a lo anterior, se ha establecido un sistema de clasificación basado en las observaciones rutinarias que efectúan los servicios meteorológicos convencionales. Este sistema reconoce que la turbulencia atmosférica y, por consiguiente, la estabilidad atmosférica depende de la intensidad de la radiación solar y de la velocidad del viento. En la tabla 4.14 se resume el sistema mencionado. (USEPA,2000)

Tabla 4.14 Clasificación de la radiación solar

Categoría	Angulo de altitud solar	Insolación solar		Índice de radiación neta*
	$\alpha$	Langley $\text{min}^{-1}$	Watt $\text{m}^{-2}$	
Fuerte	$> 60^\circ$	$> 1.0$	$> 700$	4
Moderada	$35 - 60^\circ$	$0.5 - 1.0$	$350 - 700$	3
Ligera	$15 - 35^\circ$	$< 0.5$	$< 350$	2
Débil	$< 15^\circ$			1

\* Para menos de 1/2 cielo cubierto

Como se puede apreciar en la tabla 4.14, la estabilidad atmosférica depende del nivel de insolación solar existente. Sin embargo, los servicios meteorológicos convencionales no efectúan dicha observación, por lo que es necesario recurrir a estimar el ángulo de altitud solar ( $\alpha$ ). Para ello se puede consultar la tabla 170 de Solar Altitude and Azimuth contenida en (Smithsonian, 1958)

Es evidente que la *nubosidad* juega un papel importante en modificar la insolación solar que alcanza la superficie del suelo, y por consiguiente debe considerarse para estimar la clase de estabilidad atmosférica que prevalece en un momento dado. En el concepto de nubosidad, está implícita tanto la fracción de cielo cubierto por las nubes como su altura. La primera se reporta directamente en los informes que proporcionan los servicios meteorológicos convencionales, usualmente en octantes de cielo cubierto. La segunda puede ser estimada mediante métodos visuales o instrumentos más precisos llamados *cielómetros* que utilizan fuentes luminosas o láseres dirigidos a la base de las nubes.

Con estos antecedentes se procederá ahora a describir el procedimiento desarrollado por Turner para estimar clases de estabilidad atmosférica.

Primero se debe calcular el ángulo de altitud del Sol y su hora de salida y puesta, usando los procedimientos previamente mencionados. En el periodo nocturno (*una hora antes de la puesta del Sol y una hora después de su salida*), se utiliza directamente la tabla 4.13. Durante el periodo diurno y si la nubosidad es menor de  $\frac{1}{2}$  de cielo cubierto, se asignan los índices de radiación neta con los criterios que se exponen en la tabla 4.14 y posteriormente se procede a usar la tabla 4.13. Sin embargo, en el caso de que la nubosidad sea mayor a la cantidad indicada, es necesario realizar las siguientes correcciones. Si el cielo *no está totalmente nublado*, las clases de insolación solar se reducen una categoría cuando las nubes se encuentran entre los 2000 y 5000 metros de altura, y dos categorías si se trata de nubes bajas, situadas a menos de 2000 metros.

Por otra parte, con cielo totalmente nublado y nubes situadas a más de 5000 metros de altura, las clases de insolación se reducen una categoría, y dos categorías si las nubes se encuentran entre los 5000 y 2000 metros de altura. Como se indica en la tabla 4.12, en el caso de presentarse cielo cubierto con nubes bajas (menos de 2000 metros de altura), no es necesario calcular el índice de radiación y se asume que prevalece la categoría de estabilidad atmosférica neutral D. Finalmente, una vez obtenidos los índices de radiación mencionados, las categorías de estabilidad correspondientes se obtienen usando la tabla 4.13.

La altura de las nubes se puede determinar en función del tipo de nube observada; por ejemplo, las nubes denominadas “cirrus”, son nubes altas que se forman a más de 5000 m de altura y que se observan arrizadas formando rayas o líneas en el cielo. En contraste, las nubes llamadas “cúmulos” son nubes que se forman a baja altura, a menos de 2000 m sobre el nivel del suelo, observándose como masas densas de color blanco separadas con contornos bien delimitados.

**Problema resuelto 4.5 Obtención de categorías de estabilidad atmosférica**

Obtenga las categorías de estabilidad atmosférica que prevalecen en la Ciudad de México el día 10 de marzo de 2018, bajo las siguientes condiciones meteorológicas:

- 1) 7:00 h con el cielo totalmente despejado y vientos de 2 m/s
- 2) 17:30 h con el cielo totalmente nublado con Altocúmulos y vientos de 3 m/s
- 3) Día totalmente despejado con vientos de 5.2 m/s a las 11:00 h.
- 4) Día con 6/8 de cielo cubierto con Altocúmulos y vientos de 3 m/s a las 11:00 h.

**Solución**

Primero se procederá a calcular el ángulo cenital solar existente a la 11:00 h y la hora a la que aparece y se pone el sol el día 10 de marzo. La Ciudad de México se encuentra a aproximadamente a  $19^\circ$  N y a una longitud de  $100^\circ$  Oeste. El meridiano de la zona de tiempo que le corresponde es de  $105^\circ$  Oeste. De la tabla 170 de Solar Altitude and Azimuth consultada, como se indicó anteriormente, el ángulo de altitud solar es  $58.2$  grados y el Sol sale a las 6.4 horas y se pone a las 18.2 horas.

- 1) El Sol sale a las 6.4 horas. Sin embargo, se considera que es de noche hasta las 7.4 de la mañana. Por lo tanto, de la tabla 4.13, le corresponde la clase F de estabilidad atmosférica.
- 2) Aunque el Sol se pone a las 18.2 horas y por tanto las 17:30 h debe considerarse dentro del periodo nocturno, y debido a que el cielo se encuentra totalmente cubierto de nubes bajas, le corresponde la categoría de estabilidad atmosférica D. (véase el pie de nota de la tabla 4.13)
- 3) De la tabla 4.14, la insolación solar es moderada, correspondiéndole un índice de radiación neta de 3. Por otra parte, como está totalmente despejado, se debe de usar ahora la tabla 4.13, de donde se obtiene una categoría de estabilidad atmosférica C.
- 4) Como en el inciso anterior, el índice de radiación neta tiene un valor de 3, sin embargo, éste debe ser corregido de acuerdo con la nubosidad prevaleciente. Los Altocúmulos son nubes de altitud media que se forman aproximadamente entre los 2000 y 7000 metros de altura, de modo que el índice de radiación neta debe reducirse 1 categoría; es decir, le corresponde un índice de radiación neta de 2, y consultando la tabla 4.13, la clase de estabilidad correspondiente es la C.

### 4.2.3 Capa de mezcla

La capa de aire atrapada entre la superficie del suelo y la base de una inversión térmica elevada se conoce con el nombre de *capa de mezcla*. Obsérvese que esta capa evoluciona durante el día, desde un valor mínimo, que puede ser cero, dependiendo de si se trata de una zona rural o urbana, a un valor máximo, que puede ser de varios kilómetros de altura (véase la figura 4.14).

Una característica de las zonas urbanas es que al presentar mayor temperatura que las zonas rurales circundantes, fenómeno que se denomina *isla de calor*, generan una pequeña capa de mezcla, de unas cuantas decenas de metros. Esto se ilustra en la figura 4.14, en donde se observa en b) que la capa de mezcla se encuentra acotada en la parte superior por una inversión térmica elevada. La isla de calor se origina debido a que las áreas urbanas tienden a absorber más energía calorífica que las rurales, como consecuencia de la presencia de zonas asfaltadas y construcciones de materiales absorbentes de la radiación solar, aunado a la generación de calor dentro de ellas, de manera que, al ascender el aire caliente pegado al suelo, se mezcla dentro de esta capa de aire. La isla de calor se observa principalmente durante la noche, que es cuando se presenta el mayor contraste de temperaturas entre las áreas urbanas y rurales.

Varios métodos han sido publicados para estimar la altura de la capa de mezcla. Cuando se dispone de un perfil térmico de la atmósfera generado por un radio-sondeo<sup>13</sup>, puede recurrirse al método de Holzworth, (J. Appl. Meteor 6, 1039-1044, 1967) que se describe a continuación:

El método de Holzworth, se basa en la determinación de dos valores de la capa de mezcla; uno por la mañana que corresponde a la altura de capa de mezcla mínima  $L_{\min}$ , y otro por la tarde que corresponde a la altura de capa de mezcla máxima  $L_{\max}$ . En ambos casos se utiliza el radio-sondeo proporcionado a las 12:00Z<sup>14</sup>, que corresponde al perfil de temperaturas matutino en el tiempo del Centro de México. Para obtener el valor mínimo en una zona urbana, primero se traza, a partir de la temperatura superficial mínima del día más 5 °C, el gradiente adiabático seco hasta interceptar el perfil matutino de temperaturas observado. El incremento de 5 °C tiene por objeto tomar en cuenta el efecto de la isla de calor que se explicó anteriormente, considerando que el perfil de temperaturas mencionado corresponde a una zona rural en donde usualmente se ubica un aeropuerto con estación meteorológica capaz de efectuar radio-sondeos de la atmósfera.

---

<sup>13</sup> Un radio-sondeo consiste en la exploración directa de la atmósfera mediante la liberación de un globo-sonda desde la superficie del suelo. El globo asciende hasta alturas cercanas al límite superior de la troposfera y va dotado de sensores de temperatura y otros parámetros meteorológicos, así como un radio transmisor que envía la información a la estación meteorológica en tierra.

<sup>14</sup> El tiempo Z se utiliza a nivel internacional para especificar que todas las mediciones meteorológicas deben realizarse simultáneamente. El tiempo Z es en referencia al meridiano de 0° de longitud que pasa por Greenwich, Reino Unido. Relativo al tiempo del Centro de México, las 12:00Z corresponde a las 6 am.

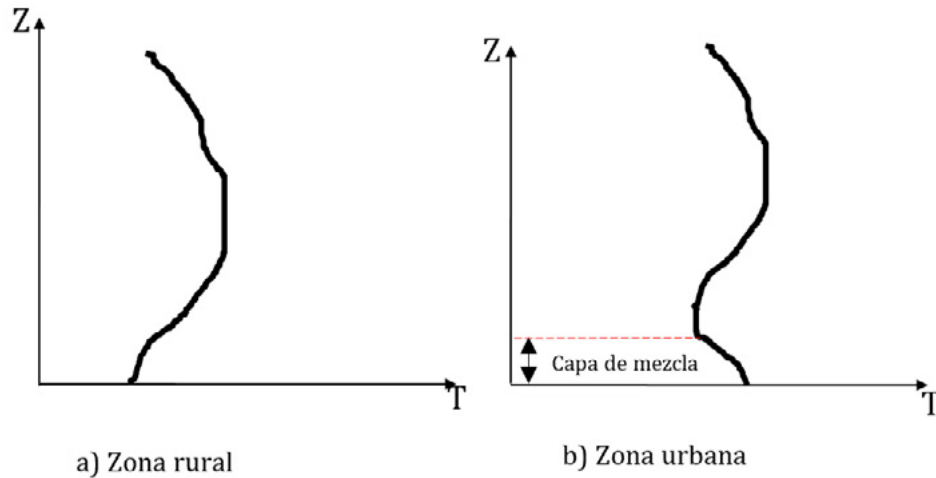


Figura 4.14 Perfil de temperaturas matutino típico en zonas rurales y urbanas. La isla de calor presente en la zona urbana genera una pequeña capa de mezcla de unas cuantas decenas de metros.

El valor máximo  $L_{max}$  se obtiene en forma similar, se intercepta el perfil matutino mencionado con gradiente adiabático seco construido a partir la temperatura superficial máxima del día. La distancia vertical que corresponde con el punto de intercepción constituye la altura de la capa de mezcla. El método de Holzworth se ilustra en la figura 4.15.

Como la capa de mezcla evoluciona durante día entre los dos valores previamente calculados, se pueden obtener los valores intermedios utilizando un procedimiento basado en la interpolación.

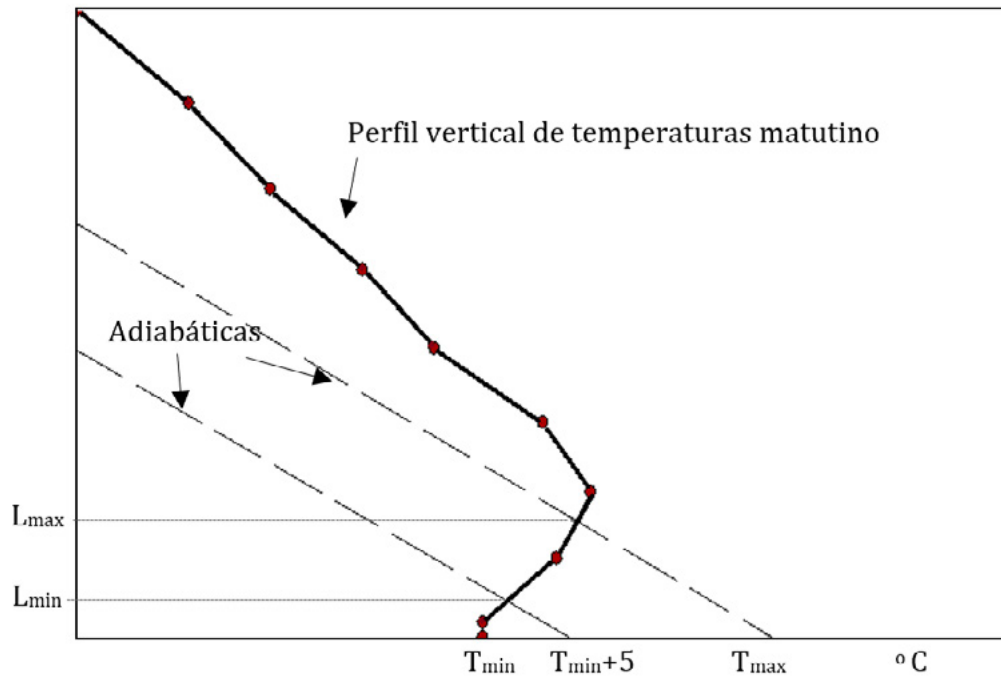


Figura 4.15 Método de Holzworth para determinar la capa de mezcla máxima  $L_{max}$  y mínima  $L_{min}$  en una zona urbana.

## 4.2.4 Vientos

La distribución de los vientos en la vertical juega un papel importante en la dispersión y el transporte de los contaminantes. Debido a la viscosidad del aire, la velocidad del viento presenta un perfil vertical característico, el cual depende de la rugosidad del terreno y de la estabilidad atmosférica, con velocidades que tienden a incrementarse con la altura.

En terrenos rugosos, como por ejemplo los que caracterizan a una zona urbana, o a una región rural boscosa, la turbulencia mecánica que generan los obstáculos asociados a la rugosidad del terreno propicia que la velocidad del viento varíe con la altura de manera menos pronunciada que en una zona de baja rugosidad. Una fórmula empírica muy utilizada que permite describir el fenómeno aludido es la siguiente

$$u_z = u_o \left( \frac{z}{z_o} \right)^p \quad (4.12)$$

en donde  $u_z$  y  $u_o$  son las velocidades del viento a las alturas  $z$  y  $z_o$  (por convención internacional  $z_o=10$  m), respectivamente, y  $p$ , es un coeficiente empírico que depende de la rugosidad del terreno y de la clase de estabilidad atmosférica prevaleciente. Esta expresión está restringida hasta alturas de aproximadamente 200 m sobre el suelo.

En la tabla 4.15 se presentan valores de dicho coeficiente para rugosidades típicas de zonas rurales y urbanas.

Los vientos están caracterizados no únicamente por su intensidad, sino también por su dirección. La disminución del efecto de la fuerza de fricción sobre el movimiento del aire en el suelo disminuye con la altura, originando que la fuerza de Coriolis comience a ejercer una influencia notable sobre el movimiento del aire. Debido a que esta fuerza únicamente actúa para desviar el movimiento de cuerpos que se mueven en un sistema de referencia que se encuentra en rotación, como lo es la Tierra, el viento tiende a cambiar su dirección en la medida en que se incrementa su velocidad, es decir a mayor altura.

Tabla 4.15 Exponente  $p$  del perfil vertical de los vientos, ecuación 4.12

Clase de estabilidad atmosférica	Zona urbana	Zona rural
A	0.15	0.07
B	0.15	0.07
C	0.20	0.10
D	0.25	0.15
E	0.30	0.35
F	0.30	0.55



## 4.3 Métodos de simulación

El fenómeno de la contaminación atmosférica puede simularse empleando diferentes tipos de modelos. Entre los más importantes destacan los siguientes:

1. Modelos de caja
2. Modelos de pluma gaussiana
3. Modelos numéricos
4. Modelos estadísticos

Los modelos de caja son modelos elementales que han sido utilizados primordialmente para estimar el comportamiento de la calidad del aire de zonas urbanas. Este tipo de modelo divide la zona urbana en una serie de celdas bien mezcladas, de modo que, mediante la aplicación del principio de conservación de la masa y la ley de acción de masas, ambas estudiadas en el libro Ingeniería Ambiental - Fundamentos, capítulo 3, se procede a determinar la evolución de las concentraciones de contaminantes reactivos y no reactivos en cada celda al interactuar éstas entre sí, por el efecto de los vientos dominantes en la zona. Cada celda recibe contaminantes de la celda existente viento arriba y del flujo másico generado dentro de ella, derivado de la contribución de múltiples fuentes móviles y fijas, que conforman una fuente de área. La altura de las celdas se corresponde con la altura de la capa de mezcla, y por tanto, tiene el comportamiento mostrado en la figura 4.8. Además, se puede incorporar un término de transformaciones que permita simular el mecanismo apropiado de reacciones químicas o fotoquímicas en cada una de las celdas. La figura 4.16 enseña un modelo de esta índole con tres celdas como las descritas abarcando la totalidad de una zona urbana.

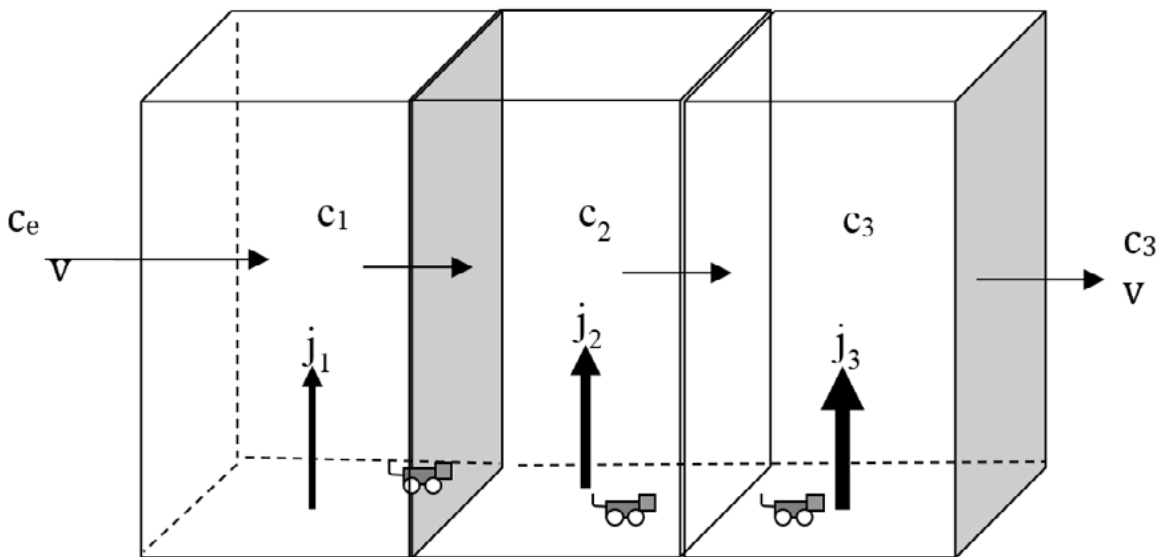


Figura 4.16 Método de celdas mezcladas abarcando una zona urbana.

El problema 3.5 del capítulo 3 del libro Ingeniería Ambiental - Fundamentos, plantea el caso de un modelo de una sola caja; conviene resolverlo con objeto de entender su funcionamiento. Actualmente los modelos de caja se utilizan escasamente, si bien tienen la ventaja de que no exigen grandes cantidades de datos para implementarlos.

Uno de los primeros modelos en emplearse, particularmente a partir de mediados del siglo XX, fueron los modelos de *pluma gaussiana*, también conocidos como *modelos gaussianos*. En la actualidad este tipo de modelos se siguen utilizando frecuentemente debido a su sencillez, versatilidad y escasa información demandada en el momento de su aplicación. Adicionalmente, son sumamente útiles para llevar a cabo una auscultación preliminar del impacto provocado por fuentes específicas como se explica más adelante. Estos modelos se basan en la suposición de que la pluma generada por una fuente puntual se distribuye como una campana de Gauss en las direcciones perpendiculares a la dirección del viento, es decir, en el plano vertical y horizontal perpendicular a la dirección de viento, como se muestra en la figura 4.17. Se verá posteriormente que existen varias versiones de los modelos gaussianos que se caracterizan por estar fundamentadas en esta consideración.

Una cualidad importante de destacar del modelo de pluma gaussiana es que puede simplificarse de tal manera que se garantiza la sobrestimación de una predicción del impacto a la calidad del aire hecha con él. Esta característica, junto con la escasa información meteorológica que demanda debido a su simplificación, hace posible utilizarlo como un *modelo exploratorio*. Un modelo de esta naturaleza permite evaluar el impacto máximo posible, y como consecuencia de lo anterior, decidir si es o no necesario recurrir a un modelo más avanzado; es evidente que, si el impacto máximo posible no es significativo, se puede concluir el proceso de simulación.

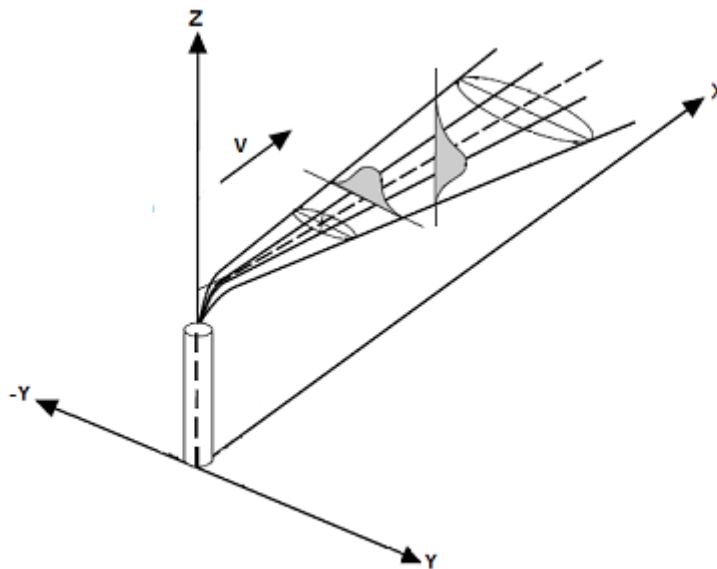


Figura 4.17 Modelo de pluma gaussiana. En las direcciones transversales a la dirección del viento la distribución de las concentraciones son campanas de Gauss

En otras palabras, el proceso de simulación para la evaluación de impactos a la calidad del aire primero utiliza un modelo exploratorio, de manera que, si el impacto a la calidad del aire provocado por una fuente específica resulta pequeño, es innecesario utilizar un modelo refinado. Los modelos refinados son más costosos debido a los requerimientos de cómputo y especialmente a la calidad y cantidad de información que debe suministrárseles. La obtención de información confiable y su procesamiento apropiado es uno de los aspectos más costosos del proceso de simulación de la calidad del aire.

Por otra parte, en el caso de que los impactos que predice el modelo exploratorio se consideren significativos, por ejemplo, porque se exceden las normas de calidad del aire, entonces, éstos deberán descartarse debido a la sobrestimación del impacto mencionada arriba, y por consiguiente se justifica recurrir a un modelo refinado que permita evaluar con precisión los efectos que ocasiona la fuente considerada. Los modelos refinados, como por ejemplo los modelos numéricos, tienen como características las siguientes:

- a) Son complejos
- b) Permiten obtener resultados precisos
- c) Demandan cuantiosa información confiable

En contraste, los modelos exploratorios poseen los siguientes atributos:

- a) Son sencillos
- b) Tienden a sobrestimar el impacto
- c) Requieren escasa información para su aplicación

Por consiguiente, este tipo de modelos permiten el ahorro de tiempo y recursos económicos significativos. La figura 4.18 resume el papel que juega un modelo de tipo exploratorio en el proceso de simulación de impactos a la calidad del aire generados por fuentes específicas.



Figura 4.18. Elementos del proceso de simulación para la evaluación de impactos a la calidad del aire provocados por fuentes específicas. El modelo exploratorio permite ahorrar tiempo y recursos económicos significativos

Los métodos para calcular el impacto a la calidad del aire que se presentan en la siguiente sección corresponden a modelos de tipo exploratorio mencionados.

### 4.3.1 Modelos de pluma gaussiana

Una característica del material que se dispersa a partir de una fuente puntual es que sigue aproximadamente una distribución gaussiana. Esta suposición se utilizará en los métodos que se exponen a continuación.

Desde el punto de vista del tiempo que dura la emisión de materiales a la atmósfera, las técnicas de simulación pueden clasificarse en modelos de fuente instantánea, de corta duración y de emisión continua.

La fuente instantánea y de corta duración de sustancias tóxicas o inflamables a la atmósfera puede ocurrir accidentalmente durante una explosión o una fuga rápida de material a la atmósfera derivada de un accidente; por ejemplo, la ruptura de una válvula de seguridad de un tanque de almacenamiento, la fuga ocasionada por tuberías en mal estado, etc. En este contexto, es importante destacar la emisión de materiales que pueden ser inflamables; es decir, cuando las concentraciones de la sustancia alcanzan límites de inflamabilidad denominados *límite inferior de inflamabilidad (LII)* y *límite superior de inflamabilidad (LSI)*, entre los cuales se puede propagar una deflagración en contacto con una fuente de ignición, propiciándose un incendio o una explosión. Estos límites constituyen las concentraciones de un gas inflamable presente en el aire, sobre o debajo de los cuales no ocurre propagación de la flama cuando se encuentra en contacto con una fuente de ignición; es decir, dentro de estos límites el material se inflama en presencia de dicha fuente, de manera que, abajo del LII se considera que la mezcla es "demasiado pobre" y arriba del LSI es "demasiado rica" para inflamarse; por ejemplo, el propano ( $C_3H_8$ ) tiene un LII = 2.2% y un LSI = 9.5% a 1 atmósfera y 20 °C; estos porcentajes constituyen fracciones volumétricas presentes en aire. La figura 4.19 enseña, mediante el trazo de líneas de igual concentración, los límites superior e inferior de inflamabilidad cuya construcción se presenta en el ejemplo 4.6.

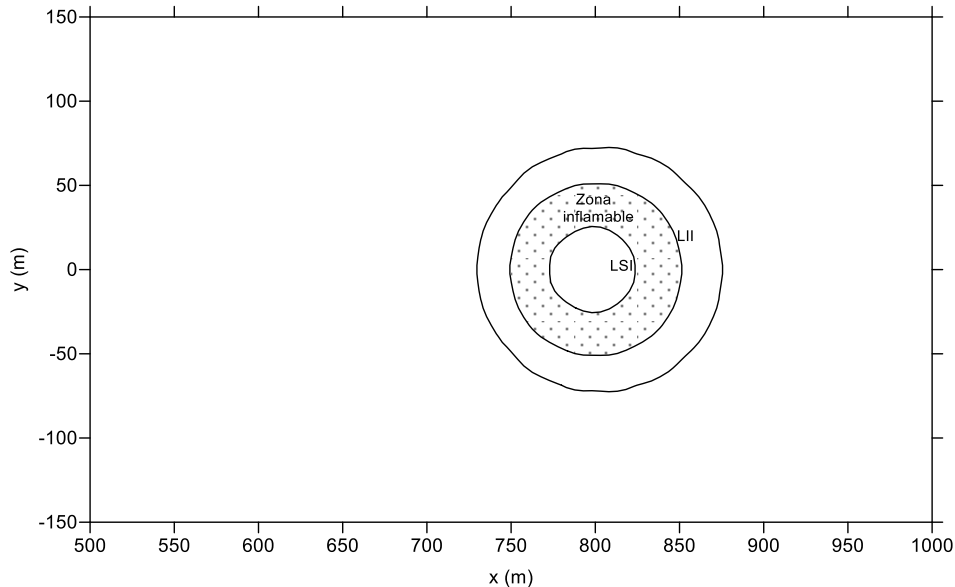


Figura 4.19 Zona inflamable delimitada por el límite superior de inflamabilidad (LSI) y el límite inferior de inflamabilidad (LII)

## Emisión instantánea

La siguiente ecuación describe la evolución y dispersión de una nube de material procedente de una fuente instantánea:

$$c(x, y, z, t) = \frac{q}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} e^{-(x-ut)^2/2\sigma_x^2} e^{-y^2/2\sigma_y^2} (e^{-(z-h)^2/2\sigma_z^2} + e^{-(z+h)^2/2\sigma_z^2}) \quad (4.13)$$

Estas variables están definidas de la manera siguiente

- c concentración en g/m<sup>3</sup>
- q emisión en gramos
- h altura de la fuente
- u velocidad del viento en m/s
- x distancia viento abajo en m
- y distancia en el plano horizontal transversal al viento en m
- z distancia vertical transversal al viento en m
- $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  desviaciones estándar viento abajo y transversal al viento en el plano horizontal y vertical, respectivamente en m

Conviene tener presente que la velocidad del viento  $u$  se dirige en el sentido del eje  $x$ , y que el material liberado  $q$  tiene unidades de masa.

Usualmente se está interesado en conocer el nivel de contaminación a nivel del suelo, es decir en  $z = 0$ , lo que transforma la ecuación 4.13 en

$$c(x, y, z = 0, t) = \frac{2q}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} e^{-(x-ut)^2/2\sigma_x^2} e^{-y^2/2\sigma_y^2} e^{-h^2/2\sigma_z^2} \quad (4.14)$$

En otras palabras, la ecuación 4.14 representa al campo de concentraciones generado a nivel de suelo como consecuencia de una emisión instantánea de material a la atmósfera desde una altura  $h$ .

Uno de los aspectos más importantes de resaltar de las anteriores ecuaciones es la procedencia de las desviaciones estándar  $\sigma_x, \sigma_y$  y  $\sigma_z$ . Desde el punto de vista práctico es usual el uso de expresiones empíricas que dependen de la estabilidad atmosférica y la distancia viento abajo entre la fuente y el receptor  $x$ . Por otra parte, en el caso particular de la desviación estándar paralela a la dirección del viento  $\sigma_x$ , es habitual suponerla aproximadamente igual a la desviación estándar transversal al viento  $\sigma_y$ . La tabla 4.16 (Peterson, 1982) presenta el conjunto de coeficientes  $a, b, c, d$  que generan  $\sigma_y$  y  $\sigma_z$  en función de las categorías de estabilidad de Pasquill y la distancia  $x$  empleando ecuaciones de la forma:

$$\sigma_y = ax^b \quad (4.15)$$

$$\sigma_z = cx^d \quad (4.16)$$

Es importante mencionar que las sigmas que se obtiene mediante esta tabla corresponden a emisiones cuasi instantáneas en donde la distancia  $x$  no debe exceder aproximadamente 4 km.

**Problema resuelto 4.6 Rompimiento de una válvula de seguridad**

El rompimiento de una válvula de seguridad de un tanque de almacenamiento que se encuentra a nivel de piso provoca la liberación de 50 g de cloro hacia la atmósfera de manera instantánea. El accidente ocurre en una noche con cielo totalmente nublado y vientos del oeste de velocidad  $u = 2$  m/s.

- a) Trace, mediante líneas de igual concentración, la “nube” generada después de 400 segundos de ocurrido el accidente.
- b) Encuentre las concentraciones máximas que se generan a las siguientes distancias 100, 200, 400 y 800 metros de la fuente.

Solución

a) Con cielo totalmente nublado la categoría de Pasquill que prevalece es la clase neutral o D, de modo que de la tabla 4.16 y con ayuda de las ecuaciones 4.15 y 4.16 las desviaciones estándar se calculan como sigue

$$\sigma_y = 0.06x^{0.92}$$

$$\sigma_z = 0.15x^{0.70}$$

Como la fuga de cloro sucede a nivel de suelo  $h = 0$  y por consiguiente las concentraciones se obtienen de la ecuación 4.14 con  $\sigma_x = \sigma_y$

$$c(x, y, z = 0, t) = \frac{2q}{(2\pi)^{3/2} \sigma_y^2 \sigma_z} e^{-(x-ut)^2/2\sigma_y^2} e^{-y^2/2\sigma_y^2} \quad (P4.6.1)$$

Las líneas de igual concentración son líneas equivalentes a las isoterms. Se puede usar una cuadrícula para trazarlas a mano, pero el trabajo para dibujarlas es arduo. La figura P4.6.1 muestra las concentraciones obtenidas mediante ecuación P4.6.1, impresas sobre una cuadrícula de 12 x 13 celdas. Las concentraciones se obtuvieron aplicando la ecuación P4.6.1 de manera iterativa generando distancias equidistantes  $dx$  y  $dy$  para formar una malla. La curva sobrepuesta a la cuadrícula representa una línea de igual concentración de  $140 \mu\text{g}/\text{m}^3$  que se trazó a mano uniendo puntos de igual concentración. Obsérvese que el proceso para trazar segmentos de línea juntando concentraciones iguales requiere de efectuar múltiples interpolaciones. La figura P4.6.2 presenta la nube formada después de 400 segundos de haber sido liberado el material a la atmósfera y la figura P4.6.3 muestra su avance y dispersión después de cuatro tiempos consecutivos.

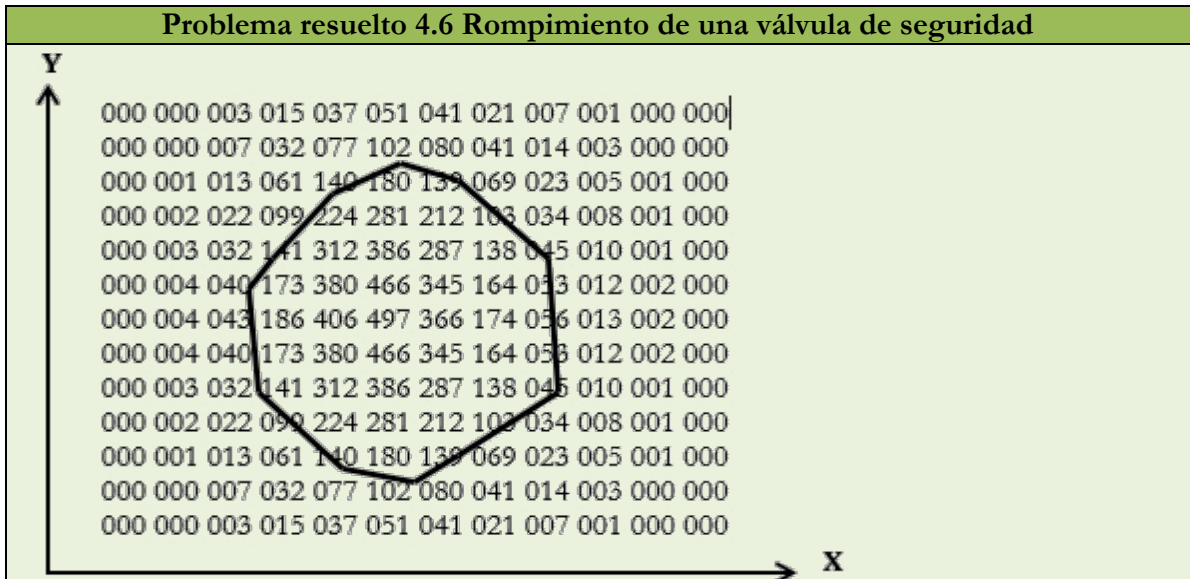


Figura P4.6.1 Línea de igual concentración ( $140 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) trazada a mano. Los números representan concentraciones posicionadas dentro de una malla rectangular de 12 x 13 celdas.

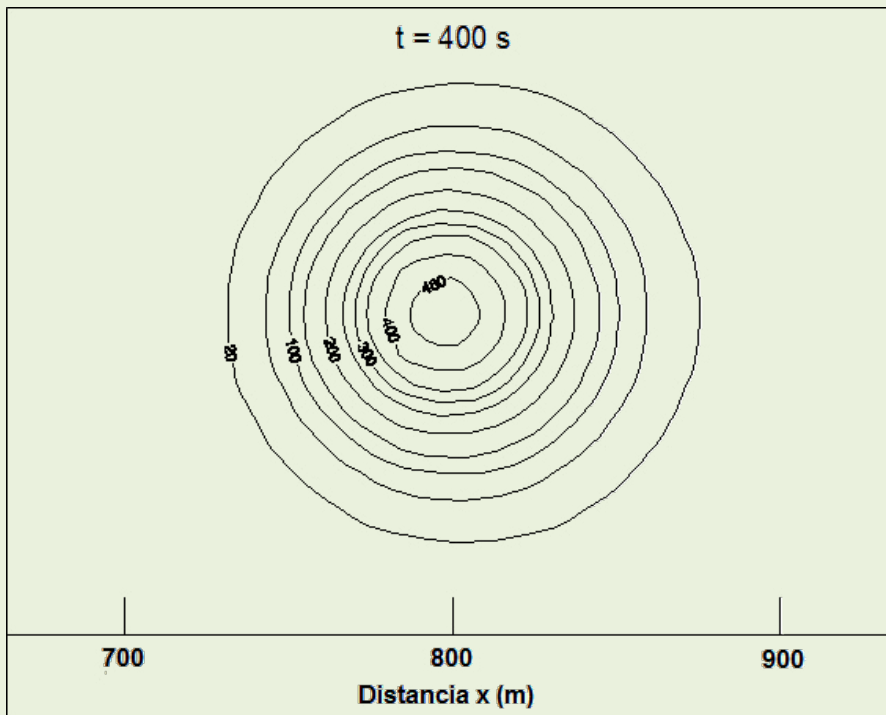


Figura P4.6.2 Nube de iguales concentraciones formada después de 400 segundos de haber sido liberado el material a la atmósfera



**Problema resuelto 4.6 R rompimiento de una válvula de seguridad**

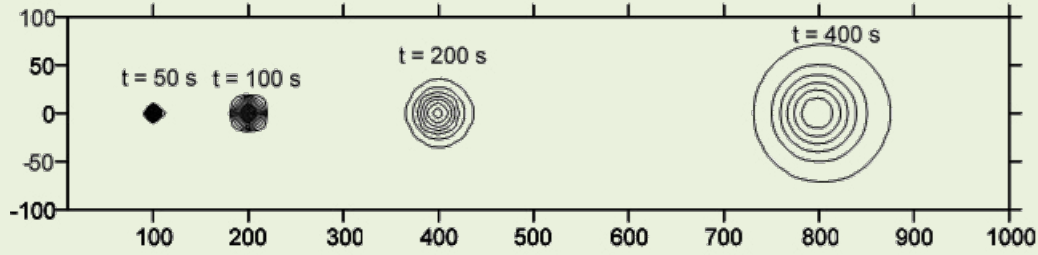


Figura P4.6.3 Avance y dispersión de la nube a diferentes tiempos consecutivos

b) Las concentraciones máximas ocurren al centro de la nube en  $y = 0$  y en  $x = ut$ ; en otras palabras, a los tiempos 50, 100, 200 y 400 segundos y en las posiciones 100, 200, 400 y 800 metros, respectivamente; por lo que las concentraciones máximas se obtienen de la ecuación P4.6.1.

Sustituyendo los datos suministrados se obtienen los siguientes resultados

Sustituyendo los datos suministrados se obtienen los siguientes resultados

En  $x = 100$  m

$$c(x, y, z = 0, t) = \frac{2q}{(2\pi)^{3/2} \sigma_y^2 \sigma_z} e^{-(x-ut)^2/2\sigma_y^2} e^{-y^2/2\sigma_y^2} = 0.097797 \text{ g/m}^3 = 97,797 \text{ } \mu\text{g/m}^3$$

En  $x = 200$  m

$$c(x, y, z = 0, t) = \frac{2q}{(2\pi)^{3/2} \sigma_y^2 \sigma_z} e^{-(x-ut)^2/2\sigma_y^2} e^{-y^2/2\sigma_y^2} = 0.016815 \text{ g/m}^3 = 16,815 \text{ } \mu\text{g/m}^3$$

En  $x = 400$  m

$$c(x, y, z = 0, t) = \frac{2q}{(2\pi)^{3/2} \sigma_y^2 \sigma_z} e^{-(x-ut)^2/2\sigma_y^2} e^{-y^2/2\sigma_y^2} = 0.002891 \text{ g/m}^3 = 2,891 \text{ } \mu\text{g/m}^3$$

En  $x = 800$  m

$$c(x, y, z = 0, t) = \frac{2q}{(2\pi)^{3/2} \sigma_y^2 \sigma_z} e^{-(x-ut)^2/2\sigma_y^2} e^{-y^2/2\sigma_y^2} = 0.000497 \text{ g/m}^3 = 497 \text{ } \mu\text{g/m}^3$$

Es importante señalar que estando en las posiciones mencionadas, es decir, a 100, 200, 400 y 800 metros de la fuente, tendría que esperarse el arribo de la nube 50, 100, 200 y 400 segundos, respectivamente, para exponerse a las concentraciones calculadas arriba, cuando el centro de la nube pase por dichos puntos. El registro de las concentraciones en cualquiera de estos lugares mostraría, primero, un incremento progresivo de las concentraciones hasta alcanzar los valores máximos arriba mostrados, y posteriormente un decremento paulatino al alejarse la nube.

Tabla 4.16 Coeficientes para generar  $\sigma_y$  y  $\sigma_z$  para fuentes instantáneas mediante las ecuaciones 4.15 y 4.16

Categorías de estabilidad atmosférica de Pasquill	a	b	c	d
A	0.18	0.92	0.72	0.76
B	0.14	0.92	0.53	0.73
C	0.10	0.92	0.34	0.72
D	0.06	0.92	0.15	0.70
E	0.045	0.91	0.12	0.67
F	0.03	0.90	0.08	0.64

Fuente: Estimating Concentrations Downwind from an Instantaneous Puff Release EPA 600/3-82-078 (Peterson, 1982)

## Emisión permanente

Según se mencionó arriba, los modelos de pluma gaussiana se caracterizan por suponer distribuciones de concentraciones que siguen curvas de Gauss. Cuando se trata de una emisión permanente o continua, es importante tener presente el sentido de esta afirmación; la distribución de las concentraciones se refiere a cantidades medias y no instantáneas, es decir, no constituyen una fotografía de la distribución, sino la superposición de un conjunto de ellas. La figura 4.20 muestra el resultado de efectuar un conjunto de muestreos transversales a una pluma que se forma a partir de una fuente puntual permanente, de modo que el viento se dirige en la dirección x. Al ondular la pluma que se aprecia instantáneamente, derivada de la oscilación de condiciones meteorológicas y la turbulencia atmosférica, las concentraciones correspondientes que se observan muestran fluctuaciones y por consiguiente no se percibe una campana de Gauss. Sin embargo, si se grafican los valores de concentración promedio derivados de un conjunto de muestreos instantáneos como el mostrado durante periodos del orden de unos cuantos minutos, de manera que las condiciones meteorológicas como la velocidad y la dirección del viento permanezcan constantes, se observa que las concentraciones se suavizan siguiendo aproximadamente distribuciones gaussianas. Es evidente que, si el periodo se extiende demasiado, las condiciones meteorológicas tenderán a variar y las distribuciones de concentración no corresponderán a este tipo de curva.

La expresión para obtener la distribución de concentraciones correspondiente a una fuente mantenida permanentemente se conoce con el nombre de *modelo de la pluma gaussiana*. Esta se representa por la siguiente ecuación:

$$c(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} e^{-y^2/2\sigma_y^2} (e^{-(z-h_e)^2/2\sigma_z^2} + e^{-(z+h_e)^2/2\sigma_z^2}) \quad (4.17)$$

Las variables que intervienen en la ecuación del modelo de la pluma gaussiana están definidas de la manera siguiente

$c(x, y, z)$  = concentración del contaminante en el punto  $(x, y, z)$  en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$

$Q$  = emisión del contaminante en  $\text{g}/\text{s}$

$u$  = velocidad del viento a la altura de la fuente en  $\text{m}/\text{s}$

$\sigma_y, \sigma_z$  desviaciones estándar viento abajo y transversal al viento en el plano horizontal y vertical, respectivamente en  $\text{m}$  (véase la figura 4.21)

$h_e$  = altura efectiva de la fuente en  $\text{m}$

La *altura efectiva* de la fuente  $h_e$  representa la suma de la altura física de la fuente (chimenea) y la distancia vertical a la que asciende la pluma desde el nivel superior de la chimenea. Este tema será expuesto detalladamente más adelante.

La expresión 4.17 se aplica bajo las siguientes condiciones:

1. Emisión continua y estacionaria procedente de una fuente puntual
2. Condiciones meteorológicas uniformes y estacionarias (vientos y estabilidad atmosférica)
3. Terreno plano
4. Material conservativo
5. Reflexión total del material en la superficie del suelo
6. Inexistencia de inversiones térmicas elevadas que limiten el transporte vertical del contaminante

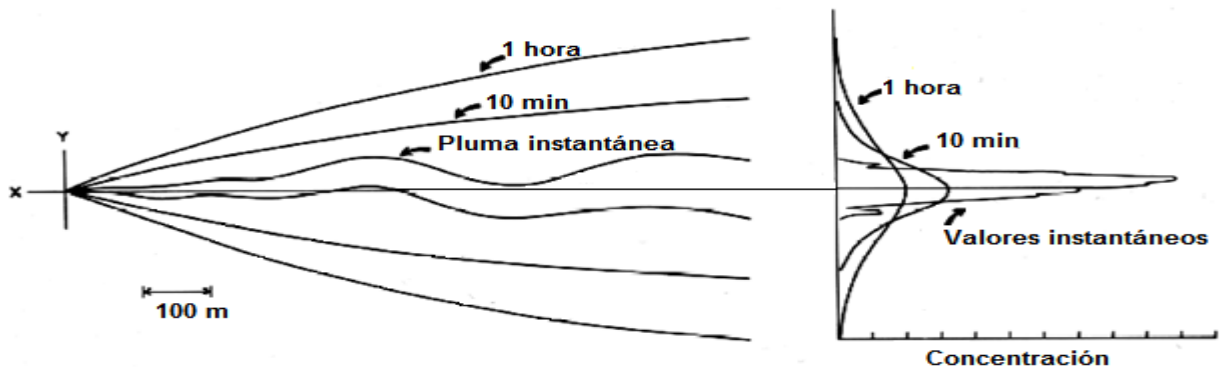


Figura 4.20 Pluma procedente de una fuente puntual permanente representada por diferentes periodos de muestreo. La distribución de Gauss se alcanza después de un periodo de aproximadamente 1 hora.

Es importante mencionar que los valores  $\sigma_y$  y  $\sigma_z$  que aparecen en la figura 4.21 se obtuvieron durante periodos de muestreo cortos, del orden de los 10 minutos, en terreno plano de baja rugosidad (pasto) y con una fuente situada a nivel de piso; normalmente estos conjuntos de desviaciones estándar se utilizan en terrenos rurales. Los experimentos que dieron lugar a este sistema de  $\sigma_y$  y  $\sigma_z$  abarcaron distancias viento abajo de unos cuantos kilómetros, lo cual puede

observarse como líneas continuas en las figuras mencionadas; las líneas discontinuas constituyen valores extrapolados.

Las desviaciones estándar presentadas en las figuras pueden obtenerse mediante ecuaciones que se ajustan a ellas y que tienen la forma siguiente

$$\sigma_y = ax^b \quad \text{y} \quad \sigma_z = cx^d \quad (4.18)$$

en donde los coeficientes a, b, c y d son función de la distancia viento abajo x, y de la estabilidad atmosférica prevaleciente. Estos coeficientes se presentan en la tabla 4.17

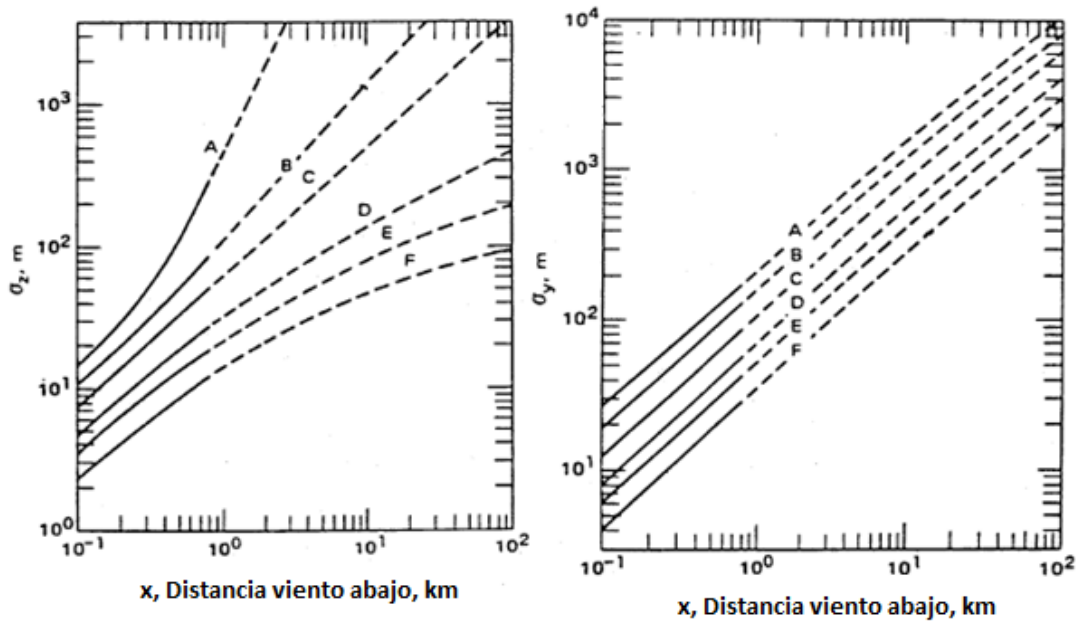


Figura 4.21 Desviaciones estándar de Pasquill-Gifford utilizadas por el modelo de pluma gaussiana

Para zonas urbanas se emplean conjuntos de sigmas diferentes a las de Pasquill-Gifford expuestas arriba. En este caso se utilizan los coeficientes de dispersión denominados de Briggs, que tienen la forma

$$\sigma_y = a_1x(1 + a_2x)^b$$

$$\sigma_z = c_1x(1 + c_2x)^d$$

en donde los coeficientes a<sub>1</sub>, a<sub>2</sub>, b, c<sub>1</sub>, c<sub>2</sub>, d se presentan en la tabla 4.18

En ambos conjuntos de coeficientes, tanto las sigmas como la distancia x están dadas en metros; sin embargo, para las zonas urbanas la distancia viento abajo se restringe a valores menores a 10000 m.

Tabla 4.17 Coeficientes para generar valores de las desviaciones estándar de Pasquill-Gifford  $\sigma_y$  y  $\sigma_z$  en zonas rurales.

x (m)	c			d			a		b	
	< 500	500 - 5000	> 5000	< 500	500 - 5000	> 5000	< 10000	> 10000	< 10000	>10000
A	0.0383	0.000254	0.00025	1.281	2.089	2.089	0.495	0.606	0.873	0.851
B	0.1393	0.0494	0.0494	0.9467	1.114	1.114	0.310	0.523	0.897	0.840
C	0.112	0.101	0.115	0.910	0.926	0.911	0.197	0.285	0.908	0.867
D	0.0856	0.259	0.737	0.865	0.687	0.564	0.122	0.193	0.916	0.865
E	0.1094	0.2452	0.9204	0.7657	0.6358	0.4805	0.0934	0.141	0.912	0.868
F	0.05645	0.1930	1.505	0.805	0.6072	0.3662	0.0625	0.0923	0.911	0.869

Tabla 4.18 Coeficientes para generar valores de la desviación estándar de Briggs  $\sigma_y$  y  $\sigma_z$  en zonas urbanas.

Clase de estabilidad	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	b	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	d
A – B	0.32	0.0004	-0.5	0.24	0.001	0.5
C	0.22	0.0004	-0.5	0.20	0	0
D	0.16	0.0004	-0.5	0.14	0.0003	-0.5
E – F	0.11	0.0004	-0.5	0.08	0.0015	-0.5

Fuente Steven R. Hanna, Gary A. Briggs, Rayford P. Hosker, Jr. Handbook on Atmospheric Diffusion, Technical Information Center. U.S. Department of Energy (Steven R. Hanna, 1982)

Debe decirse que tanto las desviaciones estándar de Pasquill-Gifford como las de Briggs deben utilizarse únicamente para emisiones continuas y no tienen validez en el caso de emisiones instantáneas o de corta duración como las estudiadas anteriormente; para este último tipo de emisiones deben emplearse las desviaciones estándar que se obtienen de la tabla 4.16.

El sistema de coordenadas que caracteriza a la ecuación 4.14 es tal que el origen se encuentra a nivel de piso, bajo la fuente y el viento se dirige en la dirección x; las dos curvas de Gauss, una en el eje z y otra en el eje y, son transversales a esta dirección, como se presenta en la figura 4.17.

La figura 4.22 muestra una vista de planta del sistema de referencia cuando el viento proviene del oeste (W), dirigiendo la pluma en dirección opuesta, es decir hacia el este (E). Obsérvese que el sistema de coordenadas ha sido trasladado de modo que el origen se encuentre sobre la fuente en las coordenadas (x<sub>f</sub>, y<sub>f</sub>). En este sistema de referencia las coordenadas de un receptor (x<sub>r</sub>, y<sub>r</sub>) son:

$$\begin{aligned} x_r &= x - x_f \\ y_r &= y - y_f \end{aligned} \tag{4.19}$$

La figura 4.23 muestra el sistema cuando la dirección del viento es noreste (NE), dirigiendo la pluma hacia suroeste (SW). Ahora el sistema debe ser además de trasladado, rotado un ángulo  $\alpha = 45^\circ$  para hacerlo coincidir con la dirección del viento. Obsérvese en la figura 4.23 que este ángulo se incrementa en el sentido de las manecillas del reloj partiendo del norte.

Las coordenadas de un receptor en este sistema de referencia (x<sub>r</sub>', y<sub>r</sub>') son:

$$x_r' = -y_r \cos \alpha - x_r \sin \alpha \tag{4.20}$$

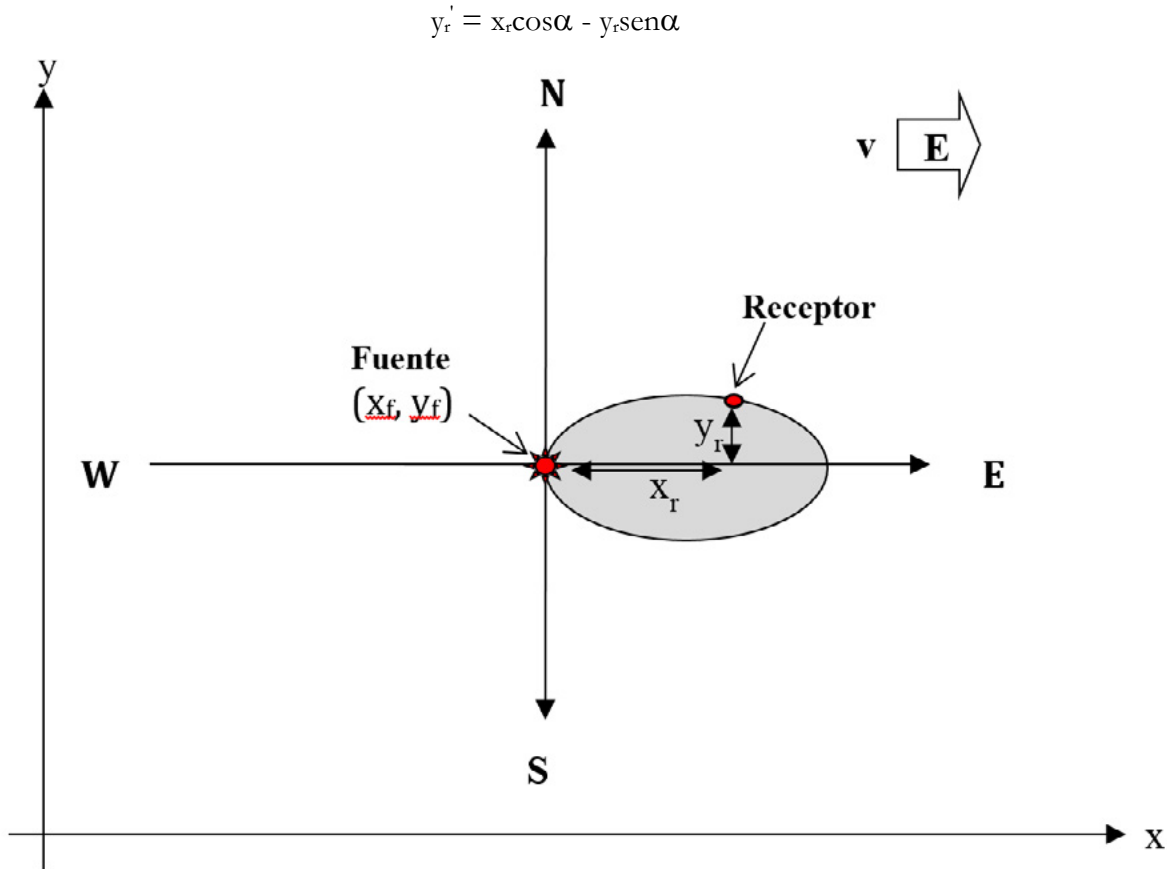


Figura 4.22 Vista de planta del sistema de referencia con vientos procedente del oeste

Es importante señalar que las anteriores ecuaciones están expresadas de modo que el ángulo de la dirección del viento  $\alpha$  coincida con la dirección de donde proviene el viento, de modo que la pluma se dirija en dirección opuesta, es decir, viento abajo de la fuente. Entonces, por ejemplo, para un viento del N la pluma se dirige hacia el S y  $\alpha = 0^\circ$ , para un viento del NNE la pluma se dirige hacia SSW y  $\alpha = 22.5^\circ$ , etc. También es conveniente percatarse que en el caso de que  $x_r'$  resulte en una cantidad negativa, se tiene una situación tal que el receptor está ubicado viento arriba de la fuente y, por tanto, no puede ser impactado por ella; en otras palabras, únicamente las  $x_r' > 0$ , que implican receptores viento abajo de la fuente generan niveles de contaminación. Obviamente esta restricción no se aplica con receptores ubicados en la dirección transversal al viento  $y'$ ; en esta dirección se tienen distancias negativas y positivas.

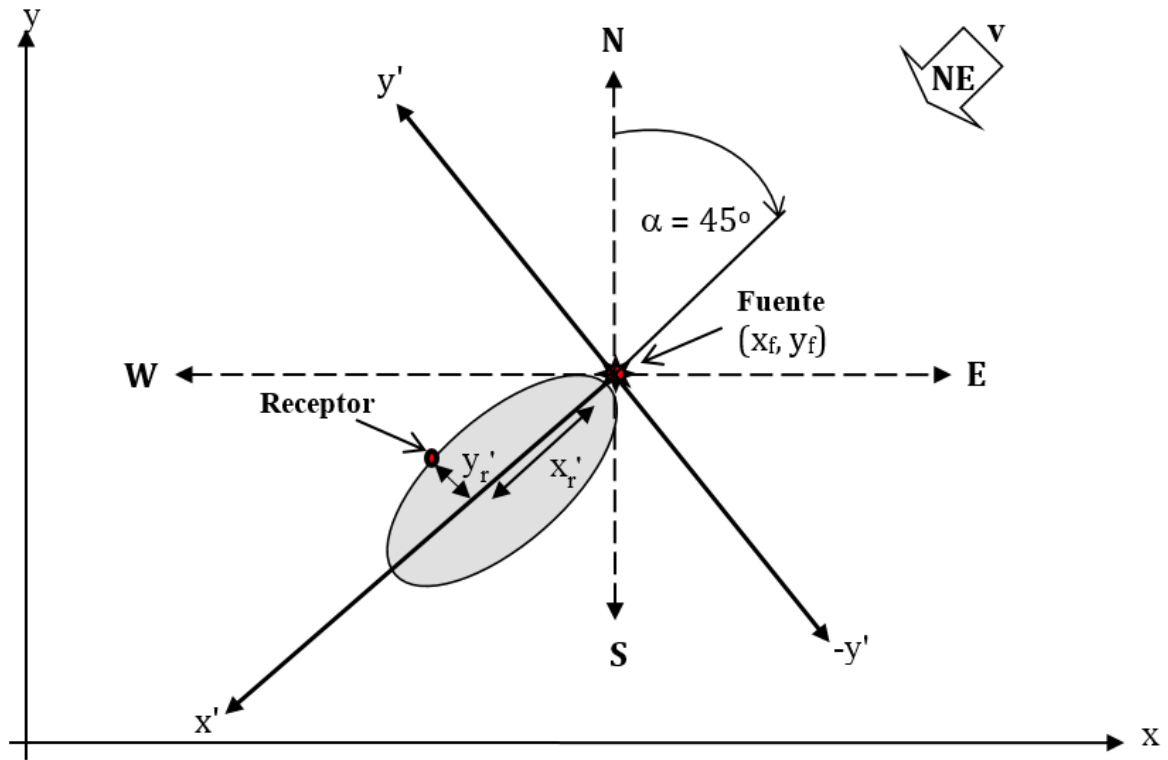


Figura 4.23 Vista de planta del sistema de referencia con vientos procedente del norte-este



**Problema resuelto 4.7 Obtención de concentraciones en diferentes receptores**

Una fuente sin ascenso de pluma se sitúa en las coordenadas (1000, 3000) sobre el piso. La fuente emite a la atmósfera 100 g/s de CO y se desea evaluar el impacto de la emisión de este contaminante sobre dos receptores ubicados en las coordenadas (1500, 3500) el primero, y (1500, 3600) el segundo. Si el viento sopla del SW

- Encuentre las coordenadas de ambos receptores en el sistema apropiado para utilizar el modelo de la pluma gaussiana.
- Determine las concentraciones generadas en ambos receptores con vientos de 6 m/s durante la noche.

**Solución**

La figura P4.5.1 presenta la ubicación de la fuente y los receptores en el sistema de coordenadas original.

a) Para expresar las coordenadas de los dos receptores en el sistema que requiere el modelo de la pluma gaussiana, primero se calculan las coordenadas de ambos receptores, trasladando el origen del sistema a la ubicación de la fuente, es decir de la ecuación 4.19

Receptor 1:

$$\begin{aligned}x_r &= x - x_f = 1500 - 1000 = 500 \text{ m} \\y_r &= y - y_f = 3500 - 3000 = 500 \text{ m}\end{aligned}$$

Receptor 2:

$$\begin{aligned}x_r &= x - x_f = 1500 - 1000 = 500 \text{ m} \\y_r &= y - y_f = 3600 - 3000 = 600 \text{ m}\end{aligned}$$

Enseguida se procede a rotar el sistema  $225^\circ$  en el sentido de las manecillas del reloj, que como se dijo arriba corresponde con la dirección del viento SW, mediante las ecuaciones 4.20, como sigue

Receptor 1:

$$\begin{aligned}x_r' &= -y_r \cos \alpha - x_r \sin \alpha = -500 \times \cos 225^\circ - 500 \times \sin 225^\circ = 707 \text{ m} \\y_r' &= x_r \cos \alpha - y_r \sin \alpha = 500 \times \cos 225^\circ - 500 \times \sin 225^\circ = 0 \text{ m}\end{aligned}$$

Receptor 2:

$$\begin{aligned}x_r' &= -y_r \cos \alpha - x_r \sin \alpha = -600 \times \cos 225^\circ - 500 \times \sin 225^\circ = 778 \text{ m} \\y_r' &= x_r \cos \alpha - y_r \sin \alpha = 500 \times \cos 225^\circ - 600 \times \sin 225^\circ = 71 \text{ m}\end{aligned}$$

**Problema resuelto 4.7 Obtención de concentraciones en diferentes receptores (continuación)**

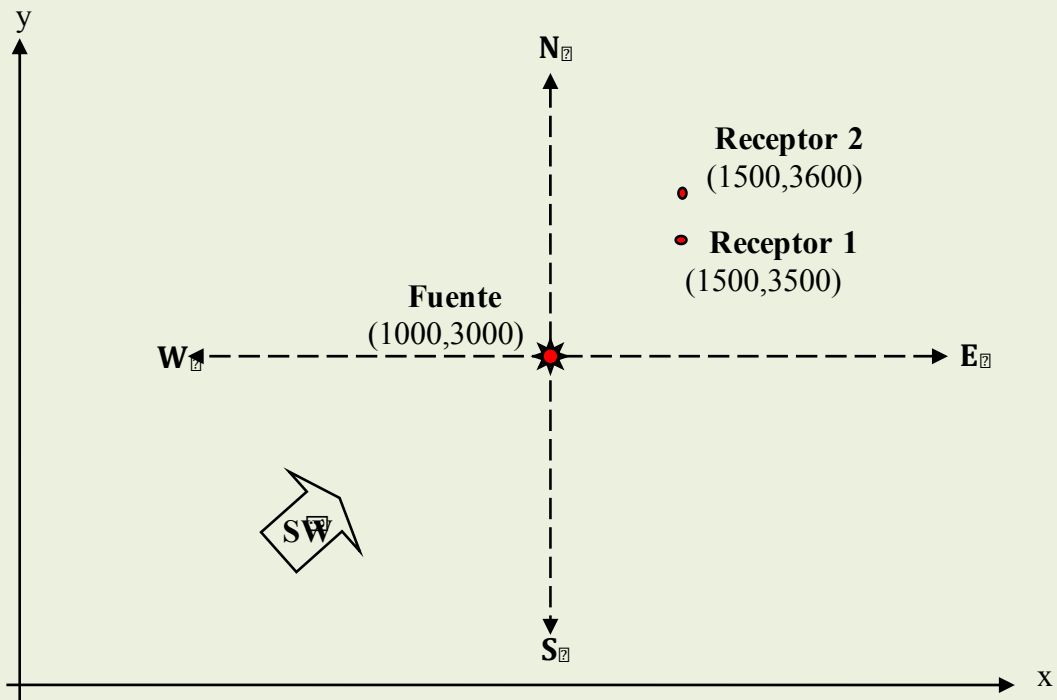


Figura P4.7.1

En otras palabras, con respecto a sistema de referencia que ha sido trasladado y rotado, el receptor 1 se encuentra sobre el eje de máximas concentraciones a 707 m viento abajo de la fuente, mientras que el receptor 2 se ubica ligeramente viento abajo del primero y desplazado una distancia  $y' = 71$  m. Esto se ilustra en la figura P4.7.2

**Problema resuelto 4.7 Obtención de concentraciones en diferentes receptores (continuación)**

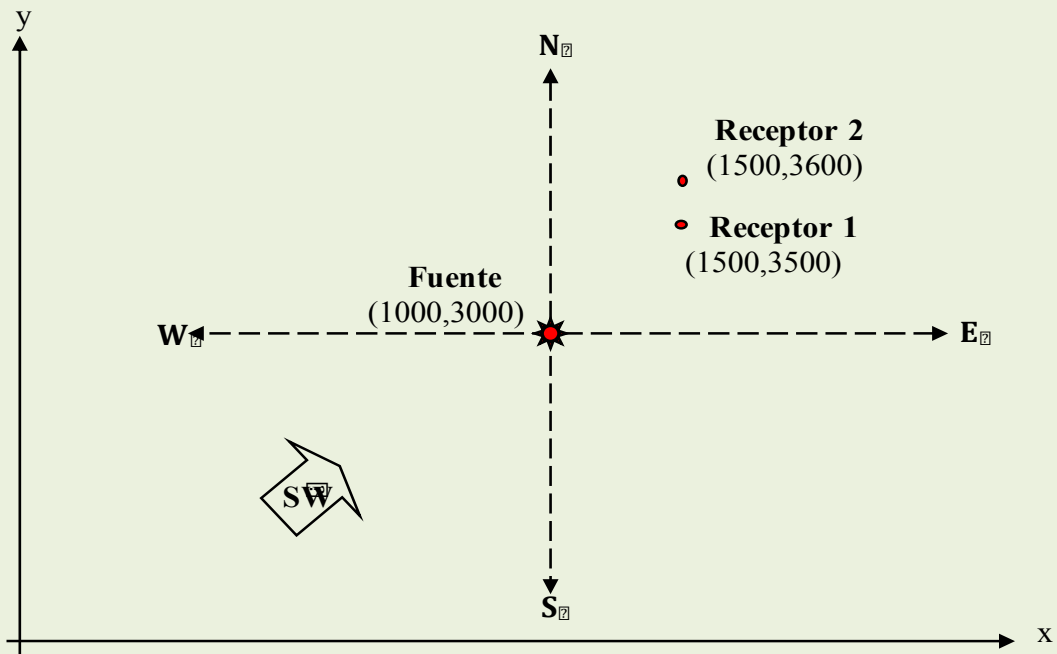


Figura P4.7.2

b) Debido a que la fuente se encuentra a nivel de piso  $z = 0$  y como no hay ascenso de la emisión  $h_e = 0$ , de modo que la ecuación de la pluma gaussiana, ecuación 4.17, se reduce a la siguiente expresión

$$c(x, y, z = 0) = \frac{Q}{\pi\sigma_y\sigma_z u} e^{-y^2/2\sigma_y^2} \quad (P4.7.1)$$

Durante la noche y con vientos de 6 m/s, se aprecia en la tabla 4.12 que la categoría de estabilidad atmosférica es D. Ahora se obtendrán las desviaciones estándar que intervienen en la ecuación 4.18. Debido a que ambos casos  $500 < x_r' < 5000$  m los coeficientes a, b, c, d para dicha categoría de estabilidad atmosférica son los siguientes

$$a = 0.122, b = 0.916, c = 0.259 \text{ y } d = 0.687$$

De modo que utilizando las ecuaciones 4.18, las desviaciones estándar para los dos receptores se obtienen como sigue

### Problema resuelto 4.7 Obtención de concentraciones en diferentes receptores (continuación)

Receptor 1:

$$\sigma_y = ax^b = 0.122 \times 707^{0.916} = 49.7 \text{ m}$$

$$\sigma_z = cx^d = 0.259 \times 707^{0.687} = 23.5 \text{ m}$$

Receptor 2:

$$\sigma_y = ax^b = 0.122 \times 778^{0.916} = 54.3 \text{ m}$$

$$\sigma_z = cx^d = 0.259 \times 778^{0.687} = 25 \text{ m}$$

Sustituyendo estas cantidades en la ecuación P4.7.1 se calculan las siguientes concentraciones

Receptor 1:

$$c(x = 707, y = 0, z = 0) = \frac{Q}{\pi\sigma_y\sigma_z u} = \frac{100 \times 10^6}{\pi \times 49.7 \times 23.5 \times 6} = 4542.3 \frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}$$

Receptor 2:

$$c(x = 778, y = 71, z = 0) = \frac{Q}{\pi\sigma_y\sigma_z u} e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}} = \frac{100 \times 10^6}{\pi \times 54.3 \times 25 \times 6} e^{-71^2 / (2 \times 54.3^2)} = 707 \frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}$$

## 4.3.2 Ascenso de plumas

Una vez que se descarga material contaminante a la atmósfera se forma una pluma que tiende a elevarse por dos procesos diferentes: *flotación* e *impulso*; generalmente ambos procesos están presentes simultáneamente, pero uno de los dos domina el ascenso.

El ascenso de la pluma por flotación se origina como consecuencia de la diferencia de densidad entre los gases emitidos y el aire circundante, provocado por las correspondientes diferencias de temperaturas, por lo que el dominio de este tipo de ascenso corresponde a una emisión relativamente caliente. En contraste, el ascenso por impulso es consecuencia de la velocidad inicial de los gases de salida y prevalece cuando la pluma se encuentra relativamente fría.

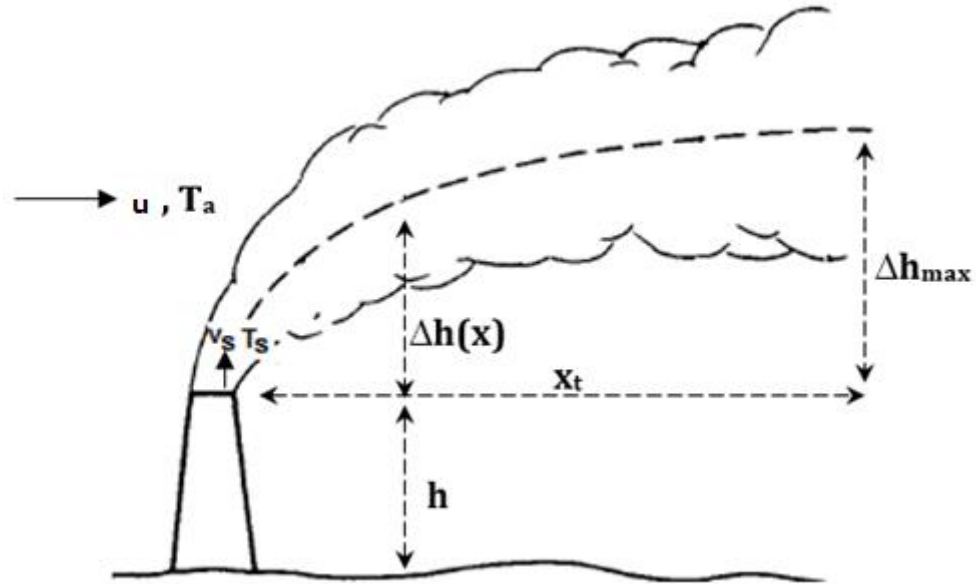


Figura 4.24 Formación y ascenso de una pluma.

En la figura 4.24 se ilustra la formación típica de una pluma;  $\Delta h$  representa el ascenso de la pluma a partir de altura de la chimenea  $h$ . Nótese el ascenso gradual que caracteriza a la pluma; primero  $\Delta h$  es función de  $x$ , hasta alcanzar, a la distancia terminal  $x_t$ , su ascenso máximo  $\Delta h_{\max}$ . La curvatura que se observa en el diagrama la provoca la velocidad del viento  $u$  que al incrementarse ocasiona una menor elevación de la pluma.

En general el ascenso de la pluma lo determinan las características de la emisión y las del medio circundante. En el primer caso la elevación de la pluma  $\Delta h$  es proporcional a la temperatura de salida de los gases  $T_s$  (K), a su velocidad  $v_s$  (m/s) y al diámetro de la chimenea  $D$  (m), de manera que:

$$\Delta h \propto f(T_s, v_s, D)$$

Con respecto al medio circundante, el ascenso de la pluma  $\Delta h$  es inversamente proporcional a la temperatura del aire ambiente  $T_a$ , a la velocidad del viento  $u$  y al *parámetro de estabilidad atmosférica*  $S$ , es decir

$$\Delta h \propto f(1 / T_a, u, S)$$

En donde el parámetro de estabilidad atmosférica  $S$  está definido de la siguiente manera:

$$S = g(dT/dz + \Gamma) / T_a$$

siendo  $dT/dz$  el gradiente de temperatura de la atmosfera y  $\Gamma$  es el gradiente adiabático seco. Cuando no se conoce  $dT/dz$  se sugiere utilizar los siguientes valores de  $S$  en ( $s^{-2}$ ):

$$S = 0.02g / T_a \text{ si se presenta la categoría de estabilidad E}$$

$$S = 0.035g / T_a \text{ si se presenta la categoría de estabilidad F}$$

La literatura es abundante en métodos para estimar el ascenso de plumas; sin embargo, las ecuaciones más utilizadas se conocen con el nombre de fórmulas de Briggs (Seinfeld, 1986), las cuales se desarrollaron principalmente a partir de estudios de campo y experimentales realizados a finales de la década de los años de 1960 y principios de los 1970.

Dos parámetros fundamentales caracterizan a las fórmulas de Briggs; el parámetro de flotación  $F_b$  y el parámetro de impulso  $F_m$ . Estos parámetros se definen como sigue:

Flotación:  $F_b = gv_s D^2 (T_s - T_a) / (4T_s)$  en unidades internacionales de  $(m^4/s^3)$

Impulso:  $F_m = v_s^2 D^2 T_a / (4T_s)$  en unidades internacionales de  $(m^4/s^2)$

Como ya se ha dicho, la elevación de la pluma puede estar dominada por el proceso de flotación o por el impulso inicial de los gases de escape. A continuación, se exponen los métodos utilizados para calcular el ascenso de la pluma en ambas situaciones.

## Ascenso dominado por flotación

Se mencionó anteriormente que la pluma tiende a elevarse en función de la distancia  $x$  si su temperatura es mayor que la del aire ambiente. Obviamente una vez que alcanza el equilibrio térmico con el aire circundante la pluma adquiere su elevación máxima. Independientemente de la estabilidad atmosférica que prevalece, el ascenso progresa de manera que éste puede calcularse empleando la siguiente fórmula:

$$\Delta h(x) = 1.6F_b^{1/3}x^{2/3} / v \quad (4.21)$$

La distancia a partir de la cual la pluma deja de ascender, denominada distancia terminal  $x_t$ , depende de la estabilidad atmosférica y se calcula como sigue:

a) Atmósfera es inestable o neutral (A – D)

Si  $F_b < 55$

$$x_t = 49F_b^{5/8} \quad (4.22)$$

Si  $F_b \geq 55$

$$x_t = 119F_b^{2/5} \quad (4.23)$$

Obsérvese que si estas distancias terminales se sustituyen en la ecuación 4.21 se obtiene el máximo ascenso así:

Si  $F_b < 55$

$$\Delta h_{\max} = 21.425 F_b^{3/4} / v \quad (4.24)$$

Si  $F_b \geq 55$

$$\Delta h_{\max} = 38.71 F_b^{3/5} / v \quad (4.25)$$

b) Atmósfera estable (E y F)

$$x_t = 2.0715 v_s / S^{1/2} \quad (4.26)$$

Y el ascenso máximo, sustituyendo 4.26 en la ecuación 4.21, es

$$\Delta h_{\max} = 2.6 (F_b / v_s S)^{1/3} \quad (4.27)$$

Una situación frecuente que puede presentarse en los casos estables es la ausencia de vientos. En esta situación, es decir, con vientos en calma, se usa la siguiente expresión

$$\Delta h_{\max} = 4 F_b^{1/4} S^{3/8} \quad (4.28)$$

## Ascenso dominado por impulso

El efecto del impulso que trae consigo la emisión es menos duradero que el efecto de la flotación discutido arriba, disipándose rápidamente; por consiguiente, la pluma alcanza su ascenso máximo muy cerca de la fuente. En forma análoga a la formación de la pluma por flotación, la estabilidad atmosférica propicia elevaciones diferentes, dando lugar a las siguientes dos fórmulas:

Categorías de estabilidad atmosféricas inestables A – D.

$$\Delta h_{\max} = 3 D v_s / u \quad (4.29)$$

Categorías de estabilidad atmosféricas estables E y F.

$$\Delta h_{\max} = 1.5 (F_m / u S^{1/2})^{1/3} \quad (4.30)$$

Debido a que el ascenso de la pluma en condiciones estables no debe exceder la elevación en condiciones inestables, generalmente se opta, para las categorías estables, por utilizar el valor menor de las expresiones 4.29 y 4.30.



### 4.3.3 Obtención de concentraciones máximas

Se recordará que las concentraciones máximas ocurren sobre el eje x en la dirección viento abajo. Si se grafican las concentraciones en este eje utilizando la ecuación 4.31 con los receptores situados a nivel de piso, es decir empleando la siguiente ecuación:

$$c(x, y = 0, z = 0) = \frac{Q}{\pi\sigma_y\sigma_z u} e^{(-h_e^2/2\sigma_z^2)} \quad (4.31)$$

se puede notar que, para una fuente elevada y dependiendo de la clase de estabilidad atmosférica, las distribuciones de las concentraciones toman la forma que se presentan en la figura 4.25. En otras palabras, se observa una distancia crítica  $x_c$ , donde ocurre la concentración máxima, y que ésta es mayor en la medida en la que las categorías de estabilidad atmosférica son más inestables; la estabilidad atmosférica tiende a bajar la pluma a nivel del suelo como se ilustró en la citada figura

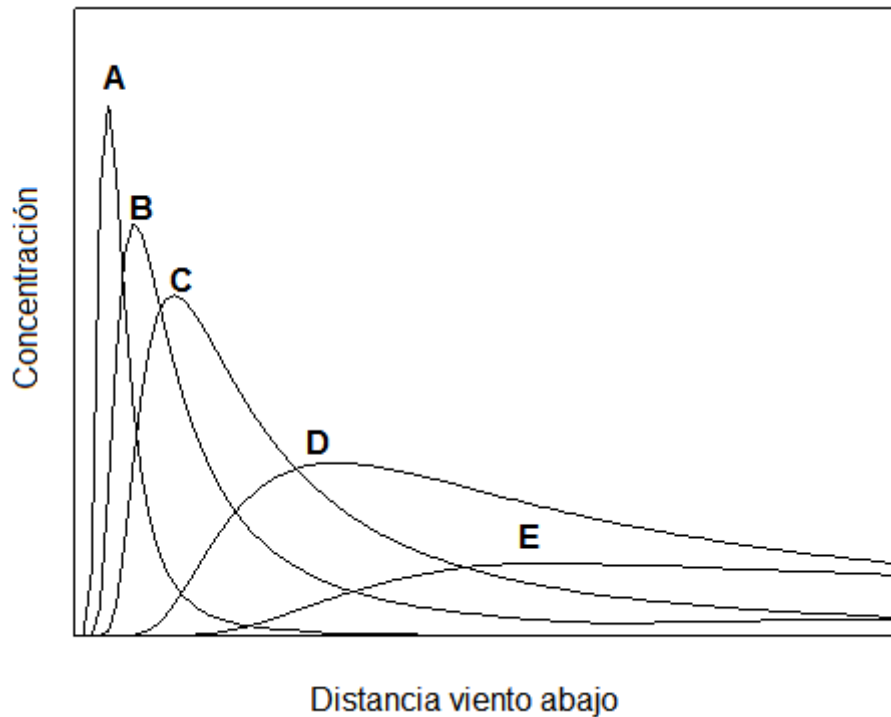


Figura 4.25 Concentraciones máximas generadas por una emisión elevada bajo diferentes categorías de estabilidad atmosférica.

Obsérvese de la ecuación 4.31 que cuando la fuente se encuentra a nivel de piso y no hay ascenso de pluma, es decir cuando  $h_e = 0$ , las concentraciones disminuyen con la distancia, ya que tanto  $\sigma_y$  como  $\sigma_z$  se incrementan, de modo que la máxima concentración ocurre sobre la fuente misma.

En estas circunstancias y en contraste con fuentes elevadas, las máximas concentraciones al nivel del piso se presentan con las categorías de estabilidad estables (E-F).

La ventaja de haber expresado las desviaciones estándar por medio de las ecuaciones 4.18 es que si se sustituyen en la ecuación 4.31 ésta puede derivarse con respecto a  $x$  para encontrar el punto crítico mencionado arriba. En otras palabras, la expresión 4.31 se convierte en la siguiente ecuación una vez sustituidas en ella  $\sigma_y$  y  $\sigma_z$ :

$$c(x, y = 0, z = 0) = \frac{Q}{\pi a c x^{b+d} u} e^{(-h_e^2 / 2c^2 x^{2d})} \quad (4.32)$$

Y el punto crítico se obtiene haciendo:

$$\frac{\partial c}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q}{\pi a c x^{b+d} u} e^{(-h_e^2 / 2c^2 x^{2d})} \right) = 0$$

Después de efectuar la operación anterior y despejando  $x$  se obtiene la distancia crítica, como sigue

$$x_c = \left[ \frac{h_e^2 d}{c^2 (b+d)} \right]^{\frac{1}{2d}} \quad (4.33)$$

Sustituyendo la ecuación 4.33 en la ecuación 4.32 se obtiene la concentración máxima:

$$c_{\max} = \frac{Q e^{-(b+d)/2d}}{\pi a c u \left[ \frac{h_e^2 d}{c^2 (b+d)} \right]^{\frac{b+d}{2d}}} \quad (4.34)$$

Para aclarar la utilidad de estas ecuaciones se presenta el siguiente ejemplo:

**Problema resuelto 4.8 Obtención de la concentración máxima**

Una fuente puntual tiene las siguientes características:

- Q = 500 g/s
- h = 100 m
- D = 3 m
- v<sub>s</sub> = 8 m/s
- T<sub>s</sub> = 150 °C
- T<sub>a</sub> = 25 °C
- u = 1.5 m/s a 10 m de altura

Determine la concentración máxima generada seleccionando la categoría de estabilidad atmosférica más adversa para este problema.

**Solución**

La categoría de estabilidad atmosférica más adversa para una emisión elevada es la categoría A; sin embargo, debe verificarse la factibilidad de que ésta se presente con la velocidad de viento dada. De la tabla 4.12 la categoría A puede presentarse durante el día con un índice de radiación fuerte y velocidades de viento de hasta 2.8 m/s, lo cual permite utilizarla con la velocidad de viento proporcionada en este problema.

Para obtener la altura efectiva de la chimenea se requiere calcular el ascenso de la pluma Δh. Primero es necesario calcular la velocidad del viento a la altura de la fuente (100 m) y el parámetro de flotación, así

$$u_{100} = u_{10}(h/10)^p = 1.5(100/10)^{0.07} = 1.76 \text{ m/s}$$

$$F_b = gv_s D^2 (T_s - T_a) / (4T_s) = 9.81 \times 8 \times 3^2 \times (150 - 25) / (4 \times (273 + 150)) = 52.2 \text{ m}^4/\text{s}^3 < 55.$$

Se aplicará ahora el método de Briggs para una emisión en donde domina el ascenso por flotación. La distancia terminal x<sub>t</sub> se calcula así

Como F<sub>b</sub> < 55

$$x_t = 49F_b^{5/8} = 49 \times 52.2^{5/8} = 580 \text{ m y}$$

$$\Delta h_{\text{máx}} = 21.425F_b^{3/4} / u_{100} = 21.425 \times 52.2^{3/4} / 1.76 = 236 \text{ m}$$

$$\text{Por lo que la altura efectiva } H_e = h + \Delta h_{\text{máx}} = 100 + 236 = 336 \text{ m}$$

Ahora será necesario seleccionar los coeficientes a, b, c y d que intervienen en las ecuaciones 4.32 y 4.33. Tentativamente se supondrá que la distancia crítica se encuentra en el intervalo de 500 a 5000 metros. Por tanto, de la tabla 4.16 se obtienen los siguientes valores:

$$a = 0.495 \quad b = 0.873, \quad c = 0.000254, \quad d = 2.089$$

Por otra parte, de la ecuación 4.33 se obtiene el siguiente valor de la distancia crítica

$$x_c = \left[ \frac{h_e^2 d}{c^2 (b+d)} \right]^{1/2d} = [336^2 \times 2.089 / (0.000254^2 (0.873 + 2.089))]^{1/2 \times 2.089} = 784 \text{ m}$$

Aquí es importante destacar que, por una parte, la distancia crítica obtenida es mayor que la distancia terminal, lo que significa que el ascenso máximo ha sido alcanzado. Si hubiera resultado menor tendría que haberse utilizado la ecuación 4.21 para obtener la altura de ascenso de la pluma. Por otra parte, la distancia crítica se encuentra dentro del intervalo supuesto de 500 a 5000 m, lo cual valida los coeficientes seleccionados. Si no hubiera sido el caso, sería necesario escoger otro intervalo y otros coeficientes, e iniciar el proceso de cálculo nuevamente.

Ahora se puede proceder a calcular la concentración máxima empleando la ecuación 4.34, como sigue

**Problema resuelto 4.8 Obtención de la concentración máxima**

$$C_{\max} = \frac{Qe^{-b+d/2d}}{\pi ac u \left[ \frac{h_e^2 d}{c^2(b+d)} \right]^{\frac{b+d}{2d}}} = \frac{500e^{-\frac{0.873+2.089}{2 \times 2.089}}}{3.1416 \times 0.495 \times 0.000254 \times 1.76 \left[ \frac{336^2 \times 2.089}{0.000254^2 \times (0.873+2.089)} \right]^{\frac{0.873+2.089}{2 \times 2.089}}} = 948 \frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}$$

## 4.4 Control de la contaminación del aire

Los métodos y equipos para controlar la contaminación del aire dependen de si los contaminantes formados son emitidos a la atmósfera, ya sea como material particulado, o en forma de gases, o ambos. Por ejemplo, los procesos de combustión emiten cantidades importantes de partículas y gases como el monóxido de carbono (CO) y los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), cuando se utilizan combustibles sólidos, como el carbón, y líquidos, como el combustóleo; sin embargo, estas emisiones se reducen considerablemente, especialmente las de partículas, si los combustibles están en forma gaseosa, como el gas natural. Dichas emisiones también dependen del contenido de impurezas existente en los combustibles. El azufre es una de las impurezas más significativas en el problema de contaminación del aire; cuando este se oxida en el proceso de combustión se forma dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>). También existen compuestos sumamente tóxicos como el ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S), en donde el control de este tipo de emisiones consiste en oxidarlo, mediante combustión, a SO<sub>2</sub>, que es un compuesto menos tóxico que el primero.

Los equipos para controlar la emisión de partículas toman en cuenta principalmente el tamaño de las partículas; las partículas grandes son más fáciles de remover que las pequeñas. Las partículas contenidas en una corriente gaseosa son expuestas a la fuerza de gravedad, centrífuga, electrostática, fuerzas inerciales, o procesos como el de intercepción o difusión molecular, para removerlas de dicha corriente. Estos principios permiten diseñar equipos como la cámara de sedimentación, que remueven partículas de gran tamaño, colectores centrífugos llamados ciclones, que remueven eficientemente partículas de tamaño intermedio y precipitadores electrostáticos y sistemas de filtros de bolsa que son eficientes en remover partículas finas.

Los dispositivos existentes para controlar la emisión de partículas se pueden dividir en equipos mecánico-eléctricos, lavadores y filtros. Los primeros se dividen a su vez en gravitatorios, inerciales, centrífugos y electrostáticos; los lavadores en cámara de aspersion, ciclónicos y lavadores tipo Venturi y los filtros en filtros de tela y de papel.

Debido a que las partículas arrastradas por la corriente gaseosa son de diversos tamaños, la eficiencia de remoción de dichos equipos es función de la distribución de tamaños de partículas existentes en la corriente. La tabla 4.19 muestra eficiencias de remoción típicas de equipos frecuentemente utilizados por la industria.

Tabla 4.19 Eficiencias de colección típicas de equipos de control en función del tamaño de partícula.

Tamaño de partículas	5 $\mu\text{m}$	2 $\mu\text{m}$	1 $\mu\text{m}$
<b>Equipo de colección</b>			
Ciclón convencional	30 %	15 %	10 %
Ciclón de alta eficiencia	75 %	50 %	30 %
Precipitador electrostático	99 %	95 %	85 %
Filtro de tela	99.8 %	99.5 %	99 %
Torre de aspersión	95 %	85 %	70 %
Lavador Venturi	99.7 %	99 %	97 %

### 4.4.1 Cámara de sedimentación

Estos equipos consisten en dispositivos de grandes dimensiones en los que la velocidad de la corriente gaseosa se reduce, de modo que las partículas que se encuentran suspendidas, principalmente las de mayor tamaño, permanecen el tiempo suficiente para caer por gravedad y depositarse en una tolva, ver figura 4.26. Aunque las cámaras de sedimentación se utilizan para el control de partículas con diámetros superiores a 10  $\mu\text{m}$ , la mayoría de los diseños solamente atrapan de manera efectiva partículas con diámetros superiores a 50  $\mu\text{m}$ , aproximadamente.

A pesar de las bajas eficiencias de recolección, las cámaras de sedimentación han sido muy utilizadas en la industria de fundición y refinación de metales. Son particularmente útiles en industrias en las que es necesario enfriar la corriente de gas antes de continuar con otros procesos. También es importante mencionar su uso en trenes de colección de partículas cuya función es, primero, atrapar partículas grandes y posteriormente continuar con dispositivos capaces de remover partículas más finas.

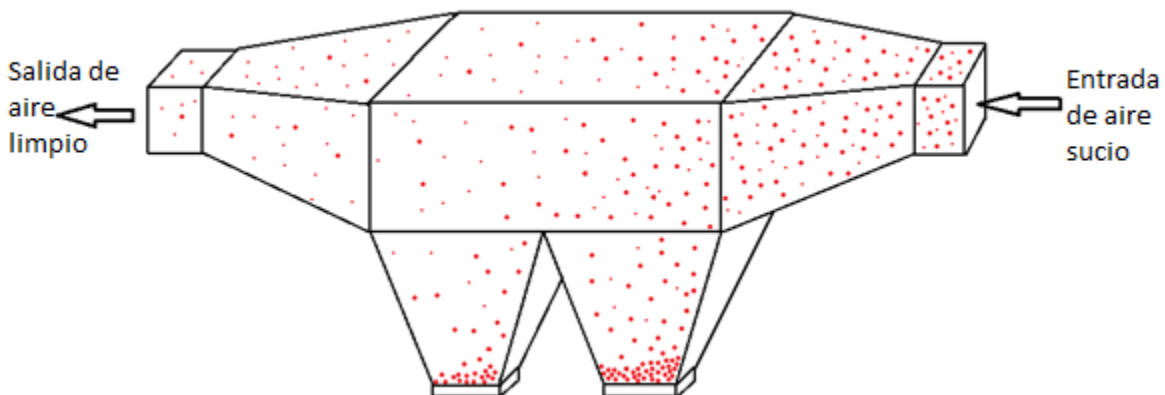


Figura 4.26 Cámara de sedimentación. La fuerza de gravedad separa las partículas de la corriente gaseosa  
 Fuente: Adaptado de [https://ca.wikipedia.org/wiki/Cambra\\_de\\_sedimentaci%C3%B3](https://ca.wikipedia.org/wiki/Cambra_de_sedimentaci%C3%B3)

Las ventajas y desventajas de las cámaras de sedimentación son principalmente las siguientes:

### **Ventajas**

1. Bajos costos de adquisición
2. Costos de energía reducidos
3. No hay partes móviles, por lo que presentan pocos requerimientos de mantenimiento y costos de operación pequeños
4. Baja caída de presión a través del equipo
5. El equipo no está sujeto a la abrasión, debido a la baja velocidad del gas
6. Proporciona enfriamiento incidental de la corriente de gas
7. Las limitaciones de temperatura y presión dependen únicamente de los materiales de construcción
8. La recolección de partículas y su disposición se efectúa en condiciones secas

### **Desventajas**

1. Eficiencias de colección de partículas relativamente bajas, particularmente aquellas de tamaño menor a 50  $\mu\text{m}$
2. No puede operar eficientemente con materiales pegajosos o aglutinantes
3. Gran tamaño físico

## **4.4.2 Ciclón**

Los ciclones consisten en dispositivos que, al impartir una fuerza centrífuga a la corriente de gas, fuerzan a las partículas relativamente grandes a impactarse en las paredes internas del dispositivo. Los ciclones pueden ser individuales o múltiples, ver figura 4.27. Se utilizan frecuentemente para reducir la carga de partículas en la entrada a dispositivos más caros, como precipitadores electrostáticos o sistemas filtros de tela, eliminando las partículas abrasivas de mayor tamaño.

El intervalo de eficiencia de control de los ciclones individuales convencionales se estima que está comprendido entre el 70 y el 90 % para partículas con diámetros superiores a 20  $\mu\text{m}$ , entre el 30 y 90 % para partículas con diámetros superiores a 10  $\mu\text{m}$  y de 0 a 40 % para partículas con diámetros superiores a 2.5  $\mu\text{m}$ .

Los ciclones individuales de alta eficacia están diseñados para alcanzar mayores eficiencias de colección para partículas más pequeñas que los ciclones convencionales. Las eficiencias de

colección varían entre el 80 y el 99 % para partículas con diámetros superiores a 20  $\mu\text{m}$  , entre el 60 y el 95% para partículas con diámetros superiores a 10  $\mu\text{m}$  y del 20 al 70 % para partículas con diámetros superiores a 2.5  $\mu\text{m}$  .

Los ciclones se utilizan también en operaciones de recuperación y reciclado de productos alimenticios y materiales de proceso, como los catalizadores. Otra aplicación es en las industrias química y de alimentos, después de operaciones de secado por aspersión y posteriormente a las operaciones de trituración, molienda y calcinación, para capturar material útil o vendible. En la industria de metales ferrosos y no ferrosos, los ciclones se utilizan con frecuencia como primera etapa en el control de las emisiones de partículas en plantas.

Las ventajas y desventajas de los ciclones son principalmente las siguientes:

### **Ventajas**

1. La inversión inicial es baja
2. Carece de partes móviles, con lo que los requerimientos de mantenimiento y los costos de operación son reducidos
3. La caída de presión es relativamente baja, comparada con la cantidad de partículas recuperadas.
4. Las limitaciones de temperatura y presión dependen únicamente de los materiales de construcción.
5. La colección y disposición de polvo tiene lugar en condiciones secas.
6. Los requisitos de espacio son relativamente pequeños

### **Desventajas**

1. Las eficiencias de colección partículas son relativamente bajas, especialmente para partículas de tamaño inferior a 10  $\mu\text{m}$ .
2. No pueden procesar materiales pegajosos o aglomerantes.
3. Las unidades de alta eficiencia pueden presentar caídas altas de presión.



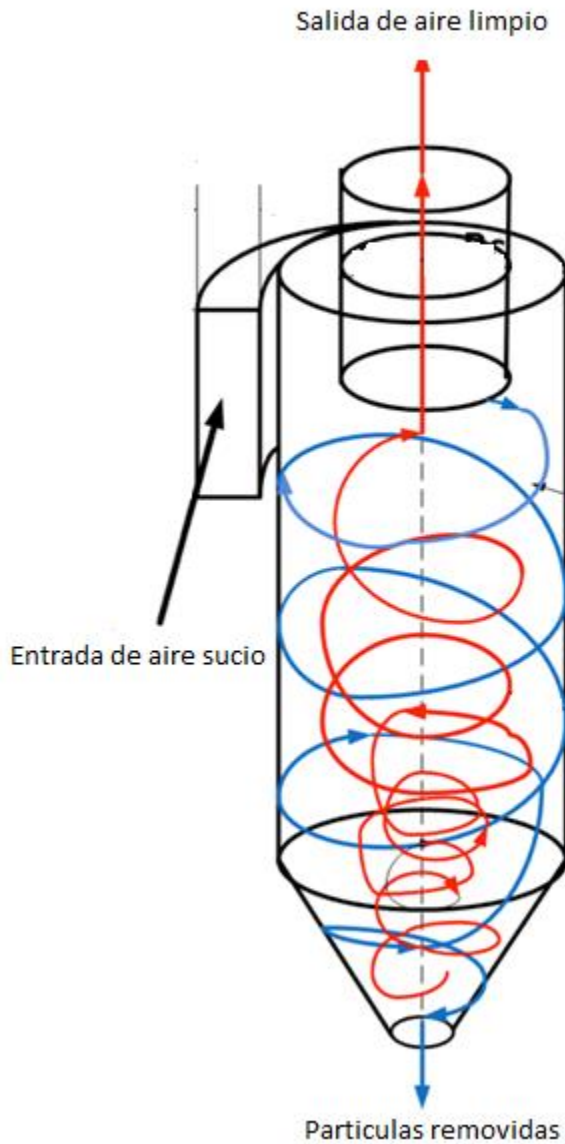


Figura 4.27 Ciclón convencional. La fuerza centrífuga separa las partículas de la corriente gaseosa  
 Fuente: Adaptado de <https://simulacionblog.com/modelado-y-simulacion-del-funcionamiento-de-un-separador-ciclonico/>

### 4.4.3 Torre de aspersión

Las torres de aspersión consisten en cámaras vacías de forma cilíndrica o rectangular por donde el gas asciende, pasando a través de un banco o bancos sucesivos de toberas de aspersión, ver

figura 4.28. En su ascenso el gas se encuentra con las gotas del líquido disolvente generadas por las toberas. Las gotas arrastran a las partículas contenidas en el gas y disuelven algunos de sus componentes gaseosos, permitiendo con ello el control simultáneo de gases contaminantes.

Las torres de aspersión se utilizan principalmente para la recuperación de partículas. Con estos dispositivos es posible la recuperación de partículas con diámetros superiores a 2.5  $\mu\text{m}$  y vapores y gases inorgánicos, como el ácido crómico, ácido sulfhídrico, amoníaco, cloruros, fluoruros, y dióxido de azufre  $\text{SO}_2$ .

Las torres de aspersión por lo general no se utilizan para el control de partículas finas, ya que serían necesarios grandes volúmenes de agua. Las eficiencias de control de partículas varían del 70 hasta más del 99%, dependiendo de la aplicación y tamaño de la partícula. Para los gases inorgánicos se estima que las eficiencias de control varían del 95 al 99%. En el control del  $\text{SO}_2$  se logran eficiencias comprendidas entre el 80 y hasta más del 99%, dependiendo del tipo de reactivo utilizado y el diseño de la torre de aspersión. Las torres de aspersión se utilizan para el control de emisiones procedentes de tanques de almacenamiento de aceite ligero y de benceno, que utilizan el aceite de lavado como disolvente. Es uno de los lavadores por vía húmeda más empleados para el control de  $\text{SO}_2$  en industrias de metales primarios no ferrosos (por ejemplo, cobre, plomo, y aluminio) aunque su uso más extendido se encuentra en los procesos asociados a las plantas de ácido sulfúrico o de azufre elemental.

Las ventajas y desventajas de las torres de aspersión son principalmente las siguientes:

### **Ventajas**

1. La caída de presión es relativamente baja
2. Se pueden manejar polvos inflamables y explosivos con poco riesgo
3. La construcción con plástico reforzado con fibra de vidrio permite operar en atmósferas altamente corrosivas
4. La inversión inicial es relativamente baja
5. No presenta muchos problemas de obstrucción
6. Los requisitos de espacio son relativamente bajos
7. Tienen capacidad para capturar tanto partículas como gases

### **Desventajas**

1. Su uso genera agua residual que tiene que ser tratada
2. El producto retirado se recolecta en húmedo
3. Las eficiencias de transferencia de masa son relativamente bajas
4. No son muy eficientes para la recuperación de partículas finas
5. Presentan costos de operación relativamente altos



Figura 4.28. Torre de aspersión. Las fuerzas inerciales y centrífuga actúan para separar las partículas de la corriente gaseosa

#### 4.4.4 Precipitador electrostático

Los precipitadores electrostáticos capturan partículas sólidas presentes en el flujo de gas a través de la aplicación de fuerzas electrostáticas; las partículas se cargan eléctricamente, y que a continuación son atraídas hacia placas metálicas con cargas opuestas ubicadas en el sentido vertical, lo que facilita su posterior remoción mediante la aplicación de golpes, para posteriormente depositarse en una tolva situada en la parte inferior de la unidad. En este tipo de precipitadores electrostáticos, el gas fluye horizontalmente y paralelo a las placas metálicas verticales, ver figura 4.29.

Los precipitadores electrostáticos se utilizan para controlar las emisiones de partículas con diámetros superiores a  $2.5 \mu\text{m}$ , así como contaminantes cuya toxicidad permite clasificarlos como peligrosos.

Las eficiencias de colección típicas de equipos nuevos varían entre el 99 y el 99.9%, mientras que equipos más antiguos pueden alcanzar valores comprendidos entre el 90 y el 99.9%. El factor que más afecta al grado de eficiencia de control alcanzado es el tamaño del precipitador, ya que de éste va a depender el tiempo de duración del proceso. Cuanto más tiempo permanezca una partícula en el precipitador es más probable que sea atrapada

Una gran cantidad de los precipitadores electrostáticos se utilizan en la industria de servicios eléctricos públicos, también se emplean en industrias papeleras y de pulpa de madera (7%), cementera y de otros minerales (3%), y de metales no ferrosos (1%).

Los precipitadores que operan en condiciones secas no son aconsejables para recolectar elementos pegajosos o neblinas.

Las ventajas y desventajas de los precipitadores electrostáticos son las siguientes:

### **Ventajas**

1. Los requisitos energéticos y los costos de operación tienden a ser bajos
2. Son capaces de alcanzar eficiencias de control muy altas, incluso con partículas muy pequeñas
3. Pueden operar en un rango amplio de temperaturas de gases, pudiendo alcanzar temperaturas de hasta 700°C
4. La recolección y eliminación del residuo en seco permite que el material pueda fácilmente ser manipulado. Los costos de operación son relativamente bajos

### **Desventajas**

1. La inversión inicial es generalmente alta
2. Son difíciles de instalar en sitios con espacio limitado puesto que deben ser relativamente grandes para obtener las bajas velocidades de gas que se necesitan para una recolección eficiente de partículas
3. Se requiere personal de mantenimiento preparado

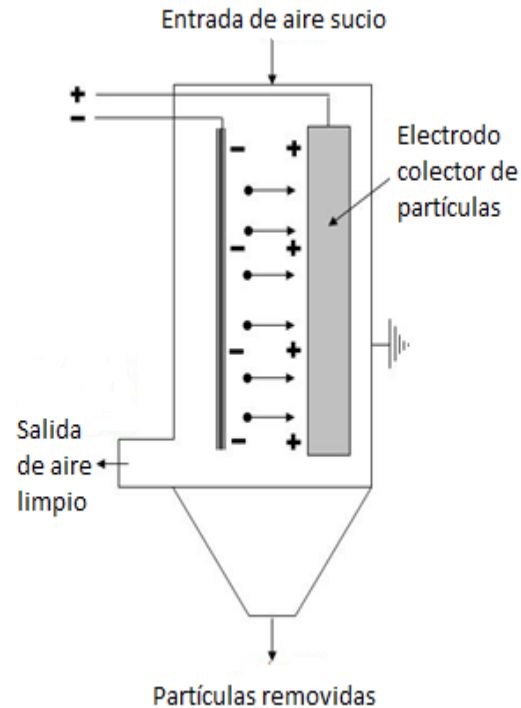


Figura 4.29. Precipitador electrostático. La fuerza electrostática actúa para separar las partículas de la corriente gaseosa. Fuente: Adaptado de <http://slideplayer.es/slide/1109652/>

## 4.4.5 Filtro de tela

En un filtro de tela, el gas pasa a través de una tela de tejido apretado o de fieltro y quedan retenidas en la tela las partículas contenidas en el gas, por tamizado y otros mecanismos de colección. A los filtros de tela se les conoce frecuentemente como casas de bolsas porque la tela está configurada, por lo general, en bolsas cilíndricas en paralelo, ver figura 4.30.

Se aplican al control de partículas con diámetros superiores a  $2.5 \mu\text{m}$  y al control de contaminantes peligrosos, como la mayoría de los metales. El mercurio es una excepción, ya que gran parte de sus emisiones tienen lugar en forma de vapor elemental.

Las eficiencias típicas de recuperación para equipos nuevos son del 99 al 99.9%. Los equipos más antiguos presentan un rango de eficiencias de operación del 95 al 99.9%. Entre los factores que determinan el valor de la eficiencia de recolección de los filtros de tela se encuentran la velocidad de filtración del gas, las características de las partículas, las propiedades de la tela y el mecanismo de limpieza.

Los filtros de tela funcionan con gran efectividad en diferentes aplicaciones. Se pueden utilizar en calderas de centrales termoeléctricas que utilizan carbón como combustible, en el procesamiento

de metales no ferrosos, (industria del cobre, plomo, zinc, aluminio, producción de otros metales), procesamiento de metales ferrosos (coque, producción de aleaciones de hierro, producción de hierro y acero, fundiciones de hierro gris, fundiciones de acero), productos minerales (manufactura de cemento, limpieza de carbón, explotación y procesamiento de piedra, manufactura de asfalto).

Las ventajas y desventajas de los filtros de tela con limpieza por sacudimiento mecánico son las siguientes:

### **Ventajas**

1. En general, los filtros de tela proporcionan altas eficiencias de recolección tanto para partículas gruesas como para las de tamaño fino
2. Son relativamente insensibles a las fluctuaciones de las condiciones de la corriente de gas
3. El aire de salida del filtro es bastante limpio y en muchos casos puede ser recirculado dentro de la planta, para conservación de energía
4. Las partículas se recolectan en seco
5. Su utilización es relativamente simple

### **Desventajas**

1. Para temperaturas de operación por encima de los 300 °C se requiere el uso de telas metálicas o de mineral refractario especial, lo que puede resultar muy costoso
2. Los filtros de tela tienen muchos requisitos de mantenimiento, como, por ejemplo, el remplazo periódico de las bolsas
3. La vida de la tela puede verse reducida a temperaturas elevadas y en presencia de constituyentes gaseosos ácidos o alcalinos
4. No son adecuados para ambientes húmedos, ya que los materiales higroscópicos, la condensación de humedad o los materiales adhesivos espesos pueden causar costras o tapar la tela.

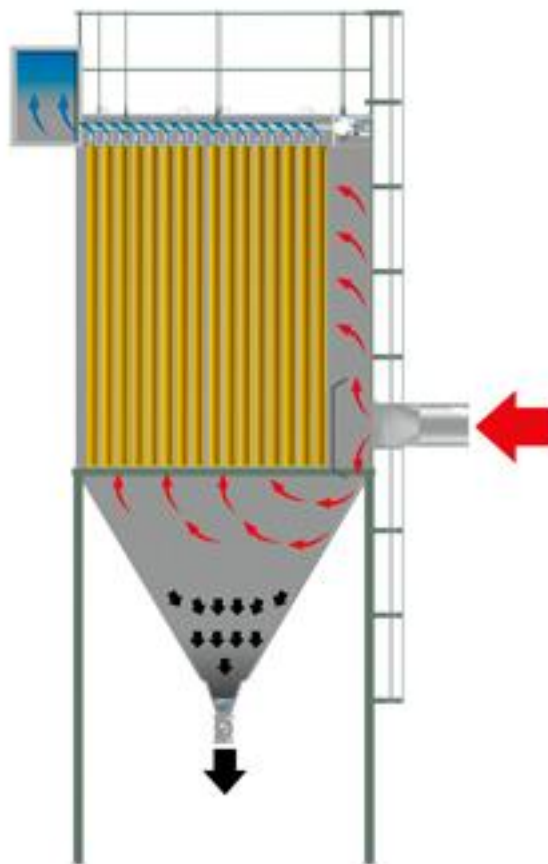


Figura 4.30. Filtros de tela. El gas pasa a través de una tela y quedan retenidas las partículas contenidas en el gas.  
Fuente: [http://www.bernauer.com.br/index.php?pagina=filtro\\_mangas](http://www.bernauer.com.br/index.php?pagina=filtro_mangas)



## 4.5 Problemas y actividades propuestas

1. Se desea construir una planta termoeléctrica de 1000 MW de capacidad a base de carbón. La eficiencia térmica de la planta es de 37%. El poder calorífico del carbón es de 24 kJoule/g. Si el contenido de azufre del carbón es de 3% en peso, calcule, mediante estequiometría, la emisión de SO<sub>2</sub> en g/s.

2. Al efectuar un monitoreo de la calidad del aire se determina una concentración de CO de 10400 µg/m<sup>3</sup>, como máximo valor horario en un lapso de 24 horas. La norma de calidad del aire de este contaminante establece un valor de 9 ppm en 8 horas. ¿Qué se puede concluir respecto a la calidad del aire existente en el periodo de mediciones mencionado?

Datos adicionales:

Temperatura ambiente 25 °C

Presión atmosférica 1013 mbar

3. En un día totalmente nublado y con vientos de 1.3 m/s provenientes del NNE, se detecta una concentración de 0.30 ppm de SO<sub>2</sub> en un punto situado a 1 km hacia el sur de una chimenea que tiene una altura física de 60 m. Por la chimenea escapa un gasto de gases de 50 m<sup>3</sup>/s a una temperatura de 125 °C. Si la temperatura ambiente es de 25 °C y la chimenea se encuentra a nivel del mar:

- a) Determine la emisión de este contaminante en g/s
- b) Obtenga la concentración máxima de SO<sub>2</sub> generada bajo las condiciones meteorológicas dadas

4. Determine la distancia mínima que deberá existir entre una fuente potencial de cloro con una capacidad de liberar 30 kg de dicho gas para prevenir una concentración máxima de 100 µg/m<sup>3</sup>, si éste se libera instantáneamente como consecuencia del rompimiento de una válvula de seguridad que se encuentra a 10 m del suelo. Para este problema considere las condiciones meteorológicas más adversas posibles.

5. Una central termoeléctrica de 200 MW de capacidad de generación tiene una chimenea de 100 m con un radio de 2.5 m, el gas fluye al exterior con una velocidad de 13.5 m/s, y a una temperatura de 145 °C. La temperatura ambiente es de 15 °C, la velocidad del viento en la chimenea es de 5 m/s, y la atmósfera es estable, clase E, con un gradiente de 5 °C/km. Si emite 300 g/s de SO<sub>2</sub> y el viento sopla del S:

- a) Estimar la concentración a ras de suelo a una distancia de 16 km en la dirección en la que sopla el viento

b) Si ahora el viento proviene del SSE, encontrar la concentración en el mismo punto que en a)

6. Una industria libera 500 g/s de partículas respirables mediante una chimenea que provoca una concentración máxima a 1200 m de distancia de la fuente, en un día despejado con vientos de 2 m/s a las 12 am. Calcule la concentración generada por la fuente.

### Actividad 4.1

#### Contaminación fotoquímica

Con base en el video “Contaminación fotoquímica” que puedes ver en el siguiente enlace: <https://youtu.be/xvHl3KzVRSQ> contesta las siguientes preguntas.

1. Investiga qué ciudades de México tienen problemas asociados con la contaminación fotoquímica.
2. Sugiere diversas acciones sencillas que podrían realizarse para controlar este tipo de contaminación en la Ciudad de México.
3. ¿De dónde proviene el ozono en las zonas urbanas? ¿Todas las zonas urbanas presentan este problema?
4. Averigua en qué otra parte de la atmósfera terrestre existe ozono de manera natural y cuál es su papel desde el punto de vista de la vida en la Tierra.

### Actividad 4.2

#### Lluvia ácida

Con base en el video “Lluvia ácida” que puedes ver en el siguiente enlace: <https://youtu.be/KjzpdP6hs>

contesta las siguientes preguntas.

1. ¿Por qué un valor de pH del agua de lluvia inferior a 7 no necesariamente se considera lluvia ácida?
2. Averigua a partir de qué valor de pH se considera que la lluvia es ácida.
3. ¿En qué sentido la lluvia ácida tiene un impacto global?
4. ¿Cómo consideras que el fenómeno de la lluvia ácida podría controlarse?
5. Investiga qué tipo de monumentos históricos están más expuestos al deterioro provocado por la lluvia ácida en México.

**Actividad 4.3**  
**Fuentes de emisión**

Con base en el video “Fuentes de emisión” que puedes ver en el siguiente enlace:  
<https://youtu.be/nHwcFxEimuE>

Contesta las siguientes preguntas.

1. Señala tres fuentes de contaminación atmosférica no mencionadas en el video y los contaminantes que libera.
2. Investiga el significado de norma de emisión y norma de calidad del aire
3. Revisa la publicación AP-42 de la EPA (Environmental Protection Agency) y obtén el factor de emisión que corresponde a la emisión de CO para una central termoeléctrica como la que se mencionó en el ejemplo resuelto considerando que ésta utiliza, en lugar de combustóleo, gas natural para generar electricidad.
4. Si el poder calorífico del gas natural PC = 1000 BTU/scf, estima la emisión de CO en g/s.

\* scf = pies cúbico estándar

**Actividad 4.4**  
**Elementos del problema de contaminación atmosférica**

Con base en el video “Elementos del problema de contaminación atmosférica” que puedes ver en el siguiente enlace: <https://youtu.be/8G7ZDzk6A6A>

contesta las siguientes preguntas.

5. ¿Cuáles son los factores que determinan que, a partir de una fuente de emisión de un contaminante específico, los receptores estén expuestos a niveles de calidad del aire variables en el tiempo?
6. En el caso de que se presente una contingencia de contaminación en una zona urbana con millones de vehículos en circulación, ¿cómo podría la legislación ambiental contribuir a evitar el que no se alcancen niveles de contaminación perjudiciales a la salud?
7. Menciona varias razones por las cuales las partículas PM<sub>2.5</sub> representan un riesgo mayor a la población que las partículas PST.
8. En el video que presenta las concentraciones de partículas PM<sub>10</sub> en algunas ciudades de América, dos ciudades tienen una población similar a la Ciudad de México, sin embargo, la contaminación que se muestra la CDMX es mucho mayor. Menciona dos razones que podrían explicar este comportamiento.

**Capítulo****5**

## Objetivos de aprendizaje

---

**Objetivo general:** El alumno explicará los efectos más importantes de la contaminación por ruido y la normatividad en la materia; medirá el nivel de presión acústica y aplicará los principios de la física para la predicción del nivel de ruido. Finalmente, propondrá las medidas de control correspondientes.

En este capítulo aprenderás acerca de:

1. La diferencia entre ruido y sonido, a través del análisis de sus definiciones.
2. Las propiedades más importantes del sonido para su estudio
3. El mecanismo de audición del ser humano, y cómo el ruido lo afecta, además de otros efectos en el organismo y la salud mental.
4. Cómo predecir los niveles de presión acústica en función de las fuentes que provocan ruido.
5. Como controlar este tipo de contaminación.

## Capítulo

## 5

## 5. Contaminación por ruido y control

*“El silencio es el ruido más fuerte, quizá el más fuerte de todos los ruidos”*

*Miles Davis*

A partir de la revolución industrial el mundo ha experimentado niveles de contaminación crecientes hasta el día de hoy. Existen tipos de contaminación que son más “visibles”, más “inmediatos” de estudiar, los que involucran materia generalmente residual de algún proceso antrópico; sin embargo, hay otras formas de contaminación que día con día su estudio cobra más importancia: las relativas a la energía y energía residual. A este grupo pertenece la contaminación por ruido, al que los seres vivos están expuestos durante toda su vida, incluso desde antes de su nacimiento. Este fenómeno se presenta especialmente en localidades que presenten algún grado de industrialización.

El ruido, definido como sonido indeseable, es producido normalmente por algún dispositivo creado por el hombre o una actividad realizada por él: automóviles, aeronaves, máquinas industriales, ferrocarriles, obras civiles, alarmas, en fin, en el ambiente se encuentra de manera persistente la **antofonía** (conjunto de sonidos generados por el ser humano).

El ruido afecta a una gran cantidad de organismos en el planeta en mayor o menor escala. Interviene en los procesos de comunicación, reproducción, obtención de alimento, ciclo de sueño, etc., y el ser humano no está exento. Tiene efectos tanto fisiológicos como psicológicos negativos, además de que es bastante complicado estudiar las relaciones directas causa-efecto en el organismo. Conforme se conoce más sobre estos efectos, existe mayor interés en evitar o mitigar con mecanismos de control el ruido.

Este capítulo se enfoca en presentar el origen, los efectos y las técnicas para medir y controlar este tipo de energía contaminante. Se estudian primeramente las propiedades del sonido, la diferenciación entre los sonidos y ruidos, la escala de medición y los instrumentos para registrar los niveles de presión acústica, el mecanismo de la audición en el ser humano, los efectos en la salud humana, se detallan las principales fuentes de emisión de ruido, las técnicas de predicción y los métodos de control.

## 5.1 Sonido y ruido

Se entiende por sonido a alguna alteración física en el medio sólido, líquido o gaseoso, que provoca la compresión y descompresión de manera alternada de las moléculas del medio. Es necesario que el medio presente moléculas que permitan la propagación de las ondas sonoras, y que presente elasticidad, por lo que el sonido no se transmite en el vacío.

El sonido parte de un foco o fuente, en donde son producidas las ondas sonoras debido a las variaciones de presión por encima y por debajo del valor estático de la presión atmosférica (en caso de transmitirse por vía aérea, como es común que se registre).

Una vez emitido, la velocidad con la que se propague el sonido dependerá de las propiedades físicas del medio por el que se traslade, como se muestra en la tabla 5.1. Se puede apreciar que la velocidad en los sólidos es mayor que en los líquidos, y a su vez es mucho mayor que en los gases, ya que, al existir mayor cantidad de moléculas por unidad de volumen, las ondas sonoras se trasladarán con mayor celeridad.

Tabla 5.1 Velocidad del sonido en distintos medios

Material	Densidad típica (kg/m <sup>3</sup> )	Velocidad de propagación del sonido (m/s)
Aire seco (a 20 °C)	1.2	344
Agua	1,000	1,416
Madera	480-800	3,048-4,572
Cobre	8,890	3,560
Concreto	2,200-2,400	4,000
Aluminio	2,700	5,100
Hierro	7,894	5,130
Diamante	3,500	12,000

Fuente: Basado en (Hernández Corona, 2014)

La rama de la física encargada de estudiar el sonido y sus propiedades es la **acústica**, haciéndolo mediante modelos tanto físicos como matemáticos. Algunas de las áreas de trabajo en acústica son:

- ✓ Acústica arquitectónica. Estudia la interacción del sonido con las construcciones. Participa en el diseño de: salas de conciertos, auditorios, teatros, estudios de grabación, iglesias, salas de reuniones, salones de clases, etc.
- ✓ Ingeniería acústica. Estudia el diseño y utilización de transductores e instrumentos de medición de sonido. Incluye la instrumentación para diagnóstico médico, sísmico, grabación y reproducción de voz y música. Una rama de la ingeniería acústica es la electroacústica la cual trata con micrófonos y altavoces.



- ✓ Control de ruido y vibraciones. Esta área cobra cada vez mayor importancia dado el aumento en el reconocimiento del ruido como un factor de contaminación que afecta seriamente la salud. Su campo de trabajo está en el sector ocupacional de la industria y los servicios, en los organismos de control gubernamental y en el diseño arquitectónico. También tiene un campo importante en el mantenimiento preventivo de maquinaria mediante el análisis de sus vibraciones.

## 5.1.1 Propiedades del sonido

### Frecuencia

Se refiere a fenómenos periódicos, y se define como el número de veces que se repite el fenómeno por unidad de tiempo, en otras palabras, es el número de veces que pasa una partícula por unidad de tiempo en la misma posición y desplazándose en el mismo sentido. En el Sistema Internacional de Unidades, la unidad de medida de la frecuencia es el Hercio (Hz), en honor al físico alemán Heinrich Rudolf Hertz. Por lo tanto, 1 Hz representa un ciclo por segundo.

Los sonidos pueden clasificarse en función del rango audible humano:

**Infrasonidos.** Son sonidos con frecuencias menores a 20 Hz, no percibidos por el oído humano, aunque es difícil establecer esta frontera inferior, ya que es posible percibir las vibraciones en tejidos blandos del cuerpo.

**Espectro audible.** Sonidos que se encuentran en frecuencias comprendidas entre los 20 y 20,000 Hz (figura 5.1). Cada individuo tiene una frecuencia límite superior, y varía a lo largo de su vida reduciéndose conforme pasa el tiempo, aunque puede reducirse drásticamente si el oído sufre algún deterioro por estar expuesto a alguna fuente dañina. Una persona de más de 60 años sólo percibe frecuencias hasta unos 10 o 12 kHz mientras que un niño puede percibir frecuencias de hasta 20 kHz.

**Ultrasonido.** Estos sonidos tienen frecuencias mayores a 15 kHz y es comúnmente percibido por algunos animales como los perros. No existe algún límite superior de frecuencia, es por ello que recibe este nombre.

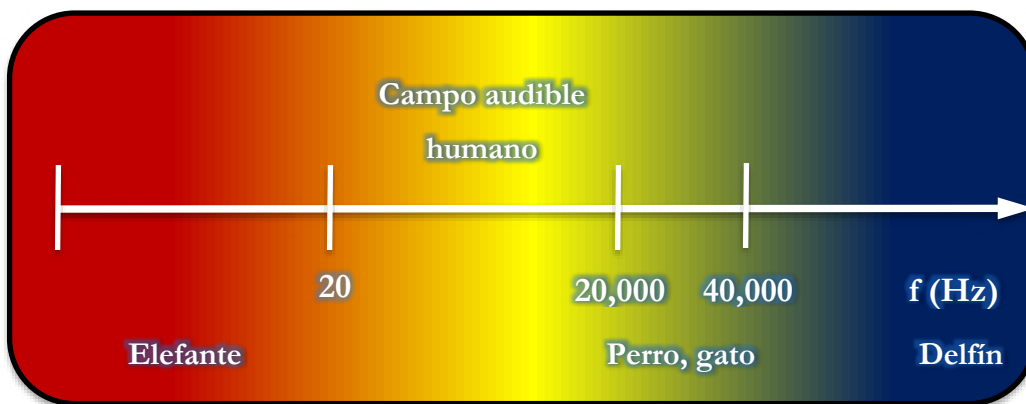


Figura 5.1 Espectro audible

## Periodo

Es el tiempo transcurrido entre dos valles o crestas en la oscilación (véase fig. 5.2).

El periodo y la frecuencia se relacionan según la ecuación 5.1:

$$P = \frac{1}{f} \quad (5.1)$$

donde:

$P$  = periodo [T]

$f$  = frecuencia [T<sup>-1</sup>]

## Longitud de onda

Es la distancia entre crestas o valles de presión adyacentes. Esta longitud puede determinarse con la ecuación 5.2, en donde se observa la relación que existe entre longitud de onda y frecuencia:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (5.2)$$

en donde:

$\lambda$  = longitud de onda [L]

$c$  = velocidad del sonido en el medio [LT<sup>-1</sup>]

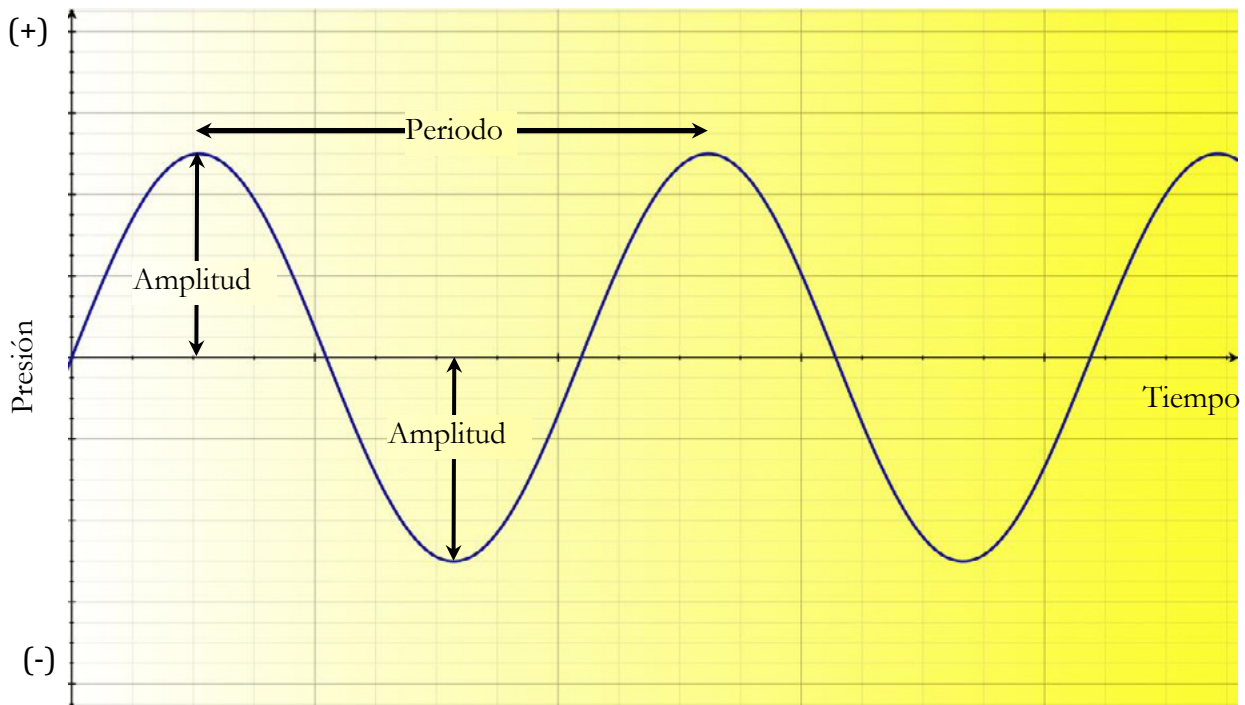


Figura 5.2. Representación gráfica de una onda sonora, en la que se muestran sus características principales.

### Amplitud de onda

En una onda con movimiento armónico simple, la amplitud de la onda es la altura al punto máximo o la profundidad del valle, medida desde la línea de presión cero. Esta medida se puede observar en la figura 5.2.

### Presión acústica

Resulta de la adición de la presión estática (debida a la presencia del aire atmosférico que rodea al cuerpo en estudio) y la presión que se produce por las ondas sonoras (ecuación 5.3). Comúnmente es expresada en micro-pascales<sup>15</sup> ( $\mu\text{Pa}$ ).

$$P(t) = P_A + p(t) \tag{5.3}$$

en donde:

---

<sup>15</sup> Pascal (Pa): unidad de presión del Sistema Internacional de Unidades. Se define como la presión que ejerce una fuerza de 1 newton sobre una superficie de 1 metro cuadrado normal a la misma ( $\text{Pa} = \text{N}/\text{m}^2$ ).

$P(t)$  = presión acústica en función del tiempo

$P_A$  = presión atmosférica

$p(t)$  = presión producida por ondas sonoras en función del tiempo

Para cuantificar la magnitud de las ondas sonoras sobre un tiempo de medición  $t$ , se utiliza la raíz cuadrada media de la presión sonora ( $p_{rcm}$ ), y se define de acuerdo con la ecuación 5.4. Esta regla de combinación permite combinar diferentes valores de tal manera que se eliminen los valores negativos obteniendo una escala absoluta.

$$p_{rcm} = \left[ \frac{1}{t} \int_0^t p^2(t) dt \right]^{1/2} \quad (5.4)$$

## Potencia e intensidad del sonido

La potencia sonora o acústica ( $W$ ) es la cantidad de energía en un tiempo determinado transmitida por las ondas de presión sonora en la dirección de su propagación. Por su parte, la intensidad sonora ( $I$ ) se define a través de la razón de la potencia sonora y el área normal ( $A$ ) a la dirección de propagación de la onda que atraviesa, como sigue

$$I = \frac{W}{A} \quad (5.5)$$

Asimismo, la intensidad es proporcional al cuadrado de la presión del sonido, siempre y cuando la distancia sea suficiente de la fuente (Kiely & Veza, 1999), es decir

$$I = \frac{(p_{rcm})^2}{\rho c} \quad (5.6)$$

en donde:

$\rho$  = densidad del medio [ $ML^{-3}$ ]

### 5.1.2 Medición del sonido

Medir las distintas características del sonido no es tarea fácil. Como se mencionó al inicio de este capítulo, el sonido es un tipo de energía, y para poderla medir es necesario que la fuente la esté emitiendo, por lo que el instrumento de medición del sonido deberá estar colocado de manera adecuada en tiempo, forma y espacio para poder obtener un valor útil. Al ser una onda de presión que se propaga en un medio elástico transportando cierta cantidad de energía, el sonido puede ser evaluado cuantitativamente a partir de medidas de la presión e intensidad sonoras.

Otra dificultad importante en la medición de una fuente sonora es que el ser humano tiene una amplia capacidad de percibir sonidos, particularmente el oído es capaz de detectar en un amplio ámbito tanto de amplitud como de frecuencia de las ondas sonoras. La presión sonora más débil o tenue que una persona es capaz de percibir es aproximadamente 0.00002 Pa. Un motor a reacción, por ejemplo, de alguna aeronave, alcanza los 100 Pa. Esta versatilidad del oído humano se debe a que no responde a los estímulos sonoros de manera lineal. Lo anterior implica que resulta necesario utilizar una escala logarítmica que permita abarcar esta amplia variedad de valores de presión acústica.

## Decibelio

Un bel o belio (en honor a Alexander Graham Bell) es una unidad logarítmica de medida utilizada para comparar o relacionar una cantidad con otra llamada de referencia, particularmente dos potencias acústicas. Esto implica que estrictamente no es una unidad de medida, y no se encuentra en el Sistema Internacional. Las mediciones en esta escala son llamadas **niveles**, por lo que se le utiliza el término nivel de presión acústica (NPA). En la práctica, debido a la amplitud de presiones sonoras que resulta necesario registrar, se utiliza el decibelio, su submúltiplo equivalente a 0.1 belios, por lo que 10 decibelios equivalen a 1 belio.

Mediante una expresión logarítmica base diez, el decibelio se utiliza entonces para comparar la presión sonora con una presión de referencia, que es una aproximación al nivel de presión mínimo que el oído humano es capaz de percibir. A la cantidad del denominador de la razón, se le llama referencia. El argumento del logaritmo ha de ser siempre adimensional y la escala correspondiente da el nivel sonoro, por encima o por debajo del valor de la referencia, según sea el signo positivo o negativo. Evidentemente el valor de 0 dB, en la escala de nivel, es el correspondiente al valor de referencia.

Se define según la ecuación 5.7:

$$L' = 10 \log \frac{C}{C_0} \quad (5.7)$$

en donde:

$L'$  = nivel, en decibelios (dB)

$C$  = cantidad medida

$C_0$  = cantidad de referencia

El nivel de referencia varía según el tipo de medida que se esté realizando. Al conocer qué tipo de medición se está realizando especificando la cantidad de referencia  $C_0$ , el resultado de la expresión adquiere un sentido físico.

El nivel de potencia de referencia es de  $10^{-12}$  vatios, que corresponde a una fuente cuya potencia está en el umbral de audición del ser humano. Lo anterior implica que el nivel de potencia sonora en decibelios se define según la ecuación 5.8:

$$L_w = 10 \log \frac{W}{10^{-12}} \quad (5.8)$$

en donde:

$L_w$  = nivel de potencia sonora para  $10^{-12}$  W, en decibelios (dB)

$W$  = potencia sonora de la fuente sonora, en vatios (W)

Obsérvese que cuando una fuente tiene el doble de potencia respecto a la fuente de referencia ( $W_0$ ) implica un aumento aditivo de 3 dB:

$$\log 2 = 0.301B = 3.01dB$$

Al ser la potencia sonora proporcional al cuadrado de la presión del sonido, se define entonces el nivel de presión del sonido de acuerdo con la expresión 5.9:

$$L_p = 10 \log \frac{p_{rcm}^2}{p_{rcm_0}^2} \quad (5.9)$$

en donde:

$L_p$  = nivel de presión sonora, en decibelios (dB)

$p_{rcm}$  = presión medida, (raíz cuadrada media de la presión sonora en Pa)

$p_{rcm_0}$  = presión de referencia (20  $\mu$ Pa)

Por lo que

$$L_p = 20 \log \frac{p_{rcm}}{p_{rcm_0}} \quad (5.10)$$

## Equipos de medición de sonido

Así como el oído humano capta y transforma vibraciones transmitidas por el aire, los aparatos de medición sonora funcionan de manera análoga. Éstos utilizan micrófonos de condensador muy sensibles, que trabajan en la zona de frecuencias audibles en donde no se producen fenómenos de resonancia. El hecho de que no intervenga la resonancia para los micrófonos es muy importante ya

que cualquier aumento o disminución de resonancia<sup>16</sup> con respecto al nivel medio de trabajo puede implicar un error en el valor medido.

Los objetivos principales de los aparatos de medición acústica son:

- Captar objetivamente las magnitudes físicas que causan excitación al oído
- Proporcionar datos de cómo opera y percibe el oído normal humano por la acción del sonido.

Para lograr dichos objetivos, los aparatos de medida acústica se basan sólo en la electrónica bajo el principio de transformación del sonido a una forma de energía eléctrica; por lo anterior, deben contar con un dispositivo que reaccione a la presión acústica, normalmente es un micrófono. El error de todo el aparato no debe superar al umbral diferencial<sup>17</sup> del oído.

Para asegurar el correcto funcionamiento de todo equipo de medición de sonido se utilizan fuentes sonoras patrón y sistemas calibradores.

Existen varios tipos de instrumentos para registrar diversas características del sonido, algunos de ellos se presentan más adelante.

### Decibelímetro o sonómetro

Es un instrumento diseñado para registrar los niveles de presión o intensidad acústica (fig. 5.3). Probablemente es el aparato más común en todo estudio y medición acústicos, registro de ruido ambiental, de maquinaria, tránsito vehicular, entre otros.



Figura 5.3. Sonómetro mostrando una medición.

<sup>16</sup> La resonancia ocurre cuando una vibración en una frecuencia determinada, genera que un cuerpo comience a oscilar.

<sup>17</sup> El umbral diferencial de la audición es la mínima variación necesaria para que se produzca un cambio en la sensación auditiva debido al estímulo físico



En la tabla 5.2 se observa una clasificación breve de los sonómetros, donde resalta que los sonómetros con mayor tolerancia son los de propósito general y los de menor, los de laboratorio. Dentro de su estructura física, estos aparatos poseen micrófono, amplificador, filtros ponderados y un cuadrante para lectura. El sonido, al ser medido, se capta con toda su energía acústica en el micrófono, siendo indistintas las frecuencias de los sonidos que pudieran componerlo.

Tabla 5.2. Clasificación de los sonómetros

Clase	Tipo	Tolerancia	Uso
Clase 0	Tipo 0	Baja	Laboratorio
Clase 1	Tipo 1	Media	Precisión
Clase 2	Tipo 2	Alta	Propósito general

Los resultados que reporta el sonómetro se leen por una sola cifra que se interpreta como un nivel global de sonido. Es decir, aunque existan dos sonidos con espectros distintos, éstos pueden tener el mismo nivel global.

Con respecto a los filtros ponderados, es necesario esclarecer algunos detalles. Al no hacer uso de ninguno de ellos, la medición será dada en decibelios o decibelios lineales.

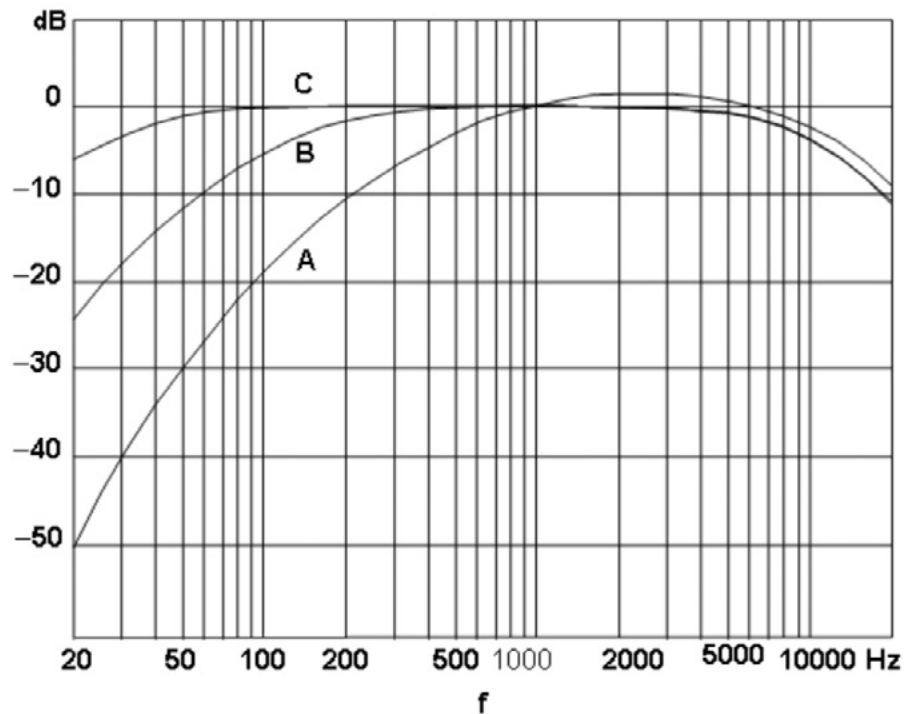


Figura 5.4. Curvas de ponderación (Harris, 1995).

Los filtros de ponderación (fig. 5.4) más utilizados se enlistan de la siguiente manera:

- **Filtro de ponderación A.** Empleado regularmente para modelar la respuesta del oído humano a niveles bajos de presión. En la actualidad la mayoría de las normas internacionales lo utilizan para clasificar los niveles de ruido aceptables. Estos niveles son denominados como: A, dB(A).
- **Filtro de ponderación B.** Su uso se centra en la modelación de la respuesta del oído humano a niveles de presión medios. Se utiliza en niveles de escucha musical. Sus niveles son denominados decibelio B, dB (B).
- **Filtro de ponderación C.** Su uso primordial es modelar la respuesta del oído humano a niveles de presión altos. Se utiliza para evaluar ruidos ambientales, así como sonidos de baja frecuencia en la frecuencia audible. A estos niveles se les denomina decibelio C, dB (C).

Sin embargo, existen otro tipo de ponderaciones llamadas temporales, las cuales dependen de la velocidad con la que se toman los niveles. Éstas podemos agruparlas de la siguiente manera:

- Ponderación rápida (fast). Se ponderan mediante constantes nominales de tiempo de 125 milisegundos. Están influidas por los sonidos generados recientemente.
- Ponderación temporal lenta (slow). Se ponderan mediante constantes nominales de tiempo de 1000 milisegundos. Están influidos por los sonidos generados en un pasado distante.
- Ponderación temporal por impulso. Posee una constante de 35 milisegundos para sonidos, midiendo la respuesta del oído humano a sonidos de corta duración.

Con el uso de estas ponderaciones se pueden obtener “niveles máximos”, que son los valores máximos obtenidos en determinado tiempo de medición dentro de una ponderación indicada. De igual forma se pueden obtener los “niveles mínimos”, los cuales son los valores mínimos que se obtiene en un tiempo determinado.

Las mediciones del nivel acústico se realizan apuntado el micrófono hacia la fuente de sonido y leyendo el instrumento que ya está calibrado en dB. Para obtener mediciones correctas, se recomienda alejar el instrumento del cuerpo del observador, ya que éste último perturba el campo sonoro al absorber y/o reflejar energía; lo mismo sucede con las paredes o muros próximos, por lo que se recomienda hacer mediciones manteniendo una distancia de los obstáculos.

Por último, un complemento indispensable en la medición es la que proporciona un calibrador acústico externo, conocido como pistófono. Se sugiere su uso antes de cada medición, ya que al hacerlo se garantiza que el sonómetro se encuentra en condiciones correctas de funcionamiento.

### **Dosímetro acústico**

Instrumento utilizado para medir la exposición sonora a la que se somete un ser humano. El efecto que causa el sonido sobre el oído humano no solamente está relacionado con el nivel acústico, sino también con la duración a la exposición. Lo anterior da pie a la evaluación del peligro o riesgo con el que se corre al estar expuesto al sonido, dicho en otros términos “exposición sonora”, y que se puede expresar según la ecuación 5.11:

$$L_{eq} = 10 \log \frac{1}{n} \left[ \sum_1^n 10^{L_i/10} \right] \quad (5.11)$$

donde:

$L_{eq}$  = nivel de exposición sonora, en decibelios (dB)

$L_i$  = nivel sonoro instantáneo, en dB

$n$  = número de mediciones instantáneas

Los dosímetros operan como una especie de sonómetros integrales, reciben la señal como un sonómetro convencional, acumulan y procesan los datos del ambiente usando la ecuación 5.11.

La estructura física del dosímetro se compone de un dispositivo pequeño con la cualidad de ser portable, un cable que conecta el dosímetro al micrófono (el cual suele acomodarse en la ropa de quien lo use, generalmente al cuello o solapa de la camisa), de manera que el micrófono pueda obtener niveles similares a los que recibe el oído humano (fig. 5.5).



Figura 5.5. Dosímetro acústico. Fuente: Catálogo comercial del dosímetro personal Casella dBadge.

## Espectrómetro

El espectrómetro es apropiado cuando se requiere conocer el espectro de frecuencias sonoras, por ejemplo, cuando se requiere aplicar técnicas para el control del ruido (que se estudia más adelante), ya que se adapta a la medición de niveles acústicos que se acotan dentro de una banda de frecuencia determinada, por medio de una serie de filtros de frecuencia variable con mayor o menor agudeza.

En cuanto al espectro del sonido, permite entonces conocer las frecuencias dominantes, información que resulta muy valiosa para determinar tanto técnicas como materiales utilizados en el diseño acústico.

En el mercado hay una gran variedad de espectrómetros y su diferencia principal está en el ancho de banda<sup>18</sup> que utilizan. Se pueden clasificar en tres grandes grupos: analizadores de ancho de banda constante; de ancho de banda porcentual constante; y por último, de bandas nominales, octavas, medias y tercios (Esparza, 1998).

El primer grupo mide el nivel de los sonidos confinados dentro de una gama de frecuencias, donde el ancho es constante e independiente de la frecuencia central. Por ejemplo, un espectrómetro que mide frecuencias entre 40 y 50 000 Hz, con un ancho de banda de 3, 10 o 50 Hz. Resulta conveniente decir que, por ejemplo, si es sintonizado en 3000 Hz, se pueden medir los sonidos comprendidos entre: 2998.50 y 3001.50 Hz (ancho 3 Hz); 2995 y 3005 Hz (ancho 10 Hz); y 2975 y 3025 Hz (ancho 50 Hz).

En el segundo grupo, lo que se mantiene constante es el porcentaje respecto a la frecuencia central. Así, por ejemplo, regresando al ejemplo anterior, ahora con anchos de banda que son 6, 5, 8, 12, 16, 21 ó 29% de la frecuencia central. De modo que, por ejemplo, para un ancho de banda de 5 % se tiene a 3000 Hz un ancho de banda de 150 Hz.

El tercer grupo es similar al anterior, sólo que trabaja con bandas fijas determinadas por normas internacionales. Así se tiene que para las bandas octavas la relación de frecuencias límite superior e inferior es 2, para las medias octavas  $\sqrt{2}$  y para los tercios  $\sqrt[3]{2}$ .

### 5.1.3 Ruido

Como se mencionó con anterioridad al inicio de este capítulo, cuando el sonido es indeseable se convierte en **ruido**. El sonido se presenta en cierto momento y lugar definidos, y cuando alguno de estos dos aspectos es inadecuado, se califica como ruido. Esto implica que los sonidos se pueden clasificar en función de la respuesta subjetiva del receptor, por lo que pueden valorarse de manera diferente por receptores distintos. No sólo depende de la respuesta subjetiva, sino de otros aspectos que lo hacen indeseable o dañino, por ejemplo, el nivel de presión sonora, duración, hora del día en que se presenta, frecuencia, entre otros.

Si se toma por ejemplo las palabras emitidas por las personas, pueden considerarse como sonidos, siempre que los niveles de presión sonora que producen no sean excesivos, ya que en este caso se tendrían que denominar ruidos, ya que interferirían en alguna actividad humana.

Además de los riesgos para la salud humana que implica estar expuesto al ruido, este tipo de contaminación puede afectar a los ecosistemas, sobre todo si éstos tienen especies sensibles.

Por otro lado, resulta complejo expresar en una escala la sensación o las molestias percibidas cuando una fuente sonora afecta al ser humano. No hay que confundir la causa (estímulo o sollicitación exterior)

---

<sup>18</sup> El ancho de banda es la longitud media en Hz, del rango de frecuencias en la que se concentra la mayor potencia de las señales.

con el efecto subjetivo en el hombre. La percepción de una onda sonora por el oído implica una vibración de las partículas de aire situadas delante del tímpano, con una frecuencia definida y una amplitud determinada. Esta vibración puede considerarse también debida a las variaciones de presión del aire en ese mismo punto. Posteriormente en este capítulo se detallarán aspectos anatómicos y fisiológicos de la audición humana.

En prácticamente cualquier lugar, existe ruido procedente de diferentes fuentes, unas próximas y otras lejanas, unas intensas y otras tenues, puede venir reflejado por las superficies, e incluso una parte de él, puede proceder de varias direcciones. De acuerdo con lo expuesto, el ruido total asociado con un determinado entorno, se llama **ruido ambiental o de fondo**.

El ruido se puede clasificar de diferentes formas, una por ejemplo en función del nivel de presión sonora (nivel de intensidad):

- elevado (nivel de ruido  $>90$  dB), produce dolor y pérdida de audición, que debe controlarse;
- intermedio ( $40$  dB  $<$  nivel de ruido  $<$   $90$  dB), este ruido se puede soportar, aunque es molesto;
- bajo (nivel de ruido  $<$   $40$  dB), no produce trastornos físicos, aunque podría causar psicológicos.

El silencio absoluto ( $0$  dB) no se obtendrá nunca en condiciones naturales, y además se debe de evitar, puesto que afecta al sistema nervioso humano. Sin embargo, se pueden lograr niveles cercanos al silencio absoluto en condiciones controladas como es el caso de las cámaras anecóicas. Las cámaras anecóicas están aisladas y equipadas con paneles que eliminan la reflectancia sonora lo que permite acercarse a el silencio absoluto.

Se puede decir que la mayoría de las fuentes de ruido provocan un gran número de componentes sonoras, distribuidas continuamente en el espectro de frecuencias.

Considerando las distintas características asociadas con el sonido, existe una gran variedad de posibilidades para categorizar el ruido. Las más usuales se enlistan a continuación:

- "Ruido de fondo", es el ruido circundante, asociado a un entorno particular, siendo generalmente una composición de sonidos de varias fuentes distintas entre sí.
- "Ruido blanco", es de naturaleza estadísticamente aleatoria, es decir que tiene igual energía por ancho de banda de frecuencia, sobre una banda total específica. Es decir, si el nivel de presión sonora medido con un analizador, es constante en un amplio margen de frecuencias, se dice que el espectro sonoro es plano, y se le denomina ruido blanco, en otras palabras, un ruido de este tipo es aquel cuya presión sonora cuadrática media es uniforme y continua con la frecuencia. Un ruido blanco puede ser también ruido aleatorio, caracterizado porque las amplitudes instantáneas de sus componentes se distribuyen en el tiempo según la curva de gauss (también llamada distribución normal). Sin embargo, el ruido aleatorio, no contiene necesariamente, un espectro plano.
- "Ruido continuo constante", es aquel cuyo nivel de presión sonora medido en bandas de octava, no fluctúa a lo largo del tiempo.

- "Ruido impulsivo repetitivo", es aquel que presenta impulsos repetidos análogos
- "Ruido impulsivo simple", es el que presenta impulsos aislados.
- "Ruido rosa", es en el que todas las componentes nos dan el mismo nivel subjetivo, es decir es el ruido blanco, pero con una pendiente de  $-3$ . Este ruido se puede definir como el que tiene igual energía por octava dentro del rango de frecuencias audibles.

## 5.2 Efectos del ruido en la salud humana

El ser humano interactúa con los distintos componentes ambientales, y éstos tienen influencia sobre él en mayor o menor medida. Uno de estos aspectos es el **paisaje sonoro**, término acuñado en la década de los 60 por el canadiense Raymond Murray Schafer, quien se convirtió en el principal impulsor del World Soundscape Project, el cual fue un proyecto de investigación de la Simon Fraser University de Canadá. El proyecto continúa vigente hasta la actualidad, y busca registrar los distintos paisajes sonoros para preservarlos, ya que están cambiando rápidamente debido a la contaminación acústica. Lo anterior implica que el paisaje sonoro incluye todas las fuentes de sonido ya sean deseados y no deseados.

El paisaje sonoro se divide, por el origen de los sonidos en:

**Geofonía:** Sonidos asociados a los fenómenos naturales como el viento, el correr del agua, la lluvia, los truenos, entre otros.

**Biofonía:** Sonidos emitidos por organismos vivos, a través de sus cuerdas vocales o cualquier otra parte de su cuerpo (por ejemplo, el aleteo de las aves).

**Antrofonía:** Sonidos emitidos por dispositivos creados por el ser humano, como por ejemplo automóviles, aeronaves, maquinaria, alarmas, etc.

Muchos otros autores han retomado y estudiado este tema desde diversas aristas, aunque todos concluyen que la alteración del paisaje sonoro por ruido de origen antrópico tiene consecuencias negativas tanto en el ambiente como en el ser humano.

Muchas actividades cotidianas emiten niveles de presión acústica poco adecuados o incluso con potencial de causar daño. En la tabla 5.3 se puede observar las situaciones anteriormente descritas, por ejemplo, un escucha en una calle transitada recibirá en promedio 80 dBA, lo que se considera un ambiente ruidoso; una motocicleta emite unos 100 dBA, lo que se considera un ambiente molesto.

Los daños a la salud que se pueden presentar debido a la exposición de altos niveles de ruido son muy diversos, ya que se tienen desde los daños directos como pérdida de audición, así como efectos secundarios, como es el caso del estrés.

Tabla 5.3. Escala relativa de niveles de presión acústica y su percepción en el ser humano

Actividad	Nivel de Presión Acústica (dBA)	Percepción del ser humano
Pisadas al caminar	10	Ambiente silencioso
Viento en los árboles	10	
Estudio de grabación	20	
Conversación en voz baja	30	Ambiente poco ruidoso
Dormitorio	30	
Biblioteca	40	
Oficina	50	
Despacho	50	
(Nivel propuesto por la Oms al aire libre, 55 dBA)		
Conversación	60	Ambiente ruidoso
Electrodomésticos	70	
(Exposición prolongada a más de 70 dBA provoca pérdida de audición y		
Calle transitada	80	
Tránsito vehicular congestionado	80	
Transporte de carga pesada	90	Ambiente molesto
Motocicleta	100	
Maquina industrial	100	
Concierto de rock	120	Ambiente insoportable
(límite de umbral de dolor 120-130 dBA)		
Martillo neumático	130	
Despegue de avión	150	

Fuente: Elaboración propia con información de Osman (2010), La Nación (2012) y Becerra (2012)



### Actividad 5.1.

**Impactos de las actividades antrópicas en el paisaje sonoro.**

Observa el video **Bernie Krause: The voice of the natural world**, localizado en <https://youtu.be/h8EtZixkUo4>, y responde las preguntas planteadas.



## 5.2.1 Mecanismo de la audición

El sistema de audición humano presenta gran sensibilidad a los cambios de presión acústica en el ambiente. De esta manera, transforma esos cambios en sensaciones auditivas, que varían en función de la intensidad y la frecuencia.

Respecto a la frecuencia, el intervalo audible para el oído humano está comprendido entre 20 Hz y 20 KHz. El intervalo de niveles de intensidad audibles (puede ser incluso mayor, pero el oído experimenta daños) varía desde 0 dB (umbral auditivo) hasta 120 dB (umbral del dolor). Sin embargo, estos intervalos no son absolutos, varían de persona a persona y también presentan variaciones respecto a la intensidad con que se presente un sonido (fig. 5.6). Para un sonido relativamente fuerte cuyo nivel de intensidad sea de 80 dB, el intervalo de frecuencias sería el mencionado con anterioridad, pero para otro cuyo nivel de intensidad sea de 20 dB, el rango de frecuencias audibles se reduce al intervalo de 160 Hz a 15000 Hz. Por otra parte, el intervalo de intensidades audibles varía respecto a la frecuencia; así por ejemplo a 1000 Hz, el intervalo de niveles de intensidad va de 3 dB a 137 dB.

La sensibilidad del oído se maximiza para las frecuencias entre 500 Hz y 5000 Hz y se atenúa de manera muy importante para las frecuencias bajas. Por ejemplo, supongamos que el oído percibe un sonido de 40 dB a 1000 Hz, tendrá la misma impresión de nivel sonoro que si se percibe un sonido de 60 dB a 62.5 Hz (Meisser, 1973).

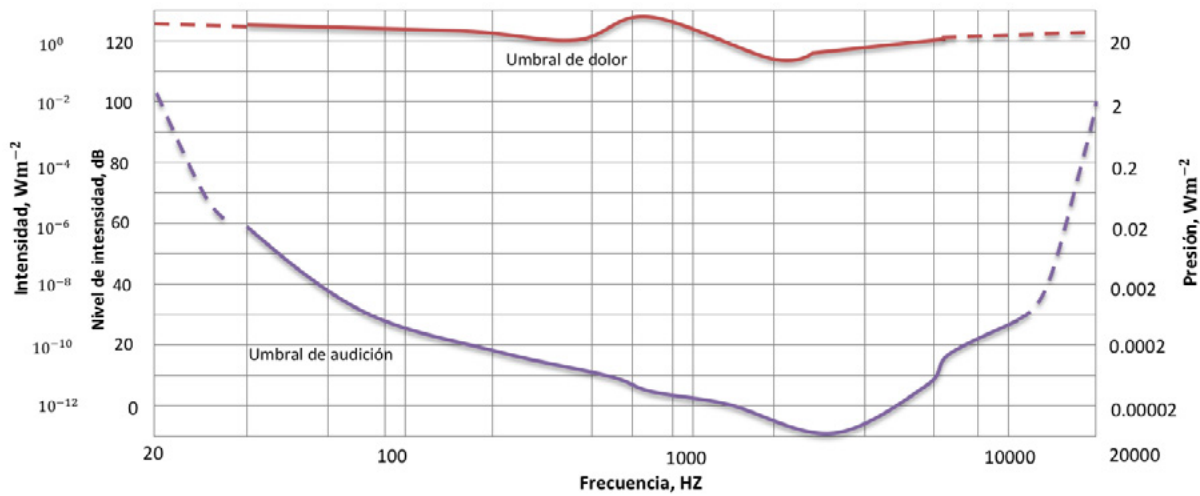


Figura 5.6. Respuesta del oído humano al sonido para distintas frecuencias emitidas.

## Aspectos fisiológicos y anatómicos

La generación de sensaciones auditivas en el ser humano es un proceso extraordinariamente complejo, el cual se desarrolla en tres etapas básicas:

- Captación y procesamiento mecánico de las ondas sonoras.
- Conversión de la señal acústica (mecánica) en impulsos nerviosos, y transmisión de dichos impulsos hasta los centros sensoriales del cerebro.
- Procesamiento neural de la información codificada en forma de impulsos nerviosos.

Respecto al procesamiento de las señales acústicas, a nivel sistémico se distinguen dos regiones del sistema auditivo, la región periférica y la región central, que se esquematizan en la figura 5.7. Ambas regiones poseen estructuras especializadas que hacen al oído humano un sistema receptor y un canal fundamental para tener comunicación con el entorno.

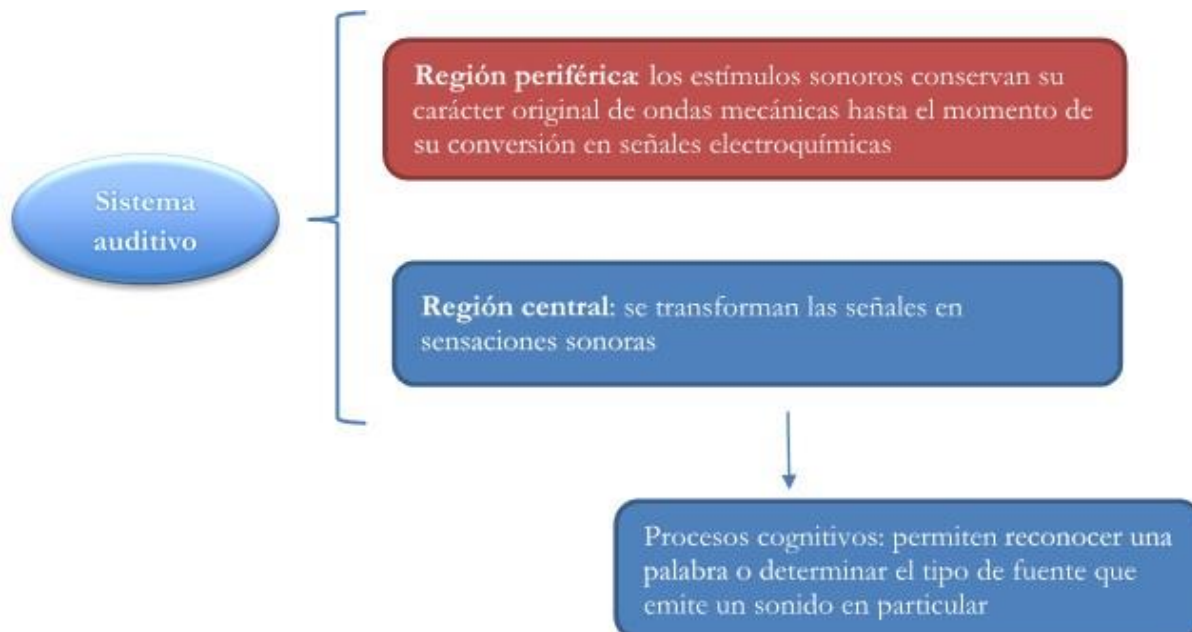


Figura 5.7. Regiones del sistema auditivo.

La región periférica del sistema auditivo se divide usualmente en tres zonas, el oído externo, el medio y el interno, como se muestra en la figura 5.8:



Figura 5.8. Región periférica del sistema auditivo humano.

La anatomía de esta región se ilustra en la figura 5.9. Obsérvese la disposición de las tres zonas, que van desde el exterior hacia el interior del cuerpo. A pesar de que tienen funciones anatómicas y fisiológicas específicas, están estrechamente ligadas en su funcionamiento.

El **oído externo** comprende el pabellón auricular (también llamado aurícula o de forma más familiar oreja); y el conducto auditivo o meato, el cual mide aproximadamente 3 cm de longitud y 0.70 cm de diámetro y termina en el tímpano. Estas dos estructuras hacen las veces de un embudo acústico, colectando, concentrando y conduciendo las ondas sonoras hacia el tímpano o membrana timpánica, en donde la presión sonora se convierte en vibraciones.

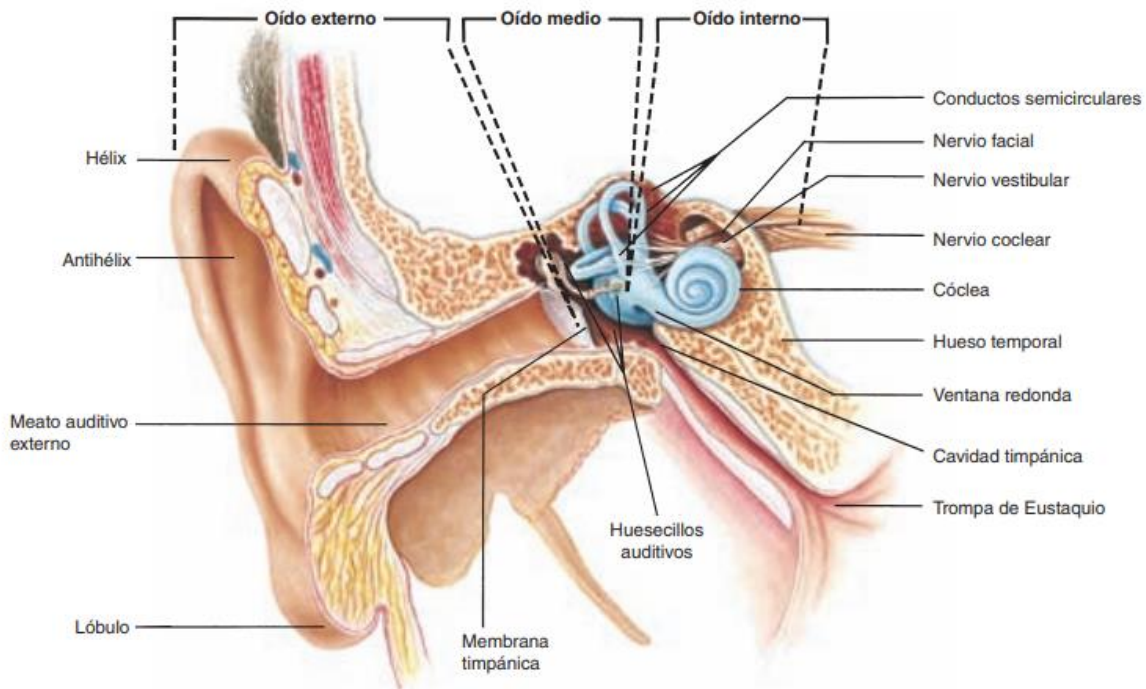


Figura 5.9. Anatomía del oído humano. Fuente: *Fisiología funcional médica*. Kim E. Barret.

El **oído medio** es una cavidad llena de aire en el hueso temporal, la cual se abre a través de la trompa de Eustaquio, que es un conducto que va desde el oído medio hasta la parte superior de la garganta, detrás del paladar blando. Suele estar cerrada, pero durante la deglución, la masticación y los bostezos, se abre mediante la contracción de los músculos del paladar para igualar la presión del aire en los dos lados de la membrana timpánica.

El oído medio cuenta con tres huesecillos auditivos: el martillo, el yunque y el estribo. Los tres están ligados mecánicamente, lo que provoca que las vibraciones del tímpano se transfieran al martillo, posteriormente al yunque y después al estribo, que está alojado en la ventana oval. En la figura 5.10 se aprecia un cuadro sinóptico que especifica las funciones de estos tres huesecillos.

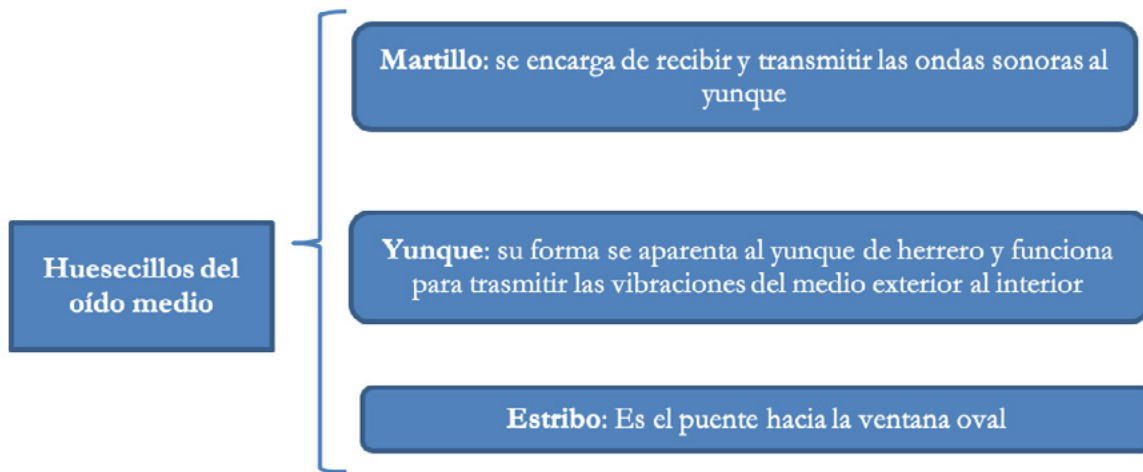


Figura 5.10. Funciones de los huesecillos del oído medio.

Los huesecillos están sostenidos por ligamentos, y se mueven debido a la contracción involuntaria de músculos o de la deflexión de la membrana timpánica (fig. 5.11).

La ventana oval es la frontera que separa el oído medio del interno. La transmisión sonora se realiza por vía mecánica. En el oído medio se lleva a cabo por medio de vibraciones de la cadena de huesecillos (vía sólida) y en el oído interno el medio de transmisión es líquido.

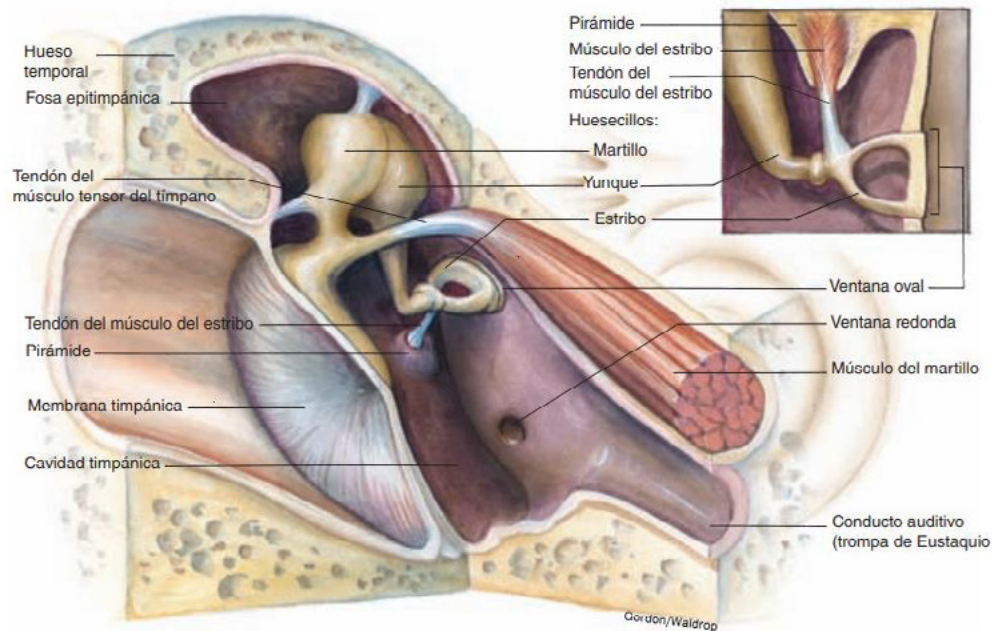


Figura 5.11. Vista interna del oído medio. Fuente: *Fisiología funcional médica*. Kim E. Barret.

El **oído interno** representa el final de la cadena de procesamiento mecánico del sonido, y en él se llevan a cabo tres funciones primordiales, ilustradas en la figura 5.12. Está constituido por la cóclea o caracol, el cual es un conducto rígido en forma de espiral de unos 35 mm de longitud, lleno con dos fluidos de distinta composición. La cóclea está llena de un líquido rico en iones potasio ( $K^+$ ) denominado endolinfa, y otro llamado perilinfa, compuesto por LCR (líquido cefalorraquídeo) y plasma filtrado. Su función fundamental es transformar los sonidos en mensajes nerviosos y enviarlos al cerebro.

Las presiones que se comunican con el estribo por la ventana oval, ponen a vibrar el líquido contenido y el movimiento hace oscilar a las células ciliares, alojadas en el órgano de Corti. Son ellas las que transforman la vibración, que es de naturaleza mecánica, en señales nerviosas de naturaleza electroquímica. Se dividen en dos tipos: células ciliadas internas y externas. Ambos tipos están dispuestos en cuatro filas: tres filas de células ciliares externas laterales al túnel formado por los bastoncillos de Corti y otra fila de células ciliares internas mediales al túnel. Se conocen unas 20 000 células ciliares externas y 3 500 células ciliares internas en cada cóclea humana. El número elevado de filetes nerviosos explica la función de analizador de frecuencias que cumple el oído humano y posteriormente se completa en el cerebro.



Figura 5.12. Funciones esenciales del oído interno.

Dentro del oído también se encuentran los canales semicirculares. Estos consisten en tres conductos semicirculares dispuestos de acuerdo con tres planos ortogonales entre sí. Su función es contribuir en el equilibrio del cuerpo humano.

### Reflejo timpánico o acústico

Cuando se aplican sonidos de gran intensidad al tímpano, los músculos tensores del tímpano y el estribo se contraen de forma automática, modificando la característica de transferencia del oído medio y disminuyendo la cantidad de energía entregada al oído interno.

Este "control de ganancia" se denomina reflejo timpánico o auditivo, y tiene como propósito proteger a las células receptoras del oído interno frente a sobrecargas que puedan llegar a destruirlas.

### Sonoridad

El nivel de sonoridad representa una característica psicoacústica del sonido. Para el sistema auditivo humano, dos tonos que sean emitidos con el mismo NPA pero con frecuencias distintas se escucharán con distinto nivel de sonoridad.

Las gráficas de Fletcher y Munson (fig 5.13) representan precisamente el comportamiento descrito con anterioridad, y se denominan **curvas de igual sonoridad**. Estiman la relación correspondiente entre la frecuencia y la intensidad (en dB), de tal modo que cualquier punto de la curva tiene una misma sensación sonora. Fueron obtenidas a partir de una serie de experimentos en los que se presentó a los sujetos en estudio un tono de referencia (de frecuencia igual a 1000 Hz) y una serie de tonos de prueba, pidiéndoles que ajustaran el nivel de sonido de la prueba hasta igualar al de referencia. Las curvas se graficaron en **fonos**, que son los NPA de los tonos puros de 1000 Hz en decibeles. La curva extrema inferior de la gráfica representa el umbral de audición, con una variación de  $\pm 10$  dB (Davis & Masten, 2005).



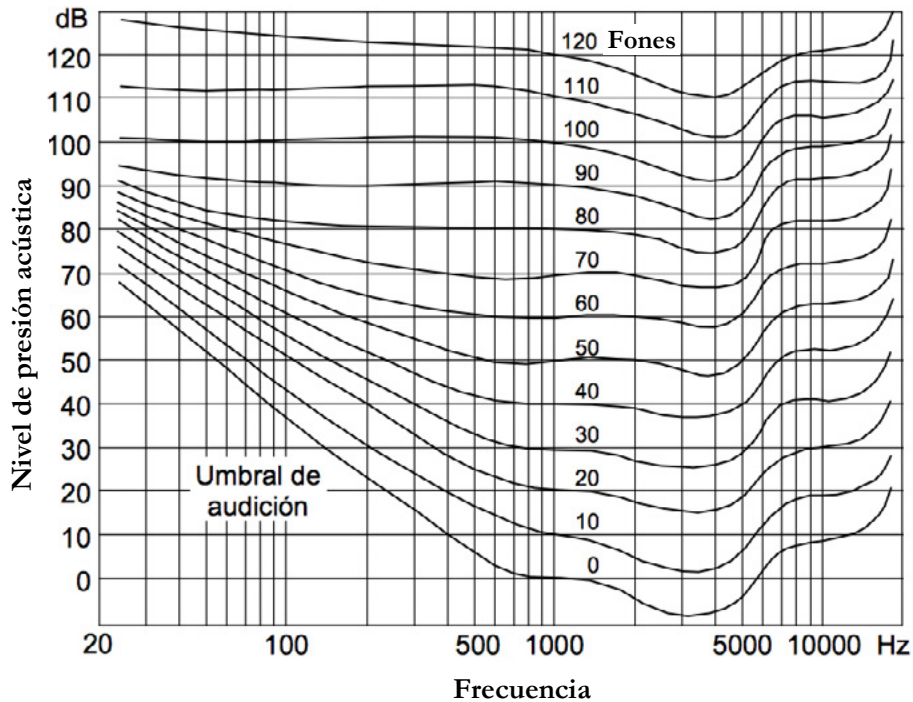


Figura 5.13. Curvas de igual sonoridad de Fletcher y Munson. Obsérvese que un tono de  $f=200$  Hz y NPA=40 dB provocará la misma sensación de sonoridad que uno de 1000 Hz y 20 dB, por lo que corresponde a un nivel de sonoridad de 20 fones. Basado en (Miyara, 2000).

## 5.2.2 Daños a la salud ocasionados por el ruido

La presencia del ruido en nuestro entorno tiene efectos diversos, particularmente en el desenvolvimiento cotidiano del ser humano. Puede impedir la comunicación, reducir la capacidad y sensibilidad del oído y afectar algunos aspectos de la salud y conducta humana. Muchos estudios de impacto social valoran al ruido entre las molestias ambientales más incómodas (Kiely, 1999). Niveles altos de ruido con suficiente duración provocarán la pérdida temporal o incluso permanente de audición. Esto ocurre especialmente cuando el organismo se encuentra expuesto de manera cotidiana durante largos periodos. Los operadores de maquinaria o trabajadores de plantas industriales son personas que se enfrentan a esta problemática, sobre todo si no toman las medidas adecuadas.

Se pueden clasificar los efectos del ruido en la salud como auditivos (efectos directos) y no auditivos (indirectos).

### Efectos auditivos o directos

Los efectos auditivos, como su propio nombre lo indica, se refieren a los problemas de salud que pueden tener las personas que están expuestas al ruido la mayor parte de día. Esto es lo que a muchas personas les sucede, ya que al estar expuestas demasiado tiempo al ruido pierden paulatinamente la capacidad auditiva. Esta pérdida es el resultado del daño neuronal de las células ciliadas que, al estar sometidas a estimulación sonora muy intensa, mueren. Este tipo de células no poseen capacidad de regenerarse, por lo que la pérdida del oído es acumulativa.



## **Pérdida de capacidad auditiva**

Las pérdidas en la audición son más comunes de lo que se podría creer. El nivel general del ruido del medio urbano es suficientemente fuerte para ensordecernos gradualmente a medida que vamos envejeciendo. En ausencia de semejante ruido, la capacidad de oído no debería deteriorarse necesariamente con los años, pero al estar expuesto, es muy complicado no presentar daños. Esta pérdida puede ser temporal o permanente.

### **Desplazamiento temporal del umbral**

El desplazamiento temporal del umbral se presenta cuando una persona se expone a altos niveles de ruido, durante un periodo relativamente corto de tiempo. Este fenómeno se presenta cuando se asiste a un concierto, a un estadio, o a cualquier otro lugar con altos niveles de presión acústica. Al salir de dicho evento, se tiene la sensación de aturdimiento o de taponamiento de los oídos.

En el caso del desplazamiento temporal del umbral, se tiene una pérdida de sensibilidad lo que ocasiona que, para poder oír un sonido, es necesario mayores niveles de presión acústica. A su vez, esto conlleva a un incremento en la sensibilidad auditiva a frecuencias cercanas a los 4000 [Hz].

Afortunadamente, esta disminución en la falta de sensibilidad auditiva es recuperada pasadas unas horas o unos días, ya que fisiológicamente, esto se trata de una fatiga de las células ciliares que buscan regresar a su estado normal. Normalmente la recuperación comienza dentro de las primeras dos horas a la exposición y el sistema auditivo se recupera por completo aproximadamente a las 24 horas posteriores.

### **Desplazamiento permanente del umbral**

Es ocasionado por una exposición frecuente al ruido intenso y que no permite que el oído pueda recuperarse a la fatiga, teniendo como consecuencia, la debilitación y la muerte de las células ciliadas.

Además, este desplazamiento permanente no se presenta de manera instantánea, sino que se genera de manera gradual, es decir, que es una consecuencia de varios años de exposición. Así mismo, resulta complicado de detectar, ya que la persona sólo notará diferencia cuando disminuya su percepción de las frecuencias asociadas al lenguaje (500 a 2000 Hz).

A pesar de que la principal consecuencia de los efectos auditivos es la pérdida paulatina de la audición, resulta importante mencionar que esto también conlleva efectos secundarios que tienen igual o mayor seriedad, ya que al momento de que una persona comienza a escuchar menos, evita mantener conversaciones y en ocasiones cambia su personalidad. Esto conlleva a desarrollar problemas psicológicos que a su vez pueden originar problemas sociales, económicos y de rendimiento.

En la tabla 5.4 se muestra la tasa de riesgo de daño auditivo relacionado con la edad y los años de exposición.

Tabla 5.4. Criterio de Glorig de riesgo porcentual de daño auditivo

Edad	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	
Años de exposición	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	
Nivel de exposición [dBA]	80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	85	0	1.0	2.6	4.0	5.0	6.1	6.5	8.0	8.0	6.5
	90	0	3.0	6.6	10.0	11.9	13.4	15.6	17.5	18.0	14.5
	95	0	5.7	12.3	18.2	21.4	21.4	26.7	28.3	28.0	24.0
	100	0	9.0	20.7	30.0	35.9	38.1	40.8	41.5	40.0	35.0
	105	0	13.2	31.7	44.0	49.9	54.1	57.8	57.5	54.0	44.5
	110	0	19.0	46.2	61.0	68.4	73.1	73.8	71.5	64.0	51.5
	115	0	26.0	61.2	79.0	83.9	86.1	84.3	89.5	70.0	55.0

Fuente: (Miyara, 2000)

El criterio considera tanto la cantidad de años de exposición, como la edad del receptor, y proporciona el riesgo porcentual de adquirir una discapacidad auditiva permanente, definida como un aumento promedio de 25 dB en el umbral auditivo correspondiente a las frecuencias de 500 Hz, 1000 Hz y 2000 Hz (que es la frecuencia a partir de la cual comienzan las dificultades para la inteligibilidad de la palabra hablada). El riesgo, a su vez, está definido por la diferencia entre el porcentaje de personas en un grupo sometido a una determinada exposición a ruido que adquiere discapacidad auditiva permanente y el porcentaje de personas no expuestas que adquiere dicha discapacidad. Según se observa, el riesgo va aumentando hasta cierta edad y luego disminuye. Esto se debe a que, a edades avanzadas, la audición se deteriora rápidamente aún sin exposición significativa a ruidos laborales, por lo que el riesgo de pérdida auditiva asociada al ruido laboral pierde relevancia (Miyara, 2000).

## Efectos no auditivos o indirectos

Los daños indirectos, están relacionados con otros daños que también perjudican la salud del ser humano, pero que no están involucrados directamente con el oído. Dentro de los principales daños indirectos a la salud se tienen los siguientes:

### Interferencia en el habla

El ruido ocasiona un efecto de enmascaramiento, sin que necesariamente sea tan intenso como para causar daños fisiológicos en el oído. Este efecto será en mayor o menor grado en función de la distancia entre receptor y emisor, la presencia de obstáculos, y las frecuencias predominantes del habla. Para una conversación a niveles normales aproximadamente a un metro de distancia, el ruido de fondo comenzará a interferir cuando sobrepase los 70 dBA.

### Trastornos del sueño

Cuando una persona está durmiendo, la exposición al ruido puede ocasionar trastornos sobre su sueño. Durante el sueño el sonido es percibido de forma inconsciente, y es perfectamente capaz de influir sobre diversas funciones del cerebro. Incluso se ha comprobado que el ruido perturba las etapas del sueño profundo.

Los trastornos se pueden presentar de tres maneras diferentes, en función de su momento de aparición.

Trastornos primarios del sueño. El ruido puede producir alteraciones en la conciliación, el patrón o en la intensidad del sueño, e incluso interrupciones en el mismo. También se puede llegar a presentar incrementos en el ritmo cardíaco, arritmia, movimientos corporales, cambios en la frecuencia respiratoria, entre otros.

Trastornos secundarios del sueño. Están relacionados con los síntomas que se presentan al día siguiente de la exposición del ruido, tal como fatiga, modificación en el carácter, reducción en la calidad del sueño percibida por la persona, alteraciones en el comportamiento, entre otros.

Trastornos terciarios del sueño. Se presentan después de una exposición prolongada al ruido durante el sueño, por lo que son efectos a largo plazo, como la aparición de enfermedades funcionales que pueden concluir en enfermedades progresivas e irreversibles.

Existen sectores de la población especialmente susceptibles a sufrir efectos dañinos por presencia de ruido durante el sueño, particularmente los bebés, a quienes afecta su desarrollo, ya que las hormonas que favorecen el crecimiento son segregadas durante las etapas del sueño profundo.

A pesar de lo expuesto anteriormente, ciertos sonidos pueden ayudar a conciliar el sueño, e incluso a conservarlo. Muchas veces se asocia esto a sonidos que tengan un patrón determinado, como el sonido de un ventilador o el oleaje del mar.

### **Pérdida en el rendimiento y la concentración**

La pérdida en el rendimiento y la concentración está sumamente ligada al ruido al que es sometido una persona mientras realiza una actividad. El ruido de fondo o algún ruido repentino disminuye el rendimiento en distintas tareas, especialmente las que requieren máxima concentración. Incluso puede poner en peligro la integridad física del sujeto, por ejemplo, cuando opera maquinaria pesada, de corte, de prensado; opera materiales a altas temperaturas o trabaja a alturas considerables.

### **Afectaciones psicológicas, estrés y molestia**

La molestia por el ruido se basa precisamente en la naturaleza del mismo: al ser desagradable, causa malestar al receptor. Cuando se presentan altos niveles de ruido ambiental, el estrés es una de las manifestaciones a nivel psicológico más importantes en el ser humano. Esto se presenta debido al aumento en la producción de adrenalina en el cuerpo, lo cual ocasiona incrementos en la presión sanguínea y en el ritmo cardíaco. En primera instancia, el estrés es una respuesta fisiológica normal que tiene la función de defender al organismo en situaciones que representan peligro. Sin embargo, estar sometido constantemente a esta situación ocasiona desequilibrio sistémico, y altera la salud con diferentes consecuencias: enfermedades cardiovasculares, hipertensión arterial, taquicardias, cefaleas, alteraciones en el aparato digestivo, vértigo, alteraciones en el sistema inmune o el sistema de reproducción, entre otros.

Otra de las afectaciones debido al ruido está relacionada con el incremento en los niveles de cortisol, lo cual está ligado con el bajo funcionamiento del sistema inmunológico del ser humano. Esto ocasiona que las personas sean más susceptibles a contraer enfermedades.

Estudios epidemiológicos realizados en zonas de ruidos intensos, revelan una incidencia de accidentes cardiovasculares, neurológicos, digestivos y endocrinos hasta 4 veces mayor que lo normal.

**Recuadro 5.1**  
**El impacto económico del ruido en las empresas**

Además de los efectos en la salud, el ruido provoca distintos impactos en el plano económico en la sociedad. Uno de ellos, es en la productividad empresarial, en donde los trabajadores que están expuestos a largos periodos de trabajo con ruidos de manera constante comienzan a presentar cansancio y otros síntomas, por lo cual su rendimiento se reduce considerablemente. Debido a lo anterior, la empresa pierde horas de trabajo y calidad en el trabajo que se entrega, por lo cual las ganancias disminuyen.

### 5.3 Fuentes de emisión de ruido

Hoy en día, el ruido es una de las principales fuentes de contaminación en las grandes ciudades. El transporte, la construcción, el acelerado crecimiento de la población, entre otros, son la principal causa de ruido en las ciudades. Por ejemplo, los niveles de ruido asociado a los medios de transporte se encuentran en un rango de 100- 110 dBA para un avión de transporte volando bajo; 80- 90 dBA a unos 10 m de un tren de pasajeros y 85-95 dBA en una calle de tránsito intenso.

No obstante, no sólo el transporte y las instalaciones industriales son en la actualidad los causantes de la situación acústica existente en las ciudades, la propia actividad humana, como consecuencia del aumento de la densidad de la población, es una fuente que contribuye a elevar los niveles de ruido en los núcleos urbanos, particularmente en las zonas donde se ubican centros o establecimientos de diversión nocturna, especialmente durante los fines de semana.

Las fuentes de emisión de ruido pueden clasificarse de acuerdo con el criterio que se enlista a continuación:

- Fijas: Toda fuente de ruido que opera en un lugar determinado en donde no cambiará su posición en el espacio.
- Móviles: Aquellas que emiten ruido mientras presentan desplazamiento, por ejemplo, los vehículos en la vía pública.
- Lineales: Aquellas que pueden modelarse como ejes a partir de los cuales se emite ruido, como son carreteras, vías férreas, etc.
- Conductuales: Comportamiento o práctica ruidosa, de una o varias personas, que atentan contra la tranquilidad de los vecinos.

### 5.3.1 Maquinaria de construcción

Algunas herramientas y equipos que se utilizan para las labores de construcción constituyen una importante fuente de emisión de ruido y, por lo tanto, un riesgo para la salud, no sólo de los trabajadores, sino también de la población en general.

Dentro de estas labores, se puede mencionar a la excavación de zapatas, la perforación con martillo hidráulico, la demolición, el colado de pilas de cimentación, el armado de acero y la perforación de pilas de cimentación, entre otras. Taladros, retroexcavadoras, sierras circulares, compactadores, serruchos eléctricos y perforadores neumáticos, son ejemplos de equipos que producen altos niveles de ruido, que dañan directamente a los operadores y causan molestia a la población aledaña a la obra en cuestión. Esto se complica aún más cuando las obras se llevan a cabo en horario nocturno y de manera continua, debido a que se ve alterada la calidad del sueño de las personas.

Alfie M. y Salinas O. mencionan al uso de maquinaria pesada en las obras de construcción como una importante fuente de contaminación auditiva en la Ciudad de México, que pueden ocasionar diversas alteraciones, tales como incremento de la presión arterial, trastornos en el proceso de digestión, nerviosismo, fatiga y estrés, entre otras (Alfie & Salinas, 2017).

Las revolventoras, retroexcavadoras, vibradores de concreto, puentes grúa, camiones tolva, revolventoras con bomba telescópica de concreto, entre otros, se utilizan con mucha frecuencia en las labores de construcción y son fuente de ruido.

Respecto del nivel de potencia acústica de una máquina, diversos autores enfatizan la importancia de informar al usuario acerca del ruido que emite dicho aparato. Ayo F. denomina a esta información como declaración del ruido o etiquetaje, la cual se debe incluir en el manual de instrucciones (Ayo, 2013). Asimismo, al “declarar” el ruido, el fabricante de alguna manera se siente obligado a reducirlo.

Las magnitudes acústicas que se encuentran en la información acerca del ruido de una máquina, se clasifican de acuerdo a la fig. 5.14:

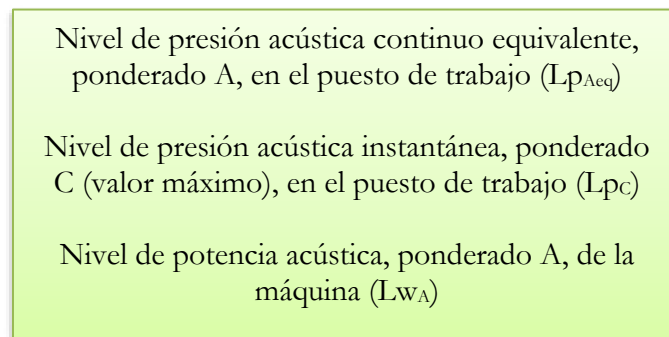


Figura 5.14. Principales niveles de presión acústica a considerar para la maquinaria

Los niveles de ruido varían en función del tipo y modelo del equipo, las condiciones en que se encuentre y la actividad que se realice. Esta actividad produce un nivel de sonido equivalente ( $L_{eq}$ ), el cual depende del tiempo de operación del equipo con relación al tiempo de construcción de la obra, ya sea que se trate de uno móvil o uno estacionario.

Hanson, Towers y Meister proponen una tabla con los niveles de presión acústica que produce la maquinaria de construcción, la cual se presenta a continuación (con datos tomados de la EPA) (Hanson, Towers, & Meister, 2006).

Tabla 5.5. Niveles de presión acústica de algunos dispositivos y maquinaria utilizados en la industria de la construcción

<b>Equipo</b>	<b>Niveles de ruido típicos (dBA) a 15 m de la fuente</b>
Compresor de aire	81
Retroexcavadora	80
Mezcladora de concreto	85
Bomba de concreto	82
Grúa	88
Grúa móvil	83
Excavadora	85
Generador	81
Motoniveladora	85
Martillo neumático	88
Pavimentadora	89
Herramienta neumática	85
Bomba	76
Sierra	90
Taladro para roca	98
Cortadora	84
Camión	88

Fuente: (Hanson et al., 2006)

## 5.3.2 Vehículos automotores

En la actualidad, en las zonas urbanas las principales fuentes de ruido se encuentran relacionadas con los medios de transporte, destacando ampliamente el tránsito rodado. Esta situación está motivada no sólo por el aumento vertiginoso que ha experimentado el parque automotriz en los últimos años, sino también por el hecho de que, en general, las ciudades por las que circulan esos vehículos no han sido concebidas para soportarlos.

El nivel básico de las emisiones de ruido del flujo vehicular viene determinado por el ruido de los motores y los dispositivos de escape. Otra fuente de ruido de los vehículos corresponde al originado por el contacto de los neumáticos con el pavimento, el que aumenta rápidamente con la velocidad. Para los vehículos ligeros los neumáticos y las superficies son las fuentes principales de ruido a velocidades superiores a los 60 km/h. Al ruido de tránsito vehicular, se deben agregar los ruidos generados desde instalaciones industriales, talleres, u obras de construcción, denominadas “fuentes fijas”, que generalmente presentan un impacto localizado en el entorno próximo al lugar donde se encuentran emplazados. Su importancia aumenta cada día, ya que, por un lado, se estudia esta fuente con mayor profundidad, y por otro, en los últimos años existe un incremento de vehículos con motores con mayor potencia. Además, al ruido de las motos, automotores y camiones, se suma el ruido de fondo y el emitido por los aviones, sobre todo en el ambiente urbano.

Un aspecto importante por considerar respecto al ambiente sonoro urbano que tiene influencia en los niveles de presión acústica que pueden presentarse en la ciudad, es el conjunto de características físicas de las calles y de los edificios que se encuentran en los alrededores. Es por ello que es deseable considerar diseños urbanísticos adecuados, poner orden de tránsito con la colocación de semáforos, asfaltar calzadas, etc.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) considera que aproximadamente 130 millones de personas alrededor del mundo están expuestas a un nivel sonoro superior a 65 dB, nivel que no se considera adecuado para la salud y el desarrollo pleno. El ruido proviene en un 80% de los vehículos automotores (ver figura 5.15), por lo que, como ya se había mencionado, este sector tiene una especial importancia en el paisaje sonoro urbano.

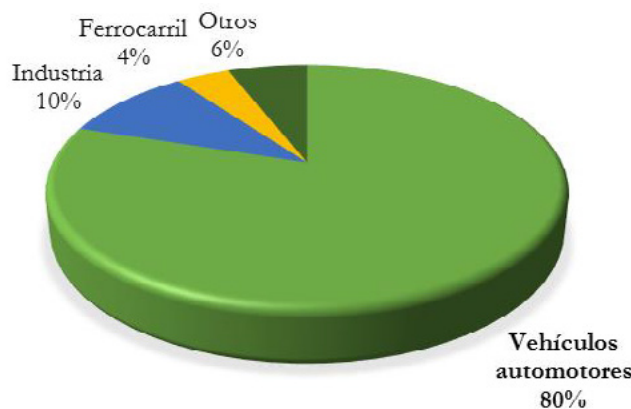


Figura 5.15. Principales fuentes generadoras de ruido. Basado en *Estudios Demográficos y urbanos*, Vol. 32, Núm. 1 (94), 2017, pp. 65-96



### 5.3.3 Aeronaves

La mayoría de las operaciones aeroportuarias son generadoras de ruido, pero sin lugar a duda el ruido con más importancia es el que generan las aeronaves. Los motores que permiten su sustentación son de gran potencia y tamaño, y emiten una gran cantidad de energía sonora.

Los problemas de ruido generados por el transporte aéreo se han incrementado en las últimas décadas debido, por un lado, a la proximidad de las ciudades a los aeropuertos y, por otro, al aumento de tráfico regular de pasajeros y mercancías, que operan de noche en muchas ocasiones. Además, existe un problema latente que no se encuentra regulado, los aviones militares, los helicópteros, ultraligeros y los aviones supersónicos.

No es de extrañarse que cada vez son más los mecanismos de protección que se proponen para evitar que el ruido producido por los aeropuertos afecte las vidas de los ciudadanos. Pero los aeropuertos no son los lugares exclusivos para la generación de ruido de las aeronaves, éstas también producen contaminación acústica en las zonas que sobrevuelan a baja altura ocasionando molestias a la población de dichas zonas.



#### Actividad 5.2.

##### Crucigrama “El ruido y su medición”.

Completa el crucigrama con los conceptos aprendidos hasta el momento.



#### Actividad 5.3.

##### El ruido en nuestro entorno.

Descarga alguna aplicación para medir niveles de ruido ambiental y realiza las actividades que se te solicitan.

## 5.4 Evaluación y predicción del ruido

Las distintas técnicas y criterios de evaluación y predicción del ruido son fundamentales para una gran variedad de estudios. Gracias a ellas, es posible estimar con bastante confiabilidad cuáles serán los niveles de presión acústica que se presenten en determinado momento y/o lugar.

Los sistemas de evaluación buscan representar la exposición al ruido de manera significativa. Toman en cuenta la hora del día en que se emite el ruido, el tiempo de emisión, las frecuencias, el tiempo de exposición del receptor, entre otros aspectos.

Por otro lado, las estrategias de control y minimización del ruido ambiental resultan difícilmente evaluables mediante mediciones acústicas in situ debido a la gran cantidad de variables que pueden influenciar la medición, por lo que se han desarrollado diversos modelos de predicción sonora como una herramienta muy eficaz para determinar la influencia de un proyecto, maquinaria o desarrollo urbanístico respecto al ambiente sonoro, o incluso para valorar la eficacia de planes de acción. Poseen ventajas que han permitido que sean exitosos en su aplicación, como la capacidad de combinar la variable espacial (multitud de fuentes y receptores en el área de estudio) con la variable temporal (evolución de los niveles sonoros en el tiempo). Es importante mencionar que las mediciones en campo no deben ser relegadas, ya que sirven para evaluar y validar los modelos anteriormente mencionados.

### Obtención del nivel de presión acústica de varias fuentes actuando simultáneamente

Debido a la naturaleza logarítmica de los NPA, la adición de niveles no puede ser de manera lineal. Una forma de adicionarlos es convertir los decibeles a niveles de potencia de sonido para linealizarlos, sumarlos y finalmente convertirlos a decibeles. La expresión 5.12 resulta útil para realizar lo anterior.

$$NPA_{total} = 10 \log \left[ \sum_{1}^{n} 10^{NPA_i/10} \right] \quad (5.12)$$

en donde:

$n$  = número total de fuentes

$NPA_i$  = nivel de presión acústica de la  $i$ -ésima fuente, en dB(A)

Obsérvese que mientras se cuente con la información del NPA de cada una de las fuentes a evaluar, sin importar la cantidad, el NPA total puede estimarse. Para que la expresión 5.12 sea válida es importante contabilizar los NPA que se reciben de cada fuente en el punto de interés. Se acostumbra en el estudio y trabajos relacionados con la contaminación por ruido reportar los resultados redondeados al número entero más cercano (Davis & Masten, 2005).

**Problema resuelto 5.1 Obtención del NPA total debido a operación de maquinaria de construcción**



El ruido generado por cierta retroexcavadora se compone a partir de los distintos niveles de presión acústica que provocan distintos elementos de ésta. Si suponemos que tres elementos son los principales generadores, y que se cuenta con el registro de NPA generado por cada uno de ellos a una distancia determinada, calcular el  $NPA_{total}$  que genera la retroexcavadora:

Elemento	NPA (dBA)
Motor	94
Radiador	72
Mecanismo del cucharón	86

**Solución**

Para calcular el nivel de presión acústica total de la retroexcavadora, se utiliza la expresión 5.12:

$$NPA_{total} = 10 \log \left[ \sum_1^n 10^{NPA_i/10} \right]$$

Sustituyendo los valores de presión acústica de cada uno de los elementos,

$$NPA_{total} = 10 \log \left[ 10^{94/10} + 10^{72/10} + 10^{86/10} \right]$$

Con lo que se obtiene:

$$NPA_{total} = 94.66 \text{ dB}(A)$$

$$NPA_{total} = 9 \text{ dB}(A)$$

### Corrección de ruido de fondo

Este procedimiento se utiliza, entre otras cosas, para determinar el nivel de presión acústica de una máquina o dispositivo que se encuentra localizada junto a otra u otras que emiten ruido y por alguna razón no se puede parar su operación.

Se procede a medir el NPA total del recinto o la zona de estudio, para posteriormente, con la máquina de interés parada, medir las condiciones del ruido de fondo. A continuación, se utiliza la expresión 5.13 para restar dicho ruido de fondo.

$$NPA_{resta} = 10 \log \left[ 10^{NPA_{total}/10} - 10^{NPA_{fondo}/10} \right] \quad (5.13)$$

#### Problema resuelto 5.2 Corrección de ruido de fondo

El nivel de presión acústica que se registra en una casa de máquinas, en donde se encuentran varios equipos funcionando continuamente es de 91 dB(A). Tras desconectar una de ellas, se obtiene un valor de 87 dB(A). ¿Qué nivel de ruido genera dicha máquina?

#### Solución

Para calcular el nivel de presión acústica de la máquina en cuestión, se utiliza la expresión 5.13:

$$NPA_{resta} = 10 \log \left[ 10^{NPA_{total}/10} - 10^{NPA_{fondo}/10} \right]$$

Sustituyendo los valores de presión acústica de cada uno de los elementos,

$$NPA_{resta} = 10 \log \left[ 10^{91/10} - 10^{87/10} \right]$$

Con lo que se obtiene:

$$NPA_{total} = \mathbf{88.80 \text{ dB(A)}}$$

$$NPA_{total} = \mathbf{89 \text{ dB(A)}}$$

### Nivel acústico continuo equivalente ( $L_{eq}$ )

Se calcula para un intervalo temporal específico y considera ponderación de frecuencia. Se define como el nivel de ruido que corresponde al promedio integral en el tiempo de la presión acústica al cuadrado

producida por fuentes de sonidos estables, fluctuantes, intermitentes, irregulares o impulsivos en el mismo intervalo de tiempo. Lo anterior implica que, al medir en cierto punto el nivel acústico, éste se obtendrá de las diversas fuentes que estén emitiendo ondas acústicas en ese momento, dichas ondas serán variables durante el tiempo de medición. Es por esto que el nivel equivalente simula un nivel que pudiera ser “equiparable” durante todo el tiempo de la medición. En otros términos, el nivel de ruido variable respecto a un nivel de ruido constante durante determinado tiempo gastaría la misma energía.

Respecto a la frecuencia, generalmente la determinación del  $L_{eq}$  considera la ponderación A, salvo que se especifique en algún estudio específico la utilización de otra ponderación de frecuencia.

El nivel acústico continuo equivalente en dB(A) se expresa con la ecuación 5.14:

$$L_{eq} = 10 \log \frac{1}{t} \left[ \int_0^t 10^{L(t)/10} dt \right] \quad (5.14)$$

en donde:

$t$  = periodo en el que se determina  $L_{eq}$

$L(t)$  = nivel acústico variable en función del tiempo, en dB(A)

Si se toman medidas puntuales del nivel de presión acústica, la expresión se simplifica:

$$L_{eq} = 10 \log \left[ \sum_1^n 10^{L_i/10} t_i \right] \quad (5.15)$$

en donde:

$n$  = número total de muestras tomadas

$L_i$  = nivel acústico de la  $i$ -ésima muestra, en dB(A)

$t_i$  = fracción del tiempo total correspondiente a  $L_i$

**Problema resuelto 5.3 Nivel de presión acústica equivalente**

Calcular el nivel de presión acústica equivalente al que está sometido un obrero de la industria acerera, midiendo en su puesto de trabajo los niveles de presión acústica de las tres tareas que conllevan exposición al ruido, que son forjar, cortar y soldar. A su vez, se estima el tiempo dedicado a cada una de ellas. La jornada es de 8 horas.

Actividad	NPA (dBA)	Duración (horas)
Forjar	84	3
Cortar	86	4
Soldar	82	1

**Solución**

Para calcular el nivel de exposición diario equivalente se utiliza la expresión 5.14:

$$L_{eq} = 10 \log \left[ \sum_1^n 10^{L_i/10} t_i \right]$$

Sustituyendo los valores de presión acústica reportados,

$$L_{eq} = 10 \log \left[ 10^{84/10} \times \frac{3}{8} + 10^{86/10} \times \frac{4}{8} + 10^{82/10} \times \frac{1}{8} \right]$$

Con lo que se obtiene:

$$L_{eq} = 84.16 \text{ dB(A)}$$

$$L_{eq} = 84 \text{ dB(A)}$$

**Pérdida energética del NPA con la distancia**

Los NPA a partir de la fuente sufren de pérdida energética considerable con la distancia. Una forma de calcularla es con la ecuación 5.16:

$$NPA_2 = NPA_1 - 20 \log \frac{d_2}{d_1} \tag{5.16}$$

en donde  $NPA_2$  es el nivel registrado a la distancia 2 ( $d_2$ ), y  $NPA_1$  es el nivel de presión acústica recibido a la distancia  $d_1$ . Ambas distancias se miden a partir de la fuente.

## 5.4.1 Ruido generado por automotores en proyectos de vialidades

Los proyectos de vialidades y el ruido generado durante su construcción y operación resultan particularmente sensibles para la población, ya que estará expuesta en su cotidianidad. Usualmente se busca utilizar modelos de predicción que incorporan distintos criterios. Estos modelos se conforman por ecuaciones matemáticas sencillas que se elaboran a partir de la integración de dos modelos: el modelo de fuente y el modelo de propagación, similares a los modelos expuestos anteriormente.

Es necesario explicar el modelo de fuente de cada método a emplear, ya que éstos buscan describir la generación del ruido desde la fuente móvil a partir de dos vertientes o escuelas distintas. La primera escuela de referencia, intenta comprender la emisión acústica de **un solo vehículo** en la vía, y a partir de esto, explicar el fenómeno de emisión del conjunto del tráfico. Entre los modelos elaborados a partir de esta escuela está el de la FHWA (Estados Unidos) y el CERTU (Francia) (Álvarez & Suárez, 2011).

La otra escuela denominada de Referencia Carretera considera a la **vía como una fuente lineal** de ruido donde cada vehículo emite energía con un desfase aleatorio. Entonces, adjudica una potencia acústica por unidad de longitud de la vía, ya sea directamente o bien estableciendo un nivel base a la distancia de referencia en función de las variables de la circulación y de la vía, tales como la densidad, velocidad y composición del tráfico, naturaleza y pendiente de la vía, entre otros. Modelos como el STL-86 (Suiza), el RLS-90 (Alemania) y el CoRTN (Inglaterra) atienden a estas características propuestas por la segunda escuela.

A continuación, se mencionan las diferencias entre los modelos. Los de fuente son principalmente empíricos y basados en una naturaleza estadística del fenómeno, puesto que el conocimiento de la potencia acústica y la directividad de cada vehículo es una tarea por demás compleja. Los niveles sonoros base, a la distancia de referencia, generalmente se determinan por un gran número de medidas en diferentes condiciones de tráfico, pero que son revisadas con cuidado para poder aislar el factor emisión de la influencia de otras variables del medio. Cabe destacar que existe una cierta dispersión entre los diferentes modelos de fuente respecto a los valores de emisión de referencia y las variables de los vehículos, tales como distancia de referencia, altura de la fuente, rango de velocidades o de los tipos de vehículos, incluso normalizando la distancia de referencia, el nivel sonoro base de emisión a tal distancia resulta dispar en los diferentes modelos (Arana & Asiain, 2002).

## 5.4.2 Modelos de predicción

Existen modelos muy variados para predecir el ruido originado por vehículos, sin embargo existen 4 modelos que se adecuan a las condiciones de un país latinoamericano, por lo que son útiles para predecir y evaluar (Peña Gutiérrez, 2012). Éstos se enlistan a continuación en la tabla 5.6.



Tabla 5.6. Modelos de predicción de ruido generado por automotores en proyectos de vialidades

<b>Modelo</b>	<b>Ecuación</b>	<b>Observaciones</b>
<b>Modelo Alemán RLS-90</b>	<p>Modelo de emisión:</p> $L_{25} = 37.3 + 10 \log [M \times (1 + 0.082P)]$	<p>Donde</p> <p><math>L_{25}</math>: Nivel de emisión a 25 metros.</p> <p><math>M</math>: Volumen medio de tráfico horario (Vehículos por hora o tráfico medio diario, PDT).</p> <p><math>P</math>: Porcentaje de vehículos pesados (Número de camiones).</p>
	<p>Modelo:</p> $L_{RECEPTOR} = LME + C_{sección} + C_{dist} + C_{suelo} + C_{pantalla} + REFLEX$	<p>Donde:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Nivel medio de emisión a 25 metros NEP (<math>L_{eq1hor}</math>)</li> <li>• Corrección por divergencia geométrica (distancia) (<math>C_{dist}</math>)</li> <li>• Corrección por el aire (<math>C_{aire}</math>)</li> <li>• Corrección por el suelo (<math>C_{suelo}</math>)</li> <li>• Corrección por barreras acústicas (<math>C_{pantalla}</math>)</li> <li>• Correcciones meteorológicas (<math>C_{met}</math>)</li> <li>• Reflexiones en fachadas cercanas (REFLEX)</li> </ul>
<b>Modelo del Reino unido</b>	<p>Modelo de emisión:</p> $L_{básico} = 42.2 + 10 \log q$	<p>Donde:</p> <p><math>L_{básico}</math>: Nivel básico de ruido, descriptor percentil <math>L_{10}</math>(dBA)</p> <p><math>q</math>: Intensidad de tráfico expresado como número de vehículos por hora (Veh/h)</p>
	<p>Modelo:</p> $L_{10} = LRE + C_{dist} + C_{suelo} + C_{ángulo} + C_{mscr} + REFLEX$	<p>Donde:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Corrección por distancia (<math>C_{dist}</math>)</li> <li>• Atenuación de terreno (<math>C_{suelo}</math>)</li> <li>• Corrección por ángulo de apertura (<math>C_{ángulo}</math>)</li> </ul>

		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Difracción por barreras acústicas (<math>C_{pantalla}</math>)</li> <li>• Múltiples difracciones (<math>C_{mscr}</math>)</li> <li>• Incremento de nivel por reflexiones (REFLEX)</li> </ul>
<b>Modelo Escandinavo Statens Planverk 48</b>	Modelo de emisión: $L_{básico} = 68dBA$	Este valor será afectado por: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Velocidad real de los vehículos livianos (<math>C_{speed}</math>)</li> <li>• Intensidad de tráfico (<math>C_{tráfico}</math>)</li> <li>• Vehículos pesados y su velocidad (<math>C_{truck}</math>)</li> <li>• Pendiente de la carpeta asfáltica (<math>C_{pendiente}</math>)</li> </ul>
	Modelo: $L_{eq} = LRE + C_{dist} + C_{suelo} + C_{pantalla} + C_{ángulo} + C_{dp} + REFLEX$	A diferencia de otros modelos, Statens Planverk 48 permite obtener el nivel de ruido en el interior de los edificios en función del aislamiento de las fachadas.
<b>Modelo francés</b>	Modelo: $L_{Aeq} = 55 + 10 \log(Q_{vl} + E \times Q_{vp}) - 10 \log L + K_h + K_v$	Donde: $Q_{vl}$ : Caudal de vehículos ligeros $Q_{vp}$ : Caudal de vehículos pesados $E$ : Pendiente (%) $L$ : Ancho de la calzada $K_h$ : Altura $K_v$ : Velocidad

### Otras consideraciones con modelos de predicción

#### Métodos Provisionales de Medición de $L_{den}$ y $L_{night}$

Si un Estado desea utilizar su propio método de medición oficial, este deberá adaptarse a las definiciones y cumplir los principios aplicables a las mediciones medias a largo plazo expuestos en las normas ISO 1996-2: 2007 e ISO 1996-1: 2003. Si un Estado no tiene en vigor ningún método de

medición o prefiere aplicar otro, es posible determinar un nuevo método sobre la base de la definición del indicador y los principios presentados en las normas ISO 1996-2: 2007 e ISO 1996-1: 2003.

#### Métodos de Evaluación de los Efectos Nocivos

Las relaciones dosis-efecto se utilizarán para evaluar el efecto del ruido sobre la población. Las relaciones dosis-efecto:

- La relación entre las molestias y los valores de  $L_{den}$  por lo que se refiere al ruido del tráfico rodado, ferroviario, aéreo y de fuentes industriales,
- La relación entre las alteraciones del sueño y los valores de  $L_{night}$  por lo que se refiere al ruido del tráfico rodado, ferroviario, aéreo y de fuentes industriales.

#### Software de modelado de predicción

Existen en el mercado muy diversas opciones para modelar por vía computacional el comportamiento de un proyecto carretero. Éstas incorporan una gran cantidad de variables, aprovechando el poder de cómputo que tienen las computadoras comerciales hoy en día. Sin embargo, la mayoría están desarrollados en países cuya normatividad y condiciones varían de las nuestras, por lo que es importante tener cuidado especial con su aplicación. A continuación, se describen brevemente un par de ellos a manera de ejemplo.

##### Modelo de predicción acústica SOUND-PLAN

Modela espacios abiertos donde se requiere analizar la propagación del sonido. Simula el sonido proyectado al ambiente por fuentes puntuales y flujo vehicular considerando también la incorporación de barreras acústicas para la mitigación del ruido.

##### Modelo de predicción acústica Cadna/A

Cadna/A (Computer Aided Noise Abatement) es un software comercial de la empresa alemana DataKustik para el cálculo, presentación, gestión y predicción de la exposición al ruido ambiental y su impacto. Los modelos de tráfico rodado que utiliza son consecuentes con los métodos dispuestos en la Directiva 2002/46/CE del Parlamento Europeo y del Consejo sobre evaluación y gestión del ruido ambiental. No obstante, a lo anterior incluye numerosas normas locales de los países europeos para las diferentes fuentes de ruido; carreteras, trenes, aviones e industrias. Presenta integración con hojas de cálculo, software CAD y SIG.

### **5.4.3 Ruido generado en los proyectos de aeropuertos**

Como se había mencionado anteriormente, los problemas de ruido generados por el transporte aéreo se han incrementado en las últimas décadas debido a la cercanía de las ciudades con los aeropuertos y al aumento de tráfico aéreo. Además, la trayectoria por donde sobrevuelan las aeronaves crea zonas con niveles de presión acústica poco adecuados.

Estas razones, por mencionar unas cuantas, hacen que el estudio del impacto por ruido de los aeropuertos, sus predicciones a través de las rutas que los aviones realizan y la propuesta de medidas correctivas en las áreas donde la población esté siendo afectada, se vean totalmente justificadas en la búsqueda de soluciones que directamente atañen al bienestar común de los ciudadanos.

Un modelo de predicción del ruido generado por las aeronaves es, en esencia, un grupo de ecuaciones que describe la relación entre varios factores que contribuyen a la intensidad y distribución del ruido. Típicamente tiene tres componentes principales (Heredia Iturbe, 1998):

- Las ecuaciones centrales; algoritmos para calcular tanto el nivel de ruido producido, en promedio, por un tipo específico de avión, en una operación determinada, como los niveles de ruido acumulado por todas las aeronaves que utilizan un aeropuerto.
- Una base de datos que contiene las características de funcionamiento y del ruido producido por cada tipo de avión que opere en un aeropuerto dado.
- Datos adicionales sobre factores del medio ambiente que afectan a los niveles de ruido (elevación, temperatura, presión atmosférica, dirección y velocidad del viento, gradiente de pista, etc.) e información operacional como tráfico, utilización de pistas y trayectorias de vuelo.

Cada corrida de un modelo produce una serie de contornos de igual nivel de exposición al ruido. El impacto del ruido de un sólo avión es llamado **huella de ruido**. El impacto acumulado por el ruido de varios aviones en un tiempo específico, se conoce generalmente como **contornos de ruido**.

Además de describir y cuantificar los impactos del ruido producido por la operación de aeronaves en lugares específicos, los modelos también tienen otras aplicaciones (Heredia Iturbe, 1998):

- Sirven como referencia para comparar los niveles de ruido predichos contra los medidos.
- Son una herramienta valiosa para la planeación del espacio aéreo, de aeropuertos y de procedimientos operativos.
- Ayudan a evaluar la efectividad de las medidas para mitigar el ruido.
- Se usan para formular estándares de ruido, y;
- Son un instrumento de investigación para conocer mejor la propagación del ruido y para desarrollar técnicas de control.

Al igual que para la predicción de ruido generado por automotores en proyectos de vialidades, para los proyectos de aeropuertos se cuenta con una variedad amplia de modelos de predicción.

### **Modelo de predicción acústica SOUND-PLAN**

Este software puede ser utilizado también en proyectos aeroportuarios. Como se mencionó anteriormente, modela espacios abiertos donde se requiere analizar la propagación del sonido. Simula el sonido proyectado al ambiente por aeronaves, con la posibilidad de integración con la base de datos del INM.

### **Modelo de dispersión de Leschnik**

Este modelo, diseñado en 1980, estudia la dispersión producida por edificios, árboles, paredes, etc., idealizado como un modelo de tres dimensiones al que se aplica la técnica de Monte Carlo, obteniéndose el resultado como una solución aproximada que puede ser obtenida por técnicas de interpolación.

### Modelo de Monte Carlo

Es un modelo de simulación que se aplica a las situaciones de alineación, en las cuales se sacan números aleatorios a partir de distribuciones de frecuencia estadística de llegada y tiempos de servicio con el propósito de calcular algunos parámetros de la situación de formación de líneas, por lo que puede aplicarse en aeropuertos.

## 5.5 Control de ruido

El control de ruido es la estrategia necesaria para obtener un entorno de ruido aceptable y tiene en cuenta consideraciones económicas y operacionales (Recuero, 1999). Usualmente se realiza cuando alguna persona o un grupo de personas requieren un entorno en el que el ruido no exceda cierto nivel. Así mismo, se efectúa cuando se ve afectado el funcionamiento de algún equipo por el ruido.



Figura 5.16. Actores en el proceso de control del ruido

Es importante observar que el término *control de ruido* puede confundirse con *reducción de ruido*, y no necesariamente el control es reducción. En algunos casos, el control implica aumentar niveles de presión acústica. Podría parecer contradictorio, pero es necesario en sitios como algunos consultorios médicos y dentales, por ejemplo. Si los muros divisorios entre el despacho del médico y la sala de espera son muy poco aislantes, la conversación del médico con el paciente que usualmente es privada sería escuchada en la sala de espera. Para evitar esto, se puede incrementar el nivel de ruido en la sala de espera mediante una fuente que emita algún sonido, por ejemplo, música. De esta forma, se enmascara las conversaciones que pudieran escucharse. Otras posibles soluciones serían desplazar el despacho (o en su caso, la sala de espera) a otro sitio en el predio, o colocar un muro que tenga mayor aislamiento, pero obviamente estas dos soluciones son sensiblemente menos económicas.

El control de ruido resulta importante y en muchos casos indispensable, pues con esto se busca garantizar un ambiente saludable para poder tener una mejor calidad en nuestra audición y también una mejor calidad de vida, incluyendo las consecuencias psicológicas ocasionadas por estar en contacto con ruido.

Una vez determinados los problemas de ruido sufridos en una zona o localidad, el control del mismo puede realizarse desde tres puntos de vista:

### **Control de ruido en la fuente**

Es lo más directo para reducir los niveles sonoros emitidos por la fuente. Se reducen los niveles de intensidad que generan el ruido desde su origen, lo cual puede hacerse mediante masas rotatorias o aislando los elementos vibratorios de la fuente. Sin embargo, en la práctica es difícil de aplicar, ya que se deben conocer el funcionamiento y los principios físicos de cada uno de los elementos que generen ruido. Con el objetivo de disminuir el ruido en la fuente, existen varias alternativas que lo permiten, entre las cuales están:

- Disminuir al mínimo el tiempo de operación y la energía necesaria en procesos en los que ocurren impactos (martilleo, prensado, corte, etc.), así como recubrir las superficies con materiales de elevado amortiguamiento interno, como hule o diversos polímeros.
- Propiciar que la amplitud de vibración sea lo más pequeña posible en máquinas que posean movimiento vibratorio como parte de su proceso operativo. En muchas situaciones esto se consigue con un adecuado equilibrio dinámico, o, en su defecto, reducir la velocidad de operación. Por ejemplo, la maquinaria de refrigeración de un local puede no producir ruido como tal, pero sí propagar una vibración por la pared de un edificio y que ésta, al entrar en contacto con un elemento de poca masa se convierta en ruido. Esto se solucionaría colocando elementos dispersores de vibración como muelles.
- Lubricar adecuadamente las máquinas que generen ruido por fricción de sus elementos.
- Incorporar silenciadores en escapes de gas o modificar el sistema mediante la inserción de conductores que dirijan el gas hacia otras direcciones.

En la mayoría de los núcleos de población, el principal problema de ruido es el producido por el tráfico rodado. Para la reducción del ruido se puede, por ejemplo, realizar un cambio en el asfaltado, pasando de pavimento adoquinado a asfalto sonorreductor se consigue una reducción del ruido de varios decibelios. Otra fuente de ruido importante dentro del tráfico rodado son los elementos de transporte público, donde lo que conviene es invertir en flotas más silenciosas.

Cuando se pretende regular los niveles de ruido en cierto intervalo de tiempo, puede resultar efectivo detener totalmente la fuente que genera ruido. Aunque esto no sea de manera permanente, detener la actividad por algunas horas permite compensar los niveles de ruido. Por ejemplo, si una fábrica para sus máquinas durante periodos, esto hará que se reduzcan los niveles de ruido durante el día cuando se ponderan. De igual forma, la interrupción de actividades ruidosas durante la noche puede compensar el nivel equivalente en 24 horas.

### **Programas institucionales**

Resultan de las leyes y normas que se hacen en materia de impacto ambiental y acústico, con el fin de que los emisores controlen los niveles de ruido y la duración de éste. Usualmente establecen mecanismos para multar o sancionar a los infractores.

### Control de ruido en la vía de transmisión

Las características del medio en donde se propaga el ruido definitivamente influyen en gran medida en la manera en que llega al receptor. Existen diversas técnicas por medio de las cuales es posible mitigar la energía sonora (Harris, 1995):

**Emplazamiento.** Consiste en mantener la mayor distancia posible entre el receptor y la fuente, ya que esto reduce el ruido al llegar al receptor por pérdida energética durante el recorrido del sonido. Por otro lado, algunas fuentes no irradian de manera uniforme en todas las direcciones, por lo que, al hacer un cambio de orientación entre la fuente y el receptor, se genera una reducción considerable. Este aspecto cobra especial importancia en el diseño de la orientación de las pistas de un aeropuerto para mitigar los niveles de ruido que recibirían las comunidades cercanas.

**Métodos de edificación.** Consiste en diseñar las habitaciones de un recinto con los materiales adecuados, considerando también dimensiones, orientación, paralelaje y forma. Lo anterior implica atender la problemática desde el diseño de la edificación. Por ejemplo, en ejes viales con mucha densidad de tráfico y por tanto un elevado nivel de ruido, el modo de aumentar la distancia y por tanto el nivel sonoro recibido en las viviendas es colocar las edificaciones de modo que la fachada no coincida con el trazado de la vía.

**Barreras.** Consiste en la utilización de elementos que obstaculicen el desplazamiento de las ondas sonoras. Resulta eficaz cuando su espesor es mayor al de la longitud de la onda, por lo que son útiles para detener frecuencias altas. Otra alternativa es colocar las barreras con cierto ángulo de inclinación con el fin de reflejar estas frecuencias. Esta técnica se profundiza en el subtema 5.5.1 de este libro.

**Cerramientos.** Consiste en encerrar la fuente o al receptor, lo cual reduce de manera considerable el ruido, ya que la mayor parte de las ondas sonoras son reflejadas y desviadas del receptor.

**Absorción.** Consiste en instalar materiales acústicos sobre los muros o techos del lugar donde se desea reducir los niveles de ruido. Son eficaces al reducir la reflexión del ruido que incide sobre el material absorbente, por lo que no tienen influencia en el ruido que proviene directo de la fuente. El coeficiente de absorción del material representa su capacidad de retención del ruido, y relaciona la energía absorbida con la energía total incidente, por lo que un coeficiente igual a cero no tendría absorción alguna y otro igual a 1 absorbería por completo el ruido.

### Medidas protectoras en el receptor

**Aparatos de protección para el oído.** Al colocar en el receptor tapones u orejeras que obstaculicen el paso de las ondas sonoras al sistema auditivo, se reduce sustancialmente el nivel de presión acústica de manera práctica y económica. Son comúnmente utilizados por trabajadores del medio industrial, trabajadores de la construcción, operadores aeroportuarios, etc.

**Cabinas.** De manera similar al método de cerramiento, se coloca un obstáculo que aísla al receptor y de esta forma se reducen los niveles de ruido.



## **Reglamentos y normas para el control de ruido**

La creación de políticas públicas y un marco legal adecuado es necesario para que un país o región tenga instrumentación legal para reducir las emisiones de ruido, con el fin de mejorar la calidad de vida de las personas. La problemática y efectos del ruido son día a día más estudiados y conocidos, por lo que la comunidad internacional poco a poco se involucra en este tema.

Estas políticas abarcan el control de emisiones de ruido en maquinaria, locales comerciales, construcción de edificios, tránsito vehicular, tránsito aéreo, entre otros. Incluso algunos países han incorporado a su normativa el control del uso del suelo debido a distintas situaciones, como el incremento de quejas provenientes de habitantes de viviendas construidas en zonas cercanas a las carreteras.

Respecto a México, existe un marco legal que pretende regular los niveles de ruido desde distintos campos de acción. La Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LEEGEPA) contiene varios artículos en materia de control de ruido, incorporados en la modificación de 1996, los cuales se mencionan a continuación:

Artículo 5º.- Son facultades de la federación:

Fracción XV.- La regulación de la prevención de la contaminación ambiental originada por ruido, vibraciones, energía térmica, lumínica, radiaciones electromagnéticas y olores perjudiciales para el equilibrio ecológico y el ambiente.

Artículo 7º.- Corresponde a los Estados:

Fracción X.- La prevención y el control de la contaminación generada por la emisión de ruido, vibraciones, energía térmica, lumínica, radiaciones electromagnéticas y olores perjudiciales al equilibrio ecológico o al ambiente, proveniente de fuentes fijas que funcionen como establecimientos industriales, así como, en su caso, de fuentes móviles que conforme a lo establecido en esta Ley no sean de competencia Federal.

Artículo 8º.- Corresponde a los Municipios:

Fracción VI.- La aplicación de las disposiciones jurídicas relativas a la prevención y control de la contaminación por ruido, vibraciones, energía térmica, radiaciones electromagnéticas y lumínica y olores perjudiciales para el equilibrio ecológico y el ambiente, proveniente de fuentes fijas que funcionen como establecimientos mercantiles o de servicios, así como la vigilancia del cumplimiento de las disposiciones que, en su caso, resulten aplicables a las fuentes móviles excepto las que conforme a esta Ley sean consideradas de jurisdicción federal.

Artículo 11º.- La Federación, por conducto de la Secretaría, podrá suscribir convenios o acuerdos de coordinación con el objeto de que los gobiernos del Distrito Federal o de los Estados, con la participación, en su caso, de sus Municipios, asuman las siguientes facultades, en el ámbito de su jurisdicción territorial:

Fracción VII.-La prevención y control de la contaminación ambiental originada por ruido, vibraciones, energía térmica, lumínica, radiaciones electromagnéticas y olores perjudiciales para el equilibrio ecológico y el ambiente, proveniente de fuentes fijas y móviles de competencia federal y, en su caso, la expedición de las autorizaciones correspondientes.

Artículo 155.- Quedan prohibidas las emisiones de ruido, vibraciones, energía térmica y lumínica y la generación de contaminación visual, en cuanto rebasen los límites máximos establecidos en las normas oficiales mexicanas que para ese efecto expida la Secretaría, considerando los valores de concentración máxima permisibles para el ser humano de contaminantes en el ambiente que determine la Secretaría de Salud. Las autoridades federales o locales, según su esfera de competencia, adoptarán las medidas para impedir que se transgredan dichos límites y en su caso, aplicarán las sanciones correspondientes.

Artículo 156.- Las normas oficiales mexicanas en materias objeto, establecerán los procedimientos a fin de prevenir y controlar la contaminación por ruido, vibraciones, energía térmica, lumínica, radiaciones electromagnéticas y olores, y fijarán los límites de emisión respectivos.

La norma más general y de más extensa aplicación en nuestro país respecto al control de emisiones de ruido es la NOM-081-SEMARNAT-1994, que establece los límites máximos permisibles de emisión de ruido de las fuentes fijas y su método de medición. Fue publicada el 22 de junio de 1994 en el Diario Oficial de la Federación, siendo vigente desde entonces. Sin embargo, se debe enfatizar el escaso número de artículos relacionados a la regulación sobre ruido en la normativa mexicana.

En el 2013, se publicó en el Diario Oficial de la Federación un acuerdo por el que se modificó el numeral 5.4 de la NOM-081-SEMARNAT-1994, en el que se presentaron nuevos límites máximos permisibles del nivel sonoro en ponderación "A" emitidos por fuentes fijas, son los establecidos en la Tabla 5.7.

Tabla 5.7. Límites máximos permisibles para fuentes fijas

Zona	Horario	Límite Máximo Permissible dB (A)
Residencial (exteriores)	6:00 a 22:00	55
	22:00 a 6:00	50
Industriales y comerciales	6:00 a 22:00	68
	22:00 a 6:00	65
Escuelas (áreas exteriores de juego)	Durante el juego	55
Ceremonias, festivales y eventos de entretenimiento	4 horas	100

Fuente: Acuerdo de modificación al numeral 5.4 de la NOM-081-SEMARNAT-1994

Además de la norma anteriormente citada, existen diversas Normas Oficiales Mexicanas (NOM) en materia de ruido, algunas de ellas se enlistan a continuación:

NOM-079-SEMARNAT-1994. Sobre el nivel máximo de ruido permitido para vehículos automotores nuevos

NOM-079-ECOL-1994. Sobre el nivel máximo de ruido permitido para vehículos.

NOM-080-ECOL-1994. Sobre los niveles máximos de ruido permitidos provenientes de los escapes de vehículos automotores, motocicletas y triciclos

• NOM-082-ECOL-1994. Sobre los niveles máximos de ruido permitidos en motocicletas.

Respecto a la Ciudad de México, existe una norma local, la NADF-005-AMBT-2013, que establece las condiciones de medición y los límites máximos permisibles de emisiones sonoras, que deberán cumplir los responsables de fuentes emisoras ubicadas en la Ciudad de México. Esta norma es aplicable a los responsables de fuentes emisoras fijas, y en la mayoría de los casos ha sido utilizada como un instrumento de supervisión para establecimientos comerciales, principalmente en el Centro Histórico y las colonias Roma y Condesa. Esta norma establece su propio método de medición y los límites máximos de ruido permitidos tanto para un punto de referencia como para un punto de denuncia. Los límites máximos permisibles se muestran en la tabla 5.8.

Tabla 5.8. Límites máximos de ruido permitidos para fuentes sonoras fijas establecidos en la Norma Ambiental de la CDMX

Horario	Límite máximo permitido en punto de referencia en dB(A)	Límite máximo permitido en punto de denuncia <sup>19</sup> en dB(A)
De 6:00 a 20:00 hrs	65	63
De 20:00 a 6:00 hrs	62	60

Fuente: Norma Ambiental NADF-005-AMBT-2013

<sup>19</sup> Límite de denuncia: Para una denuncia ciudadana, se determinará un único punto de medición, el cual deberá ubicarse en el lugar que el denunciante percibe la mayor molestia, siempre y cuando sea posible ubicarlo y el denunciante permita el acceso para medir en él.

El cumplimiento de esta norma está en manos de la SEDEMA, la Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial (PAOT) y las delegaciones políticas (actualmente alcaldías).

### Criterios internacionales

A nivel internacional, tanto la OCDE como la Unión Europea, recomiendan valores referentes a niveles de ruido ambiental. Ambos organismos plantean una diferenciación para los periodos diurnos y nocturnos, con base en parámetros estándares de ruido, que permiten representar un promedio energético del ruido para cada uno de los periodos señalados.

Tales valores, representan estándares referenciales que permiten generar un indicador ambiental común, a fin de lograr comparar los avances en materia de gestión en control de ruido ambiental en los países miembros.

Tabla 5.9. Recomendaciones OCDE-UE

Periodo	Límite máximo permisible en dB(A)
Diurno	65
Nocturno	55

La Organización Mundial de la Salud, OMS, ha publicado un estudio referente al ruido nocturno y sus efectos en la salud, específicamente Night Noise Guidelines (NNG) for Europe (2009), donde señala que para la prevención primaria de efectos subclínicos adversos en la salud de la población relacionados con el ruido nocturno, se recomienda que la población no debe estar expuesta a niveles de ruido superior a 40 dB de nivel de presión acústica equivalente durante el periodo nocturno, cuando la mayoría de la gente se encuentra durmiendo. Agrega que este valor puede ser considerado como un valor límite, basado en salud, de las directrices para ruido nocturno (NNG) necesarias para proteger a la población, incluyendo los grupos más vulnerables como niños, enfermos crónicos y los ancianos.

Cabe destacar que tal recomendación de la OMS está basada exclusivamente en criterios de salud. No obstante, señala que para sectores en los que no es factible en el corto plazo cumplir con esta meta, podrían considerarse niveles mayores, pero sólo temporalmente y con un máximo de 55 dB.

La OCDE establece recomendaciones a sus países miembros, y las referidas al tema ruido apuntan al refuerzo de las políticas de control:

- reforzamiento de las regulaciones existentes, especialmente las relacionadas a fuentes móviles y aeronaves;
- promover la fabricación de productos más silenciosos, etiquetado de productos, incentivos económicos y acciones informativas;
- establecer mecanismos de financiamiento; proteger a la población más expuesta, por medio del control del transporte, instalación de barreras acústicas, aislamiento de edificios;

- prevención de nuevas situaciones ruidosas a través del ordenamiento territorial, especialmente en áreas urbanas.

### 5.5.1 Barreras acústicas

Son elementos que funcionan como obstáculos en la trayectoria del sonido. Con la colocación de estos elementos se busca disminuir la transmisión del ruido, y por tanto los niveles en el receptor. Como se mencionó anteriormente, resultan especialmente eficaces en reducir el ruido de alta frecuencia, ya que, por la corta longitud de onda de este, no logra atravesar la barrera, o lo hace de manera atenuada.

Una **barrera simple** es aquella que está fabricada a partir de compuestos o materiales homogéneos. El aislamiento acústico que proporciona es función prácticamente exclusiva de su masa superficial, y se puede calcular mediante índices de reducción acústica, expresados en las ecuaciones 5.23 y 5.24, que determinan el aislamiento  $R$  (dB (A)) de barreras ligeras o pesadas, en función de la masa por unidad de superficie  $D_s$  ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ) (Recuero López, 1999).

$$\text{Si } D_s \leq 200 \text{ (kg/m}^2\text{), } R = 13.5 \log(D_s) + 13 \quad (5.1)$$

$$\text{Si } D_s > 200 \text{ (kg/m}^2\text{), } R = 23 \log(D_s) - 9 \quad (5.2)$$

Donde:

$D_s$  es la densidad superficial del elemento, en  $\text{kg}/\text{m}^2$

$R$  es el índice de reducción acústica, en dB(A)

La densidad superficial  $D_s$  se calcula según la siguiente expresión:

$$D_s = e \times \gamma \quad (5.3)$$

Donde:

$e$  es el espesor del elemento, en m

$\gamma$  es el peso específico del elemento, en  $\text{kg}/\text{m}^3$

Mientras más densas y gruesas sean las barreras, aislarán de manera más eficiente. Nótese que las ecuaciones anteriormente presentadas son empíricas, pero los resultados obtenidos son bastante exactos y permiten calcular de manera práctica la pérdida energética sonora.

En la figura 5.17 se observa el comportamiento acústico de distintos materiales.

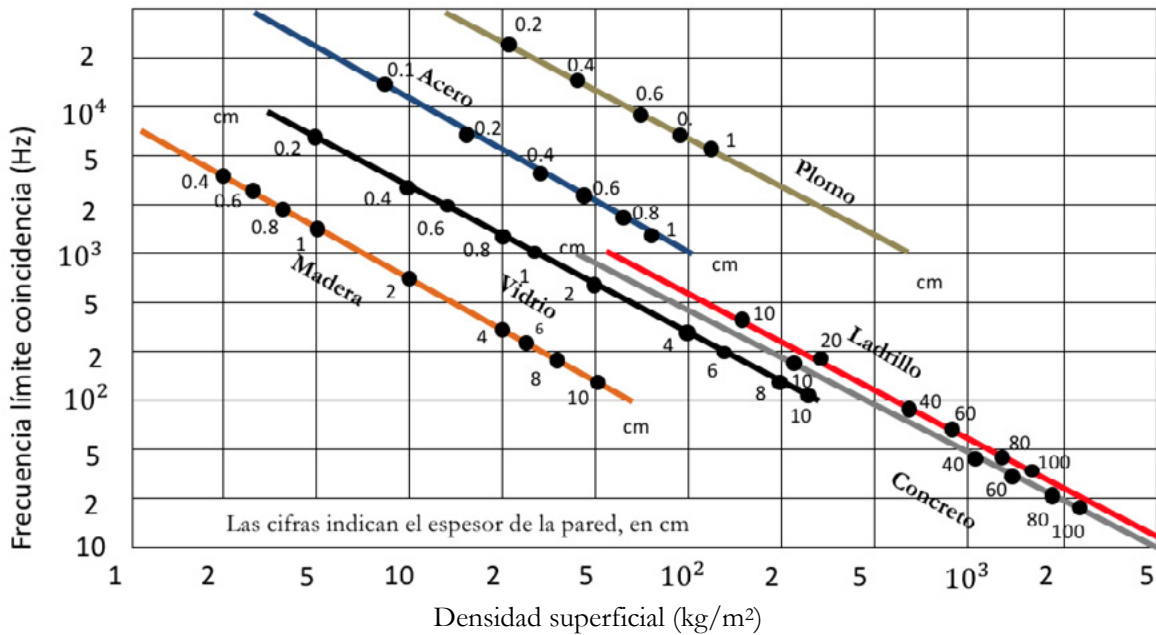


Figura 5.17. Efecto del espesor de muros de distintos materiales en el aislamiento acústico. Basado en *Universidad Nacional de Cartagena, Métodos de control de ruido, en el ambiente laboral, pág. 36*

## 5.5.2 Estrategias de control de ruido en carreteras

Como se ha comentado, el principal problema por ruido de un municipio se debe al tránsito vehicular. Por tanto, es en esta fuente en la que se plantean la mayor parte de las actuaciones reductoras a nivel global. Es importante centrarse además en las técnicas dedicadas a la reducción del nivel en la fuente, ya que, como se ha visto con anterioridad, tanto las aplicadas en propagación como en el receptor son escasas y poco eficientes.

Entre las medidas destinadas a reducción del ruido por tránsito vehicular se presenta una clasificación dividida en las destinadas a reducir el ruido de tránsito y en aquellas para reducir o reordenar el tránsito.

### Medidas de reducción del tránsito

Resulta evidente que, a menor número de vehículos, menor nivel sonoro registrado en la localidad.

Para la reducción del volumen general de tránsito se plantean dos frentes de acción:

- Creación de zonas de circunvalación: su finalidad es sacar del centro urbano todo el tráfico de paso existente en el municipio y cuyo tránsito por el interior del mismo es innecesario.
- Promoción de transporte público: un transporte público bien organizado, con fluidez de servicio y que conecte las zonas más importantes del municipio con el centro es un buen punto para fomentar su uso y disuadir a los ciudadanos del uso del vehículo particular.

Esto debe ir acompañado de planes de concientización de la población y un sistema de estacionamientos disuasorios a las afueras del centro de la localidad.

Por otra parte, para vías de tránsito muy denso o con muchos desplazamientos, se puede plantear la reducción del número de carriles y ensanchamiento de las aceras, ya que mediante la reducción de carriles de una calle es evidente que su capacidad varía, y por tanto a menor número vehículos menor nivel de ruido.

Este tipo de soluciones deben ser consideradas cautelosamente ya que la descongestión de una vía puede significar la congestión de otra si no se planifica adecuadamente. Para la toma de estas decisiones es muy útil el uso de herramientas como mapas de conflicto, en los que se identifican las calles donde el nivel sonoro es tan bajo que la introducción del tránsito evacuado de la calle congestionada no producirá un nuevo conflicto en la vía receptora.

El ensanchamiento de las aceras se produce para dar mayor predominio a los peatones, permitiendo su movilidad y haciendo el entorno más agradable mediante la introducción de nuevo mobiliario urbano.

Otra medida es la eliminación de un sentido de circulación, que reduce el volumen de tránsito, y por lo tanto, el nivel de ruido.

### **Medidas de reducción del ruido de tránsito**

El ruido producido por los vehículos se debe a dos causas:

- **Acción de rodamiento:** es especialmente notable a bajas velocidades y se debe al rozamiento del caucho de las ruedas con el pavimento del firme.
- **Funcionamiento del motor:** es más apreciable a altas velocidades donde el ruido de rodamiento queda prácticamente enmascarado. A mayor velocidad, mayor nivel de ruido.

Entre las medidas encaminadas a reducir la velocidad, están:

- **El estrechamiento de carriles y colocación de camellones:** mediante el estrechamiento real de los carriles o la simulación de su estrechez mediante la colocación de medianas que produzcan dicho efecto, la velocidad de los vehículos se ve automáticamente reducida.
- **La eliminación de trayectorias rectilíneas:** produce un efecto parecido al anterior. Si la vía es recta y con buena visibilidad, el conductor tenderá a circular a mayor velocidad. Pero si, por ejemplo, se colocan los espacios de estacionamiento de modo alternado a un lado y a otro de la calzada, esto produce una disminución de la visibilidad, ocasiona que el conductor circule con menor confianza y por tanto a menor velocidad.
- **La jerarquización de las vías:** se trata de la definición de zonas de diferentes velocidades en función del uso al que se las quiera destinar. Esto es, para calles interiores cuyo uso sea únicamente de llegada a puntos finales (por ejemplo, a viviendas particulares) la velocidad será reducida mientras que para ejes viales de gran importancia la velocidad permitida será mayor.



De este modo se crearán “islas” de baja velocidad, rodeadas por vías de tránsito cuya velocidad y por tanto nivel sonoro será mayor.

### **Medidas que van orientadas a regularizar el tránsito**

Otra fuente importante de ruido vehicular es el efecto de las paradas y arranques. Esto se produce principalmente en semáforos e intersecciones. Para evitarlo, puede resultar útil la instalación de rotondas que hacen un mejor reparto del tránsito.

Con respecto a la modificación del pavimento, el ruido de rodamiento es especialmente importante a bajas velocidades. Los niveles producidos varían mucho en función del firme instalado, siendo el adoquín el más ruidoso en contraposición con pavimentos de nueva creación conocidos como sonorreductores.

Por otro lado, es posible la introducción de transporte público más silencioso, por ejemplo, mediante autobuses que produzcan menos ruido que los autobuses diesel. Los autobuses eléctricos producen únicamente ruido de rodadura, también es útil el uso de autobuses híbridos, o incluso la sustitución de este tipo de transporte por otro menos ruidoso como los tranvías.

### **Control de uso de suelo**

Resulta indispensable en la planeación urbana considerar el control del crecimiento y expansión de la urbe a futuro. La problemática radica en que mientras se expanda más la ciudad sin adecuada planeación, las distancias y tiempos de recorrido aumentan, así como el tránsito vehicular, por lo que los niveles de ruido también lo hacen. Lo anterior se logra mitigar al proporcionar viviendas cercanas a los centros de trabajo, así como asegurar accesibilidad a los servicios y recreación. Estas estrategias ayudarán a evitar muchos problemas futuros asociados al ruido de tráfico en carreteras, especialmente las que comunican a lotes vacantes que algún día pueden ser urbanizados.

## **5.5.3 Mitigación del ruido producido por la construcción**

Es fundamental identificar las fuentes de emisión de ruido al llevar a cabo una construcción, así como los niveles de presión sonora. Si estos son de más de 80 decibeles, se debe laborar sólo durante el día y por periodos de tiempo cortos, y los ciclos de trabajo deben ser de máximo dos horas de ruido continuo en obras cercanas a hospitales o escuelas.

Los vehículos y maquinaria utilizados en las obras deberán contar con silenciadores en los escapes y estar en un correcto estado de funcionamiento. Es conveniente instalar mecanismos de insonorización en vehículos, maquinaria y equipo que se utilice en las labores de construcción.

Existen tres categorías principales para el control de ruido:

- consideraciones de diseño y formato
- secuencia de operaciones
- métodos alternativos de construcción

En el sitio de la construcción se utilizan barreras acústicas fabricadas con conglomerados, lana y/o vidrio, así como barreras móviles cercanas a las fuentes emisoras de ruido. Para las compresoras, es recomendable utilizar cerramientos acústicos y silenciadores de equipamiento anexo.

Por otro lado, si se planean adecuadamente las actividades de construcción, se puede lograr un importante control del ruido, por ejemplo, minimizando la duración en el uso de maquinaria, estableciendo una buena comunicación con la comunidad afectada para conocer los horarios más convenientes para operar, entre otros aspectos.

## 5.6 Problemas y actividades propuestas

5.1 ¿Qué nivel de presión acústica resulta de combinar tres niveles registrados por un sonómetro iguales a 75 dB(A), 86 dB(A) y 92 dB(A)?

5.2 En los sonómetros se utiliza un circuito de ponderación para hacer las mediciones. ¿Por qué se utiliza este tipo de circuitos?

5.3 En una planta industrial, se toman mediciones de ruido ambiental. Dentro de una de las naves, se encuentra una serie de 5 máquinas de corte automático. Se registra el NPA, obteniendo una lectura de 97 dB(A). Al apagar una sola de las máquinas, se vuelve a tomar lectura y se registran 96 dB(A). ¿Cuál es el NPA de la máquina que se apagó?

5.4 ¿Qué son los fones y para qué se utilizan?

5.5 ¿Qué es el nivel del umbral auditivo?

5.6 Desde la ventana de una casa se realizaron mediciones y se registraron los niveles obtenidos mostrados en la tabla. ¿Se trata de un vecindario relativamente silencioso o ruidoso?

Hora (h)	Nivel sonoro (dBA)	Hora (h)	Nivel sonoro (dBA)
00:00 - 06:00	40	14:00 - 18:00	58
06:00 - 08:00	54	18:00 - 20:00	65
08:00 - 10:00	67	20:00 - 00:00	52
10:00 - 14:00	62		

5.7 ¿Qué es el desplazamiento temporal del umbral auditivo y qué es el desplazamiento permanente de umbral auditivo?

5.8 Describir los efectos del ruido en la salud, además del daño al oído.

**Actividad 5.1****Impactos de las actividades antrópicas en el paisaje sonoro**

Mira el video “Bernie Krause: The voice of the natural world”, alojado en TED

<https://youtu.be/h8EtZixkUo4>

A partir de la reproducción del video y el análisis de la información que ofrece, responde las siguientes preguntas:

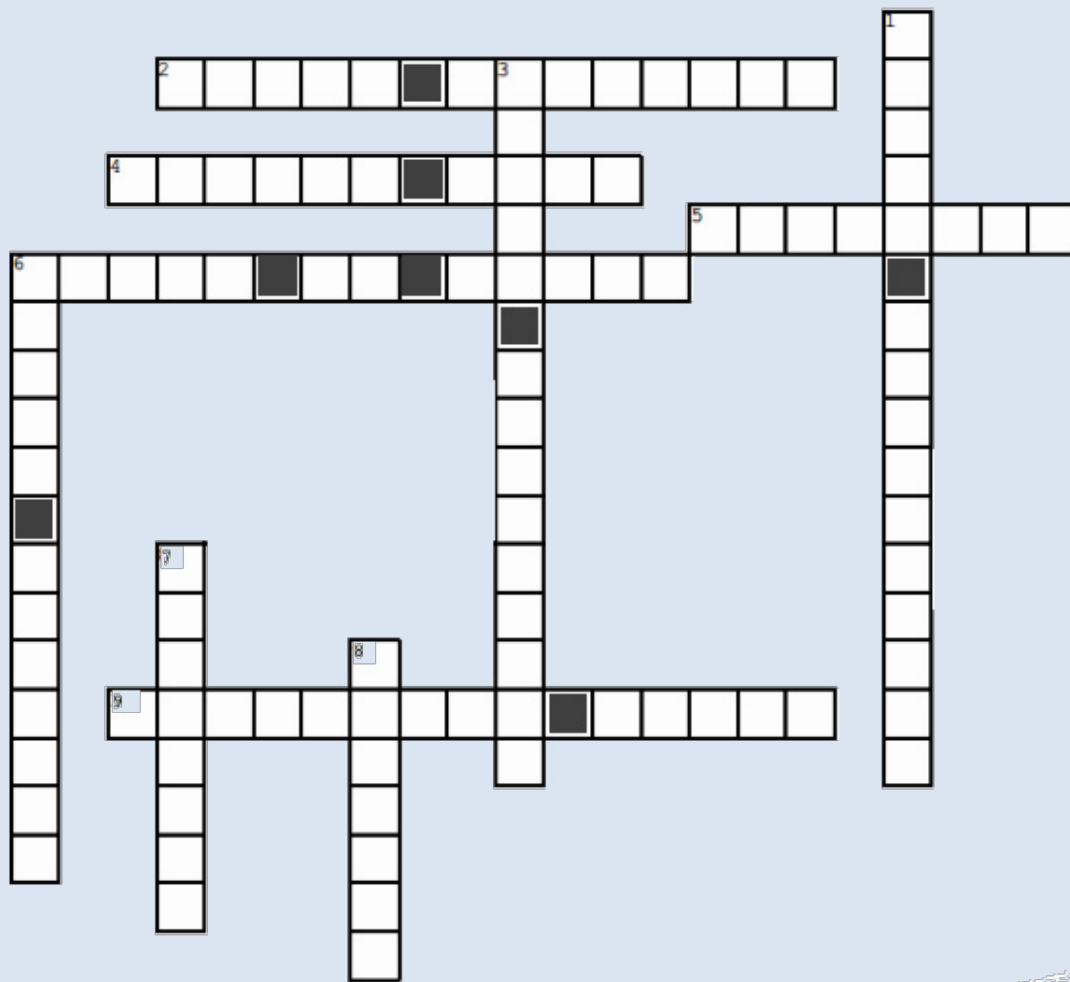
1. Describe los elementos del paisaje sonoro, proporcionando un ejemplo distinto a los mencionados en el video
2. ¿Por qué el calentamiento global altera el paisaje sonoro?
3. Explica brevemente el caso descrito de alteración al paisaje sonoro en Lincoln Meadow
4. ¿Qué es un espectrograma? ¿Qué representa el eje de las abscisas y qué el de las ordenadas?
5. ¿Cómo impacta el sonido de los aviones en el sapo de espuelas?
6. ¿Qué medidas se han tomado en el caso explicado de California para evitar el impacto de la pregunta anterior?

**Actividad 5.2**  
**Crucigrama “El ruido y su medición”**

1. Completa el crucigrama, consultando las fuentes que consideres adecuadas
2. Realiza un listado con las fuentes de consulta que utilizaste

**RUIDO**

Completa el crucigrama con relación a lo aprendido



<b>Actividad 5.2</b>	
<b>Crucigrama “El ruido y su medición” (continuación)</b>	
<b>Verticales</b>	<b>Horizontales</b>
1. Su intensidad varía a lo largo del tiempo por encima de los 5 dB	2. Áreas aledañas a la parte exterior de la colindancia del predio de la fuente fija donde ésta produce las mayores emisiones de energía acústica
3. Presente en el exterior, compuesto por sonidos de varias fuentes fijas y móviles	4. Elemento capaz de producir emisiones de ruido hacia el exterior desde un inmueble
6. Su intensidad varía a lo largo del tiempo lentamente sobre márgenes inferiores a 5 dB	5. Curvas que representan niveles de ruido constante medido en la zona en estudio, en forma simultánea y continua.
7. Persona afectada por el ruido	6. Sonido indeseado que se produce de forma simultánea a la realización de una medición acústica
8. Unidad acústica utilizada para expresar el logaritmo de la razón entre una cantidad medida y una cantidad de referencia	9. Es la respuesta del instrumento de medición que evalúa la energía media en un intervalo de un segundo

### Actividad 5.3 “El ruido en nuestro entorno”

Comúnmente nuestro entorno cotidiano (especialmente en el medio urbano) se encuentra saturado de distintas fuentes sonoras que provocan que estemos expuestos a niveles excesivos de ruido. ¿Alguna vez te has preguntado cuánto ruido te rodea? No es tan difícil averiguarlo. Existen aplicaciones para dispositivos inteligentes que miden de manera aproximada los niveles de ruido en el entorno.

1. Busca y descarga alguna aplicación para medir ruido
2. Mide el nivel de presión acústica en distintos puntos en los que te encuentres de manera cotidiana, hazlo durante 5 días consecutivos, registrando los valores mostrados por la aplicación:
  - a. En tu habitación, hazlo por la mañana y cuando te vayas a dormir.
  - b. En la acera frente a tu casa, cuando salgas a clases y cuando regreses de ellas.
  - c. En el cruce de dos avenidas importantes
  - d. En las inmediaciones de tu centro de estudio
  - e. En el salón de clases
  - f. En donde usualmente comes, mientras lo haces
  - g. En las inmediaciones de un predio en donde se encuentre alguna obra en construcción
3. Tabula los valores registrados, incluyendo el día de registro y la hora de la medición
4. Compara con la normatividad vigente en tu localidad
5. Analiza y comenta los resultados, proponiendo medidas de mitigación en caso de requerirlo



## Capítulo

# 6

## Objetivos de aprendizaje

---

Objetivo del capítulo: El alumno explicará las disposiciones legales en materia de impacto ambiental para la autorización de obras o actividades y la metodología general para la evaluación del impacto ambiental, aplicando las técnicas más adecuadas a las condiciones nacionales.

En este capítulo aprenderás acerca de:

1. El desarrollo de la política pública ambiental en México
2. Las leyes y reglamentos en materia de impacto ambiental
3. La metodología general para evaluar el impacto ambiental
4. Las técnicas para estudiar el impacto ambiental y su clasificación
5. Las técnicas más adecuadas a las condiciones nacionales
6. Estudios de caso de evaluación del impacto ambiental

## Capítulo

## 6

## 6. Evaluación de impacto ambiental

*“Cuando uno jala una sola cosa en la naturaleza, se encuentra que está agarrada del resto del mundo”*  
*John Muir (1838-1914)*

Como se estableció en el Capítulo 1 del Libro de Ingeniería Ambiental - Fundamentos, el concepto de desarrollo sustentable (DS) surgió como respuesta para enfrentar el deterioro y la sobreexplotación de los recursos naturales como consecuencia de una falta de planeación y de una política que busca maximizar beneficios económicos y sociales a costa de producir daños al ambiente. Recuérdese el concepto de DS de la Comisión Brundtland en su informe denominado “Nuestro Futuro Común” donde se define como: *“Aquel que satisface las necesidades del presente sin comprometer las necesidades de las futuras generaciones”*, incorporando en el concepto los temas ambiental, social y económico. La forma de llevar a la práctica el DS es a través de las políticas públicas ambientales, entendidas como el conjunto de acciones políticas para garantizar el objetivo del DS. Sin políticas ambientales eficaces y sin una sociedad civil alerta, consciente, movilizadora y participativa, el desarrollo económico puede llevarnos a la pérdida de nuestro patrimonio natural y ambiental, base de muchas de nuestras fortalezas y posibilidades futuras (Fuente, s.f.).

La tabla 6.1 muestra la evolución de los aspectos legales y de gestión de la política ambiental en México, como puede observarse la primera etapa de la política ambiental en México corresponde al periodo 1917-1971 en el que el enfoque fue el de la conservación de los recursos naturales en términos de su aprovechamiento para fines de productividad. Una segunda etapa corresponde al periodo (1971-1984) con la Ley Federal para Prevenir y Controlar la Contaminación (1971) y posteriormente con la Ley Federal de Protección Ambiental (1982), caracterizada por un enfoque higienista o sanitario a través de la Secretaría de Salubridad y Asistencia (SSA) y posteriormente con un enfoque urbano a través de la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE). En la tercera, correspondiente al periodo (1984-1994) con un enfoque social a través de la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL) incorporándose hacia el final del periodo un enfoque de tipo ecosistémico a través de la Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP). En la cuarta etapa (1995-2000) el enfoque de la política ambiental fue integrador incluyendo el concepto del DS en el Artículo 4<sup>o</sup> de la Constitución y en la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección del Ambiente, además de la evolución en la gestión de la SEMARNAP con una orientación hacia la protección de los recursos

naturales. La quinta etapa (2000 a la fecha) se caracteriza por la transversalidad, lo que implica la comprensión de la interdependencia de los temas ambientales, sociales y económicos; mayor complejidad y requerimiento de más información; el análisis y la toma de decisiones involucra a varias entidades gubernamentales. Por otra parte, desde la década de los 70's a la fecha se han modificado diversos artículos de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, para incorporar diversos aspectos del DS: a) reforma al Artículo 25, señalando que las actividades económicas que hicieran uso de los recursos naturales debían cuidar su conservación, b) Artículo 27 incorporando la obligación del Estado a dictar medidas para mantener el equilibrio ecológico, c) Artículo 73 facultando al Congreso a expedir leyes de orden ambiental, y más recientemente d) Artículo 4 adicionando un párrafo en el que establece que toda persona tiene derecho a un medio adecuado para su desarrollo y bienestar; y que corresponde al Estado la rectoría del desarrollo nacional para garantizar que éste sea integral y sustentable.

Con relación a la evolución internacional de la política pública ambiental en particular en materia de evaluación de impacto ambiental, José Manuel Echavarren del Centro de Estudios Andaluces, aporta una síntesis del desarrollo en el tema.

La Evaluación de Impacto Ambiental tiene su origen en Estados Unidos, donde se recoge la obligatoriedad de su aplicación en la National Environmental Protection Act (NEPA) en 1969, a resultas de la presión de la opinión pública, muy sensibilizada por las cuestiones medioambientales. A partir de la experiencia estadounidense, las Evaluaciones de Impacto Ambiental van a ir siendo adoptadas por más países en las décadas de los años setenta y ochenta (en la Unión Europea se adopta en 1988), al igual que por instituciones supranacionales como el Programa de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente (PNUMA), la Organización Mundial de la Salud, la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE), o el Banco Mundial. (Echavarren, 2007)

Tabla 6.1 Principales aspectos legales y de gestión de la política ambiental en México

<b>Periodo de Gestión Ambiental</b>	<b>Aspectos legales de la política ambiental en México</b>	<b>Aspectos de gestión de la política ambiental en México</b>
<b>1917-1971</b> <b>Conservación de los recursos naturales a partir de criterios productivistas</b>	Ley Forestal (1926, 1942, 1947 y 1960) Ley sobre irrigación de Aguas Federales (1926) Ley de Aguas propiedad de la Nación (1928) Ley de Aguas de Propiedad Nacional (1934) Ley de Conservación de Suelo y Agua (1946) Ley de Riesgos (1946) Ley Federal de Ingeniería Sanitaria (1947) Ley Federal de Caza (1951) Ley Reglamentaria del Párrafo Quinto del Artículo 27 Constitucional en materia de Aguas del Subsuelo (1956)	Posterior a 1917 y hasta el inicio de los años 70's del siglo pasado se establecieron políticas de conservación de los recursos, siempre con el criterio de aprovechamiento de ellos

<p><b>1970-1984</b></p> <p><b>Prevención de la contaminación ambiental con un enfoque hacia la salud pública. Posteriormente el enfoque es de tipo urbano</b></p>	<p>Ley Federal para Prevenir y Controlar la Contaminación Ambiental en México (1971)</p> <p>Ley Federal de Aguas (1972)</p> <p>Ley Federal de Protección Ambiental (1982) (incluye Estudios de Impacto Ambiental, Reservas Ecológicas, Ordenamiento Ecológico y Planeación Urbana)</p> <p>Reforma al artículo 25 de la Constitución, señalando que las actividades económicas que hicieran uso de los recursos naturales debían cuidar su conservación (1983)</p> <p>Firma del Convenio para la Protección y Mejoramiento del Ambiente en la Zona Transfronteriza entre México y Estados Unidos (1983)</p> <p>Artículo primero de La Ley Federal de Protección Ambiental que incorpora la responsabilidad del Estado para generar normas de protección al medio ambiente (1984)</p>	<p>La prevención de la contaminación se establece en este periodo con un enfoque hacia la protección de la salud humana y hacia el desarrollo urbano</p> <p>Subsecretaría de Mejoramiento del Ambiente perteneciente a la Secretaría de Salubridad y Asistencia (1972-1976)</p> <p>Subsecretaría de Ecología perteneciente a la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE) (a partir de 1983)</p>
<p><b>1984-1994</b></p> <p><b>Se inicia un enfoque de tipo ecosistémico</b></p> <p><b>Se incorpora el tema social en la protección ambiental</b></p>	<p>Ley Forestal (1986)</p> <p>Modificaciones a la Constitución (1987)</p> <p>Artículo 27. Incorpora la obligación del Estado a dictar medidas para mantener el equilibrio ecológico</p> <p>Artículo 73. Facultad al Congreso a expedir leyes de orden ambiental, y en el caso de la Asamblea de Representantes del Distrito Federal a legislar en materia ambiental</p> <p>Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) (1988)</p> <p>Se incorporan temas como: áreas naturales protegidas; control de la contaminación de la atmósfera, del suelo y del agua; control de materiales y residuos peligrosos; clasificación de las fuentes de contaminación y sanciones, el sistema de denuncia popular a la contaminación, la obligación de realizar estudios de impacto ambiental para cierto tipo de proyectos y el registro de consultores ambientales. Se tienen los primeros reglamentos de la LGEEPA sobre: evaluación de impacto ambiental, residuos peligrosos y de transporte terrestre de los mismos, contaminación atmosférica y contaminación por vehículos en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, ZMCM. Se publican Normas Técnicas Ecológicas: 21 para contaminación del agua, 3 para la atmósfera y 2 para residuos peligrosos</p> <p>México ratifica el protocolo de Montreal para la protección de la capa de ozono</p> <p>México firma el Protocolo de Helsinki, relativo a emisiones de azufre y sus efectos transfronterizos</p> <p>México firma el Protocolo de Sofía relativo a óxidos de nitrógeno y efectos transfronterizos (1988)</p> <p>Firma de la Agenda 21, el Convenio sobre Biodiversidad y la Convención sobre Cambio Climático, dentro de la Cumbre de Río (1992)</p>	<p>Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL)</p> <p>Plan Nacional de Desarrollo (1983-1988) (Incluye el tema ecológico como factor explícito en el desarrollo social y económico del país y estrategias para el uso adecuado de los recursos naturales)</p> <p>Se especifica el campo de gestión gubernamental en sus tres niveles de gobierno: federal, estatal y municipal.</p> <p>Creación de organismos gestores de la política ambiental: Instituto Nacional de Ecología (INE), actualmente Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) y Procuraduría Federal de protección al ambiente (PROFEPA) (1992)</p> <p>Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP) (1994)</p>

<p><b>1995-2000</b></p> <p><b>Se inicia un enfoque integrador de la gestión ambiental, incorporando de manera muy significativa el DS</b></p>	<p>Reforma a la LGEEPA (1996) (Incluye el concepto de desarrollo sustentable)</p> <p>Ley General de Vida Silvestre (1996)</p> <p>Reforma el artículo 4 de la Constitución (1998) (se adiciona “toda persona tiene derecho a un medio adecuado para su desarrollo y bienestar” y “corresponde al Estado la rectoría del desarrollo nacional para garantizar que éste sea integral y sustentable)</p>	<p>Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP)</p>
<p><b>2000-</b></p> <p><b>Se inicia el enfoque de la transversalidad, lo que implica la comprensión de la interdependencia de los temas ambientales, sociales y económicos</b></p>	<p>Ley Federal de Derechos (2001) (Cobro por el uso, usufructo y explotación de las áreas naturales protegidas)</p> <p>Ley de Desarrollo Social Sustentable (2001)</p> <p>Ley de Desarrollo Forestal Sustentable (2003)</p> <p>Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (2003)</p> <p>Ley de Aguas Nacionales (2004) modificaciones</p> <p>Ley de Bioseguridad de Organismos Genéticamente Modificados (2005)</p> <p>Ley de Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar (2005)</p> <p>Ley de Productos Orgánicos (2006)</p>	<p>Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) (2001)</p>

Elaboración propia a partir de (Micheli, 2002) y (López, 2007)

## 6.1 Legislación aplicable en materia de impacto ambiental

Esta sección trata sobre la legislación nacional en materia de impacto ambiental, la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) en la sección V trata sobre la evaluación del impacto ambiental (EIA) estableciendo en su Artículo 28 que: la EIA es el procedimiento a través del cual la Secretaría establece las condiciones a que se sujetará la realización de obras y actividades que puedan causar desequilibrio ecológico o rebasar los límites y condiciones establecidos en las disposiciones aplicables para proteger el ambiente y preservar y restaurar los ecosistemas, a fin de evitar o reducir al mínimo sus efectos negativos sobre el medio ambiente. Para ello, en los casos en que determine el Reglamento que al efecto se expida, quienes pretendan llevar a cabo alguna de las obras o actividades listadas en el mismo artículo, requerirán previamente la autorización en materia de impacto ambiental de la SEMARNAT.

En México desde 1988 se estableció como obligatorio la realización de la EIA para las actividades del Artículo 28 de la LGEEPA. La EIA es un instrumento de la política pública ambiental, es un proceso que busca identificar, predecir, evaluar y comunicar el impacto ambiental, utilizando las ciencias exactas, naturales y sociales, como parte de un proceso administrativo y jurídico.

### 6.1.1 Artículos constitucionales relativos a la preservación y restauración del equilibrio ecológico

Conviene recordar que la LGEEPA es reglamentaria de los artículos 4, 27, 73, 115 y 122 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, extractos del contenido relativo a preservación y restauración del equilibrio ecológico, así como a la protección al ambiente, se resumen en la tabla 6.2.

Tabla 6.2 Artículos de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos relacionados con la preservación, restauración del equilibrio ecológico, así como la protección del ambiente.

Artículo Constitucional	Extracto
Artículo 4	<p data-bbox="448 527 605 552">Párrafo (quinto)</p> <p data-bbox="448 590 1395 678">Toda persona tiene derecho a un medio ambiente sano para su desarrollo y bienestar. El Estado garantizará el respeto a este derecho. El daño y deterioro ambiental generará responsabilidad para quien lo provoque en términos de lo dispuesto por la ley.</p> <p data-bbox="448 709 594 735">Párrafo (sexto)</p> <p data-bbox="448 772 1395 919">Toda persona tiene derecho al acceso, disposición y saneamiento de agua para consumo personal y doméstico en forma suficiente, salubre, aceptable y asequible. El Estado garantizará este derecho y la ley definirá las bases, apoyos y modalidades para el acceso y uso equitativo y sustentable de los recursos hídricos, estableciendo la participación de la Federación, las entidades federativas y los municipios, así como la participación de la ciudadanía para la consecución de dichos fines.</p>
Artículo 27	<p data-bbox="448 951 621 976">Párrafo (primero)</p> <p data-bbox="448 1014 1395 1102">La propiedad de las tierras y aguas comprendidas dentro de los límites del territorio nacional corresponde originariamente a la Nación, la cual ha tenido y tiene el derecho de transmitir el dominio de ellas a los particulares, constituyendo la propiedad privada.</p> <p data-bbox="448 1134 610 1159">Párrafo (tercero)</p> <p data-bbox="448 1197 1395 1465">La nación tendrá en todo tiempo el derecho de imponer a la propiedad privada las modalidades que dicte el interés público, así como el de regular, en beneficio social, el aprovechamiento de los elementos naturales susceptibles de apropiación, con objeto de hacer una distribución equitativa de la riqueza pública, cuidar de su conservación, lograr el desarrollo equilibrado del país y el mejoramiento de las condiciones de vida de la población rural y urbana. En consecuencia, se dictarán las medidas necesarias para ordenar los asentamientos humanos y establecer adecuadas provisiones, usos, reservas y destinos de tierras, aguas y bosques, a efecto de ejecutar obras públicas y de planear y regular la fundación, conservación, mejoramiento y crecimiento de los centros de población; para preservar y restaurar el equilibrio ecológico; ...</p> <p data-bbox="448 1497 605 1522">Párrafo (quinto)</p> <p data-bbox="448 1560 1395 1913">Son propiedad de la Nación las aguas de los mares territoriales en la extensión y términos que fije el Derecho Internacional; las aguas marinas interiores; las de las lagunas y esteros que se comuniquen permanente o intermitentemente con el mar; las de los lagos interiores de formación natural que estén ligados directamente a corrientes constantes; las de los ríos y sus afluentes directos o indirectos, desde el punto del cauce en que se inicien las primeras aguas permanentes, intermitentes o torrenciales, hasta su desembocadura en el mar, lagos, lagunas o esteros de propiedad nacional; las de las corrientes constantes o intermitentes y sus afluentes directos o indirectos, cuando el cauce de aquéllas en toda su extensión o en parte de ellas, sirva de límite al territorio nacional o a dos entidades federativas, o cuando pase de una entidad federativa a otra o cruce la línea divisoria de la República; la de los lagos, lagunas o esteros cuyos vasos, zonas o riberas, estén cruzadas por líneas divisorias de dos o más entidades o entre la República y un país vecino, o cuando el límite de las riberas sirva de lindero entre dos entidades federativas o a la República con</p>

<b>Artículo Constitucional</b>	<b>Extracto</b>
	<p>un país vecino; las de los manantiales que broten en las playas, zonas marítimas, cauces, vasos o riberas de los lagos, lagunas o esteros de propiedad nacional, y las que se extraigan de las minas; y los cauces, lechos o riberas de los lagos y corrientes interiores en la extensión que fija la ley. Las aguas del subsuelo pueden ser libremente alumbradas mediante obras artificiales y apropiarse por el dueño del terreno, pero cuando lo exija el interés público o se afecten otros aprovechamientos; el Ejecutivo Federal podrá reglamentar su extracción y utilización y aún establecer zonas vedadas, al igual que para las demás aguas de propiedad nacional. Cualesquiera otras aguas no incluidas en la enumeración anterior, se considerarán como parte integrante de la propiedad de los terrenos por los que corran o en los que se encuentren sus depósitos, pero si se localizaren en dos o más predios, el aprovechamiento de estas aguas se considerará de utilidad pública, y quedará sujeto a las disposiciones que dicten los Estados.</p> <p>Párrafo (sexto)</p> <p>En los casos a que se refieren los dos párrafos anteriores, el dominio de la Nación es inalienable e imprescriptible y la explotación, el uso o el aprovechamiento de los recursos de que se trata, por los particulares o por sociedades constituidas conforme a las leyes mexicanas, no podrá realizarse sino mediante concesiones, otorgadas por el Ejecutivo Federal, de acuerdo con las reglas y condiciones que establezcan las leyes. ...</p>
<b>Artículo 73</b>	<p>El Congreso tiene facultad: ...</p> <p>XVII. Para dictar leyes sobre vías generales de comunicación, y sobre postas y correos, para expedir leyes sobre el uso y aprovechamiento de las aguas de jurisdicción federal.</p> <p>...</p> <p>XXIX-G. Para expedir leyes que establezcan la concurrencia del Gobierno Federal, de los gobiernos de los Estados y de los municipios, en el ámbito de sus respectivas competencias, en materia de protección al ambiente y de preservación y restauración del equilibrio ecológico.</p>
<b>Artículo 115</b>	<p>Los Estados adoptarán, para su régimen interior, la forma de gobierno republicano, representativo, popular, teniendo como base de su división territorial y de su organización política y administrativa el Municipio Libre, conforme a las bases siguientes:</p> <p>...</p> <p>III. Los Municipios tendrán a su cargo las funciones y servicios públicos siguientes:</p> <p>a) Agua potable, drenaje, alcantarillado, tratamiento y disposición de sus aguas residuales;</p>
<b>Artículo 122</b>	<p>Definida por el artículo 44 de este ordenamiento la naturaleza jurídica del Distrito Federal, su gobierno está a cargo de los Poderes Federales y de los órganos Ejecutivo, Legislativo y Judicial de carácter local, en los términos de este artículo.</p> <p>...</p> <p>La distribución de competencias entre los Poderes de la Unión y las autoridades locales del Distrito Federal se sujetará a las siguientes disposiciones:</p> <p>...</p> <p>G. Para la eficaz coordinación de las distintas jurisdicciones locales y municipales entre sí, y de éstas con la federación y el Distrito Federal en la planeación y ejecución de acciones en las zonas conurbadas limítrofes con el Distrito Federal, de acuerdo con el artículo 115, fracción VI de esta Constitución, en materia de asentamientos humanos; protección al ambiente; preservación y restauración del equilibrio ecológico; transporte, agua potable y drenaje; recolección, tratamiento y disposición de desechos sólidos y seguridad pública, sus respectivos gobiernos podrán suscribir</p>



Artículo Constitucional	Extracto
	<p>convenios para la creación de comisiones metropolitanas en las que concurren y participan con apego a sus leyes.</p> <p>Las comisiones serán constituidas por acuerdo conjunto de los participantes. En el instrumento de creación se determinará la forma de integración, estructura y funciones.</p> <p>A través de las comisiones se establecerán:</p> <p>a) Las bases para la celebración de convenios, en el seno de las comisiones, conforme a las cuales se acuerden los ámbitos territoriales y de funciones respecto a la ejecución y operación de obras, prestación de servicios públicos o realización de acciones en las materias indicadas en el primer párrafo de este apartado;</p> <p>b) Las bases para establecer, coordinadamente por las partes integrantes de las comisiones, las funciones específicas en las materias referidas, así como para la aportación común de recursos materiales, humanos y financieros necesarios para su operación; y</p> <p>c) Las demás reglas para la regulación conjunta y coordinada del desarrollo de las zonas conurbadas, prestación de servicios y realización de acciones que acuerden los integrantes de las comisiones.</p>

Fuente: Basado en (Cámara de diputados, s.f.)

## 6.1.2 Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente

La LGEEPA fue publicada en el Diario Oficial de la Federación (DOF) del 28 de enero de 1988, con última reforma publicada el 24 de enero de 2017. Con base en su Artículo 1º sus disposiciones son de orden público e interés social y tienen por objeto propiciar el desarrollo sustentable y establecer las bases para:

- I. Garantizar el derecho de toda persona a vivir en un medio ambiente sano para su desarrollo, salud y bienestar;
- II. Definir los principios de la política ambiental y los instrumentos para su aplicación;
- III. La preservación, la restauración y el mejoramiento del ambiente;
- IV. La preservación y protección de la biodiversidad, así como el establecimiento y administración de las áreas naturales protegidas;
- V. El aprovechamiento sustentable, la preservación y, en su caso, la restauración del suelo, el agua y los demás recursos naturales, de manera que sean compatibles la obtención de beneficios económicos y las actividades de la sociedad con la preservación de los ecosistemas;
- VI. La prevención y el control de la contaminación del aire, agua y suelo;

VII. Garantizar la participación corresponsable de las personas, en forma individual o colectiva, en la preservación y restauración del equilibrio ecológico y la protección al ambiente;

VIII. El ejercicio de las atribuciones que en materia ambiental corresponde a la Federación, los Estados, el Distrito Federal y los Municipios, bajo el principio de concurrencia previsto en el artículo 73 fracción XXIX - G de la Constitución;

IX. El establecimiento de los mecanismos de coordinación, inducción y concertación entre autoridades, entre éstas y los sectores social y privado, así como con personas y grupos sociales, en materia ambiental, y

X. El establecimiento de medidas de control y de seguridad para garantizar el cumplimiento y la aplicación de esta Ley y de las disposiciones que de ella se deriven, así como para la imposición de las sanciones administrativas y penales que correspondan.

Para cumplir con su objetivo de propiciar el DS, la LGEEPA incluye instrumentos de la política ambiental, este es el caso de la EIA. Al respecto, el Capítulo III Política Ambiental, incluye en su Artículo 15, apartado IV que quien realice obras o actividades que afecten o puedan afectar el ambiente, está obligado a prevenir, minimizar o reparar los daños que cause, así como a asumir los costos que dicha afectación implique. Precisamente para poder cumplir con esta obligación para la realización de obras o actividades es indispensable llevar a cabo la manifestación de impacto ambiental, que es el documento donde se da a conocer el impacto de la actividad propuesta.

La LGEEPA en su sección V Evaluación del Impacto Ambiental, artículo 28 incluye las obras o actividades que requerirán previamente la autorización en materia de impacto ambiental de la SEMARNAT. Tales actividades incluyen:

I.- Obras hidráulicas, vías generales de comunicación, oleoductos, gasoductos, carboductos y poliductos;

II.- Industria del petróleo, petroquímica, química, siderúrgica, papelera, azucarera, del cemento y eléctrica;

III.- Exploración, explotación y beneficio de minerales y sustancias reservadas a la Federación en los términos de las Leyes Minera y Reglamentaria del Artículo 27 Constitucional en Materia Nuclear;

IV.- Instalaciones de tratamiento, confinamiento o eliminación de residuos peligrosos, así como residuos radiactivos;

V.- Aprovechamientos forestales en selvas tropicales y especies de difícil regeneración;

VI. Se derogó

VII.- Cambios de uso del suelo de áreas forestales, así como en selvas y zonas áridas;

VIII.- Parques industriales donde se prevea la realización de actividades altamente riesgosas;

IX.- Desarrollos inmobiliarios que afecten los ecosistemas costeros;

X.- Obras y actividades en humedales, manglares, lagunas, ríos, lagos y esteros conectados con el mar, así como en sus litorales o zonas federales;

XI. Obras y actividades en áreas naturales protegidas de competencia de la Federación;

XII.- Actividades pesqueras, acuícolas o agropecuarias que puedan poner en peligro la preservación de una o más especies o causar daños a los ecosistemas, y

XIII.- Obras o actividades que correspondan a asuntos de competencia federal, que puedan causar desequilibrios ecológicos graves e irreparables, daños a la salud pública o a los ecosistemas, o rebasar los límites y condiciones establecidos en las disposiciones jurídicas relativas a la preservación del equilibrio ecológico y la protección del ambiente.

Por otra parte, en su Artículo 30 establece que para obtener la autorización a que se refiere el artículo 28 de esta Ley, los interesados deberán presentar a la Secretaría una manifestación de impacto ambiental, la cual deberá contener una descripción de los posibles efectos en el o los ecosistemas que pudieran ser afectados por la obra o actividad de que se trate, así como las medidas preventivas, de mitigación y las demás necesarias para evitar y reducir al mínimo los efectos negativos sobre el ambiente. El Artículo 30 también establece que cuando se trate de actividades consideradas altamente riesgosas en los términos de la LGEEPA, la manifestación deberá incluir el estudio de riesgo correspondiente.

Con relación al cumplimiento del principio del derecho a la información, el Artículo 34 establece que una vez que la Secretaría reciba una manifestación de impacto ambiental e integre el expediente, pondrá ésta a disposición del público, con el fin de que pueda ser consultada por cualquier persona.

Relativo al proceso de evaluación el Artículo 35 establece que para la autorización de las obras y actividades a que se refiere el artículo 28, la Secretaría se sujetará a lo que establezcan los ordenamientos antes señalados, así como los programas de desarrollo urbano y de ordenamiento ecológico del territorio, las declaratorias de áreas naturales protegidas y las demás disposiciones jurídicas que resulten aplicables. Establece además que: una vez evaluada la manifestación de impacto ambiental, la Secretaría emitirá, debidamente fundada y motivada, la resolución correspondiente en la que podrá:

- Autorizar la realización de la obra o actividad de que se trate, en los términos solicitados
- Autorizar de manera condicionada la obra o actividad de que se trate, a la modificación del proyecto o al establecimiento de medidas adicionales de prevención y mitigación, a fin de que se eviten, atenúen o compensen los impactos ambientales adversos susceptibles de ser producidos en la construcción, operación normal y en caso de accidente. Cuando se trate de autorizaciones condicionadas, la Secretaría señalará los requerimientos que deban observarse en la realización de la obra o actividad prevista, o

- Negar la autorización solicitada

Con relación al principio de cautela descrito en el libro de Ingeniería Ambiental - Fundamentos, capítulo 1 en la sección de desarrollo sustentable, el Artículo 35 también establece que la Secretaría podrá exigir el otorgamiento de seguros o garantías respecto del cumplimiento de las condiciones establecidas en la autorización, en aquellos casos expresamente señalados en el reglamento de la presente Ley, cuando durante la realización de las obras puedan producirse daños graves a los ecosistemas.

La LGEEPA establece en su Artículo 35 bis 1 que las personas que presten servicios de impacto ambiental serán responsables ante la Secretaría de los informes preventivos, manifestaciones de impacto ambiental y estudios de riesgo que elaboren, quienes declararán bajo protesta de decir verdad que en ellos se incorporan las mejores técnicas y metodologías existentes, así como la información y medidas de prevención y mitigación más efectivas. Además, se establece la posibilidad de que las instituciones de investigación, colegios o asociaciones profesionales puedan elaborar los estudios de impacto ambiental, en este caso la responsabilidad respecto del contenido del documento corresponderá a quien lo suscriba. Aunque no se establece un perfil para las empresas y profesionales de consultoría, es indispensable una alta capacitación en términos de conocimiento, manejo, generación e interpretación de información, además de las herramientas metodológicas.

### 6.1.3 Otras leyes relacionadas

En el desarrollo de la EIA las empresas de consultoría junto con el promovente deberán considerar una serie de ordenamientos jurídicos que deberán cumplirse y que tienen relación con el tipo de proyecto, estos permitirán apoyar el análisis y la evaluación; además permitirán definir las medidas de control y atenuación de los impactos adversos.

En todo lo no previsto en la LGEEPA, se aplicarán las disposiciones contenidas en otras leyes relacionadas con las materias que regula este ordenamiento. Las leyes federales que pueden tener vinculación con la EIA se presentan en la tabla 6.3.

Tabla 6.3 Leyes federales que pueden tener vinculación con la EIA

Leyes Federales	Fecha de publicación en el Diario Oficial de la Federación
Ley Federal de Responsabilidad Ambiental	7 de junio de 2013
Ley General de Pesca y Acuicultura Sustentables	24 de julio de 2007, última reforma publicada el 24 de abril de 2018
Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable	5 de junio de 2018
Ley General de Vida Silvestre	3 de julio de 2000, última reforma publicada el 19 de enero de 2018

<b>Ley General de Cambio Climático</b>	6 de junio de 2012, última reforma publicada el 13 de julio de 2018
<b>Ley General de Bienes Nacionales</b>	20 de mayo de 2004, última reforma publicada en el DOF el 19 de enero de 2018
<b>Ley de Planeación</b>	5 de enero de 1983, última reforma publicada en el DOF el 16 de febrero de 2018
<b>Ley de Obras Públicas y Servicios Relacionados con las mismas</b>	4 de enero del 2000, última reforma publicada en el DOF el 13 de enero del 2016
<b>Ley de Hidrocarburos</b>	11 de agosto de 2014, última reforma 15 de noviembre de 2016
<b>Ley de Aguas Nacionales</b>	1 de diciembre de 1992, última reforma publicada en el DOF el 24 de marzo de 2016
<b>Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos</b>	8 de octubre de 2003, última reforma publicada en el DOF el 19 de enero 2018
<b>Ley de Puertos</b>	19 de julio de 1993, última reforma publicada en el DOF el 19 de diciembre de 2016
<b>Ley Minera</b>	26 de junio de 1992, última reforma publicada el 11 de agosto de 2014
<b>Ley General de Asentamientos Humanos</b>	21 de julio de 1993, última reforma publicada el 24 de enero de 2014
<b>Ley de Vertimientos en las Zonas Marinas Mexicanas</b>	17 de enero de 2014
<b>Ley de la Industria Eléctrica</b>	11 de agosto de 2014
<b>Ley de la Agencia Nacional de Seguridad Industrial y de Protección al Medio Ambiente del Sector Hidrocarburos</b>	11 de agosto de 2014
<b>Ley de Energía Geotérmica</b>	11 de agosto de 2014
<b>Ley de Desarrollo Rural Sustentable</b>	7 de diciembre de 2001, última reforma publicada el 20 de junio de 2018
<b>Ley Federal de Sanidad Vegetal</b>	5 de enero de 1994, última reforma publicada el 26 de diciembre de 2017
<b>Ley Federal del Mar</b>	8 de enero de 1986

## 6.1.4 Reglamentos de la LGEEPA

La LGEEPA tiene varios Reglamentos, uno de ellos en materia de Evaluación de Impacto Ambiental, publicado en el DOF el 30 de mayo de 2000, última reforma publicada en el DOF 31 de octubre del 2014. Además de este reglamento específico, se tienen los citados en la tabla 6.4.

Tabla 6.4 Reglamentos de la LGEEPA

Reglamentos en materia de	Fecha de publicación en el Diario Oficial de la Federación
Ordenamiento Ecológico	8 de agosto de 2003, última reforma publicada en el DOF 31 de octubre del 2014
Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes	3 de junio de 2004, última reforma publicada el 31 de octubre del 2014
Prevención y Control de la Contaminación de la Atmósfera	25 de noviembre de 1988, última reforma publicada 31 de octubre de 2014
Autorregulación y Auditorías Ambientales	29 de abril del 2010, última reforma publicada en el DOF 31 de octubre del 2014
Áreas Naturales Protegidas	3 de noviembre del 2000, última reforma publicada el 21 de mayo del 2014.

## 6.1.5 Reglamento en materia de Evaluación de Impacto Ambiental

Con base en la última reforma publicada en el DOF del 31 de octubre de 2014 del Reglamento en materia de Evaluación de Impacto Ambiental (REIA), el ordenamiento es de observancia general en todo el territorio nacional y en las zonas donde la Nación ejerce su jurisdicción; y tiene por objeto reglamentar la LGEEPA en la materia de EIA a nivel federal.

En su Artículo 2 el REIA establece que el Ejecutivo Federal por conducto de la SEMARNAT tiene la competencia de su aplicación, y se añade la siguiente modificación:

La Secretaría ejercerá las atribuciones contenidas en el presente ordenamiento, incluidas las disposiciones relativas a la inspección, vigilancia y sanción, por conducto de la Agencia Nacional de Seguridad Industrial y de Protección al Medio Ambiente del Sector Hidrocarburos, cuando se trate de las obras, instalaciones o actividades del sector hidrocarburos y, cuando se trate de actividades distintas a dicho sector, la Secretaría ejercerá las atribuciones correspondientes a través de las unidades administrativas que defina su reglamento interior.

Conforme a la legislación ambiental vigente, hay varias actividades para cuya realización debe existir la autorización previa en materia de impacto ambiental. Los análisis y evaluación de impacto ambiental de obras y actividades de competencia federal corresponde efectuarlos a la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) a través de la Dirección General de Impacto y Riesgo Ambiental, así como de las Delegaciones Federales de la SEMARNAT en los Estados y a partir del 2 de marzo de 2015, las obras o actividades del sector hidrocarburos, son competencia de la Agencia Nacional de Seguridad Industrial y de Protección al Medio Ambiente del Sector Hidrocarburos, o también denominada Agencia de Seguridad, Energía y Ambiente (ASEA). (SEMARNAT, Semarnat.gob.mx, 2017)

El REIA detalla las obras o actividades que requieren autorización en materia de impacto ambiental, así como las excepciones. Los proyectos de obras y actividades de competencia federal serán evaluados a través de la presentación de una Manifestación de Impacto Ambiental (MIA), existiendo dos modalidades: la regional y la particular.

La MIA regional, cuando trate de: I. Parques industriales y acuícolas, granjas acuícolas de más de 500 hectáreas, carreteras y vías férreas, proyectos de generación de energía nuclear, presas y, en general, proyectos que alteren las cuencas hidrológicas; II. Un conjunto de obras o actividades que se encuentren incluidas en un plan o programa parcial de desarrollo urbano o de ordenamiento ecológico. III. Un conjunto de proyectos de obras y actividades que pretendan realizarse en una región ecológica determinada, y IV. Proyectos que pretendan desarrollarse en sitios en los que, por su interacción con los diferentes componentes ambientales regionales, se prevean impactos acumulativos, sinérgicos o residuales que pudieran ocasionar la destrucción, el aislamiento o la fragmentación de los ecosistemas. En los demás casos no referidos en la modalidad regional se deberá presentar una MIA modalidad particular. La figura 6.1 muestra el tipo de proyectos que requieren una MIA.

La MIA es un documento elaborado con base en estudios técnicos con el que las personas (físicas o morales) analizan y describen las condiciones ambientales anteriores a la realización del proyecto con la finalidad de identificar y evaluar los impactos potenciales que la construcción y operación de dichas obras o la realización de las actividades podría causar al ambiente y definir y proponer las medidas necesarias para prevenir, mitigar o compensar esas alteraciones.

Cuando se trate de actividades consideradas como altamente riesgosas, deberá incluirse además de la manifestación de impacto ambiental, un estudio de riesgo. En dicho estudio se debe definir: I. Escenarios y medidas preventivas resultantes del análisis de los riesgos ambientales relacionados con el proyecto, II. Descripción de las zonas de protección en torno a las instalaciones, en su caso, y III. Señalamiento de las medidas de seguridad en materia ambiental (REIA, Art. 18).



Orden de Gobierno	Tipos de MIA	Actividades que requieren
Federal	Regional	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Parques Industriales</li> <li>• Parques Acuícolas</li> <li>• Granjas acuícola de más de 500 hectáreas</li> <li>• Carreteras</li> <li>• Vías férreas</li> <li>• Proyectos de generación de energía nuclear</li> <li>• Presas</li> <li>• Proyectos que alteran las cuencas hidrológicas</li> <li>• Planes o programas parciales de desarrollo urbano o de ordenamiento ecológico</li> <li>• Conjunto de proyectos de obras y actividades que pretendan realizarse en una región ecológica determinada</li> <li>• Proyectos que pretendan desarrollarse en sitios en que se prevean impactos acumulativos, sinérgicos o residuales que pudieran ocasionar la destrucción, el aislamiento o la fragmentación de los ecosistemas</li> </ul>
	Particular	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Demás casos, previstos en el artículo 5° del reglamento de la LGEEPA en materia de EIA</li> </ul>
Estatad		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Depende de cada legislación estatal municipal</li> </ul>
Municipal		

Figura 6.1 Tipo de proyectos que requieren una MIA

Fuente: (Semarnat, Contenido de una MIA, s.f.)

Cuando la evaluación implica, además de las obras o actividades que requieren de autorización de impacto ambiental, también el cambio de uso de suelo en terrenos forestales y además requieran de autorización para el aprovechamiento de recursos forestales maderables, se podrá presentar el Trámite Unificado de Cambio de Uso de Suelo Forestal, para lo cual se elaborará el Documento Técnico Unificado (DTU) que integra, para su atención en un sólo trámite la información de la manifestación de impacto y del estudio técnico justificativo que se señala en la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable (LGDFS, Art. 117) y en su Reglamento (Reglamento de la LGDFS, Art. 121).

Se requerirá presentar un informe preventivo y no una MIA, cuando se trate de obras o actividades que se ajusten a alguna de las siguientes situaciones (REIA, Art. 29):

- I.- Existan normas oficiales mexicanas u otras disposiciones que regulen las emisiones, las descargas, el aprovechamiento de recursos naturales y, en general, todos los impactos ambientales relevantes que puedan producir las obras o actividades;
- II.- Las obras o actividades de que se trate estén expresamente previstas por un plan parcial de desarrollo urbano o de ordenamiento ecológico que haya sido evaluado por la Secretaría;
- III.- Se trate de instalaciones ubicadas en parques industriales autorizados.

De acuerdo con el Reglamento Interior de la SEMARNAT, Art. 28 y 40, la SEMARNAT puede evaluar y dictaminar las manifestaciones de impacto ambiental, los informes preventivos y los estudios de riesgo, a través de la Dirección General de Impacto y Riesgo Ambiental, a las

Delegaciones Federales de la SEMARNAT y de la Agencia Nacional de Seguridad Industrial y de Protección al Medio Ambiente del Sector Hidrocarburos.

Respecto del trámite único en materia de impacto ambiental y forestal, establece que corresponde a la Dirección General de Gestión Forestal y de Suelos de SEMARNAT resolver el trámite unificado de cambio de uso de suelo forestal (para las obras o actividades descritas sólo en la fracción VII del artículo 28 de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente y el correspondiente a la autorización de cambio de uso de suelo forestal previsto en el artículo 117 de la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable) cuando los solicitantes sean las dependencias y entidades de la administración pública federal, estatal o municipal, y el trámite unificado de aprovechamiento forestal cuando el aprovechamiento se realice dentro de la circunscripción territorial de la Ciudad de México.

Por su parte, corresponde a la Dirección General de Impacto y Riesgo Ambiental resolver el trámite unificado de cambio de uso de suelo forestal (obras y actividades señaladas en la fracción VII más las descritas en cualquier otra fracción del artículo 28 de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, excepto la prevista en la fracción V de dicho numeral y el trámite de autorización de cambio de uso de suelo forestal a que se refiere el artículo 117 de la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable), cuando los solicitantes sean las dependencias y entidades de la administración pública federal, estatal o municipal.

Asimismo, corresponde a las Delegaciones Federales de la SEMARNAT resolver el trámite unificado de cambio de uso de suelo forestal, en sus modalidades A y B, cuando los solicitantes sean particulares, y el trámite unificado de aprovechamiento forestal, cuando el aprovechamiento se realice dentro de su circunscripción territorial.

Una vez autorizados los proyectos de obras o actividades, la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente debe verificar el cumplimiento de los términos y condicionantes establecidos. El universo de inspección se compone de: estudios y autorizaciones que son hechos del conocimiento de la Procuraduría por parte de la Dirección General de Impacto y Riesgo Ambiental; denuncias de la ciudadanía presentadas por el daño ambiental que pueden causar obras o actividades específicas; proyectos en construcción o en operación que se detectan durante las acciones de inspección sistemática de la Procuraduría.



### **Actividad 6.1**

#### **Vinculación con los instrumentos de planeación ambiental**

**A partir de una búsqueda en la web, se solicita lo siguiente: investigar sobre los instrumentos de planeación: UGA, UAB, AICA's, RHP, y acuíferos y disponibilidad citando la fuente consultada. Se solicita además para cada caso explicar su relación con la evaluación del impacto ambiental.**

## **6.2 Metodología general para evaluar el impacto ambiental**

Como se estableció en el Capítulo 1 del Libro 1 de esta obra, cuando el ingeniero identifica las posibles soluciones (alternativas) a un problema que se plantea, las analizará luego empleando herramientas de la planeación, que incluyen los análisis de tipo económico, financiero, técnico y ambiental. Con relación al análisis ambiental, éste se realiza a través de los estudios de impacto ambiental, los que tienen como objetivo identificar, predecir y evaluar los impactos (cambios) positivos y negativos directos e indirectos que se presentarían sobre el ambiente de llevarse a cabo la alternativa de un proyecto; así como la forma de evitar, atenuar o mitigar aquellos que sean negativos. La mejor alternativa será aquella que ofrezca más beneficios y evite o reduzca los impactos negativos.

Por tanto, el estudio de impacto ambiental es una herramienta de la planeación que permite la selección de aquella alternativa de proyecto que ofrezca los mayores beneficios y minimice los impactos negativos. No es un trámite más, ni un obstáculo para llevar a cabo los proyectos, es un instrumento de la planeación que permite seleccionar la o las mejores alternativas, y es, por tanto, esencial para la toma de decisiones.

Recuérdese que el ambiente es todo lo que nos rodea, de acuerdo con la LGEEPA es el conjunto de elementos naturales y artificiales inducidos por el hombre que hacen posible la existencia y desarrollo de los seres humanos y demás organismos vivos que interactúan en un espacio y tiempo determinados. Del concepto anterior, puede concluirse lo siguiente:

a) El ambiente está constituido por elementos que interactúan en el tiempo y el espacio, por lo que resulta complejo identificar todas las interacciones de los elementos que lo constituyen, además de determinar de qué manera se podrían modificar esas interacciones en un análisis espaciotemporal debido a las acciones del futuro proyecto. Esto requiere, por ejemplo, del uso de modelos conceptuales, matemáticos o de simulación, para realizar la predicción de la magnitud del impacto, lo que desde luego supone, un enorme reto ya que el sistema en estudio es extraordinariamente complejo porque incluye múltiples variables interrelacionadas entre sí, y enmarcadas en ámbitos del conocimiento diversos. Aun cuando se tenga la participación formal de expertos en diversos temas, siempre habrá un cierto grado de incertidumbre sobre lo que ocurrirá, es aquí donde se aplica el principio de cautela. Para contar con información que sustente lo pronosticado por los expertos y la aplicación de los modelos, se requiere dar seguimiento a los proyectos, lo que adicionalmente permitirá adoptar medidas de control en el caso de que se presenten perjuicios no previstos.

b) Por otra parte, dado que los objetivos de la EIA son la identificación, predicción y evaluación de los impactos en el ambiente, y al incluir éste último elementos naturales e inducidos por el hombre, se requiere la participación de un equipo multi e interdisciplinario que garantice el estudio de los factores bióticos (flora y fauna) y abióticos (agua, suelo, aire) y de los factores sociales (población, cultura, educación, vivienda, salud, entre otros) y económicos (nivel de ingreso, empleo, actividades económicas, uso del suelo, entre otras), figura 6.2.

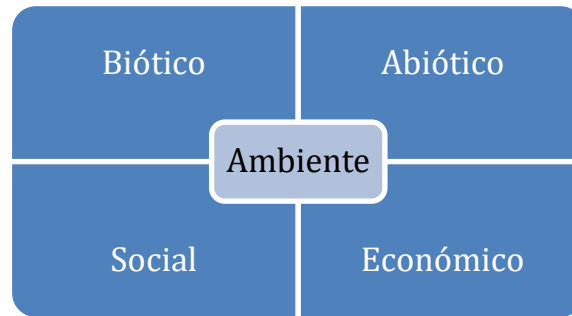


Figura 6.2 Concepto de ambiente

La metodología para la evaluación del impacto ambiental consiste en aplicar un proceso secuencial constituido por las etapas que se describen más adelante y que se muestran en la figura 6.3.

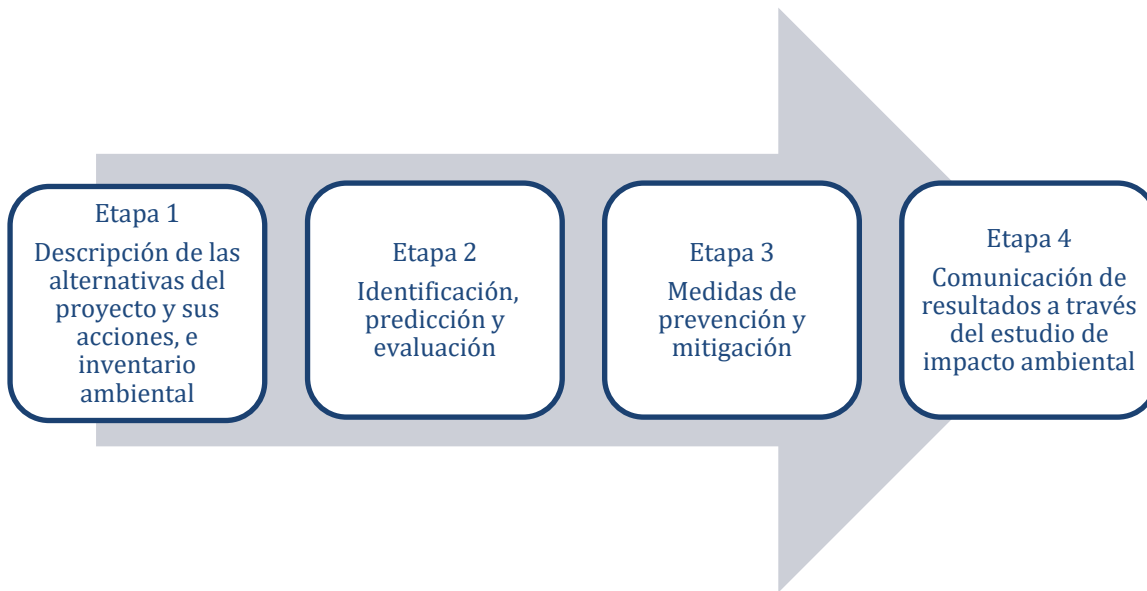


Figura 6.3 Metodología para la evaluación del impacto ambiental

### **6.2.1 Etapa 1. Descripción de las alternativas del proyecto y sus acciones, e inventario ambiental**

#### **Descripción de las alternativas del proyecto y sus acciones**

La intención de esta actividad es detallar las fases del proyecto desde una perspectiva ambiental, es decir, enfatizando aquellas acciones que puedan generar impacto ambiental. Las descripciones de las acciones del proyecto deberán incluirse de acuerdo con sus fases, que son las que se refieren al ciclo de vida de este, desde su concepción hasta el término de su vida útil. Estas fases incluyen desde la planeación, el diseño, preparación del sitio, la construcción, la operación y el mantenimiento, y el término de la vida útil y como consecuencia el abandono del proyecto.

## **Inventario ambiental**

El inventario ambiental es la descripción actual del ambiente que incluye los factores: bióticos, abióticos, sociales y económicos; y de los procesos que determinan su condición actual, con el propósito de poder saber cómo evolucionaría de llevarse a cabo el proyecto, es decir cómo podría verse modificado. Esta descripción tiene claramente el enfoque de conocer a detalle aquellos factores ambientales que previsiblemente serán afectados por el proyecto pero que, además, sean relevantes desde algún punto de vista, tales como: científico, de productividad, cultural y estético. La información podrá obtenerse de fuentes bibliográficas, de cartografía y de estudios de campo, por ejemplo, muestreos de flora y fauna, encuestas y otros. Para integrar el inventario ambiental, deberá contarse con un equipo multidisciplinario que aporte su conocimiento y experiencia para entender las características e interacciones de los factores ambientales, poder reconocer aquellos que son relevantes y cuáles podrían afectarse por el proyecto, y en una etapa posterior de la evaluación participar en la predicción de la magnitud de los impactos.

## **6.2.2 Etapa 2. Identificación, predicción y valoración de los impactos**

### **Identificación**

La identificación es una actividad que se sustenta en el conocimiento de las acciones del proyecto y de las características de los factores ambientales, para saber qué actividades causarán impactos benéficos o adversos a los elementos del ambiente, en otras palabras, es el cruce de las actividades con los factores ambientales.

### **Predicción**

La predicción es una actividad donde se busca determinar la naturaleza y magnitud de los impactos, esta labor puede cumplirse aplicando como se explicó en la introducción de este apartado algún tipo de modelo, el conocimiento, y la experiencia profesional en casos similares. La predicción puede concretarse a partir de indicadores ambientales, los cuales serán definidos más adelante.

### **Valoración**

La valoración del cambio en los indicadores ambientales incluye determinar si el cambio se considera positivo o negativo y en qué medida. Se refiere a calificar la importancia del cambio, lo cual está relacionado con sus consecuencias. Al hacerlo, se estará en posibilidad de seleccionar alguna otra alternativa de proyecto, de modificar si es posible la actividad que causa los impactos adversos o de proponer alguna medida de mitigación.

### 6.2.3 Etapa 3. Medidas de prevención y mitigación

Habiendo identificado y valorado los impactos ambientales adversos significativos, deberán proponerse las medidas de prevención y mitigación. Las de prevención se refieren a evitar los impactos adversos a través de modificar algunas de las siguientes características:

**Ubicación del proyecto.** Con relación a la ubicación del proyecto, resulta claro que si se considera el ordenamiento ecológico general del territorio nacional (Capítulo 2 del Libro 1, sección 2.6), por ejemplo, se podrá seleccionar el sitio que tenga vocación para el proyecto que pretende realizarse, lo cual evitará impactos ambientales adversos que se presentarían de llevarse a cabo la actividad sin considerar la aptitud territorial. El Recuadro 6.1 resalta la importancia que tiene el Ordenamiento Ecológico General del Territorio.

<b>Recuadro 6.1</b> <b>Importancia del Ordenamiento Ecológico General del Territorio</b>
Dados los diferentes intereses para el aprovechamiento del territorio, un instrumento clave es el ordenamiento ecológico. El Programa de Ordenamiento Ecológico General del Territorio, publicado en el DOF en 2012, será clave para encaminar nuevos proyectos que impulsen el desarrollo del país y el bienestar social con los menores impactos ambientales posibles. El OEGT se complementa con 60 y 40 ordenamientos locales y regionales decretados, respectivamente, que cubren alrededor del 40% del territorio, por lo que una buena parte de éste aún no cuenta con un instrumento legal que compatibilice las actividades productivas con la conservación de los ecosistemas. Un reto adicional será que los ordenamientos ecológicos incluyan en su elaboración escenarios de cambio climático y estrategias de adaptación.

Fuente: (Semarnat, 2013)

**Tipos de actividades o procesos asociados a la alternativa de proyecto.** Las actividades y características de las actividades de proyecto pueden generar impactos adversos debido a los insumos y procesos, y por tanto podrían evitarse modificando algún insumo o algún proceso.

**Magnitud del proyecto.** El tamaño del proyecto es directamente proporcional a los impactos producidos, por ejemplo, mayor área de ocupación, mayor número de vehículos circulando, mayor número de usuarios, mayor producción, etc., implican aumentar la magnitud de los impactos adversos.

Habrán impactos ambientales adversos que sean inevitables, en esos casos se deberán proponer las medidas de mitigación, estas pueden ser del tipo de: control, compensación y restauración.

**Medidas de control.** Estas medidas se aplican para minimizar el impacto adverso, para ello es común aplicar alguna acción de ingeniería que permita mantener la magnitud del impacto dentro de ámbitos establecidos en las normas. Por ejemplo, el uso de equipos de control de la contaminación del aire.

**Medidas de compensación.** Estas medidas compensan la pérdida de algún factor o servicio ambiental debido a la realización del proyecto a través de reubicar u ofrecer ese mismo elemento en otro sitio; por ejemplo, la reubicación de especies amenazadas o en peligro de extinción de acuerdo con la NOM 59 SEMARNAT 2010 (Capítulo 4 del Libro 1, sección 4.8.2).

**Medidas de restauración.** Estas medidas de mitigación consideran rectificar los impactos adversos a través de la restauración de los recursos afectados a su estado inicial. Restauración es en esencia el extremo de la rehabilitación.

## 6.2.4 Etapa 4. Comunicación de resultados

Con base en el Artículo 3, sección XXI de la LGEEPA, la manifestación de impacto ambiental (MIA) es el documento mediante el cual se da a conocer, con base en estudios, el impacto ambiental, significativo y potencial que generaría una obra o actividad, así como la forma de evitarlo o atenuarlo en el caso de que sea negativo. La EIA da como resultado la MIA que informa a la autoridad sobre el impacto ambiental del proyecto, y adicionalmente es este documento también el que se ofrece al público en general para cumplir con el principio ético del derecho a la información.



### Actividad 6.2

A partir del video “Fase de la delimitación de la EIA” preparado por el Banco Interamericano de Desarrollo, disponible en <https://youtu.be/8-ebx4BfL0Q> y de la sección 6.2 Metodología general para evaluar el impacto ambiental del Capítulo 6 del Libro de Ingeniería Ambiental II, prepara una tabla comparativa en donde se incluya en la primera columna los conceptos similares (aquellos que se incluyen en el libro y en el video), en la segunda columna los que no se incluyen en el libro y en la tercera columna lo que, de acuerdo con tu conocimiento previo y una breve investigación, comentas que se realiza o no en México

## 6.3 Técnicas para estudiar el impacto ambiental y su clasificación

Las técnicas para estudiar el impacto ambiental están encaminadas a identificar, predecir y evaluar los impactos ambientales de los proyectos. Antes de aplicar las técnicas deberá elaborarse primero la descripción del proyecto en evaluación y el inventario ambiental. Posteriormente se elaborará el plan de manejo y el sistema de monitoreo a ser aplicado.

A partir de la década de los 70’s del siglo pasado se han desarrollado una gran variedad de técnicas para ser aplicadas en los estudios de impacto ambiental, las que además se encuentran en evolución, pero ninguna de ellas cumple con los objetivos de la segunda etapa de la metodología de la EIA, esto es; la identificación, predicción y evaluación de los impactos. Por otra parte, las mismas técnicas también deben ser aplicadas en las otras etapas de la EIA que persiguen otros objetivos. La razón de que ninguna de ellas sea adecuada para cualquier proyecto, es porque fueron concebidas para proyectos específicos, con características peculiares y con acceso amplio a información. Es de resaltar que la mayoría de las técnicas fueron creadas en Estados Unidos. En el mundo, los países aplican esas metodologías en mayor o menor medida dependiendo principalmente de su marco normativo (en los diversos países se establecen los aspectos que deben ser analizados y la forma de presentarlos), del tipo y sitio de proyecto, y del acceso a datos. Con relación a los requerimientos del marco normativo en México, el Recuadro 6.2 ejemplifica algunos de ellos, para el caso de la presentación de la MIA modalidad regional.



Del análisis de los factores antes mencionados se concluye que no existe una técnica que sea aplicable a todos los casos, y se resalta la necesidad de contar con diversas técnicas que sean aplicables a la diversidad de proyectos y sus actividades a ser evaluadas, a la diversidad de medios y factores ambientales potencialmente afectados, y a la complejidad de las interacciones entre factores y el entorno; además de su pertinencia en términos de los datos disponibles y de su grado de certidumbre.

### Recuadro 6.2 MIA Regional

Si bien hoy se considera a la EIA como una condición previa a la definición de las características de nuevos proyectos, planes o programas, esto obliga a evitar que en la integración de una Manifestación de Impacto Ambiental (MIA), ésta contenga deficiencias en su integración y particularmente en el análisis de la información compilada, bajo el argumento de que, dado el momento en que se elaboran los estudios, se carece de información de mayor precisión. Es por ello que la autoridad ambiental, ocupada por hacer de la EIA, en el ámbito regional, un instrumento de planeación integral más efectivo y orientado a lograr la prevención, mitigación y compensación de impactos ambientales regionales, sinérgicos y acumulativos, desarrolló esta nueva versión de guía para la integración de la Manifestación del Impacto Ambiental en su modalidad regional la cual, al mismo tiempo, pretende simplificar el proceso.

Es importante señalar que el marco legal especifica dos modalidades para la evaluación ambiental de los proyectos: la particular y la regional. Para la modalidad regional, el alcance de su contenido se concentra en dos rubros de suma importancia, los cuales son:

- 1) La descripción del sistema ambiental regional, el cual puede contener a uno o más ecosistemas y cuyas tendencias de desarrollo y deterioro ambiental es imprescindible analizar y determinar para lograr la identificación y evaluación eficiente del impacto del proyecto sobre dicho sistema, y
- 2) El tipo o la naturaleza de los impactos que se generan, en el sistema ambiental regional y que podrán verse incrementados por el establecimiento del proyecto. En la modalidad regional, la evaluación ambiental de los impactos acumulativos que se desarrollan en el sistema ambiental regional y la forma como el proyecto puede incrementar el nivel de acumulación o residualidad, es uno de los contenidos fundamentales del estudio que se integre a la MIA.

Con base en las consideraciones anteriores y en el contenido que dispone asumir el Artículo 13 del Reglamento de la LGEEPA en materia de Evaluación del Impacto Ambiental, se presenta esta nueva versión de las guías para formular una Manifestación del Impacto Ambiental en su modalidad regional. La guía se formuló con el objetivo de orientar al promovente ó al consultor, hacia la conformación de un documento caracterizado por alcanzar la prospección integrada del medio a través del conocimiento de la estructura y del funcionamiento del sistema ambiental de la región dentro del cual se insertará el proyecto y de la forma como éste incide sobre los distintos factores que lo componen.

Por lo expuesto, el consultor debe considerar conformar y analizar la información que se integre a la MIA de manera armónica, vinculando el contenido de cada capítulo con el resto del documento. Debe asegurarse que el enfoque de la información permita a la autoridad cumplir con lo que le obliga a ésta el artículo 35 de la LGEEPA y en particular su tercer párrafo, por lo que se refiere a la *integralidad del estudio*; así como con lo que dispone el artículo 44 de su Reglamento en materia de Evaluación del Impacto Ambiental en lo relativo a la determinación del respeto a la *integridad funcional de los ecosistemas* y de su *capacidad de carga*.

También es importante considerar en la integración de la MIA-regional la definición que se establece en la fracción XX del artículo 3° de la LGEEPA en relación a lo que es la MIA, se dispone en ese precepto que es “El documento

**Recuadro 6.2  
MIA Regional**

mediante el cual se da a conocer, con base en estudios, el impacto ambiental, significativo y potencial que generaría una obra o actividad, así como la forma de evitarlo o atenuarlo en caso de que sea negativo”.

De la transcripción anterior conviene destacar que, en la integración de la MIA-regional, el consultor debe centrar su atención en identificar, analizar y valorar los *impactos ambientales significativos o relevantes*, después de aplicar un ejercicio de tamizado del conjunto de impactos ambientales identificados, ya que de ese esfuerzo deben derivar las medidas específicas de mitigación cuando dichos impactos son de signo negativo.

La determinación de los factores ambientales a evaluar es la parte básica del trabajo del inventario ambiental, identificado en esta guía en su rubro IV.2.2 como “Caracterización y análisis actual del sistema ambiental regional”. El inventario representa la línea base del estudio y su integración determina todo el desarrollo posterior de la MIA. Este ejercicio, previsto por el artículo 13 del REIA en el capítulo cuarto dentro del rubro de la descripción del sistema ambiental regional, equivale a determinar el estado preoperativo o “estado sin proyecto” del sistema ambiental de la región donde se establecerá el proyecto y su contenido temático se desarrolla de manera indicativa en el capítulo IV de esta guía, sin embargo, debe considerarse que la guía debe prever enunciar un número suficiente de factores ambientales para cumplir con su objetivo de cubrir la orientación a todos los proyectos de cualquier sector de nuestra economía por lo que, para un proyecto en particular, el criterio del evaluador ha de intervenir para identificar y delimitar únicamente a los factores ambientales que sustentarán la integración del diagnóstico ambiental por lo que, necesariamente, no habrán de considerarse la totalidad que se citan en esta guía.

Fuente: (Semarnat, Mía Regional)

### 6.3.1 Clasificación de las técnicas usadas para la evaluación del impacto ambiental

Como se ha establecido en la sección previa, las técnicas disponibles para la realización de la evaluación de impacto ambiental son diversas, pero ninguna por sí sola permitirá lograr los objetivos que se persiguen en todas las etapas de la metodología para la evaluación del impacto ambiental. Entonces, según el objetivo que deba cumplirse, deberá seleccionarse la técnica adecuada para lograrlo. La tabla 6.5 presenta una clasificación de las técnicas disponibles según el propósito o tarea a cumplir.

Tabla 6.5 Clasificación de técnicas disponibles según el objetivo a cumplir

Propósito por cumplir con base en la metodología de la EIA	Técnica para estudiar el IA	Utilidad relativa
Selección de la actuación propuesta según valoración de alternativas	Sobreposición de mapas	Alta
	Participación pública	
	Listados	
Identificación de impactos	Opinión de expertos	Alta
	Diagramas de Redes	Alta
	Matrices	Alta
	Sobreposición de mapas	Alta
	Listados	Medía
	Revisión de casos similares	Medía

Descripción de los impactos	Diagrama de Redes	Alta
	Listados descriptivos y cuestionario	Alta
	Matrices (por etapas del proyecto)	Alta
	Revisión de casos similares	Alta a media
Predicción y evaluación de los impactos	Modelos cualitativos y cuantitativos	Alta
	Opinión de expertos	Alta
	Valoración de impactos	Alta
	Método Delphi	Alta
	Sistema Batelle-Columbus	Alta
	Revisión de casos similares	Media
	Matrices	Media
	Sobreposición de mapas	Media
Propuesta de medidas de mitigación	Opinión de expertos	Alta
	Revisión de casos similares	Alta
	Matrices	Alta
Comunicación de los resultados	Matrices	Alta
	Sobreposición de mapas	Alta
	Listados	Media

Fuente: Elaborado a partir de (Canter, 2002)

### 6.3.2 Listados

Los listados son técnicas que incluyen una relación de los factores del ambiente susceptibles a ser impactados, para el sitio del proyecto. En general se consideran los factores bióticos (flora y fauna) y abióticos (agua, suelo, aire) y los factores sociales (población, cultura, educación, vivienda, salud, entre otros) y económicos (nivel de ingreso, empleo, actividades económicas, uso del suelo, entre otros). Los listados pueden ser de tres tipos: simples, descriptivos y tipo cuestionarios.

#### Simple

Incluyen una relación de factores ambientales en la que únicamente se indica la ocurrencia de un impacto sin indicar la magnitud o cómo deberá interpretarse. Pretende garantizar que ningún factor sea omitido del análisis. También hay listados que pueden incluir las acciones del proyecto y los factores susceptibles de ser impactados. La tabla 6.6 muestra un ejemplo de listado simple desarrollado por el Departamento de Transporte de los Estados Unidos.

Tabla 6.6 Listado simple para proyectos de sistemas de transporte

Factor Ambiental	Planeación y diseño	Construcción	Operación
1. Ruido a) Salud pública b) Uso del suelo		✓	✓
2. Calidad del aire a) Salud pública b) Uso del suelo		✓	✓
3. Calidad del agua a) Aguas subterráneas b) Aguas superficiales c) Salud pública		✓	✓
4. Erosión del suelo a) Económicos b) Contaminación		✓	
5. Ecología a) Flora b) Fauna		✓	✓
6. Economía a) Uso del suelo b) Impuestos c) Empleos d) Vivienda y servicios públicos		✓	✓
6. Sociedad a) Estilo de vida y actividades b) Seguridad c) Aspectos estéticos	✓		✓

Fuente: Modificado de (Vázquez & César, 1994)

## Descriptivos

Proporcionan orientación para una evaluación de los factores ambientales a ser impactados. Por ejemplo, incluyendo datos sobre los elementos afectados, posibles medidas de mitigación y otra información. La tabla 6.7 muestra un ejemplo de listado descriptivo de un proyecto aeroportuario sobre el factor biótico.

Tabla 6.7 Extracto de listado descriptivo para un proyecto aeroportuario sobre el factor biótico

<b>Construcción impacto directo potencial (corto plazo)</b>	<b>Operación impacto directo potencial (largo plazo)</b>	<b>Construcción impacto indirecto potencial (corto plazo)</b>	<b>Operación impacto indirecto potencial (largo plazo)</b>
La destrucción y/o daño de los hábitats y las plantas y animales silvestres en el área ocupada por el aeropuerto y los caminos de acceso	La modificación de drenaje superior y subterráneo puede resultar en cambios en la hábitat terrestre y acuático	La eutrofización por los desechos (orgánicos) de los trabajadores y la escorrentía que puede llevar más materia orgánica	Los impactos negativos a la flora y la fauna por la pérdida de hábitat, caza ilegal, eutrofización.
La destrucción o daño de flora y fauna acuáticos por la mayor sedimentación y contaminación (por la erosión de las excavaciones, desmonte, depósitos de los materiales de construcción, etc.) y la disminución de la calidad del agua	La destrucción o daño de las plantas y animales acuáticos por la contaminación del aeropuerto llevada por la escorrentía		La fragmentación de los hábitats que pueden tener como resultado la disminución de las posibilidades de supervivencia
La destrucción o daño a las especies en peligro de extinción, en estado crítica, o protegidas	Los accidentes entre los aviones y la fauna, especialmente las aves cuando colisionan contra los aviones en pleno vuelo, despegue o aterrizaje, son succionadas por los motores etc. Aunque la mayoría de los accidentes son contra las aves, un pequeño porcentaje de ellos ocurren contra los mamíferos y los reptiles.		La absorción de contaminantes tóxicos puede afectar a la cadena trófica
La destrucción o daño de la única área de reproducción de especies de fauna	La contaminación de la calidad del aire y el polvo provoca enfermedades respiratorias en la fauna		La acidificación de sistemas acuáticos puede causar muerte de la flora y la fauna acuáticas
La interrupción de las rutas de movimiento de la vida silvestre y el ganado por la ruta y los camiones de construcción	La disrupción de la vida silvestre por los impactos de las operaciones del aeropuerto tales como el ruido, la vibración, y la emisión de la luz		La acidificación del agua superficial puede interferir con la asimilación de nutrientes en las plantas

<p>La caza o pesca ilegal por la parte de los trabajadores de construcción</p>	<p>La interrupción de las rutas de migración para la vida silvestre y el ganado y mayores choques contra animales terrestres por los caminos de acceso</p>	<p>La exposición a monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, ozono puede causar necrosis en las hojas</p>
	<p>La introducción de las especies no-nativa que podrían ser llevadas por los aviones</p>	<p>La contaminación de los hábitats y ecosistemas (terrestre y acuático) por el uso de herbicidas (control de plantas) y químicos (control de polvo) en los caminos de acceso</p>
		<p>El aumento de la actividad humana a menudo se asocia con incidentes más frecuentes de incendios</p>

Fuente: Tomado de (Agencia para la Protección del Medioambiente de los Estados Unidos (EPA), 1999)

## Listados tipo cuestionarios

Se trata de un conjunto de preguntas sistemáticas sobre categorías genéricas de factores ambientales. Analizando las respuestas se puede tener una idea cualitativa de la importancia relativa de un cierto impacto, tanto negativo como positivo (Estevan, 1981). Es decir, corresponde a un listado simple, pero en forma de cuestionario, se incluye a continuación como ejemplo un extracto de cuestionario para proyectos de pequeños embalses en Oregón, EUA (tabla 6.8).

Tabla 6.8 Extracto de un listado simple en forma de cuestionario para proyectos de pequeños embalses en Oregón, EUA.

**Instrucciones:** Responda las preguntas siguientes marcando una X en el sitio apropiado, considere la actividad, la construcción, la explotación, así como los impactos indirectos. Use la sección “explicación” para clarificar puntos o añadir información.

### A. MEDIO BIÓTICO NATURAL

1. ¿Podría la actividad propuesta afectar algún factor natural o a un recurso hídrico adyacente o próximo a las áreas de actividad? SI X NO     

Si la respuesta es SI, especifique qué factor natural se afecta:

	Directo	Indirecto	Sinérgico	Corto plazo	Largo plazo	reversible	irreversible	severo	moderado	Insignificante
Hidrología superficial	(X)	( )	( )	( )	(X)	( )	(X)	( )	( )	(X)
Calidad agua sup.	(X)	( )	( )	( )	(X)	( )	(X)	(X)	( )	( )
Suelo/erosión	(X)	( )	( )	( )	(X)	( )	(X)	(X)	( )	( )
Geología	(X)	( )	( )	( )	(X)	( )	(X)	(X)	( )	( )
Clima	(X)	( )	( )	( )	(X)	( )	(X)	(X)	( )	( )

2. ¿Podría afectar la actividad a la vida animal o los peces? SI X NO     

Si la respuesta es SI, especifique qué vida animal o peces se afecta.

Hábitat natural	(X)	( )	( )	( )	(X)	( )	(X)	(X)	( )	( )
Ecología de peces	(X)	( )	( )	( )	(X)	( )	(X)	(X)	(X)	( )

3. ¿Podría afectar la actividad a la vegetación natural? SI X NO     

Si la respuesta es SI, especifique qué vegetación y en que extensión se le afecta.

### B. RIESGOS AMBIENTALES

1. ¿Podría implicar la actividad que se propone el uso, almacenaje, escape o eliminación de alguna sustancia potencialmente peligrosa? SI      NO X

Si la respuesta es SI, especifique qué sustancia y su efecto posible.

2. ¿Podría la actividad propuesta provocar un aumento real o probable de los riesgos ambientales?

SI      NO X

Si la respuesta es SI, especifique qué tipo



3. ¿Podría la actividad propuesta ser susceptible de sufrir riesgos ambientales debido a su situación?

SI \_\_\_ NO \_\_\_ X \_\_\_

Si la respuesta es SI, especifique qué tipo.

#### C. CONSERVACION Y USO DE LOS RECURSOS

1. ¿Podría la actividad propuesta afectar o eliminar tierra adecuada para la producción agraria o maderera?

SI \_\_\_ X \_\_\_ NO \_\_\_

Si la respuesta es SI, especifique hectáreas y clase de suelos que se verían afectados.

2. ¿Podría la actividad propuesta afectar a la pesca comercial o a los recursos de acuicultura o a su producción?

SI \_\_\_ X \_\_\_ NO \_\_\_

Si la respuesta es SI, especifique qué tipo se afecta

3. ¿Podría la actividad propuesta afectar al uso potencial o a la extracción de un recurso mineral o energético indispensable o escaso?

SI \_\_\_ NO \_\_\_ X \_\_\_

#### D. CALIDAD Y CANTIDAD DE AGUA

1. ¿Podría la actividad propuesta afectar a la calidad de los recursos hídricos que se encuentran dentro, adyacentes o cerca del área de actividad?

SI \_\_\_ X \_\_\_ NO \_\_\_

Si la respuesta es SI, especifique qué recursos hídricos se afectan y en qué cantidad diaria aproximada.

2. ¿Podría la actividad propuesta provocar un deterioro de la calidad de alguna zona o cuenca del recurso hídrico?

SI \_\_\_ X \_\_\_ NO \_\_\_

Fuente: Modificado de ( Economic and Social Commission for Asia and the Pacific, ESCAP, 1990) citado por (Canter, 2002)

### 6.3.3 Panel de expertos y método de Delphi

Esta técnica consiste en reunir a un grupo multidisciplinario de expertos que definirán la importancia de la información, la forma de obtener datos faltantes, evaluarán y seleccionarán métodos y modelos para la evaluación de los impactos, y también interpretarán los impactos predichos. Para el caso de evaluación de los impactos, en la ponderación de los factores ambientales, suele establecerse un debate, el cual concluye una vez que se ha llegado a un consenso.

Considerando que en un debate el resultado puede estar orientado en función de la capacidad de persuasión y comunicación de los expertos, se suele utilizar el método Delphi, el cual consiste en que a través de un moderador los expertos conozcan la información necesaria del proyecto y del ambiente para que puedan definir los factores ambientales a ser impactados, y además deberán asignarles una ponderación, justificando por escrito su opinión. El moderador recibe esta información, integra los listados de factores y calcula la media aritmética de las ponderaciones, la cual envía a los expertos junto con las justificaciones de la evaluación, sin que los expertos conozcan el nombre del que emitió el juicio. El método concluye una vez que todos los expertos están de acuerdo en la asignación de las ponderaciones y por supuesto en la justificación.

### 6.3.4 Técnica de Mc Harg. Sistemas de selección geográfica

Desarrollado en 1968 por Mc Harg para la selección del mejor trazo de una carretera, es una técnica de análisis geográfico que puede ser muy útil en la selección del mejor sitio para el desarrollo de un proyecto. Consiste en sobreponer la ubicación del sitio sobre los diversos factores ambientales de una zona para identificar la aptitud del territorio al proyecto y por tanto el impacto ambiental que puede generarse. Actualmente este método desarrollado por Mc Harg tiene un gran potencial de aplicación

ya que puede hacerse un análisis geográfico basado en las características del ambiente a través de la diversa cartografía, incluyendo además, instrumentos de la planeación ambiental como el ordenamiento del territorio nacional, entre otros; todo ello a través de sistemas de información geográfica (SIG). La figura 6.4 muestra la aplicación de esta técnica. De acuerdo con el Centro Nacional de Información Geográfica y Análisis de EUA, un SIG es un sistema de información compuesto por hardware, software y procedimientos para capturar, almacenar, manipular, analizar, modelar y representar datos geo-referenciados, con el objetivo de resolver problemas de gestión y planificación.

Actualmente SEMARNAT ofrece un SIG denominado SIGEIA (Sistema de Información Geográfica de Impacto Ambiental) a través de su portal. El Recuadro 6.3 muestra la información publicada en la web sobre el SIGEIA.

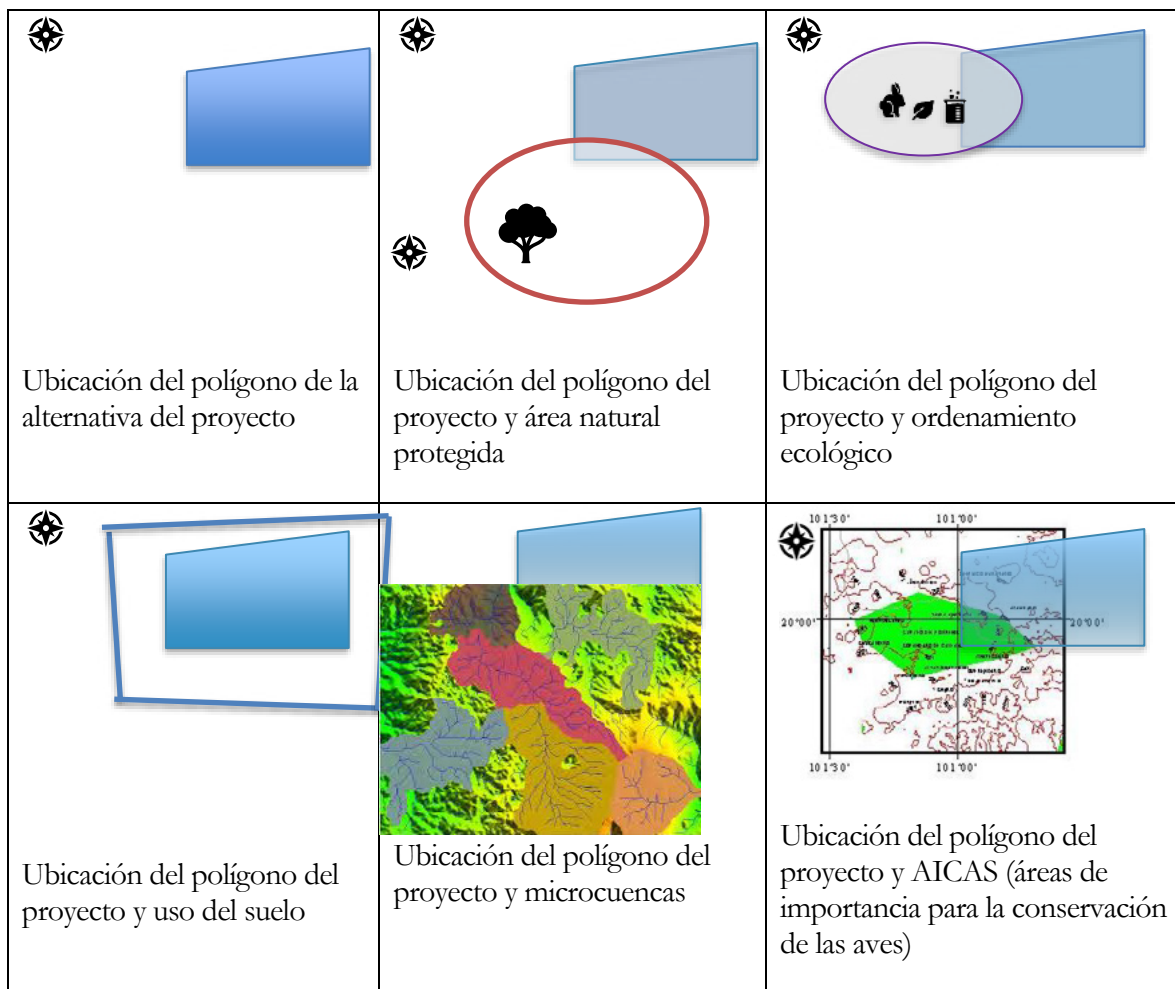


Figura 6.4 Sistema de selección geográfica

**Recuadro 6.3**  
**SIGEIA**

Es una herramienta que ayuda al ciudadano a identificar las características físicas y/o ambientales, así como los diferentes instrumentos jurídicos que le aplican a un espacio dado en donde se pretende construir un proyecto que pueda generar impacto ambiental.

La Subsecretaría de Gestión para la Protección Ambiental con la Dirección General de Impacto y Riesgo Ambiental (DGIRA), desarrollaron un sistema de información geográfica que permitiera apoyar las tareas de evaluación del impacto ambiental a través del análisis espacial de geometrías.

**Objetivo**

Permitir el acceso al público en general (Ciudadanía, promoventes, consultores, ONG´s, Universidades, diferentes niveles de gobierno) al SIGEIA, con el fin de que las y los usuarios puedan tener un panorama de la ubicación de su proyecto dentro del contexto ambiental respecto a los instrumentos de planeación ambiental, proporcionándole información cartográfica y un análisis espacial.

**Beneficios**

- Facilidad para generar el análisis espacial (Cuantificación de la superficie del proyecto que incide en cada uno de los diferentes instrumentos de planeación ambiental).
- Elaboración de diversos mapas de manera fácil y rápida, respecto a la ubicación del proyecto con cada uno de los instrumentos de planeación ambiental.
- Obtención del archivo de la ubicación del proyecto en formato kml (Google Earth®).
- Creación de archivos con las coordenadas geográficas de la ubicación del proyecto.
- Generación de tablas de fácil entendimiento de cada uno de los resultados del análisis espacial.
- Identificación de restricciones o limitaciones para desarrollar su proyecto y que puedan ser causa de una negativa por parte de la autoridad.
- Integración de imágenes de satélite (Google Maps® y Ortofotos del INEGI).
- Opción de diversos métodos para ingresar la ubicación del proyecto (shp, kml, dxf, csv, captura en pantalla de las coordenadas y dibujar en pantalla).
- Corroboración de las coordenadas que las y los promoventes obtiene para su proyecto y que además incluye en los estudios de MIA, obteniendo certidumbre respecto a la correcta ubicación del proyecto.
- Diseño amigable.

Podrás conocer si el sitio donde se desarrollará tu proyecto, sujeto a evaluación de impacto ambiental, se encuentra total o parcialmente dentro de algún área de importancia ambiental, como, por ejemplo:

Áreas Naturales Protegidas (Federales, Estatales y Municipales),

Regiones prioritarias (Terrestres, Hidrológicas y Marinas),

Ordenamientos Ecológicos (Regionales, Locales y Marinos),

Uso del suelo y vegetación, y

Otros (Sitios Ramsar, AICAS, UMAS y manglares)

Además de incluir información adicional como:

Estados,

Municipios,

Microcuencas, y

Suelos

**¿Cómo realizar el análisis espacial en SIGEIA?**

Ubica y captura tu proyecto, con alguno de los siguientes métodos:

- Dibújalo en pantalla,
  - Escribe o adjunta las coordenadas (txt o csv) o
  - Adjunta un archivo con geometrías vectoriales (shp, kml o dxf)
- Genera el Análisis espacial, pulsando el botón con la leyenda: "Sí y quiero generar análisis espacial"
- Guarda y utiliza los resultados:
- Tablas de superficies de incidencia por tema
  - Archivo kml
  - Vista de impresión

Fuente: Tomado de (SEMARNAT, 2016)

### 6.3.5 Modelos

Como se ha establecido, los estudios de impacto ambiental tienen como objetivo identificar, predecir y evaluar los impactos (cambios) positivos y negativos directos e indirectos que se presentarían sobre el ambiente de llevarse a cabo la alternativa de un proyecto; así como la forma de evitar, atenuar o mitigar aquellos que sean negativos. Uno de los aspectos de mayor relevancia en la evaluación del impacto ambiental es precisamente la predicción porque se pretende valorar lo que ocurriría de llevarse a cabo el proyecto, lo que implica estimar, cuantificar, pronosticar o predecir los cambios en los factores del ambiente. Para lograrlo, se dispone principalmente de modelos matemáticos y de extrapolación. En los primeros se requiere de un modelo matemático que ha sido elaborado a partir de ciertas consideraciones y que requiere de ciertos datos; en los segundos se busca, a partir de datos pasados de otros casos similares y de los datos del presente del área de estudio, extrapolar a posibles tendencias. Desde luego, hay que reconocer que hay ciertos impactos que se sabe que ocurrirán con base en la experiencia en casos similares, pero para los cuales no existe un modelo matemático para estimarlo. Por otra parte, aun cuando se disponga de datos, de modelos, de experiencias y de buen juicio; debido a la complejidad del ambiente y a las variables que pueden intervenir, siempre existirá un cierto grado de incertidumbre. De allí, la importancia de llevar a cabo un seguimiento o monitoreo de los proyectos que permita el ajuste de los modelos o que por lo menos pueda conocerse el grado de incertidumbre.

En la Guía de Revisión Técnica de EIA: Proyectos Turísticos, Volumen I preparado por expertos regionales en EIA y turísticos de los países de CAFTA-DR y EUA, se enfatizan las ventajas del uso de los modelos.

En el desarrollo de una EIA es importante que los modelos sean usados prudentemente y que los resultados no sean aceptados sin una revisión exhaustiva. Los modelos cuantitativos, calibrados para los escenarios y circunstancias particulares, son particularmente útiles para evaluar los impactos en los recursos de aire y agua, así como los posibles riesgos para los humanos y la biota y pueden ser requeridos aún como un enfoque consistente y objetivo para evaluar los impactos donde esos modelos son validados para su uso en las circunstancias particulares. Otra de las ventajas de usar modelos es que se pueden hacer los análisis de sensibilidad y los escenarios de “qué pasaría si” se pueden modelar para identificar la naturaleza y la extensión de los impactos e identificar cuáles variables contribuyen a los impactos, así como la incertidumbre de los resultados. (US EPA, CCAD, 2011)

Este capítulo “Evaluación del Impacto Ambiental” es el último de este libro, a lo largo de varios capítulos de los libros 1 y 2 de Ingeniería Ambiental se han tratado varios modelos que pueden ser utilizados para resolver diversos problemas de ingeniería ambiental y en particular en los estudios de EIA. En el Capítulo 3 “Balances de materia y energía” del Libro 1, se establecieron las bases de muchos de los modelos usados en la ingeniería ambiental a partir de dos principios fundamentales: la ley de conservación de la masa y de la energía que son herramientas esenciales para resolver diversos problemas. La tabla 6.9 muestra los principios y modelos que se han estudiado en los dos libros y que resultan útiles en la EIA para hacer el estudio y la predicción de los cambios en el ambiente debidos a las acciones de los proyectos.

Tabla 6.9 Herramientas para la predicción de cambios en el ambiente incluidas en los libros 1 y 2 de Ingeniería Ambiental

Libro y Capítulo	Principio o modelo	Descripción
<b>Libro 1</b> <b>Capítulo 2 “Conceptos básicos del análisis demográfico”</b>	Proyecciones de población y métodos	Uno de los enfoques del análisis demográfico es el uso de las variables generadas para hacer una prospección del volumen, dinamismo y estructura de la población. La proyección de población es uno de los recursos de mayor valor para el proceso de planeación de un sistema u obra civil. Escenario 1: Existencia de tasas de crecimiento poblacional. Escenario 2: Cálculo de tasas de crecimiento con registros de censos y conteos de población.
	Ley de conservación de la masa Ley de conservación de la energía	Herramientas esenciales para resolver problemas de ingeniería ambiental, que pueden involucrar sustancias conservativas y no conservativas, así como contaminación térmica en cuerpos de agua.
<b>Libro 1</b> <b>Capítulo 3 “Balances de materia y energía”</b>	Balances de materia en sistemas sin transformaciones	Puede obtenerse el modelo en la zona de mezcla de una descarga y una corriente. Permite estimar el impacto instantáneo en la calidad del agua. Puede fijarse la condición que deberá cumplirse en la descarga para cumplir con cierta condición de calidad aguas abajo.
	Balances de materia en sistemas con transformaciones	Permite estimar cuál sería la eficiencia de remoción de una sustancia que es descargada en un lago o un embalse si se conoce la constante de degradación.
	Tipos de reactores y su diseño	Dependiendo de sus características los sistemas naturales pueden ser estudiados como reactores. Por ejemplo, sistemas completamente mezclados o tipo flujo pistón. Los estudios de estos sistemas nos permiten estimar la concentración de una sustancia que es descargada en un río a cierta distancia, a partir de saber qué tan rápido se degrada.

Libro y Capítulo	Principio o modelo	Descripción
	Aplicación de la primera ley de la termodinámica a problemas de contaminación térmica	Determinar el impacto que tiene la descarga térmica en la temperatura del río inmediatamente río abajo del sitio de descarga.
	Aplicación de la segunda ley de la termodinámica: rendimiento de centrales termoeléctricas.	En una torre de enfriamiento se considera que la reducción de la temperatura del agua dentro de la torre se logra principalmente por vaporización del agua, puede calcularse la cantidad de agua que deberá suministrarse al sistema de enfriamiento como reposición del agua perdida por la torre.
<b>Libro 1</b> <b>Capítulo 4 “Ingeniería y principios de ecología”</b>	Eficiencia de la transferencia de energía	Cálculo de la energía transferida en una cadena trófica.
	Bioconcentración	Cálculo de sustancias químicas que se acumulan en los peces de un lago.
	Cuantificación de ciclo de nutrientes	Tasa media de renovación de calcio en organismos y en el suelo.
	Limnología	Alteración de las cuencas hidrológicas debida a obras de uso y manejo del agua
	Eutrofización	Determinación del nutriente limitante para su control.
<b>Libro 1</b> <b>Capítulo 6 “Evaluación de la calidad del agua”</b>	Modelo de oxígeno disuelto	Basado en la ecuación de Streeter y Phelps, permite estimar el cambio en la concentración del oxígeno disuelto como consecuencia de una descarga de agua que contiene materia orgánica.
	Modelo de contaminación de acuíferos	Basado en el movimiento de los contaminantes en el acuífero, lo que permite estimar el tiempo de traslado del contaminante a un punto de interés. Modelo para control de plumas contaminantes consistente en limpiar el acuífero a través de la instalación de pozos de extracción.
<b>Libro 2</b> <b>Capítulo 4 “Contaminación del aire y control”</b>	Modelo de pluma gaussiana	Estimar concentraciones generadas por fuentes puntuales en su zona de influencia, para el caso de contaminantes

Libro y Capítulo	Principio o modelo	Descripción
		atmosféricos que incluyen partículas suspendidas y gases no reactivos.
	Modelo de caja	Conocer las concentraciones de contaminantes no reactivos en una zona urbana.
<b>Libro 2</b> <b>Capítulo 5 “Contaminación por ruido y ontról”</b>	Modelos de predicción de ruido generado por automotores en proyectos de vialidades	Estimar los niveles de emisión del ruido
	Modelos de predicción de ruido generado por aeronaves	
	Modelo para estimar el nivel de presión acústica de varias fuentes actuando simultáneamente	Estimar el NPA de varias fuentes

Existen varios modelos que pueden ser usados para la predicción de impactos y que están disponibles en la web, la tabla 6.10 presenta algunos modelos para aguas superficiales.

Tabla 6.10 Modelos para aguas superficiales

Modelo	Enlace	Descripción
<b>CORMIX</b> <b>Cornell Mixing</b> <b>Zone Expert</b> <b>System</b>	<a href="http://www.epa.gov/waterscience/models/cormix.html">http://www.epa.gov/waterscience/models/cormix.html</a>	Modelado de la calidad del agua y sistema de apoyo de decisiones para evaluaciones de impacto ambiental de zonas de mezcla que resultan de la descarga de aguas residuales de fuentes de un punto. El sistema enfatiza el papel de la interacción del límite para predecir la geometría y dilución de la pluma en relación con los requisitos reglamentarios de la zona de mezcla. Como un sistema experto, CORMIX es una aplicación fácil de usar que guía a los analistas de calidad del agua para simular una configuración de la descarga específica del sitio. Para facilitar su uso, se proporcionan amplias instrucciones, se incluyen sugerencias para mejorar las características de dilución y se muestran mensajes de advertencia cuando ocurren condiciones de flujo indeseables o poco comunes.
<b>EXAMS</b>	<a href="http://www.epa.gov/ceampubl/swater/exams">www.epa.gov/ceampubl/swater/exams</a>	Biología acuática, evaluación, biología, química, cumplimiento, efectos ambientales, metales, relativos a NPS, permisos, pesticidas, fuente(s) de un punto, ríos, corrientes, aguas superficiales, pruebas/análisis.



<b>Modelo</b>	<b>Enlace</b>	<b>Descripción</b>
<b>HSCTM2D</b>	<a href="http://www.epa.gov/ceampubl/swater/hscm2d">www.epa.gov/ceampubl/swater/hscm2d</a>	Hidrología, sedimento, contaminantes, transporte, modelo de elemento finito, ríos, esteros.
<b>HSPF</b>	<a href="http://www.epa.gov/ceampubl/swater/hspf">www.epa.gov/ceampubl/swater/hspf</a>	Evaluación, biología, cumplimiento, deposición, descarga, efectos ambientales, esteros, hidrología, lagos, metales, monitoreo, relativo a NPS, NPDES, nutrientes, permisos, pesticidas, fuente(s) de un punto, ríos, sedimento, corrientes, aguas superficiales, pruebas/análisis, relativo a TMDL, toxicidad.
<b>Juego de herramientas HSPF</b>	<a href="http://www.epa.gov/athens/research/modeling/table">www.epa.gov/athens/research/modeling/table</a>	Evaluación, cumplimiento, descarga, efectos ambientales, hidrología, permisos, ríos, sedimento, corrientes, aguas superficiales, relativo a TMDL, toxicidad.
<b>PRZM3</b>	<a href="http://www.epa.gov/ceampubl/gwater/przm3">www.epa.gov/ceampubl/gwater/przm3</a>	Evaluación, descarga, efectos ambientales, hidrología, manejo del uso de la tierra, metales, pesticidas, aguas superficiales, pruebas/análisis.
<b>QUAL2K</b>	<a href="http://www.epa.gov/athens/wwqtsc/html/qual2k.html">www.epa.gov/athens/wwqtsc/html/qual2k.html</a>	Biología acuática, evaluación, cumplimiento, descarga, efectos ambientales, hidrología, relativo a NPS, fuente(s) de un punto, aguas superficiales, pruebas/análisis, relativo a TMDL.
<b>SERAFM</b>	<a href="http://www.epa.gov/ceampubl/swater/serafm">www.epa.gov/ceampubl/swater/serafm</a>	Exposición, evaluación, mercurio, hg, aguas superficiales, estanques, corrientes, ríos.
<b>Visual Plumes</b>	<a href="http://www.epa.gov/ceampubl/swater/vplume">www.epa.gov/ceampubl/swater/vplume</a>	Aguas superficiales, jet, pluma, modelo, calidad, contaminantes, TMDL.
<b>WASP</b>	<a href="http://www.epa.gov/athens/wwqtsc/html/wasp.html">www.epa.gov/athens/wwqtsc/html/wasp.html</a>	Biología acuática, evaluación, cumplimiento, descarga, efectos ambientales, hidrología, metales, relativo a NPS, fuente(s) de un punto, aguas superficiales, pruebas/análisis, relativo a TMDL.
<b>HEC-RAS</b>	<a href="http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/">http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/</a>	El Sistema de Análisis de Ríos del Centro de Ingeniería Hidrológica (HEC-RAS, por sus siglas en inglés) es un programa de computación que modela el flujo constante, flujo inconstante, cálculos del transporte de sedimento/lecho móvil y temperatura del agua a través de ríos naturales y otros canales. El programa es unidimensional, lo cual significa que no hay modelado directo del efecto hidráulico de los cambios de forma transversal, curvas y otros aspectos bidimensionales y tridimensionales del flujo.
<b>HEC-ResSim</b>	<a href="http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-reessim/">http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-reessim/</a>	Programa de Simulación del Sistema de Reservorios del Centro de Ingeniería Hidrológica para modelar

Modelo	Enlace	Descripción
		operaciones de reservorio en uno o más reservorios cuyas operaciones están definidas por una variedad de metas y limitaciones operativas.
<b>GSFLOW</b>	<a href="http://water.usgs.gov/software/lists/surface_water">http://water.usgs.gov/software/lists/surface_water</a>	Modelo de flujo de aguas freáticas y aguas superficiales. Puede ser utilizado para evaluar los efectos de factores tales como cambio del uso de la tierra, variabilidad climática y retiros de aguas freáticas en el flujo superficial y subsuperficial. Incorpora la simulación de la escorrentía e infiltración de la precipitación; balance de energía y pronóstico de masa de la cubierta vegetal, carga de nieve y zona de suelos; y simulación de la interacción del agua superficial con el agua freática en cuencas hidrográficas.
<b>SMS (Surface Water Modeling System)</b>	<a href="http://www.ems-i.com">www.ems-i.com</a> . (disponible en español)	Surface Water Modeling System (SMS) es un ambiente integral para modelado hidrodinámico unidimensional, bidimensional y tridimensional. El SMS es un pre- y post-procesador para modelado y diseño de aguas superficiales que incluye herramientas de modelado de un elemento finito 2D, diferencia finita 2D y elemento finito 3D y agua estancada 1D. El modelo permite el análisis de inundación, análisis de olas y análisis de huracanes. El SMS también incluye una interfaz de modelo genérica que se puede usar para soportar otros modelos que no han sido incorporados oficialmente en el sistema.
<b>Watershed Modeling software (WMS)</b>	<a href="http://www.ems-i.com">www.ems-i.com</a> (disponible en español)	Watershed Modeling Software es un ambiente de modelado gráfico integral para todas las fases de la hidrología e hidráulica de cuencas hidrográficas. El software WMS incluye herramientas poderosas para procesos de modelado automático tales como delineado de cuencas automático, cálculos de parámetros geométricos; cálculos de superposición de SIG (CN, profundidad de la precipitación pluvial, coeficientes de rugosidad, etc.), extracción transversal de datos del terreno y otros. Los modelos hidráulicos soportados en el software WMS incluyen HEC-RAS y CE QUAL W2
<b>IBM In-stream Flow Assessment</b>	<a href="http://my.epri.com/portal/server.pt?space=CommunityPage&amp;cached=true&amp;parentname=ObjMgr&amp;parentid=2&amp;control=SetCommunity&amp;CommunityID=404&amp;raiseDocID=TR-">http://my.epri.com/portal/server.pt?space=CommunityPage&amp;cached=true&amp;parentname=ObjMgr&amp;parentid=2&amp;control=SetCommunity&amp;CommunityID=404&amp;raiseDocID=TR-</a>	Modelado basado en el hábitat para la pesca. Los modelos de Pesca Basados en Corrientes individuales mejoran la efectividad en función de los costos de la conducción de la evaluación del flujo dentro de la corriente tradicionalmente conducida utilizando IFIM.
<b>PHABSIM</b>	<a href="http://www.fort.usgs.gov/Products/Software/PHABSIM/">http://www.fort.usgs.gov/Products/Software/PHABSIM/</a>	PHABSIM es una colección de modelos hidráulicos y de hábitat utilizado para determinar el valor relativo

Modelo	Enlace	Descripción
	<a href="http://www.fort.usgs.gov/products/Publications/15000/chapter1.htm/Publications/15000/chapter1.htm">http://www.fort.usgs.gov/products/Publications/15000/chapter1.htm/Publications/15000/chapter1.htm</a>	de un hábitat objetivo para una especie de peces en particular u otro organismo acuático en un rango de flujos. PHABSIM es un componente del IFIM (Instream Flow Incremental Methodology) más grande, el cual es un proceso para resolver problemas para abordar asuntos de recursos hídricos. Los datos de campo para ingresar en los modelos incluyen medidas del flujo, velocidad y profundidad; composición del sustrato; y uso del hábitat visual, observaciones de las especies de peces objetivo.
<b>MARS</b>	<a href="http://my.epri.com/portal/server.pt?space=CommunityPage&amp;cached=true&amp;parentname=ObjMgr&amp;parentid=2&amp;control=SetCommunity&amp;CommunityID=404&amp;RaiseDocID=00000000001008490&amp;RaiseDocType=Abstract_id">http://my.epri.com/portal/server.pt?space=CommunityPage&amp;cached=true&amp;parentname=ObjMgr&amp;parentid=2&amp;control=SetCommunity&amp;CommunityID=404&amp;RaiseDocID=00000000001008490&amp;RaiseDocType=Abstract_id</a>	Modela sedimentos de aguas superficiales contaminadas. Tres Modelos interconectados de transporte y destino hidrodinámico, sedimento y químico que simulan el destino y transporte de compuestos orgánicos a la vez que permiten la evaluación de alternativas correctivas del sitio tales como atenuación natural, dragado y recubrimiento.
<b>SNTEMP</b>	<a href="http://www.fort.usgs.gov/Products/Software/SNTEMP/">http://www.fort.usgs.gov/Products/Software/SNTEMP/</a>	El Modelo Stream Network and Stream Temperature simula las temperaturas de corrientes constantes a través de una red dendrítica de corrientes que maneja múltiples períodos de tiempo por año. Ayuda a formular recomendaciones para el flujo dentro de la corriente, evaluar los efectos de regímenes alterados de flujo de la corriente, evaluar los efectos de proyectos de mejora de hábitat y ayudar a negociar las liberaciones de proyectos de almacenamiento existentes.
<b>BASINS</b>	<a href="http://water.epa.gov/scitech/datait/models/basins/index.cfm">http://water.epa.gov/scitech/datait/models/basins/index.cfm</a>	El software System Model Watershed es integral para fuentes de un punto y de no punto. Es un sistema de análisis ambiental de propósitos múltiples que integra un sistema de información geográfica (SIG), datos de cuencas hidrográficas nacionales y herramientas de modelado y evaluación de última generación en un paquete conveniente

Fuente: Tomado de (US EPA,CCAD, 2011)

En el Capítulo 6 “Evaluación de la calidad del agua” del libro I, sección 6.4 de agua subterráneas, se plantean los conceptos básicos de las aguas subterráneas, modelos sencillos de contaminación de acuíferos y una explicación del fenómeno de intrusión salina y algunos métodos para su control. Unos de los impactos más significativos de los proyectos de desarrollo pueden ser sobre el agua subterránea. Por ejemplo, al extraer el agua subterránea en una zona costera para el abastecimiento de agua para diferentes propósitos: uso potable, riego agrícola, riego de campos de golf, un parque acuático, etc., se requiere conocer la hidrogeología del sitio para evaluar los impactos.

Para determinar las características del acuífero deberán hacerse pruebas de bombeo conducidas bajo condiciones de estado constante o transitorio para determinar las características del acuífero. De ser

posible, es importante que estas pruebas sean realizadas a las tasas de bombeo que serían utilizadas por duraciones adecuadas para determinar los impactos regionales de la bajada de nivel y los posibles cambios en la dirección del flujo. Estas pruebas requieren la instalación previa de una red apropiada de pozos de observación. Las transmisibilidades, los coeficientes de almacenamiento y las conductividades hidráulicas verticales y horizontales pueden ser calculados a partir de pruebas de bombeo diseñadas adecuadamente. (US EPA,CCAD, 2011).

Con relación a los acuíferos, se usan modelos para determinar el abatimiento en el acuífero debido al uso para consumo, transporte contaminante, calidad del agua superficial y otros factores. La tabla 6.11 presenta los modelos de aguas freáticas para evaluar los impactos de la extracción y descarga al agua subterránea, algunos disponibles como software libre y otros de manera comercial.

Tabla 6.11 Modelos de computadora de aguas freáticas y aguas superficiales

Modelo	Enlace	Descripción
<b>MODFLOW</b>	<a href="http://water.usgs.gov/software/lists/groundwater">http://water.usgs.gov/software/lists/groundwater</a>	MODFLOW es un código de diferencia finita desarrollado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (McDonald y Harbaugh, 1988). MODFLOW es un código de modelado de flujo numérico ampliamente aceptado y ha sido utilizado mundialmente para evaluar los impactos de las actividades que pueden derivar en alteraciones de grandes áreas. MODFLOW traduce el(los) modelo(s) conceptual(es) del sitio en modelos numéricos usando la discretización del espacio y el tiempo. La discretización del dominio espacial se realiza construyendo una cuadrícula designando celdas de un ancho, longitud y grosor específicos.
<b>MT3D</b>	<a href="http://water.usgs.gov/software/lists/groundwater">http://water.usgs.gov/software/lists/groundwater</a>	MT3D es un código de transporte soluto también vinculado al modelo básico MODFLOW. El dominio de flujo que usa MODFLOW está vinculado a MT3D, que luego simula el transporte contaminante usando dispersión y reacciones químicas.
<b>Visual MODFLOW</b>	<a href="http://www.visual-modflow.com">www.visual-modflow.com</a> . (disponible en español)	Permite aplicaciones en el modelado 3D del flujo de aguas freáticas y transporte de contaminantes usando una interfaz gráfica de usuario fácil de utilizar. La información para este paquete se encuentra disponible en Scientific Software Group.
<b>GW Vistas</b>	<a href="http://www.esinternational.com/groundwater-vistas.html">www.esinternational.com/groundwater-vistas.html</a>	Este software es para modelado 3D, calibración y optimización del flujo de aguas freáticas y transporte de contaminantes usando la serie de códigos de MODFLOW. La versión avanzada de Groundwater Vistas provee la herramienta ideal para la evaluación de riesgos de aguas freáticas. La información de este

		software se encuentra disponible a través de ESI Lt.
<b>GMS (Groundwater Modeling System)</b>	<a href="http://www.ems-i.com">www.ems-i.com</a>	GMS provee herramientas de software para cada fase de una simulación de aguas freáticas incluyendo caracterización del sitio, desarrollo de modelos, calibración, post-procesamiento y visualización. GMS soporta modelos 2D y 3D de elemento finito y diferencia finita, incluyendo MODFLOW 2000, MODPATH, MT3DMS/RT3D, SEAM3D, ART3D, UTCHEM, FEMWATER, PEST, UCODE, MODAEM y SEEP2D. La información se encuentra disponible a través de Environmental Monitoring Systems, Inc.
<b>HYDROGEOCHEM</b>	<a href="http://www.scisoftware.com/products/hydrogeochem/overview/hydrogeochem%20overview.html">http://www.scisoftware.com/products/hydrogeochem/overview/hydrogeochem overview.html</a>	HYDROGEOCHEM es un modelo acoplado de transporte hidrológico y reacción geoquímica en medios saturados-insaturados.
<b>MIKE SHE</b>	<a href="http://www.crrwr.utexas.edu/gis/gishyd98/dhi/mikeshe/Mshemain.htm">http://www.crrwr.utexas.edu/gis/gishyd98/dhi/mikeshe/Mshemain.htm</a>	MIKE SHE es un sistema de modelado hidrológico avanzado e integrado. Simula el flujo del agua en toda la fase basada en la tierra del ciclo hidrológico desde la precipitación pluvial hasta el flujo del río, a través de varios procesos de flujo tales como flujo terrestre, infiltración al suelo, evapotranspiración de la vegetación y flujo de aguas freáticas. MIKE SHE ha sido aplicado a un gran número de estudios en todo el mundo centrándose, por ejemplo, en el uso conjunto de agua superficial y agua freática para consumo doméstico e industrial e irrigación, dinámica en humedales y estudios de calidad del agua en relación con la contaminación de fuentes puntuales y no puntuales.
<b>SEAWAT</b>	<a href="http://water.usgs.gov/ogw/seawat/">http://water.usgs.gov/ogw/seawat/</a>	Esta es una versión combinada de MODFLOW y MT3DMS emitida para simular los patrones de flujo de variable-densidad debido a la interferencia de agua salada. Está diseñada para simular el flujo tridimensional de agua freática de densidad variable con soluto de especies múltiples y transporte de calor. El programa ha sido utilizado para una amplia variedad de estudios de aguas freáticas, incluyendo aquellos centrados en la migración de la salmuera en acuíferos continentales, así como aquellos centrados en la interferencia del agua salada en acuíferos costeros.

Fuente: Tomado de (US EPA,CCAD, 2011)

En el Capítulo 4 “Contaminación del aire y control” del Libro 2, sección 4.3 se desarrolló el tema de dispersión atmosférica y las aplicaciones del modelo gaussiano a la predicción de impactos de fuentes puntuales, y se desarrolló el modelo de caja. Con el paso del tiempo, se han desarrollado otros modelos numéricos de dispersión de contaminantes. Estos incluyen modelos de selección para evaluaciones de fuente única (SCREEN3 o AIRSCREEN) así como modelos más complejos y refinados (AERMOD o CALPUFF). La selección de modelos depende de la complejidad y geomorfología del sitio del proyecto (por ejemplo, terreno montañoso, área urbana o rural). (US EPA,CCAD, 2011). La tabla 6.12 presenta una lista de modelos, la mayoría disponibles en los enlaces de uso libre, están diseñados para modelar fuentes puntuales, de línea y de área; para distintos contaminantes (gases, partículas, gases más pesados que el aire); para distintos tipos de terreno.

Tabla 6.12 Modelos computacionales de dispersión de contaminantes en el aire

<b>Modelo</b>	<b>Enlace</b>	<b>Descripción</b>
<b>AERMOD</b>	<a href="http://www.epa.gov/scram001/dispersion_prefrec.htm">http://www.epa.gov/scram001/dispersion_prefrec.htm</a> #rec.	Un modelo de pluma en estado estable que incorpora la dispersión del aire basada en la estructura de turbulencia de la capa límite planetaria y conceptos de escala, incluyendo el tratamiento de las fuentes en el suelo y elevadas y terrenos simples y complejos.
<b>CALPUFF</b>	<a href="http://www.epa.gov/scram001/dispersion_prefrec.htm">http://www.epa.gov/scram001/dispersion_prefrec.htm</a> #rec.	Un modelo de dispersión de “puff” en estado inestable que simula los efectos de las condiciones meteorológicas que varían con el tiempo y el espacio en el transporte, transformación o retiro de la contaminación. CALPUFF se puede aplicar para el transporte de largo alcance y terrenos complejos.
<b>CALINE3</b>	<a href="http://www.epa.gov/scram001/dispersion_prefrec.htm">http://www.epa.gov/scram001/dispersion_prefrec.htm</a> #rec.	Modelo gaussiano de dispersión de estado estable diseñado para determinar las concentraciones de contaminación del aire en sitios receptores a favor del viento en carreteras ubicadas en terreno relativamente no complicado.
<b>CAL3QHC/CAL3QHC R</b>	<a href="http://www.epa.gov/scram001/dispersion_prefrec.htm">http://www.epa.gov/scram001/dispersion_prefrec.htm</a> #rec.	CAL3QHC es un modelo CO basado en CALINE3 con cálculos de cola y situación crítica y con un modelo de tráfico para calcular atrasos y colas que ocurren en intersecciones señalizadas; CAL3QHCR es una versión más refinada basada en CAL3QHC que

Modelo	Enlace	Descripción
		requiere datos meteorológicos locales.
<b>ISC3</b>	<a href="http://www.epa.gov/ttn/catc1/cica/9904e.html">http://www.epa.gov/ttn/catc1/cica/9904e.html</a> (En español)	El Modelo Industrial Source Complex (ISC3) es un modelo gaussiano de pluma de estado estable que puede ser utilizado para evaluar las concentraciones de contaminantes de una amplia variedad de fuentes relacionadas con un complejo industrial. ISC3 opera en modos a largo y a corto plazo.
<b>SCREEN3</b>	<a href="http://www.epa.gov/ttn/catc1/cica/9904e.html">http://www.epa.gov/ttn/catc1/cica/9904e.html</a> (En español)	SCREEN3 es un modelo gaussiano de pluma de fuente única que provee concentraciones máximas al nivel del suelo para fuentes de punto, área, llamarada y volumen.

Fuente: Tomado de (US EPA,CCAD, 2011)

### 6.3.6 Valoración de los impactos

La importancia del impacto se mide en función de la alteración producida y de la caracterización del efecto, que a su vez responde a una serie de atributos de tipo cualitativo tales como extensión, periodo de manifestación, persistencia, reversibilidad, recuperabilidad, sinergia, acumulación y periodicidad, entre los principales. La caracterización que se presenta a continuación está basada en (Espinoza, 2002) como se cita en (Gómez Orea, 2003) y es útil para la valoración de los impactos en función de sus características. La propuesta no es limitativa, pues un impacto puede tener varias características como las descritas en este texto, o pueden incluirse nuevas. Además, pueden usarse criterios y pesos diferentes que deberán ser definidos por el equipo de expertos. La tabla 6.13 incluye la denominación y los atributos del impacto.

Tabla 6.13 Características y descripción de la tipología de impactos

Características	Descripción
<b>Carácter (1)</b>	Los positivos son benéficos para el factor ambiental. Los negativos son perjudiciales para el factor ambiental. Impactos positivos, negativos o neutros.
<b>Grado de perturbación (2)</b>	Es la escala del impacto sobre el factor ambiental.



	Importante, regular, escaso.
<b>Importancia (3)</b>	Desde el punto de vista de los recursos naturales o de la calidad ambiental. Alta, media y baja.
<b>Probabilidad de ocurrencia (4)</b>	Se refiere a la probabilidad de que se presente un impacto. Muy probable, probable y poco probable.
<b>Extensión (5)</b>	Se refiere al territorio afectado. Regional, local, puntual.
<b>Duración (6)</b>	Se refiere al periodo en el que se manifestará el impacto. Durante toda la vida del proyecto “permanente”. Durante la operación del proyecto “media”. Durante la construcción del proyecto “corta”.
<b>Reversibilidad (7)</b>	No requiere ninguna acción para regresar a la condición inicial “reversible”. Si requiere alguna acción para regresar a la condición inicial “parcial”. Aún con acciones no podrá recuperarse el factor ambiental “irreversible”.

Fuente: Modificado de Espinoza como se cita en (Gómez Orea, 2003)

Para la valoración de los impactos se incluye en la tabla 6.14 la propuesta de ponderación de los atributos, basada en (Espinoza, 2002) como se cita en (Gómez Orea, 1994).

Tabla 6.14 Ponderación de los atributos

Carácter (C)	Negativo (-1)	Neutro (0)	Positivo (1)
Grado de perturbación (P)	Importante (3)	Regular (2)	Escaso (1)
Importancia (I)	Alta (3)	Media (2)	Baja (1)
Probabilidad de ocurrencia (O)	Muy probable (3)	Probable (2)	Poco probable (1)
Extensión (E)	Regional (3)	Local (2)	Puntual (1)
Duración (D)	Permanente (3)	Media (2)	Corta (1)
Reversibilidad (R)	Irreversible (3)	Parcial (2)	Reversible (1)
<b>Suma exceptuando el carácter</b>	<b>18</b>	<b>12</b>	<b>6</b>

Fuente: Modificado de (Espinoza, 2002) como se cita en (Gómez Orea, 2003)

Para valorar los impactos se emplea la ecuación 6.1

$$\text{Valoración del impacto} = VI = C (P+I+O+D+R) \quad \text{ec. (6.1)}$$

Donde las variables C, P, I, O, D, R califican al impacto, y tienen el siguiente significado:

- C: carácter del impacto
- P: grado de perturbación
- I: importancia
- O: probabilidad de ocurrencia
- D: duración
- R: reversibilidad

La interpretación de la valoración del impacto (VI) se realiza según su carácter, como se indica en las figuras 6.5 y 6.6, para impactos negativos y positivos, respectivamente.

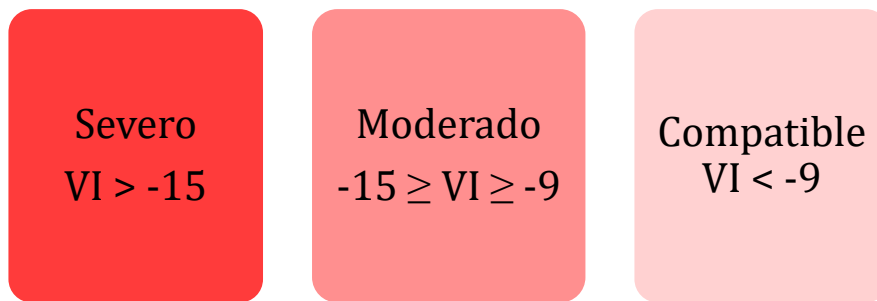


Figura 6.5 Valoración de impactos negativos

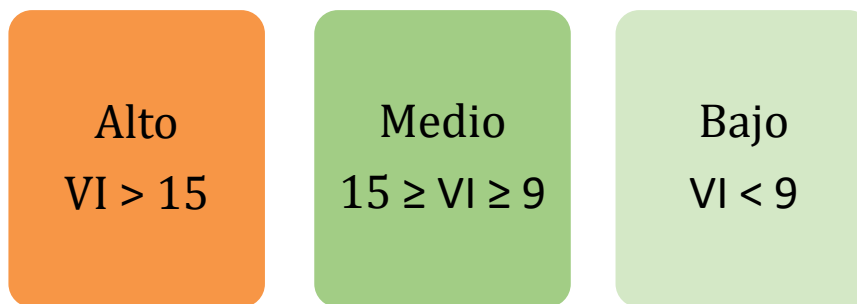


Figura 6.6 Valoración de impactos positivos

Para el caso de los impactos negativos, la interpretación se presenta en la tabla 6.15.

Tabla 6.15 Interpretación de la valoración de impactos negativos

Impacto ambiental compatible	Hay una recuperación inmediata en el factor ambiental tras el cese de la actividad que provoca el impacto, y no requiere medidas de mitigación de protección o corrección.
Impacto ambiental moderado	La recuperación de las condiciones ambientales requiere de cierto tiempo, sin que se requieran medidas de mitigación intensivas.
Impacto ambiental severo	Para lograr la recuperación de las condiciones del factor ambiental es preciso la aplicación de medidas de mitigación, y aun con ellas, requerirá de un tiempo significativo de recuperación. En algunos casos ese impacto podría implicar una pérdida permanente de la calidad del factor ambiental, aun con la aplicación de las medidas de mitigación.

### 6.3.7 Matrices

#### Matrices de identificación

Las matrices son utilizadas fundamentalmente para la identificación de impactos, se construyen a partir de una lista de actividades o acciones del proyecto, versus otro listado donde se incluyen los factores ambientales, permitiendo determinar qué actividades causarán impactos benéficos o adversos a los elementos del ambiente. Es decir, son el cruce de las actividades con los factores ambientales que son susceptibles de modificarse, logrando de este modo identificar las relaciones causa-efecto. Entre los factores ambientales, se incluyen, por ejemplo, del medio físico: aire, agua, suelo; del medio biótico: fauna y vegetación; del medio socioeconómico: calidad de vida, condiciones económicas, entre otros. La figura 6.7 muestra el ejemplo de una matriz de identificación.

Acciones proyecto \ Factores ambientales	Preparación del sitio y construcción						Operación y mantenimiento						Abandono del proyecto			
	Acción 1	Acción 2	Acción 3	Acción 4	Acción 5	Acción n	Acción 1	Acción 2	Acción 3	Acción 4	Acción 5	Acción 6	Acción n	Acción 1	Acción 2	Acción n
Factor ambiental 1		●								●					●	
Factor ambiental 2			●				●								●	
Factor ambiental 3				●					●					●		
Factor ambiental 4	●										●					●
Factor ambiental 5		●								●						●
Factor ambiental 6					●			●								●
Factor ambiental...n						●							●		●	

Figura 6.7 Matriz de identificación de impactos

#### Matriz cualitativa de evaluación de impactos

Las matrices pueden también utilizarse para la descripción y evaluación de los impactos, esta última puede ser de naturaleza cualitativa o cuantitativa. La figura 6.8 presenta una matriz de evaluación de impactos de naturaleza cualitativa, la cual presenta las características de los impactos descritos en la tabla 6.13, además incluye si requiere medida de mitigación, la calificación final de los impactos negativos o positivos, y en la última columna la identificación de la acción que causa el impacto ambiental. Estas matrices pueden elaborarse para las distintas etapas del proyecto: preparación del sitio y construcción, operación y mantenimiento, y término de la vida útil; permitiendo el desglose de las acciones detalladas para cada etapa del proyecto. En resumen, incluyen: la identificación, descripción, evaluación, identificación de medidas de mitigación y comunicación de resultados. La figura 6.9 muestra un ejemplo para el caso de un proyecto en la etapa de preparación del sitio y construcción. Debido a que cada impacto se asocia a una casilla puede llegarse a pensar que los impactos se presentan aisladamente y que no tienen relación unos con otros, debido a ello se requiere que en la MIA se incluya un texto por cada casilla que permita la discusión integrada de los impactos cuando hay relación de unos con otros, como cadenas de impactos.

**INGENIERÍA AMBIENTAL**  
**Aplicaciones**

MANIFESTACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL
MATRIZ DE EVALUACIÓN DE IMPACTOS AMBIENTALES

ETAPAS DEL PROYECTO	
ACTIVIDADES EN	1
EVALUACIÓN	2
	3
	4
	5
	6
	7

ELEMENTOS Y CARACTERÍSTICAS AMBIENTALES SUSCEPTIBLES DE SER IMPACTADOS	CARACTERÍSTICAS DE LOS IMPACTOS (TABLA 6.11)														MEDIDA DE MITIGACIÓN	EVALUACIÓN						OBRA O ACTIVIDAD GENERADORA DE IMPACTO									
	1		2		3			4		5			6			7		NEGATIVOS			POSITIVOS										
	POSITIVO	NEGATIVO	IMPORTANTE	REGULAR	ESCASO	ALTA	MEDIA	BAJA	MUY PROBABLE	PROBABLE	POCO PROBABLE	REGIONAL	LOCAL	PUNTUAL		PERMANENTE	MEDIA	CORTA	REVERSIBLE	PARCIAL	IRREVERSIBLE		SI	NO	SEVERO	MODERADO	COMPATIBLE	ALTO	MEDIANO	BAJO	
ATMOSFERA																															
GEOMORFOLOGIA																															
SUELO																															
HIDROLOGIA																															
OCEANOGRAFIA																															
VEGETACIÓN																															
FAUNA																															
MARINA																															
SOCIOECONOMICA																															

Figura 6.8 Matriz de evaluación de impactos de naturaleza cualitativa

**INGENIERÍA AMBIENTAL**  
Aplicaciones

MANIFESTACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL		ETAPA DEL PROYECTO																												
MATRIZ DE EVALUACIÓN DE IMPACTOS AMBIENTALES		Preparación del sitio y construcción.																												
		ACTIVIDADES EN EVALUACIÓN																												
		1. DESMONTE Y DESPALME																												
		2. EXCAVACIÓN, CORTES Y RELLENOS																												
		3. TRANSPORTE DE MATERIAL Y MOVIMIENTO DE EQUIPO																												
		4. SUMINISTRO DE COMBUSTIBLE																												
		5. SUMINISTRO DE AGUA CRUDA																												
		6. TALLERES Y ALMACENES																												
		7. INFRAESTRUCTURA																												
ELEMENTOS Y CARACTERÍSTICAS AMBIENTALES SUSCEPTIBLES DE SER IMPACTADOS		CARACTERÍSTICAS DE LOS IMPACTOS (TABLA 6.11)														MEDIDA DE MITIGACIÓN		EVALUACIÓN						OBRA O ACTIVIDAD GENERADORA DE IMPACTO						
		1		2		3		4		5		6		7				NEGATIVOS			POSITIVOS									
		POSITIVO	NEGATIVO	IMPORTANTE	REGULAR	ESCASO	ALTA	MEDIA	BAJA	MUY PROBABLE	PROBABLE	POCO PROBABLE	REGIONAL	LOCAL	PUNTUAL	PERMANENTE	MEDIA	CORTA	REVERSIBLE	PARCIAL	IRREVERSIBLE	SI	NO	SEVERO	MODERADO	COMPATIBLE	ALTO	MEDIANO	BAJO	
ATMOSFERA	MICROCLIMA		●		●				●	●				●			●					●								1
	CALIDAD DEL AIRE		●		●			●		●				●			●		●			●			●					2,3,4
	NIVEL DE RUIDO		●	●			●			●				●				●		●			●							2,3
GEOMORFOLOGÍA	PLAYA ARENOSA																													
	LLANURA DE MATERIAL CONSOLIDADO		●	●			●			●				●			●						●							2
	LLANURA DE MATERIAL NO CONSOLIDADO		●	●			●			●				●			●						●							2
PAISAJE			●		●					●							●					●								12,5,7
SUELO	GLEYSOL MÓLICO		●	●			●			●				●			●					●		●						12,3
	RENDZINAS		●	●			●			●				●			●					●		●						12,3,4,5
HIDROLOGÍA	SUPERFICIAL		●	●			●			●				●			●					●		●						12,6,7
	SUBTERRÁNEA		●	●			●			●				●			●					●		●						12,4,5,6
OCEANOGRAFÍA	CORRIENTES																													
	BATIMETRÍA																													
	TRANSPORTE LITORAL																													
VEGETACIÓN	SELVA MEDIANA SUBCADUCIFOLIA SUCESIONAL		●		●			●		●				●			●		●			●			●					1
	ACAHUALES Y POTREROS		●	●			●			●				●			●					●			●					1
	MANGLAR		●	●			●			●				●			●					●			●					1
	DE DUNA					●			●			●																		
FAUNA	MAMÍFEROS		●		●			●		●				●			●		●			●			●					12,3
	AVES		●		●			●		●				●			●		●			●			●					12,3
	REPTILES		●		●			●		●				●			●		●			●			●					12,3
	PECES																													
MARINA	ARRECIFE																													
	PASTOS																													
SOCIOECONÓMICA	EMPLEO	●		●			●			●				●			●									●				12,3,7
	VIVIENDA, EQUIPAMIENTO Y SERVICIOS	●			●			●		●				●			●									●				12,3,7
	ECONOMÍA REGIONAL	●			●			●		●			●				●									●				12,3,7
	ACTIVIDADES PRODUCTIVAS	●		●			●			●				●			●									●				12,3,7

Figura 6.9 Ejemplo para el caso de un proyecto en la etapa de preparación del sitio y construcción.

## Matriz cuantitativa de impactos. Matriz de Leopold

Las matrices de naturaleza cuantitativa están basadas en la matriz propuesta por Luna B. Leopold en 1971 usada en el Servicio Geológico de los Estados Unidos. La matriz de Leopold incluye 100 acciones del proyecto que pueden afectar a 88 características ambientales, por lo que sería posible identificar 8800 interacciones o impactos ambientales. Es una matriz maestra, que podría tomarse como referencia para ser expandida o contraída según las acciones del proyecto o las características del escenario ambiental, (tablas 6.16 y 6.17). El equipo multi e inter-disciplinario procederá a identificar los impactos, colocando en cada casilla una diagonal trazada del ángulo superior derecho al ángulo inferior izquierdo. Los impactos reciben entonces dos calificaciones, una relacionada con la magnitud y la otra relacionada con la importancia, además se incluye un signo (+) o (-) según corresponda a un impacto positivo o negativo, Figura 6.10.

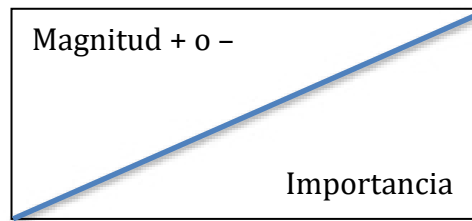


Figura 6.10 Valoración de un impacto en la Matriz de Leopold

La magnitud y la importancia se califican en una escala de 1 a 10, la magnitud representa la extensión o tamaño del impacto (1 es de pequeña dimensión y 10 de gran magnitud). La importancia del impacto es la trascendencia del impacto en términos de sus consecuencias, también se califica en una escala de 1 a 10, donde 1 representa un impacto de poca importancia y 10 uno de mayores consecuencias. Por ejemplo, un derrame de 1 litro de una sustancia tóxica a un ecosistema acuático como un lago con un volumen de varios miles de m<sup>3</sup>, puede calificarse como un impacto de pequeña magnitud, pero de gran importancia por las consecuencias. Una vez llenadas todas las casillas donde se presentan los impactos, es posible calcular el impacto ambiental por acción del proyecto para todos los factores ambientales, y también es posible calcular el impacto que recibe un factor ambiental debido a todas las acciones de un proyecto, y finalmente conocer las unidades de impacto ambiental global. Matemáticamente se tiene:

$$\text{Impacto total sobre el } i\text{ésimo factor ambiental para todas las acciones} = \sum_i M_{ij} I_{ij}$$

$$\text{Impacto total de la } j\text{ésima acción sobre todos los factores ambientales} = \sum_j M_{ij} I_{ij}$$

$$\text{El impacto total del proyecto, o bien el impacto global de la etapa del proyecto} = \sum_i \sum_j M_{ij} I_{ij}$$

Donde:

M (+ ó -): Magnitud de la jésima acción en el iésimo factor ambiental

I: Importancia de la jésima acción en el iésimo factor ambiental



Tabla 6.16 Lista de acciones que pueden causar impacto en la Matriz de Leopold

<b>A) MODIFICACIÓN DEL RÉGIMEN:</b>	
1. Introducción de flora y fauna exótica	8. Canalización
2. Controles biológicos	9. Riego
3. Modificación del hábitat	10. Modificación del clima
4. Alteración de la cubierta terrestre	11. Incendios
5. Alteración de la hidrología	12. Superficie o pavimento
6. Alteración del drenaje	13. Ruido vibraciones
7. Control del río y modificación del flujo	
<b>B) TRANSFORMACIÓN DEL TERRITORIO Y CONSTRUCCIÓN:</b>	
14. Urbanización	24. Revestimiento de canales
15. Emplazamientos industriales y edificio	25. Canales
16. Aeropuertos	26. Presas y embalses
17. Autopistas y puentes	27. Escolleras, diques, puertos y terminales marítimas
18. Carreteras y caminos	28. Estructuras en alta mar
19. Vías férreas	29. Estructuras recreacionales
20. Cables y elevadores	30. Voladuras y perforaciones
21. Líneas de transmisión, oleoductos y corredores	31. Desmontes y rellenos
22. Barreras incluyendo vallados	32. Túneles y estructuras subterráneas
23. Dragados y alineado de canales	
<b>C) EXTRACCIÓN DE RECURSOS:</b>	
35. Voladuras y perforaciones	39. Dragados
36. Excavaciones superficiales	39. Explotación forestal
37. Excavaciones subterráneas	40. Explotación forestal
38. Perforación de pozos y transporte de fluidos	41. Pesca comercial y caza
<b>D) PROCESOS:</b>	
42. Agricultura	50. Industria textil
43. Ganaderías y pastoreo	51. Automóviles y aeroplanos
44. Piensos	52. Refinerías de petróleo
45. Industrias lácteas	53. Alimentación
46. Generación energía eléctrica	54. Herrerías (explotación de maderas)
47. Minería	55. Celulosa y papel
48. Metalurgia	56. Almacenamiento de productos
49. Industria química	
<b>E) ALTERACIONES DEL TERRENO:</b>	
57. Control de la erosión, cultivo en terrazas o bancales	60. Paisaje
58. Sellado de minas y control de residuos	61. Dragado de puertos
59. Rehabilitación de minas a cielo abierto	62. Aterramientos y drenajes
<b>F) RECURSOS RENOVABLES:</b>	
63. Repoblación forestal	66. Fertilización
64. Gestión y control vida natural	67. Reciclado de residuos
65. Recarga aguas subterráneas	

Tabla 6.16 Lista de acciones que pueden causar impacto en la Matriz de Leopold

<b>G) CAMBIOS EN TRÁFICO:</b>	
68. Ferrocarril	74. Deportes náuticos
69. Automóvil	75. Caminos
70. Camiones	76. Telesillas, telecabinas, etc.
71. Barcos	77. Comunicaciones
72. Aviones	78. Oleoductos
73. Tráfico fluvial	
<b>H) SITUACIÓN Y TRATAMIENTO DE RESIDUOS:</b>	
79. Vertidos en mar abierto	86. Vertido de aguas de refrigeración
80. Vertedero	87. Vertido de residuos urbanos
81. Emplazamiento de residuos mineros	88. Vertido de efluentes líquidos
82. Almacenamiento subterráneo	89. Balsas de estabilización y oxidación
83. Disposición de chatarra	90. Tanques y fosas sépticas, comerciales y domésticas
84. Derrames en pozos de petróleo	91. Emisión de corrientes residuales a la atmósfera
85. Disposición en pozos profundos	92. Lubricantes o aceites usados
<b>I) TRATAMIENTO QUÍMICO:</b>	
93. Fertilización	96. Control de maleza y vegetación terrestre
94. Descongelación química de autopistas, etc.	97. Pesticidas
95. Estabilización química del suelo	
<b>J) ACCIDENTES:</b>	
98. Explosiones	100. Fallos de funcionamiento
99. Escapes y fugas	
<b>K) OTROS:</b>	
...	

Tabla 6.17 Características Ambientales que pueden ser afectadas en la Matriz de Leopold

<b>A) CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS</b>	
<b>A.1 EXTRACCIÓN DE RECURSOS:</b>	
1. Recursos minerales	4. Geomorfología
2. Material de construcción	5. Campos magnéticos y radioactividad de fondo
3. Suelos	6. Factores físicos singulares
<b>A.2 AGUA:</b>	
7. Superficiales	11. Temperatura
8. Marinas	12. Recarga
9. Subterráneas	13. Nieve, hielos y heladas
10. Calidad	
<b>A.3. ATMÓSFERA:</b>	
14. Calidad (gases, partículas)	16. Temperatura
15. Clima (micro, macro)	
<b>A.4. PROCESOS:</b>	
17. Inundaciones	22. Compactación y asientos
18. Erosión	23. Estabilidad
19. Deposición (sedimentación y precipitación)	24. Sismología (terremotos)
20. Solución	25. Movimientos de aire
21. Sorción (intercambios de iones complejos)	
<b>B) CONDICIONES BIOLÓGICAS:</b>	
<b>B.1. FLORA:</b>	
26. Árboles	31. Plantas acuáticas
27. Arbustos	32. Especies en peligro
28. Hierbas	33. Barreras, obstáculos
29. Cosechas	34. Corredores
30. Microflora	
<b>B.2. FAUNA:</b>	
35. Aves	40. Microfauna
36. Animales terrestres, incluso reptiles	41. Especies en peligro
37. Peces y mariscos	42. Barreras
38. Organismos bentónicos	43. Correos
39. Insectos	

Tabla 6.17 Características Ambientales que pueden ser afectadas en la Matriz de Leopold

<b>C) FACTORES CULTURALES:</b>	
<b>C.1. USOS DEL TERRITORIO:</b>	
44. Espacios abiertos y salvajes	49. Zona residencial
45. Zonas húmedas	50. Zona comercial
46. Selvicultura	51. Zona industrial
47. Pastos	52. Minas y canteras
48. Agricultura	
<b>C.2. RECREATIVOS:</b>	
53. Caza	57. Camping
54. Pesca	58. Excursión
55. Navegación	59. Zonas de recreo
56. Zona de baño	
<b>C.3. ESTÉTICOS Y DE INTERÉS HUMANO:</b>	
59. Vistas panorámicas y paisajes	64. Parques y reservas
60. Naturaleza	65. Monumentos
61. Espacios abiertos	66. Especies o ecosistemas especiales
62. Paisajes	67. Lugares u objetos históricos o arqueológicos
63. Agentes físicos singulares	68. Desarmonías
<b>C.4. NIVEL CULTURAL:</b>	
69. Modelos culturales (estilos de vida)	71. Empleo
70. Salud y seguridad	72. Densidad de población
<b>C.5. SERVICIOS E INFRAESTRUCTURA:</b>	
73. Estructuras	76. Disposición de residuos
74. Red de transportes (movimiento, accesos)	77. Barreras
75. Red de servicios	78. Corredores
<b>D) RELACIONES ECOLÓGICAS:</b>	
79. Salinización de recursos hidráulicos	83. Invasión de maleza
80. Eutrofización	84. Controles biológicos
81. Vectores, insectos y enfermedades	85. Modificación hábitat
82. Cadenas alimentarias	86. Introducción de fauna y flora exótica
<b>E) OTROS:</b>	
88. Otros	

## **6.3.8 Sistema de evaluación ambiental Batelle Columbus**

El sistema de evaluación fue diseñado por los laboratorios Batelle Columbus para evaluar el impacto ambiental de obras de uso y manejo del agua en los Estados Unidos de Norteamérica. Es un método con una estructura jerárquica que utiliza 78 indicadores ambientales. Los indicadores de impacto ambiental deben ofrecer información sobre la condición actual del factor ambiental y pueden utilizarse para determinar el cambio en la calidad asociado a una determinada acción. Son de carácter cuantitativo, es decir, su valor numérico expresa directamente la condición de calidad del elemento. Por ejemplo, en el caso de la calidad del agua la concentración del oxígeno disuelto es un indicador ambiental, ya que a mayor concentración del oxígeno la calidad del agua es mejor, en comparación con un agua que no lo tenga; debido a que como se recordará el oxígeno disuelto es indispensable para la vida acuática y además un agua con oxígeno disuelto no se encuentra en estado séptico. Para estimar el cambio en la calidad a través del uso de indicadores se requieren funciones de transformación que relacionen el valor del parámetro versus la calidad ambiental, de técnicas de muestreo que permitan cuantificar las variables analizadas con el estado del factor ambiental, y también es necesario estimar el cambio en el valor del indicador debido a la acción del proyecto que se analiza a través del uso de modelos, del análisis de casos similares y de la aplicación del juicio profesional.

Los indicadores ambientales deberán cumplir con las siguientes condiciones: a) los cambios en sus valores cuantitativos deben reflejar el cambio en la calidad ambiental del factor analizado, b) deben ser fácilmente medibles en campo y c) deben permitir su pronóstico o predicción, con base en los cambios que pueden provocar las acciones del proyecto. Los indicadores permiten, además, estimar la magnitud del impacto. El método de Batelle Columbus podría aplicarse a la evaluación del impacto ambiental de cualquier tipo de proyecto, en ese caso los responsables deberán seleccionar los parámetros en función de las características del ambiente, de las características e impactos del proyecto, de los conocimientos disponibles, además de su propia experiencia.

El método tiene una estructura jerárquica que incluye 78 parámetros ambientales (indicadores), clasificados en 18 componentes ambientales que a su vez se agrupan en 4 categorías ambientales, figura 6.11.

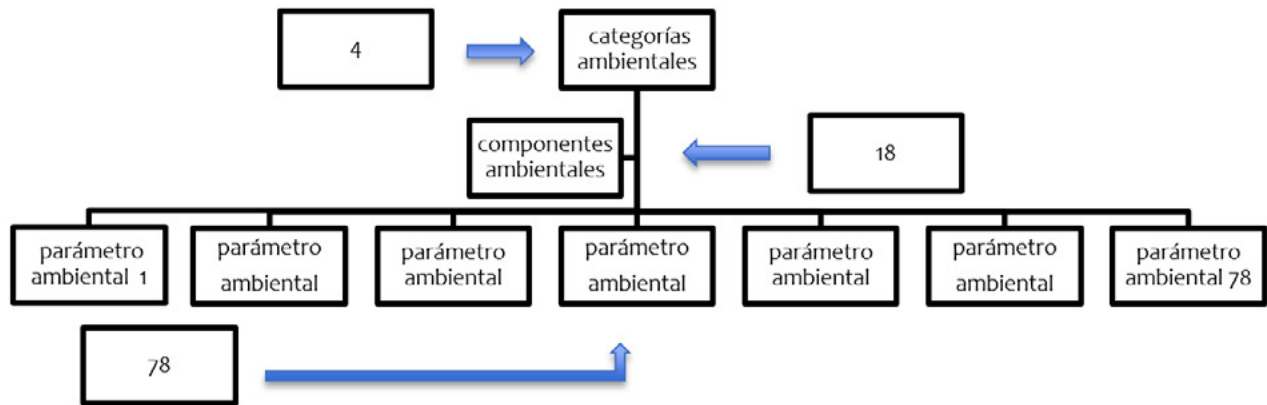


Figura 6.11 Categorías, componentes y parámetros ambientales

Las categorías ambientales son: ecología, contaminación, aspectos estéticos y aspectos de interés humano. Cada una de estas categorías se divide en componentes, los cuales se indican en la tabla 6.18.

Tabla 6.18 Categorías y componentes del Método de Batelle Columbus

<b>Categoría 1 Ecología</b>	Especies y poblaciones Hábitat y comunidades Ecosistema
<b>Categoría 2 Contaminación</b>	Contaminación del aire Contaminación del agua Contaminación del suelo Contaminación por ruido
<b>Categoría 3. Aspectos Estéticos</b>	Suelo Aire Agua Biota Objetos artesanales Composición
<b>Categoría 4. Aspectos de interés humano</b>	Estilos de vida Valores educacionales y científicos Valores históricos Cultura Sensaciones

La estructura completa del Sistema de Evaluación Ambiental se presenta en la figura 6.12, en ella aparecen las unidades de importancia ponderal (UIP) propuestas por Batelle Columbus para cada uno de los parámetros, componentes y categorías. Las UIP son estimadas como se explica más adelante y representan la importancia relativa de los parámetros ambientales en el sistema

de un total de 1000 UIP, las cuales están repartidas en las cuatro categorías ambientales, Ecología (240), Contaminación (402), Aspectos Estéticos (153) y Aspectos de Interés Humano (205). A su vez, cada componente y cada parámetro tiene asignada la correspondiente UIP. Las 1000 UIP fueron propuestas para representar la importancia de cada indicador, componente y categoría; estas fueron obtenidas a partir del método de consulta a expertos para asignar las unidades en función de la importancia que tiene el indicador, componente o categoría; corresponden a los factores ambientales más significativos y que podrían ser afectados por el proyecto. Obsérvese que la categoría que tiene el mayor número de UIP es la de Contaminación con 402 UIP, el Componente es el de Contaminación del agua con 318 UIP y el parámetro o indicador es el OD con 32 UIP, como puede verse en la figura 6.12.

El uso de funciones de transformación y técnicas de muestreo es necesario para estimar la magnitud del impacto. Las funciones de transformación expresan la relación de la magnitud del parámetro versus la calidad ambiental medida en una escala de 0 a 1, donde el cero corresponde a la peor calidad y 1 a la excelente. La tabla 6.19 muestra algunos ejemplos de funciones de transformación propuestas por Batelle Columbus. La forma de la función de transformación (recta, parábola, logarítmica, exponencial, etc.) se determina a través de la consulta a un panel de expertos usando el método Delphi, los cuales definirán cómo es el comportamiento de la calidad del parámetro cuando aumenta o disminuye su valor.

El método de Batelle Columbus establece que la cuantificación del impacto se realiza a través de las unidades de impacto ambiental (UIA), para obtenerlas deberá seguirse el siguiente procedimiento.

- 1) Transformar todos los parámetros a su correspondiente índice de calidad ambiental ( $0 \leq CA \leq 1$ )
- 2) Obtener la importancia relativa del parámetro (UIP), según lo propuesto por el método (consultar la figura 6.16), para otro tipo de proyectos y en sitios diferentes a EUA, deberá hacerse una nueva selección de parámetros que funcionen como indicadores y deberán asignarse las UIP.
- 3) Calcular el impacto como UIA a partir de multiplicar la calidad ambiental por las UIP.

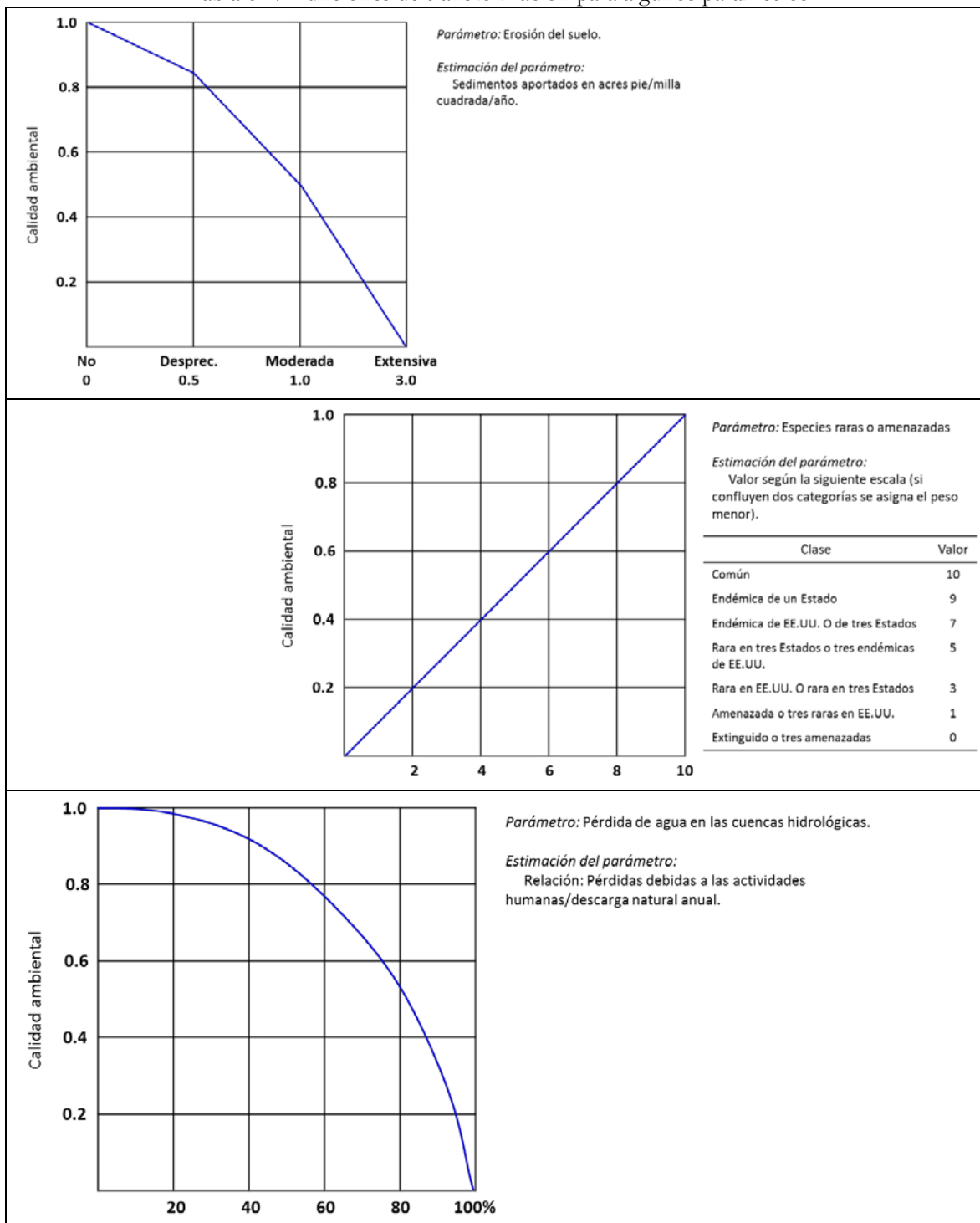
$$UIA = CA \times UIP$$

El método propone el cálculo de las UIA para la condición “con proyecto”, y para la condición “sin proyecto”, para los 78 parámetros de tal forma que las UIA se calcularían como se indica en la siguiente ecuación.

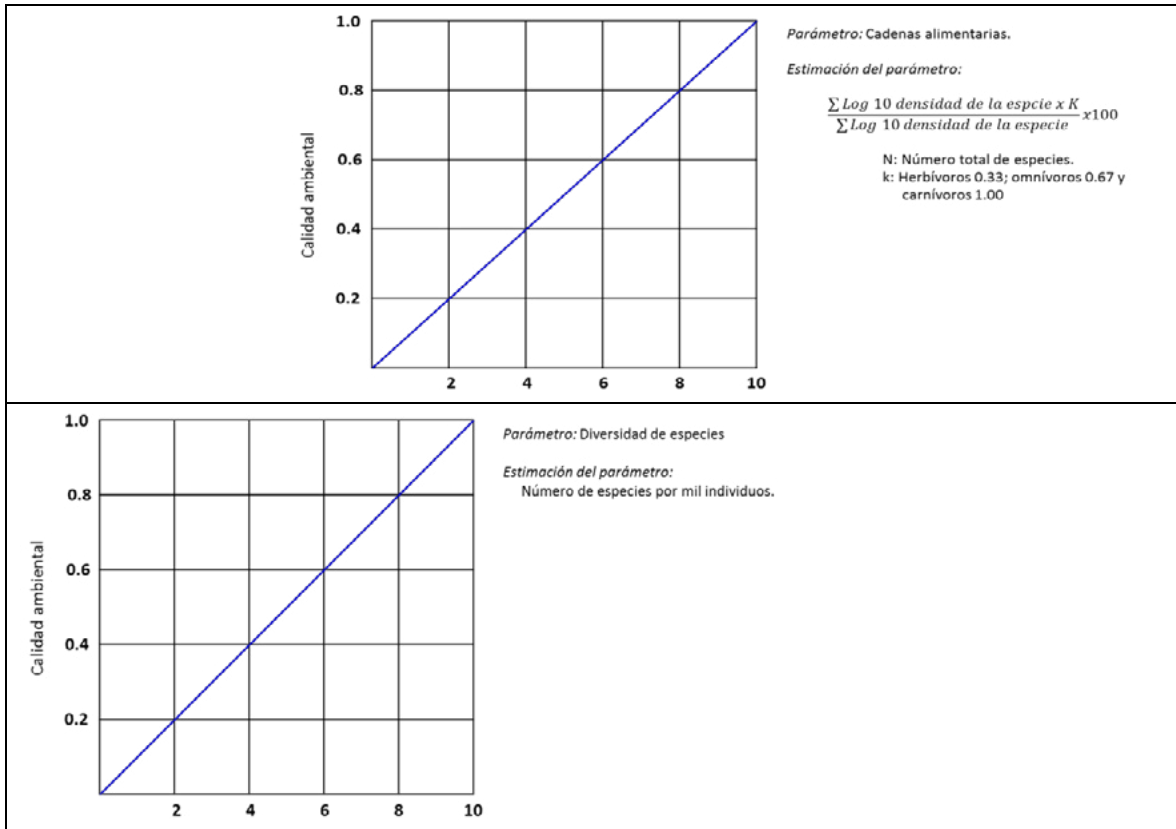
$$\sum_{i=1}^{i=78} (CA_i \times UIP_i) \text{ con proyecto} - \sum_{i=1}^{i=78} (CA_i \times UIP_i) \text{ sin proyecto} = UIA \text{ debidas al proyecto}$$

En el caso de una UIA con signo positivo, quiere decir que el proyecto causa más beneficios, mientras que en un valor negativo la calidad del ambiente disminuye con la realización del proyecto; por tanto, causa un impacto global negativo.

Tabla 6.19 Funciones de transformación para algunos parámetros







Fuente: (Gómez Orea, 2003)

**Problema resuelto 6.1 Cálculo de las unidades de impacto ambiental (UIA)**

Empleando el método de Batelle Columbus se pretende evaluar el impacto ambiental de un proyecto de una planta de tratamiento de aguas residuales. A partir de los registros de mediciones de un río se tienen los datos de parámetros de calidad del agua mostrados en la tabla siguiente.

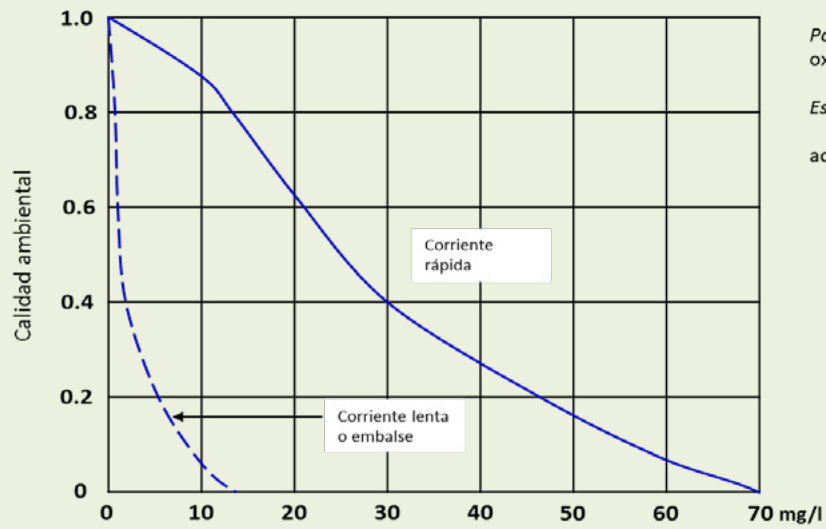
<b>DBO</b>	<b>15 mg/l</b>
<b>Coliformes fecales</b>	100 NMP/100ml
<b>Temperatura</b>	15 °C
<b>Oxígeno Disuelto</b>	8 mg/l (considere que el valor de saturación para el sitio es de 9.0 mg/l)
<b>pH</b>	7 upH

Con base en los registros de proyectos semejantes, además del juicio profesional de los expertos que participan en el estudio, se considera que los valores de los parámetros una vez funcionando el proyecto serían los que se indican en la tabla que se muestra a continuación.

<b>DBO</b>	<b>30 mg/l</b>
<b>Coliformes fecales</b>	1000 NMP/100ml
<b>Temperatura</b>	16 °C
<b>Oxígeno Disuelto</b>	6 mg/l (considere que el valor de saturación para el sitio es de 9.0 mg/l)
<b>pH</b>	6 upH

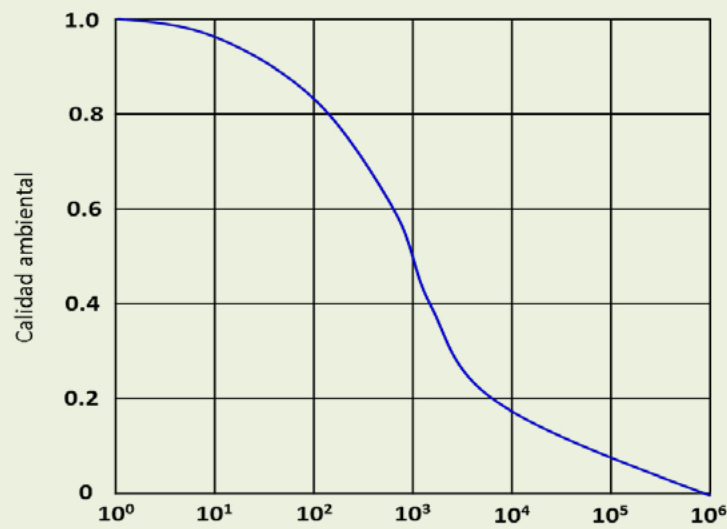
La corriente puede ser considerada rápida, y la temperatura de equilibrio considerando las condiciones geográficas y climatológicas es de 15°C. Calcule las UIA para los cinco parámetros de calidad.

Utilice las siguientes funciones de transformación



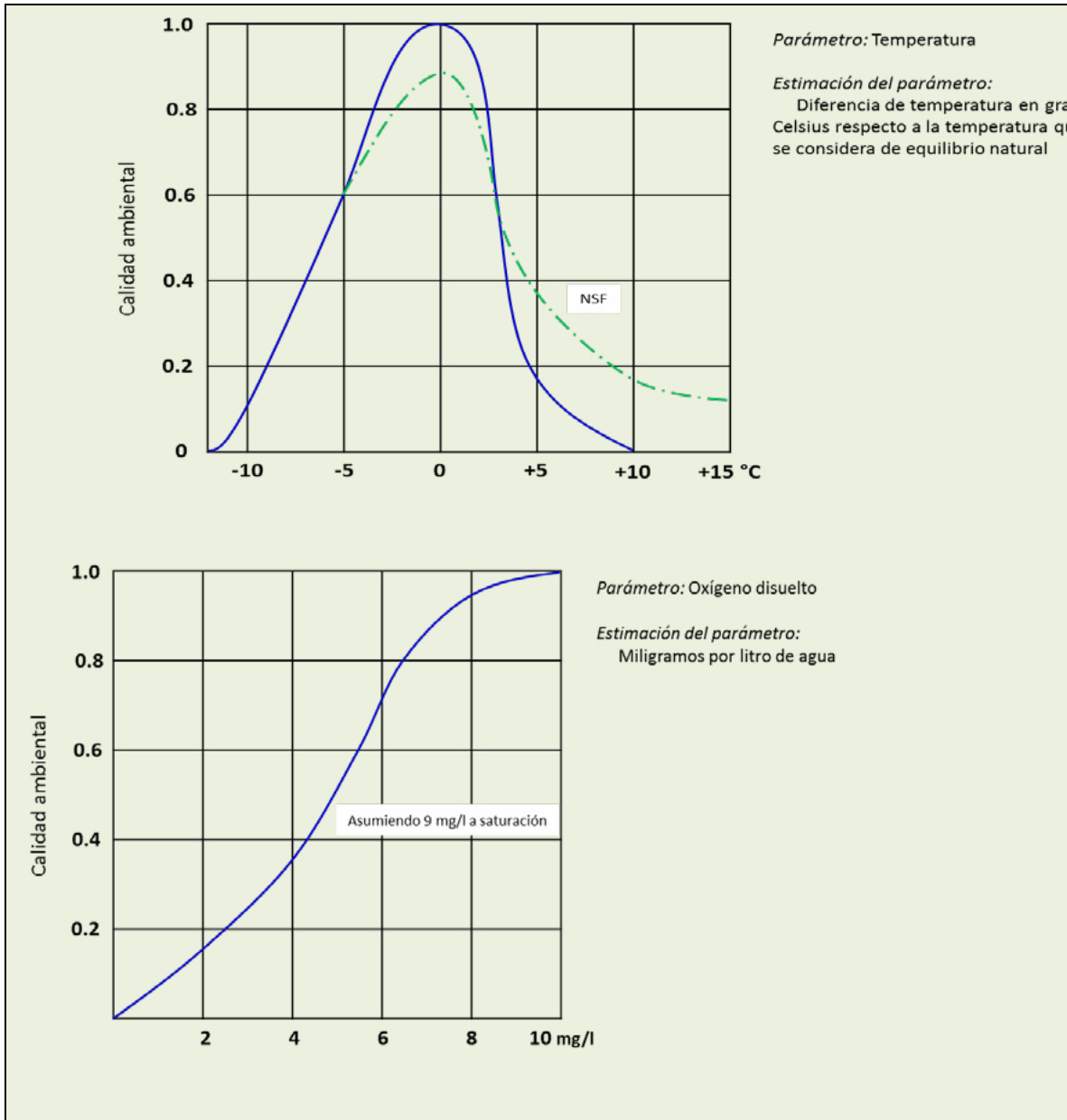
*Parámetro:* Demanda biológica de oxígeno.

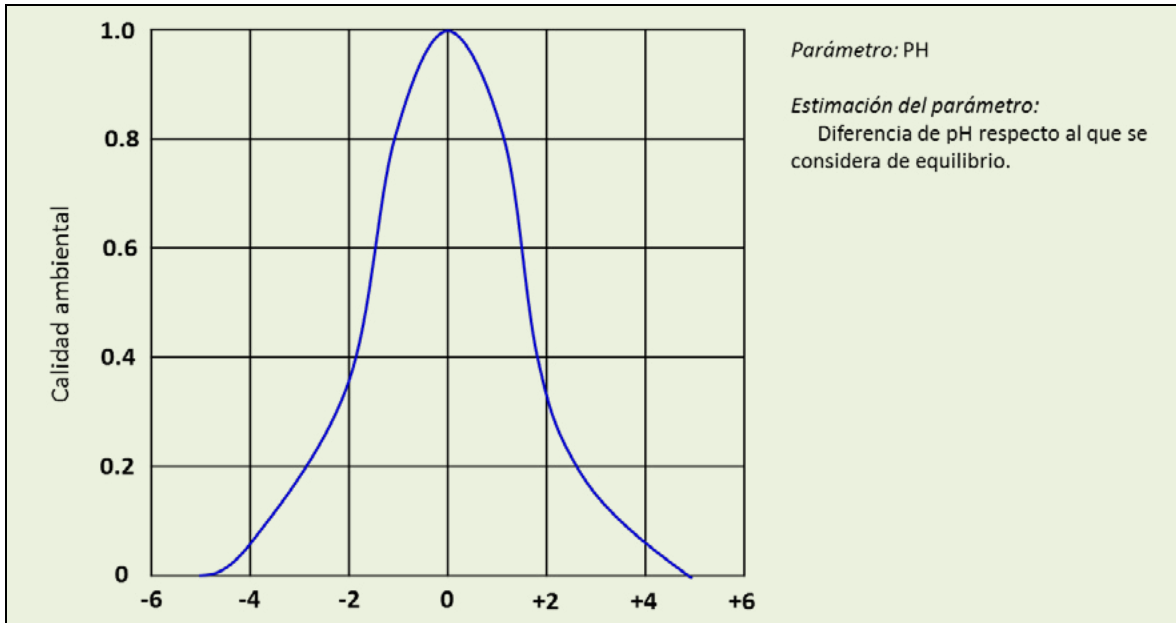
*Estimación del parámetro:*  
Variable según carácter del medio acuático.  
miligramos/litro.



*Parámetro:* Coliformes fecales

*Estimación del parámetro:*  
Unidades convencionales de MPN/100ml.





**Solución**

Debe calcularse las UIA para la condición sin proyecto y para la condición con proyecto y aplicar la siguiente ecuación

$$\sum_{i=1}^{i=78} (CA_{ixUIPi})_{con\ proyecto} - \sum_{i=1}^{i=78} (CA_{xUIP})_{sin\ proyecto} = UIA\ debidas\ al\ proyecto$$

En este caso, quedaría como:

$$\sum_{i=1}^{i=5} (CA_{ixUIPi})_{con\ proyecto} - \sum_{i=1}^{i=5} (CA_{xUIP})_{sin\ proyecto} = UIA\ debidas\ al\ proyecto$$

Primero se obtendrá la calidad ambiental para los 5 indicadores para la condición con y sin proyecto, usando las funciones de transformación.

Parámetro	CA sin proyecto	CA con proyecto
DBO	0.75	0.4
Coliformes fecales	0.82	0.48
Temperatura	1.0	0.98
Oxígeno Disuelto	0.94	0.7
pH	1.0	0.85

Por otra parte, de la Figura 6.12 se tienen las siguientes UIP

Parámetro	UIP
DBO	25
Coliformes fecales	18
Temperatura	28
Oxígeno Disuelto	32
pH	18

A continuación, se calculan las UIA	
$\sum_{i=1}^{i=5} (CAixUIPi) \text{ sin proyecto}$	$\sum_{i=1}^{i=5} (CAixUIPi) \text{ con proyecto}$
$\frac{(0.75)(25)+(0.82)(18)+(1)(28)+(0.94)(32)+(1)(18)}{109.59}$	$\frac{(0.4)(25)+(0.48)(18)+(0.98)(28)+(0.7)(32)+(0.85)(18)}{83.78}$
$\sum_{i=1}^{i=5} (CAixUIPi) \text{ con proyecto} - \sum_{i=1}^{i=5} (CAixUIPi) \text{ sin proyecto} = \text{UIA debidas al proyecto}$	
<p>UIA debidas al proyecto = -25.81 en los 5 parámetros</p>	
<p>En este caso puede observarse que el proyecto afectará negativamente a la calidad de los cinco parámetros analizados. Obviamente para determinar el impacto global del proyecto será necesario extender el cálculo a 78 indicadores que considera el método.</p> <p>Es pertinente enfatizar que el método permite calcular las UIA globales (para los 78 parámetros ambientales), y no necesariamente todos son afectados negativamente aun cuando el resultado integral sea negativo.</p>	

### 6.3.9 Diagramas de redes de impacto

Esta metodología resulta ser de mucha utilidad para identificar relaciones de causalidad, es decir a partir de una acción del proyecto se identifican los impactos primarios, secundarios, terciarios. Es adecuada para identificar impactos indirectos y permite hacer un análisis de causalidad, pero no permite la cuantificación de impactos. Resultan de mucha utilidad en la identificación de impactos de proyectos complejos y también para presentar los impactos globales del proyecto. La figura 6.13 presenta la red de impactos correspondientes a las etapas de localización y preparación del sitio y de construcción, la figura 6.14 muestra un proyecto de producción agrícola en etapa de operación en particular en la aplicación de fertilizantes, la figura 6.15 presenta la red de impactos para el caso del proyecto de una presa, la figura 6.16 incluye los impactos producidos por la construcción de un puente , y finalmente la figura 6.17 muestra la red de impactos debidos al desmonte de un terraplén.

**INGENIERÍA AMBIENTAL**  
Aplicaciones

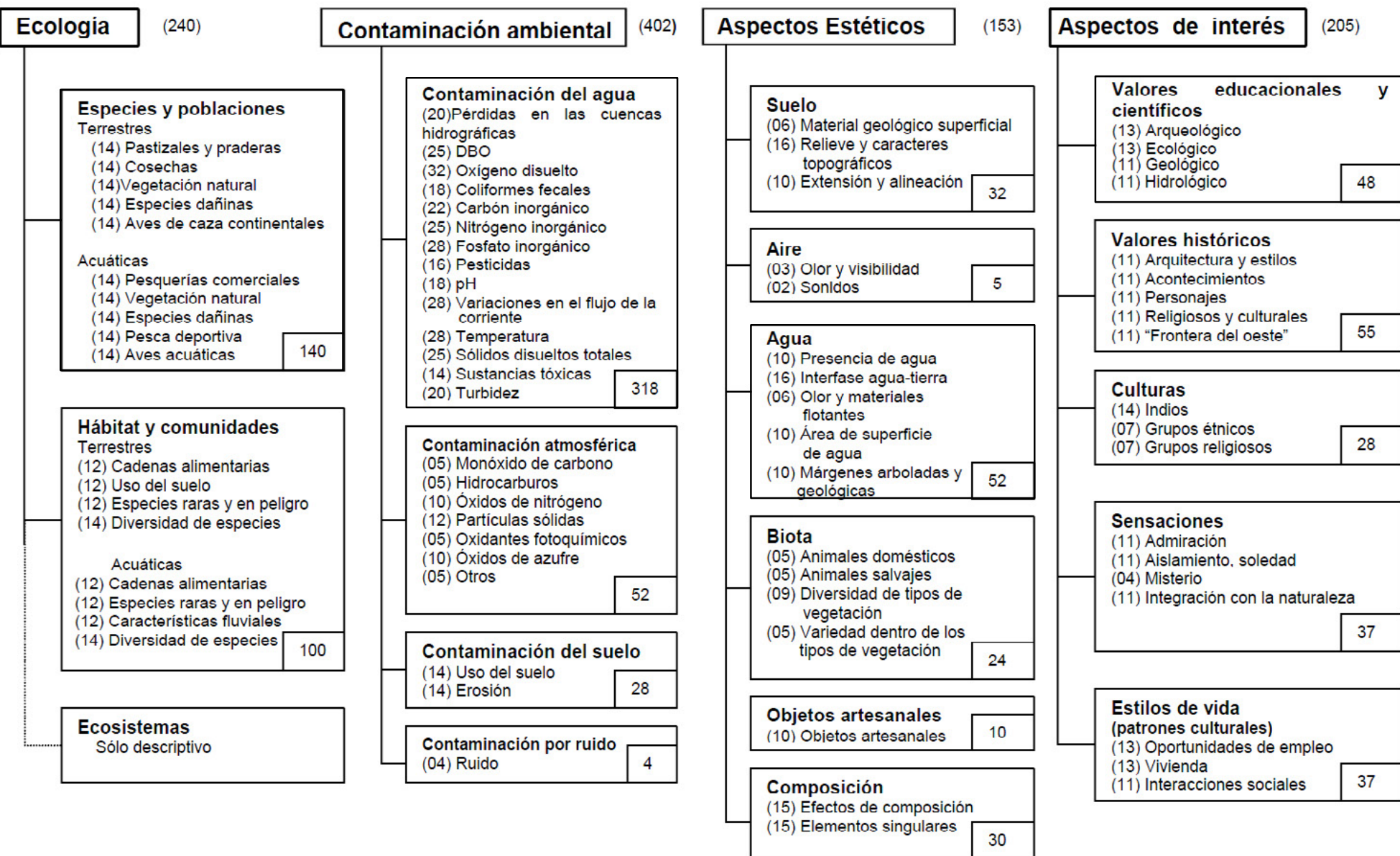


Figura 6.12 Sistema de Evaluación Ambiental Battelle-Columbus

**INGENIERÍA AMBIENTAL**  
Aplicaciones

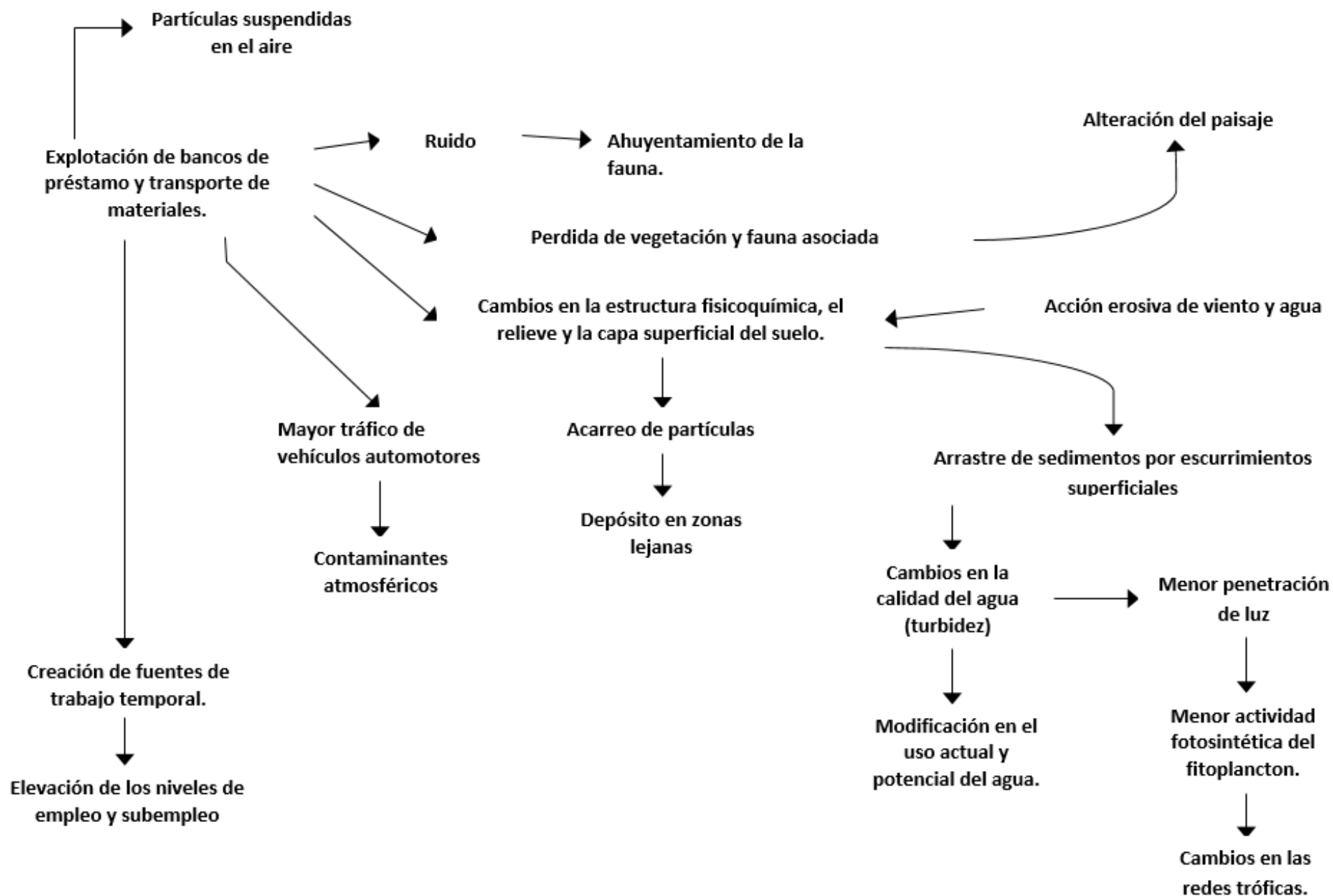


Figura 6.13 Etapas de localización y preparación del sitio y de construcción  
Fuente: (Gómez Orea, 2003)

**INGENIERÍA AMBIENTAL**  
Aplicaciones

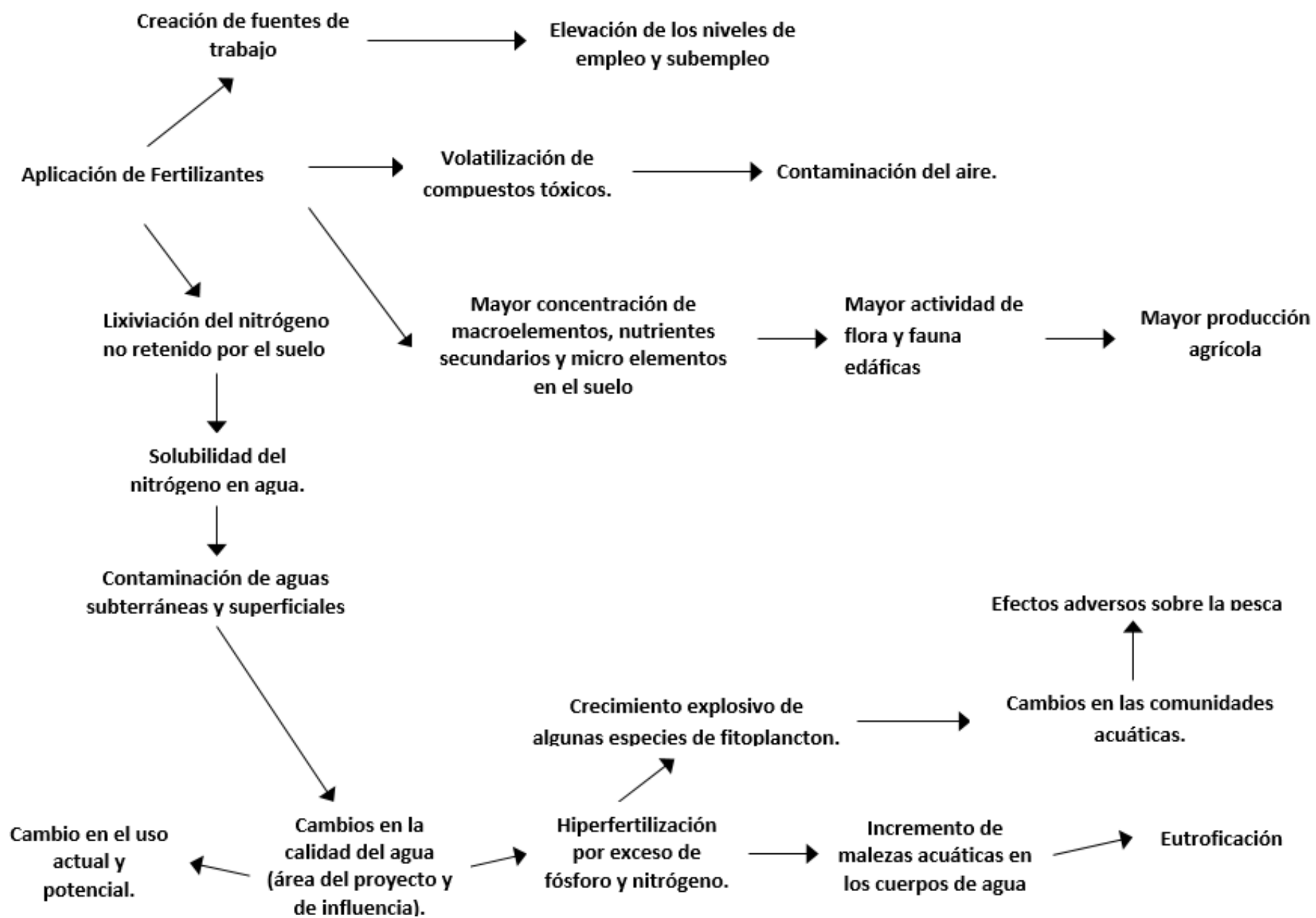


Figura 6.14 Etapa de operación de un proyecto de producción agrícola (aplicación de fertilizantes)  
Fuente: (Gómez Orea, 2003)



**INGENIERÍA AMBIENTAL**  
Aplicaciones

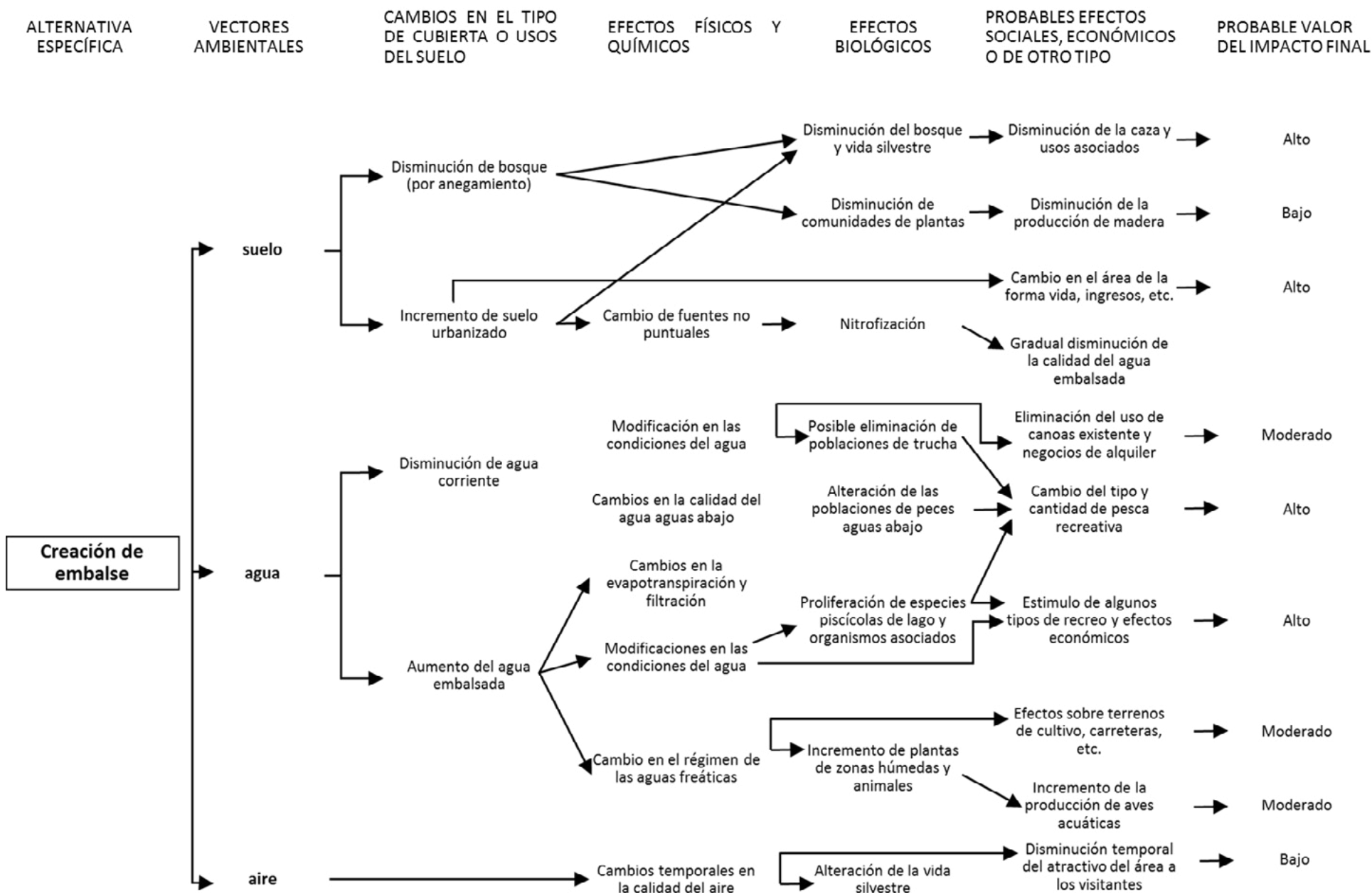


Figura 6.15 Proyecto de una presa  
Fuente: (Canter, 2002)

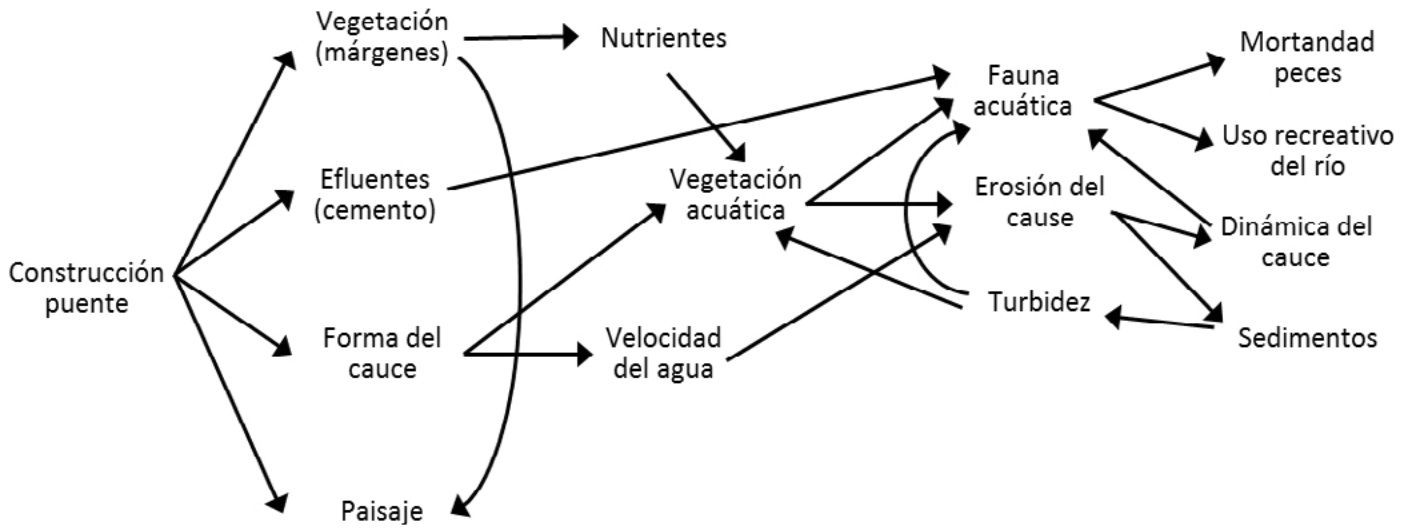


Figura 6.16 Construcción de un puente

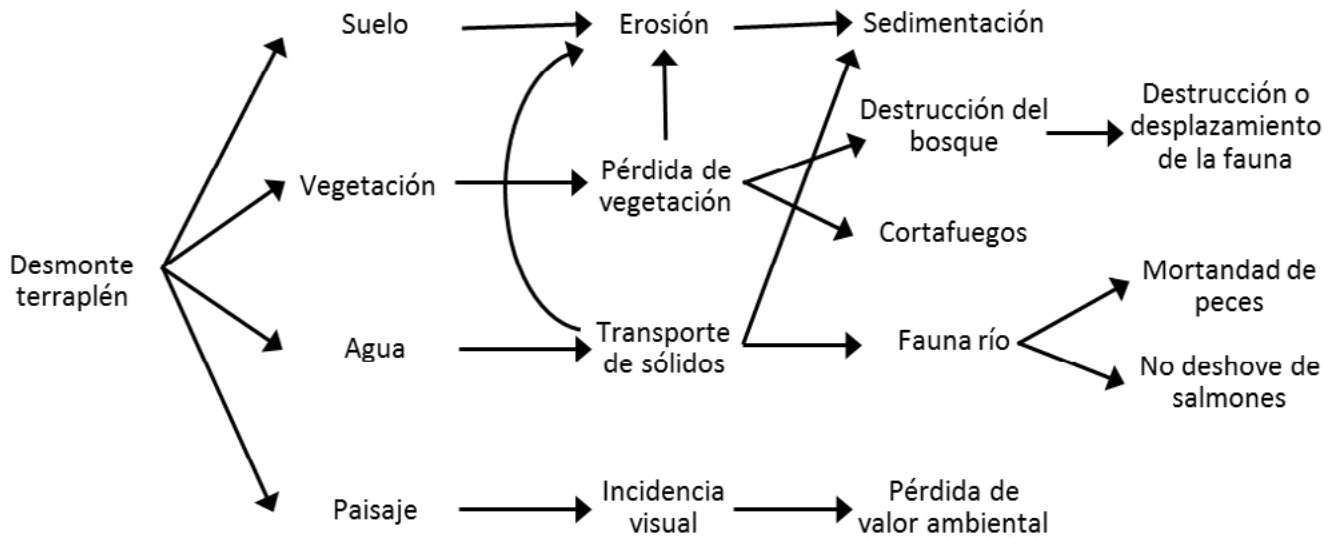


Figura 6.17 Desmonte de terraplén



**Actividad 6.3.**

**Técnicas para estudiar el impacto ambiental**

**Descarga la manifestación de impacto ambiental (MIA) de la propuesta de un nuevo aeropuerto internacional. Desarrolla las actividades que se solicitan en la actividad en el SIGEIA de Semarnat**

**6.4 Explicación de las técnicas más adecuadas a las condiciones nacionales**

Las técnicas para la evaluación del impacto ambiental han sido diseñadas en países con nivel de desarrollo diferente al de México; sin embargo, los métodos son sistemáticos, por lo que su aplicación resulta posible, dependiendo de las necesidades del proyecto y de la información y recursos disponibles para el análisis. La calidad de la evaluación dependerá en buena medida de la calidad y cantidad de información, de los recursos que se destinen y del conocimiento que se adquiera de la zona de estudio, más que de la selección de una técnica. De hecho, como se ha establecido resulta necesario aplicar varias de ellas en la EIA para poder cumplir con los objetivos de: identificación, predicción, evaluación y comunicación. Por tal motivo, la tabla 6.19 muestra las ventajas, desventajas y los objetivos que pueden satisfacerse con la aplicación de las técnicas presentadas en la sección anterior.

Tabla 6.19 Características de las técnicas usadas para la EIA

<b>Técnica</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>	<b>Propósito que satisface</b>
<b>Listados</b>	<p>El uso de listados que han sido diseñados para evaluar distintos proyectos permite que ningún factor ambiental sea omitido del análisis.</p> <p>Adecuado para iniciar la EIA, para la identificación de impactos.</p> <p>Facilita una comparación de alternativas de proyecto.</p>	<p>No identifica impactos como consecuencia de la ocurrencia de impactos primarios.</p> <p>No estima la probabilidad de ocurrencia del impacto.</p> <p>No permite la localización espacial de los impactos.</p> <p>No asigna un orden de importancia de los impactos.</p>	<p>Identificación y descripción de impactos.</p>
<b>Panel de expertos y método de Delphi</b>	<p>Estas técnicas son las que permiten lograr la multi e interdisciplinariedad requeridas en los EIA.</p> <p>Se identifican los impactos más significativos, las necesidades de información o estudios requeridos, las medidas de mitigación y las de seguimiento y control.</p>	<p>Una de las posibles desventajas es lograr un panel de expertos con amplia experiencia y con el perfil requerido de acuerdo con el área y tipo de proyecto.</p>	<p>Trabajo multi e inter disciplinario.</p> <p>Identificación y descripción de impactos.</p> <p>Predicción y evaluación de los impactos.</p> <p>Propuesta de medidas de mitigación.</p>

<b>Técnica</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>	<b>Propósito que satisface</b>
	Al aplicar el método Delphi se logra consenso en cuanto a la importancia de cada factor ambiental.		
<b>Mc Harg</b> <b>Sistemas de selección geográfica</b>	<p>Facilita el análisis para definir la mejor ubicación del proyecto.</p> <p>Para el caso de infraestructura de tipo lineal como: carreteras, ferrocarriles, líneas de transmisión de energía eléctrica, gasoductos y otros, se puede obtener el mejor trazo (minimizando los impactos ambientales directos adversos).</p> <p>Identificación de áreas más vulnerables a impactos.</p> <p>Ubicación espacial de impactos ambientales.</p>	<p>La principal desventaja es que no permite identificar impactos indirectos, impactos que ocurran más allá de las fronteras del área del proyecto.</p> <p>No permite estimar la probabilidad de ocurrencia y las condiciones de los impactos.</p>	<p>En la planeación para la selección geográfica de las mejores alternativas en función de la vocación del suelo.</p> <p>Para la identificación de impactos primarios, y la cuantificación de áreas de afectación con diversos usos.</p>
<b>Modelos</b>	Permite la predicción de la magnitud del impacto; sin embargo, esa predicción dependerá de la información disponible.	<p>Suficiente cobertura de datos en el sentido espacial y temporal.</p> <p>Calidad y validación de datos.</p> <p>Algunos modelos requieren una gran cantidad de datos y un alto costo de adquisición.</p>	Para la predicción de los impactos.
<b>Valoración cualitativa y cuantitativa</b>	Facilita la unificación de los criterios para calificar los impactos, permitiendo realizar una evaluación.	Debe intervenir un grupo multidisciplinario, para que la valoración no sea una opinión personal.	Para la evaluación y comunicación de resultados.
<b>Diagramas de redes</b>	<p>Permite el análisis detallado de impactos para una acción. Identificando impactos primarios, secundarios, terciarios, etc.</p> <p>Permite comunicar las modificaciones ambientales de una acción.</p>	No permite conocer la magnitud ni la importancia de un impacto.	Para la identificación y descripción de los impactos.
<b>Matrices</b>	<p>Posibilidad de uso como matriz de identificación, de evaluación y de comunicación.</p> <p>Garantía de incluir todas las posibilidades de parejas “acción del</p>	Pueden llegar a ser muy extensas, requieren una justificación para cada celda de los criterios de evaluación (interacción entre la acción-factor ambiental).	Para la identificación, evaluación y comunicación de resultados.

Técnica	Ventajas	Desventajas	Propósito que satisface
	<p>proyecto versus factor ambiental afectable”.</p> <p>Idealmente para la identificación, aunque con la ayuda de otras técnicas para la evaluación.</p> <p>Permiten calcular el impacto ambiental por acción o factor ambiental y global.</p> <p>Permite tener una visión integral de los impactos que producen las acciones del proyecto sobre los factores ambientales por etapas. Efectiva para la comunicación de resultados.</p>	<p>En el caso de las matrices de identificación, y debido a que la identificación de impactos se realiza por casillas separadas en la matriz, se induce a pensar en impactos aislados, cuando en realidad se tienen varios sistemas interrelacionados, repercutiendo los impactos de éstos unos sobre otros, acumulándose, o compensándose.</p>	
<b>Batelle-Columbus</b>	<p>Permite calcular las unidades de impacto ambiental a partir de la condición “sin proyecto” y “con proyecto”.</p> <p>Permite la comparación entre proyectos o entre alternativas de proyecto, a partir de las unidades de impacto ambiental (UIA).</p> <p>Provee de un método para asignar unidades de importancia y para el cálculo de calidad ambiental a partir de funciones de transformación.</p> <p>Facilita la comparación entre alternativas.</p>	<p>Es una técnica que requiere una gran cantidad de datos del sitio del proyecto. Requiere apoyarse en el juicio profesional y en los modelos para pronosticar cómo se modificarían los parámetros ambientales.</p>	<p>Para la evaluación de los impactos.</p>

## 6.5 Estudio de caso

En esta sección se analiza el impacto ambiental de un tipo de proyecto de infraestructura, *las carreteras*, que primero serán motivo de estudio por sus características generales y por las modificaciones al ambiente que generan, y luego se tratarán a través de algunos ejemplos particulares.

Una carretera está constituida por un conjunto de elementos que conforman una vía terrestre acondicionada para el tránsito de vehículos automotores con neumáticos. Una característica de este tipo de proyectos es que son lineales, lo que implica que atravesarán diversos escenarios ambientales, caracterizados por: variedad de ecosistemas, clases de suelos, topografía, geología, cuencas hidrológicas, etc. Aparentemente provocan un impacto ambiental mínimo porque las carreteras tienen

la propiedad de ser estrechas; sin embargo, si se considera que tienen una longitud considerable, además de que su estrechez es incrementada por el derecho de vía, puede haber áreas afectadas considerables. Algunos de los impactos más significativos de las carreteras son: el efecto barrera que provoca la separación de zonas ecológicas homogéneas, lo que a su vez conlleva a la modificación de la zonificación e intercambio de especies de fauna, y la afectación en el drenaje natural, entre otros. Es importante considerar que el uso del suelo debe ser compatible con su vocación natural y no afectar el equilibrio de los ecosistemas. Para lograrlo, se debe llevar a cabo una exploración exhaustiva de las posibles alternativas de localización del trazo de carreteras de forma que se garantice la maximización de la aptitud de uso y se disminuya el conflicto con otras actividades. Dadas estas características de las carreteras, una de las técnicas adecuadas para la identificación y análisis de impactos son los sistemas de información geográfica, ya que es necesario hacer el análisis espacial de las diversas alternativas de trazo con los instrumentos que establecen la vocación o aptitud del suelo, como los ordenamientos ecológicos del territorio (general, regional, local y marino), los sitios Ramsar, los sitios de patrimonio mundial, las áreas naturales protegidas y otras modalidades de conservación, entre otros.

Una síntesis del impacto ambiental de las carreteras, así como el compromiso de minimizarlo es expresado por Gómez Orea.

Toda actividad humana, en este caso la construcción y operación de carreteras, se ubica necesariamente en un entorno que fuera de los centros de población está ocupado por ecosistemas con los cuales interactúa en un tiempo y un espacio físico que se ocupa y modifica (derecho de vía), en términos de las entradas (agua, energía, recursos naturales, materias primas) y salidas (gases, polvo, luz, energía, ruido, líquidos contaminados por sustancias tóxicas); con los cuales debe formar un sistema armónico y funcional, medida de su sustentabilidad y de su contribución al desarrollo. (Gómez Orea, 2003)

### 6.5.1 Impactos ambientales potenciales de las carreteras

Los impactos ambientales de las carreteras se presentan según la etapa del proyecto, durante la construcción, operación y mantenimiento. La tabla 6.20 presenta un resumen de los impactos ambientales potenciales por factor ambiental y por etapa del proyecto.

Tabla 6.20 Impactos potenciales de la construcción de carreteras

	<b>Construcción</b>	<b>Operación</b>	<b>Construcción</b>	<b>Operación</b>
	<b>Impactos Directos</b>		<b>Impactos Indirectos</b>	
	<b>Corto plazo</b>	<b>Largo plazo</b>	<b>Corto plazo</b>	<b>Largo Plazo</b>
<b>Ambiente Físico</b>				
<b>Suelo</b>	Erosión del suelo en los lugares de préstamo, en los taludes	Pérdida recursos renovables en el área ocupada por la carretera y el	Pérdida en la productividad de la tierra debido a la	Tala de bosques y la conversión a terrenos para pastura o agricultura en áreas impropias para estos

	<b>Construcción</b>	<b>Operación</b>	<b>Construcción</b>	<b>Operación</b>
	<b>Impactos Directos</b>		<b>Impactos Indirectos</b>	
	<b>Corto plazo</b>	<b>Largo plazo</b>	<b>Corto plazo</b>	<b>Largo Plazo</b>
		cambio en el uso del suelo	compactación con la maquinaria pesada	usos, resultando en la utilización insostenible y la degradación del suelo
	Afectación del paisaje por los terraplenes y cortes profundos, rellenos y canteras	Erosión de las tierras debajo de lecho de camino, que reciben el flujo concentrado de los drenajes tapados o abiertos		Destrucción de las áreas y ambientes para actividades recreativas que son accesibles por el camino
	Contaminación del suelo por los desechos peligrosos como aceite, grasa, combustible, y pintura y desechos de los trabajadores (orgánico e inorgánico) en los sitios de trabajo	Deslaves, hundimientos, deslizamientos y demás movimientos masivos en los cortes de caminos		
	Material de cortes del camino puede matar la vegetación y añadir a la erosión y los problemas de la estabilidad	Aumento en superficie pavimentada que resulta en mayor escorrentía		
	Pérdida del suelo debido a la compactación con la maquinaria pesada	Afectación al paisaje		
		Esparcimiento de basura por el camino		
<b>Agua</b>	Aumento de la sedimentación en ríos por la erosión en los sitios de construcción	Modificación de drenaje superficial y subterráneo	La modificación de drenaje superficial y subterráneo puede tener como resultado la pérdida de agua para el consumo doméstico y la agricultura	La modificación de drenaje superficial y subterráneo puede tener como resultado la pérdida de agua para beber, para la agricultura, y para los

	<b>Construcción</b>	<b>Operación</b>	<b>Construcción</b>	<b>Operación</b>
	<b>Impactos Directos</b>		<b>Impactos Indirectos</b>	
	<b>Corto plazo</b>	<b>Largo plazo</b>	<b>Corto plazo</b>	<b>Largo Plazo</b>
				hábitats terrestre y acuático
	Destrucción y/o daño de los canales de riego	Modificación de terreno aluvial que aumenta el flujo, lo que puede resultar en erosión e inundación		Acidificación del agua superior por la contaminación del aire
	Contaminación del agua superficial y subterránea con los desechos orgánicos e inorgánicos de los trabajadores en los sitios de trabajo	Aumento en la sedimentación en ríos por la escorrentía y la erosión		Contaminación del agua superficial y subterránea por derrame de materiales tóxico y/o peligroso en los caminos
	Contaminación del agua superficial y subterránea con aceite, grasa, combustible, y pintura en los patios para el equipo	Aumento en la escorrentía por el incremento en la superficie pavimentada		Aumento en el consumo del agua potable (aumento en la carga de la infraestructura del agua y alcantarilla)
	Contaminación del agua superficial y subterránea por el uso de los herbicidas (control de plantas) y químicos (control de polvo) en el camino	Contaminación del agua con aceite, grasa, combustible etc. por la escorrentía		
		La contaminación del agua superficial y subterránea por el uso de herbicidas (control de plantas) y químicos (control de polvo) en el camino		
<b>Aire</b>	Contaminación de la calidad del aire por el	Contaminación de la calidad del aire por la emisión de vehículos (monóxido de		Contaminación de la calidad del aire, que tiene afectaciones a la



	<b>Construcción</b>	<b>Operación</b>	<b>Construcción</b>	<b>Operación</b>
	<b>Impactos Directos</b>		<b>Impactos Indirectos</b>	
	<b>Corto plazo</b>	<b>Largo plazo</b>	<b>Corto plazo</b>	<b>Largo Plazo</b>
	polvo de la construcción	carbono, óxido de nitrógeno, plomo, compuestos orgánicos volátiles partículas, etc.		flora, fauna y las personas
	Contaminación de la calidad del aire por los desechos sólidos que son incendiados por los trabajadores			
<b>Tránsito</b>	Condiciones peligrosas de tránsito que interfieren con caminos existentes debido a los camiones pesados que transportan materiales desde y hacia los sitios de construcción	Condiciones peligrosas de tránsito donde hay cruce con caminos existentes	Condiciones peligrosas de tránsito en el cruce con caminos existentes (accidentes)	Congestión del tránsito
	Obstrucción de rutas aumentando el tiempo de viaje.	Interrupción del transporte no motorizado e incremento de los peligros para peatones y la fauna		Aumento de tránsito por otros tipos de transporte
<b>Ruido</b>	Ruido generado por el equipo de construcción	El ruido generado por los vehículos (los altos niveles de ruidos pueden causar interferencia a la conversación, el sueño. La exposición crónica al ruido puede causar la pérdida de oído)		Transporte motorizado resultando en mayor ruido
	Afectación a los trabajadores si no usan medidas de seguridad indicadas			

	<b>Construcción</b>	<b>Operación</b>	<b>Construcción</b>	<b>Operación</b>
	<b>Impactos Directos</b>		<b>Impactos Indirectos</b>	
	<b>Corto plazo</b>	<b>Largo plazo</b>	<b>Corto plazo</b>	<b>Largo Plazo</b>
<b>Ambiente Biótico</b>				
	Destrucción y/o daño de los hábitats y las plantas y animales silvestres en el área ocupada por la carretera	La modificación del drenaje superficial y subterráneo puede resultar en cambios en la hábitat terrestre y acuático	Eutrofización por los desechos (orgánico), la escorrentía que puede llevar más materia orgánica	Afectaciones a flora y la fauna por el desarrollo tales como pérdida de hábitat, caza ilegal, eutrofización
	Destrucción o daño de las plantas y animales acuáticos por la mayor sedimentación y contaminación (debida a la erosión de los cortes de camino, disminución de la calidad del agua y mayor sedimentación, aguas abajo)	Destrucción o daño de las plantas y animales acuáticos por la mayor sedimentación y contaminación (debida a la erosión, disminución de la calidad del agua y mayor sedimentación, aguas abajo)		Fragmentación de los hábitats que pueden tener como resultado disminución las oportunidades de sobre vivencia
<b>Recursos bióticos</b>	Destrucción o daño a las especies en peligro de extinción, o en estado crítico	Fragmentación del hábitat por el camino que puede resultar en la disminución de las oportunidades de sobre vivencia para la flora y la fauna		Absorción de contaminantes tóxicos puede causar un efecto en la cadena alimenticia
	Destrucción o daño de la única área de reproducción	Interferencia con el crecimiento de las plantas junto al camino, debido al polvo que se levanta al pasar los vehículos (disminución del proceso de fotosíntesis y polinización)		Acidificación de los sistemas acuáticos que puede causar muerte de la flora y fauna acuática

	<b>Construcción</b>	<b>Operación</b>	<b>Construcción</b>	<b>Operación</b>
	<b>Impactos Directos</b>		<b>Impactos Indirectos</b>	
	<b>Corto plazo</b>	<b>Largo plazo</b>	<b>Corto plazo</b>	<b>Largo Plazo</b>
<b>Recursos Bióticos</b>	Interrupción de las rutas de movimiento de la vida silvestre y el ganado	Contaminación de la calidad del aire y polvo afectando a la fauna		Exposición a monóxido de carbono, óxido de nitrógeno, ozono que puede causar necrosis localizada de la hoja
	Caza o pesca ilegal por la parte de los trabajadores de construcción	Contaminación de los hábitats y ecosistemas (terrestre y acuático) por el uso de herbicidas (control de plantas) y químicos (control de polvo) en el camino		Aumento en la actividad humana asociado con incidentes más frecuentes de fuegos, que pueden tener impactos repentinos, severos y amplios
		Interrupción de las rutas de migración para la vida silvestre y el ganado y choques contra animales terrestres		
<b>Ambiente Humano</b>				
<b>Ambiente Humano</b>	Desplazamiento y repoblación forzada de las personas que viven en la ruta (derecho de vía)	Disrupción de la vida tradicional resultando en la pérdida de la identidad tradicional	Creación temporal de hábitats de reproducción para mosquitos vectores de enfermedades (p. ej. estanques, canteras)	Problemas sociales y de la salud (físico y psicológico) tales como las enfermedades, el abuso de alcohol, el desempleo debido a la pérdida de la vida tradicional
	Disrupción de la vida tradicional resultando en la pérdida de la identidad tradicional	Desplazamiento y repoblación forzada de las personas que viven en la ruta (derecho de vía)	Aumento de prostitución y delincuencia	Disrupción de los cultivos tradicionales que pueden resultar en la pérdida de las fuentes tradicionales de nutrición con impactos negativos a la salud

	<b>Construcción</b>	<b>Operación</b>	<b>Construcción</b>	<b>Operación</b>
	<b>Impactos Directos</b>		<b>Impactos Indirectos</b>	
	<b>Corto plazo</b>	<b>Largo plazo</b>	<b>Corto plazo</b>	<b>Largo Plazo</b>
	Afectación al desarrollo de la caza, la pesca y la recolección	La degradación de recursos de agua dulce tiene impactos negativos a la salud y el costo de agua potable y agua industrial	Aumento de las actividades comerciales y empleo temporal	Desarrollo planificado e invasión ilegal de las tierras natales de los indígenas, por los ocupantes o cazadores ilegales, causando serios trastornos sociales y económicos
	Las degradaciones de los recursos de agua dulce tienen impactos negativos a la salud y el costo de agua potable y agua industrial y también el consumo doméstico y el agua tratada para la agricultura	Disminución de las actividades tradicionales debido a los cambios en el uso de tierra, los tipos de las industrias		Afectación a la salud por la contaminación del agua, por comer alimento contaminado (plantas, pescado etc.)
	División de las comunidades por el corte de las rutas tradicionales del viaje y/o comunicación	Contaminación de la calidad del aire y el polvo de resultando en enfermedades respiratorias		Demanda excesiva de servicios públicos debido a desarrollo no planificado
<b>Ambiente Humano</b>	Contaminación de la calidad del aire por el polvo de los caminos resultando en enfermedades respiratorias y afectaciones a los cultivos	Contaminación de la calidad del aire la emisión por los vehículos. Niveles altos de contaminación atmosférica perjudican directamente a personas que padecen asma y otros tipos de enfermedad pulmonar o cardiaca y también al ganado y a los cultivos		Impedimento de la economía del transporte no motorizado debido en cambios en el uso del suelo y/o mayor disponibilidad de alternativas motorizadas

<b>Construcción</b>	<b>Operación</b>	<b>Construcción</b>	<b>Operación</b>
<b>Impactos Directos</b>		<b>Impactos Indirectos</b>	
<b>Corto plazo</b>	<b>Largo plazo</b>	<b>Corto plazo</b>	<b>Largo Plazo</b>
Condiciones peligrosas de tránsito que interfieren con caminos existentes	Riesgos de accidentes asociados con el tránsito y el transporte vehicular que pueden causar derrames de materiales tóxico y/o peligrosos, lesiones y muerte		Aumento de actividad comercial
Pérdida del empleo debido a obstrucción de negocios por actividades de construcción	Aumento del empleo debido a desarrollo inducido		
Contaminación de la calidad del aire la emisión por los vehículos. Niveles altos de contaminación atmosférica perjudican directamente a personas que padecen de asma y otros tipos de enfermedad pulmonar o cardiaca	Interrupción del transporte no motorizado en la ruta de la carretera, debido al paso reducido u obstaculizado		
Caza o pesca ilegal por parte de los trabajadores de construcción	Obstrucción de rutas aumentando el tiempo de viaje		
	Ruidos altos pueden causar interferencia a la conversación, el sueño y también afecta el sistema nervioso		
	Ruido en receptores sensibles como los		

Construcción	Operación	Construcción	Operación
Impactos Directos		Impactos Indirectos	
Corto plazo	Largo plazo	Corto plazo	Largo Plazo
		centros educativos, los hospitales, las iglesias, etc.	

Fuente: Modificado de (Dirección General de Asuntos Socio-Ambientales) cómo se cita en (Banco Mundial, 1994) (Mundial, 1997) (BID, 1997) (EPA, 1999)

## 6.5.2 Ejemplos de impactos ambientales provocados por carreteras y algunas medidas de prevención y mitigación

Se presentan a continuación algunos ejemplos de los impactos ambientales adversos debidos a la construcción y operación de carreteras; así como las medidas de mitigación que pueden adoptarse.

### Impactos ambientales directos

*Deslaves, hundimientos, deslizamientos y demás movimientos masivos en los cortes de caminos*

Las actividades que se llevan a cabo de cortes y rellenos, con suelos sin estabilizar causan la pérdida de este y obstruyen el flujo natural del agua. Taludes con pendientes pronunciadas, sin una protección de vegetación o física, causan el arrastre del suelo, que puede afectar a la fauna y además incrementa el transporte de sólidos hacia los cuerpos de agua, aumentando su turbiedad y afectando la calidad del agua y al ecosistema acuático, figura 6.18. Por otra parte, el arrastre provoca un deterioro en el pavimento y en las obras de drenaje, lo cual aumenta los costos de operación y mantenimiento.



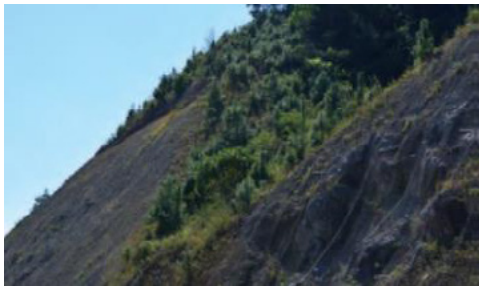
Figura 6.18 Material de corte en talud sin estabilizar  
Fuente (SCT, 2016)

### Medida de prevención

Como parte del análisis de las alternativas de trazo de la carretera, es importante considerar aquel trazo que se ajuste mejor a los contornos naturales, reduciendo los cortes y rellenos.

### Medida de mitigación

Deben incorporarse acciones para prevenir y reducir la erosión, por ejemplo, la reforestación y el uso de las geomallas que den estabilidad al talud. Por otra parte, deben diseñarse obras adecuadas de drenaje, que sean capaz de desalojar la precipitación pluvial, sin causar efectos adversos en los ecosistemas, figura 6.19.



Reforestación y empleo de geomallas en talud para evitar derrumbes



Protecciones metálicas con empleo de geomallas en pendiente rocosa complementado con Muro de Gavión para evitar Derrumbes sobre la Carretera

Figura 6.19 Obras para prevenir y reducir la erosión  
Fuente (SCT, 2016)

### *Incremento de los peligros para la fauna*

Las carreteras son infraestructura lineal que se inserta a lo largo de diversos tipos de ecosistemas, esto provoca un efecto barrera, lo que conduce a la fragmentación de los ecosistemas. La fauna tiene necesidad de desplazarse libremente en busca de comida, zonas de refugio y de reproducción. Este desplazamiento se verá afectado por la carretera, causando que la distribución y el número de individuos de poblaciones se reduzcan, además puede provocar la muerte por atropellamiento de la fauna.

### Medida de prevención y mitigación

Con la intención de prevenir y mitigar el atropellamiento de la fauna (figura 6.20), será necesario que, como parte del estudio de impacto ambiental, se haga un estudio de la movilidad de la fauna silvestre, así como zonas de pastoreo para colocar pasos inferiores de fauna que permitan un adecuado desplazamiento.



Fig. 6.20 Puma atropellado en la carretera a Reynosa  
Fuente: (SCT, 2016)

*Alteración de la calidad y cantidad de agua*

Debido a la remoción de la cubierta vegetal, la generación de residuos de la construcción que luego puede llegar a cuerpos de agua superficiales y a la alteración del flujo superficial del agua, además del uso de maquinaria y equipo que puede contaminar el suelo con combustibles y aceites, la construcción de la carretera causa impactos adversos a la cantidad y calidad del agua.

Medidas de prevención y mitigación

Recuperar y disponer la totalidad del producto del desmonte y despalme de los bancos de préstamo, por ejemplo, en los trabajos de reforestación, no utilizar herbicidas e insecticidas para la limpieza del derecho de vía, usar lonas y mallas para evitar que los sólidos caigan en las aguas superficiales. Tener un estricto plan de operación y mantenimiento del equipo y maquinaria, se requiere instruir a los trabajadores de la construcción sobre la importancia que tiene el reducir al mínimo los derrames de combustibles y aceites.

Como parte del proyecto carretero se deberá tener un buen proyecto hidrológico, deberá evitarse el desvío de corrientes. Las alcantarillas deberán tener rejillas en la entrada con el fin de retener sólidos, además de realizar la limpieza y desazolve de las cunetas.

El Recuadro 6.4 muestra un ejemplo de vías terrestres en el que se presentó un socavón a causa de un deficiente sistema de alcantarillas e inadecuadas medidas de operación, lo que causó la muerte de dos personas el 12 de julio de 2017, figura 6.21.

<b>Recuadro 6.4</b> Intensas lluvias y basura, la causa de socavón en Paso Exprés: SCT y constructoras
<p>El consorcio constructor del “Paso Exprés” en Cuernavaca, Morelos, conformado por las empresas Epccor y Aldesa, explicó en un comunicado que, según un análisis previo, el socavón que se formó en el kilómetro 93+600 de la autopista México-Cuernavaca, fue a causa de la <b>erosión de una alcantarilla</b> afectada por el exceso de basura y una acumulación extraordinaria de agua provocada por la intensa lluvia.</p> <p>Por su parte, en un comunicado, la Secretaría de Comunicaciones y Transportes <b>coincidió con el consorcio constructor</b> en que el socavón fue ocasionado por las intensas lluvias y el exceso de basura.</p>



**Recuadro 6.4****Intensas lluvias y basura, la causa de socavón en Paso Exprés: SCT y constructoras**

“Si hubo en algún momento una falla, omisión, o no hubo suficiente diligencia o eficiencia, se tendrá que **actuar en consecuencia**”, indicó el secretario, Gerardo Ruiz Esparza.

**Comunicado de Secretaría de Comunicaciones y Transportes:**

Al supervisar los trabajos de rescate de las personas que se encontraban en el interior de un vehículo que cayó en el socavón que se formó en el kilómetro 93+600 de la autopista México-Cuernavaca, el secretario de Comunicaciones y Transportes, Gerardo Ruiz Esparza, afirmó que solicitó al Colegio de Ingenieros Civiles realice un dictamen técnico de las causas que lo originaron y se deslinden responsabilidades.

Si hubo en algún momento una falla, omisión, o no hubo suficiente diligencia o eficiencia, se tendrá que actuar en consecuencia, indicó Ruiz Esparza.

Asimismo, aseguró que se solicitó una auditoría al Órgano Interno de Control sobre el tema, a fin de deslindar posibles responsabilidades de funcionarios, si no se cumplió o hubo negligencia, los responsables asumirán las consecuencias.

Comentó que desde el primer momento lo más importante fue tratar de rescatar a las personas que viajaban en el vehículo y atender y apoyar con el mayor de los respetos a sus familiares, lo que se ha cumplido cabalmente.

Luego de conocer el fallecimiento de los señores Juan Mena López de 56 años y Juan Mena Romero de 36, el titular de la SCT lamentó su deceso y comentó que se entregará a su familia la indemnización correspondiente, así como los beneficios que la ley otorga.

Explicó que el socavón fue ocasionado por la erosión de una alcantarilla afectada por el exceso de basura y la acumulación de agua por la reciente atípica lluvia, que alcanzó los 8 metros.

Señaló que después de los respectivos estudios y de concluir las reparaciones, la zona afectada reabrirá a la circulación, en un plazo aproximado de 15 días.

Ruiz Esparza destacó que el subsecretario de Infraestructura, Oscar Callejo Silva, se reunirá con vecinos de la zona y los atenderá personalmente, “estaré atento a que las cosas se resuelvan de la mejor manera”, advirtió finalmente.

Tomado de (<https://aristeguinoticias.com>, s.f.)



Figura 6.21 Socavón Paso Exprés  
 Fuente (<https://www.animalpolitico.com>, s.f.)

## Impactos ambientales indirectos

### *Fragmentación de hábitats*

Fragmentación de los hábitats que pueden tener como resultado disminución de las oportunidades de sobre vivencia, figura 6.22. La carretera contribuye a la fragmentación de poblaciones, dejándolas aisladas y convirtiéndolas en subpoblaciones, las cuales tienen mayor riesgo de ser reducido el número de individuos y de aumentar su probabilidad de extinción. Un ejemplo de fauna silvestre de pequeño tamaño y que por tanto son más vulnerables es el Conejito de los Volcanes, conocido también como “Teporingo” o “Zacatuche” (*Romerolagus diazi*), especie endémica (que solo se encuentra en México) cuyas poblaciones son muy reducidas. Se afecta además el desplazamiento libre de la fauna para la búsqueda de alimento, anidación, y variabilidad genética.

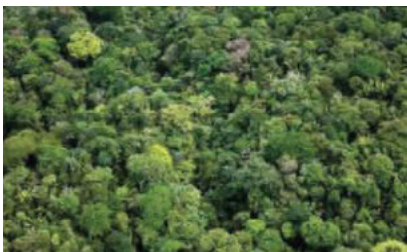


Figura 6.22 Fragmentación de Hábitats  
 Fuente: (SCT, 2016)

Medida de prevención

Análisis espacial de las diversas alternativas de trazo considerando los instrumentos que establecen la vocación o aptitud del suelo, para identificar aquella que reduzca el impacto, figura 6.23.

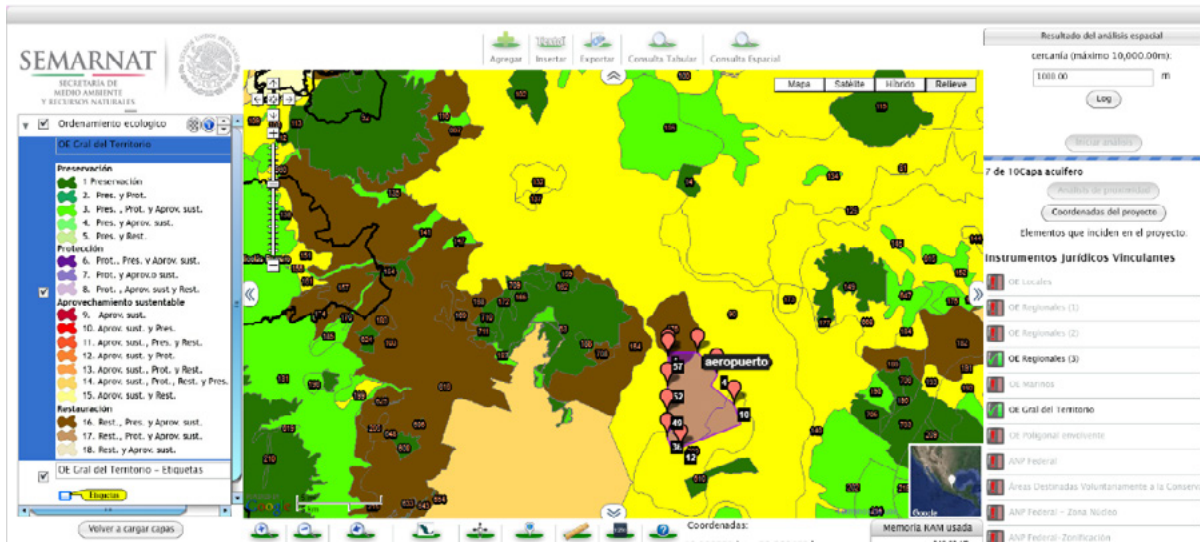


Figura 6.23 Figura que muestra el uso del SIGEIA para el análisis del mejor trazo de una carretera

Medida de mitigación. Implantar acciones que permitan el movimiento de la fauna a través de la carretera. Primero identificando cuáles son los pasos de cruce natural (figura 6.24), luego diseñando obras que permitan el paso, figura 6.25.



Figura 6.24 Identificación de corredores biológicos y construcción de obras que permitan el paso de la fauna  
Fuente (SCT, 2016)





Paso específico para Anfibios y barrera permanente en la carretera Seestrasse, Cantón de Berna, Suiza.



Paso superior de vida Silvestre por la autopista, Parque Nacional Banff, Alberta, Canadá.



Paso Superior de Fauna con falsos túneles, Países Bajos.



Paso Superior específico para Fauna. Puente Verde sobre la A20, Grevesmühlen, Alemania.



Cercado perimetral que conduce la Fauna hacia el Cruce Superior.

Figura 6.25 Estructuras para el paso de fauna  
Fuente: (SCT, 2016)

### *Generación de residuos*

El derecho de vía de algunas carreteras suele tener depósitos de residuos de todo tipo: municipales, de manejo especial y hasta peligrosos, debido a la accesibilidad, figura 6.26.

### Medida de mitigación

De tenerse un programa permanente de recolección de desechos sólidos dentro del derecho de vía, así como las instalaciones de depósitos de basura a lo largo de la carretera. Realizar campañas de vigilancia para evitar la formación de basureros en el derecho de vía. (SCT, 2016)

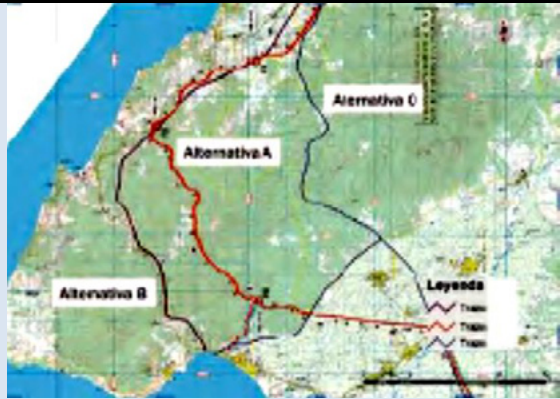


Figura 6.26 Residuos municipales y de manejo especial en carreteras  
Fuente: (SCT, 2016)

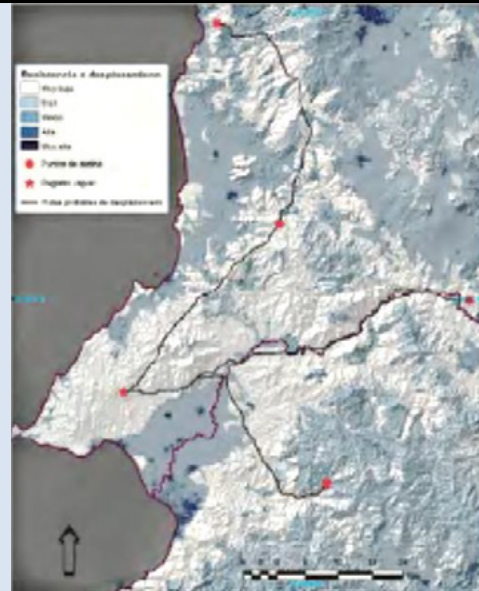
El Recuadro 6.5 presenta el caso del Libramiento de Puerto Vallarta, Jalisco-Nayarit, México, en donde se adecuó el trazo para reducir el impacto sobre la población del jaguar; además de incluir pasos para fauna de diferente tipo y tamaño, entre otras medidas de mitigación.

<b>Recuadro 6.5</b> <b>Libramiento de Puerto Vallarta, Jalisco-Nayarit, México.</b>
<p>El proyecto carretero Jala – Puerto Vallarta, tramo Compostela II – Las Varas -Bucerías-Entronque-libramiento Puerto Vallarta el cual requiere autorización en materia de impacto ambiental, se desarrollará a lo largo de una parte costera del Estado de Nayarit hasta la cercanía con Puerto Vallarta en el Estado de Jalisco, constando con una longitud aproximada de 108.241 km. Este proyecto cruzará por los municipios de Compostela y Bahía de Banderas en el Estado de Nayarit y por el municipio de Puerto Vallarta en el Estado de Jalisco.</p> <p>La actual carretera Tepic-Puerto Vallarta es una de las pocas vías de acceso a la zona costera de Nayarit, y se ha concluido que ha sido rebasada en más de 5 veces la cantidad de tránsito para la que fue originalmente diseñada y construida, por lo que actualmente constituye una vialidad saturada de alta peligrosidad, por el riesgo por accidentes y disminución en la eficiencia de la carretera , por esta razón, el proyecto constituye una alternativa de solución para el desahogo del tránsito de bienes y personas a lo largo de la zona costera Nayarita hasta Puerto Vallarta y con esto el desarrollo de la costa misma como destino turístico.</p>

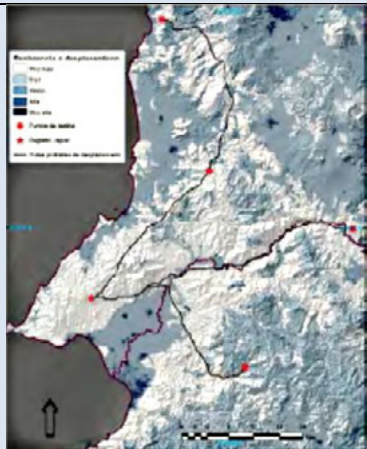
**Recuadro 6.5**  
**Libramiento de Puerto Vallarta, Jalisco-Nayarit, México.**



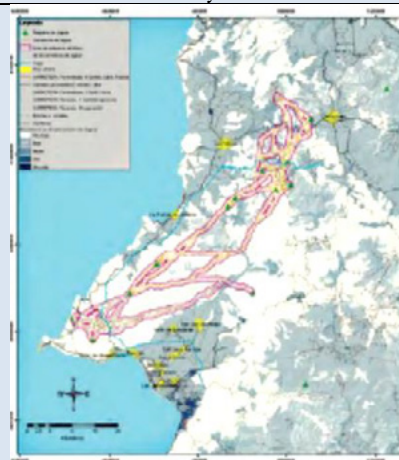
Ruta propuesta (A) y alternativas (B, 0)



Modelo 1 de corredores potenciales de desplazamiento de jaguares en el sur de Nayarit



Modelo 2 de corredores potenciales de desplazamiento de jaguares en el sur de Nayarit



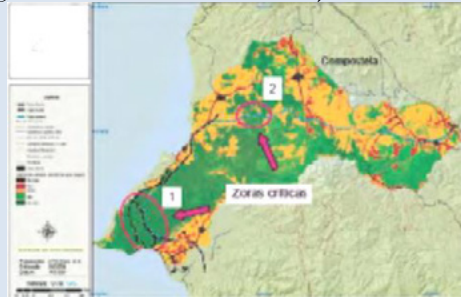
Modelo 3 de corredores potenciales de desplazamiento de jaguares en el sur de Nayarit

La zona comprendida por el sistema ambiental regional analizado mostró tener muy alta calidad ambiental, atribuida a su complejidad topográfica que hace que sea en buena medida poco accesible ya que el principal desarrollo urbano y agrícola se localiza en las porciones planas del terreno y cercanas a la costa. Predominan selvas tropicales secas y semisecas con alto grado de conservación y gran cantidad de especies vegetales y animales protegidas por la NOM-059-SEMARNAT-2001. Por su ubicación geográfica, es una zona que integra la flora y fauna neárticas y neotropicales, de ahí su alta biodiversidad. Se confirmó la presencia de jaguar y otros animales de importancia para su conservación en toda la región bajo estudio y se identificaron diferentes rutas (corredores) de

### Recuadro 6.5 Libramiento de Puerto Vallarta, Jalisco-Nayarit, México.

desplazamiento de jaguar y su interacción con carreteras, existentes en proyecto para visualizar la aplicación de medidas de mitigación y compensación.

Para reducir el impacto sobre corredores de jaguar, se adecuará el trazo aproximándolo a las vías carreteras actuales. El diseño e inclusión de gran cantidad de pasos para fauna de diferentes tipos y dimensiones, aunado a los puentes y túneles que serán construidos, permitirán una adecuada permeabilidad de animales en sentido Norte-sur; dirección hacia donde se tienen reconocidos los principales corredores de jaguares. Como compensación ambiental, la SCT considera la construcción de pasos de fauna de diferentes tipos en sitios estratégicos sobre las carreteras existentes para restituir los corredores de jaguar que han sido suprimidos a la fecha por estas vialidades. Aunado a ello, se contempla la restauración de parcelas y sitios perturbados a lo largo de los corredores de jaguar identificados, para lograr maximizar la conectividad entre las poblaciones de jaguar en la región de Sierra Vallejo y esta parte de Nayarit, con las poblaciones al sur de Sinaloa y la zona norte de Jalisco (región de Chamela-Cuitzmala).



Zonas críticas por cruce: proyecto carretero-zona de importancia para jaguar

Asociado a las dos medidas anteriores, el proyecto actual contempla la restauración ecológica del interior del derecho de vía (y demás zonas que hayan sido afectadas por las obras), para conformar un corredor biológico que permita aislar la carretera del entorno circundante y funcione como zona para el desplazamiento y hábitat de fauna silvestre, fusionando la vegetación de los lomeríos al este del poblado de Ixtapa y la que crece en los lomeríos al norte de Bucerías; actualmente separadas por la planicie aluvial del río Ameca dedicada al cultivo.

Tomado de (SCT, 2016)



#### Actividad 6.4

##### Impacto ambiental de las carreteras

A partir del video “Efectos de las carreteras sobre la distribución de fauna en Calakmul y Balam-kú, México”

<https://youtu.be/JxwWJGZCGZY>

Contesta el cuestionario



## 6.7 Preguntas y actividades propuestas

### Conceptos del análisis de impacto ambiental.

Conteste las siguientes preguntas indicando el artículo de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (en lo sucesivo “la Ley”) o de su Reglamento en Materia de Impacto Ambiental (en lo sucesivo “el reglamento”) en el que se basa su respuesta.

1. Una vez evaluada la manifestación de impacto ambiental de un proyecto por las autoridades correspondientes, ¿Cuáles son las posibles resoluciones que pueden emitir dichas autoridades?
2. Defina de acuerdo con el reglamento: a) estudio de riesgo, y b) medidas de prevención y mitigación.
3. ¿Qué modalidad de manifestación de impacto ambiental debe presentarse para obtener la autorización en materia ambiental para la explotación de una mina de carbón en el municipio de Piedras Negras, Sonora?
4. Elabore un cuadro resumen en donde se observe la diferencia en los contenidos respectivos de las manifestaciones de impacto ambiental en sus diferentes modalidades.
5. ¿Qué requisito debe cumplir una empresa de consultoría para que la SEMARNAT reconozca validez y evalúe los estudios de impacto ambiental que dicha empresa formule?
6. La empresa Colgate-Palmolive S.A. de C.V. va a presentar la manifestación de impacto ambiental de un proyecto de implantación de un nuevo proceso para la fabricación de dentífrico. Sin embargo, como cualquier persona podrá consultar la manifestación, se teme que las empresas de la competencia conozcan la formulación de sus productos, lo cual afectaría sus derechos lícitos mercantiles. ¿De acuerdo con el Reglamento, que puede hacer la empresa para evitar que trascienda cierta información?
7. Cierta empresa pretende realizar una obra de las que requieren de autorización previa de acuerdo con el artículo 5° del reglamento; sin embargo, los proponentes consideran que el impacto ambiental de dicha obra no causara desequilibrio ecológico ni rebasara los límites o condiciones señalados en los reglamentos y normas técnicas ecológicas. ¿Existe alguna posibilidad de que no tenga que presentarse manifestación de impacto ambiental? Explique el procedimiento.

### Técnicas para estudiar y evaluar el impacto ambiental

1. ¿Qué es una MIA?
2. ¿Cuáles son las etapas de un estudio de impacto ambiental?
3. ¿Cuáles son los objetivos que deben cumplirse en las 2ª etapa del estudio de impacto ambiental?



4. Explicar en qué consiste cada uno de los objetivos mencionados.
5. ¿Cuáles son las metodologías utilizadas para la EIA?
6. Explicar brevemente en qué consisten las metodologías.
7. ¿Por qué se dice que el método de Batelle- Columbus es de naturaleza jerárquica?
8. ¿Qué características deben cumplir los parámetros ambientales?
9. ¿Cuáles son los pasos que deben seguirse para transformar los parámetros a unidades conmensurables?
10. ¿Explicar el procedimiento para determinar la función de valor en el sistema de Batelle Columbus?
11. ¿Cómo se realiza la ponderación de los parámetros en el método de Batelle-Columbus?
12. ¿Cómo se calculan las UIA debidas al proyecto?
13. ¿En qué consisten los métodos matriciales?
14. ¿Qué valores se colocan en cada una de las celdas en la matriz?
15. ¿Matemáticamente cómo se calcula el impacto total sobre el iésimo valor factor ambiental para todas las acciones?
16. Matemáticamente ¿cómo se calcula el impacto de la jésima acción sobre todos los factores ambientales?
17. ¿Cómo se calcula el impacto total del proyecto en matrices matemáticamente?
18. ¿En qué consiste la matriz de Leopold?
19. ¿Cómo se utiliza la matriz de Leopold?
20. ¿Mencionar algunas formas en cómo pueden calificarse los impactos cualitativamente?
21. ¿En qué consiste la metodología de redes?

### **Evaluación del impacto ambiental**

1. Un municipio está planeando disponer el efluente de su planta de tratamiento secundario en una corriente cuyo gasto es de  $50 \text{ m}^3/\text{s}$ . El gasto de agua residual tratada es de  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  y tiene una  $\text{DBO}_{5-20}$  de  $20 \text{ mg/l}$ . el río, aguas arriba del punto de descarga tiene una  $\text{DBO}_{5-20}$  de  $5 \text{ mg/l}$  y el oxígeno disuelto es un 99% del de saturación. La temperatura de la descarga será de  $20^\circ\text{C}$  y  $15^\circ\text{C}$  la del río. La constante de rapidez de la desoxigenación es de  $0.5 \text{ día}^{-1}$  y la constante de rapidez de la oxigenación es de  $0.8 \text{ día}^{-1}$ , ambas a  $20^\circ\text{C}$ . Asuma que el oxígeno disuelto en el agua

residual tratada será de 4 mg/l y que la región de estudio se encuentra a una presión promedio de 370 mm de mercurio. La velocidad de la corriente es de 3.2 km/h. Determinar ¿cuál será el impacto en la calidad del agua?, deberán considerarse las normas que protegen la vida acuática.

2. Como parte de la MIA se requiere evaluar el NPA que se tendrá en una obra en construcción donde se tendrán varias máquinas trabajando simultáneamente: una perforadora neumática; un bulldozer; una motoescrepa; una olla de concreto mezclando y un vibrador. Los sonidos individuales con respecto al mismo punto de medición a 10 m de distancia son: 108, 94, 100, 60 y 68 dB(A) para cada máquina, respectivamente. a) ¿Cuál es la presión en microbares de los sonidos individuales?, b) ¿Cuál es el nivel de presión acústica de los sonidos combinados? y c) determine el nivel de presión acústica de los sonidos combinados a una distancia de 100 m.

**Actividad 6.1****Vinculación con los instrumentos de planeación en materia ambiental**

El Reglamento de Evaluación de Impacto Ambiental (REIA) establece en el Artículo 12 que la manifestación de impacto ambiental en su modalidad particular deberá contener un capítulo de Vinculación con los ordenamientos jurídicos aplicables en materia ambiental y, en su caso, con la regulación sobre uso del suelo. Para el caso de la modalidad regional el Artículo 13 establece que deberá contener un capítulo relativo a la Vinculación con los instrumentos de planeación y ordenamientos jurídicos aplicables.

A partir de una búsqueda en la web, se solicita lo siguiente: investigar sobre los instrumentos de planeación que se indican abajo, citando la fuente consultada. Se solicita además para cada caso explicar su relación con la evaluación del impacto ambiental.

1. Unidad de gestión ambiental (UGA)
2. Unidad ambiental biofísica (UAB)
3. Áreas de importancia para la conservación de las aves (AICA's)
4. Regiones hidrológicas prioritarias (RHP)
5. Acuíferos y su disponibilidad (DOF 20-04-2015)

**Actividad 6.2**  
**Fase de delimitación de la EIA**

Indicaciones

A partir del video “Fase de la delimitación de la EIA” preparado por el Banco Interamericano de Desarrollo,

<https://youtu.be/8-ebx4BfL0Q>

y de la sección 6.2 Metodología general para evaluar el impacto ambiental del Capítulo 6 del Libro de Ingeniería Ambiental II, prepara una tabla comparativa en donde se incluya en la primera columna los conceptos similares (aquellos que se incluyen en el libro y en el video), en la segunda columna los que no se incluyen en el libro y en la tercera columna lo que, de acuerdo con tu conocimiento previo y una breve investigación, comentas que se realiza o no en México. Por ejemplo:

<b>Conceptos similares</b>	<b>Conceptos del video</b>	<b>Aplicación en México</b>
Es un instrumento de la planeación que permite seleccionar la o las mejores alternativas, y es, por tanto, esencial para la toma de decisiones.	La EIA es la base para la toma de decisiones y establecer los requisitos apropiados del proyecto.	

**Actividad 6.3**  
**Técnicas para estudiar el impacto ambiental**

Busca en la web la manifestación de impacto ambiental (MIA) del nuevo aeropuerto internacional de la Ciudad de México y descárgala. En el documento en PDF de la MIA localiza las coordenadas en el sistema UTM del predio del proyecto. Deberás pasar esas coordenadas a un archivo en Excel que deberá ser guardado en formato CSV (valores separados por comas) para ingresarlos al SIGEIA de Semarnat. La estructura del archivo CSV deberá ser la indicada a continuación, no incluir encabezados de las columnas.

Primera columna	Número del elemento geométrico
Segunda columna	Número de vértice del elemento geométrico
Tercera columna	Coordenada X del vértice o punto
Cuarta columna	Coordenada Y del vértice o punto
Quinta columna	Descripción del elemento geométrico

El elemento geométrico será únicamente el predio del aeropuerto, por lo tanto, se le asignará únicamente un valor (1), para el caso del número de vértice del elemento geométrico, se le asignará un valor consecutivo (a partir de 1), las coordenadas X e Y son las que aparecen en el PDF en coordenadas UTM, y finalmente en la descripción del elemento geométrico se colocará “aeropuerto”, lo descrito se ejemplifica a continuación:

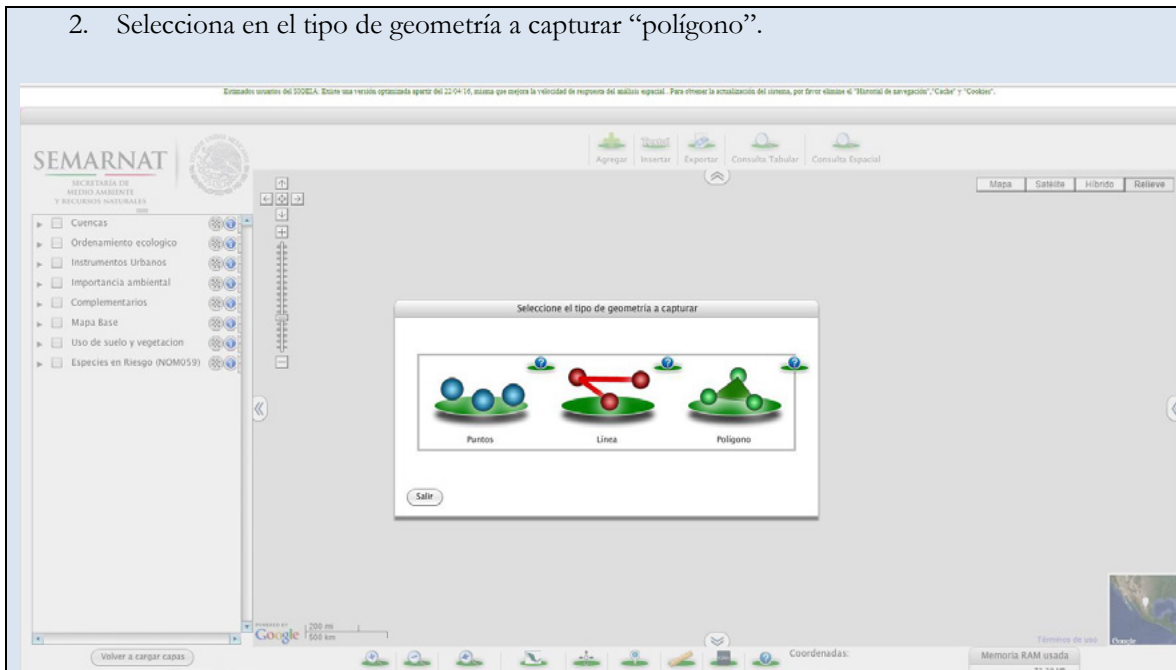
1	53	498572.6	2158837.44	aeropuerto
1	54	498574.315	2158988.87	aeropuerto
1	55	498582.258	2159682.42	aeropuerto

1. Ingresa al Sistema de Información Geográfica de SEMARNAT, en la siguiente dirección electrónica.

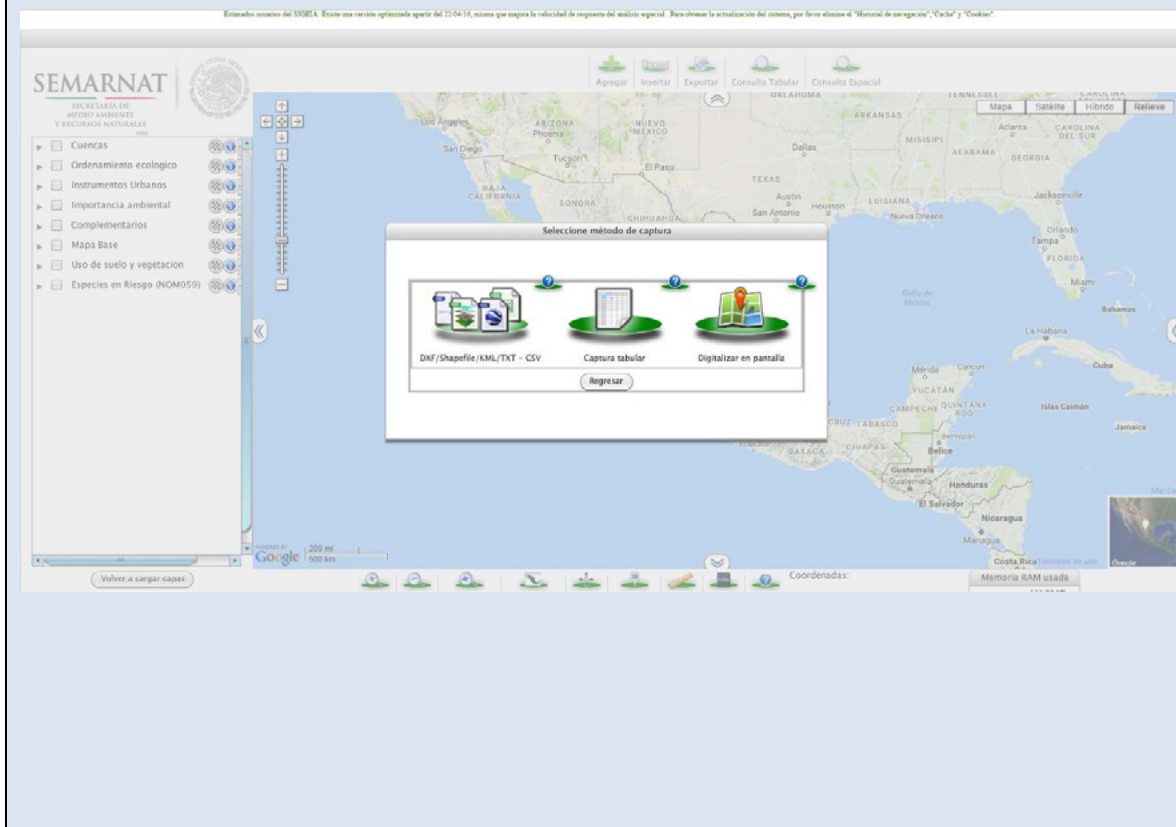
<http://mapas.semarnat.gob.mx/SIGEIA5e5PUBLICO/BOS/Bos.php#>



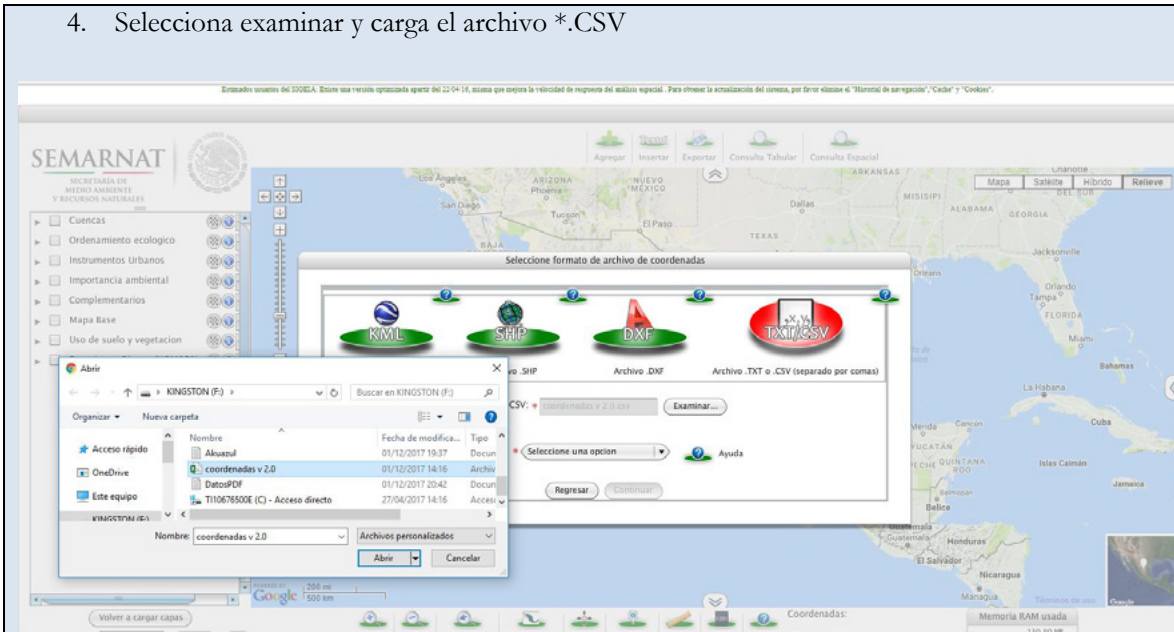
2. Selecciona en el tipo de geometría a capturar “polígono”.



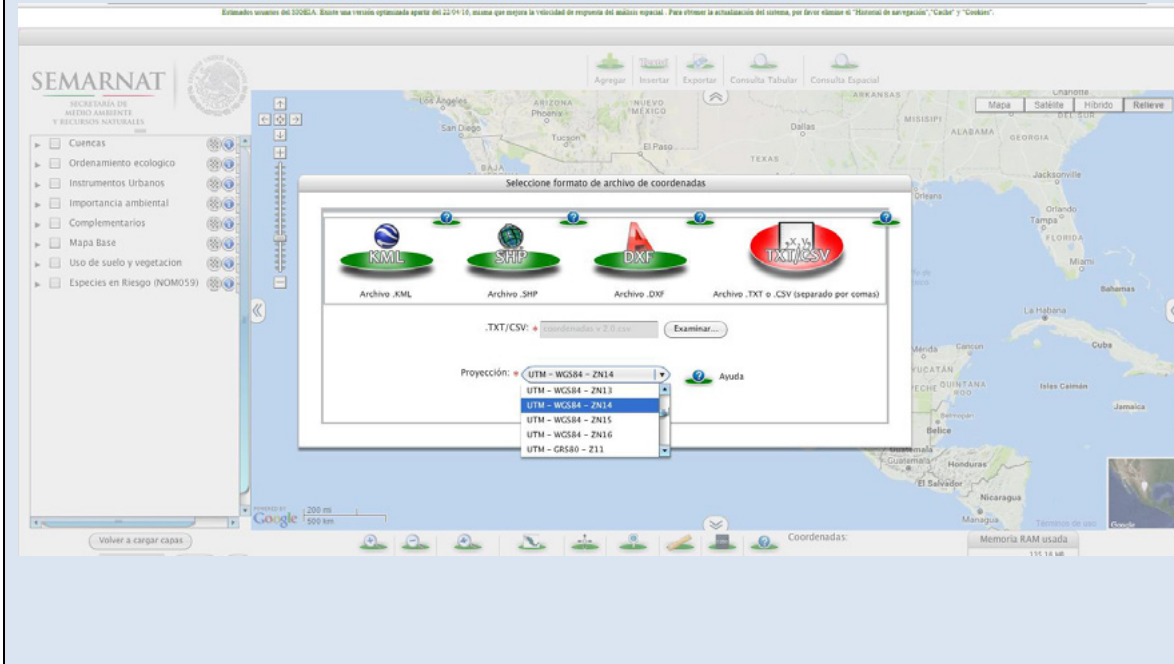
3. Selecciona en el método de captura la primera opción DXF/Shapefile/KML/TXT-CSV.



4. Selecciona examinar y carga el archivo \*.CSV

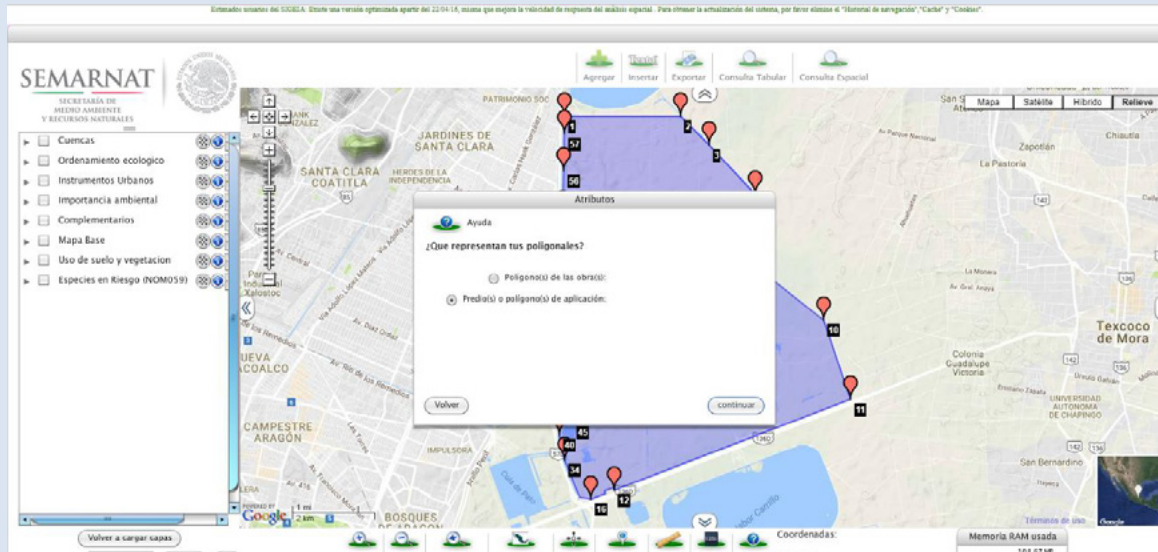


5. A continuación, selecciona la proyección UTM-WGS84 ZN14, esta información aparece en la MIA como UTM WGS84 Huso 14.

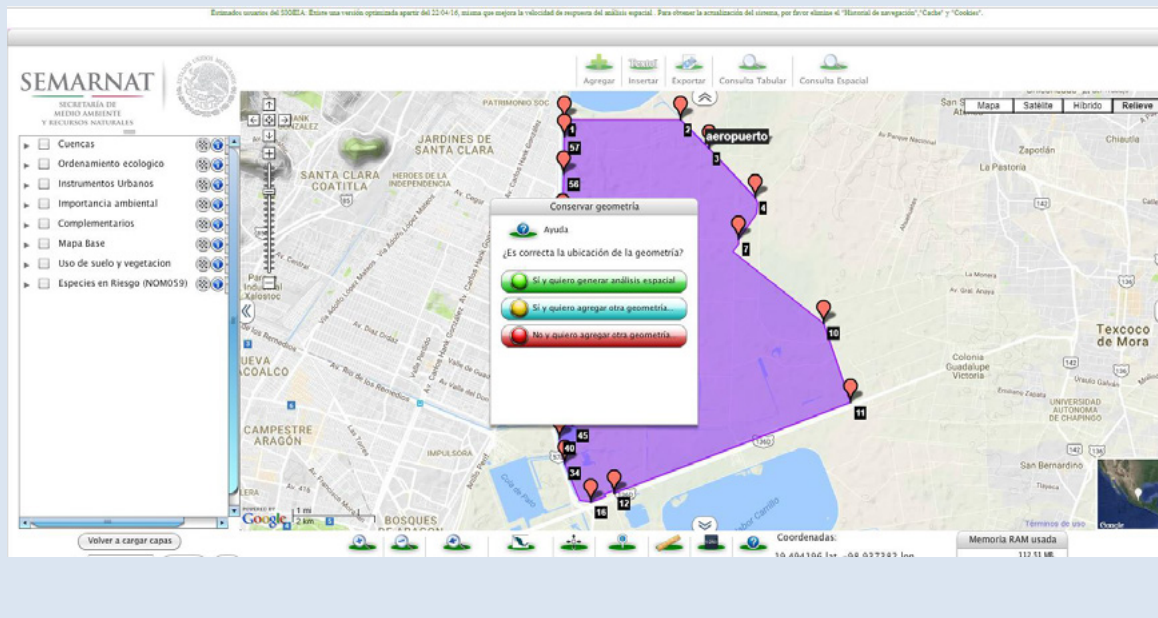




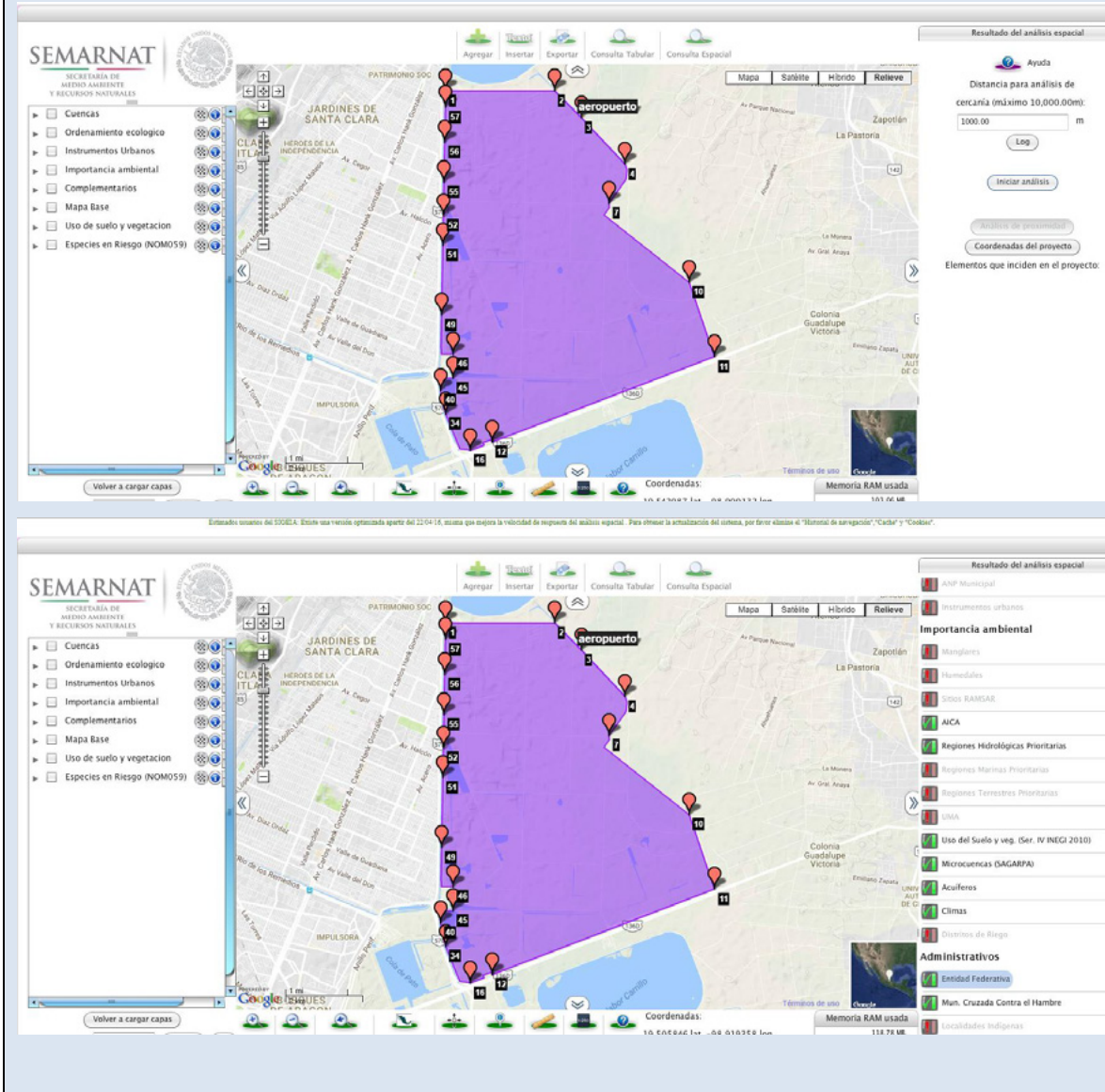
6. Aparecerá el polígono del aeropuerto y se preguntará “¿qué representan tus poligonales?”, deberá indicarse predio polígono de aplicación.

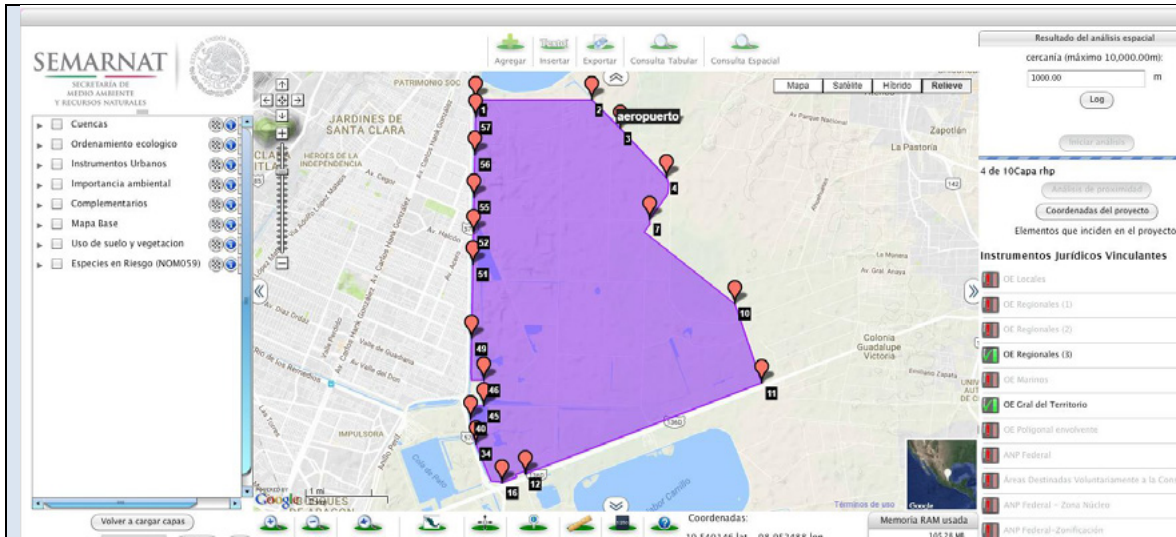


7. Se preguntará “¿es correcta la aplicación de la geometría?”, si no hay error, deberá seleccionarse sí y quiero generar análisis espacial.



8. Se iniciará el análisis espacial, con los instrumentos que inciden en el proyecto. El SIGEIA indicará el progreso del análisis, por ejemplo, “4 de 10 capas”. Los instrumentos que aparecen en rojo, no tienen incidencia; en cambio los de color verde tienen incidencia con el proyecto. Por ejemplo, OE General del Territorio.





9. Investiga que significa WGS84, proyección UTM y zona 14. ¿Por qué es necesaria esta información para el SIGEIA?
10. ¿Cuál es la vinculación con el Ordenamiento Regional del Estado de México (OREM), por UGA's y políticas (por ejemplo: restauración y aprovechamiento)? ¿Cuál es la superficie de incidencia del proyecto en el polígono del tema (OREM)?, ¿Qué porcentaje del área del proyecto del nuevo aeropuerto incide en el OREM) por UGA's y políticas?

UGA	Política	Uso predominante	Área predio del proyecto (m <sup>2</sup> )	Área del predio del proyecto que incide en el OREM (m <sup>2</sup> )	Área total incidente del predio del proyecto con el OREM (m <sup>2</sup> )

<p>11.¿Cuál es la vinculación con el Ordenamiento General del Territorio (OGT), por UAB's y políticas (por ejemplo: restauración y aprovechamiento) y el estado actual de la UAB's?, ¿Cuál es la superficie de incidencia del proyecto en el polígono del tema (OGT)?, ¿Qué porcentaje del área del proyecto del nuevo aeropuerto incide en el OGT por UAB's y políticas?</p>						
UAB	Política Ambiental	Estado actual	Área predio del proyecto (m <sup>2</sup> )	Área del predio del proyecto que incide en el OGT (m <sup>2</sup> )	Área total incidente del predio del proyecto con el OREM	
<p>12. ¿Con cuál AICA tiene vinculación el proyecto del nuevo aeropuerto de la Ciudad de México?, ¿Cuál es el área que ocupa esa AICA?, ¿cuál es la superficie de incidencia del predio del aeropuerto con la AICA?</p>						
AICA	Superficie de la AICA (ha)	Área predio del proyecto (m <sup>2</sup> )	Área del predio del proyecto que incide en el AICA (m <sup>2</sup> )			
<p>13.El proyecto del nuevo aeropuerto de la Ciudad de México, ¿tiene vinculación con alguna de las Regiones Hidrológicas Prioritarias (RHP)?, con cuál. Indica la clave, la región y el nombre de la región hidrológica prioritaria y su superficie en (ha). ¿Cuál es el estatus de la RHP?</p>						
Clave de RHP	Región	Nombre RHP	Superficie de la RHP (Ha)	Estatus	Área predio del proyecto (m <sup>2</sup> )	Área del predio del proyecto que incide en el RHP (m <sup>2</sup> )

14. ¿Cuál es la incidencia del predio del proyecto sobre los acuíferos?, indica lo siguiente:

Clave	Nombre	Disponibilidad	¿Está sobreexplotado?	Superficie del acuífero	Área del predio del proyecto que incide en el acuífero (m <sup>2</sup> )

15. Utilizando el menú de la izquierda del SIGEIA donde se muestran los instrumentos vinculantes, selecciona los temas de OREM, OGT, AICA, RHP y Acuíferos para ver espacialmente el resultado. Hacer impresiones de pantalla para mostrarlo en tu informe.

16. Dadas las características del área seleccionada para el proyecto del nuevo aeropuerto de la Cd. de México, ¿se ha hecho una selección adecuada para reducir los impactos ambientales adversos?, justifica tu respuesta.

<b>Actividad 6.4</b> <b>Impacto ambiental de las carreteras</b>
<p>Indicaciones</p> <p>A partir del video “Efectos de las carreteras sobre la distribución de fauna en Calakmul y Balamkú, México”</p> <p style="text-align: center;"><a href="https://youtu.be/JxwWJGZCGZY">https://youtu.be/JxwWJGZCGZY</a></p> <p>contesta las siguientes preguntas:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. ¿Cuáles son los impactos benéficos de los proyectos de carreteras?</li> <li>2. Durante la operación de los proyectos carreteros cuáles son los principales impactos adversos sobre la fauna.</li> <li>3. ¿Cuál es la relación entre el impacto sobre la fauna y el tipo y características de la infraestructura carretera?</li> <li>4. ¿Cuál es la zona geográfica a la que se refiere el video, y ¿cuál es su importancia?</li> <li>5. ¿Cuáles son las características de la carretera que se menciona en el video?</li> <li>6. Explica cuál es el objetivo del proyecto de investigación con participación ciudadana que iniciaron el centro EPOMEX de la Universidad Autónoma de Campeche, el Departamento de Geografía de Calgary, la WCS y la Asociación Civil Ecología aplicada del Sureste. ¿Cuál es la base de la metodología de este estudio?, comenta algunas características.</li> <li>7. ¿Cuáles han sido los resultados del estudio?</li> <li>8. ¿Cuáles han sido las medidas de mitigación que se han identificado?</li> <li>9. ¿Qué sugerencias se dan en el video a los conductores que entran al área de la reserva?</li> <li>10. Relaciona el contenido del tema 6.2 Metodología general para evaluar el impacto ambiental del Libro de Ingeniería Ambiental II con el caso de la carretera Federal 170.</li> </ol>



## 7. Bibliografía

(s.f.).

Economic and Social Commission for Asia and the Pacific, ESCAP. (1990)., (págs. 22-26).

5 minerales en los que México brilla en el mundo. (08 de 01 de 2017). *El Financiero*. Recuperado el 12 de marzo de 2018, de <http://www.elfinanciero.com.mx/rankings/minerales-en-los-que-mexico-brilla-en-el-mundo.html>

Agencia para la Protección del Medioambiente de los Estados Unidos (EPA). (octubre de 1999). *Indicadores de los impactos ambientales de la Infraestructura de Transporte*. Recuperado el 29 de diciembre de 2017, de <https://www.mtc.gob.pe/transportes/socioambientales/documentos/IDISA.pdf>

AP-42. (US EPA). *Compilation of air emission factors*. Fifth Edition.

Aparicio Mijares, F. J. (2009). *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. México: Limusa.

Applications, M. M. (2000). *U.S. EPA*.

Applications, M. M. (2001). *U.S. EPA*.

Banco Mundial. (1994). *Consulta para la evaluación de impacto ambiental*.

Becerra, M. A. (1997). *Erosión de suelos*. México, D.F.: Universidad Autónoma de México.

BID. (1997). *Environmental Assessment in the Transportation Sector, Guidelines for Managers*. Banco Interamericano de Desarrollo.

Brañes, R. (2000). *Manual de derecho ambiental mexicano*. México: Fondo de Cultura Económica.

Cámara de Diputados . (2015). *Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos*. Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. México: Diario Oficial de la Federación.

Cámara de diputados. (s.f.). *Cámara de Diputados Congreso de la Unión*. Recuperado el 13 de noviembre de 2017, de [http://www3.diputados.gob.mx/camara/001\\_diputados/012\\_comisioneslxii/01\\_ordinarias/002\\_agua\\_potable\\_y\\_saneamiento/13\\_marco\\_juridico/01\\_constitucion\\_politica\\_de\\_los\\_estados\\_unidos\\_mexicanos](http://www3.diputados.gob.mx/camara/001_diputados/012_comisioneslxii/01_ordinarias/002_agua_potable_y_saneamiento/13_marco_juridico/01_constitucion_politica_de_los_estados_unidos_mexicanos)

Canter, L. (2002). *Manual de evaluación de impacto ambiental, técnicas para la elaboración de estudios de impacto ambiental*. Madrid: Mc Graw Hill.

Coenraads R., K. J. (2008). *Geológica*. China: H. F. Ullmann.

Dirección General de Asuntos Socio-Ambientales. (s.f.). *Proyectos de Transporte*. Lima, Perú: Ministerio de Transportes y Comunicaciones.

Dirección General de Usos del Agua y Prevención de la Contaminación. (1982). *Manual de Factores Ambientales*. México: SARH.

Domínguez Reiboras, M. A. (2008). *Química. La ciencia básica*. Madrid, España: Parainflo S.A.

Doran, J. J. (1996). *Methods for assessing soil quality* (Vol. Special Publication Number 49).



- Madison, Wisconsin, USA: Soil Science Society of America, Inc.
- Echavarren, J. M. (mayo-agosto de 2007). Aspectos socioeconómicos de la evaluación de impacto ambiental. *Revista internacional de sociología (RIS)*, LXV, 99-114.
- EPA. (1999). *The Environmental Guidebook, Federal Highway Administration*. EPA.
- Espinoza, G. (2002). *Gestión y fundamentos de evaluación de impacto ambiental*. Santiago de Chile: BID\_CED.
- Estevan, M. (1981). *Las evaluaciones de impacto ambiental, criterios y metodologías*. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.
- Fuente, H. D. (s.f.). *Cepal publicaciones*. Recuperado el 14 de noviembre de 2017, de <https://www.cepal.org/publicaciones/xml/6/4496/duran.htm>
- FUNIBER. (2015). *Apuntes de la Maestría en Gestión Ambiental*. Barcelona, España: FUNIBER.
- G. o. (noviembre 2006). *NADF-009-AIRE-2006 que estable los requisitos para elaborar el IMECA*. Norma Ambiental para el Distrito Federal.
- Galatowitsch, S. (2012). *Ecological Restoration*. Sunderland, Massachusetts, USA: Sinauer Associates.
- Garduño, R. (20 de septiembre de 2015). Fox y Calderón cedieron casi 10 millones de hectáreas a mineras. *La Jornada*, pág. 5.
- Gómez Orea, D. (2003). *Evaluación de Impacto Ambiental*. Madrid: Agrícola Española.
- Hayes, E. T. (1997). *Implications of Materials Processing*. <https://aristeguinoicias.com>. (s.f.). <https://aristeguinoicias.com>. Obtenido de <https://aristeguinoicias.com/1207/mexico/intensas-lluvias-y-basura-la-causa-de-socavon-en-paso-expres-sct-y-constructoras/>
- <https://www.animalpolitico.com>. (s.f.). Obtenido de <https://www.animalpolitico.com/2017/08/sct-graco-paso-expres-morelos/>
- INEGI. (2007). Conjunto de Datos Vectorial Edafológico Serie II, escala 1:250000. México.
- Instituto Nacional de Ecología. (1996). *Estaciones de transferencia de residuos sólidos en áreas urbanas*. México, México: Instituto Nacional de Ecología.
- Jacintos, A. (2015). *Metodología para el cálculo de generación de residuos de manejo especial a partir del valor de la producción bruta para los sectores industrial, comercial y servicios, en el Estado de Guanajuato, México*. México: FUNIBER.
- Kelley, M. (1988). *Mining and the freshwater environment*. London: Elsevier.
- Kiely, G. (1999). *INGENIERÍA AMBIENTAL, Fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión*. Madrid: McGraw Hill.
- López, G. M. (2007 de septiembre de 2007). *cedrsa.gob*. (C. Mexicano, Editor) Recuperado el 12 de noviembre de 2017, de agenda legislativa: [www.cedrssa.gob.mx/includes/](http://www.cedrssa.gob.mx/includes/)

- asp/download.asp?idocumento=1875&idurl...
- Martínez, M. (2005). Estimación de la Erosión del Suelo. (SAGARPA, Ed.) Recuperado el 12 de Marzo de 2018, de [www.sagarpa.gob.mx/desarrolloRural/Publicaciones/Lists/.../6/04estim-eros-sue.pdf](http://www.sagarpa.gob.mx/desarrolloRural/Publicaciones/Lists/.../6/04estim-eros-sue.pdf)
- Masters, G. y. (2008). *Introducción a la ingeniería medioambiental* (Tercera ed.). Madrid, España: PEARSON, Prentice Hall.
- McKinney, M. L. (1998). *Environmental Science: Systems and Solutions*. Boston: Jones and Bartlett Publishers.
- Meteorological Monitoring Guidance for Regulatory Modeling Applications*. . (2000).
- México, G. d. (2002). *Alternativas de Rellenos Sanitarios, Guía de Toma de Decisión*.
- Micheli, J. (2002). Política Ambiental en México y su Dimensión Regional. (E. C. Sonora, Ed.) *Región y Sociedad*, 1-42.
- Mines, U. B. (2012). *Mineral Commodity Summaries*.
- Montes, M., Uribe, M., & García, E. (2011). Mapa Nacional de Erosión Potencial. *Tecnología y Ciencias del Agua*, II(1), 5-17.
- Mundial, B. (1997). *Roads and the environment*. Banco Mundial.
- Peterson, W. (1982). *Estimating Concentrations Downwind from an Instantaneous Puff Release EPA 600/3-82-078*.
- Pixabay. (18 de 05 de 2016). *Relleno sanitario*. Recuperado el 22 de 02 de 2019, de <https://pixabay.com/es/relleno-sanitario-papelera-volcado-1396596/>
- Real Academia Española. (20 de Septiembre de 2017). *Diccionario de la lengua española*. Recuperado el 20 de Septiembre de 2017, de Real Academia Española: <http://dle.rae.es/?id=W9sEaKE>
- Recuero, M. (1999). *Acústica arquitectónica aplicada*. Madrid: Paraninfo.
- S. I. (1958). *Solar Altitude and Azimuth*. US: Smithsonian Meteorological.
- SCT. (2016). *MANUAL PARA ESTUDIOS, GESTIÓN Y ATENCIÓN AMBIENTAL*. Ciudad de México: SCT.
- SEDESOL. (2009). *Manual para la Operación de Rellenos Sanitarios*. Mexico DF.
- Seinfeld, J. (1986). *Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution*. New York: John Wiley and Sons.
- Semarnat. (2003). *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales Edición 2002*. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, México.
- SEMARNAT. (2003). *NOM 083*. DOF.
- SEMARNAT. (2008). *Programa Nacional para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos 2009-2012*.
- SEMARNAT. (2009). *Manual de Especificaciones Técnicas para la Construcción de Rellenos Sanitarios para Resodios Sólidos Urbanos y de Residuos de Manejo Especial*. México.

- SEMARNAT. (2012). *Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos*. SEMARNAT, INECC. México: SEMARNAT.
- Semarnat. (2013). México: Dirección General de Política Ambiental e Integración Regional y Sectorial.
- SEMARNAT. (21 de enero de 2016). Recuperado el 31 de diciembre de 2017, de <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/sistema-de-informacion-geografica-para-la-evaluacion-del-impacto-ambiental-sigeia>
- Semarnat. (2016). *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales Edición 2015*. México. Obtenido de <http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe15/>
- SEMARNAT. (24 de noviembre de 2017). *Semarnat.gob.mx*. Obtenido de [http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi\\_apps/WFServlet?IBIF\\_ex=D4\\_R\\_IMPACTO00\\_01&IBIC\\_user=dgeia\\_mce&IBIC\\_pass=dgeia\\_mce](http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D4_R_IMPACTO00_01&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce)
- SEMARNAT. (11 de febrero de 2019). *www.gob.mx*. Recuperado el 11 de febrero de 2019, de <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/normatividad-aplicable-al-tema-de-residuos>
- Semarnat. (s.f.). *Contenido de una MIA*. Recuperado el 26 de noviembre de 2017, de <http://www.semarnat.gob.mx/temas/gestion-ambiental/impacto-ambiental-y-tipos/contenido-de-una-mia>
- Semarnat. (s.f.). *Mia Regional*. México, DF: Semarnat. Recuperado el 26 de noviembre de 2017
- Semarnat. (s.f.). *NOMS en Materia de Suelos*. Recuperado el 5 de marzo de 2018, de <http://www.semarnat.mx/leyes-y-normas/nom-suelos>
- Simmons, I. G. (1991). *Earth, air and water: Resources and environment in the late twentieth century*. Kent, Gran Bretaña: Edward Arnold.
- Steven R. Hanna, G. A. (1982). *Handbook on Atmospheric Diffusion*.
- Tchobanoglous, G. y. (2002). *Handbook of solid waste management* (Segunda ed.). New York, USA: McGraw-Hill.
- U.S.EPA. (2000). *Meteorological Monitoring Guidance for Regulatory Modeling Applications*.
- UNAM. (2012). *Fundamentos de Digestión Anaerobia de Residuos Sólidos Orgánicos Urbanos*. México, México: UNAM.
- UNAM. (2014). *Programa estatal para la prevención y gestión integral de residuos del estado de Guanajuato*. Programa universitario de medio ambiente. Guanajuato: UNAM.
- Universidad Autónoma de Aguascalientes. (2010). *Programa estatal para la prevención y gestión integral de residuos sólidos de Aguascalientes*. Universidad Autónoma de Aguascalientes.

- Aguascalientes: Instituto de Medio Ambiente.
- US EPA,CCAD. (2011). *Guías de Revisión Técnica de EIA: Proyectos Turísticos*. US EPA, CCAD.
- Vázquez, A., & César, E. (1994). *Impacto Ambiental*. México: Facultad de Ingeniería e Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- White, R. E. (1979). *Introduction to the Principles and Practice of Soil Science*. Nueva York: John Wiley & Sons.
- WHO, SDE, PHE, & OEH. (2005). *Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre*. Actualización mundial.
- Worrell, W. y. (2010). *Solid waste engineering* (Segunda ed.). Stamford, USA: CENGAGE Learning.



*Ingeniería Ambiental. Aplicaciones*, se publicó de manera digital el 31 de enero de 2022 en la página de la Facultad de Ingeniería, Ciudad Universitaria, México, Ciudad de México. C.P. 04510