



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Clausura de sitios de disposición final de residuos
sólidos urbanos**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniera Civil

P R E S E N T A

Blanca Estela Barragán Rosas

DIRECTOR DE TESIS

M.C. Constantino Gutiérrez Palacios



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2022

A mis padres y hermanas.

A mi abuelita Rosa, a mi abuelito Lucio y a mi tía Ale

A mis amigas y amigos por andar este camino conmigo.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México.

A la Facultad de Ingeniería

A mi director de tesis. M.C Constantino Gutiérrez Palacios

A la M.I. Amalia Adriana Cafaggi Félix, al M.I. Héctor Sanginés García, al Ing. Marcos Trejo Hernández y al Dr. Mauro Pompeyo Niño Lázaro, por el tiempo invertido en la revisión de este trabajo.

A mis padres y a mis hermanas a quienes todo les debo, a mi abuelita Rosa y mi tía Ale.

A mis queridos amigos de la Facultad de Ingeniería con quienes compartí aventuras y desventuras.

A Miry y Emma, Erick y Aida, Mony y Elvia, Ale y Marycruz, y a Raquel, por su apoyo incondicional y por su gran generosidad.

Gracias a la vida que me deja sin espacio suficiente para agradecer a cada una de las personas que enriquecieron mi paso por la Facultad de ingeniería.

ÍNDICE

INTRODUCCION.....	7
CAPITULO 1. ANTECEDENTES	8
1.1 DEFINICIONES	8
1.1.1 Residuo.....	8
1.1.2 Plan de Manejo.....	8
1.1.3 Residuos sólidos urbanos.....	9
1.1.4 Residuos peligrosos.....	9
1.1.5 Residuos de Manejo Especial.....	11
1.1.6 Residuos Incompatibles	12
1.2 Patógenos presentes en los RSU.....	13
1.3 Características de los residuos sólidos urbanos.....	14
1.3.1 Propiedades Físicas	14
1.3.2 Propiedades Químicas.....	15
1.3.3 Propiedades Biológicas.....	15
1.4 Manejo de residuos sólidos:	16
1.4.1 Conversión térmica.....	18
1.5 Biogás	24
1.5.1 Fases de degradación de la materia orgánica en los RSU	24
1.5.2 Proceso de generación de biogás	25
1.5.3 Determinación de cantidad de biogás.	27
1.6 Lixiviados	30
1.6.1 Generalidades	30
1.6.2 Características del lixiviado.	32
1.6.3 Determinación del volumen de lixiviados.....	35
1.6.4 Manejo de Lixiviados.....	36
Capítulo 2 SITUACION DE LOS SITIOS DE DISPOSICION FINAL DE RESIDUOS SOLIDOS URBANOS EN MÉXICO	38

2.1 Introducción	38
2.2 Datos de la situación de los sitios de manejo de residuos sólidos urbanos en México	40
CAPÍTULO 3. LINEAMIENTOS PARA LA CLAUSURA DE SITIOS DE DISPOSICION FINAL DE RESIDUOS URBANOS NO CONTROLADOS.....	50
3.1 Normatividad.....	50
3.2 Requisitos para la construcción y operación de los sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos.....	51
3.2.3 Características constructivas y operativas de los centros de disposición final de RSU	52
3.3 Clausura de sitios de disposición final de RSU	54
3.3.1 Sello del sitio.....	56
3.3.2 Obras de control y programa monitoreo	56
3.3.3 Uso final del sitio clausurado	57
CAPITULO 4 CASO DE ESTUDIO. CLAUSURA DEL TIRADERO NEZA 1	58
4.1 Antecedentes	58
4.2 Datos generales del proyecto.....	58
4.2.1 Sembrado arquitectónico del predio.....	59
4.2.2 Ortofoto del sitio previa a los trabajos realizados	60
4.3 PROCESO CONSTRUCTIVO.....	61
4.3.1 Trabajos preliminares.....	61
4.3.2. Etapa de construcción:	61
4.3.3 Obras de control.....	76
4.3.3.1 Sistema de captación, conducción, y quema de biogás.....	77
4.3.3.2 Sistema de tratamiento de lixiviados.	86
4.3.3.2 Sistema de control para aguas pluviales.....	95
4.3.3.3 Obras de edificación.....	99

5. CONCLUSIONES.....	108
6. BIBLIOGRAFÍA.....	110

INTRODUCCION

El manejo de los residuos sólidos es un problema grave en el mundo incluso en los países desarrollados pues, aunque tienen sistemas eficientes de manejo, los patrones de consumo generan una cantidad de residuos difícil de manejar por su volumen y composición.

Los países con menor desarrollo económico enfrentan una situación más grave tanto por la falta de recursos asignados al manejo de los residuos, como por volumen que se produce por la alta densidad de población.

En México, el manejo de los residuos sólidos urbanos es un problema alarmante. La población creció de 1950 a 2019 de 25.8 a 126 millones de habitantes (INEGI 2020); y la generación per cápita de residuos pasó de 300 a 990 gramos de 1950 a 2012¹ (SEMARNAT, 2014), aunado a que la mayoría de los sitios de disposición final operan a cielo abierto y sin el control ambiental adecuado.

Los residuos sólidos inadecuadamente manejados son un grave problema ambiental porque contaminan el suelo, aire y agua del espacio que ocupan, así como del entorno que los rodea, socialmente generan marginación e inseguridad porque la población colindante a los tiraderos se ve afectada por escurrimiento de líquido proveniente de la basura, malos olores, biogás y fauna nociva.

En México se observan barrancas cuerpos de agua y terrenos baldíos conteniendo residuos sólidos depositados en forma clandestina, y la mayoría de los sitios oficiales de disposición son tiraderos a cielo abierto y gran parte de los rellenos sanitarios no cumplen con las medidas necesarias para aminorar el impacto ambiental de esta actividad.

Cuando los sitios de disposición final llegan al final de su vida útil y no tienen capacidad para recibir más residuos, se cierran sin que se realice la clausura de acuerdo a la normatividad vigente. En la Ciudad de México se cerró el relleno sanitario denominado “Bordo Poniente” en diciembre de 2011 y en 2021 aún se perciben los olores de los residuos en la zona aledaña.

El presente trabajo tiene como objetivo exponer brevemente los conceptos generales sobre residuos sólidos, exponer la situación de los sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos a cielo abierto en México y los lineamientos a seguir para su clausura, así como presentar como caso de estudio la clausura del tiradero a Cielo abierto Neza-1 y la construcción del Deportivo Ciudad Jardín Bicentenario que es parte del Proyecto Ciudad Jardín Bicentenario ubicado en el municipio de Nezahualcóyotl, donde se realizó la recuperación total del terreno clausurado, desarrollando un proyecto comercial y de servicios con colaboración de la iniciativa privada y los gobiernos municipal y estatal.

CAPITULO 1. ANTECEDENTES

Como resultado de las actividades humanas, se generan desechos sólidos, semisólido, líquidos o gaseosos que pueden tener efectos negativos sobre el ambiente y la salud humana. En esta primera parte, se exponen los conceptos básicos sobre residuos sólidos.

1.1 DEFINICIONES

1.1.1 Residuo

Se define como cualquier material orgánico o inorgánico generado en los procesos de extracción, beneficio, transformación, producción, consumo, utilización o tratamiento, cuya calidad no permite incluirlo nuevamente en el proceso que lo generó. (SEMARNAT 2015)

1.1.2 Plan de Manejo

El artículo 5, párrafo XXI de la Ley General para la prevención y Gestión Integral de Residuos (LGPGIR) define el plan de manejo de residuos sólidos como el instrumento cuyo objetivo es minimizar la generación y maximizar la valorización de residuos sólidos urbanos, de manejo especial y peligrosos específicos, bajo criterios de eficiencia ambiental, tecnológica, económica y social; diseñado bajo los principios de responsabilidad compartida y manejo integral; que considera el conjunto de acciones, procedimientos y medios viables e involucra a productores, importadores, exportadores, distribuidores, comerciantes, consumidores, usuarios de subproductos y grandes generadores de residuos, así como a los tres niveles de gobierno

Están sujetos a un plan de manejo los residuos peligrosos y los productos usados, caducos, retirados del comercio o que se desechen y que estén clasificados como tales en la norma oficial mexicana correspondiente: lubricantes usados, disolventes orgánicos usados, convertidores catalíticos de vehículos automotores, acumuladores de vehículos automotores conteniendo plomo, baterías eléctricas a base de mercurio o de níquel – cadmio, lámparas fluorescentes y de vapor de mercurio, aditamentos que contengan mercurio, cadmio o plomo, fármacos, plaguicidas y sus envases que contengan remanentes de los mismos, compuestos orgánicos persistentes como los bifenilos policlorados, lodos de perforación base aceite, provenientes de la extracción de combustibles fósiles y lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales cuando sean considerados como peligrosos, sangre y su componentes en su forma líquida, así como sus derivados, las cepas y cultivos de agentes patógenos generados en los procedimientos de diagnóstico e investigación y en la producción y control de agentes biológicos, residuos patológicos constituidos por tejidos, órganos y partes que se remueven durante las necropsias, cirugía o algún otro tipo de intervención quirúrgica que no estén contenidos en formol, los residuos punzocortantes que hayan estado en contacto con humanos o animales o sus muestras biológicas durante el diagnóstico y tratamiento, incluyendo navajas de bisturí, lancetas, jeringas con aguja integrada, agujas hipodérmicas, de acupuntura y para tatuajes. Adicionalmente, la SEMARNAT determinará

con las partes interesadas, otros residuos peligrosos que serán sujetos a planes de manejo. (Artículo 31 de la LGPGIR)

1.1.3 Residuos sólidos urbanos

Son los residuos generados en casas habitación, parques, jardines, vías públicas, oficinas, sitios de reunión, mercados, comercios, bienes inmuebles, demoliciones, construcciones, instalaciones, establecimientos de servicios y en general todos aquellos generados en actividades municipales que no requieran técnicas especiales para su control, excepto los peligrosos y potencialmente peligrosos de hospitales, clínicas, laboratorios y centros de investigación. Se subclasifican en orgánicos e inorgánicos con objeto de facilitar su separación primaria y secundaria. (Artículo 31 de la LGPGIR)

1.1.4 Residuos peligrosos

Según la Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005, que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos; un residuo es peligroso si una muestra representativa, posee al menos una de las siguientes características:

- Corrosividad
- Explosividad
- Inflamabilidad
- Reactividad
- Toxicidad Ambiental
- Biológico-Infeciosa

Por sus siglas, identificamos que son residuos peligrosos cuando están dentro de alguna(s) definiciones de la denominación CRETIB (Corrosivo, Reactivo, Explosivo, Tóxico Ambiental Inflamable, Biológico-Infecioso)

Un residuo es corrosivo si una muestra representativa del desecho:

- Es un líquido acuoso con un pH menor o igual a 2.0 (muy ácido) o mayor a 12.5 (muy alcalino).
- Es un sólido que al mezclarse con agua destilada presenta un pH menor o igual a 2,0 o mayor o igual a 12,5.
- Es un líquido no acuoso capaz de corroer el acero al carbón, tipo SAE 1020, a una velocidad de 6,35 milímetros o más por año a una temperatura de 328 K (55°C).

Es reactivo si:

- Es un líquido o sólido que después de ponerse en contacto con el aire se inflama en un tiempo menor a cinco minutos sin que exista una fuente externa de ignición.
- Cuando se pone en contacto con agua reacciona espontáneamente y genera gases inflamables en una cantidad mayor de 1 litro por kilogramo del residuo por hora.
- En contacto con el aire y sin una fuente de energía suplementaria genera calor.
- Posee en su constitución cianuros o sulfuros liberables, que cuando se expone a condiciones ácidas genera gases en cantidades mayores a 250 mg de ácido cianhídrico por kg de residuo o 500 mg de ácido sulfhídrico por kg de residuo

Es explosivo si:

- Es capaz de producir una reacción o descomposición detonante o explosiva solo o en presencia de una fuente de energía o si es calentado bajo confinamiento.

Es tóxico ambiental cuando:

- El extracto PECT (lixiviado con el que se determinan los constituyentes tóxicos del residuo y su concentración) contenga cualquiera de los constituyentes tóxicos incluidos en la Tabla 2 de la norma en una concentración mayor a los límites señalados. (NOM-052-SEMARNAT-2005)

Es inflamable si:

- Es un líquido o una mezcla de líquidos que contienen sólidos en solución o suspensión que tiene un punto de inflamación inferior a 60,5°C, medido en copa cerrada
- No es líquido y es capaz de provocar fuego por fricción, absorción de humedad o cambios químicos espontáneos a 25°C.
- Es un gas que, a 20°C y una presión de 101,3 KPa, arde cuando se encuentra en una mezcla del 13% o menos por volumen de aire, o tiene un rango de inflamabilidad con aire de cuando menos 12% sin importar el límite inferior de inflamabilidad.
- Es un gas oxidante que puede causar o contribuir más que el aire, a la combustión de otro material.

Los Residuos Peligrosos Biológico-Infeciosos (RPBI), son aquellos materiales que contengan agentes biológico-infeccioso (cualquier microorganismo capaz de producir enfermedades cuando está presente en concentraciones suficientes (inóculo), en un ambiente propicio (supervivencia) en un hospedero susceptible y en presencia de una vía de entrada. NOM-087-ECOL-SSA-2002. Se consideran residuos biológico – infecciosos:

Sangre y sus componentes de en su forma líquida, y los derivados no comerciales incluyendo células progenitoras, hematopoyéticas y las fracciones celulares o acelulares de la sangre resultante (hemoderivados); cultivos y cepas de agentes biológico-infecciosos generados en los procedimientos de diagnóstico e investigación, los generados en la producción y control de agentes biológico-infecciosos; utensilios desechables usados para contener, transferir, inocular y mezclar cultivos de agentes biológico-infecciosos; residuos patológicos, tejidos, órganos y partes que se extirpan o remueven durante las necropsias, cirugía u otro tipo de intervención quirúrgica que no se encuentren en formol; muestras biológicas para análisis químico, microbiológico, citológico e histológico, excepto orina y excremento; cadáveres y partes de animales que fueron inoculados con agentes enteropatógenos en centros de investigación y bioterios; recipientes desechables que contengan sangre líquida, materiales de curación empapados, saturados o goteando sangre, o líquido sinovial, líquido pericárdico, líquido pleural, líquido céfalo raquídeo o líquido peritoneal; materiales desechables que contengan esputo, secreciones pulmonares y cualquier material usado para contener estos de pacientes con sospecha o diagnóstico de tuberculosis o de otra enfermedad infecciosa emergente según la SSA; materiales absorbentes utilizados en las jaulas de animales que hayan sido expuestos a agentes enteropatógenos y objetos punzocortantes que han estado en contacto con humanos o animales o sus muestras biológicas

durante el diagnóstico y tratamiento, como tubos capilares, navajas, lancetas, agujas de jeringas desechables, agujas hipodérmicas, de sutura, de acupuntura, tatuaje, bisturís y estiletes de catéter, excepto todo material de vidrio roto utilizado en el laboratorio, el cual deberá desinfectar o esterilizar antes de ser dispuesto como residuo municipal.

TABLA 1
CÓDIGOS DE PELIGROSIDAD DE LOS RESIDUOS (CPR)

Características	Código de Peligrosidad de los Residuos (CPR)
Corrosividad	C
Reactividad	R
Explosividad	E
Toxicidad	T
Ambiental	Te
Aguda	Th
Crónica	Tt
Inflamabilidad	I
Biológico-Infecioso	B

Tabla de peligrosidad de residuos sólidos NOM 052 SEMARNAT 052

1.1.5 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 como:

- Residuos de las rocas o los productos de su descomposición que sólo puedan utilizarse para la fabricación de materiales de construcción
- Residuos de servicios de salud, humanas o animales, centros de investigación, excepto los biológico – infecciosos
- Residuos generados por actividades pesqueras, agrícolas, silvícolas, forestales, avícolas, ganaderas, incluyendo los residuos de los insumos utilizados en esas actividades
- 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
- Lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales, residuos de tiendas departamentales o centros comerciales generados en grandes volúmenes
- Residuos de la construcción, mantenimiento y demolición en general
- 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
- Pilas que contengan litio, níquel, mercurio, cadmio, manganeso, plomo, zinc, o cualquier otro elemento que permita la generación de energía en las mismas
- Neumáticos usados

- Otros que determine la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) en común acuerdo con las entidades federativas y municipios, que así lo convengan para facilitar su gestión integral. (artículo 19 de la LGPGIR)

1.1.6 Residuos Incompatibles

Son 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.**

Para determinar la reactividad, están disponible las tablas de los grupos reactivos y cómo interactúan entre ellos, en la Norma Oficial Mexicana NOM-054-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-ECOL-1993. La tabla 2 indica los grupos reactivos (Anexo 1 de la NOM-054-SEMARNAT-1993)

GRUPOS REACTIVOS			
Número	Nombre	Número	Nombre
1	Ácidos minerales no oxidantes	22	Metales y aleaciones en forma de talco, vapores o partículas.
2	Ácidos minerales oxidantes	23	Otros metales elementales y aleaciones tales como láminas, varillas y molduras
3	Ácidos orgánicos	24	Metales y compuestos de metales tóxicos
4	Alcoholes y glicoles	25	Nitruros
5	Aldehídos	26	Nitrilos
6	Amidas	27	Nitrocompuestos
7	Aminas, alifáticas y aromáticas	28	Hidrocarburos alifáticos no saturados
8	Azo compuestos, diazo compuestos e hidracinas	29	Hidrocarburos alifáticos saturados
9	Carbamatos	30	Peróxidos e hidroperóxidos orgánicos
10	Cáusticos	31	Fenoles y cresoles
11	Cianuros	32	Organofosfatos, Fosfocátos y Fosfoditocátos
12	Ditiocarbamatos	33	Sulfuros inorgánicos
13	Esteres	34	Epóxidos
14	Éteres	101	Materiales combustibles e inflamables
15	Fluoruros inorgánicos	102	Explosivos
16	Hidrocarburos aromáticos	103	Compuestos polimerizables
17	Órgano-halogenados	104	Agentes oxidantes fuertes
18	Isocianatos	105	Agentes reductores fuertes
19	Cetonas	106	Agua y mezclas que contienen agua
20	Mercaptanos, sulfuros orgánicos	107	Sustancias reactivas al agua
21	Metales alcalinos y alcalinotérreos, elementales y aleaciones		

Tabla 2. Grupos reactivos

En la tabla 3, se muestran las reacciones de algunos residuos peligrosos con otros que son incompatibles. (NOM 054 SEMARNAT)

Tipo de residuo peligroso	Características F, Q, B						Componentes	Grupo Reactivo		Incompatible con		
	C	R	E	T	I	B		No.	Nombre	No.	Nombre	Consecuencias de la reacción
Acete usado				x	x		Acete lubricante	101	Materiales combustibles e inflamables diversos	2, 24	Acumuladores usados	Genera calor por reacción química, genera fuego por reacciones exotermicas violentas y por ignición de mezclas o de productos de la reacción. Genera gases tóxicos. Prosuve explosión debido a reacciones estremadamente vigorosas o suficientemente exotérmicas para detonar compuestos inestables o productos de reacción.
Filtros usados				x								
Trapos, mop o estopas impregnadas en acete				x								
Recipientes vacíos de fluidos automotrices y aerosoles				x		Acete lubricante, líquido de frenos, aerosoles, anticongelantes						
Trapos con thinner				x		Thinner						
Trapos con pintura y solventes				x		Pintura base solvente						
Recipientes vacíos de pintura				x								
Material sólido impregnado con pintura base solvente (brochas, estopa, trapo)				x								
Desechos de pintura				x								
Lamparas fluorescentes				x		Vapor de mercurio	22	Otros metales elementales y aleaciones en forma de polvos, vapores, metale y compuestos de metales tóxicos	2	Acumuladores usados	Genera calor por reacción química, genera fuego por reacciones exotermicas violentas y por ignición de mezclas o de productos de la reacción. Genera gases tóxicos	
						Plomo	24		10	Pilas alcalinas, residuos de pintura, acete usado, material solido impregnado con pintura o acete o recipientes vacios que los contuvieron	Genera calor por reacción química y genera gases tóxicos	
Acumuladores usados	x			x		Acido sulfúrico	2	Ácidos minerales oxidantes	101, 13, 22		Genera calor por reacción química, genera fuego por reacciones exotermicas violentas y por ignición de mezclas o de productos de la reacción. Genera gases inflamables y tóxicos. EXTREMADAMENTE REACTIVO NO SE MEZCLE CON NINGUN RESIDUO O MATERIAL QUIMICO	
							107	Sustancias reactivas al agua	TODOS	TODOS		
Pilas alcalinas				x		Zinc	22	Otros metales elementales y aleaciones en forma de polvos, vapores, metale y compuestos de metales tóxicos	2	Acumuladores usados	Genera calor por reacción química, produce fuego por reacciones exotérmicas violentas y por ignición de mezclas o de productos de la reacción. Genera gases inflamables.	
						Dioxido de magnesio						

Tabla 3. Residuos incompatibles

1.2 Patógenos presentes en los RSU

En los residuos sólidos, se encuentran organismos que pueden causar enfermedades (patógenos), son organismos de diferentes categorías: bacterias, virus, hongos, protozoos y helmintos, así como la proliferación de vectores (organismos que transmiten un patógeno a otros organismos vivos) como roedores, cucarachas, moscas, mosquitos, aves, perros, gatos que se vuelven una fuente de enfermedades para los animales y personas en contacto con los residuos sólidos urbanos

Virus: Proceden fundamentalmente de excretas, esputos, mucosas, alimentos en mal estado, residuos hospitalarios, etc. Son capsulas más pequeñas que las células y contienen material genético, para replicarse invaden las células del cuerpo; los virus transmiten enfermedades como el VIH, ébola, hepatitis, herpes, influenza, sarampión, varicela, etc.

Bacterias: Estos microorganismos son poco resistentes a los factores ambientales dependiendo de la cepa. Su capacidad de infección es más o menos alta. Algunas

enfermedades causadas por bacterias son: fiebre tifoidea, disentería bacilar, cólera, gastroenteritis, tuberculosis, ántrax, leptospirosis, etc.

Hongos: Se desarrollan en los residuos si las condiciones de humedad, temperatura, cantidad de materia orgánica, presencia de oxígeno, etc. son las adecuadas. La forma de infección es por medio de sus esporas que son muy resistentes en el medio. Pueden causar enfermedades como candidiasis, pie de atleta, tiña, etcétera.

Protozoos: Son microorganismos unicelulares que cazan y recogen a otros microbios como alimento, pasan parte de sus ciclos de vida fuera de los seres humanos u otros huéspedes, y viven en los alimentos, la tierra, el agua o los insectos. Algunos protozoos invaden el cuerpo por medio de los alimentos que ingerimos, otros, como la malaria, se transmiten a través de los mosquitos. Provocan enfermedades, como: giardia, malaria, toxoplasmosis, etcétera.

Helmintos. - Los helmintos son organismos multicelulares parásitos con capacidad de causar enfermedades a los seres humanos y animales por infestación e infección. Si este parásito o sus huevos ingresan al cuerpo se instalan en el tracto intestinal, pulmones, hígado, piel o el cerebro, y vive de los nutrientes del cuerpo. Los helmintos comprenden las tenias y las ascárides. La forma de contagio se da principalmente por contaminación a través de las manos, la piel, contacto con mucosa, ojos, heridas o raspaduras, ingestión accidental.

Adicionalmente está el tema de la transmisión por vectores, como mosquitos, piojos, pulgas, moscas, garrapatas, chinches, ácaros, cucarachas, ratas y ratones.

1.3 Características de los residuos sólidos urbanos.

Los residuos sólidos urbanos pueden subclasificarse en orgánicos e inorgánicos con objeto de facilitar su separación primaria y secundaria, conforme a los Programas Estatales y Municipales para la Prevención y la Gestión Integral de los Residuos. (Artículo 18 LGPGIR)

- Orgánicos: Todo desecho de origen biológico que alguna vez estuvo vivo o fue parte de un ser vivo.
- Inorgánicos: Todo desecho que no es de origen biológico

1.3.1 Propiedades Físicas

Peso específico. - Es el peso de un material por unidad de volumen (kg/m^3), el valor depende del grado de compactación de los residuos, contenido de humedad, época del año, ubicación, etc.

Contenido de humedad. - En el método de medición de la humedad o peso húmedo. La humedad de una muestra se expresa como el porcentaje del peso del material húmedo. En el método peso seco se expresa un porcentaje del peso seco del material.

Tamaño de partícula. - El tamaño y la distribución del tamaño de los componentes de los materiales en los residuos sólidos son de una consideración importante dentro de los

procesos mecánicos y físicos de recuperación de materiales, como cribas y separadores magnéticos.

Capacidad de campo. - Es la cantidad de humedad que puede ser retenida por una muestra de residuo sometida a la acción de la gravedad. Es de gran importancia para determinar la formación de la lixiviación en los sitios de disposición final. El exceso de agua sobre la capacidad de campo se emitirá en forma de lixiviado. La capacidad de campo varía con el grado de presión aplicada y el estado de descomposición del residuo.

Permeabilidad. - La conductividad hidrológica de los residuos compactados es una propiedad física importante que, en gran parte, gobierna el movimiento de líquidos y gases dentro de un sitio de disposición final.

1.3.2 Propiedades Químicas

Las propiedades químicas de los RSU son importantes a la hora de conocer la capacidad de estos residuos para ser procesados y/o recuperados, ya sea para estudiar la viabilidad de la incineración, las posibilidades de compostaje o su depósito en sitios de disposición final autorizado con el fin de obtener biogás.

Por lo general los residuos sólidos son una combinación de materiales con cierto grado de humedad que pueden ser combustibles o no combustibles.

Cuando se pretenda emplear los residuos sólidos como combustibles, se deberá conocer el análisis físico, el punto de fusión de las cenizas, el análisis elemental y el contenido energético.

Si lo que se desea es utilizar los RSU para el compostaje u otros procesos de conversión biológica, se debe obtener información sobre su composición: Análisis físicos para determinar la humedad, materia volátil combustible, carbono fijo, ceniza, punto de fusión de la ceniza.

Se realizan análisis elementales de los componentes de residuos sólidos (determinación del porcentaje de carbono, hidrogeno, oxígeno, nitrógeno, azufre y ceniza; se incluye la determinación de halógenos en el análisis elemental). Con estos análisis se determina la composición química de la materia orgánica de los residuos sólidos urbanos, se obtienen relaciones C/N aptas para los procesos de conversión biológica.

Contenido energético de los componentes de los residuos. (Capacidad calorífica de los componentes de los residuos).

Nutrientes esenciales y otros elementos: Determina la disponibilidad de nutrientes de microbios, y para valorar los usos finales que puedan tener los materiales restantes después de la conversión biológica.

1.3.3 Propiedades Biológicas.

La fracción orgánica de la mayoría de los residuos sólidos urbanos se puede clasificar en constituyentes solubles en agua, (azúcares, féculas, aminoácidos y ácidos orgánicos),

hemicelulosa, celulosa, aceites y ceras (ésteres de alcoholes y ácidos grasos de cadena larga), lignina y lignocelulosa.

La Biodegradabilidad de los componentes, es la capacidad que tiene un compuesto para ser degradado en otros más sencillos mediante la actuación de microorganismos.

Sólidos volátiles (SV) es la porción de materia orgánica que puede eliminarse o volatizarse cuando esta se quema en un horno mufla a una temperatura de 550°C).

Producción de olores. - Los olores se producen por la descomposición de los compuestos orgánicos presentes en los residuos. La fermentación anaerobia y aerobia liberan sustancias que dan el olor desagradable a la basura, las más comunes son: aminas (olor a pescado), mercaptanos (olor a zorrillo), sulfuros orgánicos (col podrida), diaminas (carne podrida), amoniaco (amoniaco), ácido sulfhídrico (olor a huevo podrido), y escatol (Olor a heces fecales).

1.4 Manejo de residuos sólidos:

El manejo de residuos inicia desde la fuente con las actividades de reducción de residuos, la separación, reutilización y reciclaje, así como su almacenamiento para su recolección y transporte, acopio de desechos ya sea por los servicios municipales, empresas especializadas o el gobierno en general, y su transporte al lugar de tratamiento o descarga. “La disposición final de los residuos tiene que ver con su depósito o confinamiento permanente en sitios e instalaciones que permitan evitar su diseminación y las posibles afectaciones a los ecosistemas y a la salud de la población. La Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003 define las 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.” (SEMARNAT 2018)

El tratamiento de los residuos sólidos urbanos es el proceso de transformación física, química o biológica de los desechos sólidos enfocado a la reducción o eliminación de efectos nocivos a las personas y su ambiente, procurando adicionalmente obtener beneficios económicos.

El manejo integral de residuos implica las actividades de reducción, separación, reutilización, reciclaje, coprocesamiento, tratamiento biológico, químico, físico o térmico, acopio, almacenamiento, transporte y disposición final de residuos, individualmente realizadas o combinadas de manera apropiada, para adaptarse a las condiciones y necesidades de cada lugar, cumpliendo objetivos de valorización, eficiencia sanitaria, ambiental, tecnológica, económica y social. El plan de manejo de residuos tiene como objetivo minimizar la generación y maximizar la valorización de los RSU, de manejo especial y residuos peligrosos específicos, bajo criterios de eficiencia ambiental, tecnológica, económica y social fundamentado en el diagnóstico básico para la gestión integral de residuos, diseñado bajo los principios de responsabilidad compartida y manejo integral.

Un adecuado manejo de los residuos incluye la reducción, reúso y reciclaje, compostaje, digestión anaerobia, su conversión térmica con y sin recuperación de energía, y la disposición final en rellenos sanitarios y tiraderos a cielo abierto como última opción. (CFE 2012). Las Tecnologías de tratamientos de residuos y sus productos se resumen en la figura 1

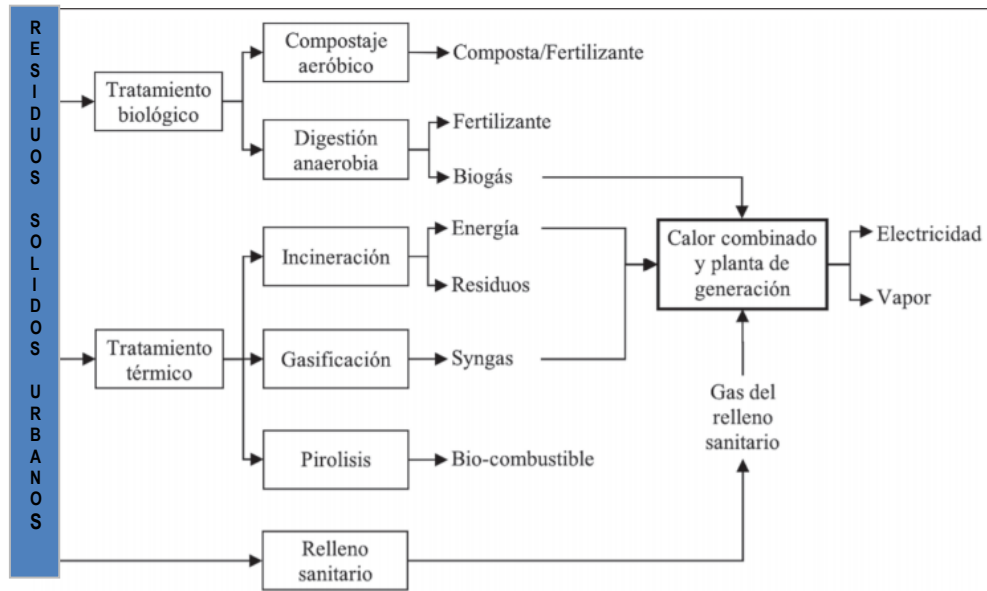


Figura 1. Tecnologías de tratamientos de residuos y sus productos. CFE 2012

La recolección puede ser selectiva o no diferenciada, y consiste en tomar los residuos sólidos de sus sitios de almacenamiento, para depositarlos en un equipo destinado a conducirlos a las estaciones de transferencia, instalaciones de tratamiento o sitios de disposición final.

Reciclaje es el proceso de separar, escoger, clasificar, empacar, almacenar y comercializar ciertos materiales para reincorporarlos como materia prima al ciclo productivo esto reduce los espacios necesarios para manejo de basura, ahorra energía por la disminución de la producción a partir de materia prima virgen y la emisión de gases de efecto invernadero derivado de su producción, se conservan recursos naturales como agua, madera y minerales y se aumenta la competitividad de las empresas y la oferta de trabajo.

Recuperación. Con esta actividad se obtienen materiales secundarios, bien sea por separación, desempaque, recogida o cualquier otra forma de retirar de los residuos sólidos alguno de sus componentes para su reciclaje o reutilización.

Relleno de tierra controlado. Sitio de disposición final de RSU, que cuenta parcialmente con inspección, vigilancia y aplicación de las medidas necesarias para el cumplimiento de las disposiciones establecidas

Relleno de tierra no controlado (Tiradero a cielo abierto) Sitio en donde son vertidos y mezclados diversos tipos de residuos sólidos urbanos sin ningún control o protección al ambiente.

Relleno sanitario. Instalación de ingeniería para la disposición de los residuos sólidos urbanos, diseñada y operada para minimizar los impactos a la salud pública y al ambiente.

Pasivo Ambiental: Son los sitios contaminados por la liberación de materiales o residuos peligrosos que no fueron remediados oportunamente para impedir la dispersión de contaminantes, pero que implican una obligación de remediación. En esta definición se incluye la contaminación generada por una emergencia que tenga efectos a largo plazo sobre el medio ambiente.

1.4.1 Conversión térmica.

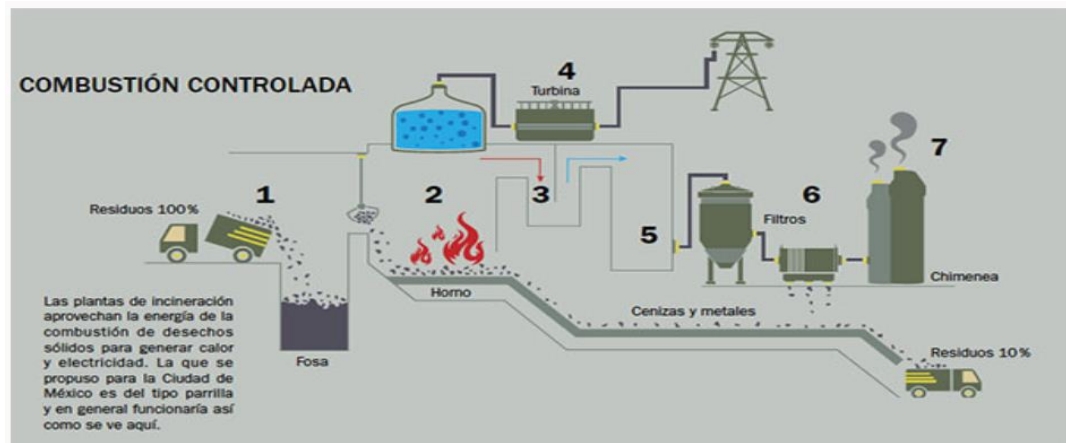
Los procesos para el aprovechamiento de los residuos sólidos para generación de energía eléctrica son:

Tipo Biológico: Se da por la digestión anaerobia de bacterias presentes en los residuos dispuestos en rellenos sanitarios, tiraderos a cielo abierto, plantas de tratamiento, zonas ganaderas, pantanos y en cualquier lugar donde haya descomposición de materia orgánica.

Tipo Térmico: Waste-to-Energy (WTE) Los procesos como la incineración, pirólisis, gasificación a baja temperatura y gasificación en arco de plasma.

Incineración: convierten el carbono en calor que puede generar vapor y electricidad en una turbina. La planta incineradora quema los residuos, se recupera el calor de la incineración que puede utilizarse para, calefacción de una ciudad, generación de electricidad, etc. Con este proceso, se reduce el volumen de residuos entre el 85 y 90%.

Los detractores de este sistema se basan en que las primeras tecnologías se emitían compuestos muy contaminantes, con una toxicidad alta, cancerígenos, etc. (furanos, dioxinas y metales pesados), las cenizas producto del proceso son muy contaminantes y requieren confinarse en rellenos sanitarios muy controlados, tienen un alto costo de construcción y operación, la operación requiere grandes volúmenes de basura por periodos prolongados de tiempo (lo que va en contra del ideal “basura cero”), además de no tener la certeza de su funcionamiento en condiciones diferentes a las normalmente utilizadas, por ejemplo a la altura sobre el nivel del mar en que se encuentra la Ciudad de México. (Greenpeace 2017). El Consejo Mundial de Energía (CME) recomienda instalar plantas de incineración en países en desarrollo siempre y cuando tengan un suministro constante de al menos 100,000 toneladas de desechos sólidos al año, así como un rendimiento calorífico de al menos siete Megajoules por kilogramo de materia como promedio, a esto debe agregarse, según los criterios del Banco Mundial, un sistema de gestión de desechos que funcione adecuadamente, sin riesgos de filtraciones de sustancias al suelo y subsuelo. (UNAM 2019). En la figura 2 se describe el proceso de Combustión Controlada.



1. Los camiones recolectores depositan su carga. Tras una última depuración de los residuos, se introducen al incinerador con ayuda de grúas.
2. En la parrilla de combustión se incineran los residuos a temperaturas que pueden superar los 1 000 °C.
3. Los incineradores están conectados a calderas donde circula agua que se vaporiza debido al calor de la combustión.
4. El vapor se canaliza hacia una turbina de vapor y generador, que convierte la energía de movimiento en corriente eléctrica.
5. Los restos de la quema se envían a un separador de partículas, mientras en la parrilla se depositan cenizas residuales y metales.
6. Los gases resultantes del proceso pasan por depuradores y filtros de carbón activado, entre otros sistemas.
7. Los gases se canalizan a filtros de mangas que filtran las partículas PM10 antes de ser expulsados por las chimeneas.

Fuente: Consejo Mundial de Energía y doctor Javier Aguillón Martínez, Instituto de Ingeniería de la UNAM.

Figura 2. Proceso de combustión controlada

Pirolisis

El pirólisis es un proceso fisicoquímico en el que la descomposición de la materia orgánica se realiza en un ambiente con deficiencia o ausencia de aire, en un rango de temperaturas de 500° a 900°C. Durante este proceso, la materia orgánica genera subproductos de alto contenido energético: carbón, alquitrán, gases de hidrógeno, nitrógeno, metano, etano, propano, butano, pentano, amoníaco, oxígeno, monóxido y bióxido de carbono que pueden ser utilizados como combustibles. Aceites ligeros: (mezclas de benceno, tolueno, xileno y otros), sales y metales reducidas que se pueden usar como materia prima en otros procesos

La proporción de la mezcla resultante de la pirólisis de los residuos sólidos, depende de las condiciones del proceso (temperatura de operación, velocidad del calentamiento y composición de los desechos de alimentación)

El componente principal de las plantas pirolíticas es el reactor pirolítico que consta de una cámara calentada con gas, hermética y revestida con un material aislante. Los reactores pueden ser discontinuos, Auger, lechos fluidizados y conos rotatorios.

Esta retorta gira lentamente y tiene una pequeña inclinación en el sentido de alimentación hacia la descarga. Los residuos son alimentados a través de un sello que abre intermitentemente y son sometidos a temperaturas de 650 a 982°C en una atmósfera deficiente o libre de oxígeno. (SEDESOL 2015). En la figura 3 se muestra el esquema general del proceso de pirólisis.

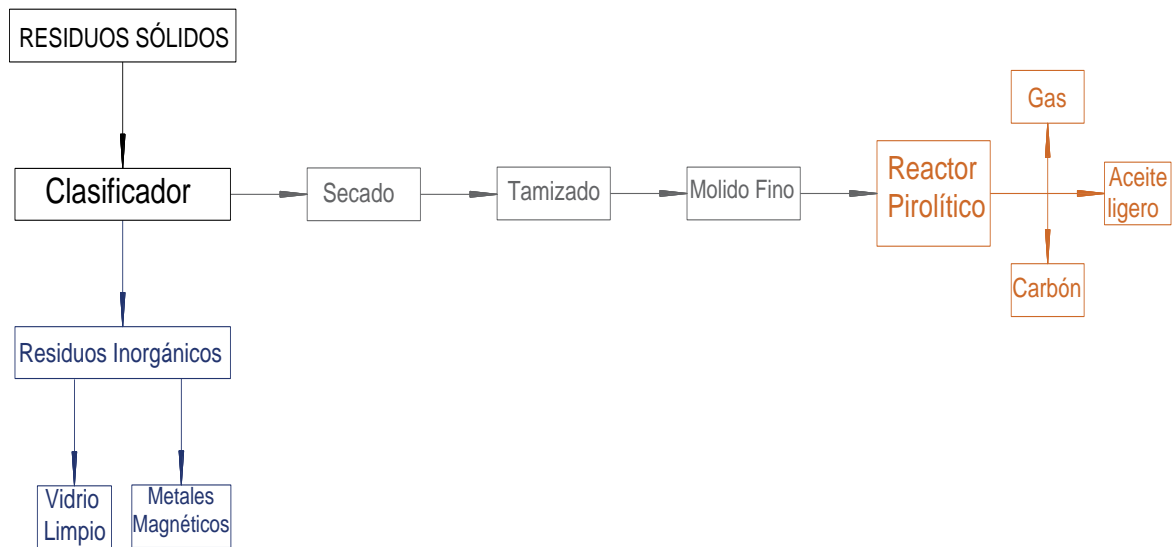


Figura 3 Esquema general del proceso de Pirólisis.

Los procesos de pirólisis se agrupan en dos categorías: Pirólisis convencional y Pirólisis a altas temperaturas. En la tabla 4 se muestran los sistemas pirolíticos.

SISTEMAS PIROLITICOS DE RESIDUOS SOLIDOS URBANOS		
PIROLISIS CONVENCIONAL		PIROLISIS A ALTAS TEMPERATURAS
Producción de gas combustible	Sistema Landgard Sistema Austin	Sistema de Torrax
Producción de líquido combustible	Sistema de la Compañía de Desarrollo e Investigación de Garret, EUA	Sistema de la Corporación de Investigación y Desarrollo Urbano, EUA

Tabla 4. Sistemas pirolíticos

Ventajas y desventajas de los sistemas pirolíticos

- Transforma muchos procesos industriales lineales en cíclicos

- A diferencia de la incineración, no genera gases contaminantes como óxidos de nitrógeno y azufre, generan formas residuales de nitrógeno gaseoso y azufre sólido.
- El cloro y el flúor se reducen a cloruros y fluoruros que se pueden precipitar con calcio.
- Maneja todo tipo de material orgánico con alto valor calórico, inclusive mezclas de residuos domésticos e industriales peligrosos.
- Los residuos se transforman en una fuente de energía que en una pequeña proporción mantiene el sistema y el resto se puede utilizar en otras tecnologías complementarias.
- Algunos residuos pueden utilizarse como materia prima del proceso
- Permite tratar los lodos de las plantas de tratamiento y suelos contaminados con hidrocarburos u otros compuestos orgánicos y así ser transformados en productos cerámicos útiles (por ejemplo: ladrillos).
- Convierten los plásticos, aceites, disolventes orgánicos, compuestos orgánicos clorados, hidrocarburos y materiales contaminados con estos productos, en hidrocarburos ligeros limpios y carbón.
- Al ser un sistema cerrado no genera emisiones a la atmósfera, los subproductos pueden ser reutilizados como combustible o materia prima para procesos industriales.
- Los gastos de construcción y operación son muy elevados

Gasificación a baja temperatura.

Esta tecnología de gasificación a baja temperatura (500°C), convierte los residuos en mezcla de gases con un poder calorífico entre 6 y 12 MJ/m³, al ser un proceso de bajo contenido de oxígeno, limita la formación de dioxinas, grandes cantidades de óxido de azufre y nitrógeno, los gases de combustión son menores y se requiere equipos más pequeños.

La descomposición térmica se da mediante la oxidación parcial de un sustrato carbonoso en condiciones de bajo contenido de aire, oxígeno o en presencia de otros agentes gasificantes como vapor de agua. La reacción genera una mezcla de gases que recibe el nombre de gas de síntesis o syngas. El gas de síntesis contiene concentraciones variables de CO, H₂, CH₄, CO₂ y N₂, así como de otros hidrocarburos ligeros. Los rendimientos obtenidos y las características de los gases producidos en la gasificación dependen principalmente de las condiciones presentes en la reacción (temperatura, presión, agente gasificante y tiempo de reacción), del tipo de reactor utilizado (lecho fijo Updraft y Downdraft, lecho fluidizado y de arrastre de gas) y de la aplicación de distintos sistemas de tratamiento y limpieza de los gases producidos.

Los gasificadores se clasifican según el tipo de agente gasificante, del tipo de contacto gas-sólido, la dirección y velocidad relativa gas-sólido, la presión de trabajo y la forma de aportar el calor al reactor.

En función de la composición, poder calorífico y presencia de sustancias contaminantes (alquitranes, azufre, cenizas), los gases de síntesis pueden emplearse como combustibles en turbinas, motores de combustión interna o calderas, producción de metanol, amoníaco y combustibles líquidos. Actualmente, se busca aumentar la proporción de hidrógeno y reducir la presencia de monóxido de carbono para que el syngas pueda utilizarse como alimentación en pilas de combustibles. (Gallardo, Colomer, Campos y Arias 2019). En la tabla 5 se indican los tipos de gasificadores más comercializados

Tipo de reactor	Características		
	Proceso	Empresa comercializadora	Agente gasificante
Lecho descendente (Fijo)	Sin fusión de cenizas	Lurgi	Aire u oxígeno
		Foster Wheeler Stoic	Aire
		Babcock W - D	Aire u oxígeno
	Con fusión de cenizas	Lurgi British Gas	Oxígeno
Lecho fluidizado	Sin aglomeración	Winkler	Aire u oxígeno
	Con aglomeración	Westinghouse	Aire u oxígeno
Lecho de arrastre	Alimentación seca	KBW	Oxígeno
		Shell	Aire u oxígeno
		Combustion Engineering	Aire u oxígeno
	Alimentación Slurry	Texaco	Aire u oxígeno
	Medio fundido	Saaberg - Otto	Aire u oxígeno
Reactor rotativo		KILnGAS	Aire

Tabla 5 Gasificadores más comercializados

GASIFICACION EN ARCO PLASMA

Es una variante de la gasificación. El plasma es un gas ionizado que no posee equilibrio electromagnético; se logra al ionizar un flujo gaseoso eléctricamente neutro mediante un campo electromagnético, es un buen conductor eléctrico y es sensible a los campos magnéticos. Las antorchas de plasma consiguen concentrar mucha energía (105 W/cm^2) en una zona reducida por medio de la ionización con arco eléctrico de un gas (generalmente aire). La temperatura que se alcanza es de $2,000^\circ$ a $4,000^\circ \text{C}$, por lo que se consigue vitrificar las cenizas y eliminar completamente la fracción orgánica.

Un reactor con antorcha de plasma consiste en un recipiente con una cantidad de oxígeno subestequiométrico donde la altísima temperatura producida permite romper los enlaces moleculares formando un gas de síntesis y una lava fundida que al enfriar se transforma en un producto vítreo inerte. Por tanto, este tipo de reactor transforma los residuos en un material vitrificado (corriente sólida) y un gas combustible compuesto principalmente por H_2 , CO y N , CL y S , siendo la reducción en peso y en volumen superior al 90 %.

El gas de síntesis generado contiene polvo y otros elementos indeseables por lo que debe someterse a un proceso de limpieza para su aprovechamiento energético.

Este sistema es útil para residuos que contengan sustancias orgánicas e inorgánicas.

El tratamiento es rápido, tiene efectiva transmisión de calor, la energía recuperada es superior al equivalente térmico de la electricidad consumida (excepto para residuos con pci (Poder calorífico inferior), el gas de síntesis tiene un gran poder calorífico y es libre de alquitranes.

1.4.2 Impacto de los RSU. Gases de efecto invernadero (GEI) y sustancias agotadoras del ozono.

Entre los impactos negativos del inadecuado manejo de los residuos está la generación de contaminantes y gases de efecto invernadero

Los gases de efecto invernadero (GEI) se acumulan en la atmósfera y absorben la radiación infrarroja del Sol, aumentando y reteniendo el calor en la atmósfera. Los principales GEI son de origen natural y son esenciales para la vida en el planeta porque permiten beneficiarnos del calor procedente del sol, sin embargo, la actividad humana ha generado una producción en exceso lo que impacta negativamente al medio ambiente.

La criticidad de los GEI se mide por su PCG (potencial de calentamiento global) o su capacidad de absorción de la radiación. Se define como «el forzamiento radiativo acumulado de las emisiones de una masa unitaria de gas en relación con un gas de referencia (CO₂), considerando tanto los efectos directos como de los indirectos en un horizonte de tiempo especificado» (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC 1996)). Los efectos directos se presentan cuando el gas en sí es un gas de efecto invernadero; el forzamiento radiativo indirecto se presenta cuando las transformaciones químicas que involucran al gas original producen un gas o gases que son de efecto invernadero o cuando un gas afecta los tiempos de vida de otros gases en la atmósfera.

El gas de referencia es el bióxido de carbono por lo que las emisiones son ponderadas por el potencial de calentamiento global (PCG) y se miden en teragramos de equivalentes de bióxido de carbono. (SEMARNAT 2004) En la tabla 6 se enumeran los gases de efecto invernadero.

Nombre del gas	Potencial de calentamiento global	Persistencia en la atmosfera (años)	Principal actividad humana que lo genera
Dióxido de carbono (CO₂)	1.00	Variable	Combustibles fósiles, producción de cemento, cambios de uso de suelo
Metano (CO₄)	21.00	12.00	Combustibles fósiles, agricultura, sitios de disposición final de residuos sólidos, ganadería, pesca, plantas de tratamiento, etc.
Óxido Nitroso (N₂O)	310.00	114.00	Fertilizantes, procesos de combustión industriales
HFC 23 (HCF₃)	12,000.00	250.00	Electrónica, refrigerantes
HFC 134 a (CF₃ CH₂F)	1,300.00	13.80	Refrigerantes
HFC 152 a (CH₃ CHF₂)	120.00	1.40	Procesos industriales
Tetrafluorometano (CF₄)	5,700.00	>50,000	Producción de aluminio
Hexafluoroetano (C₂F₆)	11,900.00	10,000.00	Producción de aluminio
Hexafluoruro de azufre (S F₆)	22000	3,200.00	Fluidos dieléctricos

Tabla 6 Gases de efecto invernadero

Además, se encuentran en los RSU sustancias agotadoras del ozono (SAO) que se emplean en la fabricación de envases de unicel, como propulsores de aerosoles para el cabello, en algunas pinturas y desodorantes, plaguicidas, así como en refrigeradores y climas artificiales contribuyen, al ser liberadas a la atmósfera, al adelgazamiento de la capa de ozono. Cuando los envases de estos productos son desechados de manera inadecuada se convierten en fuentes de emisión de SAO.

1.5 Biogás

El biogás es un producto de la descomposición de la materia orgánica compuesto principalmente por metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂) y otros gases como oxígeno (O₂) y nitrógeno (N₂)

1.5.1 Fases de degradación de la materia orgánica en los RSU

La degradación de la fracción orgánica de los desechos sólidos urbanos se realiza en fase aeróbica y anaeróbica.

La fase aeróbica se da en presencia de aire y comienza desde el momento en que se genera el residuo; en esta etapa intervienen hongos, bacterias aeróbicas y protozoarios cuyos subproductos finales son el bióxido de carbono (CO₂), el amoníaco (NH₃) y el agua (H₂O). (UNAM 2011). La duración de esta fase es variable y mientras exista suficiente oxígeno para sostener a las poblaciones aeróbicas se sigue dando la degradación; cuando ya no hay oxígeno, los organismos aerobios se extinguen y son reemplazadas por microorganismos anaeróbicos. Esta etapa puede aprovecharse para compostaje

La digestión anaerobia se realiza en ausencia de oxígeno, consta de una serie de reacciones bioquímicas en la que residuos orgánicos son degradados o consumidos por un conjunto de microorganismos.

1.5.2 Proceso de generación de biogás

La descomposición de los residuos orgánicos produce gases que pueden ser peligroso por su toxicidad o explosividad además de ser de efecto invernadero: bióxido y monóxido de carbono (CO_2 y CO) respectivamente, metano (CH_4), ácido sulfhídrico (H_2S) y compuestos orgánicos volátiles (COVs como la acetona, benceno, estireno, tolueno y tricloroetileno). (Compendio de estadísticas ambientales, capítulo 7, SEMARNAT 2007)

La descomposición anaerobia se presenta en condiciones libres de oxígeno y el resultado de este proceso es un combustible gaseoso llamado biogás que contiene principalmente Metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2) en menor escala, impurezas como humedad, ácido sulfhídrico (H_2S), siloxanos. Para el aprovechamiento del biogás es necesario eliminar el CO_2 e impurezas que contiene.

El proceso de la generación de biogás, se da en cuatro principales etapas biológicas y químicas, la cadena compleja (proteínas, carbohidratos lípidos) son hidrolizadas por enzimas extracelulares producidas por los microorganismos acidogénicos o fermentativos que los descomponen en moléculas estructurales básicas, tales como ácidos grasos de cadena corta, alcoholes, hidrógeno, dióxido de carbono, monosacáridos, aminoácidos y otros productos intermedios. Los ácidos grasos de cadena corta son transformados en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono, mediante la acción de los microorganismos acetogénicos. Por último, los microorganismos metanogénicos producen metano a partir de ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono.

Etapas 1. Hidrólisis:

La materia orgánica polimérica no puede ser utilizada por los microorganismos a menos que se hidrolicen en compuestos solubles capaces de atravesar la pared celular; es el primer paso para la degradación anaeróbica de sustratos orgánicos complejos, ya que proporciona sustratos orgánicos para la digestión anaeróbica. Se realiza por la acción de enzimas extracelulares producidas por microorganismos hidrolíticos; depende de la temperatura, tiempo de retención hidráulico, composición bioquímica del sustrato (porcentaje de lignina, carbohidratos, proteínas y grasas), tamaño de partículas, pH, concentración de ion Amonio (NH_4^+) y de la concentración de los productos de la hidrólisis. Esta etapa puede ser el proceso limitante de la velocidad global del proceso sobre todo cuando se tratan residuos con alto contenido de sólidos, porque la degradación de los materiales lignocelulósicos es tan lenta que afecta el proceso de la lignina y otros hidratos de carbono.

En el proceso de digestión anaeróbica las proteínas son fuente de carbono y energía y los aminoácidos derivados de su hidrólisis tienen un elevado valor nutricional. Las proteínas son hidrolizadas en péptidos y aminoácidos por la acción de enzimas proteolíticas llamadas proteasas; parte de estos aminoácidos son utilizados directamente en la síntesis de nuevo material celular y el resto son degradados a ácidos volátiles, dióxido de carbono, hidrógeno, amonio y sulfuro en posteriores etapas del proceso.

La degradación de los lípidos en ambientes anaeróbicos comienza con la ruptura de las grasas por la acción de enzimas hidrolíticas denominadas lipasas produciendo ácidos grasos de cadena larga y glicerol.

Los pretratamientos físico-químicos cuyo principal efecto es la reducción del tamaño de las partículas producen un aumento en la tasa de hidrólisis lo que beneficia el proceso general produciendo menores tiempos de retención y tamaños de reactor menores. (Manual de biogás, Varnero 2011)

Etapa fermentativa o Acidogénesis

En esta etapa se presenta la fermentación de las moléculas orgánicas dando como productos dióxido de carbono, metano, amoníaco, acético, fórmico, H₂ y compuestos orgánicos más reducidos (propiónico, butírico, valérico, láctico y etanol principalmente) que tienen que ser oxidados por bacterias acetogénicas en la siguiente etapa del proceso. La importancia de las bacterias fermentativas además del hecho que producen el alimento para los grupos de bacterias es que eliminan cualquier traza del oxígeno disuelto del sistema.

Acetogénesis:

Algunos productos de la fermentación pueden ser metabolizados directamente por los organismos metanogénicos (H₂ y acético), el etanol, ácidos grasos volátiles y algunos compuestos aromáticos se digieren adicionalmente por acetógenos para producir en gran parte ácido acético, dióxido de carbono e hidrógeno. Los microorganismos encargados de este proceso son bacterias facultativas y anaeróbicas obligadas que colectivamente se denominan bacterias formadoras de ácidos.

Los microorganismos acetogénicos son *Syntrophomonas wolfei* y *Syntrophobacter wolini*.

Un tipo especial de bacterias acetogénicas son las llamadas homoacetogénicas, son capaces de crecer heterotróficamente en presencia de azúcares o compuestos monocarbonados (como mezcla hidrógeno / dióxido de carbono) produciendo como único producto acetato. A diferencia de otras bacterias acetogénicas, estas no producen hidrógeno como resultado de su metabolismo, sino que lo consumen como sustrato. Según se ha estudiado el resultado neto del metabolismo homoacetogénico permite mantener bajas presiones parciales del hidrógeno y por tanto permite la actividad de las bacterias acidogénicas y acetogénicas. Los principales microorganismos homoacetogénicos que han sido aislados son *Acetobacterium woodii* o *Clostridium aceticum*. (Varnero 2011)

Metanogénesis

En esta etapa las bacterias metanógenas convierten los productos intermedios en CO_2 , CH_4 y H_2O , estas bacterias son sensibles a la temperatura y el tipo de sustrato (materia orgánica que se va a emplear), sólidos totales en el sustrato, temperatura del biodigestor, pH, relación carbono/nitrógeno, tiempo de retención, grado de mezclado, agregado de inoculantes, y la presencia de compuestos inhibidores del proceso por lo que en la operación de un biodigestor se deben tener en cuenta.

En esta etapa bacterias anaeróbicas estrictas actúan sobre los productos resultantes de las etapas anteriores. Los microorganismos metanogénicos son responsables de la formación de metano y la eliminación de los productos de los procesos, completan el proceso de digestión anaeróbica mediante la formación de metano a partir de sustratos monocarbonados o con dos átomos de carbono unidos por un enlace covalente: acetato, H_2/CO_2 , formato, metanol y algunas metilaminas.

Estos organismos se clasifican dentro del dominio Archaea y tienen características comunes que los diferencian del resto de procariontes. Se pueden establecer dos grandes grupos de microorganismos en función del sustrato principal que metabolizan: hidrogenotróficos que consumen H_2/CO_2 y fórmico y acetoclásticos, que consumen acetato, metanol y algunas aminas.

Se ha demostrado que un 70% del metano producido en los reactores anaeróbicos se forma a partir de la descarboxilación de ácido acético a pesar de que mientras todos los organismos metanogénicos son capaces de utilizar el H_2 como aceptor de electrones, sólo dos géneros pueden utilizar acetato. Los dos géneros que tienen especies acetotróficas son Methanosarcina y Methanothermobacter. El metano restante proviene de los sustratos ácido carbónico, ácido fórmico y metanol. El más importante es el carbónico, el cual es reducido por el hidrógeno, también producido en la etapa anterior.

Las bacterias del género Acetobacterium y Eubacterium, trabajan en las 4 etapas.

1.5.3 Determinación de cantidad de biogás.

La composición típica obtenida en el biogás producto de la digestión anaerobia es de 45 - 60 % de metano (CH_4) y 40 - 60 % de dióxido de carbono (CO_2) (CFE 2012)

El biogás generado por la descomposición anaerobia de los RSU tiene un potencial para la generación eléctrica.

Tener una proyección del volumen y características del biogás es necesario para el diseño de los sistemas de control del mismo

La cantidad de biogás que se genera depende principalmente de los siguientes factores: Contenido de humedad en los residuos, disponibilidad de nutrientes para bacterias generadoras de metano, pH del medio y temperatura

Para determinar los productos de la descomposición de los RSU es necesario determinar la proporción de carbono (C), hidrógeno (H), oxígeno (O), nitrógeno (N), humedad (H₂O), materia volátil (MO) y cenizas. Con esta información se realiza el balance estequiométrico, los productos son metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂), amoníaco (NH₃) y ácido sulfhídrico (SH₂)

El modelo empleado para predecir la generación de biogás emplea una ecuación derivada del modelo de cinética de 2° orden, se muestra a continuación en la ecuación 1.

Donde:

n

$\sum_{i=1}^n$ = La suma del año de apertura +1 hasta el año de proyección (n);

i=1

Q_M= Generación máxima de Biogás (m³/año)

k= Índice de generación de metano (1/año)

L₀= Generación potencial de metano (m³/Mg)
Masa de residuos sólidos dispuestos en

M_i= el año i (Mg)

Edad de los residuos dispuestos en el

t_i= año i (años)

$$Q_M = \sum_{i=1}^n 2kL_0M_i(e^{-kt_i})$$

Los valores de (k) obtenidos de observaciones en varios rellenos sanitarios varían de 0.003 a 0.21 por año (EPA, 1991). Estos valores fueron definidos con modelos teóricos haciendo pruebas de campo.

Esta ecuación permite calcular la generación de biogás usando las cantidades de residuos acumulados a través de un año. Las proyecciones se efectúan variando la cuantificación del año que corresponda y después iterando la ecuación. El año de máxima generación de biogás como ya se ha dicho por lo regular coincide con el año en que se hace la clausura del sitio o en el siguiente año.

Para aprovechar el biogás es necesario eliminar el CO₂ y los contaminantes. Otro subproducto benéfico es el fertilizante proveniente de las plantas de biogás.

Modelo Mexicano de Biogás

El Landfill Methane Outreach Program (LMOP) de la EPA desarrolló en 2003 el **primer Modelo de producción de biogás mexicano** en colaboración con la Agencia de Desarrollo Internacional de los Estados Unidos (USAID por sus siglas en inglés) y otras agencias gubernamentales mexicanas. **El modelo mexicano de biogás versión 1.0** se utilizó para estimar la generación y recuperación de biogás para rellenos sanitarios que contaban o planeaban tener sistemas de recolección del biogás generado.

En 2009 se desarrolló el Modelo Mexicano de Biogás versión 2.0 por SCS Engineers.

El modelo proporciona valores precalculados para el índice de generación y generación potencial de metano. Requiere datos específicos del relleno: año de apertura, de clausura, índices de disposición anual, precipitación promedio anual y eficiencia del sistema de recolección y provee automáticamente valores del índice de generación de metano (k) y el potencial de generación de metano (L_0), fueron desarrollados usando datos específicos representativos de México y la relación entre los valores de k y L_0 observados en rellenos sanitarios en Estados Unidos. Los valores de k y L_0 varían dependiendo de la precipitación promedio anual y pueden utilizarse para proyectar la generación de biogás en rellenos sanitarios localizados en las diferentes regiones de México y pueden ser modificados de acuerdo a las características in situ.

El método supone que la generación de biogás llega a su máximo después de un periodo de tiempo antes de la generación de CH_4 .

El modelo asume que el tiempo que transcurre entre la colocación de los residuos y el comienzo de la generación de biogás es de un año y la generación disminuye exponencialmente mientras la fracción orgánica es consumida. (Aguilar-Virgen FI-UADY 2011). El año de generación máxima normalmente ocurre en el año de clausura o el año siguiente, la ecuación 2 permite obtener el flujo de biogás máximo esperado.

$$Q_{LFG} = \sum_{t=1}^n \sum_{j=0.1}^1 2kL_0 \left[\frac{Mi}{10} \right] (e^{-kt_{ij}})(MCF)(F)$$

Ecuación 2 Modelo mexicano de Biogás 2.0

Q_{LFG} : Flujo de biogás máximo esperado ($\text{m}^3/\text{año}$)

i: Incremento de tiempo en un año

n: Año inicial de disposición de residuos.

j: Incremento de tiempo en 0.1 años

k: índice de generación de metano ($1/\text{año}$)

L_0 : Generación potencial de metano (m^3/Mg)

M_i : Masa de residuos dispuestos en el año i (Mg)

tij: Edad de la sección j de la masa de residuos M_i dispuestos en el año i (años decimales)

MCF: Factor de corrección de metano

F: Factor de ajuste por incendios

Con esta ecuación se estima la generación de biogás usando cantidades de residuos dispuestos acumulados en un año, proyecciones para años múltiples son desarrolladas variando la proyección del anual y luego iterando la ecuación.

El índice de generación de metano (k) representa la tasa de biodegradación de primer orden a la cual el CH_4 es generado luego de la disposición de residuo en el sitio y está relacionado con el período de vida de los residuos de acuerdo con la ecuación: período = $\ln(2) / k$. Conforme el valor de k incrementa, la generación de CH_4 también incrementa (en tanto siga recibiendo residuos) y disminuye con el tiempo cuando el relleno sanitario es clausurado.

La constante k depende del contenido de humedad, la disponibilidad de nutrientes, el pH y la temperatura. El contenido de humedad es uno de los parámetros más importantes que inciden en la tasa de generación del gas, ya que sirve como medio para el transporte de nutrientes y bacterias, la humedad depende del volumen de lluvia infiltrado, el contenido inicial de humedad, cantidad y tipo de cobertura diaria, la permeabilidad y tiempo de disposición de la cobertura final, impermeabilización de la base, sistema de recolección de lixiviados y la profundidad de los residuos.

Esta versión del modelo asigna valores de k para las cuatro categorías de degradación: degradación de residuos muy rápida (DRR), degradación de residuos moderadamente rápida (DRMR), degradación de residuos moderadamente lenta (DRML), y degradación de residuos muy lenta (DRL), en cada una de las 5 regiones climáticas de México. Estos valores varían en base a la precipitación promedio anual en el clima de la región donde está ubicado el RESA, tipo de residuo y clima.

1.6 Lixiviados

1.6.1 Generalidades

Los lixiviados son líquidos que se forman “por la reacción, arrastre o filtrado de los materiales que constituyen los residuos y que contiene en forma directa o en suspensión, sustancias que pueden infiltrarse en los suelos o escurrirse fuera de los sitios en los que depositan los residuos y que puede dar lugar a la contaminación del suelo y cuerpos de agua, provocando su deterioro y representar un riesgo potencial para la salud humana y de los demás organismos vivos” (NOM-083-SEMARNAT 2003)

Los lixiviados en los residuos sólidos se forman por la percolación (flujo de un líquido a través de un medio poroso no saturado debido a la acción de la gravedad) de agua a través de los residuos, el agua proviene de la lluvia, drenajes superficiales y el líquido producido por la descomposición de los residuos por lo que cuanto menos compactados estén los residuos, mayor es la cantidad de lixiviado que se produce. Pueden considerarse como un tipo muy específico de agua residual; contienen diversos constituyentes derivados de la solubilización

de los residuos depositados, así como de las reacciones químicas y bioquímicas que se producen dentro del sitio de disposición final.

El impacto de los lixiviados genera un problema ambiental grave, por lo que es necesario que los sitios de disposición final, impermeabilicen el suelo previo a la colocación de residuos y al final sellen los residuos para disminuir su producción.

Contienen una alta carga orgánica compuestos orgánicos solubles que al no ser colectados y tratados adecuadamente producen contaminación del agua subterránea adicionándole DBO₅ y DQO, agotamiento de oxígeno disuelto, contaminación por virus y bacterias, incremento en el contenido de minerales (cloruro, sulfato, bicarbonato, sodio y potasio), adición de metales pesados, compuestos orgánicos complejos (pesticidas, hidrocarburos, químicos industriales), eutrofización (adición de nitrógeno y fósforo).

La calidad de los lixiviados y biogás está asociada a los procesos de descomposición de los residuos que a su vez dependen de las condiciones climáticas y meteorológicas en el sitio, propiedades fisicoquímicas de los residuos dispuestos, la tecnología aplicada en la disposición final, y la edad del relleno.

Los productos de la descomposición aerobia generalmente son: bióxido de carbono, amoníaco (que después se transforma en nitrato) y agua, así como otros productos de oxidación en menor proporción. Las reacciones de oxidación generalmente son exotérmicas razón por la que la temperatura interna del relleno puede ser de 60°C o más. Esto provoca que un porcentaje importante de la humedad se evapore por lo que en esta fase prácticamente no se genera lixiviado. (Gaceta Ecológica, núm. 79, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales Distrito Federal, México 2006)

Con la descomposición anaerobia se produce cierta cantidad de lixiviado. En esta fase se degradan las macromoléculas como proteínas y aminoácidos para la generación posterior de ácidos orgánicos, metano y bióxido de carbono; mientras se lleva a cabo una desnitrificación y la reducción de los diversos componentes sobre todo de sulfatos.

Adicional a este lixiviado, pueden existir condiciones mixtas o bacterias facultativas que respondan a ambos ambientes favoreciendo la descomposición aerobia y anaerobia al mismo tiempo; si además el sitio está expuesto permanentemente a la precipitación pluvial; el agua de lluvia pasa a través del relleno disuelve diferentes componentes de los residuos y parte de los productos de la descomposición aerobia y anaerobia.

Las reacciones químicas más importantes en la generación de lixiviado son la Disolución y arrastre en suspensión de los materiales de los residuos y productos de conversión biológica en los líquidos que se filtran a través de los residuos, la evaporación de compuestos químicos y de agua en el biogás, la absorción de compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles presentes en los residuos; la deshalogenación y descomposición de compuestos orgánicos y las reacciones de oxido-reducción que afectan a metales y a la solubilidad de las sales metálicas.

La capacidad de campo es el contenido de humedad; una vez que ha drenado por gravedad toda el agua libre desde la masa saturada; la capacidad de campo es excedida y el agua que es retenida por los residuos sólidos migra en forma de lixiviados.

En la figura 4 se presenta un resumen de las condiciones y resultados de los procesos de descomposición de los residuos en un sitio de disposición final.

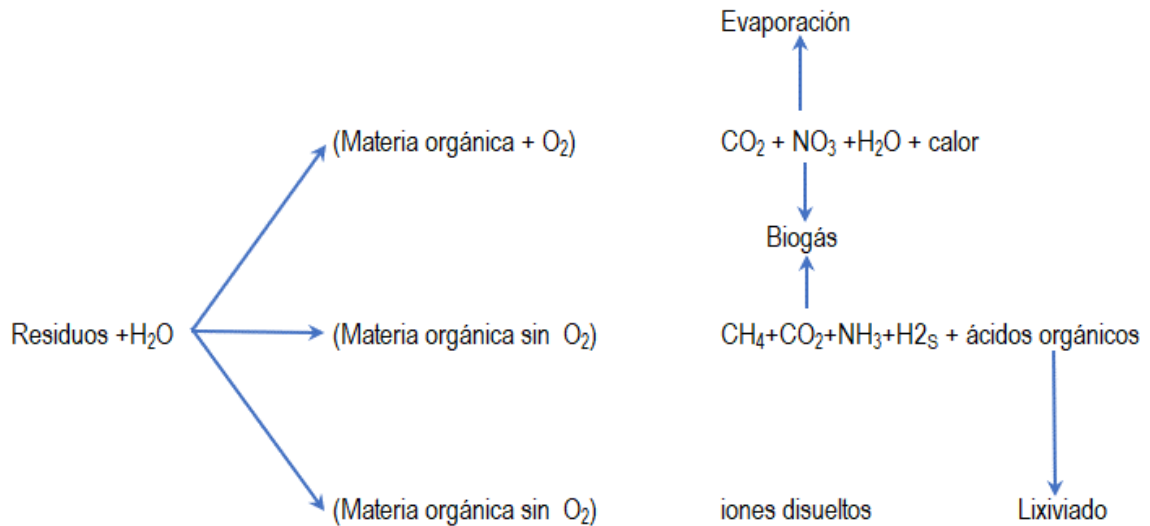


Figura 4 Condiciones de descomposición de los recursos y resultados de los mismos.

1.6.2 Características del lixiviado.

Los lixiviados se representan comúnmente por los parámetros básicos siguientes:

DBO₅. “Demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅): Es una estimación de la cantidad de oxígeno que requiere una población microbiana heterogénea para oxidar la materia orgánica de una muestra de agua en un periodo de 5 días. (NMX-AA-025-SCFI-2001). Es una medida de la materia orgánica que puede ser degradada mediante procesos biológicos.

DQO: demanda Química de oxígeno (DQO) Es una medida aproximada de la demanda teórica de oxígeno consumida en la oxidación química total de constituyentes orgánicos a productos inorgánicos finales” (NMX-AA-030/1-SCFI-2012). El parámetro más crítico para el tratamiento de lixiviados es la DQO

Relación DBO₅/DQO Indica la edad del lixiviado. Generalmente para un lixiviado joven es más alta que el de un lixiviado maduro, una baja relación DBO₅/DQO indica que el lixiviado es estable y difícil de degradar biológicamente, por lo que se recomiendan procesos fisicoquímicos para su tratamiento. La determinación de la relación DBO₅/DQO permite

monitorear cambios en la composición del lixiviado. Si la relación está en un rango de 0.4 a 0.6, indica que la materia orgánica en los lixiviados es fácilmente biodegradable.

En los lixiviados viejos provenientes de celdas antiguas, la relación DBO₅/DQO está a menudo en el rango de 0.05 a 0.2. La relación cae por que estos lixiviados, contienen ácidos húmicos y fúlvicos, que no son fácilmente biodegradables. (Chávez 2011 CIMAV)

pH. El pH varía de acuerdo con la edad del lixiviado y de la fase de descomposición en que se encuentren los residuos; disminuye hasta 5 o menos por la presencia de ácidos orgánicos durante la fase ácida, incrementando después hasta un valor de 8 durante la fase de maduración.

Conductividad eléctrica. Está relacionada con la presencia de sales en solución, cuya disociación genera iones positivos y negativos capaces de transportar energía eléctrica si se somete el líquido a un campo eléctrico.

ST. La división de los contaminantes en SDT (sólidos disueltos totales) y SST (sólidos suspendidos totales) es fundamental ya que muchos tratamientos solo son efectivos contra uno de ellos. Los sólidos que pasan a través de un filtro apropiado son definidos como los SDT, mientras que los sólidos que son retenidos por el filtro son los SST

Nitrógeno Total: Es la suma del nitrógeno amoniacal y nitrógeno orgánico los cuales son convertidos a sulfato de amonio [(NH₄)₂SO₄], La concentración de nitrógeno total está relacionada con la edad del lixiviado, los lixiviados jóvenes tienen concentraciones mayores, y van decreciendo conforme pasa el tiempo.

Metales pesados: Metales pesados son aquellos cuya densidad es por lo menos cinco veces mayor que la del agua, como el Arsénico (As), Cadmio (Cd), Cobalto (Co), Cromo (Cr), Cobre (Cu), Mercurio (Hg), Níquel (Ni), Plomo (Pb), Estaño (Sn) y Zinc (Zn). Su concentración en los lixiviados, disminuye con el tiempo.

En la tabla 7 se muestran las características del lixiviado (HICKMAN L., 1999)

Características	Joven	Intermedio	Maduro
Edad (años)	< 5	5 - 10	> 10
pH	6.5	6.5 - 7.5	> 7.5
DQO (mg/L)	> 10000	4000-10000	> 4000
DBO ₅ / DQO	> 0.3	0.1 - 0.3	<0.1
Compuestos orgánicos	80% ácidos orgánicos	5 - 30% ácidos orgánicos + compuestos húmicos y fúlvicos	Compuestos húmicos y fúlvicos
Metales pesados	Bajo - medio		Bajo
Biodegradabilidad	Importante	Medio	Bajo

Tabla 7 Características del lixiviado

En función del tiempo, el proceso de descomposición de los residuos puede dividirse en varias etapas.

La fase I es una etapa aeróbica. El oxígeno del aire, se consume rápidamente, así como el nitrógeno, por los procesos de nitrificación. Se produce bióxido de carbono y una elevación de la temperatura, por lo general esta fase dura un par de semanas.

La fase II es la llamada fase ácida, es una transición a los procesos anaerobios, cuando la fermentación empieza a generar lixiviados con un alto contenido de ácidos orgánicos, que dan lugar a un descenso significativo en el pH. El biogás en esta etapa generado está constituido principalmente por bióxido de carbono y nitrógeno aún no consumido y un porcentaje menor de hidrógeno. En los lixiviados, la demanda química de oxígeno alcanza su concentración más alta, así como el amoníaco y los ácidos orgánicos.

La fase III es una etapa metanogénica intermedia en donde predominan las condiciones totalmente anaerobias. La proporción del metano se incrementa, el bióxido de carbono decrece. Los ácidos grasos volátiles se transforman en biogás, y su concentración disminuye en el lixiviado. El pH aumenta y la carga orgánica del lixiviado se reduce considerablemente.

La fase IV (metanogénica estable). Es anaerobia y se alcanza la máxima producción del metano, con concentración estable alrededor del 55% en volumen. El bióxido de carbono es algo menor pero también estable, variando entre 40 y 50%. En el lixiviado se mantiene un pH elevado, con concentraciones significativas de amoníaco, y una carga orgánica decreciente medida por la demanda química de oxígeno.

La fase V es la etapa final de la estabilización de los residuos, tiene carácter aerobio. Estas condiciones ocurren por lo regular en rellenos recién clausurados. La producción de metano decrece y el bióxido de carbono se sustituye por nitrógeno y oxígeno conforme se introduce el aire atmosférico a través de las capas superficiales del relleno.

Debido a la falta de control en muchos de los sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos en México, no se tiene una caracterización típica de los lixiviados que se generan, en la tabla 8 se muestran los rangos típicos indicados en la literatura internacional. Los datos que la carga contaminante de los lixiviados disminuye con el tiempo. (Gestión integral de residuos sólidos, Tchobanoglous, Samuel Vigil, Hilary Theisen. McGraw-Hill Interamericana de España, 1994)

Características	Relleno nuevo (menos de 2 años)	Relleno Maduro (más de 10 años)
Demanda química de oxígeno (DQO)	3,000 - 60,000	100 - 500
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO5)	2,000 - 30,000	100 - 200
Carbono orgánico Total (COT)	1,500 - 20,000	80 - 160
Sólidos totales en suspensión (STS)	200 - 2,000	100 - 400
Nitrógeno total	20 - 1,600	100 - 160
Fosforo total	5 - 100	5 - 10
Alcalinidad como CaCO ₃	1,000 - 10,000	200 - 1,000
Dureza Total como CaCO ₃	300 - 10,000	200 - 500
Calcio (Ca ²⁺)	200 - 3,000	100 - 400
Magnesio (Mg ²⁺)	50 - 1,500	50 - 200
Potasio (K +)	200 - 1,000	50 - 400
Sodio (Na +)	200 - 2,500	100 - 200
Cloro (Cl -)	200 - 3,000	100 - 400
Sulfatos (SO ₄ ²⁻)	50 - 1,000	20 - 50
Hierro Total	50 - 1,200	20 - 200
pH	4.7 - 7.5	6.6 - 7.5

Tabla 8. Características de los lixiviados según la edad del sitio de disposición final.

1.6.3 Determinación del volumen de lixiviados

El diseño de los sistemas para manejo de lixiviados requiere de la determinación del volumen de lixiviado a manejar, para lo cual es necesaria la información hidrológica del sitio (precipitaciones, evaporaciones y temperaturas mensuales) y a partir de esta información de dimensiona el sistema de recolección, cárcamo de extracción y bombeo de lixiviados. La cantidad de agua que entra al relleno sanitario se calcula con el balance de agua: Ecuación 3

Donde:

$$WB=P-(R+E+T)$$

WB: Balance de agua

R: Escurrimiento

P: Precipitación

E: Evaporación

T: Transpiración

Esta expresión no considera el agua que es utilizada en la formación de biogás, el agua retenida por los residuos sólidos (20 a 25% de contenido de humedad), ni el agua perdida en forma de vapor. (HICKMAN; 1999)

1.6.4 Manejo de Lixiviados

El tratamiento de los lixiviados es diferente al del agua residual municipal, tienen valores mayores de DBO y DQO y su composición y volumen es variable en el tiempo. (CIMAV 2011). Para que el tratamiento sea eficiente, es necesario ajustarlo según las características que tenga por el paso del tiempo, de lo contrario resultan ineficientes.

La primera parte para el manejo de lixiviados, es la recolección de éstos; dado que fluyen por gravedad, generalmente se da pendiente a las celdas para poder captarlos en la parte más baja y extraerlos por bombeo.

Tratamientos convencionales de lixiviados: Transferencia de lixiviados: recirculación y tratamiento combinado con aguas residuales (comúnmente utilizados en lixiviados jóvenes)

Biológicos: aerobia y anaerobia

Métodos fisicoquímicos: oxidación química, adsorción, precipitación química, coagulación / floculación, sedimentación y extracción con aire. Son mayormente usados en el tratamiento de lixiviados maduros refieren a la evolución de las proporciones volumétricas de los principales componentes del biogás.

La eficacia de los tratamientos biológicos y otros procesos físicos favorables, tales como, la evaporación, se ven reducidos por las temperaturas bajas de invierno.

Recirculación: Es un método muy eficiente para el tratamiento de lixiviados, los lixiviados se captan y son recirculados a las celdas de basura del vertedero. Durante las primeras etapas del funcionamiento de cualquier vertedero, el lixiviado contendrá cantidades importantes de SDT, DBO₅, DQO, nutrientes y metales pesados. Cuando se recircula el lixiviado se atenúan y diluyen los compuestos producidos por la actividad biológica y por otras reacciones químicas y físicas que se producen dentro del vertedero. Por ejemplo, los ácidos orgánicos sencillos presentes en el lixiviado, se convertirán en CH₄ y CO₂. Por el incremento del valor del pH cuando se produce el CH₄; los metales se precipitan y son retenidos dentro del sitio. Adicionalmente la reinfiltración incrementa la tasa de producción de biogás. Si antes de reinfiltrarse el lixiviado se acondiciona en un reactor anaerobio con flujo ascendente, especialmente concebido para extraer un licor rico en microorganismos metanogénicos; es posible acelerar los tiempos de estabilización de los residuos dentro del vertedero, en este método es fundamental contar con un sistema de extracción del biogás.

Evaporación de lixiviados: Es uno de los sistemas más sencillos, el lixiviado se almacena en estanques impermeabilizados donde se evapora, el que no se evapora se riega en el vertedero y en temporada de lluvias, se cubren los estanques para no tener aportación de la lluvia. Se extraen los lodos generados para su estabilización.

Coagulación/floculación/sedimentación: Mediante la adición de coagulantes, se da una desestabilización química de las partículas que forman flóculos. Las partículas presentes en el agua son removidas mediante coagulación/floculación, sedimentación y filtración. El

objetivo es remover la mayor cantidad de solidos por medio de la sedimentación y ser separados a través del proceso de filtrado como un proceso de purificación.

Adsorción

Consiste, en la captación de sustancias solubles presentes en la interfase de una solución y se utiliza principalmente carbón activado (CA). Esta interfase puede hallarse entre un líquido y un gas, un sólido, o entre dos líquidos diferentes. El proceso de adsorción tiene lugar en tres etapas: macrotransporte, microtransporte y sorción. La capacidad teórica de adsorción de un determinado contaminante por medio del carbón activado determina calculando su isoterma de adsorción (cantidad de materia adsorbida en función de la concentración a temperatura constante). Las fórmulas más frecuentemente empleadas para el tratamiento de los datos experimentales de la isoterma fueron desarrolladas por Freundlich, por Langmuir, y por Brunauer, Emmet y Teller (Isoterma BET). (Chávez Montes 2011)

Oxidación Química: Se utiliza frecuentemente en la descomposición de compuestos orgánicos peligrosos. El peróxido de hidrogeno (H_2O_2) en la presencia de un catalizador (Fe por ejemplo) genera radicales hidroxilo ($\bullet OH$) los cuales reaccionan con el material orgánico reduciéndolo a Fe_{3+} y produciendo un coagulante potente para la remoción de constituyentes de alto peso molecular por la adsorción en los flóculos formados de $Fe(OH)_3$ a un pH neutro. Las aplicaciones costo-eficiencia de la oxidación química sugieren una oxidación parcial de los compuestos orgánicos refractarios para hacerlos más biodegradables.

Membranas: Se realiza una filtración mediante membranas; que pueden definirse como la región discontinua interpuesta entre dos fases, o como la fase que actúa como barrera para prevenir el movimiento de masa regulando o restringiendo el paso de una o más especies a través de ella actuar como una barrera selectiva. Esto permite el paso de ciertos componentes y la retención de otros en una mezcla de compuestos. La membrana puede estar en fase gaseosa, líquida o sólida o combinaciones de estas, ser natural o sintética, porosa o no porosa, y permite separar en fase gaseosa, gas – líquido, líquido – líquido, etc.

Osmosis inversa: Esta tecnología es utilizada en la remoción de altas concentraciones de solidos disueltos; “filtra” sólidos disueltos en el agua forzando a pasar el agua a través de una membrana mediante la aplicación de una fuerza que excede la presión osmótica de los componentes disueltos en la solución.

En este capítulo se definieron los conceptos generales sobre residuos sólidos, su clasificación, características y principales sistemas para aprovechamiento y tratamiento, información necesaria para la Gestión integral de residuos sólidos.

Capítulo 2 SITUACION DE LOS SITIOS DE DISPOSICION FINAL DE RESIDUOS SOLIDOS URBANOS EN MÉXICO

2.1 Introducción

México presenta un problema grave por la generación, transporte y manejo de residuos sólidos urbanos.

Mientras que el tratamiento térmico de los RSU, (Waste to Energy WTE) es una alternativa dominante como manejo efectivo de los RSU en los países desarrollados, en los países en vías de desarrollo, los sitios de disposición final son, predominantemente rellenos sanitarios y tiraderos a cielo abierto (muchos de ellos operando en forma clandestina).

En México la ley que da marco legal a todas las políticas, programas y planes relacionados con el sector de los residuos sólidos urbanos, especiales y peligrosos, es la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR), publicada el 19 de junio de 2007 en el Diario Oficial de la Federación.

Establece como facultades de la federación en materia de residuos; expedir las normas oficiales mexicanas (NOM) con enfoque a la gestión integral de los residuos sólidos urbanos, de manejo especial y peligrosos, así como promover junto con las entidades federativas y municipios la participación de inversionistas y del sector social (Artículo 7°); la promoción, investigación, desarrollo y aplicación de nuevas tecnologías, equipos, sistemas y procesos que eliminen reduzcan o minimicen la liberación al ambiente y transferencia de uno a otro de sus elementos, de contaminantes provenientes de la gestión integral de los residuos; también impone medidas de control, incentivos económicos, fiscales financieros y de mercado, que tengan por objeto prevenir o evitar la generación de residuos, y aplica las sanciones correspondientes, entre otros, para el correcto cumplimiento de la normatividad, planteando la necesidad de colaborar en conjunto con las entidades federativas para la instrumentación de programas para la prevención y gestión integral

A las instituciones estatales, les indica que deberán someter a consideración de la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) la construcción y operación de rellenos sanitarios para recibir asistencia técnica del Gobierno Federal para tal fin.

Un punto importante es que contempla el cobro por el manejo integral de los residuos sólidos urbanos.

El Artículo 115° de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos establece que los servicios públicos de limpia, recolección, traslado, tratamiento y disposición final de los RSU son competencia de los gobiernos municipales. El artículo 10 de la LGPGIR señala además que contarán con la colaboración y el apoyo del gobierno estatal y federal.

La gestión de los residuos de manejo especial RME es responsabilidad directa de las entidades federativas, la regulación de la generación y manejo integral de los mismos debe

cumplir con lo estipulado en la LGPGIR en el Artículo 9°, las disposiciones emitidas por las entidades federativas y demás disposiciones aplicables.

Los residuos sólidos urbanos son generados en las casas habitación, también aquellos generados por actividades en establecimientos y vía pública con características domiciliarias y que no entren en la clasificación de residuos de otro tipo por las normas y leyes vigentes.

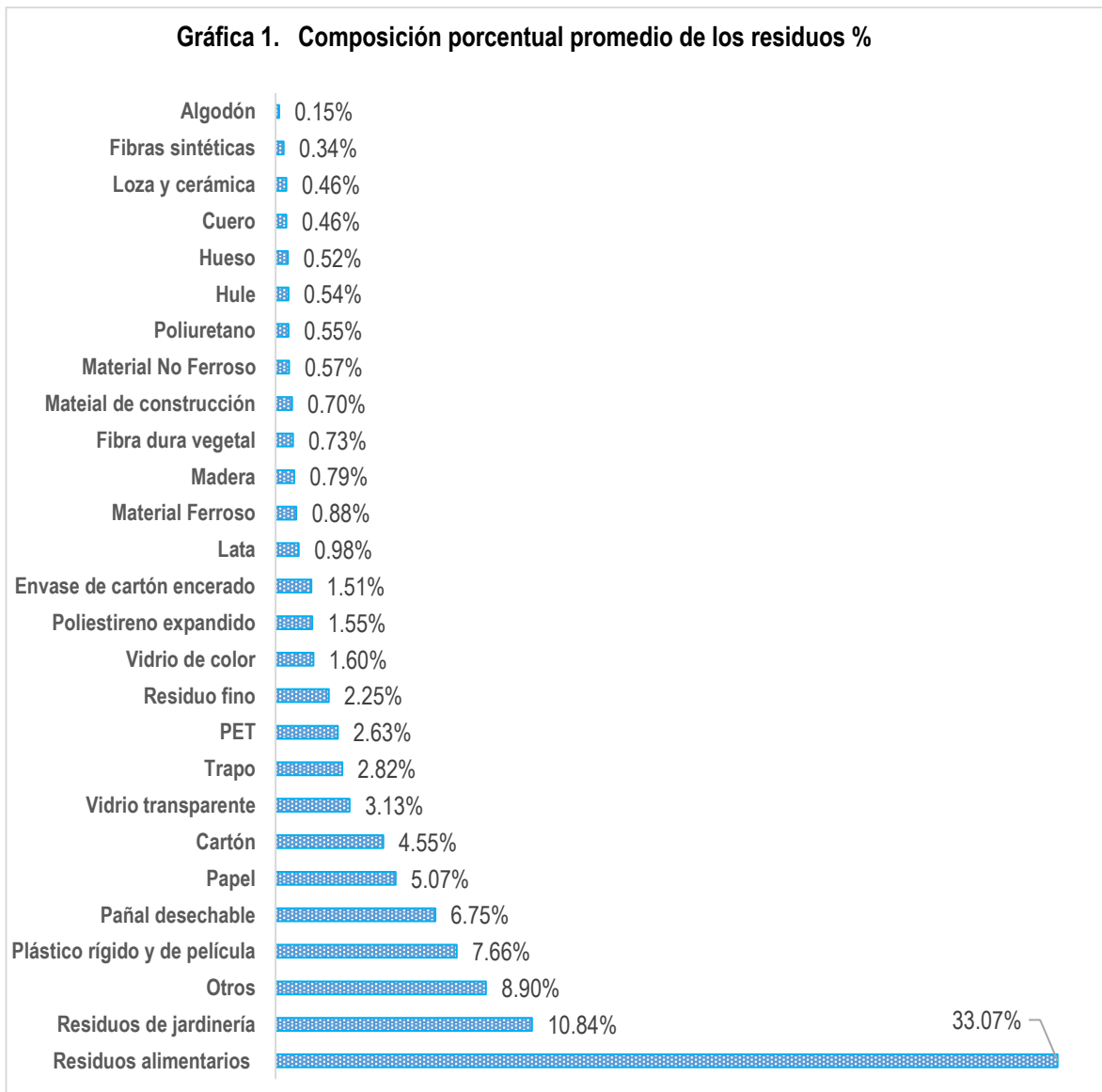
La generación de residuos sólidos, varía según la zona geográfica, tanto en el volumen per cápita generado como en su composición; mientras en las zonas rurales los residuos son en su mayoría residuos orgánicos en las zonas urbanas la composición es cada vez más compleja.

Cabe aclarar que en las zonas rurales se ha incrementado el volumen de residuos inorgánicos, en gran parte debido a la distribución nacional de alimentos y bebidas procesadas y el acceso fácil a productos inorgánicos. Estas modificaciones en los hábitos de consumo incrementan el volumen de residuos contaminantes que van a parar a los cuerpos de agua, suelo y aire.

El volumen de basura generado es muy alto y difícil de manejar, por un lado, la producción per cápita de residuos aumentó de 300 gramos en la década de los 50's, a 944 gramos en 2017 (promedio), y la población pasó de 25.8 a 126 millones de 1950 a 2019; el peso volumétrico promedio es de 140.447 kg/m³. (SEMAR 2020)

La composición de la basura en México, ha cambiado con el tiempo, mientras que en la década de los 50's, entre el 65 y 70% de la composición del volumen de residuos eran orgánicos, para el 2012 esta cifra se redujo a 46.42%. (SEMARNAT 2019) – INEGI 2017

En la gráfica 1 se muestra la composición porcentual promedio de los residuos según el Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Delegacionales (CNGMD) 2017 del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI),



2.2 Datos de la situación de los sitios de manejo de residuos sólidos urbanos en México

Según los Tabulados básicos de Residuos Sólidos Urbanos del Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Delegacionales (CNGMD) 2017 publicado por el INEGI; 2314 municipios en México cuentan con servicio de recolección de basura. Los residuos recolectados son transportados a sitios de disposición final que pueden o no estar en el municipio o alcaldía que los genera.

Según el mismo censo, la generación per cápita calculada fue de **0.944 kg/hab/día** con una generación estimada total de residuos en el país de 120,128 t/día. De éstos; 31.56% son

residuos susceptibles de aprovechamiento; 46.42% son residuos orgánicos y 12.03% “otros residuos” (Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos, SEMARNAT 2020)

Se recolectan 100,751 t/día; lo que da una cobertura del 83.87%; el mayor porcentaje de residuos orgánicos (53.46%) se presenta en localidades con menos de 10,000 habitantes, el menor porcentaje (40.32%) se presenta en las localidades con población entre 30 y 40 mil habitantes. Los residuos susceptibles de aprovechamiento varían entre el 27.30% y el 33.51% presentándose el mayor porcentaje en localidades de más de 100,000 habitantes. De la misma manera los residuos denominados “otros” varían entre el 19.24 y 26.84% y las localidades que generan el menor porcentaje, tienen poblaciones menores a 10,000 habitantes.

Las regiones que mayor volumen de residuos generan son: Centro (50%), Norte (18%) y la Ciudad de México (13%)

El parque vehicular de recolección nacional es de 16,615 vehículos. El 29% son modelos anteriores a 1994 y de la totalidad, 59.30% tienen sistema de compactación, 29.02% son de caja abierta y 11.69% son vehículos de otro tipo.

En México hay 127 instalaciones para transferencia ubicadas en 112 municipios de 23 entidades federativas; el 49.67% se ubican en municipios con población superior a 100,000 habitantes, así mismo, cuenta con 173 centros de acopio en 63 municipios de 19 entidades federativas.

Se realiza recolección separada en 144 municipios de 23 estados y en las 16 alcaldías de la Ciudad de México. Solo se recolectan separadamente el 5% de los residuos. Los mayores obstáculos que enfrenta la recolección separada son las limitaciones presupuestales para emprender proyectos de recolección separada, la costumbre de la población de mezclar los residuos y la insuficiencia de instalaciones para el aprovechamiento de los residuos separados.

La cobertura de recolección nacional es del 83.87%, lo que se traduce en que 19,377 t/día no son recolectadas.

Los estados que recolectan el 100% de los residuos generados son Colima, Baja California Sur, Ciudad de México, Nayarit, Quintana Roo y Sinaloa y los que tienen índices menores al 60% son Chiapas y Oaxaca. Hay 179 municipios que no prestan el servicio de recolección y que representa el 0.52% de la población nacional ubicada principalmente en Chiapas, Oaxaca, Puebla y Veracruz. Adicionalmente algunos hogares realizan la quema de residuos (11.4%) y entierro o depósito en otros lugares (2.1%)

En México existen instalaciones para el acopio de residuos con potencial de aprovechamiento; hay 173 centros de acopio en 19 estados, además de 47 plantas de tratamiento o de aprovechamiento de residuos distribuidas en 43 municipios de 15 estados donde se realizan los siguientes procesos: en 26 separación o reciclaje; en 5 trituración; en 13 compactación; en 19 compostaje y en 5 biodigestión.

El Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Delegacionales (CNMGD) 2017 registró que hay 2516 prestadores de servicio de recolección en los municipios; de los cuales 87.12% son del sector público, 9.82% del sector privado y el 3.06% del sector social

En 2017, había 2203 sitios de disposición final ubicados en 1722 municipios localizados en todo el país excepto la Ciudad de México; de los cuales, 238 (10.80%) son rellenos sanitarios y 1643 (74.585) son tiraderos a cielo abierto. El 60% de la totalidad de los residuos recolectados se depositan en 228 SDF.

La recuperación informal de residuos reciclables (pepena) es una actividad generalizada en México y aunque no se tienen cifras oficiales, se estima que es la principal fuente de recuperación de residuos reciclados y según el director del Instituto Nacional de Recicladores AC; al menos dos millones de personas viven de esta actividad.

El CNMCD 2017 reportó que de los SDF que hay en México, 359 (16.30%) capturan los lixiviados, 213 (9.67%) captura el biogás y solo 5 producen energía con el biogás; 326 (14.8%) cuentan con geomembrana para aislar los residuos, 355 (43.35%) cuentan con cerca perimetral; 190 (8.62%) cuentan con báscula), en el 81% no tienen control del tipo y cantidad de residuos que ingresan, 955 (43.35%) compactan los residuos y los cubren con materiales térreos 1053 (47.80%) no cuenta con ninguna infraestructura para la protección al ambiente; 85 SDF cumplen con todas las características de infraestructura y operación; así mismo, 1440 SDF (65%) han concluido su vida útil. Ver tablas 9 a 13

Entidad federativa	Generación estimada (t)	Recolección promedio (t/día)	Sitios de Disposición Final (SDF)	TIPO A	TIPO B	TIPO C	TIPO D
				Mayor a 100 t/día	De 50 a 100 t/d	De 10 a 50 t/d	Menor a 10 t/día
Σ	120,128	100,751	2,203	162	109	457	1,475
Aguascalientes	1,330	942	1	1	0	0	0
Baja California	3,535	2,957	28	4	1	7	16
Baja California Sur	737	1,081	33	3	1	7	22
Campeche	888	792	28	2	2	4	20
Chiapas	4,964	2,286	113	5	6	30	72
Chihuahua	3,638	787	137	5	1	10	121
Ciudad de México	9,552	2,886	0	0	0	0	0
Coahuila de Zaragoza	3,032	3,504	35	6	2	6	21
Colima	743	10,049	3	3	0	0	0
Durango	1,767	1,327	50	2	1	13	34
Estado de México	16,739	4,155	71	14	6	33	18
Guanajuato	6,031	2,670	44	9	13	15	7
Guerrero	3,421	2,128	116	4	4	29	79
Hidalgo	2,694	7,451	65	6	2	24	33
Jalisco	7,961	12,409	122	9	13	41	59
Michoacán	4,459	4,615	99	9	8	37	45
Morelos	1,878	1,456	14	0	3	10	1
Nayarit	1,146	1,843	27	2	6	9	10
Nuevo León	5,310	4,564	40	4	2	8	26
Oaxaca	3,538	1,985	385	4	3	14	364
Puebla	5,991	4,218	94	8	4	16	66
Querétaro	2,085	1,867	15	3	1	8	3
Quintana Roo	1,546	2,538	44	5	1	3	35
San Luis Potosí	2,640	1,870	57	5	2	17	33
Sinaloa	3,068	3,139	49	7	1	15	26
Sonora	2,916	2,468	123	5	7	13	98
Tabasco	2,471	1,991	17	9	2	5	1
Tamaulipas	3,591	3,054	46	8	3	11	24
Tlaxcala	1,123	1,059	5	2	2	1	0
Veracruz	7,813	6,102	150	15	9	38	88
Yucatán	2,016	1,487	116	1	2	15	98
Zacatecas	1,505	1,071	76	2	1	18	55

TABLA 9. SDF POR ESTADO. CNGMD 2017

Entidad federativa	Estaciones de Transferencia	Centros de acopio	Plantas de Tratamiento o aprovechamiento	Cantidad de residuos separados recolectados		
				FORSU (t/día)	FIRSU (t/día)	Total
Σ	127	173	47	2,062	3,219	5,281
Aguascalientes	5	11	0	0	0	0
Baja California	5	0	0	0	0	0
Baja California Sur	0	0	0	0	0	0
Campeche	0	0	0	0	0	0
Chiapas	8	1	1	16	18	33
Chihuahua	2	2	3	50	100	150
Cd. de México	12	0	12	1,374	2,500	3,874
Coahuila de Zaragoza	0	2	0	0	0	0
Colima	2	1	0	1	5	6
Durango	1	0	0	0	8	8
Estado de Méx	20	16	7	228	59	287
Guanajuato	3	18	2	3	23	26
Guerrero	0	1	0	50	20	70
Hidalgo	1	11	0	8	23	31
Jalisco	12	25	6	173	216	389
Michoacán	5	5	4	31	39	70
Morelos	9	1	0	2	24	26
Nayarit	0	0	0	0	0	0
Nuevo León	4	4	2	0	2	2
Oaxaca	10	2	1	35	53	88
Puebla	4	5	3	*	*	0
Querétaro	2	0	0	9	12	22
Quintana Roo	2	1	1	0	1	1
San Luis Potosí	1	0	0	0	1	2
Sinaloa	1	0	0	0	0	0
Sonora	3	0	1	3	0	3
Tabasco	1	7	2	0	2	2
Tamaulipas	4	2	0	0	1	1
Tlaxcala	1	0	0	0	0	0
Veracruz	6	58	1	8	5	14
Yucatán	2	0	1	71	107	179
Zacatecas	1	0	0	0	0	1

TABLA 10 SDF INFRAESTRUCTURA POR ESTADO. CNGMD 2017

Infraestructura	Cantidad de SDF	% respecto al total
Báscula	190	8.62%
Captura de lixiviados	359	16.30%
Captura de biogás	213	9.67%
Geomembrana	326	14.80%
Cerca perimetral	955	43.35%
Ninguna	1,053	47.80%
Control de Acceso	753	34.18%
Control de admisión de residuos	417	18.93%
Compactación y cubierta con tierra	955	43.35%
Monitoreo de aspectos de higiene y seguridad	260	11.80%
Ninguna	883	40.08%
TABLA 11 Equipamiento de los SDF. CNGMD 2017		

Infraestructura	Cantidad de SDF	% respecto al total
Antes de 1999	441	20.02%
de 2000 a 2005	411	18.66%
De 2006 a 2010	385	17.48%
De 2011 a 2015	424	19.25%
2,016	106	4.81%
2,017	8	0.36%
2,018	0	0.00%
Sin información	428	19.43%
Total	2,203	100.00%

TABLA 12. Inicio de operaciones de los SDF. CNGMD 2017

Cantidad de años	Cantidad de SDF	% respecto al total
0	1,440	65.37%
De 1 a 5	134	6.08%
De 6 a 10	184	8.35%
Más de 10	445	20.20%
Total	2,203	100.00%

TABLA 13. Vida útil remanente de los SDF. CNGMD 2017

En cuanto a los contaminantes atmosféricos, en la siguiente tabla se muestran la cantidad de emisiones equivalentes a bióxido de carbono generados, según el reporte México en el mundo (INEGI 2016) (tabla 14)

Atmósfera			
Emisiones de metano originadas por fuentes antropogénicas en México ^c	Millones de toneladas métricas (equivalentes a bióxido de carbono)	2015	194.2
Emisiones de óxido nitroso originadas por fuentes antropogénicas en México ^c	Millones de toneladas métricas (equivalentes a bióxido de carbono)	2015	28.8
Emisiones de bióxido de carbono derivadas de la quema de combustibles fósiles y de la manufactura de cemento en México ^c	Miles de toneladas de carbón	2013	133243
Emisiones de bióxido de carbono según sector: electricidad y producción de calor en México ^c	Miles de Toneladas	2013	150.4
Emisiones de bióxido de carbono según sector: industrias manufactureras y de la construcción en México ^c	Miles de Toneladas	2013	65.8
Emisiones de bióxido de carbono según sector: transporte en México ^c	Miles de Toneladas	2013	150.6

^c INEGI. México en el mundo, 2016.

TABLA 14 Emisiones de bióxido de carbono

CIUDAD DE MEXICO

Según el inventario de residuos sólidos 2018, la generación diaria de residuos en la Ciudad de México fue de 13,073 toneladas. Entre las medidas en materia de manejo de residuos sólidos, el gobierno de la Ciudad de México ha implementado el programa para la separación de residuos que busca la reducción del volumen que se ingresa a los SDF, al incrementar su aprovechamiento mediante el reúso, reciclado, transformación y aprovechamiento energético, con el objetivo de llegar al ideal de basura cero.

Cuenta con 13 estaciones de transferencia ubicadas en 11 demarcaciones territoriales, operan de 06:00 a 20:00 horas, excepto las estaciones de transferencia Central de Abasto e Iztapalapa que operan las 24 horas.

La generación per cápita de residuos en la capital del país es más alta que el promedio nacional, incrementándose en las alcaldías con concentraciones de servicios, actividades culturales y funciones públicas más fuertes y disminuyendo en las que aún tienen áreas agrícolas. (SEDEMA 2018)

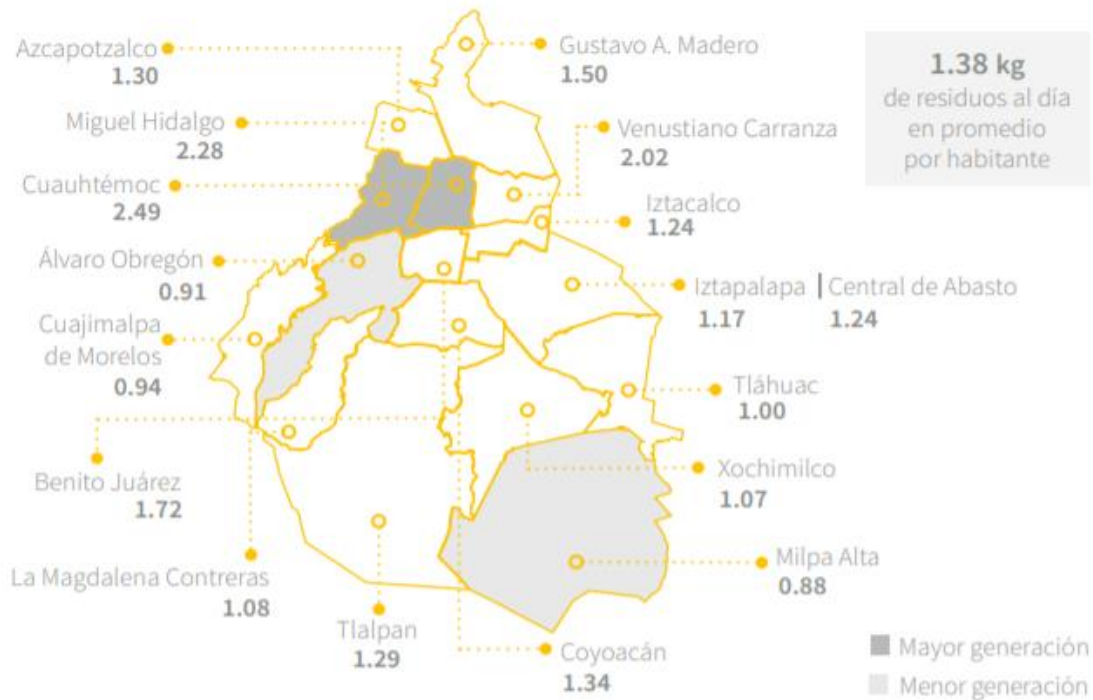


Figura 4. Generación per cápita (kg/hab) por alcaldía en la Ciudad de México

La principal fuente de generación de residuos es la domiciliaria (48%), seguida por el comercio (26%), servicios (14%), diversos (5%) central de abastos (4%) y controlados (3%), en cuanto al volumen generado (13,073 toneladas/día), 6,274 se generan en los domicilios, 3,348 por establecimientos mercantiles, 1,794 t/día por restaurantes, hoteles, oficinas,

etcétera, 674 t/día residuos de manejo especial, parques y jardines, 585 t/día por la central de abastos y 398 t/día por terminales de transporte, unidades médicas (no peligrosos), etc.

El Servicio Público de Limpia se integra por 8,155 personas de barrido manual, 2,652 vehículos de recolección y 72 barredoras mecánicas.

Para el manejo de los residuos, cuenta con una infraestructura de 13 estaciones de transferencia, 2 plantas de selección, 2 plantas de compactación, 8 plantas de composta y 5 sitios de disposición final, cuenta con 6 sitios de disposición final clausurados (Santa Catarina, Prados de la Montaña y Bordo Poniente etapas I, II, III y IV) (Inventario de Residuos Sólidos de la Ciudad de México SEDEMA 2018)

La ciudad de México genera alrededor de 13 mil toneladas de basura diarias, de las cuales 8 mil 600 se envían a rellenos sanitarios y sólo mil 900 toneladas se van al reciclaje.

Hay además distribuidos en las alcaldías, 1251 tiraderos clandestinos. (SEDEMA 2018)

Infraestructura	Cantidad	Ubicación
Estaciones de transferencia	13	Alvaro Obregón, Azcapotzalco, Benito Juárez, Central de Abasto, Coyoacán, Cuauhtémoc, Gustavo A Madero, Iztapalapa, Miguel Hidalgo, Milpa Alta, Tlalpan, Venustiano Carranza y Xochimilco (PGIR 2016-2020 SEDEMA 2020)
Plantas de selección	3	San Juan de Aragón Módulo I y II, Fase II y Santa Catarina
Plantas de compactación	2	San Juan de Aragón (fase II), Iztapalapa etapas 1 y 2
Plantas de composta	8	Bordo Poniente, Alvaro Obregón, Cuajimalpa, Iztapalapa, Milpa Alta (2), Xochimilco y San Juan de Aragón
Sitios de disposición final (ubicadas fuera de la Cd de México)	5	Cañada, Milagro, Chicoloapan, Perseverancia (Cuautla) y Bicentenario (Cuautitlán)

TABLA 15 infraestructura Ciudad de México. Inventario de Residuos Sólidos de la Ciudad de México 2018. SEDEMA

Alcaldía	No. De tiraderos clandestinos
Iztapalapa	331
Cuauhtémoc	224
Venustiano Carranza	109
Benito Juárez	102
Tlalpan	99
Gustavo A Madero	86
Alvaro Obregón	83
Miguel Hidalgo	70
Azcapotzalco	47
Iztacalco	46
Coyoacán	18
Milpa Alta	13
La Magdalena Contreras	9
Tláhuac	5
Xochimilco	5
Cuajimalpa de Morelos	4
Total	1,251

TABLA 16 Tiraderos clandestinos en la Ciudad de México. Inventario de Residuos Sólidos de la Ciudad de México 2018. SEDEMA

En este capítulo se hizo una breve exposición de la situación de los sitios de disposición final para los residuos sólidos urbanos en México. Para el caso de la Ciudad de México destaca la presentación del Programa de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS 2016-2020) que tiene como objetivo considerar un enfoque metropolitano que tienda a un cambio de paradigma de “Basura cero”, para lo que plantea los siguientes principios rectores:

- I. Desarrollo sustentable
- II. Prevención y minimización
- III. Manejo seguro y ambientalmente adecuado
- IV. Autosuficiencia
- V. Comunicación, educación y capacitación
- VI. Información
- VII. Participación social
- VIII. Responsabilidad compartida
- IX. Quien contamina paga
- X. Desarrollo tecnológico
- XI. Protección al suelo
- XII. Armonización de las políticas
- XIII. Principio precautorio

CAPÍTULO 3. LINEAMIENTOS PARA LA CLAUSURA DE SITIOS DE DISPOSICION FINAL DE RESIDUOS URBANOS NO CONTROLADOS

Se iniciará el presente capítulo haciendo una revisión de la normatividad mexicana.

3.1 Normatividad

“Toda persona tiene derecho a un medio ambiente adecuado para su desarrollo y bienestar”, este derecho se estableció en 1999 en el artículo cuarto de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos y el correcto manejo de los residuos sólidos urbanos es parte necesaria para el cumplimiento del derecho a un medio ambiente adecuado.

La normatividad existente abarca desde la clasificación y manejo de residuos, hasta los métodos de muestreo y determinación de las características de los residuos sólidos y la clausura de los sitios de disposición final

En cuanto a la competencia de las autoridades de los diferentes niveles de gobierno, el artículo 115 de la Constitución establece que el manejo de los RSU es competencia de los gobiernos municipales.

El artículo segundo transitorio de la LGPGIR publicada en 2003, señala: “... los gobiernos de las entidades federativas y de los municipios, deberán expedir y, en su caso, adecuar sus leyes, reglamentos, bandos y demás disposiciones jurídicas, de acuerdo con las competencias que a cada uno corresponda”, para lo que contarán con la colaboración y el apoyo del gobierno estatal y federal (artículo 10 de la LGPGIR)

Para los fines del presente trabajo, se utiliza como referencia la Ley General Para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR); la NOM-052 SEMARNAT-2005 para las definiciones y clasificación de residuos peligrosos; la NOM 087 ECOL-SSA -2002 para las definiciones de los residuos biológico infecciosos y la NOM-083-ECOL-2003 que es la primer norma específica en materia de sitios de disposición final de residuos sólidos y que rige todos los temas expuestos en el presente documento.

La mayoría de los estados de la República Mexicana cuentan con leyes ambientales y/o de equilibrio ecológico. Hay 9 estados que no cuentan con una Ley Estatal en materia de residuos (Aguascalientes, Baja California Sur, Chiapas, Nayarit, Nuevo León, San Luis Potosí, Tamaulipas, Tlaxcala y Estado de México).

3.2 Requisitos para la construcción y operación de los sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos

Las dos referencias obligadas para el manejo de sitios de disposición final de residuos sólidos se describen brevemente a continuación.

LEY GENERAL PARA LA PREVENCIÓN Y GESTIÓN INTEGRAL DE LOS RESIDUOS (LGPGIR)

El manejo de residuos sólidos tienen como objetivo garantizar el derecho de toda persona al medio ambiente sano y propiciar el desarrollo sustentable a través de la prevención de la generación, la valorización y la gestión integral de los residuos peligrosos, de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial; prevenir la contaminación de sitios con estos residuos y llevar a cabo su remediación, así como establecer las bases para aplicar los principios de valorización, responsabilidad compartida y manejo integral de residuos, bajo criterios de eficiencia ambiental, tecnológica, económica y social, los cuales deben de considerarse en el diseño de instrumentos, programas y planes de política ambiental para la gestión de residuos (Artículo 1 de la LGPGIR)

La **NOM-083-ECOL-2003** es la primera normativa referente a la disposición de residuos sólidos. Establece las 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.

3.2.1 Tipos de SDF:

En función del volumen de residuos recibidos por día, la norma clasifica los sitios según la siguiente tabla

TIPO	t/día
A	Mayor a 100
B	50 hasta 100
C	10 y menor que 50
D	Menor a 10

Tabla 17: Clasificación de SDF según el volumen de residuos recibidos por día.

3.2.2 Selección del sitio:

En cuanto a la selección de sitios que recibirán RSM el epígrafe seis de la norma establece las especificaciones que deben cumplir los sitios de disposición final:

- La distancia entre el sitio y aeródromos o aeropuertos deberá ser mayor a 13 Km; en caso de no cumplirse, solicita adicionalmente un estudio de riesgo aviario.

- No se puede ubicar un sitio de disposición final de residuos dentro de áreas naturales protegidas salvo los que lo tengan contemplado en el Plan de Manejo.
- El sitio deberá estar a una distancia mínima de 500 metros del límite de la traza urbana en localidades mayores a 2500 habitantes.
- No puede ubicarse en zonas de marismas, manglares, esteros, pantanos, humedales, estuarios, planicies aluviales, fluviales, recarga de acuíferos, arqueológicas, sobre cavernas, fracturas o fallas geológicas.
- Fuera de zona de inundación para un periodo de retorno de 100 años, en caso de no cumplirse, no deberá haber obstrucción del flujo ni posibilidad de deslaves o erosión que afecten las instalaciones.
- La distancia mínima entre el sitio y un cuerpo de agua superficial con caudal continuo, lagos y lagunas, será de 500 metros.
- Garantizar una distancia de al menos 100 m entre el sitio y la circunferencia mayor del cono de abatimiento de cualquier pozo de extracción de agua en operación o abandonado, y en caso de no poder determinar el cono de abatimiento, la distancia no será menor a 500 m.
- Con el objetivo de hacer un diseño adecuado del sitio de disposición o la clausura de sitios que dejaran de operar, la norma indica realizar previamente estudios geológicos, hidrogeológicos, topográfico, geotécnico de generación y caracterización de residuos, lixiviados y biogás, para todos los tipos de sitios de disposición final

3.2.3 Características constructivas y operativas de los centros de disposición final de RSU

El epígrafe 7, de la norma, indica las características **constructivas** y operativas del sitio de disposición final: debe cumplir con:

- Una barrera geológica natural o equivalente a un metro y un coeficiente de conductividad hidráulica de al menos 1×10^{-7} cm/s o contar con un sistema impermeable equivalente
- Sistema de control de biogás que garantice su extracción, captación, conducción y control.
- Sistema de control de lixiviados que garantice su extracción, captación y conducción para infiltración a las celdas, tratamiento o ambas.

- Control de agua pluvial para minimizar su infiltración.
- Un área de emergencia para recibir residuos en caso de que no se pueda operar el frente de trabajo y esta área deberá cumplir con la misma seguridad ambiental que las celdas de operación ordinaria.
- Requerimiento de compactación dependiendo del tipo de sitio (A, B, C) que va de 400 a 700 kg/m³ (mínimo)
- Para el control de la dispersión de materiales ligeros, fauna nociva e infiltración pluvial, establece se realice la cobertura intermedia y continua dentro de un lapso menor a 24 horas posteriores a su depósito.
- Control de admisión de residuos: No puede admitir aguas residuales y líquidos industriales de proceso ni lodos hidratados con más de 85% de humedad; residuos que contengan aceites minerales ni residuos peligrosos según la normatividad vigente.

Un aspecto importante de esta norma, es la inclusión de obras complementarias para la operación adecuada del sitio y que deben cumplir todos los tipos de sitios: Caminos de acceso, caminos interiores, cerca perimetral, caseta de vigilancia y control de acceso, báscula, agua potable, electricidad y drenaje, vestidores y servicios sanitarios, una franja de amortiguamiento de al menos 10 metros y los tipos A, además deberán contar con oficinas, Servicio médico y seguridad Personal.

La norma exige contar con:

- a. Un Manual de operación que especifique:

Los dispositivos de control de accesos, prohibiendo el ingreso de residuos peligrosos, radiactivos o inaceptables; registro de tipo y cantidad de residuos recibidos, cronograma de operación, programas de control de calidad, mantenimiento, monitoreo ambiental de biogás, lixiviados y acuíferos; programa de seguridad y plan de contingencia para incendios, explosiones, sismos, fenómenos meteorológicos, manejo de lixiviados, sustancias reactivas, explosivas e inflamables; procedimiento de operación, perfil de puestos y reglamento interno.

- b. Un control de registro de RSU que contenga:

Ingreso de residuos sólidos urbanos y de manejo especial, materiales, vehículos, personal y visitantes, secuencia de llenado del sitio, generación y control de biogás y lixiviados, contingencias y residuos rechazados

- c. Informe mensual de actividades

- Instrumentar un programa para medición y control de impactos ambientales, programa de monitoreo ambiental con sus respectivos registros.

- Programa de monitoreo de biogás para conocer el grado de estabilización de los residuos, detectar migraciones fuera del predio. Deberá especificar la composición explosividad y flujo.
- Monitoreo de lixiviados: pH, DBO₅, DQO y metales pesados
- Monitoreo de acuíferos: Deberá contar puntos de monitoreo y con al menos un pozo aguas abajo y uno aguas arriba del sitio para monitorear la calidad del agua en comparación con el agua nativa.
- Las actividades de separación de residuos no deberán afectar el cumplimiento de las especificaciones de la norma ni poner en riesgo a las personas que lo realicen.
- Para los sitios tipo D (menos de 10 toneladas diarias los requisitos a cumplir son menores: Garantizar un coeficiente de conductividad hidráulica de al menos 1×10^{-5} cm/seg, compactación de la basura a 300 kg/m³, cobertura al menos semanal de los residuos, evitar el ingreso de residuos peligrosos, control de fauna nociva, evitar el ingreso de animales y cercar la totalidad del sitio.

3.3 Clausura de sitios de disposición final de RSU

La clausura es la etapa correspondiente al cierre definitivo de un sitio de disposición final de los RSU y RME al término de su vida útil, o porque es necesario cerrarlo debido a los efectos ambientales negativos. Debe cumplir con los requisitos mínimos fijados en el punto 9 de la NOM- 083 -SEMARNAT-2003 para procurar la estabilidad, monitoreo sanitario y ambiental a largo plazo.

El proyecto de clausura es un diseño de ingeniería que requiere de la información reunida en los estudios previos (composición de los RSU y RME, análisis de lixiviados, de biogás y de agua subterránea; topografía, geofísica y geohidrología, mecánica de suelos, climatología y meteorología y estudios del servicio de limpia en general). El flujo de actividades para la clausura está representado en la figura 5. (Guía de cumplimiento NOM – 083 – SEMARNAT 2003)

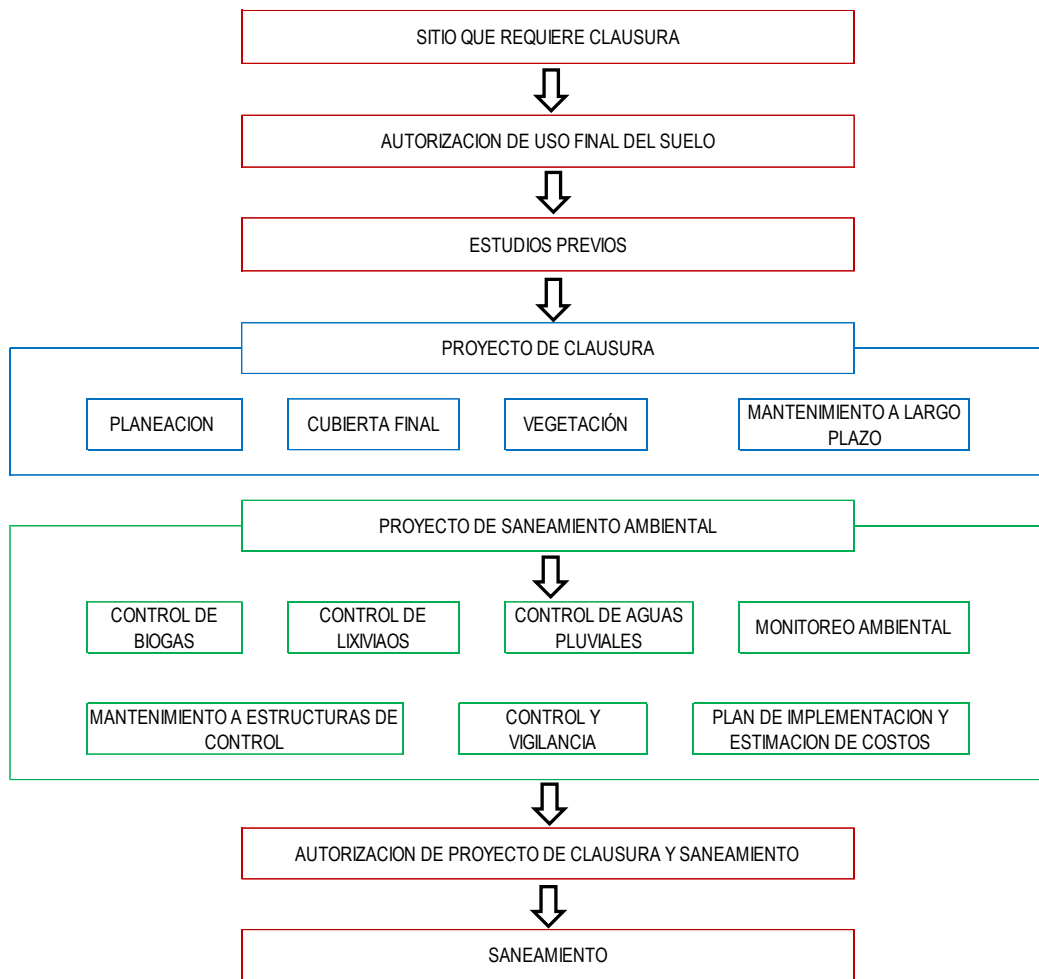


Figura 5 Diagrama de flujo de actividades para la clausura de un SDF

El epígrafe 9 de la norma contiene los requisitos necesarios para la **clausura del sitio**:
Esta debe cumplir:

- Una cobertura que aisle los residuos, minimice la infiltración, controle el flujo de biogás, minimice la erosión, y tenga un drenaje adecuado, utilizando materiales naturales o sintéticos.
- Conformación adecuada para la operación de los sistemas de control de biogás, lixiviados, estabilidad de taludes, pendiente mínima del 0.5% compactación inicial mínima del 75% Proctor, correcto drenaje pluvial que proteja la cobertura las restricciones derivadas del uso final del predio.
- Programa de mantenimiento postclausura de al menos 20 años o menos si se demuestra que ya no hay peligro para la salud y el ambiente.
- Programa de monitoreo para biogás y lixiviado.
- Uso final aprobado por la autoridad competente (Secretaría de medio Ambiente y recursos naturales y gobiernos estatales y municipales) de acuerdo a la capacidad de

carga del suelo, hundimientos y presencia de biogás, cuando se garantice la seguridad de los usuarios, podrán utilizarse como áreas verdes, parques y jardines.

- Para la clausura de un sitio controlado o no controlado se debe cumplir al menos con los siguientes requisitos: Estudios topográficos, drenes perimetrales al pie de los taludes del sitio, para la captación de los lixiviados y la canalización para el control de los mismos, infraestructura para el control y monitoreo de biogás, drenaje pluvial y cumplir el apartado 9.1 de la norma (conformación el sitio)

El epígrafe 10 de la norma contiene el Procedimiento para la evaluación de la conformidad (PEC) que establece la metodología que las unidades verificadoras (UV) y organismos públicos o privados que operen los sitios deben tener para cumplir con la norma (documentos que se elaborarán para la validación del sitio, Protocolo de actuaciones y trámites que conforman el procedimiento y Proyecto técnico, información y estudios mínimos que se requieren)

3.3.1 Sello del sitio

La norma NOM 0083 SEMARNAT, indica que un sitio de disposición final de residuos sólidos, debe contar con una barrera geológica natural o equivalente a un espesor de un metro y un coeficiente de conductividad hidráulica de al menos 1×10^{-7} cm/s o bien garantizarla con un sistema de impermeabilización equivalente. (NOM 083-SEMARNAT-2003)

La importancia del sello resulta de la necesidad de controlar dadas sus características contaminantes, el lixiviado y el biogás, al evitar que el agua siga ingresando en la masa de residuos confinados, se evita la generación de más lixiviados y, por otro lado, se evita la emanación del biogás hacia la atmósfera.

Para lograr el sello del suelo se colocan capas de material compactado o geocompuestos que impermeabilicen el suelo; como geomembranas de polietileno de alta densidad (PAD), o de policloruro de vinil PVC. Durante la postclausura, éste es un punto al que debe ponerse especial cuidado en el mantenimiento.

3.3.2 Obras de control y programa monitoreo

Los sitios de disposición final de residuos sólidos, al clausurarse deben contar con los siguientes sistemas de control y monitoreo:

Construcción de sistemas de control de escurrimientos: se refiere a los sistemas para la captación y disposición de los escurrimientos provenientes del agua pluvial, dado que, al estar sellado el suelo, el agua escurre y debe ser captada y transportada a un cuerpo de agua o algún sistema de alcantarillado.

Construcción de sistemas de control de biogás y lixiviados: son los sistemas para captación conducción y manejo de lixiviados, así como los sistemas de captación, conducción y destrucción o aprovechamiento del biogás.

Construcción de sistemas de monitoreo de agua subterránea, biogás, lixiviados, asentamientos diferenciales y estabilidad de taludes, son necesarios para operar en forma

segura el sitio y poder dar mantenimiento a los sistemas de manejo de biogás y lixiviado, evitar desplazamientos indeseados del suelo, evitar contaminación en los cuerpos de agua, así mismo, permite determinar el grado de peligrosidad ambiental y saber en qué momento el sitio ya no es un peligro para el medio ambiente y la salud.

Colocación de suelo orgánico (tierra orgánica) sobre la cubierta del sitio saneado.

Colocación de cubierta vegetal.

Colocación de barrera vegetal.

Instalaciones para mantenimiento y control (caseta de control, cercado perimetral, oficinas, etc.)

Según la norma NOM 083 – SEMARNAT 2003, el cuidado y monitoreo de los sitios clausurados se realizará durante 20 años o menos si se determina que ya no es un riesgo para la salud y el medio ambiente.

3.3.3 Uso final del sitio clausurado

Por la degradación de los residuos sólidos, la movilidad de los productos de la degradación, los efectos climáticos, alteraciones geológicas, sismos, etcétera, los sitios clausurados sufren cambios, por ello es necesario vigilar el mantenimiento de la cubierta final y a las instalaciones para el control ambiental, así como la identificación de los posibles problemas de contaminación ocasionados por el sitio clausurado, asegurar el funcionamiento de los sistemas de control ambiental, mediante el monitoreo de diferentes componentes relacionados con la disposición de residuos sólidos (biogás, lixiviados, aguas subterráneas e inestabilidad de taludes). (Manual para la rehabilitación y clausura de tiraderos a Cielo abierto. SEDESOL 1996)

Debido a la baja capacidad de carga del suelo, los cambios volumétricos por la degradación de la basura, asentamientos diferenciales, así como la potencial emanación de biogás y movimiento de lixiviados, los sitios clausurados solo pueden utilizarse en los usos de suelo permitidos por las autoridades competente. Generalmente se usan como parques y áreas deportivas.

CAPITULO 4 CASO DE ESTUDIO. CLAUSURA DEL TIRADERO NEZA 1

4.1 Antecedentes

El caso de estudio, trata sobre la recuperación del área que albergó al tiradero “Neza I” ubicado en el Municipio de Nezahualcóyotl, Estado de México y su transformación en un centro deportivo.

El proyecto global está integrado por un campus de la Universidad La Salle, la Universidad Autónoma del Estado de México, un Centro de Rehabilitación Integral Teletón, tiendas de autoservicio, restaurantes, un hospital VIVO Star Médica, el Centro Comercial y Centro ecológico y Deportivo Ciudad Jardín Bicentenario, desarrollados por IDEAL. El tiradero Neza 1 debía clausurarse, por lo que las autoridades acogieron favorablemente el proyecto propuesto por la iniciativa privada de realizar un convenio de pago en especie.

El Centro Comercial se ubica sobre lo que fue la antigua unidad deportiva, desplantada sobre 40 hectáreas de un tiradero clausurado en los años 90’s, mientras que Centro Ecológico y deportivo Ciudad Jardín Bicentenario se construyó sobre el tiradero Neza I clausurado.

4.2 Datos generales del proyecto

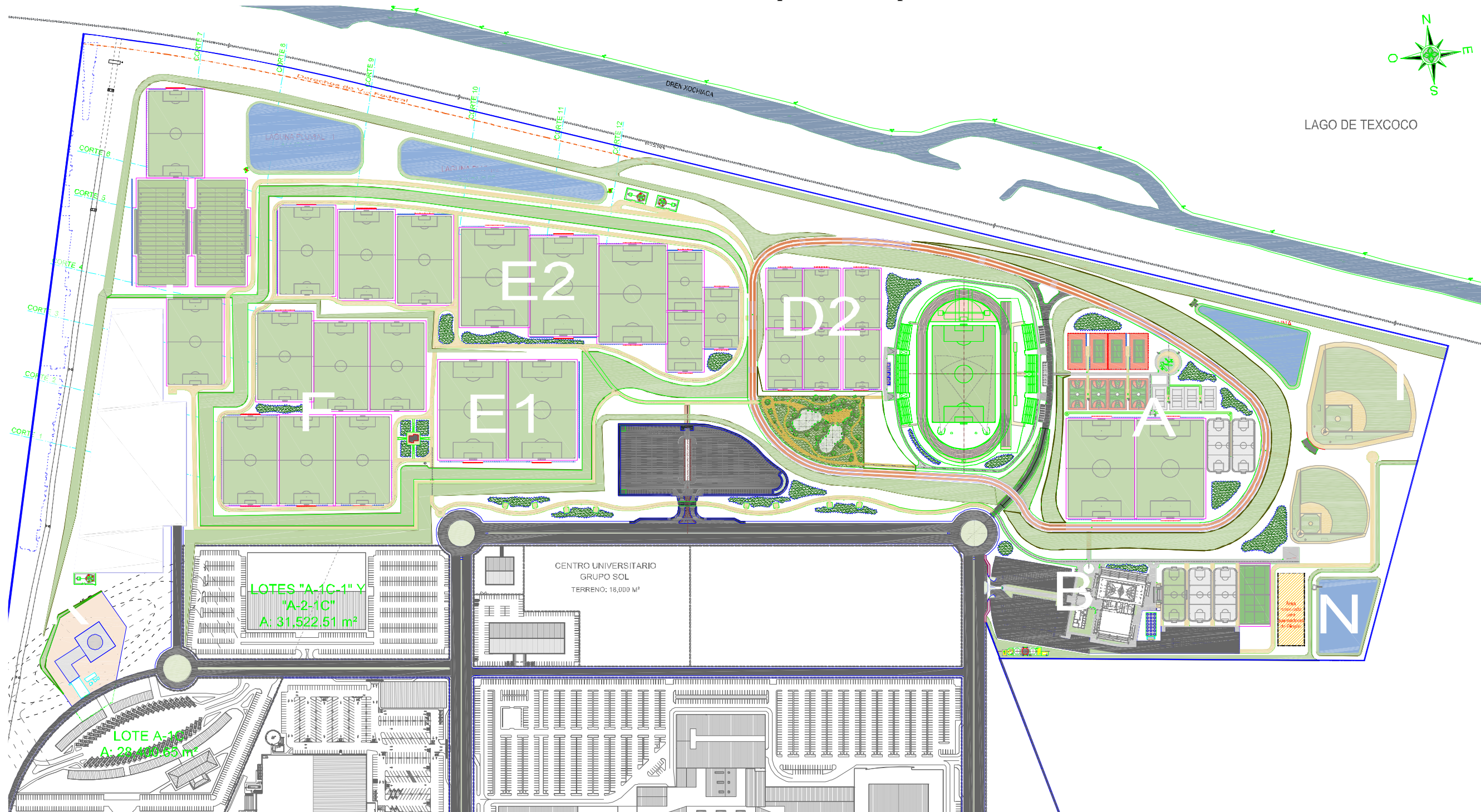
- Nombre: Ciudad Jardín Bicentenario (Centro Deportivo, Comercial y de Servicios), se tratará únicamente la parte correspondiente al Centro Deportivo
- Ubicación: Bordo de Xochiaca, Ciudad Nezahualcóyotl, Estado de México.
- Periodo de ejecución 2006 - 2009
- Área del Centro deportivo: 682,000 m²

Los trabajos de construcción además del sello del suelo y las obras de control de biogás y lixiviados, incluyen la construcción de un estadio olímpico con gradas, módulos de sanitarios, pista de atletismo y cancha de usos múltiples, una ciclopista, gimnasio y salón de usos múltiples con enfermería, oficinas y sanitarios; canchas de futbol soccer, futbol rápido, futbol americano, frontón, basquetbol, tenis, voleibol, voleibol de playa, béisbol, kioscos, andadores, área de juegos infantiles, áreas verdes, estacionamiento, módulos de sanitarios y lagunas pluviales.

La ejecución del proyecto requirió de una coordinación muy estrecha entre las autoridades y la iniciativa privada, así como con las personas que se dedicaban a la separación de residuos durante la operación del tiradero.

A continuación de muestra el sembrado general del proyecto y la ortofoto del sitio previo a la clausura.

4.2.1 Sembrado arquitectónico del predio



4.2.2 Ortofoto del sitio previa a los trabajos realizados



4.3 PROCESO CONSTRUCTIVO.

4.3.1 Trabajos preliminares

En esta etapa se realizó el control de fauna nociva. La fauna considerada como nociva, está constituida principalmente por roedores e insectos, algunas especies de ornitofauna y manadas de perros que vivían en el sitio.

Las ratas y ratones encuentran en los basureros condiciones propicias para su desarrollo, el control de los roedores resulta importante para minimizar el riesgo de que durante las maniobras se presente emigración hacia las zonas aledañas (en este caso son viviendas que colindan con el tiradero). El programa de desratización se realizó mediante la colocación de cebos con veneno. Para el control de insectos (moscas, mosquitos y cucarachas principalmente) se realizó la fumigación con insecticidas por atomización en espacios abiertos. Para el caso de las palomas, no se realizó ninguna acción porque se retiraron del sitio al iniciar los trabajos y se retiraron grupos de perros que vivían en el basurero.

4.3.2. Etapa de construcción:

El proceso para realizar la recuperación del terreno requirió de la conformación y terraseo de plataformas, instalación de las obras de drenaje, recolección, transporte y tratamiento de lixiviados y extracción de biogás, sello con un geocompuesto, colocación de capa de cobertura vegetal para las áreas verdes y canchas deportivas sobre pasto y para el resto de las áreas; mejoramiento del terreno con grava controlada y geomalla para el posterior desplante de edificios, canchas y andadores.

Conformación de Plataformas:

A partir de la topografía existente, se realizaron las plataformas del proyecto, procurando compensar el terreno. Se realizó la conformación de la basura, para distribuirla regularmente en todo el terreno disponible, conformando plataformas de configuración topográfica plana y taludes con pendientes mayores o iguales a 3:1 como lo recomienda el Manual para la Rehabilitación y Clausura de Tiraderos a Cielo (SEDESOL 1996. Cap 5 pp 122)

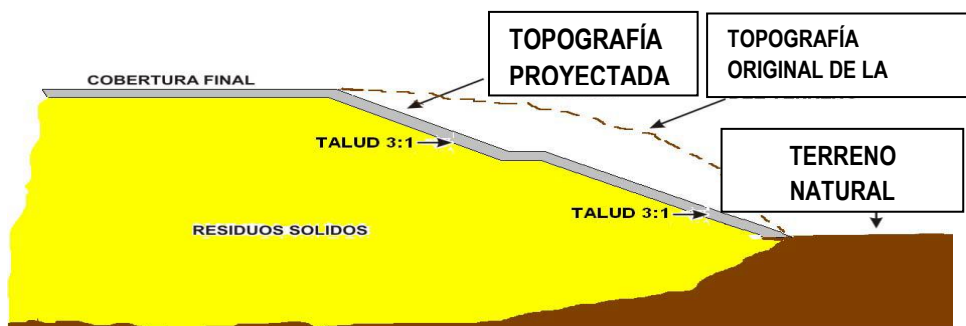


Figura 6. Consideración general para la conformación de taludes
Figura 6. Configuración de taludes

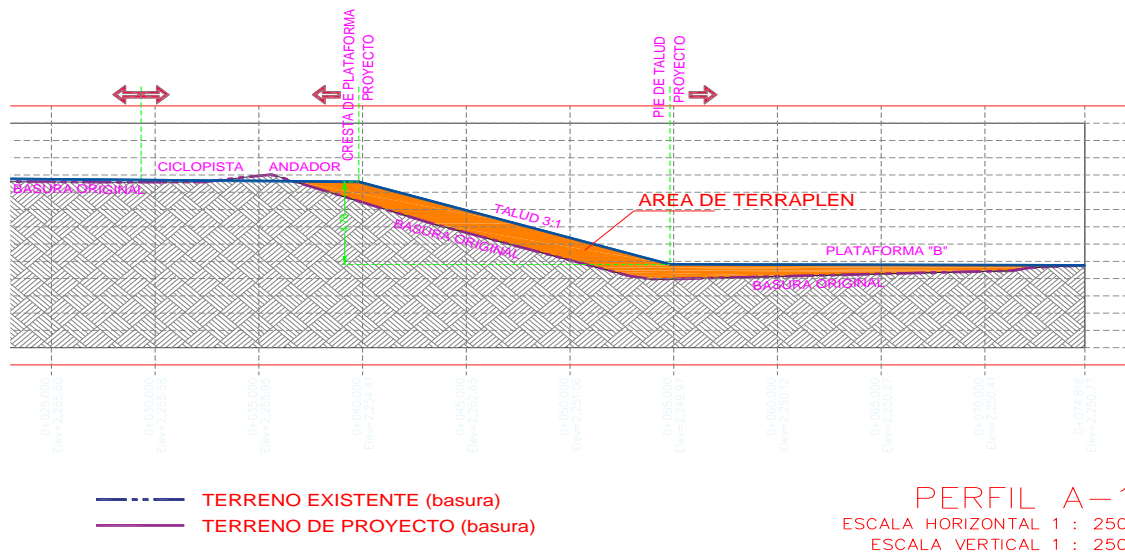


Figura 7 Proyecto de taludes en plataforma A del proyecto Ciudad Jardín

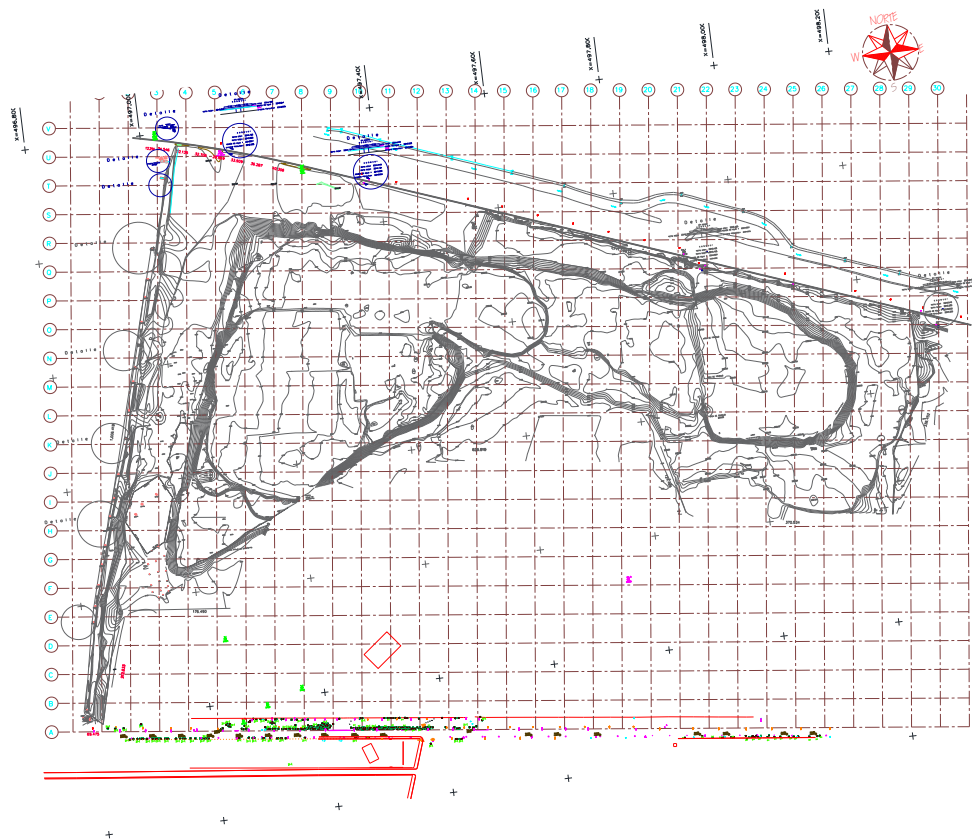
Se realizó el trazo y nivelación del terreno con topógrafos, estaciones totales y niveles, los topógrafos realizaron el control topográfico horizontal y vertical de la ejecución del proyecto, así como el monitoreo de pruebas de carga en las plataformas que albergan el gimnasio, frontón y estadio. Estas pruebas consistieron en la colocación de depósitos de agua de 10,000 litros sobre una losa, donde se monitoreaban los asentamientos para tener datos del comportamiento del terreno.



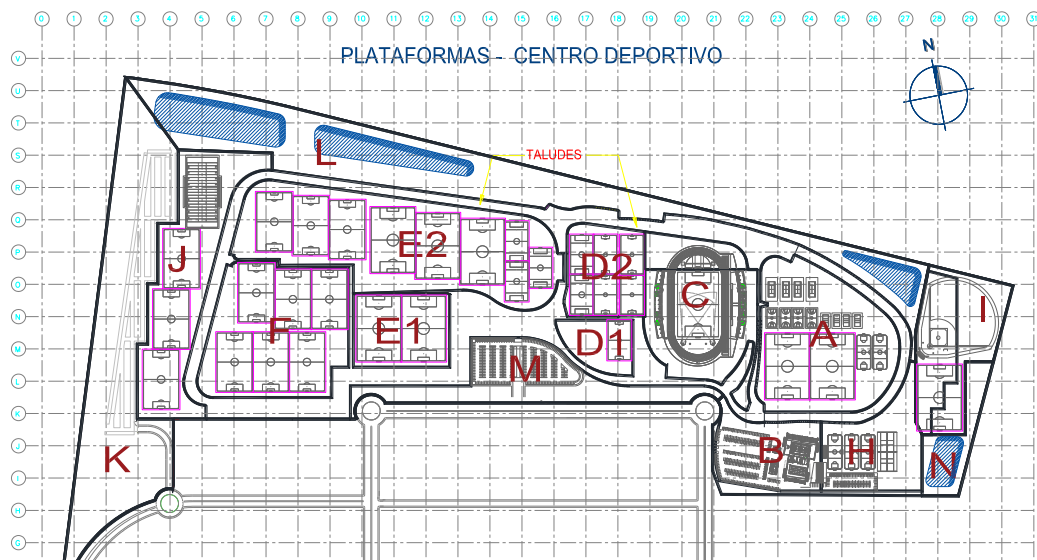
Pruebas de carga zona del frontón



Pruebas de carga zona del Gimnasio



CONFIGURACION INICIAL DEL PREDIO



PLATAFORMAS DEL PROYECTO

Figura 8 Configuración inicial y final del predio

El movimiento de basura para compensar y conformar las plataformas, se realizó haciendo corte de la basura, con equipos de excavación sobre orugas (excavadoras hidráulicas), equipos de excavación y carga sobre neumáticos (retroexcavadoras), equipos para empuje de basura y suelo (bulldozers) y camiones de carga y volteo.



Corte de basura del proyecto Ciudad Jardín

Para la conformación de plataformas; las excavadoras y retroexcavadoras realizaron el corte de la basura, se acarrea el producto de este corte a las plataformas donde era requerido, en caso de que no se requiriera; se enviaba a un tiro autorizado.

Se hizo el movimiento de la basura con excavadoras, retroexcavadoras, compactadores pata de cabra 815 y 825 de Caterpillar, tractores topadores D6, D7 y D8 de Caterpillar, y compactadores para rellenos sanitarios 816 de Caterpillar, se acomodó la basura en capas de 30 cm máximo y se le dio “compactación” hasta lograr el peso volumétrico solicitado por el proyecto.

En la plataforma que alberga el estadio, se realizó la ampliación de la plataforma con grava controlada y grava de bajo peso volumétrico (tezontle) en vez de basura. Esta plataforma requirió un tratamiento diferente por albergar el estadio.

Los taludes se conformaron con pendientes 3.6:1 y 3:1 de acuerdo al proyecto.



Conformación de plataformas y taludes

Aplicación de cobertura final y sello.

El sello se compone de un geocompuesto que confina el terreno, y permite controlar las emisiones de biogás a la atmosfera y la inclusión de agua al interior del basurero para evitar el incremento de lixiviado y mantener las condiciones para la descomposición de los residuos y la generación de biogás.

En las áreas donde se desplantaron estructuras se reforzaron las plataformas con materiales controlados y una geomalla biaxial para incrementar la resistencia al cortante del suelo.

La cobertura final en la mayor área del predio se realizó con tierra y pasto en las canchas deportivas, así como en las áreas verdes y taludes.

Para el sello del suelo se colocaron sobre el terreno compactado diferentes capas de materiales en el siguiente orden: una capa de grava ligera (tezontle de 2”) de 25 cm de espesor, una primer capa de geotextil, una primer capa de limo arenoso (tepetate); una geomembrana de PEAD; una segunda capa de geotextil; una segunda capa de limo arenoso una capa de tierra vegetal y pasto; este diseño permite proteger la membrana y la capa de tezontle que es primordial para el sistema de biogás.

En la figura 9 se ilustran las diferentes capas que integraron una sección típica de cierre, en el caso donde se él área requería un refuerzo adicional para soportar estructuras, se colocaron adicionalmente una capa de grava controlada de espesor variable dependiendo de la estructura a soportar y una geomalla biaxial.

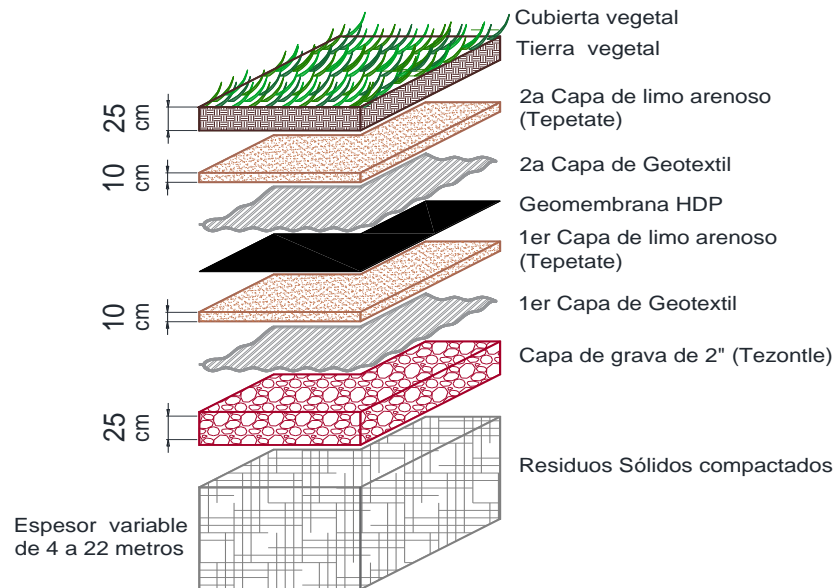


Fig. 9 SECCIÓN TÍPICA DE SELLO Y COBERTURA DEL TERRENO.

La selección de los materiales utilizados para el cierre del tiradero se realizó mediante el muestreo de los materiales para la revisión y determinación de su calidad por laboratorios certificados. Para el caso de las gravas, limos arenosos y gravas controladas, se realizó el muestreo de bancos de préstamo de materiales ubicados en los municipios de Chicoloapan, Chimalhuacán e Ixtapaluca en el Estado de México y en la delegación Iztapalapa de la Ciudad de México y se realizaron pruebas para la determinación las propiedades índice y granulometría para determinar la aceptación o rechazo de los materiales.

Los geosintéticos además de contar con los certificados de calidad de los fabricantes; pasaron las pruebas realizadas en el Centro de Innovación Aplicada en Tecnologías Competitivas (CIATEC) para tener la certeza de la calidad del proveedor del proyecto.

Una vez que la basura daba la “compactación”, se colocaba una capa de grava ligera de 2” de origen volcánico (tezontle) con espesor de 25 cm, el tezontle se tendió con motoconformadoras que lo distribuyeron uniformemente con apoyo de las excavadoras, retroexcavadoras y tractores, bandeando el material para su acomodo a fin de que la capa quedara firme y con la pendiente de proyecto; no se utilizó equipo de compactación para no disgregar el material.



Trabajos de sello: colocación de tezontle en plataformas

Terminada de colocar la capa de tezontle, se colocó una capa de geotextil no tejido de poliéster de 200 gr/m² de peso. Este material proviene de materiales reciclados (PET). Los rollos de geotextil se transportaron con cargadores frontales, se extienden los rollos y se

unieron los paños con un traslape de al menos 10 cm fusionándolos con un equipo de patín caliente.

Esta protección a la capa tezontle resulta muy importante porque evita la colmatación de los huecos entre la grava con material fino, disminuye sustancialmente la disgregación de la grava y permite tener la capa de tezontle limpia y aislada, lo cual es importante para el sistema de extracción de biogás, como se explicará en la sección de medidas de control.



Trabajos de sello: colocación de primera capa de geotextil

La fijación del geocompuesto al terreno se realizó mediante la excavación de zanjas perimetrales.

Estas zanjas se excavaron con excavadoras y retroexcavadoras; hecho lo cual se afinó el fondo de la excavación y se le dio la compactación con equipos manuales “bailarina” para cumplir con la sección y compactación requerida en el proyecto. Los geotextiles y la geomembrana cubren por completo la sección de la zanja y posteriormente se rellenó la zanja. La sección utilizada en el proyecto fue mayor a la sugerida por el proveedor.

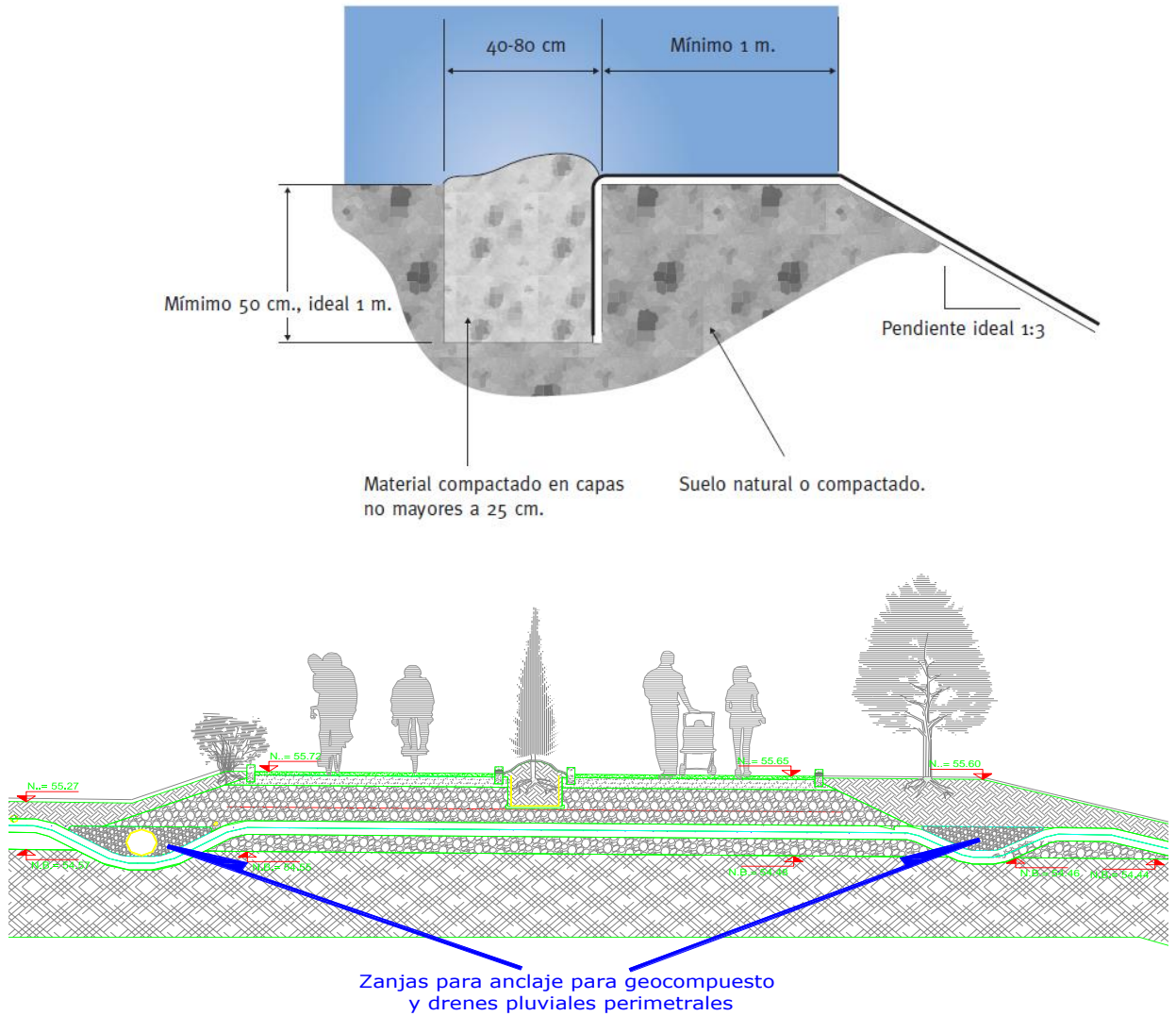


Figura 10. Detalle para anclaje del geocompuesto



Zanjas para anclaje de geocompuesto

Una vez cerrada la capa de geotextil se colocó la primera capa de limo arenoso (“tepetate”) en una capa de 10 cm mínimo, compactándola al 95% de su PVMS.



Trabajos de sello: colocación de primer capa de tepetate



Trabajos de sello: colocación de primer capa de tepetate

Sobre la capa de tepetate compactada se colocó la geomembrana de polietileno de alta densidad de 1 mm de espesor.

Se transportó con cargadores frontales hasta donde se colocaría y una vez en el sitio se tendió y traslapó, haciendo el sello entre paños fusionándolos con equipo de termofusión; cabe mencionar que dada la importancia de la geomembrana como elemento de impermeabilización del suelo; cada soldadura se probó con vena de aire y manómetro para garantizar hermeticidad de la soldadura.



Colocación, traslape y soldadura de geomembrana PAD de 1 mm



Prueba de hermeticidad de la soldadura de la geomembrana

Una vez colocada la geomembrana se colocó la segunda capa de geotextil para proteger la integridad de la geomembrana.



Sello: Colocación de segunda capa de geotextil (sobre la geomembrana)

La integridad del sello del terreno debe preservarse por lo que, para las instalaciones ubicadas por debajo del nivel del sello, se realizan dos procedimientos para mantenerlo:

- Para las tuberías, se realizó el sello con la geomembrana mediante termofusión (las tuberías y la geomembrana son de polietileno de alta densidad), lo que permite el sello sin contratiempos.
- Para los registros de las instalaciones sanitarias, pluviales, biogás y lixiviados se colocaron placas de polietileno dentadas, que tienen una cara dentada y una cara lisa. El polietileno de alta densidad brinda protección al concreto y permite dar continuidad al sello.

La placa se coloca en la cimbra del elemento de concreto del registro acomodando la cara dentada de la placa hacia dentro del elemento para que, al fraguar, quede integrada al concreto, al retirar la cimbra queda la cara lisa de la placa por la parte exterior del registro y en esta área se suelda la geomembrana con el registro, termofusionándose con la cara lisa de la placa de PAD.





Sello: soldadura de geomembrana con registros y tubos en instalaciones.

Sobre la segunda capa de geotextil, se colocó la segunda capa de 10 cm de tepetate compactado 95% de su PVMS.

Para el trabajo en taludes, se utilizaron además mini rodillos vibratorios y mini cargadores frontales para poder trabajar en los ángulos de los taludes.



Sello: Colocación de segunda capa de limo arenoso (tepetate)

En las áreas que alojan andadores, canchas y edificios, se colocó un **mejoramiento del terreno** dependiendo de la estructura a soportar. Sobre la segunda capa de tepetate se colocó una capa de una mezcla de tezontle con tepetate compactada al 95%, sobre esta capa se colocó la geomalla biaxial (bi-orientada) para incrementar la resistencia a la tensión del suelo. Sobre la geomalla se colocó en capas de hasta 20 centímetros, la mezcla de tepetate y tezontle faltante para alcanzar el espesor de mejoramiento requerido en el proyecto. La cimentación de las estructuras para todos los casos quedó dentro de la capa de mejoramiento encima de una capa de grava controlada sobre la geomalla. Los espesores de los mejoramientos fueron de 0.25 a 1.10 metros, siendo el menor el de la pista de triple salto del estadio y el mayor, el del gimnasio y salón de usos múltiples.

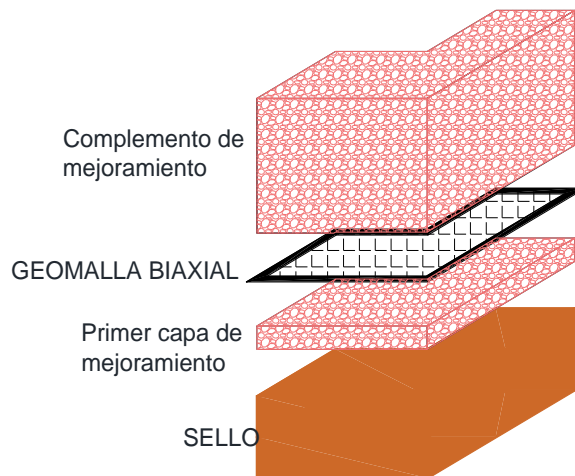


Figura 11. SECCIÓN TÍPICA DE MEJORAMIENTO DEL SUELO PARA ALOJAR ESTRUCTURA

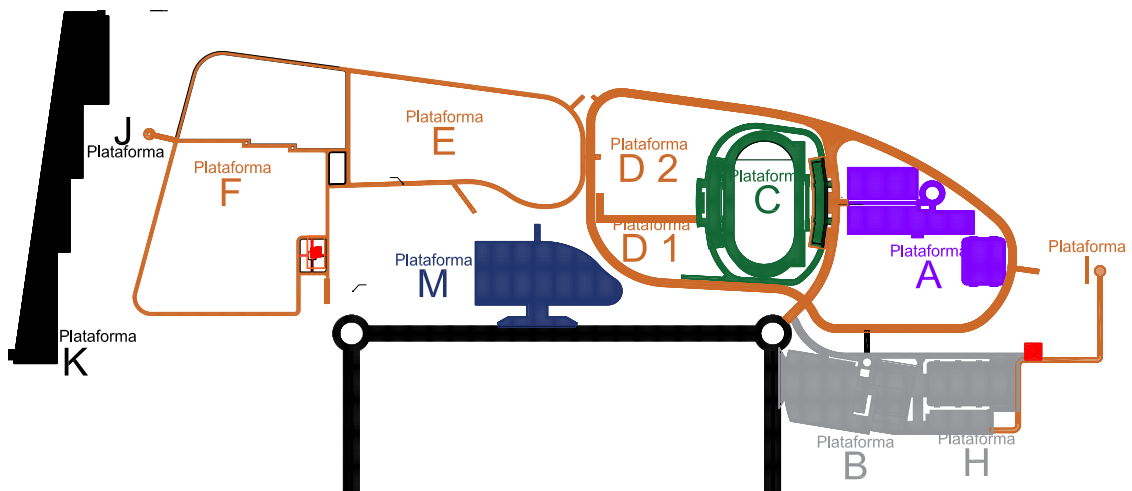


Figura 12. Planta de áreas con mejoramiento.

Las áreas que recibieron un mejoramiento del suelo, fueron:

Gradas del estadio, pista de atletismo y de triple salto del estadio (Plataforma C)

Gimnasio, salón de usos múltiples y estacionamiento en plataforma B.

Frontón, Módulos de sanitarios, kioscos, canchas de futbol rápido, áreas de quemadores de biogás, zonas técnicas. (Plataforma H)

Gradas de beisbol (plataforma I), canchas de basquetbol, voleibol y futbol rápido (plataforma A), ciclopista, andadores de asfalto, andadores de adocreto y estacionamiento. (Todas las plataformas)

El procedimiento constructivo para la colocación de mejoramientos del suelo, consiste en transportar y acomodar la grava controlada con camiones de volteo, excavadoras y retroexcavadoras, se humedeció con pipas, se homogeniza la mezcla, se extiende con tractores y motoconformadoras y se compactó hasta obtener el 95% de su PVMS con rodillos, hecho lo cual, se extendió la geomalla, terminado éste paso, se prosiguió con la colocación del resto del espesor de la capa de mejoramiento, en capas máximas de 20 cm, con el mismo procedimiento que en la primer capa.



Colocación de mejoramiento para plataformas.

Para las áreas destinadas a ser canchas deportivas sobre pasto y áreas verdes se colocaron 25 cm de tierra y pasto, se colocaron espesores mayores de tierra para alojar árboles y arbustos.

El riego para el mantenimiento de las áreas verdes se realiza mediante una red con válvulas de acoplamiento rápido distribuidos en todo el terreno. El agua utilizada proviene de dos fuentes de abastecimiento: en tiempo de lluvias se almacena agua en las lagunas y en temporada de estiaje se toma agua de la red de agua tratada municipal.



Colocación de tierra y árboles en plataformas

4.3.3 Obras de control

Las obras de control realizadas en el proyecto son:

- Sistema de captación, conducción, destrucción y/o aprovechamiento de biogás.
- Sistema de captación, conducción y control de lixiviados.
- Sistema perimetral de captación, conducción y control de aguas pluviales.

4.3.3.1 Sistema de captación, conducción, y quema de biogás.

Para el diseño del sistema, primero se realizaron 3 campañas de mediciones, dos pasivas y una activa, se muestreó el gas para su caracterización en laboratorio y se midió el flujo.

Dentro de las condiciones del sitio, se encontró que una porción importante de los residuos confinados, se encuentran dentro de una interfase líquida de elevadas concentraciones de cloruros, carbonatos, bicarbonatos y sulfatos; mismos que disminuyen la actividad biológica por lo que los procesos de degradación son muy lentos, haciendo que la rapidez de la reacción, sea casi nula.

Los datos arrojados llevaron a diseñar el sistema final de extracción y conducción de gas, que genera un bulbo cónico que permite la captación de un mayor volumen de biogás.

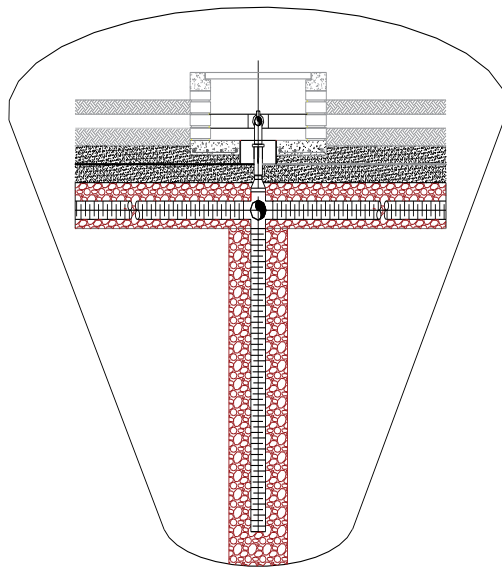
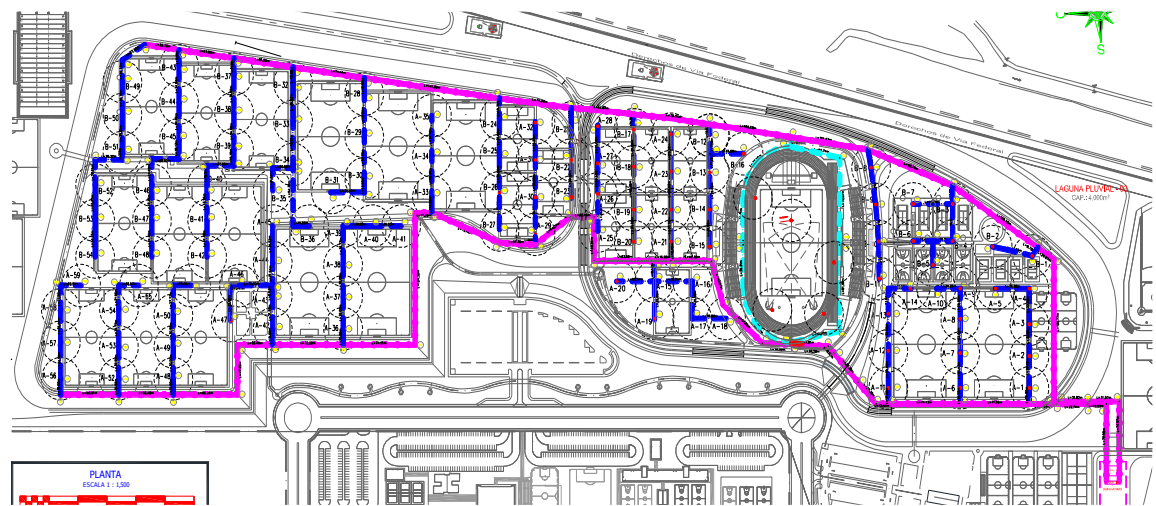


Figura 13 Bulbo cónico de extracción de biogás

El estudio del sitio concluyó que los residuos que tienen las condiciones para degradarse más rápidamente, eran los ubicados en una capa de 4.5 metros de espesor promedio, mismos que no se encuentran inmersos en la interfase de agua salobre del acuitardo. Por ello el diseño final se basó en un sistema de pozos de profundidades entre 2.0 y 3.0 metros, ubicados respetando en la medida de lo posible un radio de influencia de 20 m.

En la figura 14 se muestra la ubicación de los pozos de extracción, tuberías recolección, conducción y ubicación de la caseta del personal técnico y cobertizo para el equipo de extracción y quema del biogás.









- | | |
|---|--|
| P.A.D. | POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD |
| P.E.M.D. | POLIETILENO DE MEDIA DENSIDAD |
|  | TUBERIA DE \varnothing 3" P.E.M.D. PARA LA RECOLECCIÓN DE BIO – GAS |
|  | TUBERIA DE \varnothing 8" P.E.M.D. PARA LA CONDUCCION DE BIO – GAS |
|  | TUBERIA RANURADA DE \varnothing 4" P.A.D. PARA LA CAPTACION DE BIO – GAS |
|  | POZO–GALERIA DE CAPTACION |
|  | AREA DE INFLUENCIA DE POZOS |
| L=71.56m | LONGITUD DE TUBERIA DE CRUCERO A CRUCERO |
| A-2 | No. DE POZO–GALERIA DE CAPTACION |
|  | NUMERO DE CRUCERO |

Figura 14 Planta general del sistema de extracción, conducción y quema de biogás.

Cada pozo, se perforó en un diámetro de 0.80 metros, en la parte inferior de la perforación, se dejó una cama de 0.50 m de ancho de grava de 1 a 3 pulgadas, sobre esta cama y empacada en grava, se colocó una tubería vertical de polietileno de alta densidad (PEAD) de 4" de diámetro ranurada transversalmente a tresbolillo, envuelta en una manga de geotextil para evitar la colmatación de las ranuras al realizar la extracción forzada.

La tubería vertical se conectó a una pieza especial de 6 entradas (bola), (2 de entrada y salida) que dan continuidad en el sentido vertical para conectar con una pieza especial (socket de expansión) que reduce el diámetro de la tubería, de 3" a 1" y que adicionalmente cumple con la función de evidenciar los asentamientos del sitio por la degradación de los residuos y evitar daño a los pozos y sus conexiones las otras 4 salidas de la "bola", permiten conectar a 4 tuberías horizontales de polietileno de alta densidad ranurada a tresbolillo con "calcetín" de geotextil alojadas en la capa de 25 centímetros de tezontle.

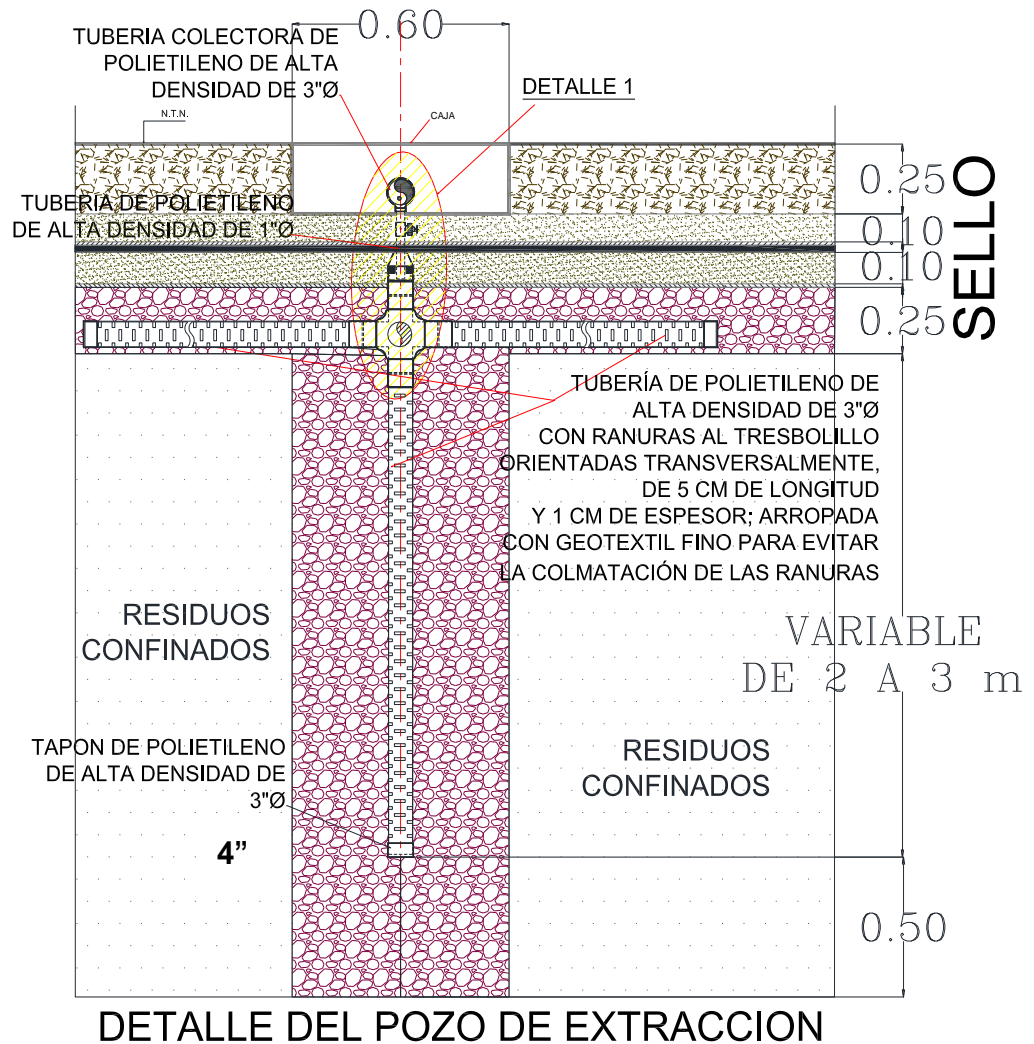


Figura 15 Detalle del pozo de extracción de biogás

La tubería de conducción es una tubería de 8" ciega que se ubicó en las capas más superficiales del sello del terreno, sobre las capas de tierra vegetal o sobre la segunda capa de tepetate, se conectó a las tuberías ramales de 3" con una "Tee" de 8" a 3" con una sola Terminal de 3" y dos de 8"; se colocó previamente una trampa de agua y un cabezal horizontal Tipo Accu-Flo, con válvula de compuerta y sensores para registrar el flujo, composición y temperatura del biogás. La válvula de compuerta permite regular el flujo e incrementar la velocidad y el caudal del biogás, además de evitar la entrada de oxígeno al sistema.

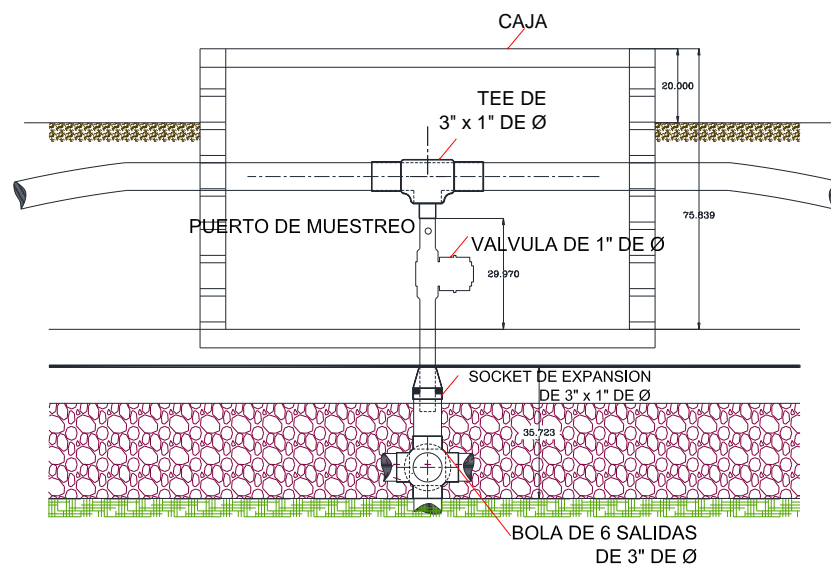


Figura 16. Corte de conexión de la tubería de extracción a la de recolección de biogás

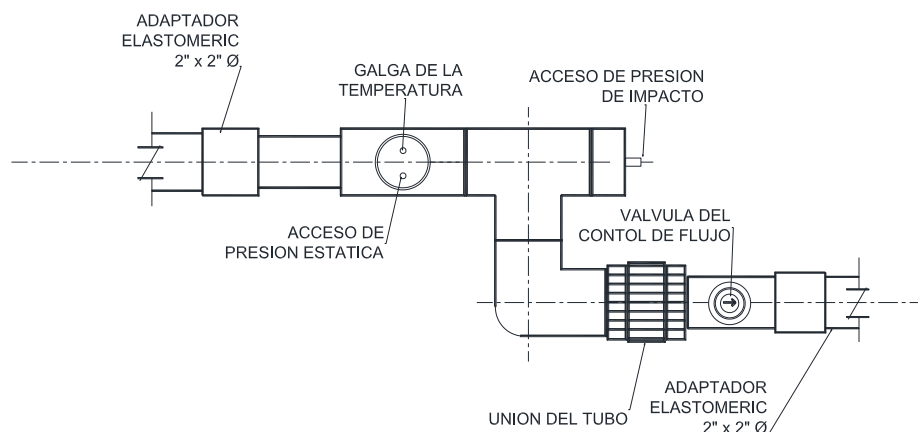


Figura 17. Detalle del cabezal para monitoreo. (ACCU FLOW)

La tubería ciega de 3" de diámetro, que conecta con los pozos de extracción se instaló con una pendiente mínima de 1 por ciento para el drenaje del condensado, colocando la trampa de agua en la parte más baja del registro. La tubería de 8", conduce el gas recolectado hacia los sopladores y quemadores del gas, los quemadores son de flama cerrada.

El sistema de monitoreo, permite revisar y documentar los parámetros de operación incluyendo el nivel de lixiviados), con lo que se hacen los ajustes necesarios al sistema

Para este proyecto, el sistema de extracción, recolección y quema del biogás va de la mano con el sistema de tratamiento de lixiviados. La descomposición de los residuos requiere de condiciones de humedad que, una vez sellado el terreno no pueden sostenerse; por ello se inyecta lixiviado proveniente del sistema de control y tratamiento de lixiviados para mantener las condiciones de humedad necesarias y permitir la generación de biogás.

Para la construcción del sistema de control de biogás, se realizó su trazo, se retiró manualmente la capa de tezontle, se perforaron los pozos y se colocaron las tuberías, piezas especiales y registros.



Trazo de pozos y líneas de recolección y conducción de biogás, retiro de tezontle, excavación de zanjas, perforación de pozos colocación de tuberías verticales ranuradas de 4" de diámetro dentro del pozo y horizontales para conectarlas entre sí. Empaque de las tuberías con grava (tezontle)



Colocación de piezas especiales para conectar el pozo a la línea de registros de control y monitoreo, y conexión a línea de recolección de PEMD de 3"

Una vez conectada la tubería de los pozos a las tuberías de recolección (tubería PEMD), estas se conectan a la línea de conducción (tubería de PEMD de 8", que lleva el biogás al cobertizo para su quema).



Sello de la geomembrana y colocación de tubería de PEMD para recolección y conducción del biogás al cobertizo del soplador y quemador del biogás. Rellenos a mano de las zanjas. Colocación de tuberías de conducción hacia zona de equipos (extractores y quemador)

Para alojar los equipos de extracción y quema del biogás, se construyeron un cobertizo y las oficinas administrativas para el personal que operará el sistema una vez puesto en marcha.

Se realizó el mejoramiento del terreno con grava controlada y geomalla, se hicieron las bases para colocar los extractores y el quemador de flama cerrada para quemar el biogás y se construyó un cobertizo para delimitar el área de los equipos y proteger los instrumentos; las oficinas administrativas se construyeron con muros de block y losa maciza.

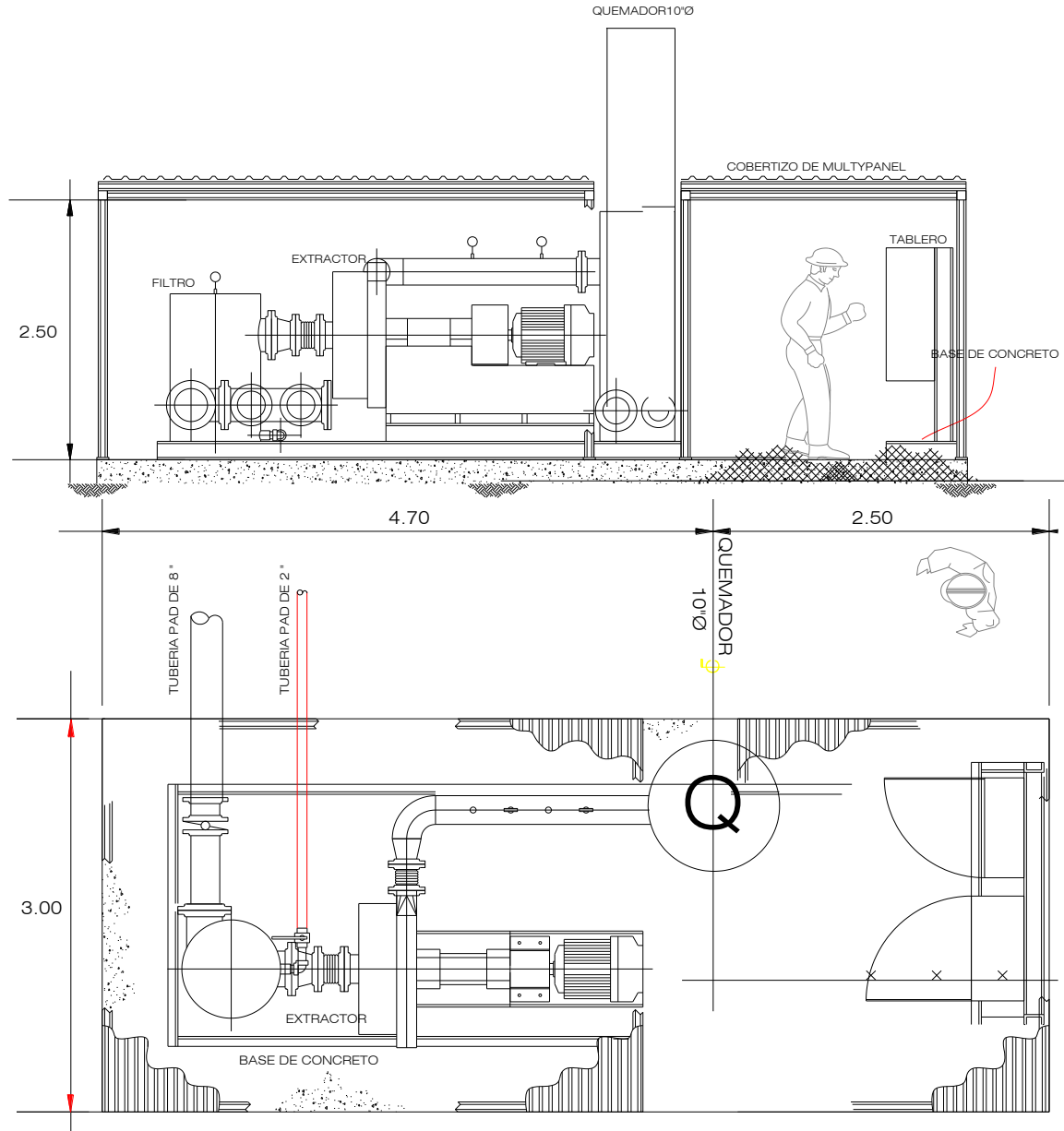


Figura 18 Planta y alzado del cobertizo para los extractores y quemador

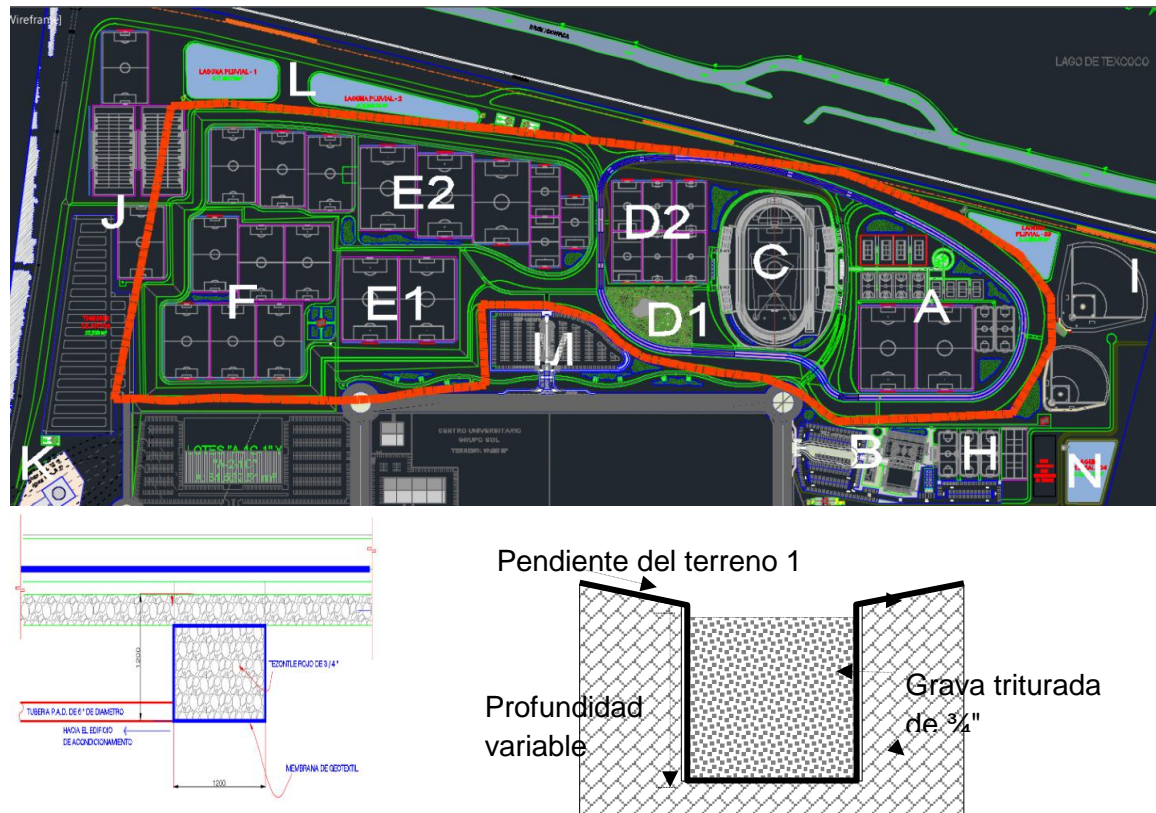


Zona de extracción y quema. Chimenea de flama cerrada y equipos de extracción y quema de biogás

4.3.3.2 Sistema de tratamiento de lixiviados.

Los lixiviados se captan mediante subdrenes perimetrales ubicados muy próximo al pie de los taludes de las plataformas A, B, C, D1, D2; E1, E2 y F y cuenta con pozos de visita de polietileno de alta densidad para inspección y muestreo que lo transportan a 3 módulos de tratamiento con 5 reactores anaerobios, una vez tratado se reinfiltra el lixiviado para favorecer la degradación de la materia orgánica contenida en la basura confinada, nuevamente se capta en el dren y se vuelve a tratar y a reinfiltrar n veces, hasta que la carga contaminante presente esté en niveles que permitan verterlos según norma; la reinfiltración del lixiviado forma parte importante del sistema de biogás porque mantienen las condiciones óptimas de humedad para continuar el proceso de descomposición de la basura y obtención del mismo.

Una vez que el lixiviado llega a los cárcamos de los módulos de reacondicionamiento, en estos bioreactores anaerobios integrados (BRAIN) se les incluye una biomasa metanogénica para reinfiltarlos en los residuos confinados para su estabilización. El ciclo de captación, acondicionamiento y reinfiltración de lixiviados se realizará hasta que la generación de biogás termine y el lixiviado captado por el dren de captación cumpla con la norma NOM-001-ECOL-1996



DETALLE DREN DE LIXIVIADOS

Figura 19 Ubicación del dren de captación y transporte de lixiviados

Para inyectar el lixiviado acondicionado se construyó un sistema de tuberías en forma de peine a una distancia máxima de 25 metros, esta tubería es de polietileno de alta densidad de 2" perforada a tresbolillo con barrenos de 1/2" y permite distribuir el lixiviado adecuadamente, se conectó a una boca vertical de PAD de 4" por donde se alimenta el lixiviado.

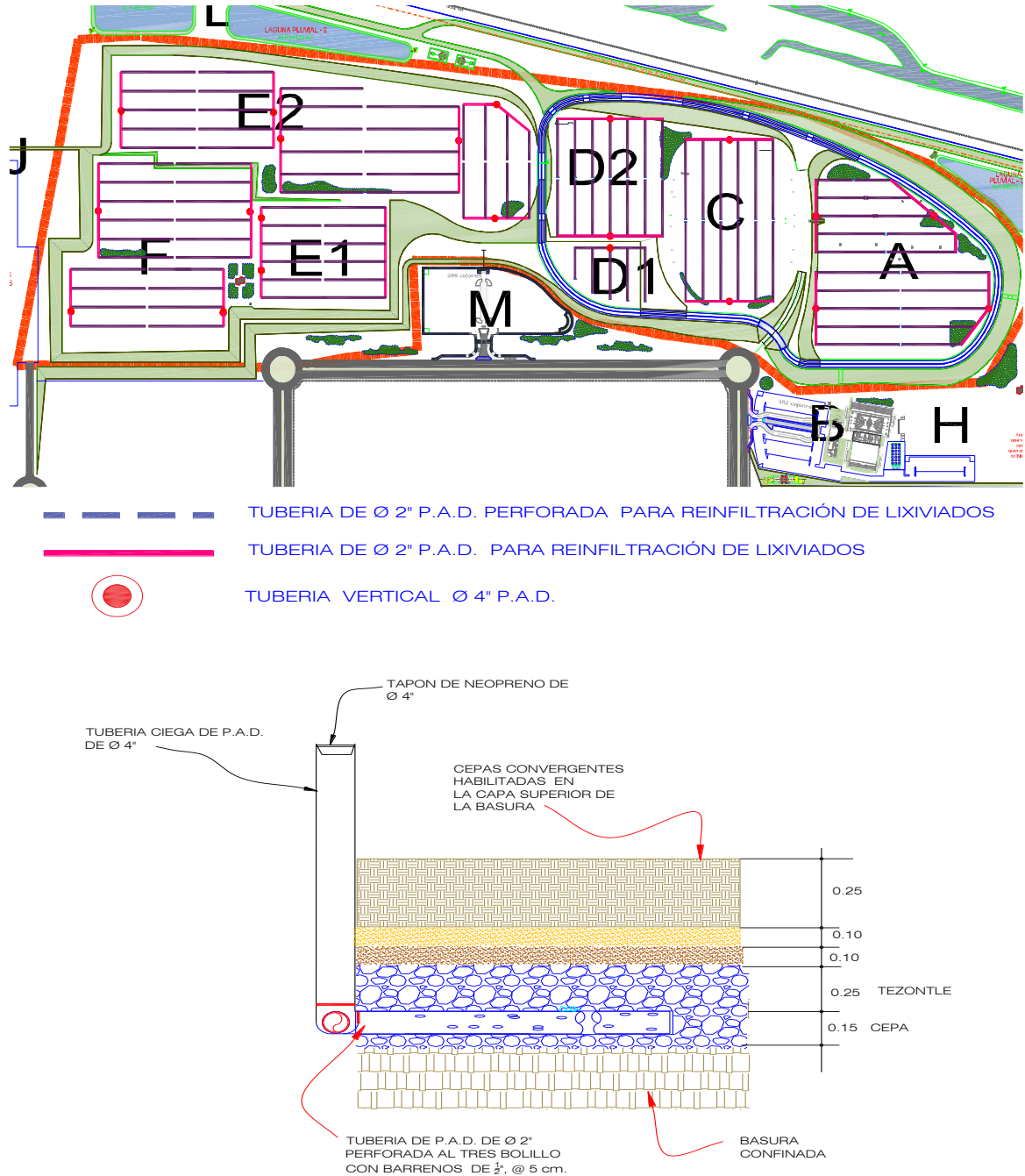


Figura 20 Sistema de re-infiltración de lixiviados. Planta del proyecto y detalle de la re-infiltración

El sistema BRAIN es un sistema de tratamiento biológico anaerobio que integra varios procesos en la misma unidad. Contiene un digestor anaerobio de flujo ascendente que promueve una mezcla hidráulica favorable para el contacto entre microorganismos y materia orgánica generando una eficiencia de remoción buena.

Descripción del tren de Tratamiento

Pretratamiento.

Rejilla metálica: Una vez que el lixiviado es transportado hacia los módulos de tratamiento, pasa por una Rejilla que separa sólidos mayores a 1/2" y basuras flotantes del lixiviado.

Desarenador: Es un registro con una depresión al fondo del mismo, que precipita gravilla, arena y partículas finas de origen mineral, evitando que esta precipitación se presente en el fondo de las tuberías y equipos.

Trampa de grasas: mediante las diferentes densidades entre las grasas, aceites y el resto del lixiviado, permite que las grasas y aceites floten y se adhieran a las mamparas de la trampa, adicionalmente, el líquido que ingresa tiene una mayor temperatura que el que está dentro del recipiente por lo que al enfriarse, se solidifica la grasa y facilita su manejo.

Una vez que el efluente ha pasado el Pretratamiento, se almacena en un cárcamo de bombeo donde bombas sumergibles lo ingresan a la caja repartidora que los distribuye en los 5 reactores BRAIN para su tratamiento secundario.

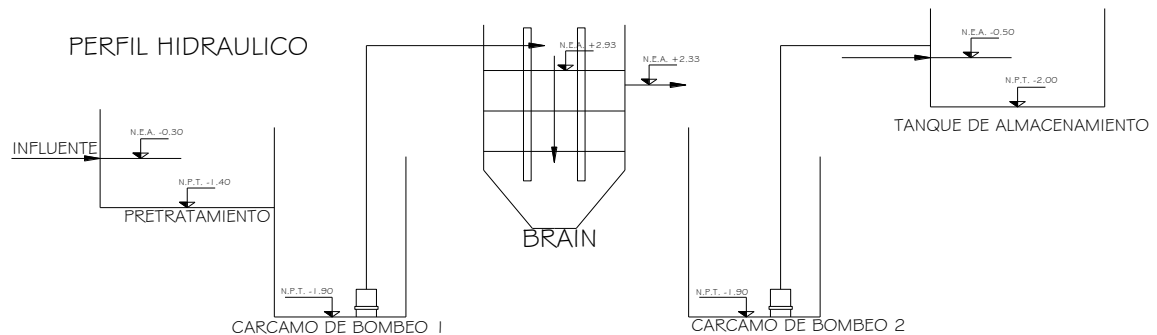
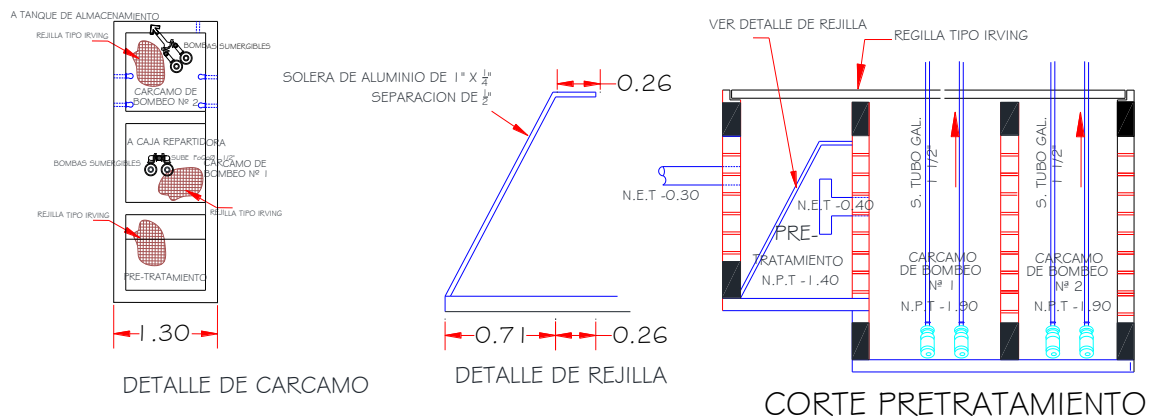


Figura 21 Perfil hidráulico del sistema de tratamiento de lixiviados



Pretratamiento

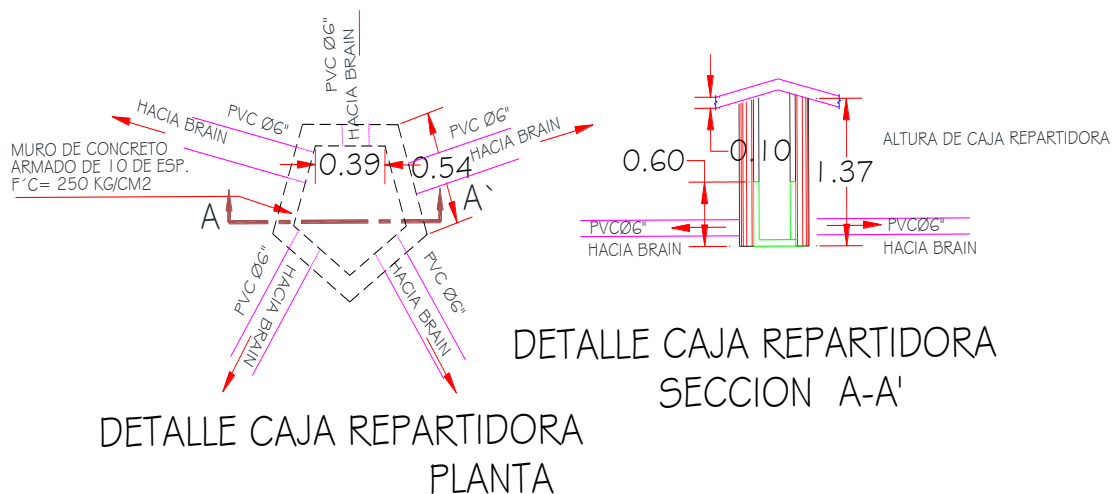


Figura 22 Pretratamiento y detalles de la caja repartidora del lixiviado a los biorreactores anaerobios integrados.

Tratamiento Secundario

Biorreactor anaerobio integrado (BRAIN)

Sedimentador primario: Permite disminuir la concentración de sólidos suspendidos totales, que se decantan por su propio peso.

Reactor anaerobio de flujo ascendente: Es una unidad de tratamiento biológico de digestión anaerobia; se alimenta por el centro del tanque en la zona de reacción biológica. En la cámara de digestión se forma un manto de lodos que se mantiene parcialmente mezclado por la acción combinada de la evacuación de gases y la difusión radial que propicia el flujo ascendente del agua, en contracorriente con los sólidos separados por el sedimentador secundario; de esta manera, la atracción de lodos es gravitacional y el reactor anaerobio no requiere de agitación mecánica adicional.

Sedimentador secundario de alta tasa. Remueve los sólidos sedimentables remanentes y retiene los lodos biológicos que se encuentran en fase de digestión; este compartimiento se implementa con placas paralelas de polietileno que conforman un panel tubificado cuya sección es trapecial, para acelerar y hacer más eficiente la decantación.

Filtro anaerobio: Retiene hasta un 75% del sustrato remanente y da pulimento en los sólidos suspendidos y al residual de los sedimentables. El medio de empaque escogido para este filtro son cilindros de polietileno de alta densidad (anillo Pall) con alta superficie de contacto, el filtro es de operación continua y se instala directamente sobre las placas paralelas del sedimentador de alta tasa.

Descarga final: El efluente tratado se vierte en un estanque donde se almacena para dosificarlo en los residuos confinados en el sitio, mediante vehículos automotores con sistema de bombeo propio.

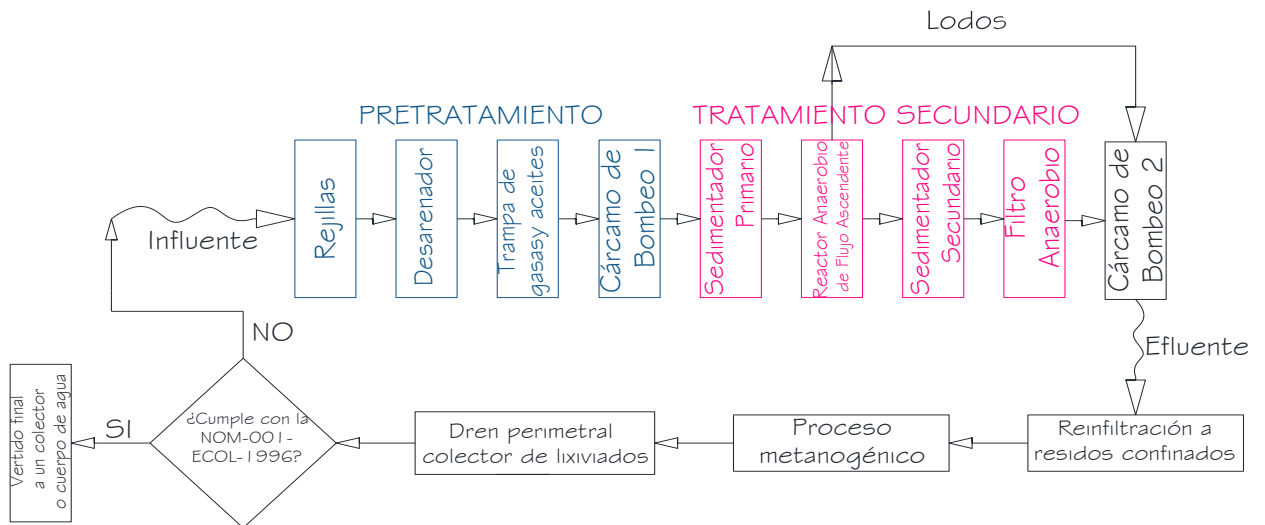


Figura 23 Diagrama de Flujo del Sistema de Tratamiento y reinfiltración de Lixiviados

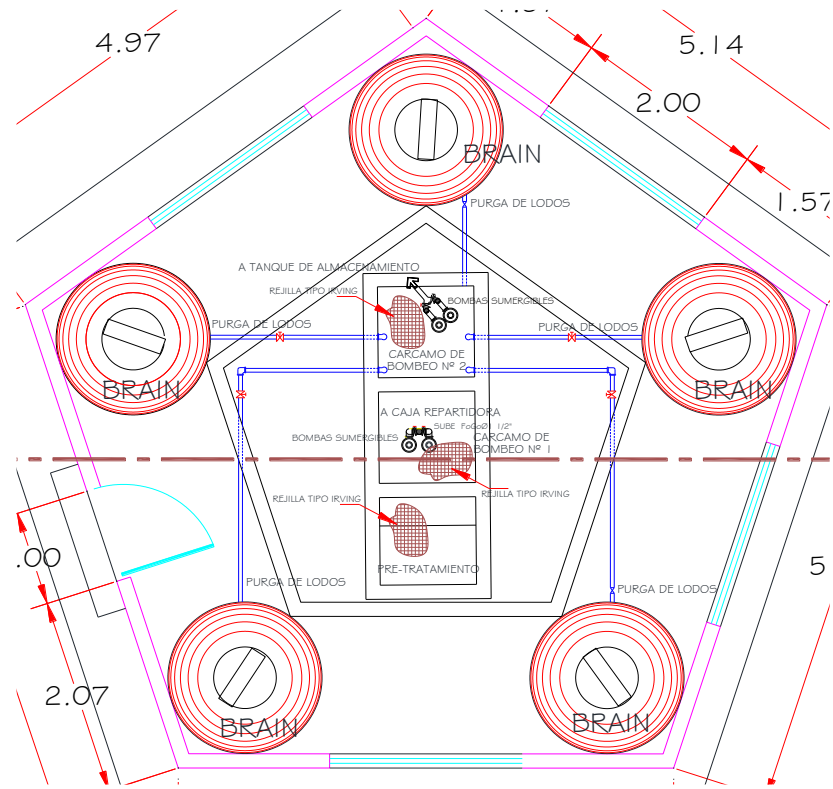


Figura 24 Planta del arreglo de los módulos de tratamiento. NIVEL 0.30

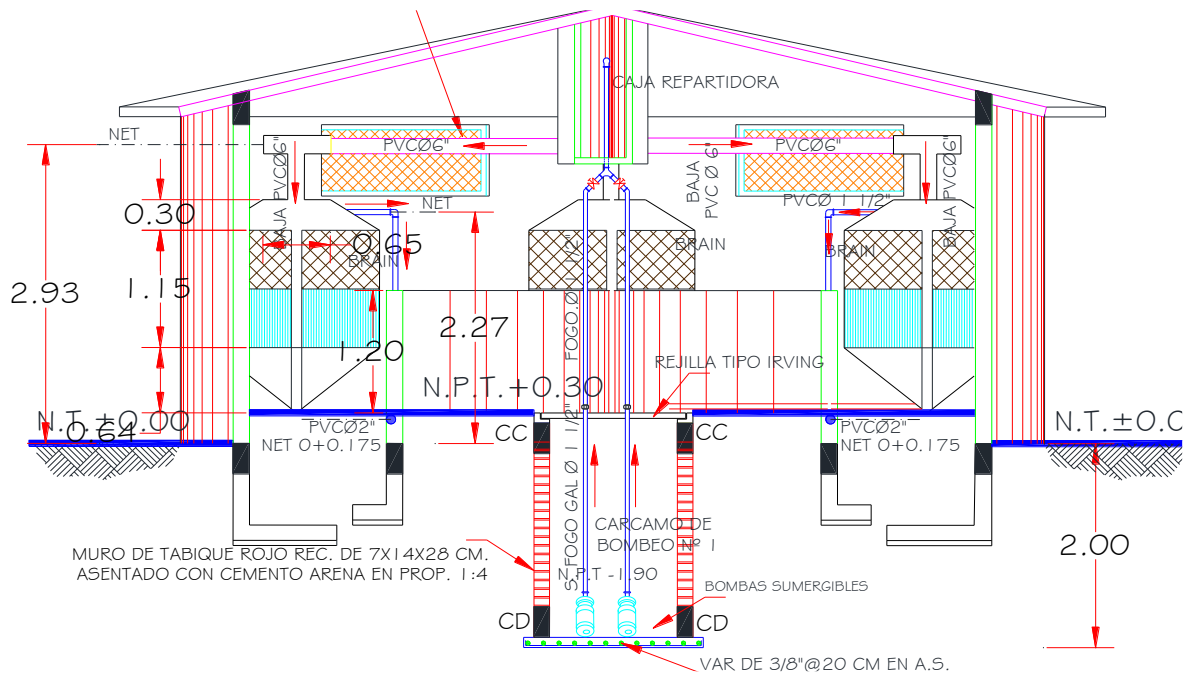


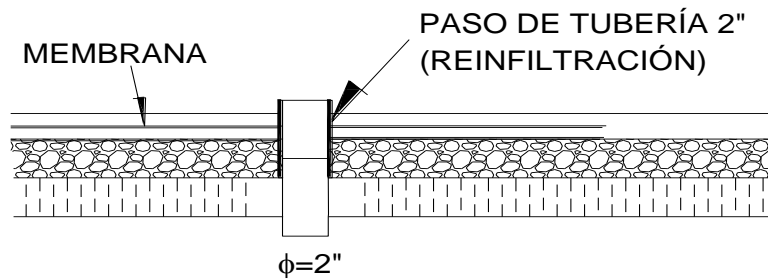
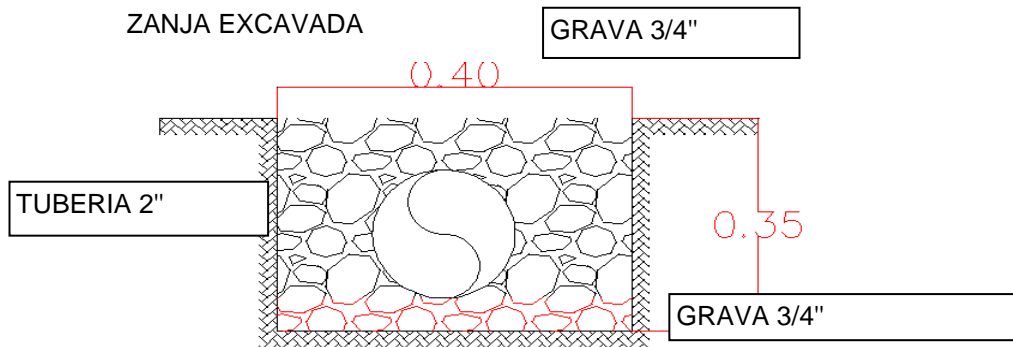
Figura 25 Corte de módulo de Tratamiento de Lixiviados

4.3.3.1.2 Procedimiento Constructivo.

Para el dren de captación perimetral se realizó el trazo, la excavación, se retiró el material producto de la excavación. Una vez terminada la excavación se relleno con grava y se colocaron tubos PAD de verticalmente como pozos de inspección y monitoreo.



Trabajos de excavación y pozos de visita dren perimetral para recolección de lixiviados, tendido de tuberías para infiltración de lixiviados.



Instalación de red de reinfiltrado: Excavaciones, colocación de tubería, empackado de tubería con grava y colocación de piezas especiales.



Arriba: Vista exterior de los módulos de acondicionamiento de lixiviados
Abajo: Bioreactores Anaerobios Integrales (BRAIN)

4.3.3.2 Sistema de control para aguas pluviales

El sistema pluvial está diseñado para captar la totalidad de la precipitación pluvial que cae sobre el área dado que el suelo fue impermeabilizado por la geomembrana.

El agua se capta en las plataformas mediante tubería de polietileno de alta densidad ranurada y forrada con un textil colocadas en toda el área de las plataformas, estos tubos se conectan mediante una TEE de inserción de PAD con manga de neopreno a una tubería perimetral también perforada ubicada en un dren perimetral y empacada con grava (tezontle) confinado mediante un geotextil, los drenes perimetrales se conectan a tuberías ciegas que transporta el agua hacia las 4 lagunas que regulan el volumen de agua en temporada de lluvias, vertiéndola en forma controlada al canal existente en la zona norte del predio, dichas lagunas abastecen al sistema de riego ya sea con agua pluvial o tratada según la disponibilidad del agua.

Para la cancha del estadio el concepto es el mismo, salvo que se utilizó una tubería de sección elíptica casi plana ranurada para drenar la cancha en forma inmediata sin afectar el campo, las tuberías se conectan a un canal con una rejilla ubicada perimetralmente que la transporta a la tubería ciega que lleva el agua a las lagunas.

Las lagunas de agua pluvial tienen una capacidad de almacenamiento de 21,329.7 m³ que se utilizan para el riego de las áreas verdes.

Las 4 lagunas almacenan agua para el riego; durante la temporada de lluvias almacenan agua proveniente del sistema de recolección pluvial y se utilizan hasta agotar el volumen contenido en el riego de las áreas verdes. Cuando no hay agua pluvial se alimentan con la línea de agua tratada de la red municipal. Cuando el nivel de aguas máximo de las lagunas se alcanza, se desfoga el agua hacia el colector ubicado al norte del predio.

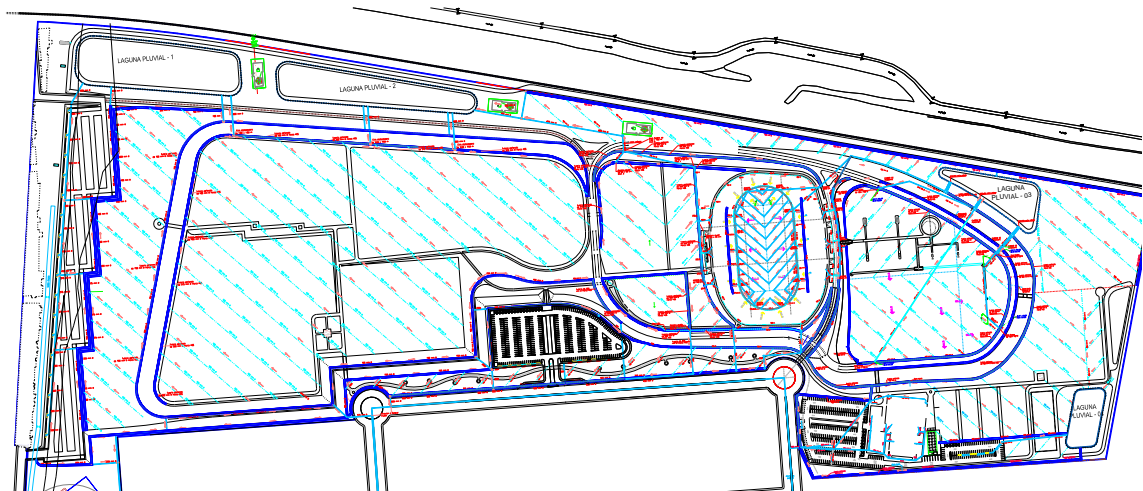
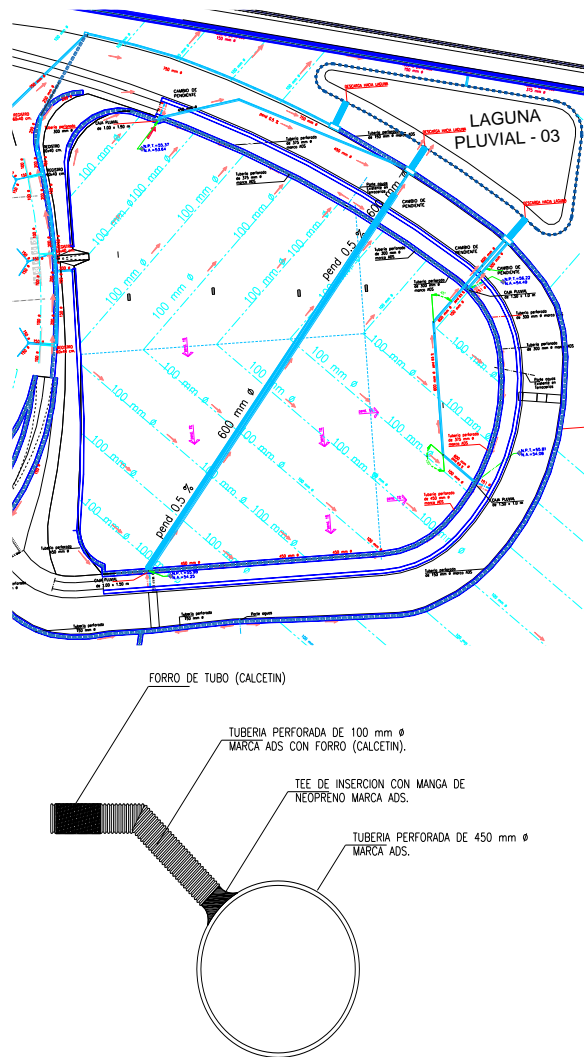


Figura 26 Planta general del sistema de Drenaje Pluvial.



Detalle de Drenaje Pluvial: se drenan las plataformas con tubería de 100 mm de polietileno de alta densidad ranurada, con calcetín de geotextil, conectada mediante una pieza especial a una tubería de PAD ranurada de mayor diámetro, empacada en grava y un geotextil, que colecta las tuberías de 100 mm y se conecta a tuberías PAD que llevan el agua captada a las lagunas.

Proceso constructivo.

Las tuberías para el drenado de plataformas, se colocan según la distribución del proyecto sobre la segunda capa de tepetate de aguas abajo hacia aguas arriba acoplándola con un sistema espiga – campana; una vez unida se les hizo un pequeño atraque. Se conectaron las tuberías con una tee de inserción a la tubería del dren perimetral. El dren perimetral se conformó manualmente y con retroexcavadora sobre los residuos confinados, sobre la sección de la trinchera, se colocó un geotextil y la tubería ranurada que recibirá a las de la

plataforma, se empacó en grava, cerrando el geotextil. La tubería de la trinchera se conectó a las tuberías de descarga a las lagunas.

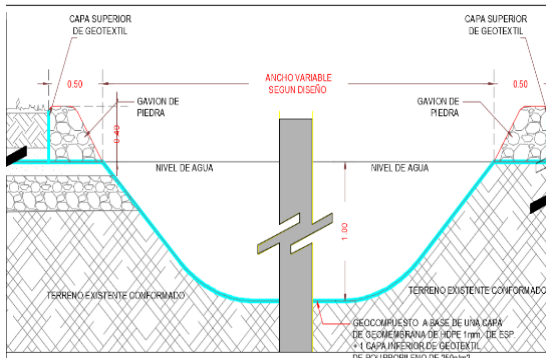


Colocación de tubería para drenaje de plataformas y conexión a dren perimetral



Conexión de tubería a dren perimetral, fusión del geotextil y tubería en estadio

Para los colectores la tubería se conectó con un sistema campana - espiga, se acostilló el tubo, se colocó limo arenoso sobre el lomo del tubo, se compactó con compactadora manual y pisón de mano y se rellenó hasta llegar al nivel de sello, se colocó el sello del terreno, se construyeron las cajas de conexión para descargar a las lagunas y las cajas de válvulas para desfogar las lagunas al canal de drenaje de la zona norte del predio.



SECCION LAGUNA DE AMORTIGUAMIENTO DE AGUAS PLUVIALES



Sección de las lagunas y tuberías de llenado provenientes de las plataformas



2

4.3.3.3 Obras de edificación

Estadio olímpico

Cuenta con una cancha múltiple para fútbol soccer y americano, tiene pista olímpica, dos bloques de gradas techadas, baños vestidores y sanitarios.

La cimentación de las gradas consiste en traveses de liga y una losa reforzada, los muros son de block estructural vidriado con castillos y dalas de concreto armado, la estructura del estadio es de estructura metálica de acero A-36, columnas, vigas, armaduras, largueros y contraventeos. La cubierta es de lámina Pintro IMSA R-101.

Una vez que se concluyó el mejoramiento, se trazó la cimentación, se coló una plantilla, y sobre esta se armó el acero de refuerzo de $f_y=4200 \text{ kg/cm}^2$ habilitado, se armaron los dados con las anclas para las placas base de las columnas, dejando las preparaciones para el anclaje de castillos y gradas, se cimbraron los elementos armados, y se coló la cimentación, una vez alcanzada la resistencia del concreto de la cimentación, se realizó el montaje de la estructura, se realizaron pruebas de soldadura y torque a los elementos, se colocó la losa de acero para las gradas y losas de vestidores y sanitarios al interior de las gradas, se habilitó el acero de las gradas y losa y se colaron. Se colocaron los acabados cerámicos y de pasta y pintura; se montó la lámina con sus canalones, la cancelería, muebles baño y mamparas, instalaciones hidrosanitarias y eléctrica.



Trabajos de cimentación, estructura y alfaridas



Trabajos acabados e instalaciones

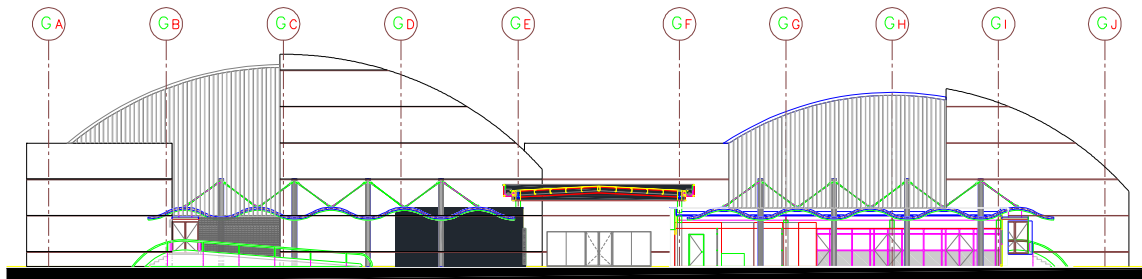
Gimnasio y salón de usos múltiples.

Cuenta con un gimnasio, salón de usos múltiples una cancha de usos múltiples, gradas, baños-vestidores para jugadores, sanitarios para público, oficinas administrativas, enfermería y áreas técnicas.

La cimentación se desplantó sobre el mejoramiento del terreno y consiste en trabes de liga y una losa reforzada; los muros son de block estructural con castillos y dalas de concreto armado. La estructura metálica es de acero A-36: columnas, vigas, armaduras, largueros y contraventeos. La cubierta es autoportable tipo Arcotecho de lámina engargolada, que se apoya en un canalón de placa de acero.

La estructura metálica se montó una vez que la cimentación alcanzó la resistencia de proyecto. La fachada es de panel de cemento, se colocaron los plafones y muros de durock o tablarroca, la pasta y pintura y los acabados cerámicos, así como el arcotecho con sus canalones, la cancelería, muebles de baño y mamparas, instalaciones hidrosanitarias y eléctrica.

Para el área exterior, se realizó un estacionamiento de asfalto con banquetas y andadores de adocreto.



Fachada poniente del gimnasio



Trabajos de cimentación



Trabajos de estructura, albañilería, cubierta, acabados y pavimento.

AREAS DE SERVICIOS (MODULOS DE SANITARIOS, CUARTOS DE BOMBAS)

El deportivo cuenta con dos módulos de sanitarios y cuartos de bombas en las lagunas pluviales.

Se realizó mejoramiento al terreno con geomalla y grava controlada. La cimentación, consiste en una losa con una pequeña zapata para desplantar los muros de block estructural o de block hueco, con castillos y dalas de concreto armado. La cubierta es de lámina Pintro, con pisos cerámicos para los sanitarios y firme de concreto pulido para los cuartos de bombas..



Módulos de sanitarios y Cuartos de bombas para lagunas

CANCHAS DE FRONTON, FUTBOL RAPIDO, VOLEIBOL, BASQUETBOL, TENIS, ANDADORES Y PUENTE DE CICLOPISTA.

Para todas las canchas que utilizan firmes de concreto, se colaron firmes sobre el mejoramiento del terreno. Los firmes son de concreto de resistencia a la compresión de 250 kg/cm², en las áreas donde llevan muros (los frontones y canchas de futbol rápido) se habilitaron zapatas para desplantar los muros y en las demás canchas se hicieron dados o zapatas para colocar placas base para porterías, canastas de basquetbol y postes en las de voleibol, tenis y futbol rápido.

El frontón tiene muros de 9.85 metros de alto: son muros dobles de block hueco junteado con mortero, con refuerzo horizontal a cada 3 hiladas, y trabes de concreto intermedias y columnas de concreto armado. Tiene 3.0 metros de estructura ligera y malla como remate. De las cuatro canchas, una es cerrada. Los acabados son aplanados finos de mortero cemento-arena, con pintura color verde y la malla de protección con pintura blanca en el remate de las canchas.

Para las canchas de futbol rápido, voleibol, basquetbol y tenis se coló el firme y las zapatas para los muros de block (solo para las de futbol rápido) y dados y zapatas para el equipamiento de las canchas, con concreto de resistencia a la compresión de 250 kg/cm^2 , reforzado con malla electrosoldada, con pasa juntas y canastillas en las juntas. Una vez colados los firmes, se realizó el sello de juntas con cola de rata y sellador. Los muros son de block, con castillos y dalas de concreto reforzado; se aplanaron los muros, se pintaron las canchas y se equiparon para su funcionamiento.

El puente de la ciclopista une las plataformas A y C, es un puente con 4 apoyos con cimentación a base de zapatas y contratrabes y muros de contención en el ligue con las losas de acceso. Las vigas son de acero A-36 y la losa es de sistema losacero.

El campo de beisbol tiene una grada cimentada (contratrabes y losas) sobre el mejoramiento del terreno. La grada es de acero estructural A-36 con cubierta de lámina Pintro.

Los andadores son de adocreto. Para estos trabajos se coló la guarnición o bordillo sobre el mejoramiento del terreno. Para la ciclopista se colocó una carpeta asfáltica y para los de adocreto una cama de arena sobre la que se asentaron las piezas de adoquín.

Para los estacionamientos y andadores de asfalto, se colocó una estructura de pavimento sobre el mejoramiento, se colocó el riego de sello con un equipo petrolizadora, se tendió la mezcla asfáltica con la extendedora de asfalto (Finisher) y se realizó la colocación de carpeta asfáltica, se compactó con rodillo de tambor metálico y se cerró con rodillo neumático, se colocó un sello asfáltico que incluyó un riego de liga, se colocó un sello de cemento finalmente se colocó la pintura de señalamiento horizontal y delimitación de cajones.



Colado de firmes en canchas



Armado, colado y sello de juntas de los firmes de las canchas, Trabajos de albañilería y acabados en canchas, colocación de adoquín en los andadores.



Canchas de frontón, beisbol, basquetbol, tenis y puente de ciclista



Trabajos de andadores y estacionamientos

5. CONCLUSIONES

El problema ambiental que representan los sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos es complejo porque requiere un manejo que involucra a los gobiernos, prestadores de servicios relacionados, el sector y privado y la sociedad en general.

En el capítulo 1 se desarrollaron los principales conceptos sobre el manejo de residuos sólidos. En el segundo se expone la situación del manejo de residuos sólidos en México, un dato muy importante es que en el año 2017 el 65% de los sitios de disposición final habían llegado al término de su vida útil, por lo que la clausura adecuada de los sitios que dejen de operar es fundamental para mitigar el impacto ambiental cuando se clausuren, adicionalmente es necesario buscar que los sitios de disposición que inicien operaciones, lo hagan apegados a la normatividad y en la medida de lo posible se realicen medidas de mitigación en los que están operando sin cumplirla.

En 2017, en México la generación promedio de residuos sólidos urbanos fue de 120,128 t/día. Las regiones que más generan son: la Centro con un 50%, Norte 18% y la Ciudad de México con el 13%. La generación promedio por habitante es de 0.944 kg. La composición promedio de los residuos es 31.56% son residuos susceptibles de aprovechamiento; 46.42% son residuos orgánicos, 12.03% “otros residuos”. Diariamente se recolectan 100,751 toneladas (83.87%). 2314 municipios cuentan con servicio de recolección y el parque vehicular para este fin es de 16,615 vehículos. La recolección separada representa el 5% y se realiza en 144 municipios y las 16 alcaldías de la Ciudad de México.

Hay 2516 prestadores de servicio de recolección 87.12% son del sector público, 9.82% del sector privado y el 3.06% al sector social. 19,377 toneladas por día no se recolectan. Solo 5 estados y la Ciudad de México recolectan el 100% de los residuos

Hay 173 centros de acopio para residuos con potencial de aprovechamiento en 19 estados y 47 plantas aprovechamiento en 15 estados, en donde se realizan alguno o varios de los siguientes procesos: separación o reciclaje, trituración; compactación; compostaje y biodigestión. En 2017, había 2203 SDF, de los cuales 238 (12.62 %) son rellenos sanitarios y 1643 (87.35%) tiraderos a cielo abierto. La recuperación informal (pepena) es la principal fuente de recuperación de residuos reciclables y se estima que al menos dos millones de personas viven se ella.

En cuanto al equipamiento; de la totalidad de SDF 359 (16.30%) capturan los lixiviados, 213 (9.67%) captura el biogás y solo 5 producen energía con el biogás; 326 (14.8%) cuentan con geomembrana para proteger el suelo, 1053 (47.80%) carecen de todas las medidas de protección al ambiente, 85 cumplen con todos los requerimientos, 685 no cumplen ninguno y el 65% (1440 SDF) han concluido su vida útil.

En el capítulo tres se hace un repaso de la normatividad vigente para la clausura de sitios de disposición final.

En cuanto al capítulo 4; el proyecto Ciudad Jardín Bicentenario es un buen ejemplo de la colaboración de la iniciativa privada y los gobiernos estatal y municipal, donde un pasivo ambiental se transformó en un complejo comercial y de servicios atractivo, lo cual es muy importante porque dio un valor comercial a un área que solo representaba un problema ambiental. En cuanto a la clausura del caso de estudio, se concluye lo siguiente de acuerdo a los lineamientos especificados por la NOM-083-SEMARNAT-2003

El proyecto cumple con el punto 9.6 de la norma pues cuenta con estudios topográficos, drenes perimetrales al pie de los taludes para la captación de lixiviados, canalizándolos para su control en los sistema de tratamiento (BRAIN) e infiltración del mismo en los residuos; infraestructura para la captación y quemado de biogás (éste proyecto cuenta con un quemador de flama cerrada), cuenta con drenaje pluvial que capta la totalidad de precipitación y la almacena en lagunas pluviales que pueden desfogarse, así como con el punto 9.1 pues cumple con los taludes, pendiente y compactación del terreno, drenaje, infraestructura para el control de lixiviados y biogás, de acuerdo al punto 9.1 de la norma, la cobertura final cumple el punto 9.2 de la norma porque aísla los residuos controlando la emisión de biogás y la infiltración de líquidos, así mismo, el sello cumple con la conductividad hidráulica.

El uso final del sitio es un deportivo equipado con canchas deportivas, un estadio pequeño, un gimnasio, canchas deportivas, andadores, ciclovía, estacionamiento y áreas verdes. no cuenta con construcciones para uso habitacional ni educativos.

En cuanto al mantenimiento y el programa de monitoreo, están a cargo de las autoridades.

Los proyectos para la recuperación de estos espacios, son pocos (en proporción a los que están sin ningún tratamiento), sin embargo, los hay y exitosos como Santa Fe, Jardines de la Montaña, Ciudad Jardín Bicentenario y ahora el proyecto del Parque Cuitláhuac en Iztapalapa.

Para el caso de estudio, se recuperó el área y se construyó un deportivo, con un modelo de colaboración mixta. Se deja de emitir el equivalente a 93,000 toneladas de CO₂ al año, se confinaron millones de toneladas de basura (espesores de 4 a 22 m) acumuladas por 30 años, se colocaron más de un millón de m² de geotextil de poliéster reciclado de 200 gr/m², más de 700,000 m² de geomembrana, se recupera el agua de lluvia y se utiliza en el riego de las áreas verdes.

La normativa para cerrar los sitios de disposición final es clara en los requerimientos, sin embargo, pese al beneficio social y ambiental que se logra con la clausura adecuada, los recursos requeridos para ello son el principal problema. Se requieren fuertes inversiones para clausurar un SDF y en 2017, había 1440 sitios que habían concluido su vida útil. La gestión integral de residuos considera necesario para lograr un modelo de negocio sustentable y de economía circular: mejorar los servicios, valoración material y energética, inspección y vigilancia, creación de organismos operadores y generación de cadenas productivas para el aprovechamiento.

6. BIBLIOGRAFÍA

El medio Ambiente en México 2013-2014. SEMARNAT, 2014, Recuperado el 30 de noviembre de 2021, de:

https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_resumen14/07_residuos/7_1_1.html

Compendio de Estadísticas ambientales 2015, SEMARNAT. Recuperado el 30 de noviembre de 2021, de:

https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/compendio_2015/dgeiawf.semarnat.gob.mx_8080/ibi_apps/WFServletb73b.html

Ley General para la prevención y Gestión Integral de Residuos (LGPGIR). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Primera edición. México 2003

Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005 que establece las características, el procedimiento identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos.

Norma Oficial Mexicana NOM-087-ECOL-SSA-2002. Protección ambiental-Salud ambiental – Residuos peligrosos – biológico –infecciosos- Clasificación y especificaciones de manejo.

TABLA-INCOMPATIBILIDAD-NOM-054-SEMARNAT.pdf Recuperado el 23 de noviembre de 2021 en: <http://uptapachula.edu.mx/page/wp-content/uploads/2018/03/>

Gestión integral de los residuos sólidos urbanos. Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil. Arturo Ríos Hernández, IPN, ESIA 2009

Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de estadísticas Ambientales, Indicadores Clave, de Desempeño Ambiental y de crecimiento verde. Capítulo 7 (Residuos) SEMARNAT 2018, Recuperado el 23 de noviembre de 2021 en: <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/index.html>

Guía de usuario. Generación de electricidad mediante Residuos sólidos urbanos. Primera edición: octubre de 2012 D.R. Comisión Federal de Electricidad (CFE) México, D. F.

Antonio Gallardo Izquierdo, Francisco José Colomer Mendoza, Roel Campos Rodríguez, Dagoberto Arias Aguila. (2019). Aprovechamiento energético de residuos sólidos. España: Universitat Jaume

Programa Nacional de remediación de sitios contaminados. SEMARNAT 2018. Recuperado el 23 de noviembre de 2021 de: <https://www.gob.mx/semarnat/documentos/programa-nacional-de-remediacion-de-sitios-contaminado>

Incineración de residuos en la Ciudad de México, el gran obstáculo para transitar hacia una sociedad sostenible. Greenpeace México, Noviembre 2017

REVISTA ¿CÓMO VES?, Número 242, enero 2019, UNAM. Recuperado el 28 de noviembre de 2021. En <http://www.comoves.unam.mx/numeros/articulo/242/la-basura-en-su-lugar>

Capítulo 6 PIROLISIS, SEDESOL. Recuperado el 28 de noviembre de 2021 en: <https://docplayer.es/15481573-6-1-antecedentes-6-0-pirolisis-sedesol.html>

El impacto de los desechos sólidos sobre el medio. Rocío López de Juambelz. Revista Ciencias, UNAM 2011. Recuperado el 28 de noviembre de 2021 de: <https://www.revistaciencias.unam.mx/es/168-revistas/revista-ciencias-20/1507-el-impacto-de-los-desechos-s%C3%B3lidos-sobre-el-medio.html>

Cambio climático. Una visión desde México. Julia Martínez y Adrián Fernández Coordinadores. Sección 1 Los gases regulados por la convención marco de las Naciones Unidas sobre cambio climático. Dick Homero Cuatecontzi y Jorge Gasca. Instituto Nacional de Ecología, SEMARNAT. Primera edición 2004

MANUAL DE BIOGÁS. Prof. María Teresa Varnero Moren; Gobierno de Chile - Ministerio de Energía; Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo; Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Santiago de Chile 2011

Aguilar-Virgen, Q., Taboada-González, P. A., Ojeda-Benítez, S. (2011). Modelo Mexicano para la estimación de la generación biogás. Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY, 15-1, pp 37-45, ISSN: 1665-529-X

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.

Los productos y los impactos de la descomposición de residuos sólidos urbanos en los sitios de disposición final Gaceta Ecológica, núm. 79, 2006, pp. 39-51 Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales Distrito Federal, México

NMX-AA-025-SCFI-2001. Análisis de agua - determinación de la demanda bioquímica de oxígeno en aguas naturales, residuales (DBO5) y residuales tratadas - método de prueba (cancela a la NMX-AA-028-1981)

NORMA MEXICANA NMX-AA-030/1-SCFI-2012 Análisis de agua - medición de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. - método de prueba - parte 1 - método de reflujos abiertos - (Cancela a la NMX-AA-030-SCFI-2001).

HICKMAN L., Integrated solid waste management, 1999, Estados Unidos, Ed. American Academy of Environmental Engineers Staff

Tchobanoglous G, Theisen H, Vigil S.A. Gestión integral de residuos sólidos. Volumen I. Madrid: McGraw-Hill; 1994.

NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-054-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-ECOL-1993.

Programa Nacional de remediación de sitios contaminados. 2018.

Determinación de los parámetros hidrológicos en Rellenos Sanitarios en México, Caso de estudio: Tlalnepantla, Edo. de México. Tesis que para optar por el grado de: Maestría en Ingeniería Ambiental – Residuos Sólidos presenta Ing. Rodrigo Antonio Aguilar Vera. Septiembre 2008. Tutor: M.C. Constantino Gutiérrez Palacios. Pp 18-25 Programa de maestría y doctorado en ingeniería. UNAM

Tratamiento de lixiviados generados en el relleno sanitario de la Cd. de Chihuahua, Méx. Tesis como requisito para obtener el grado de Maestro en Ciencia y Tecnología Ambiental presenta Wendy Margarita Chávez Montes. Director de tesis: Dr. Guillermo González Sánchez CENTRO DE INVESTIGACION EN MATERIALES AVANZADOS 2011
Recuperado el 30 de noviembre de 2021, de:
<https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/858/1/Wendy%20Margarita%20Ch%C3%A1vez%20Montes%20MCTA.pdf>

Análisis de Estadísticas del INEGI sobre Residuos Sólidos Urbanos. Recuperado el 23 de noviembre de 2021 de:
<https://rde.inegi.org.mx/index.php/2015/01/09/analisis-de-estadisticas-del-inegi-sobre-residuos-solidos-urbanos/>

Guía de cumplimiento de la Norma NOM-083-SEMARNAT-2003. México 2004 pp. 40-44
Manual para la rehabilitación y clausura de tiraderos a Cielo abierto. SEDESOL. Pp 84-87

Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos, Primera edición, mayo 2020. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales

Inventario de Residuos Sólidos de la Ciudad de México 2018 Recuperado el 30 de noviembre de 2021 de: <https://www.sedema.cdmx.gob.mx/storage/app/media/IRS-2018-VF-09-09-2019.pdf>

Programa de gestión integral de residuos 2016-2020 Secretaría del Medio Ambiente
Guía de cumplimiento de la Norma NOM-083-SEMARNAT-2003. México 2004 pp. 40-44

Manual para la rehabilitación y clausura de tiraderos a Cielo abierto. SEDESOL 1996. Pp 84-87