



**UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE MÉXICO  
FACULTAD DE INGENIERÍA**

---

UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

**“INGENIERÍA DE RESILIENCIA APLICADA  
PARA LA DISMINUCIÓN DE LA  
VULNERABILIDAD DEL SISTEMA HIDRÁULICO  
DE LA CIUDAD DE MÉXICO”**

**QUE PRESENTA  
JAVIER ARREOLA ROSALES  
PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL**

**DIRECTOR:  
ING. MARCOS TREJO HERNÁNDEZ**

**JULIO DE 2012**







UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA  
COMITÉ DE TITULACIÓN  
FING/DICyG/SEAC/UTIT/117/11

Señor  
JAVIER ARREOLA ROSALES  
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor ING. MARCOS TREJO HERNÁNDEZ, que aprobó este Comité, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

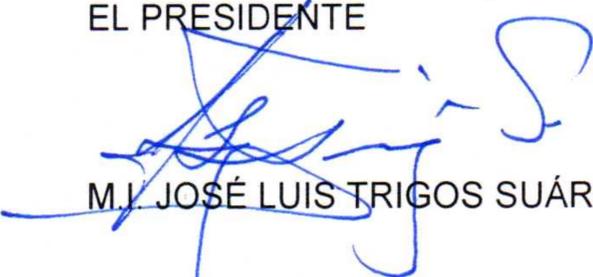
**"INGENIERÍA DE RESILIENCIA APLICADA PARA LA DISMINUCIÓN DE LA VULNERABILIDAD EN EL SISTEMA HIDRÁULICO DE LA CIUDAD DE MÉXICO"**

- INTRODUCCIÓN
- I. OBJETIVOS
- II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA
- III. LA RESILIENCIA Y LA INGENIERÍA DE RESILIENCIA PARA LA DISMINUCIÓN DE LA VULNERABILIDAD DE LOS SISTEMAS
- IV. EL SISTEMA HIDRÁULICO DE LA CIUDAD DE MÉXICO Y SUS RIESGOS
- V. INGENIERÍA DE RESILIENCIA APLICADA PARA LA DISMINUCIÓN DE LA VULNERABILIDAD DEL SISTEMA HIDRÁULICO DE LA CIUDAD DE MÉXICO
- VI. CONCLUSIONES

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"  
Cd. Universitaria a 27 de junio del 2012.  
EL PRESIDENTE

  
M.I. JOSÉ LUIS TRIGOS SUÁREZ

JLTS/MTH\*gar.



## **Dedicatoria**

A mis padres, familia y maestros,  
ejemplos de resiliencia, trabajo y vida.



## **Agradecimientos**

A mi madre, Martha Emilia, por su entrega, amor y dedicación  
A mi padre, Javier, por estar allí siempre

A mis hermanos, Andrea e Iván, por nuestras risas interminables

A mi abuela, María Elena, orgullosa entre orgullosas,  
A mi abuelo, Alejandro, genio y figura

A mi Facultad de Ingeniería, de mi  
Universidad Nacional Autónoma de México

A los que acompañaron este proceso,  
Manuel Viejo Zubicaray, Marcos Trejo, Esteban Figueroa,  
Alfonso Morales, Sergio Macuil, Cristian González

A mis maestros de la Facultad,  
Gonzalo Guerrero, Pedro Struck, Rogelio Soto, Adriana Cafaggi,  
Érik Castañeda, Juan Velázquez, Carlos Sánchez Mejía, Violeta Bravo,  
Claudia Sánchez, Carmelino Zea, Agustín Deméneghi, Víctor Mahbub

Maestros en mi camino que me hicieron mejor persona,  
María de los Ángeles Jiménez “Campanita”, Eloísa Machado,  
Claudia Ascanio, Claudia Martí, Carmen Moreno, Sara Pérez,  
Adrián Cano, Lourdes Ochoa, Erick Escandón, Ariel Sánchez,  
Nikolaus Schwarz, Claudia Boy, Miriam Flores, Ana Francina Pintado,  
Carolina Hernández, Flor Cervera, Alberto Mancilla,  
Antonio Bárcena, Joe Rider, Angela Fellowes, Annie Claudon,  
Chris Norris, Pedro Vela, Gaby Corral, Vero Álvarez, Jesús Ramírez,  
Antonio Murrieta, Tom Kosnik, Angelos Findikakis

Amigos de la Carrera, compañeros de la andanza,  
Arturo Peña, Óscar Esquinca, Carlos Lastra, Diego Cisneros, Jessica Aceves,  
Javier Ramos, Enrique Évoli, Juan Goslinga, Gonzalo Guerrero, Ana Irastorza,  
Estrella Hernández, Aldo Marín, Jorge Buendía, Monserrat Alcázar, Roberto Sierra,  
José Eduardo Valdés, Angélica Madrigal, Thomas Chang, Abdulrahman Alfozan,  
Stefan Doppler, Paulina Pérez, Alejandro Corinto, Ani Hovsepyan, Eduardo Sverdlin,  
Valeria Méndez, Rodolfo Salvador, Atenea Rosado y Cristian Estrada.

A la Asociación de Ingenieros Líderes Unidos por México,  
con la convicción de que México llegará a donde se merece estar.

Gracias, porque sin ustedes no estaría aquí.



---

# Índice

---

Índice .....	5
Mapa Mental de Estructura.....	9
Resumen.....	11
Objetivos .....	15
Preguntas Clave .....	15
Planteamiento del Problema.....	17
Definición de los Conceptos Clave .....	22
Ingeniería de Resiliencia .....	22
Vulnerabilidad.....	22
Peligro Natural .....	22
Riesgos .....	22
Daño .....	22
Infraestructura Hidráulica, de Drenaje y Sanitaria.....	23
Gestión de Recursos Hidráulicos.....	23
Seguridad Hídrica.....	23
Factores de Vulnerabilidad, Peligros y Riesgos .....	25
Desarrollo de Conceptos Claves.....	25
La Vulnerabilidad de un Sistema Ingenieril en una Sociedad .....	28
Los Peligros Naturales que impactan en un Sistema .....	32
Funcionamiento y Rendimiento del Sistema.....	35
La Resiliencia y la Ingeniería de Resiliencia para la disminución de la vulnerabilidad de los sistemas .....	39
La Resiliencia nace del ser humano.....	39
Ingeniería de Resiliencia .....	43
Introducción .....	43
El Porqué de la Resiliencia .....	45
El enfoque de la Ingeniería de Resiliencia .....	51

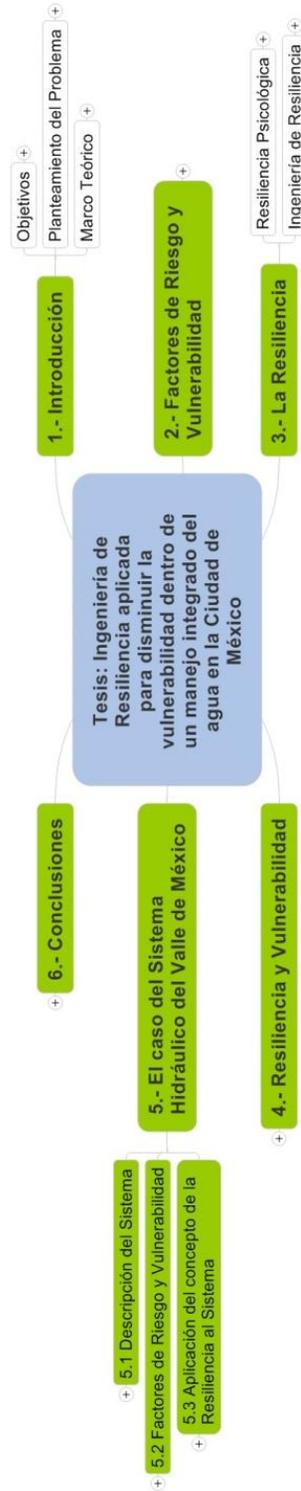
El Proceso hacia la Resiliencia .....	57
Conclusión .....	62
Casos Recientes dentro del Contexto Histórico .....	63
Vuelo 1549 de US Airways, 2009 .....	63
Presa Sayano-Shushenskaya, 2009 .....	66
Sismo en Haití, 2010.....	69
Sismo en Chile, 2010.....	72
Las 4 Crisis del Japón, 2011.....	75
Sismo en México, 2012 .....	79
Comparación Final entre Eventos.....	80
El Sistema Hidráulico de la Ciudad de México y sus Riesgos .....	81
Descripción del Sistema.....	81
La Ciudad de México .....	81
Infraestructura de Abastecimiento .....	89
Fuentes de Abastecimiento.....	91
Infraestructura de Drenaje.....	101
Infraestructura de Tratamiento y Reúso.....	109
Definición de Actores .....	113
Introducción .....	113
Consideraciones para entender e implementar en el Manejo del Agua en la Ciudad de México .....	115
Financieras .....	115
Sociales.....	116
Ambientales.....	117
Políticas.....	118
Macroeconómicas.....	119
Legales y de Gestión .....	120
Tecnológicas .....	121
Gestión de Recursos Hidráulicos.....	122
Introducción .....	122
Gestión Integrada de Recursos Hidráulicos.....	122
Economías de Escala .....	123

---

Conformación de la Gestión Integrada de Recursos Hidráulicos .....	131
Sustentabilidad.....	133
Factores de Riesgo y Vulnerabilidad.....	140
Ingeniería de Resiliencia aplicada para la disminución de la Vulnerabilidad del Sistema Hidráulico de la Ciudad de México .....	153
Incidentes en los Últimos Años .....	153
Análisis FODA del Sistema Hidráulico de la Ciudad de México .....	155
De la Vulnerabilidad y los Peligros a los Riesgos y los Daños .....	155
Estado del Arte en las Delegaciones.....	170
Funcionamiento del Sistema.....	174
Evaluación de la Resiliencia .....	178
El Proceso de la Ingeniería de Resiliencia aplicado a los Sistemas de Abastecimiento, Drenaje y Tratamiento .....	184
Conclusiones.....	187
Evaluación de la Seguridad Hídrica y la Resiliencia del Sistema.....	187
Acciones para mejorar la Resiliencia del Sistema .....	188
Sugerencias para Investigaciones Futuras .....	189
Listado de Trabajos Consultados.....	191



# Mapa Mental de Estructura





---

# Resumen

---

Durante el fin de semana del 29 y 30 de octubre del 2011, el Sistema de Aguas de la Ciudad de México redujo una vez más, ahora en 40%, el flujo de agua potable suministrado a buena parte de los 8.8 millones de habitantes del Distrito Federal. (Robles & Montes, 2011) Sin embargo, pocos fueron los sorprendidos. Los problemas relacionados con agua son cada día mayores por la recurrencia de fugas, recortes, escasez, desbordes, encharcamientos, inundaciones y deslaves. Se propone la realización de una tesis de investigación que ponga la Ingeniería de Resiliencia sobre las órbitas mexicanas de investigación, educación y sociedad.

En los dos últimos años han surgido terribles fallas en diferentes obras de infraestructura alrededor del mundo –la catástrofe de la Presa Sayano-Shushenskaya en Siberia con pérdidas de 1,200 mdd, el derrame de 4.9 millones de barriles de petróleo por parte de la Deepwater Horizon (Frieden, 2012) y el desastre en la central nuclear de Fukushima que amenazó con evacuar a 2 millones de personas-.

Ante dichos fenómenos que rebasan la Administración de Riesgos tradicional, ha tomado fuerza la Ingeniería de Resiliencia, especialmente en Francia y Estados Unidos. Ésta se define como la preparación de los sistemas para ajustar y garantizar su funcionamiento antes, durante y después de cambios y alteraciones, tanto internas como externas. (Hollnagel, Woods, & Leveson, Resilience Engineering: Concepts and precepts, 2006)

Se tiene el objetivo de determinar si al día de hoy, el sistema de control de aguas de la Ciudad de México es resiliente o no, y hasta qué punto podrá operar antes de fallar. Para ello se realizará una recolección de datos e información, a partir de fuentes bibliográficas y observaciones en desplazamientos in situ, que permitan determinar el status-quo sobre el manejo realizado por el Sistema de Aguas de la Ciudad de México y la Comisión Nacional del Agua en los aspectos de infraestructura hidráulica de abastecimiento y drenaje.

Esta información será analizada para plantear modelos probabilísticos estocásticos: Dado el espacio de muestreo  $\Omega$  (Sistema hidráulico de la Ciudad de México), se planteará en forma cualitativa un conjunto de eventos que contengan los procesos no lineales  $\mathcal{F}(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4 \dots \alpha_n)$ , o adversidades continuas. Así se determinará qué tan capaz es el sistema para ajustar su funcionamiento a cambios y alteraciones continuas, al tiempo que controla y mitiga dinámicamente dichas variaciones.

Se utilizará el enfoque de Planeación, Evaluación de Proyectos, Infraestructura de Desarrollo y Manejo de Recursos Hidráulicos, de forma que se emitan recomendaciones que mejoren el manejo del agua en la Ciudad de México. Se tomará en cuenta que existen recursos finitos, incertidumbre irreductible y objetivos múltiples que interactúan dinámicamente entre sí. (Modarres, 2006) De esta forma, la investigación innovadora que se propone tendrá un impacto positivo en la seguridad hídrica de más de 8 millones de habitantes de esta metrópoli.



---

“Cosas que nunca habían pasado antes,  
pasan todo el tiempo.”  
Scott D. Sagan



## Objetivos

---

1. Plantear la idea de la Ingeniería de Resiliencia como una alternativa para el manejo de la vulnerabilidad de un sistema ante los riesgos a los que está expuesto.
2. Proponer soluciones conceptuales y creativas a partir de la aplicación de la Ingeniería de Resiliencia que puedan ser aplicadas en el sistema hidráulico del Valle de México, de forma que disminuya la vulnerabilidad ante la presencia continuada de factores adversos.

## Preguntas Clave

---

1. ¿Qué es la seguridad en el sistema hidráulico de la Ciudad de México?
2. ¿Qué partes del sistema son vulnerables?
3. ¿La Ciudad de México está más cercana a la vulnerabilidad o a la resiliencia?
4. ¿Qué medidas se proponen para que el sistema sea más resiliente?



# Planteamiento del Problema

---

El Distrito Federal, asentado en el Valle de México –a una altura de 2200 msnm- con sus 9 millones de habitantes, es el centro neurálgico del país. Considerada como una de las 10 urbes del mundo con mayor PIB, concentra permanentemente más del 20% de la actividad económica de México. Dado su tamaño, y rodeado por su vasta zona metropolitana, presenta retos de gran magnitud en los ámbitos económico, político, social y tecnológico, que deben ser superados día con día para garantizar su funcionamiento. (Instituto Nacional de Geografía y Estadística, 2012)

En el aspecto de la Ingeniería encaminada al funcionamiento de la Ciudad, se tienen desafíos que por años se han atendido de una u otra forma, alcanzando un nivel de bienestar aceptable para la población. Conforme la capital del país ha crecido desmedida y desordenadamente, convirtiéndose por un tiempo en la metrópoli más grande del mundo, muchas necesidades no se han cubierto con la suficiencia mínima requerida.

La Ciudad de México funciona a través de los sistemas –de infraestructura, financiero, comercial, gubernamental, industrial, entre muchos otros- y los sistemas tienen a las personas como elementos trascendentes, ya que los operan, diseñan, mantienen y supervisan. (Figueroa Palacios, 2011, 2012)

Tanto los sistemas como la población son vulnerables en mayor o menor grado. La vulnerabilidad de los sistemas se manifiesta cuando estos fallan. Cuando esto sucede, generalmente hay pocas alternativas para recuperarse rápidamente y las personas a cargo se dan cuenta que no estaban preparadas para el peor escenario posible. A pesar de que se ha hecho un esfuerzo enfático por posicionar la Ingeniería de Riesgos en las últimas décadas como una solución para lidiar ante la adversidad, las desgracias siguen ocurriendo, cumpliendo el dicho popular “las desgracias nunca vienen solas”. (Viejo Zubicaray, 2011, 2012)

Ante ello, es necesario preguntarse si algún método para el manejo de riesgos funciona verdaderamente. También debemos preguntarnos, ¿alguien en la organización sabrá rápidamente cuándo y por qué el sistema no está funcionando correctamente? Y si el sistema no trabajara adecuadamente, ¿cuáles serían las consecuencias?

Como lo señaló The Economist recientemente, el mundo se está preocupando por las cuantiosas catástrofes que han sucedido en las últimas décadas. El continente asiático ha sido el más afectado, pero no se ha quedado atrás el continente americano: Desastres naturales como inundaciones, sismos, tsunamis y huracanes, y desastres originados por trabajo humano como falla de estructuras, derrames petroleros e infraestructuras deficientes. Estos desastres multibillonarios son cada día más comunes. (The Economist, 2012)

El mundo ha tenido éxito en volver los desastres naturales menos mortales, con más acceso a la información sobre el estado de las infraestructuras y planes de contingencia. Con un aumento en la población muy creciente, la proporción de fatalidades por desastre ha disminuido considerablemente.

Los costos económicos de los desastres han aumentado significativamente, especialmente porque las actividades económicas se han ubicado en zonas con alta densidad de población, y con alta vulnerabilidad hacia desastres de origen natural y humano. El mundo hoy ha acumulado más riqueza y bienestar, por lo que el riesgo también ha aumentado. (The Economist, 2012)

Para la mayoría de las organizaciones, responder a estas preguntarse acerca de la vulnerabilidad de los sistemas traería malas noticias. Los desastres naturales, geopolíticos, y de todos tipos, tanto los temporales como los permanentes, traído consecuencias tan catastróficas, que se ha creado una nueva conciencia sobre la seguridad, los riesgos, la vulnerabilidad y los daños causados por la conjunción de todos ellos.

Es indispensable mencionar que la falla potencialmente más peligrosa para un sistema y una organización es la falla en la gestión de los riesgos, integrados por la vulnerabilidad y los peligros inherentes a su entorno. Éste sería el caso de que la organización no esté lista a lidiar con la adversidad. El riesgo, a pesar de su definición formal, se manifiesta en nuestros pensamientos como la sensación permanente de que algo malo podría pasar. (Hollnagel, Woods, & Leveson, Resilience Engineering: Concepts and precepts, 2006)

A partir de la comprensión de la relación intrínseca que existe entre la vulnerabilidad y los peligros del entorno de los sistemas y la población, se ha desarrollado la Ingeniería de Resiliencia como una alternativa dentro del análisis de riesgos para lidiar con la incertidumbre, y estar preparados para cualquier evento adverso que se presente, por más conocido o desconocido que sea. La Ingeniería de Resiliencia se aplicará conceptualmente a la infraestructura del sistema hidráulico de la Ciudad de México.

El reto de infraestructura que tiene más potencial de riesgo para la sociedad, debido a su contacto vis-à-vis con cada habitante es el del agua. La ciudad tiene la mayor presión hídrica del país para el abastecimiento, a pesar de que otrora fue un lago con importante presencia de ríos. Por décadas, el principal suministro de agua ha sido por extracción del subsuelo a través de pozos, cuya sobreexplotación ha derivado en reducción de presiones hidrostáticas debido a la alta permeabilidad de la formación aluvial y al mantenimiento de las presiones en la capa de arcilla de los depósitos lacustres poco permeables. Acto seguido ocurre la generación de una diferencia de presiones, o subpresión, que provoca la aportación vertical de agua por parte de las arcillas, que se consolidan y posteriormente se hunden.

Los hundimientos han tenido afectaciones importantes, provocando dislocamientos en conductos, fugas, necesidad de bombeo, encharcamientos continuos y afectación a estructuras. Así como se ha afectado la infraestructura de abastecimiento y distribución, igual de dramático

ha resultado el perjuicio al sistema de drenaje. En los últimos 100 años se ha perdido toda la pendiente del Gran Canal de Desagüe, al grado que hoy es negativa. Además de que el agua regresa a la ciudad, el Emisor Central y el Emisor Poniente se han desbordado por exceder sus respectivos gastos de diseño.



1910:  $S_o=0.00019$  80m<sup>3</sup>/s



2005:  $S_o=0.0007$  15 m<sup>3</sup>/s

En este año se concluirán las obras del Túnel Emisor Oriente, que dotará al sistema con una capacidad de 150 m<sup>3</sup>/s adicionales. (Comisión Nacional del Agua, 2012)

En el aspecto de infraestructura de tratamiento de agua, apenas el 40% del agua en México es tratada. Con la construcción de la PTAR de Atotonilco, se proyecta aumentar el tratamiento de la Ciudad a 60%. Esta obra es crítica para eliminar el empleo del agua de primer uso para riego y reutilizar el agua usada como fuente de agua potable. (Comisión Nacional del Agua, 2012) (Espino de la O, 2011)

Con estos antecedentes, se observa que la ciudad tiene riesgos puntuales en el abastecimiento de agua potable, drenaje pluvial y tratamiento de aguas residuales.

Para proteger la riqueza y el bienestar de las ciudades, se requiere aumentar la resiliencia del sistema y promover compensaciones más transparentes. La urbanización de la Ciudad de México ha derivado en debilitar sus defensas naturales contra desastres – manifestado especialmente en los hundimientos-. Hoy la población está más expuesta a pérdidas. Por otro lado, la urbanización mejora las condiciones de la población en situación de pobreza, a través del aumento en productividad y abatimiento de costos de seguridad. Por todo ello, se requiere que la ciudad incentive a sus habitantes a protegerse mejor.

Con el enfoque novedoso de la Ingeniería de Resiliencia aplicada al manejo de riesgos y del sistema de agua de la Ciudad de México, se buscará en el presente trabajo determinar la situación actual de la capital del país, de forma que se puedan identificar algunas acciones necesarias para fortalecer el sistema.

Las preguntas fundamentales que se responderán en este trabajo son:

- a) ¿Qué es la seguridad en el sistema hidráulico de la Ciudad de México?
- b) ¿Qué partes del sistema son vulnerables?
- c) ¿La Ciudad de México está más cercana a la vulnerabilidad o a la resiliencia?
- d) ¿Qué medidas se proponen para que el sistema sea más resiliente?

Las preguntas secundarias que se derivarán de este trabajo son:

- a) ¿Cómo se controla el estrés en el sistema hidráulico?
- b) ¿Está el sistema hidráulico de la Ciudad de México preparado para manejar adecuadamente la presencia continuada de factores adversos?
- c) ¿Cuál es el grado de vulnerabilidad de las infraestructuras críticas de abastecimiento, drenaje y tratamiento?
- d) ¿Qué consecuencias en grado de daño y permanencia de los mismos habría en caso de falla de los sistemas de abastecimiento, drenaje y tratamiento?
- e) ¿Qué éxitos ha tenido el sistema hidráulico de la Ciudad de México?
- f) ¿Qué fallas ha tenido el sistema hidráulico de la Ciudad de México?
- g) ¿Cómo se deben monitorear los desarrollos o conductas que estén sucediendo en el sistema?
- h) ¿Cómo se puede anticipar las futuras amenazas?
- i) ¿Qué acciones resilientes deben ser realizadas en el sistema con el fin de anticiparse a los problemas?
- j) ¿Qué acciones resilientes deben ser realizadas en el sistema en caso de falla?
- k) ¿Qué capacidades necesitan los operadores del sistema para responder adecuadamente a situaciones estocásticas e inesperadas?
- l) ¿Esas capacidades son específicas de la emergencia, o son una implementación armónica y paulatina para aumentar la seguridad?
- m) ¿Se puede utilizar el enfoque de la Ingeniería de Resiliencia para el diseño de futuras obras de infraestructura para la Ciudad de México?
- n) En caso de que exista una falla, ¿qué acciones son las que tienen prioridad?
- o) ¿Cómo se podría recuperar el sistema, lo más rápido y en la mejor forma posibles?



# Definición de los Conceptos Clave

---

## Ingeniería de Resiliencia

Habilidad intrínseca de un sistema para ajustar su funcionamiento antes, durante o después de cambios y alteraciones, de tal forma que pueda sostener las operaciones requeridas bajo condiciones tanto esperadas como inesperadas. (Hollnagel, Woods, & Leveson, Resilience Engineering: Concepts and precepts, 2006)

Aplicación de conocimientos científicos, matemáticos, físicos, económicos y sociales encaminados a preparar a una organización para manejar adecuadamente la presencia continuada de factores adversos. (Viejo Zubicaray, 2011, 2012)

## Vulnerabilidad

Debilidad, discontinuidad o exposición que puede ser aprovechada por peligros o amenazas, causando daño o destrucción de activos. (Keller & De Vecchio, 2012)

## Peligro Natural

Evento y proceso natural que es una amenaza potencial para la vida humana y la propiedad. (Keller & De Vecchio, 2012)

## Riesgos

La probabilidad y magnitud de pérdida, desastre o evento indeseable, a partir de la conjunción de la vulnerabilidad y los peligros naturales. (Hubbard, 2009)

## Daño

Es la ocurrencia de pérdida, desastre o evento indeseable, a partir de la conjunción de la vulnerabilidad y los peligros naturales. (Hubbard, 2009)

## **Infraestructura Hidráulica, de Drenaje y Sanitaria**

Conjunto de estructuras básicas, técnicas e interconectadas que son necesarias para la operación de instalaciones de control de agua, que proveen de comodidades y servicios esenciales para permitir, sostener y potenciar las condiciones de vida de los habitantes de una sociedad. Incluyen las estructuras básicas de abastecimiento de agua potable, alcantarillado, drenaje, y sanitaria y de tratamiento. (Fulmer, 2009) (US Army Corps of Engineers) (Morales García, 2012)

## **Gestión de Recursos Hidráulicos**

Conjunto de actividades necesarias para satisfacer las necesidades hidráulicas de un área al hacer el mejor uso posible de los recursos hidrológicos disponibles. (Findikakis, 2011)

## **Seguridad Hídrica**

Capacidad de una población de asegurar la oferta de acceso al agua potable, alcantarillado, drenaje, sanitaria y de tratamiento, en cantidad y calidad adecuadas para cubrir las necesidades de un país, región o ciudad, soportando las actividades económicas asociadas al recurso. (Findikakis, 2011)



# Factores de Vulnerabilidad, Peligros y Riesgos

---

## Desarrollo de Conceptos Claves

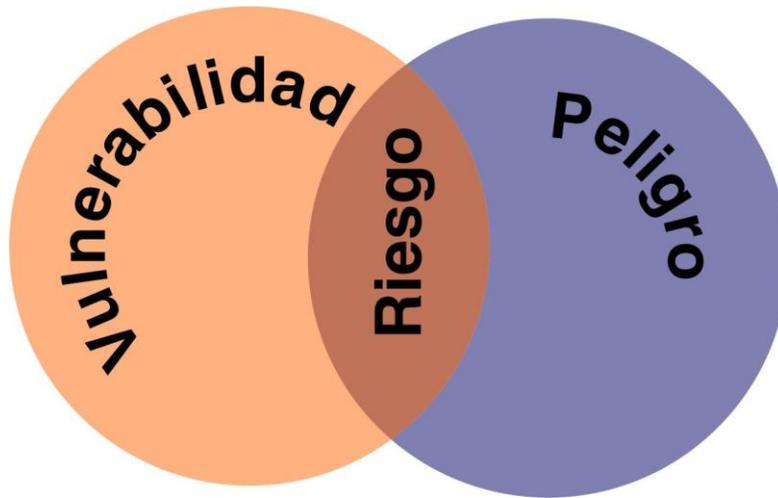
Los riesgos, y en caso de ocurrencia, daños, se pueden explicar a partir de los conceptos de vulnerabilidad y peligros. La vulnerabilidad se refiere a las debilidades, discontinuidades o exposiciones de los sistemas o las personas –según aplique- que pueden ser aprovechadas por peligros o amenazas, causando daño o destrucción. (Figueroa Palacios, 2011, 2012)

Los sistemas son vulnerables en mayor o menor grado. Sin embargo, la vulnerabilidad es totalmente visible cuando es aprovechada por los riesgos, derivando en fallas e inclusive catástrofes. (Viejo Zubicaray, 2011, 2012)

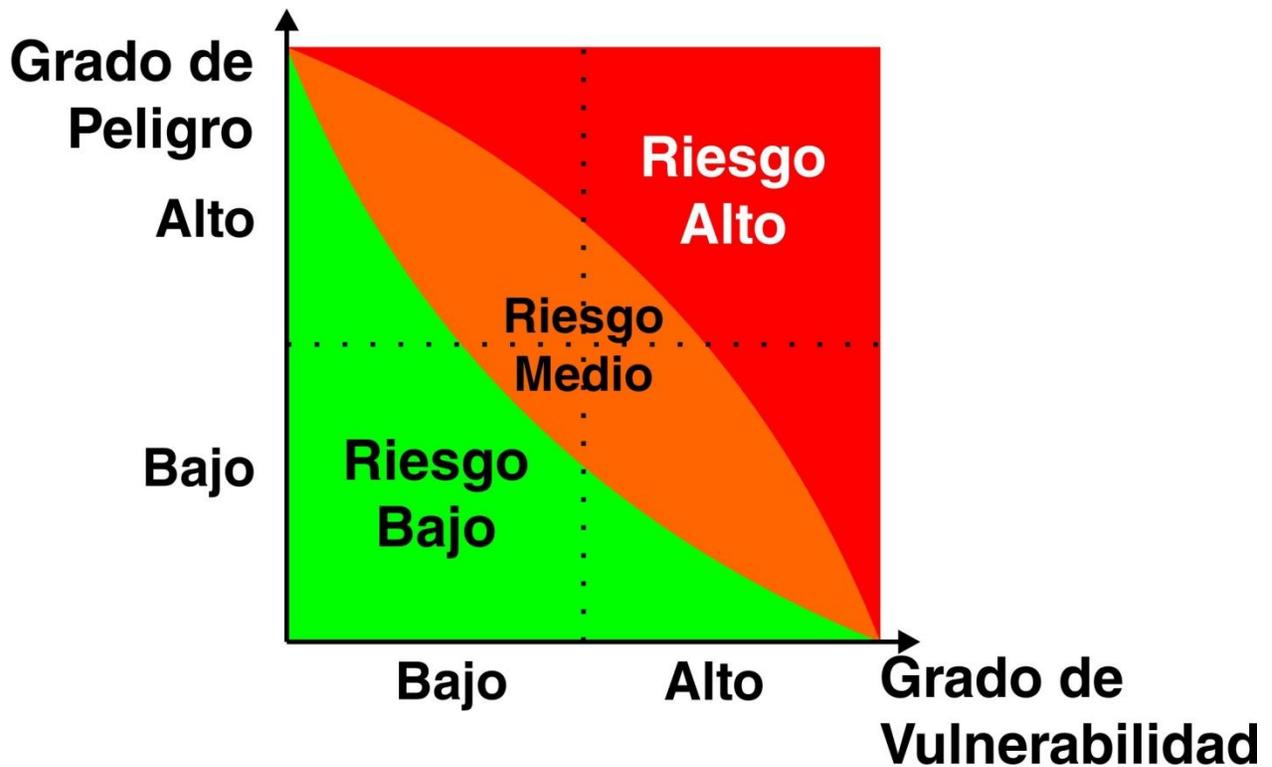
La vulnerabilidad tiene su origen en un diseño deficiente y/o a la exposición del sistema a las presiones dinámicas que están presentes en el entorno. La vulnerabilidad es aprovechada por los peligros o amenazas, que son los factores adversos que se presentan durante el funcionamiento de los sistemas. Cuando el peligro tiene un origen natural y que constituye una amenaza para la vida humana, la propiedad y los sistemas, se le denomina peligro natural. (Keller & De Vecchio, 2012)

Cuando un peligro y una vulnerabilidad se conjuntan, entonces aparece el llamado riesgo. De esta forma, si un sistema es altamente vulnerable, pero no existe un peligro que pueda tomar ventaja de ello, entonces no existe el riesgo. Por el contrario, si existe un peligro muy grande que amenaza un sistema invulnerable, el peligro tampoco existe. (Threat Analysis Group, 2010)

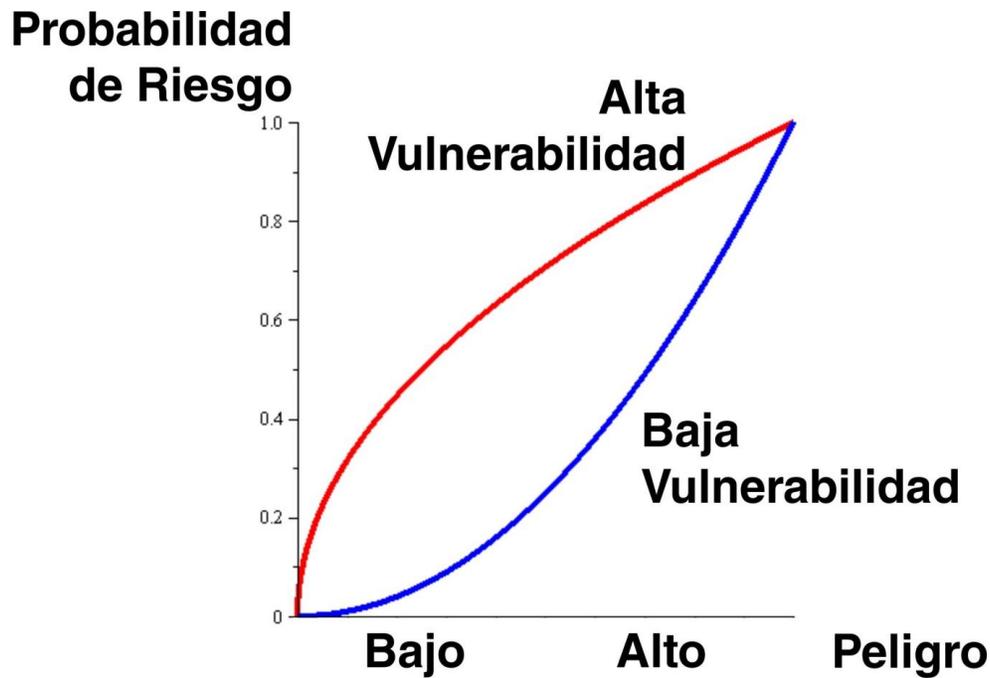
Sin embargo, los dos casos anteriores se presentan muy pocas veces en la realidad. Además, la comprensión de los riesgos sobre un sistema se maximiza a partir de la interacción entre estos dos fenómenos. Esto se puede representar mediante el siguiente diagrama:



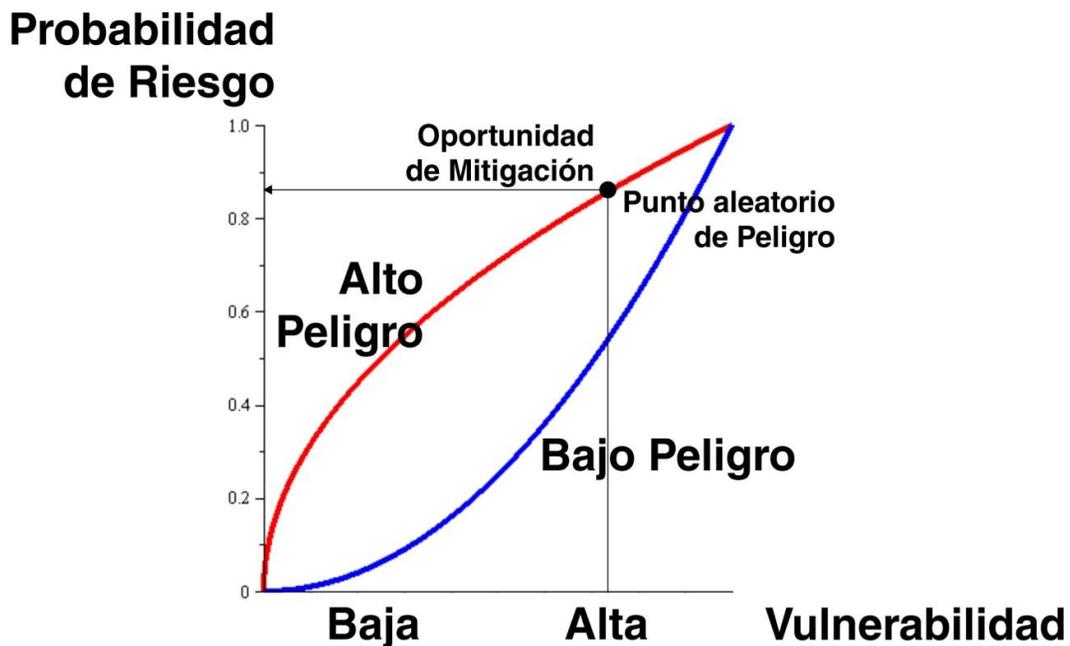
De forma conceptual y simplificada, se puede entender que tanto la vulnerabilidad como el peligro pueden ser bajos o altos. Estos grados de exposición de pueden manifestar en el siguiente cuadrante:



Ahora se presenta el esquema simplificado de correlación peligro vs probabilidad de riesgo, con alta y baja vulnerabilidad, respectivamente:



Asimismo se presenta el esquema simplificado de correlación vulnerabilidad vs probabilidad de riesgo, con peligro bajo y alto, respectivamente. Nótese que se localizó un punto aleatorio peligro, y se señaló la forma de mitigar el riesgo a partir de acciones para disminución de la vulnerabilidad.



Los peligros a los que está expuesta la infraestructura son recurrentemente de origen natural. Dichos peligros presentan un factor de riesgo generalmente constante, que debe ser mitigado disminuyendo la vulnerabilidad. Algunas acciones comunes para combatir la vulnerabilidad son la ejecución de obras de infraestructura (correctivas o de soporte en la mayoría de los casos), además de la contratación de seguros. (Keller & De Vecchio, 2012)

En caso de ocurrencia de un evento adverso, la probabilidad de riesgo se traducirá en un daño. En caso de que la vulnerabilidad y el impacto sean muy altos, al grado de que la recuperación del sistema tarde meses o años, se le conoce como catástrofe.

Si la vulnerabilidad y el impacto son todavía más altos, se dará el caso de que el sistema tenga efectos irreversibles y no se pueda recuperar, por lo que estará perdido o destruido.

## **La Vulnerabilidad de un Sistema Ingenieril en una Sociedad**

El manejo de la vulnerabilidad ha estado presente por milenios en ciudades, tribus, naciones, asociaciones y sistemas. El éxito operacional y de ingeniería depende fuertemente de la habilidad para identificar y remediar la vulnerabilidad que puede ser aprovechada.

Día tras día, aparecen nuevas vulnerabilidades en los sistemas, principalmente por el dinamismo de los mismos y el entorno en el que se encuentran. Existen factores tanto externo como internos que hacen que la seguridad sea una materia en cambio constante. El reto de cada sistema es mantener una red segura, abierta e interconectada.

El manejo de la vulnerabilidad es un proceso cíclico para identificar, clasificar, remediar y mitigar las vulnerabilidades. Tiene la función vital de fortalecer las defensas e identificar las debilidades de los sistemas, procesos y estrategias.

El manejo de riesgos identifica las condiciones o eventos a partir de los cuales pueden ocurrir pérdidas. Tiene las siguientes posibilidades:

- a. Aceptación o retención del riesgo, que es optar por hacer nada.
- b. Mitigación del riesgo, que es prevenir que suceda.
- c. Reducción del riesgo, que es reducir las consecuencias de las acciones emanadas del evento, como el aseguramiento de los bienes. (Foreman, 2010)

Cuando una vulnerabilidad se ha identificado, se pueden seguir los siguientes pasos:

- a. Realizar y revisar un reporte que identifique las vulnerabilidades críticas encontradas.
- b. Evaluar el grado de vulnerabilidad. Si es una vulnerabilidad crítica, se debe tratar como un incidente.
- c. Diseñar una estrategia para reducir en la forma más viable la vulnerabilidad.
- d. Remediar la vulnerabilidad.
- e. Revisar nuevamente el sistema y descartar nuevas vulnerabilidades. (Modarres, 2006)

También se tienen las siguientes consideraciones para el tratamiento de las vulnerabilidades:

- a. Priorización de vulnerabilidades: Las vulnerabilidades encontradas deben ser priorizadas. Ya que se pueden encontrar más vulnerabilidades de las que posiblemente puedan ser reparadas en un tiempo determinado y razonable, se necesita especificar cuáles serán atendidas primero. Es válido desarrollar prioridades de atención de vulnerabilidad.
- b. Valuación de los activos: Cada sistema es un activo. Tiene un valor dado, que puede ser utilizado en el proceso de evaluación de prioridades.
- c. Tiempos límite: Dependiendo de la severidad y tipo de vulnerabilidad, se deben usar límites de tiempo para remediar cada conjunto. Se debe considerar el riesgo basado en diferentes criterios. Dichos criterios deben tener un estándar de apoyo. (Threat Analysis Group, 2010)

A partir de los puntos anteriores, se puede inferir que las medidas para gestionar y reducir la vulnerabilidad se basan en recomendaciones e implementaciones sobre prácticas establecidas, el análisis de políticas actuales y la revisión de planes, sistemas e infraestructuras ya existentes.

En el caso de la vulnerabilidad que tiene una población que es parte de un sistema de infraestructura, cabe destacar que las personas no se moverán a una ubicación más segura, y evitarán en lo posible evacuar sus viviendas, aún cuando les sea ordenado hacerlo. La vulnerabilidad está alojada en la complejidad que caracteriza a la relación sistema-sociedad y los procesos inherentes a la misma. Los desastres resultan de la inadaptación de los sistemas, la sociedad humana, los entornos ya existentes y el mundo físico.

De acuerdo con Blaikie, los paradigmas actualmente dominantes son:

1. Los eventos extremos son las causas dominantes de desastre. Los eventos extremos y naturales que ocurren en la naturaleza son externos a la sociedad.
2. Los desastres son accidentes o eventos aislados. Los desastres operan fuera de la historia humana y se distribuyen en el flujo normal del tiempo.
3. La ciencia y la tecnología son los principales medios disponibles para atender los desastres naturales.
4. Las personas ya han sido instruidas y guiadas para actuar reactivamente ante los riesgos.
5. Los resultados han sido las fallas en las condiciones de los sistemas, con influencia de factores económicos, políticos y sociales que son agentes de vulnerabilidad. (Blaikie, Cannon, Davis, & Wisner, 1994)

De acuerdo con la International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies, los desastres son la primera y por mucho, la mayor amenaza al desarrollo, específicamente al desarrollo de los países más pobres y marginados. La relación entre vulnerabilidad de desastre y desarrollo es complicada. Los desastres son considerados frecuentemente como desviaciones o interrupciones del desarrollo de una actividad normal. (United Nations Development Programme, 2004)

Para reducir la vulnerabilidad ante desastre, se deben considerar tanto los impactos de riesgos naturales como los esfuerzos para contrarrestarlos. La pérdida de infraestructura - puentes, caminos, líneas de comunicación, y fuentes de energía- y la pérdida de personas - muerte, discapacidad y migración- pueden tener efectos devastadores en el desarrollo social y económico en los aspectos locales, regionales y nacionales.

El impacto que el desarrollo puede tener en la vulnerabilidad ante desastres es extremadamente importante. Hay muchas formas en las que el desarrollo puede incrementar la vulnerabilidad ante desastre, especialmente fallando en incorporar la planificación ante peligros en las estrategias de desarrollo. En las áreas que son proclives a ciertos peligros, los impactos pueden ser mitigados si se ataca la relación vulnerabilidad-riesgo con desarrollo.

Uno de los valores fundamentales para atender integralmente la vulnerabilidad, es el desarrollo de sistemas sustentables, que tengan una importante incidencia de los capitales

humano, social, físico, financiero y natural. De ahí que se pueda inferir que la resiliencia tiene una alta correlación con la sustentabilidad.

Asimismo, se debe introducir el ciclo de vida de los desastres, que consta de las siguientes fases:

1. Aviso / Evacuación / Respuesta – Estos conceptos pertenecen a la fase que se conoce como de prevención y preparación. Por ejemplo, los peligros como los terremotos no permiten una amplia fase de aviso y alerta. Se tienen apenas unas pocas opciones de evacuación. En cambio, los peligros como los huracanes tienen fases de alertas de larga duración que ofrecen oportunidades de protección previa al impacto.
2. Impactos – La parte más vulnerable de los sistemas es la que tiende a fallar. En una sociedad, el sector más vulnerable de la población es generalmente el que tiene menores recursos económicos. Las pérdidas de la parte más vulnerable de los sistemas son proporcionalmente altísimas.
3. Recuperación en el corto y mediano plazo – Los retos más importantes se encuentran en la fase de recuperación del desastre. Cuando sucede un impacto, la vulnerabilidad se dispara en función de las estructuras más frágiles. Ellas tendrán más dificultad para conjuntar los recursos necesarios de recuperación. (Faulkner, 2001) (Qualys, 2008)

La toma de decisiones es un factor determinante que influye sobre el grado de vulnerabilidad. Los eventos naturales como huracanes, incendios, tornados y sismos son inevitables, pero los impactos devastadores que se presentan a partir de ellos son el resultado de las relaciones entre los valores y los sistemas que forman parte de una comunidad.

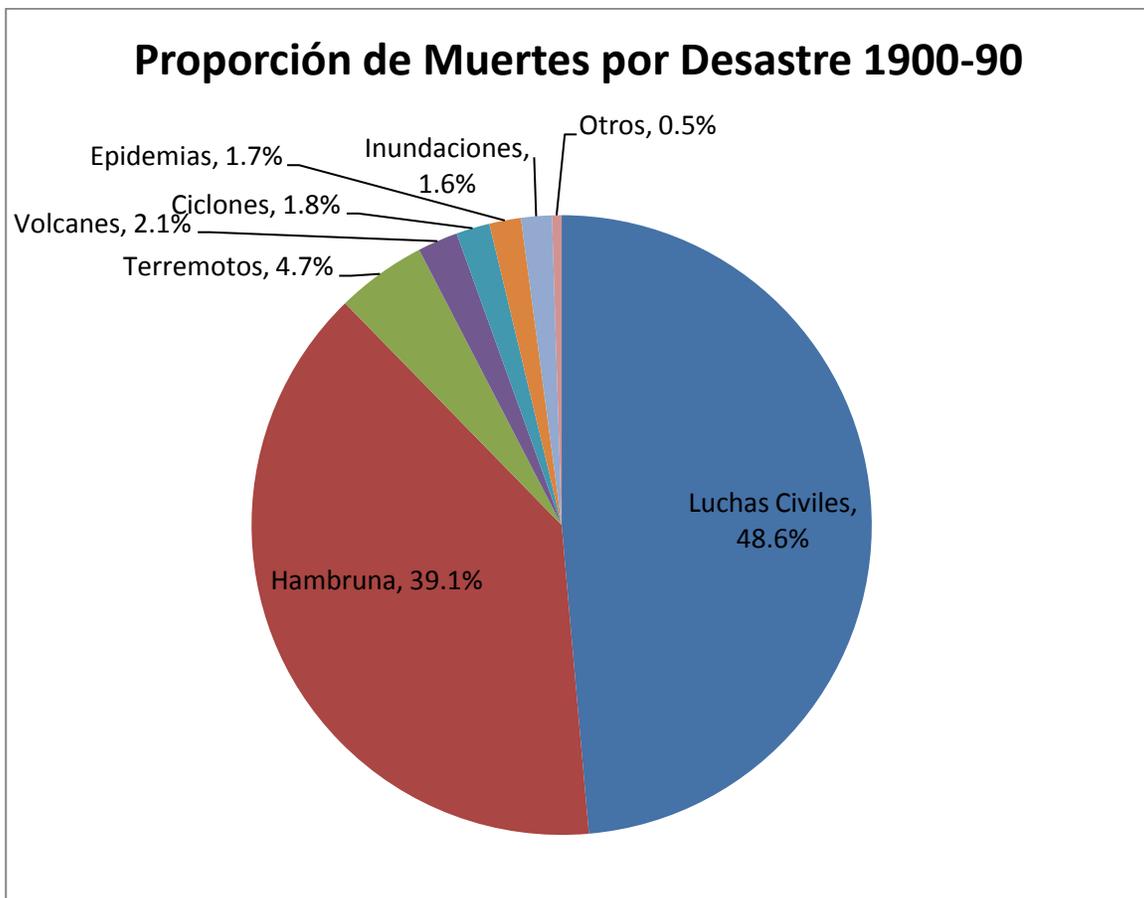
El grado de vulnerabilidad también se puede describir por capas, destacándose los siguientes niveles:

1. Espacio físico y asentamientos humanos
2. Sistemas y estructuras creadas por los humanos
3. Población, grupos de personas y organizaciones de la sociedad (Blaikie, Cannon, Davis, & Wisner, 1994)

## Los Peligros Naturales que impactan en un Sistema

Los desastres, a pesar de su reputación letal, no son la amenaza más grande para la humanidad. Ocasionalmente los terremotos matan a cientos de miles y ocasionalmente las inundaciones matan a millones. El análisis de los desastres permite mostrar cómo los riesgos que involucran deben ser correlacionados con la vulnerabilidad que está presente en todos los sistemas.

Según Disaster History: Significant data on major disasters worldwide, la proporción de muertes a partir de desastres entre 1900-90 fue así: (United States Foreign Assistance, 1990)



Las personas viven en una situación económica adversa que les lleva a vivir en partes inhabitables del mundo. Las principales partes inhabitables son afectadas generalmente por planicies con ríos que se desbordan, faldas de volcanes, o zonas de alta sismicidad. De ahí que muchos desastres son percibidos como una mezcla compleja de los peligros de la naturaleza y acciones humanas en el diseño de los sistemas. (Blaikie, Cannon, Davis, & Wisner, 1994)

Los peligros se identifican a partir de procesos internos y externos. En el caso de los peligros naturales, un proceso se refiere a los eventos físicos, químicos, y biológicos que afectan la superficie terrestre.

Un peligro natural es el proceso natural en el que un evento es una potencial amenaza para la vida humana y la propiedad. Los procesos o eventos no son en sí mismo un peligro, pero se convierten en uno conforme el uso que le dan los seres humanos a la tierra.

Un desastre es un evento peligroso que ocurre en un periodo de tiempo limitado sobre un área definida. Los criterios para definir un desastre son a partir de la ocurrencia de cualquiera de los siguientes:

- a) Más de 10 fallecidos o
- b) 100 o más personas afectadas o
- c) Declaración de estado de emergencia o
- d) Solicitud de asistencia internacional. (Blaikie, Cannon, Davis, & Wisner, 1994)

Una catástrofe es un desastre masivo que requiere una inversión significativa de dinero por un largo periodo de tiempo para permitir la recuperación de la zona afectada.

Las pérdidas causadas por desastres son del orden de 80 mil personas por año. Las pérdidas financieras exceden los 50 mil millones de dólares por año, sin contar las pérdidas sociales. (Blaikie, Cannon, Davis, & Wisner, 1994)

Los ciclos tectónico, de rocas, hidrológico y biogeoquímicos son los agentes por los cuales existen los riesgos naturales.

Históricamente, para el estudio de los peligros naturales, se asumieron las siguientes premisas:

- a) Los peligros pueden ser estudiados e identificados utilizando el método científico.
- b) El análisis de riesgos es un componente importante para entender los efectos de los procesos peligrosos.
- c) Los procesos peligrosos son la vinculación entre diferentes peligros naturales, los sistemas (con su inherente vulnerabilidad) y los entornos (el principal es el ambiente físico)

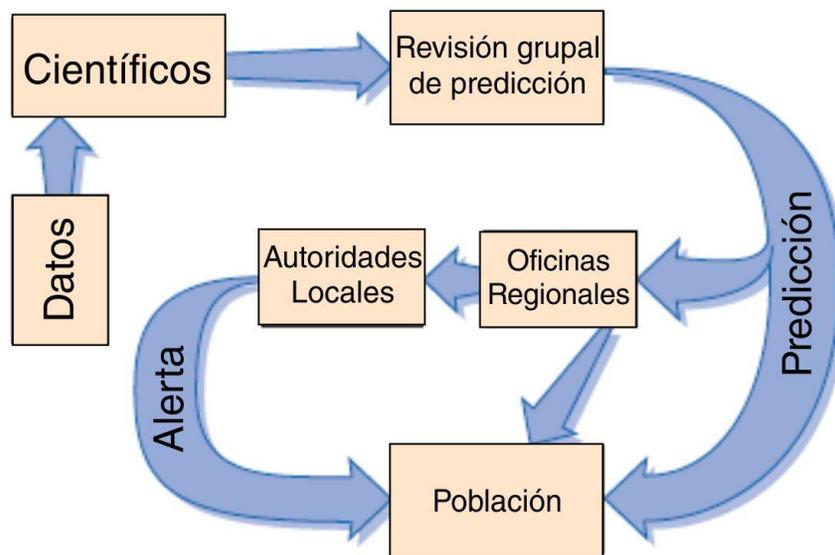
- d) Los eventos peligrosos que han producido desastres con anterioridad, están ahora produciendo catástrofes.
- e) Las consecuencias de los peligros pueden ser minimizadas. (Keller & De Vecchio, 2012)

Para realizar los estudios encaminados a la comprensión de los peligros naturales del sistema, se desarrollaron modelos de pronóstico, predicción y alerta de eventos peligrosos. Por un lado, la predicción de un evento peligroso involucra especificar la fecha, la hora y el tamaño del evento. Debido a que esto no es del todo viable y certero, se recurrió a los pronósticos. El pronóstico de un evento contempla un rango de certidumbre, en el que se predice dónde y qué tan frecuentemente se presenta un evento particular.

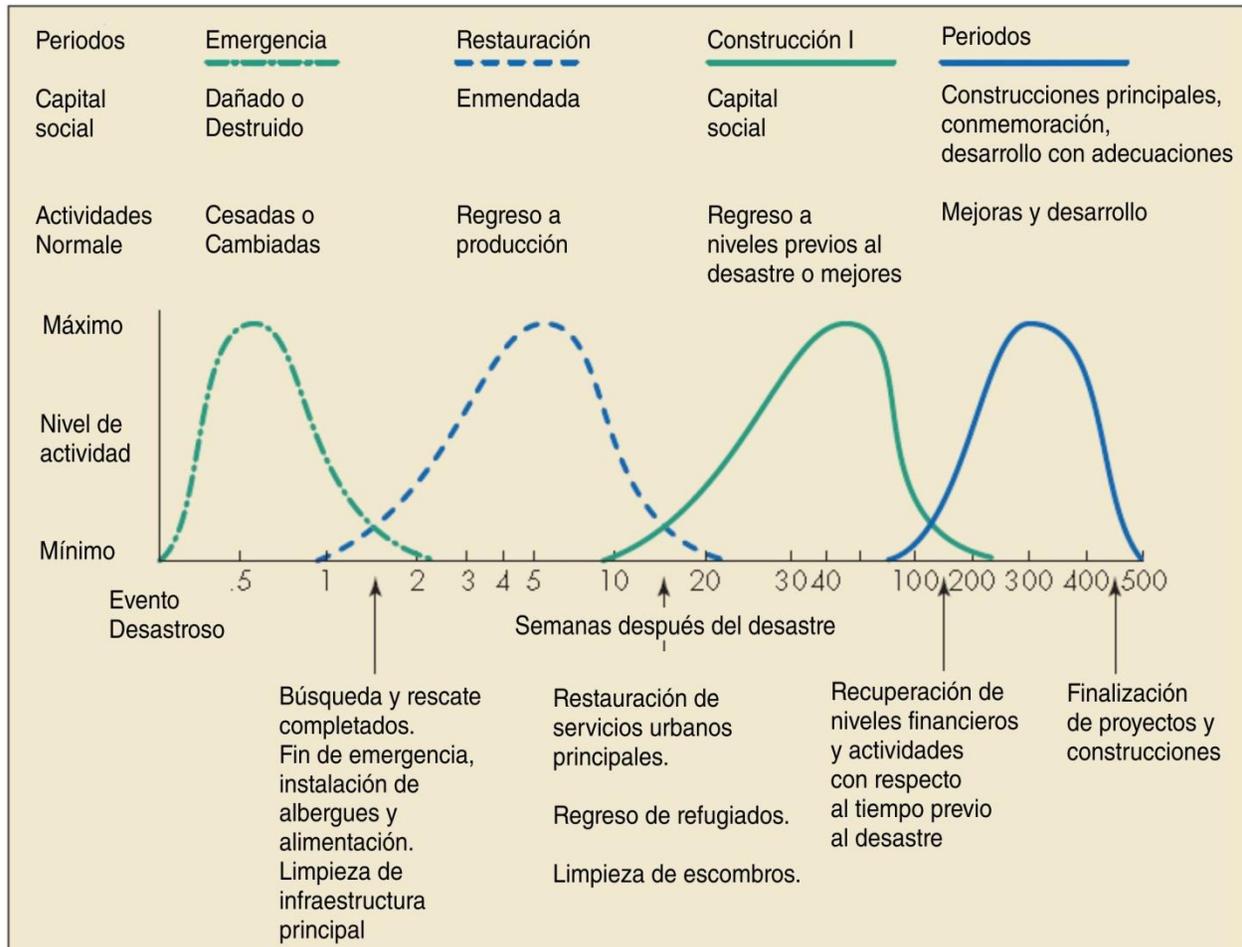
Los efectos de los eventos peligrosos pueden ser reducidos si se pueden pronosticar, predecir en cierto grado, y emitir una alerta. Esto incluye los siguientes elementos:

- a) Identificar la localización posible y probable donde se podría presentar el evento
- b) Determinar la probabilidad de que un evento de cierta magnitud ocurra
- c) Observar los eventos que sean precursores
- d) Pronosticar o predecir el evento
- e) Alertar a los habitantes involucrados

El sistema se puede esquematizar de la siguiente manera:■



El impacto de un evento peligroso es en parte una función de su magnitud (o cantidad de energía liberada) y la frecuencia (el intervalo entre ocurrencias). El impacto también está influenciado por el clima, la geología, la vegetación, la población y el uso de suelo. A partir de la aparición de un evento de desastre, se encuentran las fases de emergencia, restauración y dos fases de reconstrucción. Esto se explica en el siguiente diagrama: (Keller & De Vecchio, 2012)



## Funcionamiento y Rendimiento del Sistema

Para asegurar la fiabilidad en el funcionamiento de los sistemas, es necesario introducir las interconexiones, o conexiones recíprocas, presentes en los sistemas. En este contexto, dos o más entidades pueden intercambiar funciones, recursos, ideas, información, divisas, y otros bienes valiosos entre ellos, beneficiándose a partir del proceso. A través del tiempo, estas interconexiones se fortalecen o decaen, dependiendo de los beneficios adquiridos a través de la interconectividad. Si la relación se fortalece significativamente, la condición de interdependencia en el sistema emerge. En este contexto, las entidades involucradas requieren de una operación

fidedigna entre sus partes para funcionar adecuadamente. Si la relación se enfría significativamente, las conexiones se pueden perder.

De acuerdo con el informe White House & Critical Infrastructures, los retos y las incertidumbres presentadas por nodos críticos y puntos simples de falla dentro de las infraestructuras, así como el incremento de interdependencias que existen entre varios sectores de infraestructura, nacionales e internacionales, son difíciles de identificar y resolver, pues existen efectos tipo cascada y en sectores interconectados que llevan a la interrupción del sistema. (Congressional Research Service, 2003, 2011)

El problema más notorio de estos niveles de interdependencia es el potencial de falla por cascada entre sistemas mutuamente dependientes. Esta falla ocurre cuando un evento que desencadena un colapso produce una serie de fallas secundarias en infraestructuras interdependientes. Cada alteración del sistema crítico de infraestructura debe ser evaluada, de forma que los sistemas ingenieriles puedan ser mantenidos dentro de una operación continua. Los resultados de estas evaluaciones deben ser usados para fortalecer o proteger los sistemas, planear y construir otros más nuevos, que conlleven a una infraestructura más resiliente, motivando nuevas políticas públicas acerca de la infraestructura crítica y su rendimiento esperado, ayudando al desarrollo de planes de mitigación de riesgos.

Las funciones sociales son altamente dependientes de sistemas interconectados. Hasta las funciones más básicas requieren de una interactividad importante entre los sistemas. La infraestructura crítica está integrada por los sistemas de telecomunicaciones, de abastecimiento eléctrico, de gas y petróleo, de transporte, de bancos y financiamiento, de abastecimiento de agua, de emergencia (médico, policía, fuego y rescate), y de continuidad en el gobierno. Un grupo de activos clave está conformado por los monumentos e íconos nacionales, plantas nucleares, plantas hidroeléctricas, facilidades gubernamentales y activos comerciales clave. (Congressional Research Service, 2003, 2011)

Todos estos activos tienen una importante participación ingenieril. Así como ningún sistema o activo es individualmente más importante que el otro, la naturaleza de interdependencia para lograr la funcionalidad es una preocupación constante. Si un sistema ha sido interrumpido, existe un potencial importante de fallas secundarias en infraestructuras dependientes. Por ello existe una fuerte necesidad de medir y monitorear el potencial de vulnerabilidades de los sistemas de infraestructura.

La habilidad para modelar efectos en el funcionamiento de la infraestructura es un aspecto crucial en el diseño de las redes, la planeación encaminada a recuperación ante desastre, la identificación de infraestructuras críticas y el fortalecimiento de las mismas. Dada la presencia masiva de redes en el mundo industrializado, es importante tener un espectro de técnicas capaz de identificar las vulnerabilidades potenciales en una red de elementos, y las debilidades sistémicas para proteger y/o fortalecerlo.

La fiabilidad es especialmente importante cuando se examina la habilidad de la infraestructura crítica para continuar su operación ante la adversidad. Se define como la probabilidad de que un elemento de un sistema crítico de infraestructura pueda funcionar en cualquier momento dado. Por tanto, es la medición de la probabilidad de que los elementos no fallen o mal funcionen, dada una serie de líneas guía de desempeño. (Blaikie, Cannon, Davis, & Wisner, 1994)

La vulnerabilidad se enfoca en el potencial de interrupción o degradación de los elementos que permiten la operación de una infraestructura, de forma que el rendimiento se ve disminuido. El hecho de que aparezca un evento adverso, hace al sistema más vulnerable y lo encamina hacia la interrupción de operación. Por ello, la fiabilidad y la vulnerabilidad son importantes para garantizar las operaciones críticas de un sistema de infraestructura.

Se debe evaluar continuamente cada infraestructura crítica basada en redes, evitando que los elementos de la red –nodos o conexiones- sean deshabilitadas, intencional o accidentalmente, deteniendo el flujo de los bienes o servicios de valor a través de la red.

Las diferentes fallas, accidentales o intencionales de la infraestructura, son un problema más creciente y complejo cada día. La seguridad de la infraestructura es un problema global, pues todas las naciones son dependientes de infraestructura. Las naciones se enfrentan a la responsabilidad de asegurar su infraestructura.

Los principales problemas de la infraestructura y la seguridad son:

- a) Las infraestructuras son interdependientes de la fiabilidad de otros sistemas;
- b) Las infraestructuras son gigantescas, dinámicas, no están sincronizadas, y complejas;
- c) Compartir información acerca de las vulnerabilidades de infraestructura es una acción omitida dentro de lo posible, pues existen miedos sobre la

regulación, la confidencialidad de la información y la competencia entre actores.

A pesar del conocimiento de estos conceptos, los desastres siguen sucediendo, con impactos mayores a los previstos o imaginados. Es por ello que la Ingeniería de Resiliencia plantea nuevos paradigmas para lidiar con estos fenómenos.

# La Resiliencia y la Ingeniería de Resiliencia para la disminución de la vulnerabilidad de los sistemas

---

## La Resiliencia nace del ser humano

Un sistema se conforma por miembros, partes y componentes independientes que forman un conjunto integrado como un todo. Existen diferentes relaciones entre estos miembros, que generalmente conjuntan un factor común como:

1. Estructura, que es definida por los elementos componentes y su composición,
2. Conducta, que se relaciona con entradas, procesos y salidas de material, momentum, o información,
3. Interconexión entre varias parte del sistema, con estructura interrelacionadas,
4. Funciones o grupos de funciones.

Un sistema, al ser creado por el ser humano, tiene características que fueron impresas por su diseñador. Muchas veces son extensivas del ser humano, especialmente en el plano de la conducta, aunque también en la estructura, las interconexiones o las funciones. Por tanto, los sistemas diseñados por el hombre, replican actitudes y conductas que forman parte de la psicología del ser humano.

La idea de la resiliencia psicológica del ser humano se comenzó a concebir en la década de los 70's y fue ampliada en la década de los 80's. Esta idea se refiere a la tendencia de un individuo para lidiar con estrés y adversidad. Ante un caso de desgracia, infortunio o fatalidad, un individuo puede:

1. Tener afectaciones posteriores que le inhiban de regresar a su estado previo –de funcionamiento normal-, o
2. Reaccionar regresando a su estado previo –de funcionamiento normal-, o
3. Utilizar la experiencia de exposición a la adversidad para producir un efecto fortalecedor, y funcionar en una mejor forma que en su estado previo.  
(Zuckerfeld, 2005)

Con ello, se debe entender que la resiliencia psicológica es un proceso y no una característica de un individuo. Además, el estado contrario a la resiliencia es la vulnerabilidad.

La resiliencia se define “como la capacidad humana de enfrentar, sobreponerse y ser fortalecido o transformado por las experiencias de adversidad.” (Grotberg, 2001). También se entiende como “el proceso o la capacidad para desarrollar una adaptación exitosa en circunstancias asociadas con disfunción psicológica y baja competencia. (Rutter, 1985) Y finalmente como “la capacidad de un sujeto para superar circunstancias de especial dificultad, gracias a sus cualidades mentales de conducta y de adaptación.” (Kreiser, 1996)

En pocas palabras, resiliencia es recuperarse de una enfermedad, un trauma o un estrés. (Zuckerfeld, 2005)

El término ha ido evolucionando, de una consideración genética a un proceso que los seres humanos pueden ejecutar en su vida. “Si es resiliente significa que se arregla muy bien con sus propios recursos.” Por tanto, una persona que vive este proceso “ya no sólo ‘carece’ y se ‘enferma’ sino que es capaz de buscar sus propios recursos y salir fortalecido de la adversidad.”

Se identifican:

1. Factores resilientes, que giran alrededor de la interacción entre el “Yo soy”, “Yo estoy”, “Yo tengo” y “Yo puedo”.
2. Resultados resilientes, como el incremento del bienestar, aprendizaje de la experiencia y estimación de impacto sobre otros.
3. Pilares de la resiliencia, que son atributos para promover programas de salud, como introspección, independencia, iniciativa, humor, capacidad de relacionarse, creatividad y moralidad.

Con una importante participación del psicoanálisis freudiano, se identifican los siguientes tipos de adversidad:

1. Cuerpo
  - a. Enfermedades graves, crónicas y/o enigmáticas
  - b. Accidentes severos y discapacidades
2. Mundo Externo
  - a. Catástrofes naturales como incendios, inundaciones y terremotos

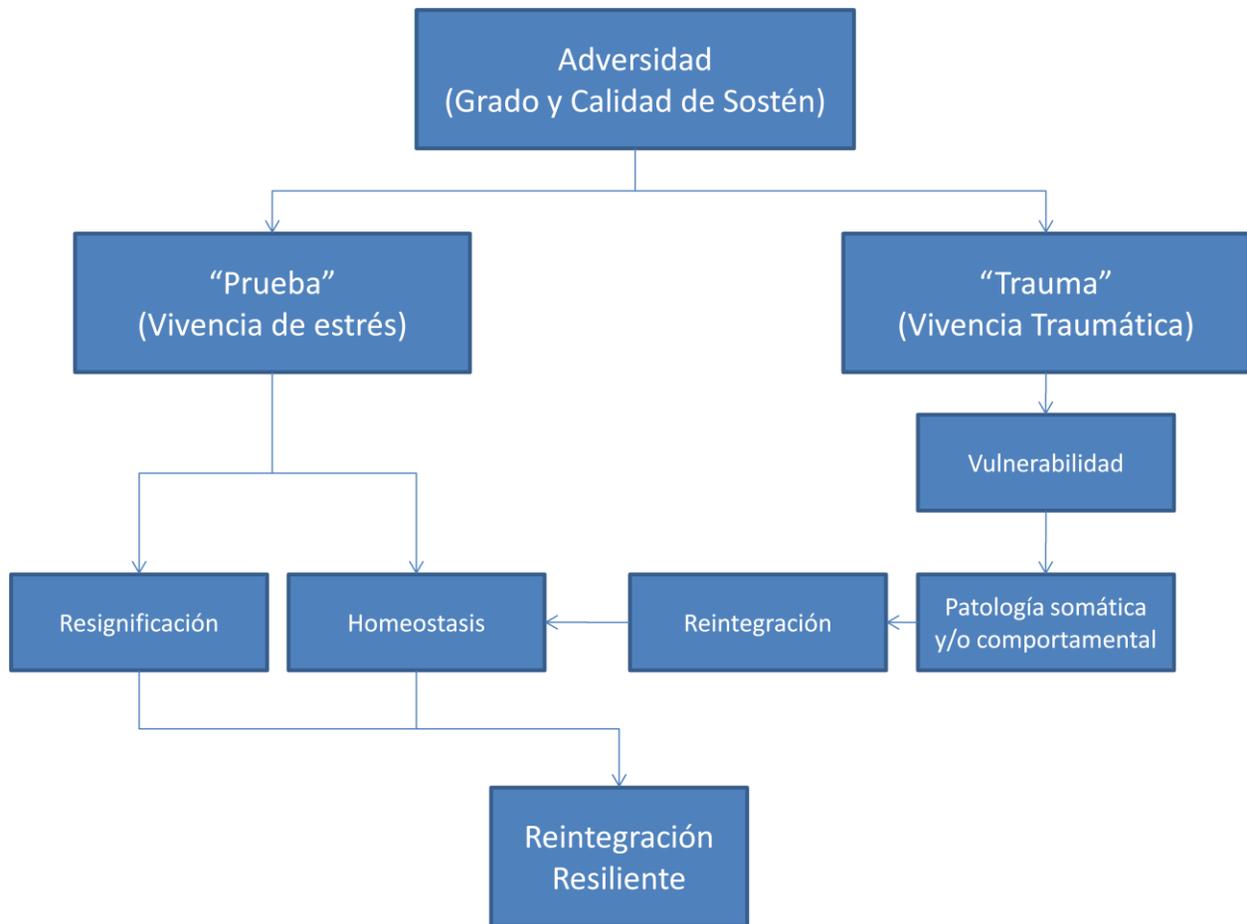
- b. Alteraciones del medio ambiente como la contaminación
3. Vínculos
- a. Personales
    - i. Como divorcios y la violencia familiar
    - ii. Como los abusos, el maltrato y la violación
  - b. Sociales
    - i. Delimitados
      - 1. Como las dictaduras, guerras y crisis económicas
      - 2. Como el terrorismo de estado, los campos de concentración y las torturas
      - 3. Como secuestros, robos y asesinatos
    - ii. Persistentes
      - 1. Como pobreza, desempleo, analfabetismo y exclusión social
      - 2. Como discriminación y migración (Zuckerfeld, 2005)

Se asocia la aceptación a la resiliencia, desarrollando una metodología para ayudar al paciente a encontrar en sí mismo una fuerza interior y desarrollar aptitudes para enfrentar su enfermedad. La antítesis de la aceptación es la resignación, que enfrenta las adversidades con actitud pasiva y un estilo depresivo que no permite poner en juego capacidades y habilidades para sobrellevar el status quo del individuo. Por tanto, se volverá dependiente y sometido a su enfermedad.

Un impulsor de la resiliencia debe ser un tutor, que es aquella persona, lugar, acontecimiento, objeto u obra que provoca un renacer del desarrollo psicológico tras el trauma.

La resiliencia psicológica es entonces subvertir la idea de causalidad que gobierna el pensamiento positivista, introduciendo el azar –para introducir en el sujeto valoraciones y crear sentidos a su vida-, pasando de una víctima pasiva de sus circunstancias a un sujeto activo de su experiencia.

Los psicólogos desarrolladores de la tesis de la resiliencia han definido el proceso de la resiliencia en un esquema como el que sigue: (Zuckerfeld, 2005)



## Ingeniería de Resiliencia

### Introducción

El mundo está marcado por recursos finitos, incertidumbre irreductible, y objetivos múltiples que recurrentemente conflictúan entre sí. (Modarres, 2006) Por ello, la seguridad se desarrolla más pensando en las barreras de desarrollo que en los procesos resilientes. Estas barreras están marcadas por la complejidad de los sistemas ingenieriles, que se caracterizan por estar interconectados, ser no lineales, distribuidos geográficamente y por ser costosos.

Las consecuencias en las fallas de dichos sistemas son excesivamente dañinas y destructivas hacia los humanos, el medio ambiente y la economía. Estas fallas son inevitables, especialmente debido a las limitaciones regulatorias en materia de seguridad, salud y medio ambiente. (Blaikie, Cannon, Davis, & Wisner, 1994)

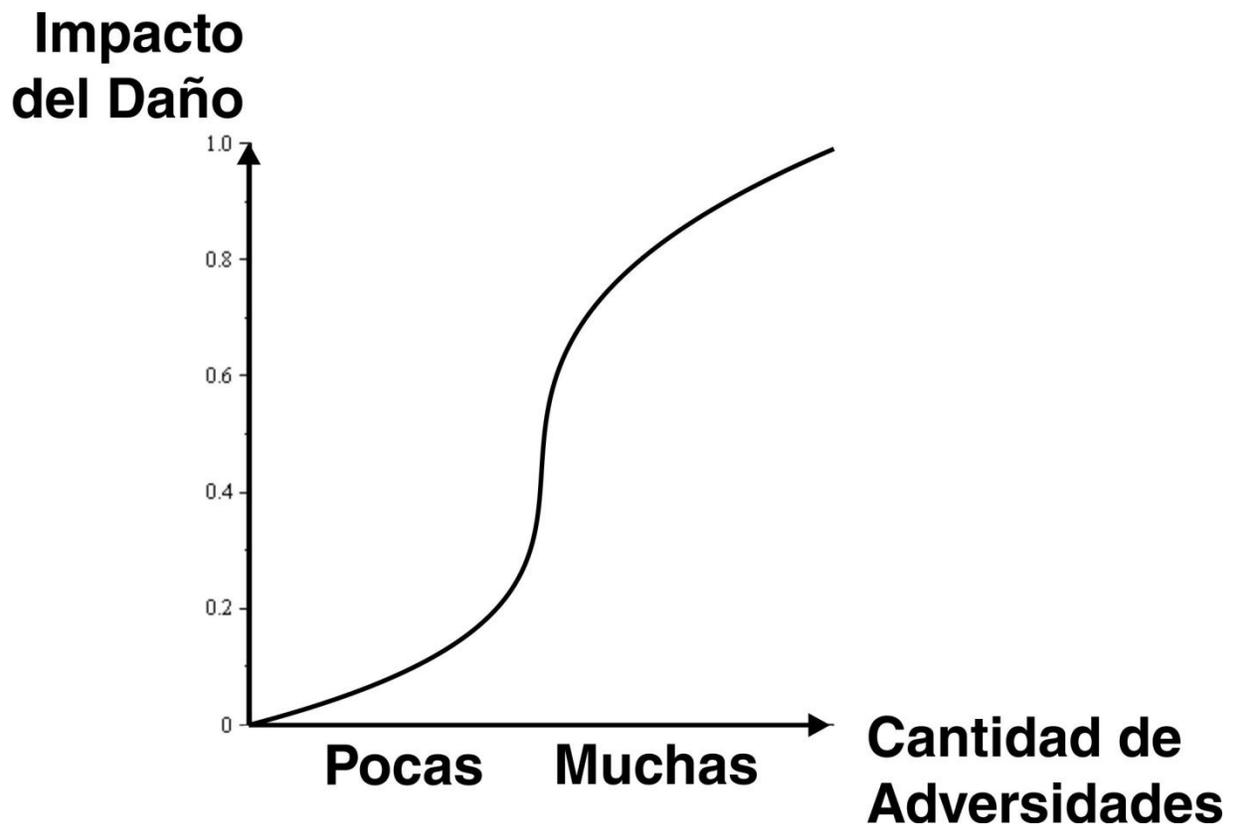
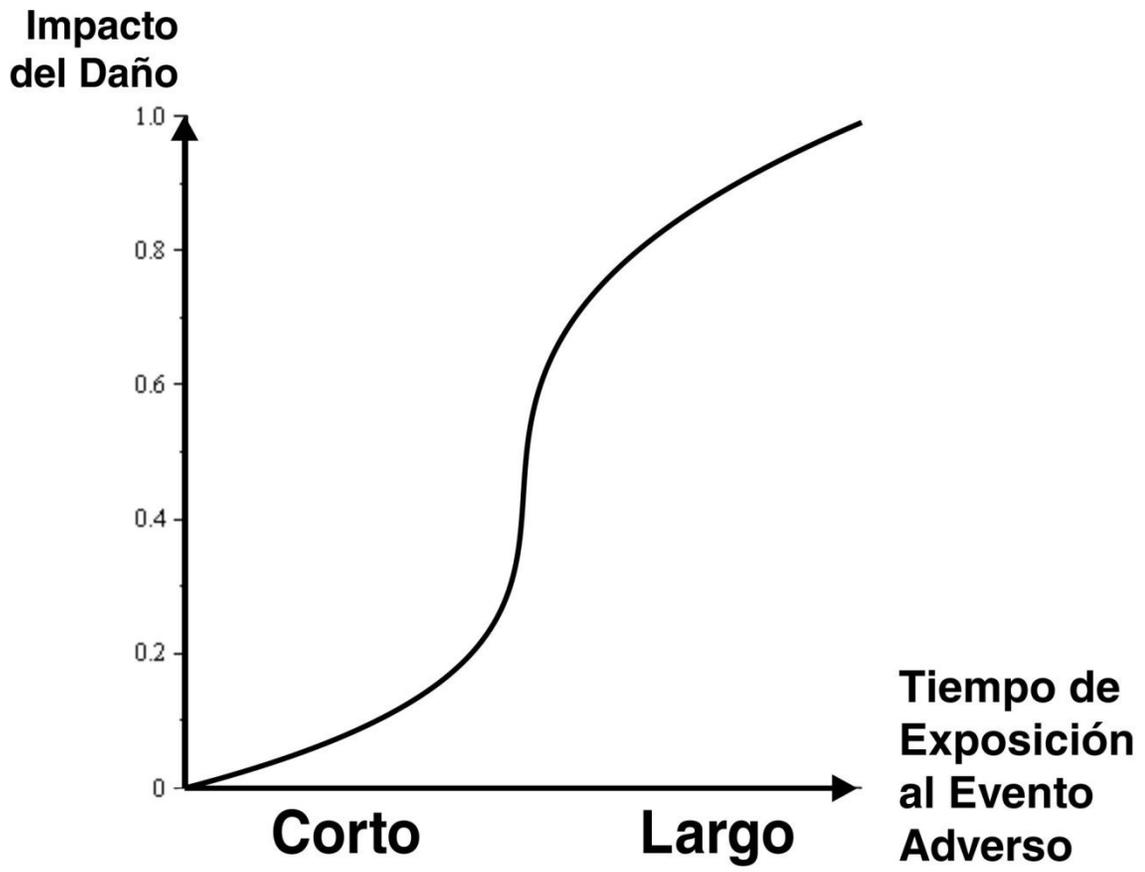
A partir de la revisión de diversos desastres que han ocurrido con anterioridad, se han encontrado dos consideraciones fundamentales:

- a) Los desastres no ocurren solos, ya que desencadenan una serie de fenómenos que complican el panorama inicial rápidamente y en formas que difícilmente podían ser anticipadas con anterioridad.
- b) La duración del periodo de tiempo de exposición a estos eventos adversos magnifica exponencialmente los impactos de los fenómenos descritos.

A partir de las consideraciones antes expuestas y de forma matemática, se puede entender que el impacto del daño es función se puede comprender de la siguiente forma: (Figuroa Palacios, 2011, 2012)

$$\text{Impacto} = f(\text{Peligro}, \text{Vulnerabilidad}, \\ \text{Tiempo de Exposición durante Evento}, \text{Número/Cantidad de Adversidades})$$

Estas consideraciones se podrían entender observando las siguientes gráficas conceptuales:



Al paso de varias décadas de esfuerzos encaminados a desarrollar lo que es y debería ser la seguridad, se ha encontrado que la mayoría de los accidentes suceden más por una combinación de diferentes condiciones, antes que por el fallo de una sola función o componente del sistema. También se ha encontrado que el comportamiento de los mismos depende del grado control que tienen las personas sobre el sistema. En el funcionamiento de dicho entorno, se presentan variaciones en lo individual y como conjunto. (Hollnagel, Woods, & Leveson, Resilience Engineering: Concepts and precepts, 2006)

La Ingeniería de Resiliencia representa un enfoque innovador e integral para desarrollar y gestionar la seguridad de las obras de infraestructura. Este enfoque busca formas para controlar y mitigar dinámicamente los riesgos no lineales  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4 \dots \alpha_n$ , que se presentan durante la ejecución y la operación de la obra. (Modarres, 2006)

La Ingeniería de Resiliencia se ha convertido en una alternativa reconocida ante los enfoques tradicionales de la gestión de la seguridad. Mientras éstos se han orientado hacia los riesgos y las fallas que derivan en la degradación del rendimiento normal de un sistema, la Ingeniería de Resiliencia se enfoca en observar las fallas y éxitos del sistema como los dos resultados posibles de un mismo proceso. Esto al tiempo que existen diferentes resultados de cómo las personas y las organizaciones manejan ambientes parcialmente impredecibles, marcados por ser complejos y poco específicos.

El rendimiento normal de un sistema requiere de personas y organizaciones que en todo momento estén ajustando sus actividades para poder cubrir las condiciones adecuadas del espacio de trabajo, muchas veces sacrificando eficiencia y robustez, entre otras decisiones que deben tomar. Pero debido a que la información, los recursos, y el tiempo son siempre finitos, estos ajustes deben ser aproximados, por lo que el rendimiento es consecuentemente variable. Bajo condiciones normales, esto tiene pocas consecuencias. Pero conforme pasa el tiempo y los sistemas son más complejos, la variabilidad en el rendimiento o en su defecto, su estaticidad, se pueden combinar en formas inesperadas, derivando en resultados no deseados.

### **El Porqué de la Resiliencia**

Se tiene que los éxitos, más allá de ser el resultado de una planeación detallada, también deben su ocurrencia a la combinación de ciertas condiciones. Cuando se piensa en lo general que los éxitos son el resultado de habilidades y competencias antes que de suerte, se tiene una visión tan parcial como si se comentara que los fallos se deben a incompetencia o

error. Muchos casos de éxito, y también de fracaso, no fueron ejecutados exactamente como se planearon.

En vista de todas estas situaciones de falla, emergió el concepto de resiliencia como la forma lógica de superar las limitaciones de los enfoques existentes de determinación y mitigación del riesgo, y el posterior desarrollo de sistemas de seguridad.

Los esfuerzos para mejorar la seguridad en los sistemas generalmente han estado dominados por la retrospectiva. Esto a partir de la investigación, y en menor proporción, de la práctica.

La investigación se ha desarrollado en Instituciones Académicas, más por motivos intelectuales que económicos. La investigación debería, por su naturaleza, observar los problemas más allá de sus necesidades prácticas inmediatas, y atender problemas en sus principios teóricos más elementales. También es una característica de la naturaleza humana tratar de comprender y dar sentido a lo que ha pasado, tratando de hacer el mundo percibido más comprensible. En general, nos preocupamos por el futuro, tomando demasiado en cuenta el pasado. (Hollnagel, Woods, & Leveson, Resilience Engineering: Concepts and precepts, 2006)

La práctica de la investigación generalmente es desarrollada a partir de eventos que han sucedido. Existe una motivación natural para prevenir la aparición de estos eventos, especialmente debido a pérdidas -humanas, materiales, financieras, entre otras-. En este sentido, abundan los términos de "error humano", "fallas en la organización", "cultura de la seguridad", entre otros.

El principio general es el de cambiar únicamente lo necesario para explicar los nuevos desafíos que aparecieron a partir de un evento. En cambio, la Ingeniería de Resiliencia trata de adelantarse a este principio al proponer el desarrollo de una nueva forma de comprender y desarrollar la seguridad.

Tradicionalmente, el paradigma dominante de la seguridad estaba basado en la búsqueda de caminos para limitar o eliminar los errores humanos. Ello se denominó "sistemas seguros". En la mayoría de los casos, la seguridad se basó en demostraciones. Dicha seguridad podría ser mantenida a partir de acciones humanas de los actores que siguieran las normas y procedimientos prescritos.

A partir este paradigma, el error se podía haber categorizado y medido. Por ello, se ha exigido una gran cantidad de datos para tabular los errores y extrapolar las situaciones futuras. Esto derivó en que el ser humano fue percibido como la parte del sistema que disminuye el rendimiento, por lo que se debía minimizar el contacto con el 'poco fidedigno, errático y limitado humano'. Entonces se comenzó a examinar las fallas en los sistemas complejos.

Se encontró que en situaciones límite (cambios, abismos en el diseño de sistemas, o situaciones no planeadas), los seres humanos realizaron contribuciones positivas encaminadas hacia la seguridad. Algunos trabajos pioneros, que examinaron estas situaciones límite, fueron los de Hollnagel y de Rasmussen, ambos publicados en 1983. También se encontró que las descripciones formales de los sistemas, integradas por políticas, regulaciones, procedimientos, y tomar estaciones, fueron modelos incompletos desde el punto de vista de éxito y especialización.

Al compararse la teoría y la práctica, se encontró que los desarrolladores de los sistemas tuvieron grandes problemas para anticipar los caminos hacia la falla, además de crear y sostener estrategias de mitigación, y de mantener los márgenes con vista a incrementar la eficiencia del sistema ante presiones.

Las conclusiones más importantes fueron que:

- a) Los trabajadores y las organizaciones continuamente revisan sus enfoques de seguridad para continuar sensibles a una falla. Sin embargo, realizan cambios poco sustanciosos a los mismos.
- b) Los observadores, inclusive los trabajadores, apenas están parcialmente conscientes del potencial de falla del sistema.
- c) Las mejoras y cambios en los sistemas crearon nuevos caminos hacia la falla, además de crear nuevos problemas a los trabajadores, que tuvieron la necesidad no atendida de adquirir nuevas habilidades.
- d) Las estrategias para mitigar los caminos hacia la falla pueden ser, fuertes y resilientes, o débiles y erróneas.
- e) Una nueva cultura encaminada hacia el éxito en la seguridad, depende más de evitar medidas estáticas y de visión estrecha ante cambios que se presenten, que de crear sistemas únicamente hacia el éxito.
- f) Los desarrolladores de sistemas que pueden tener confianza en su trabajo son aquellos que han anticipado los tipos y mecanismos de falla, y creado estrategias

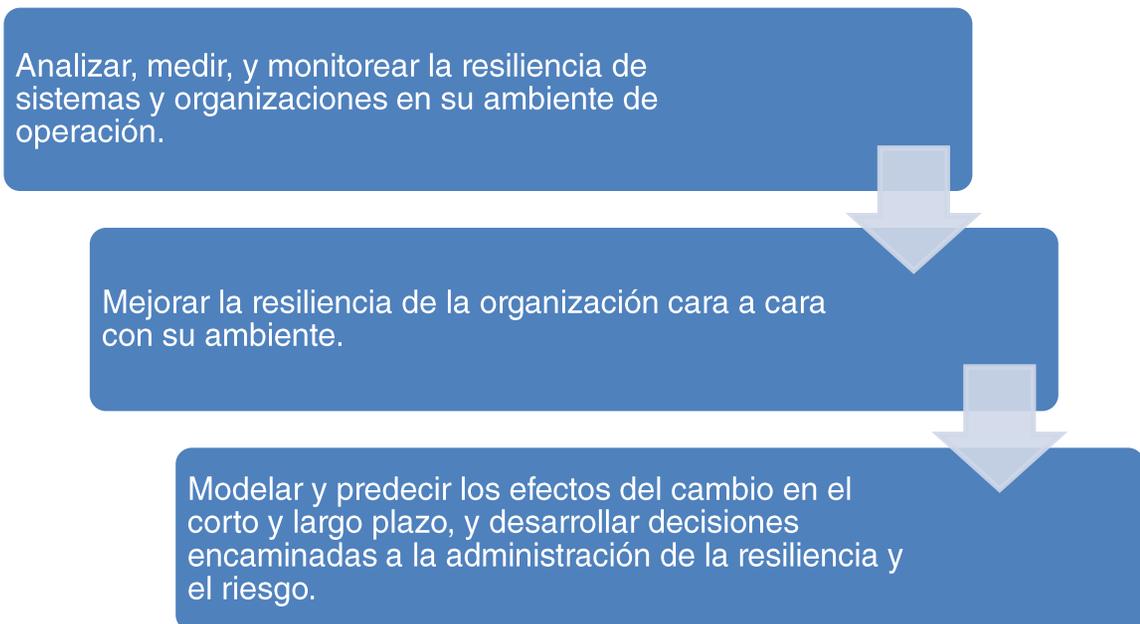
de mitigación que son efectivas a lo largo del tiempo y ante escenarios cambiantes.

- g) El esfuerzo continuo que tome en cuenta las presiones cambiantes y nuevas amenazas que actúan sobre un sistema es fundamental para crear la seguridad. (Hollnagel, Pariés, Woods, & Wreathall, 2011)

La Ingeniería de Resiliencia es un paradigma en la gestión de la seguridad que se enfoca en cómo las personas pueden sobrellevar la complejidad de un sistema bajo presión, de forma positiva y alcanzando el éxito.

En primer lugar se tiene que la resiliencia trata la seguridad como un proceso y como un valor. Por tanto, la seguridad se alcanza cuando los eventos negativos que se podrían presentar no suceden. El enfoque resiliente invierte recursos para anticipar cambios encaminados a la falla. Da por sentado que el sistema es imperfecto y que el ambiente cambia constantemente. Por tanto, la forma de medir la resiliencia se encuentra en las habilidades para crear una visión que anticipa el cambio en la forma del riesgo, antes de falla o de daño. (Woods, 2005)

Los pasos iniciales para desarrollar la Ingeniería de Resiliencia pasan por: (Hollnagel, Woods, & Leveson, Resilience Engineering: Concepts and precepts, 2006)



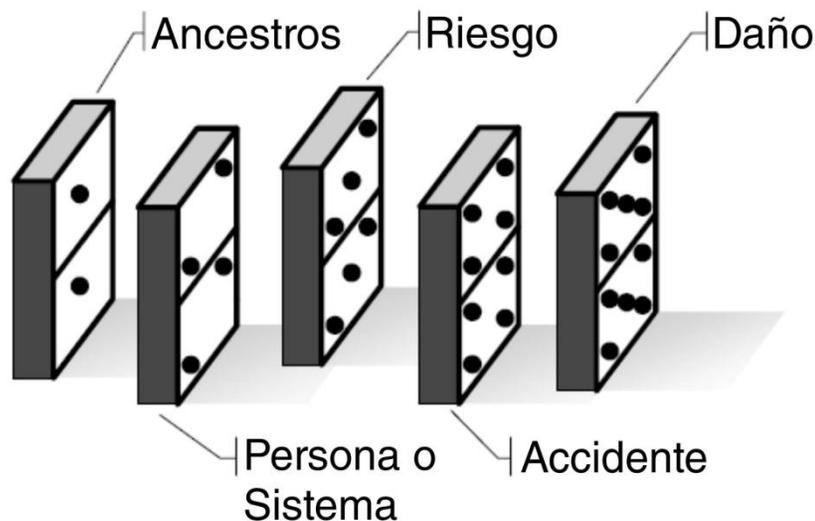
De acuerdo con la resiliencia, la seguridad entonces se puede expresar matemáticamente como: (Hollnagel, Pariés, Woods, & Wreathall, 2011)

$$Seguridad = \int_0^n d(\text{accidentes que no ocurren})$$

Mientras la investigación de accidentes se ha enfocado en entender el porqué ocurren dichos eventos, la investigación en seguridad debe enfocarse en los accidentes que no ocurrieron y entender su porqué.

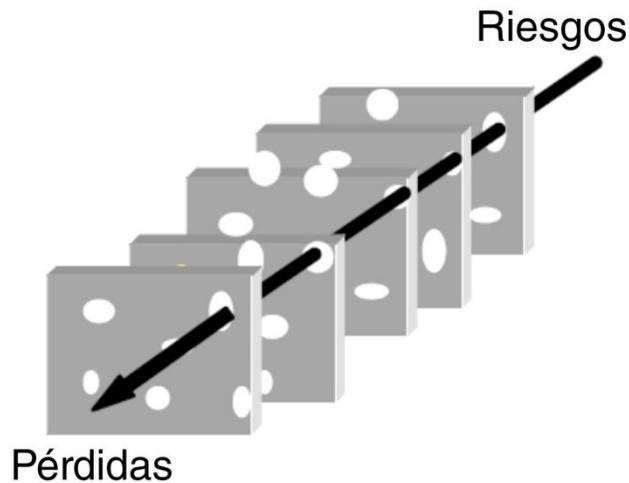
Al tiempo que ha habido avances significativos entendiendo el porqué corre los accidentes, no ha habido avances importantes en entender la forma adecuada para mitigar y reducir riesgos. Un sistema seguro se muestra impermeable y resiste a perturbaciones, por lo que la identificación de los riesgos es esencial. Por tanto, así como existe una etiología para estudiar las posibles causas de accidentes, caminos se necesita una etiología de la seguridad. Esto es, ¿qué es la seguridad? y ¿cómo se ve amenazada?

Por mucho tiempo, los accidentes explicaron de forma lineal, entendiéndose como un modelo de dominó el que existe una propagación lineal de una cadena de causas que libera efectos. Por tanto, se entiende como la alteración del sistema estable. Sin embargo, esto hizo creer que los accidentes tiene una causa directa, que puede ser encontrada simplemente revisando las etapas que lo precedieron. (Hollnagel, Woods, & Leveson, Resilience Engineering: Concepts and precepts, 2006)



Este modelo evolucionó hacia el llamado modelo de queso suizo, estructurado para modelos complejos lineales. De acuerdo con él, los accidentes pueden ser vistos como un resultado de interrelaciones entre actos inseguros realizados por los operadores de los

sistemas. El modelo no es siempre aplicable debido que no se enfoca en entender el problema como un sistema.



Se modelaron los accidentes como una combinación o suma de condiciones o eventos. Esto se llamó concurrencia, que es cuando dos o más eventos ocurren al mismo tiempo, afectan los entre sí. Así nacieron los sistemas no lineales.

También hacer modelo sistemático, contemplando la variabilidad en el rendimiento del sistema, contemplando variables ser humano-máquina, sociotécnicas, entre otras, que están presentes en el sistema. La esencia de esta filosofía está expresada en las siguientes características: (Hollnagel, Woods, & Leveson, Resilience Engineering: Concepts and precepts, 2006)

- a) El rendimiento normal y las fallas son fenómenos emergentes. No se pueden explicar como un malfuncionamiento de componentes o partes específicas. El rendimiento normal no es el prescrito por las reglas y la regulación, sino el resultado de ajustes requeridos al estar en funcionamiento del sistema en un ambiente impredecible.
- b) Los resultados de las acciones pueden diferir de lo previsto, esperado o requerido. Cuando esto pasó, la mayor parte de las veces se debe a la variación de las condiciones y el contexto, y no por fallas en acciones, componentes o funciones.
- c) La adaptabilidad y flexibilidad del trabajo humano la razón para su eficiencia. Las acciones normales son exitosas porque las personas se ajustan a las condiciones locales, a eventos repentinos, o particularidades en lógicas, además de los

cambios predecibles en recursos o en demandas. Los operadores y encargados aprenden correcta y rápidamente a anticiparse a variaciones recurrentes en el sistema.

- d) La adaptabilidad y flexibilidad del trabajo humano también es una razón que induce la ocurrencia de fallas, aunque muy pocas veces es la causa de las mismas. Las acciones y respuestas generalmente están basadas en un análisis limitado y no completo de las condiciones. Por tanto, las fallas ocurren cuando los ajustes fracasan, a pesar de que las acciones y los principios de ajustes sean técnicamente correctos.

Por todo ello, el enfoque sistémico adopta un punto de vista funcional, en el que la resiliencia es la habilidad que tiene una organización para ajustarse eficientemente a influencias perjudiciales, más allá de su capacidad de rehuirlas o resistirlas. Un estado inseguro aparece porque los ajustes al sistema son insuficientes o inapropiados, antes que por una falla en el sistema.

### **El enfoque de la Ingeniería de Resiliencia**

La seguridad se enfoca usual y tradicionalmente en los resultados no deseados, lesiones, y pérdidas, que son resultado de eventos adversos. De esta forma, se entiende la seguridad como un sistema "libre de riesgos inadmisibles." Por otro lado, la Ingeniería de Resiliencia define la seguridad como la habilidad que tiene sistema para funcionar exitosamente bajo condiciones variables. Por ello es igualmente importante estudiar tanto aquellos eventos que funcionan correctamente como aquellos eventos que funcionaron incorrectamente. Según la Resiliencia, el entendimiento del funcionamiento normal de un sistema socio-técnico es la base necesaria y suficiente para entender cómo falla. (Hollnagel, Woods, & Leveson, Resilience Engineering: Concepts and precepts, 2006)

Con estas premisas, se tiene que la Resiliencia es la habilidad que tiene el sistema para:

- a) responder a eventos
- b) monitorear desarrollos o conductas en curso
- c) anticipar futuras amenazas y oportunidades
- d) aprender y contemplar fallas y éxitos anteriores

Con lo antes explicado, se podría entender que la resiliencia es la habilidad de absorber y adaptarse a interrupciones, trastornos y cambios. Sin embargo, la resiliencia es una

capacidad más amplia, que gestiona interrupciones y variaciones de naturaleza externa a los mecanismos base del sistema.

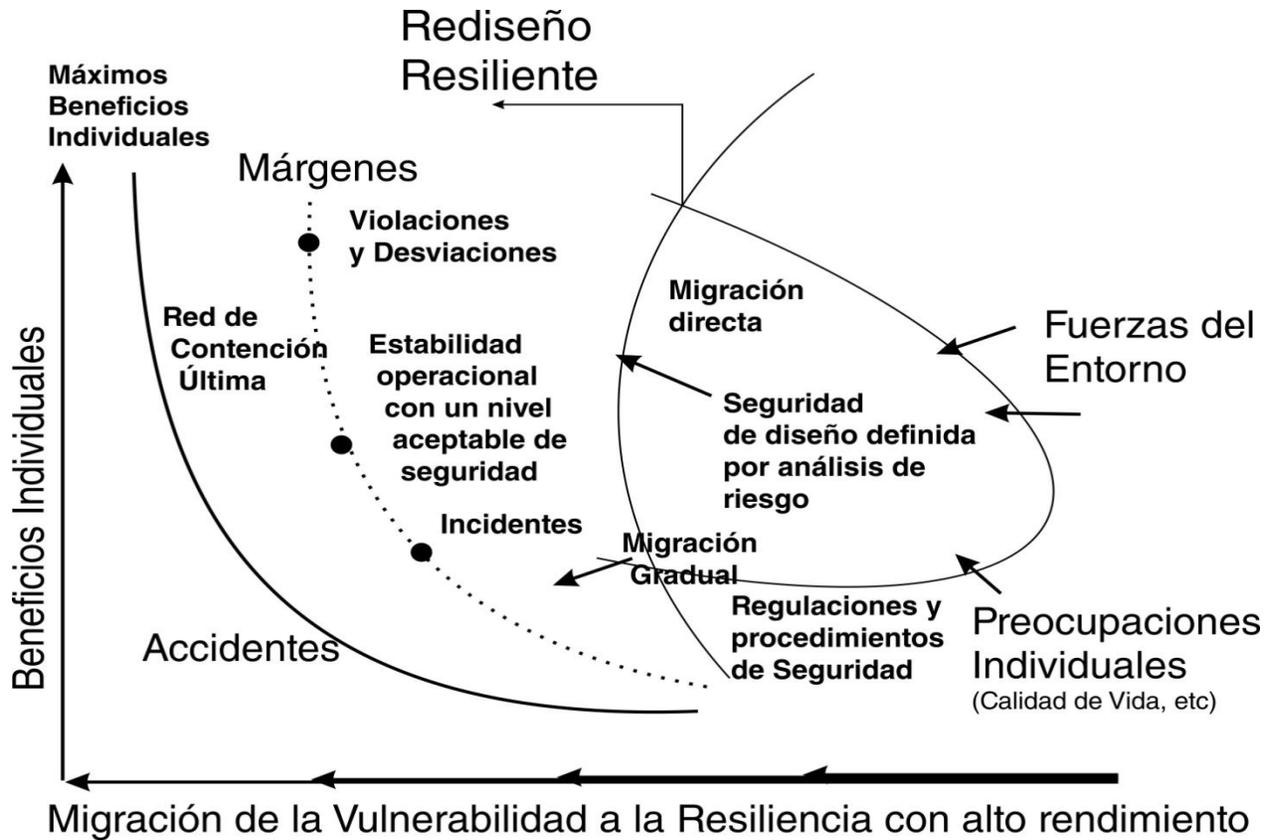
Las perturbaciones que no han sido anticipadas escalan generalmente debido a que la envolvente del modelo está incompleta, limitada o con premisas incorrectas, o bien porque los cambios en el ambiente –nuevas presiones, demandas o vulnerabilidades- disminuyen la efectividad de las competencias del sistema.

La resiliencia debe proponer procesos, estrategias y coordinación entre los actores para resolver el problema correcto. Por ello debe monitorear las condiciones frontera del modelo, y ajustarlo o expandirlo para adaptarse correctamente a los diferentes cambios en la demanda.

De esta forma, se busca que las medidas maximicen la capacidad del sistema para:

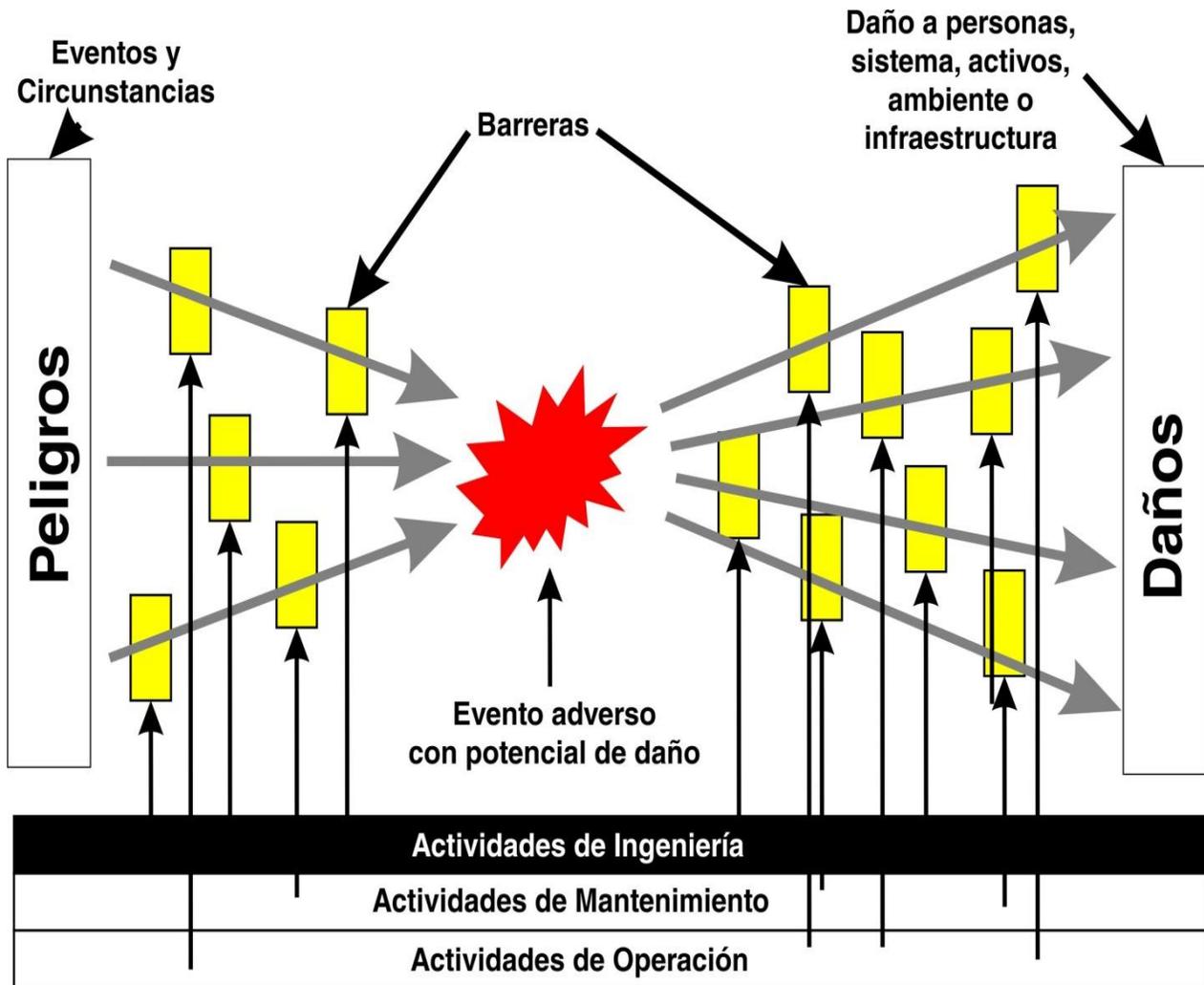
1. Amortiguar el escalamiento y los efectos de eventos adversos
2. Flexibilidad antes que estaticidad
3. Margen de maniobra, especialmente en niveles cercanos a las condiciones frontera
4. Tolerancia en la conducta del sistema para degradar los incrementos de estrés o presión que llevan al colapso, después de exceder la capacidad de adaptación del sistema (Hollnagel, Woods, & Leveson, Resilience Engineering: Concepts and precepts, 2006)

Una característica esencial de la resiliencia es la capacidad de gestión de las actividades de un sistema para anticipar y sortear las amenazas y peligros que existen en el entorno.



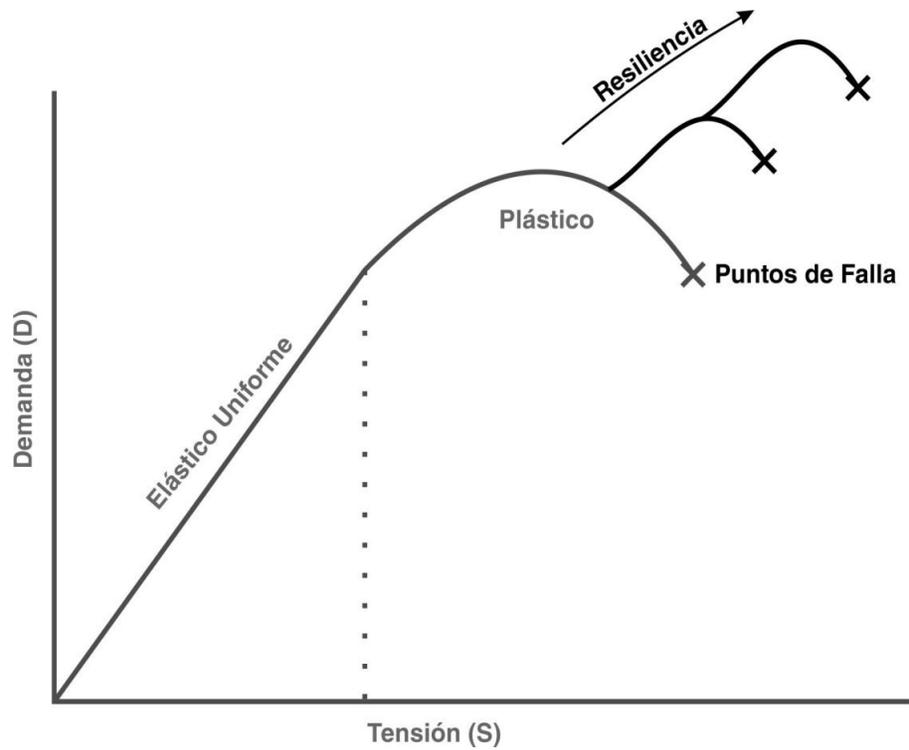
De acuerdo con Rasmussen, es necesario concentrarse en la prevención de pérdida de control por exposición al riesgo, antes que concentrarse en la recuperación del sistema en caso de pérdida del control. Así propone que la resiliencia es la habilidad para conducir las actividades de un sistema u organización para que puedan operar cerca del área en que los accidentes ocurrirán, pero siempre evitando el área de accidentes y peligros. Por ello se necesita una conciencia sensible para responder con efectividad en caso de escalamiento. De ahí que la migración es mejor que sea gradual, para evitar una sobreexposición del sistema cuando los cambios se comiencen a implementar. (Rasmussen & Svedung, 2000)

A continuación se presenta el modelo de Bowtie, caracterizado por las diferentes actividades –de Ingeniería, Operación y Mantenimiento–, que funcionan como barreras para prevenir, mitigar y amortiguar el impacto de un efecto adverso con potencial dañino. (Hollnagel, Woods, & Leveson, Resilience Engineering: Concepts and precepts, 2006)



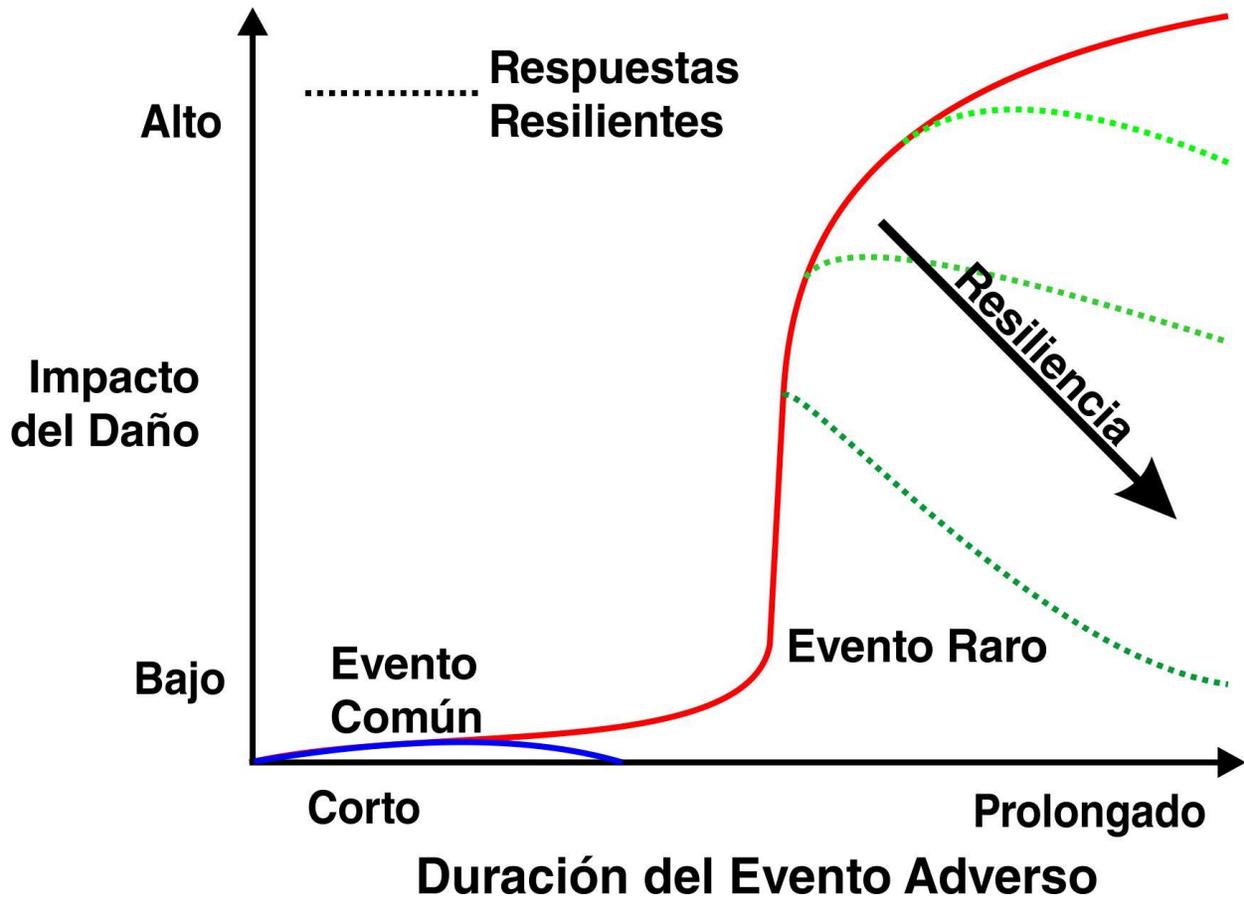
De acuerdo con Elizabeth Lay, la infraestructura tiende a funcionar bajo condiciones complejas de trabajo, sometida a alta presión y alto riesgo. Cualquier incidente puede ser extremadamente costoso para el proveedor y el usuario. Ya que una organización resiliente puede anticiparse a situaciones críticas, identificar circunstancias adversas, planificar cómo responder y adaptarse para solucionar los problemas, se ha propuesto que se puede realizar el símil con la ductilidad de los metales. (Gopalakrishnan & Peeta, 2010) (Hollnagel, Pariés, Woods, & Wreathall, 2011)

El sistema se encontrará sometido a cierta presión de trabajo (o tensión) y en función de ello responderá con una demanda. La demanda podría ser proporcional y uniforme, hasta llegar al punto de fluencia, en el que no habría retorno a su estado original. Un sistema resiliente será aquel en el que, después de identificar con claridad el inicio del periodo de adversidad, podrá reaccionar con acciones que extiendan su capacidad.

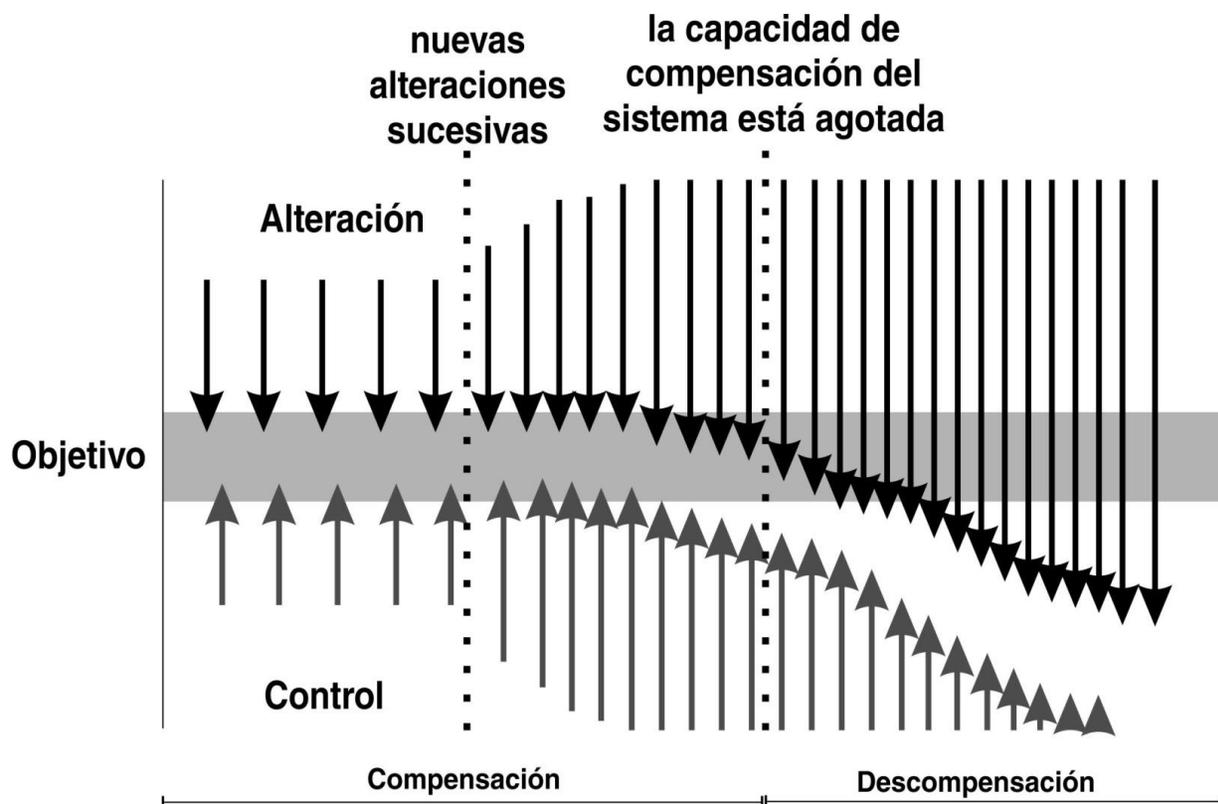


Si se analizara el impacto del daño en el sistema en función de la duración de un evento adverso, se encontraría que los eventos comunes tienden a tener impactos bajos, de los que se recuperarán a lo largo del tiempo, generalmente por sustitución o mantenimiento.

Los eventos raros tenderán a escalar hasta conseguir abruptamente un impacto alto, con daños considerables al sistema, y tendrán una duración importante. Dichos eventos raros pueden ser tratados con respuestas resilientes, que mitigarán el impacto y a lo largo del tiempo lo reducirán. Mientras una respuesta sea más rápida y efectiva, entonces será más resiliente. (Hollnagel, Pariés, Woods, & Wreathall, 2011)



En caso de que el sistema sea poco resiliente, sufrirá una descompensación, que es un patrón que evoluciona en dos fases. En la primera fase, el sistema se adapta parcialmente para compensarse ante una alteración creciente. Esto es parcialmente efectivo inicialmente, resultando en un encubrimiento aparte de la alteración subyacente. Al entrar en la segunda fase de descompensación, la respuesta automática no podrá compensar la alteración completa o definitivamente. Después de la respuesta inicial, el mecanismo del sistema estará agotado, desencadenando la falla. La falla ocurrirá de forma acelerada, según se incremente la fuerza que debe resistir el sistema de control. Esto se puede entender a través del siguiente diagrama. (Hollnagel, Pariés, Woods, & Wreathall, 2011)



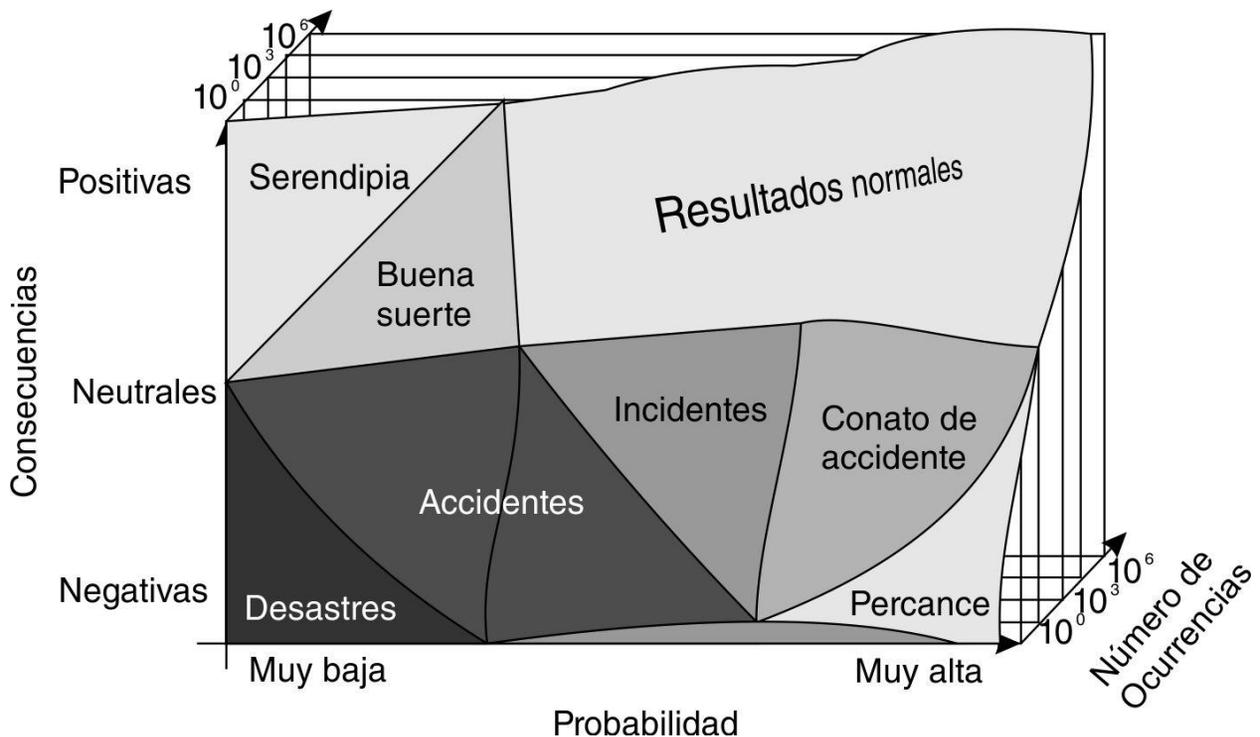
### El Proceso hacia la Resiliencia

Dentro del enfoque tradicional, ha sido importante entender las fallas del sistema. Comúnmente se utiliza una Matriz de Riesgo, que se caracteriza la vulnerabilidad del sistema según los posibles resultados y consecuencias. La evolución de esta matriz de riesgo debe contemplar una dimensión de consecuencias positivas y esperadas, y negativas e inesperadas.

Los posibles resultados son:

- a) Resultados positivos que tienen una gran probabilidad de suceder. Esto representa los éxitos o acciones normales. Son las cosas que iban bien, y de las que se esperaba que fueran bien, con un funcionamiento normal.
- b) Resultados positivos que tienen una probabilidad pequeña de suceder. Representa aquellas cosas buenas que pueden pasar, pero que pasan de forma inesperada. Se pueden entender como serendipia, o descubrimientos fortuitos positivos.
- c) Resultados negativos e inesperados que tienen una baja probabilidad de suceder. Son aquellos que pueden ir mal y que son inesperados, pero imaginables. Estos casos son los que se estudian con el enfoque tradicional de seguridad, sobre todo aquellos que son serios, ya que causan pérdidas muy importantes y son difíciles de predecir. Se consideran como incidentes como accidentes, pero también los desastres.
- d) Resultados negativos o indeseados que tienen una alta probabilidad de suceder. Los resultados son realísticamente esperados, por lo que suceden frecuentemente o regularmente. Generalmente sólo traen consecuencias, por lo que su ejecución se considera como acción insegura. (Hollnagel, Woods, & Leveson, Resilience Engineering: Concepts and precepts, 2006)

Esto se condensa en el siguiente diagrama:



El enfoque tradicional argumenta que la seguridad se alcanza cuando los accidentes, incidentes, o percances pueden ser prevenidos o con una frecuencia de ocurrencia reducida. Los desastres no pueden ser desatendidos, pero su previsibilidad usualmente es tan baja que es muy difícil prepararse para ellos.

Usando el enfoque de la Ingeniería de Resiliencia, la explicación de los fenómenos estocásticos debe contemplar los resultados negativos y negativos. Esto debido a que en la vida real, existen muchos más diseños que funcionan que diseños que fallan. Por ejemplo, si la probabilidad de falla de un sistema es de 1/10000, el diseño tradicional enfocará más del 80% del esfuerzo en esa pequeña probabilidad de falla. Con la lógica de la Resiliencia, se debería dedicar más del 80% del esfuerzo a la probabilidad de que sistema funcione correctamente. De esta forma, se garantizará que existirán 9999 casos de éxito.

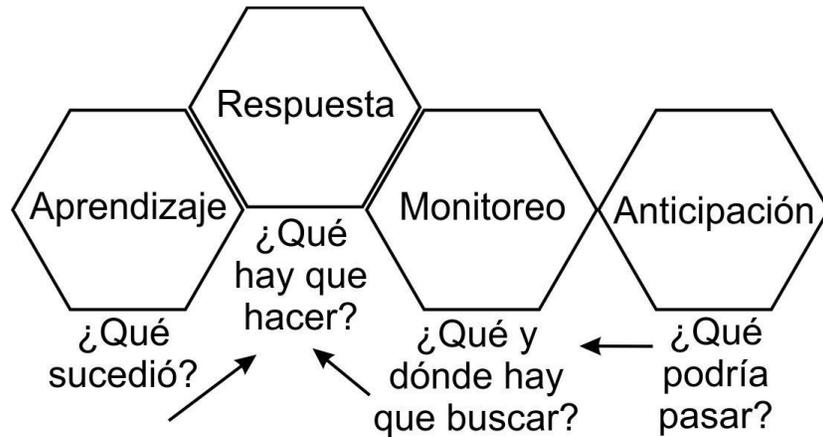
Es una paradoja que los esfuerzos dentro de la seguridad se hayan enfocado en el funcionamiento inseguro, antes que en el funcionamiento seguro. Esto es influido por el hecho psicológico de que la seguridad es casi invisible, mientras que la inseguridad es altamente visible.

El desarrollo en la complejidad y técnica de los últimos 20 años, ha creado un incremento en los sistemas que los hace menos manejables, presentando variabilidad y dinamismo en el rendimiento del mismo. Por ello la Ingeniería de Resiliencia se enfoca en incrementar el número de cosas de éxito.

Los pilares de la Resiliencia se basan en la habilidad sistema para ajustar su funcionamiento. Estas cuatro habilidades esenciales son: (Hollnagel, Woods, & Leveson, Resilience Engineering: Concepts and precepts, 2006)

- a. Saber qué hacer y cómo responder a situaciones regulares, irregulares y alteraciones, ya sea implementando un conjunto de respuestas preparadas, o ajustando su funcionamiento normal. Esto es la habilidad de atender el estado del arte sistema.
- b. Saber dónde buscar, monitoreando aquellos elementos que son o pueden convertirse en una amenaza en el corto, mediano y largo plazo. Esta monitorización debe cubrir aquellos eventos que suceden tanto en el ambiente como en el sistema, con su inherente rendimiento. Esta es la habilidad de atender los elementos críticos del sistema.

- c. Saber qué esperar, al realizar acciones para anticipar desarrollos por implementar, además de amenazas y oportunidades en el futuro, especialmente cambios potenciales, disoluciones, presiones, y sus respectivas consecuencias. Esto es la habilidad de atender el potencial.
- d. Saber qué ha pasado, aprendiendo de la experiencia, particularmente de aquellos casos exitosos, y en menor forma de las fallas esta es la habilidad de atender los hechos.



El proceso Aprendizaje / Anticipación-Monitoreo / Respuesta se distribuye a lo largo del tiempo. Un sistema resiliente prevendrá la ocurrencia de un malfuncionamiento. En su defecto, el sistema será resiliente si previene que una situación adversa empeore. Y por último, el sistema será resiliente si puede recobrase del empeoramiento.

Las fases son:

- a. Prevenir y Evitar – De acuerdo con Adamski, es la habilidad para anticipar cuándo y cómo puede impactar una calamidad. Se puede realizar esta acción a partir de la experiencia, programando las amenazas predecibles. También puede anticiparse a partir de la revisión de la vulnerabilidad, tomando en cuenta eventos sintomáticos, tendencias identificadas, y especulación inteligente. Se deben evitar cuellos de botella y lentitud de actuación.
- b. Actuación ante adversidad – Es la habilidad de monitorear lo que está pasando en una organización. Una vez que el peligro ha sido previsto, comprendido, se ha preparado para el mismo y sucede el evento, los mecanismos se ponen en práctica. Se deben erradicar los problemas

subyacentes que existen en el sistema, de forma que puedan tomar decisiones que implementen con efectividad y rapidez, con flexibilidad para adaptarse y de ser posible, puedan rediseñarse dinámicamente. Éste es el corazón de la ingeniería de resiliencia. La secuencia de eventos y adaptaciones se debe comenzar rápidamente.

- c. Reparación después de la catástrofe – Es fundamental la recuperación del sistema, especialmente ante desastres naturales, determinando con efectividad la escala del daño y la frecuencia del desastre. Las estrategias requieren de un complejo número de mecanismos para obtener recursos en tiempos de adversidad o desastre. Se quedan cortos después del reconocimiento del riesgo y la ocurrencia del mismo. También son insuficientes los parámetros de respuesta. Las estrategias resilientes han dado buenos resultados en el mundo. Muchas de las estrategias que vienen alrededor de una variación en las presiones han reducido sus alcances y eficacia.

La resiliencia de una infraestructura crítica se puede contener cualquiera de los siguientes aspectos:

- a. Densidad de infraestructura
  - a. Capacidad (volumen, tráfico, flujo)
  - b. Identificación de cuellos de botella (enfoques algorítmicos para identificar áreas con gran flujo, pero poca diversidad para reconducirlos)
  - c. Análisis estructural (enfoque algorítmico para calcular todos los posibles caminos a través de una infraestructura, y encontrar aquellos lugares discretos que se utilizan más frecuentemente como rutas).
  - d. Análisis estructural ponderado (expande todos los posibles análisis de caminos para incluir e identificar los lugares que son usados frecuentemente como rutas y que tienen bajos niveles de capacidad, o alternativas que podrían servir como conductoras en fallas de eventos, y que pueden tener una capacidad menor a la requerida).
- b. Interdependencia entre elementos
  - a. Colocación (dos o más infraestructuras están localizadas en el mismo lugar)
  - b. Redundancias

- c. Funcional (la pérdida de una infraestructura causará fallas en las infraestructuras dependientes).
  - d. Costo (creación de una línea base para determinar los costos de la infraestructura en su configuración actual, como el costo de la renta de un servicio por mes).
  - e. Verificación de implementación de actividades
  - f. Falla por simulación. ¿Qué impacto se produce y cómo puede ser comparado? ¿Qué tan crítico es? ¿Será que el impacto más crítico se produce en el área con más densidad de infraestructura, o será en donde se encuentra el cuello de botella? La simulación por falla provee de argumentos para verificar qué tan críticos son los escenarios para garantizar la continuidad de la infraestructura.
  - g. Se deben verificar los cambios en la red después de la falla en la estructura. Lo que podía haber sido el segundo activo crítico de la red podría haber cambiado.
  - h. Determinación de correlación entre fenómenos.
- c. Consecuencias en caso de evento adverso
- a. Población afectada - ¿Cuántas personas serán afectadas por la falla o falta de continuidad de una infraestructura?
  - b. Actividades clave afectadas
  - c. Infraestructuras interdependientes afectadas - ¿Qué infraestructuras con dependencia a una infraestructura que falló serán impactadas por el evento? (Hubbard, 2009)

## Conclusión

La infraestructura crítica de un sistema es un asunto mayor en el aspecto de la seguridad. La presencia de tantos actores para diseñar, implementar, promover, construir, operar y mantener una infraestructura presenta exigencias que no deben ser minimizadas.

No existe una garantía que los enfoques como el resiliente trabajarán en todo momento. Sin embargo, son una alternativa viable y que sigue la evolución natural de la teoría de los riesgos, basándose en una línea fidedigna con mediciones para la generación de estrategias. La resiliencia es una respuesta amplia a un problema tan complejo como la seguridad de un sistema crítico.

## Casos Recientes dentro del Contexto Histórico

### Vuelo 1549 de US Airways, 2009

El vuelo 1549 de US Airways fue un vuelo comercial doméstico, del aeropuerto LaGuardia, NY, al Charlotte/Douglas International Airport de Charlotte, Carolina del Norte. El 15 de enero de 2009, el Airbus A320-214, aterrizó con éxito en el Río Hudson, en el centro de Manhattan, seis minutos después de haber despegado, ya que fue dañado por una serie de gansos canadienses en su elevación.

El impacto de aves, resultó en una pérdida total e inmediata de empuje de ambos motores. Cuando la tripulación del avión determinó que no podrían aterrizar correctamente, decidieron aterrizar en el Hudson. Los 150 pasajeros y 5 tripulantes del avión sobrevivieron. Este evento es considerado el aterrizaje de emergencia más exitoso de la historia de la aviación. (US Airways, 2009) (CNN USA, 2009)



El 15 de enero de 2009, el vuelo despegó a las 3:24:56 pm, hora local, conducido por Chesley Sullenberger, ex piloto de combate, experto en seguridad y piloto planeador. La colisión con las aves sucedió a los 2,818 msns, derivando en una importante disminución de la velocidad al tiempo que seguía elevándose.

Este es un caso de Ingeniería de Resiliencia desarrollada para la industria de la aviación, ya que se realizó un manejo exitoso de una falla mecánica total por colisión e ingestión de aves. Afortunadamente el sistema estuvo tanto preparado para lo previsto como preparado para lo imprevisto. El diseño resiliente fue óptimo, ya que presentó eficiencia –el alto grado de adaptación al sistema- y flexibilidad –con una gran velocidad de adaptación-. El tiempo entre la colisión y el aterrizaje fue menor a 6 minutos. (Hollnagel, Pariés, Woods, & Wreathall, 2011) (Gladwell, 2005)

Se señaló que la conjunción de eventos que se dio, es estadísticamente muy poco probable, aunque el choque de aeronaves con parvadas es recurrente, y este problema aún no se ha resuelto. Se han hecho esfuerzos para mejorar los armazones, parabrisas y la certificación de los motores. El riesgo se maneja tomando en cuenta que el avión tiene  $n$  número de motores, y seguirá volando mientras algún motor siga funcionando. La improbabilidad señalada radica en que dos motores presentaron un daño de forma simultánea.

Los esfuerzos de la ingeniería de resiliencia están encaminados a mantener suficiente control de la aeronave para realizar un aterrizaje forzoso. La probabilidad de este evento es aún más baja contemplando un aterrizaje en el agua. Por ende también se ha tildado de milagroso.

Se encuentra que el sistema tiene una gran cantidad de incertidumbre que prevalece en dichos momentos. En esa diferencial de tiempo, el futuro es altamente incierto, dependiendo críticamente de decisiones irreversibles, que tienen que ser tomadas rápidamente y que sólo pueden ser basadas en un rápido asesoramiento genérico, pudiendo tomar en cuenta apenas unas pocas referencias y antecedentes. La decisión planteó dos opciones: aterrizar en el Hudson, elección dura e incómoda pero posiblemente no catastrófica, o buscar aeropuertos cercanos, con un posible final positivo, con un mínimo daño al avión, pero catastrófico en caso de falla. Cabe destacar que la aviación reconoce tres situaciones de operación: la envolvente de operación normal, la operación anormal, y la operación emergencia.

1. La primera se refiere a eventos con una secuencia definida, con parámetros de conducta dentro de los límites de diseño, y con variaciones compensadas y absorbidas por la flexibilidad intrínseca del sistema.
2. La segunda se refiere a eventos que son significativamente diferentes de los patrones normales, aunque se encuentran dentro de los límites de falla contemplados. Ejemplos son la falla de componentes, disturbios, y excesos del límite de diseño. Son manejados por procedimientos específicos.
3. La tercera se refiere a la operación de emergencia, con situaciones extremadamente anormales. Son eventos totalmente fuera de lo anticipado, en que los parámetros alcanzan proporciones desmedidas, los componentes críticos se pierden y existen disturbios excepcionales que amenazan severamente la posibilidad de mantener el control del sistema. Necesitan ser manejados por respuestas y procedimientos genéricos, creatividad, experiencia adquirida, y

tenacidad intrínseca del operador del sistema. (Hollnagel, Pariés, Woods, & Wreathall, 2011)

La estrategia de resiliencia debe tomar en cuenta que en cada fase:

1. la situación se volvió más improbable, más variable, y menos controlable,
2. la probabilidad de daño aumentó en cada momento, así como el potencial de daño,
3. las respuestas por contemplar fueron más restringidas, más difíciles de anticipar, menos reversibles y más demandantes.

A partir de ello, se realizaron las siguientes sugerencias encaminadas a mejorar la resiliencia de los procedimientos aeronáuticos en el proyecto ACCOMPLI (2006-2009):

- Permitir la construcción y mantenimiento de una adecuada y distribuida representación mental de la situación.
- Permitir el asesoramiento de información relevante, riesgos y amenazas al vuelo.
- Permitir una envolvente de autosuficiencia, conociendo y reconociendo sus fronteras, y adoptando las tácticas y estrategias del operador.
- Permitir cambiar el enfoque mental de una situación bajo control, al de una situación de crisis.
- Permitir construir y mantener un nivel relevante de confianza, hacia sí mismo, los demás y la tecnología.
- Permitir contribuir para tomar decisiones en un ambiente complejo y de incertidumbre.
- Permitir el manejo de interacciones con un sistema automatizado de vuelo y staff. Además de permitir el uso de técnicas y recursos humanos para reconfigurarlos. Igualmente se permite el manejo del tiempo, la presión y la conjunción de ambos.

Con todo ello, se concluye que sistema sí estuvo preparado, tanto para lo previsto, como para lo imprevisto. Se encuentra que nunca podrá estar suficientemente anticipado en detalles, por lo que se requieren esquemas genéricos de anticipación, que provean marcos de trabajo con lógica y sentido común sobre la situación, y un nivel de abstracción suficientemente alto para procurar controlar el sistema. Asimismo, la implementación rápida y eficiente de los escenarios y de las habilidades de la titulación, capaz de forzar esquemas genéricos viables dentro de los parámetros ofrecidos por las circunstancias del evento.

### **Presa Sayano-Shushenskaya, 2009**

El accidente en la presa hidroeléctrica Sayano-Shushenskaya ocurrió el 17 de agosto de 2009 a las 8:13 hrs, cuando la turbina 2 se rompió en pedazos violentamente. Las casas de máquinas y de turbinas presentaron inundaciones, además de que el techo de la última colapsó. 9 de las 10 turbinas presentaron daños o fueron destruidas y 75 personas perdieron la vida. La planta, con capacidad de producción de 6,400 MW y una significativa porción de oferta energética para la región, tuvo daños significativos que tardaron meses en ser reparados, ocasionando falta de suministro de energía eléctrica.



La planta Sayano-Shushenskaya se encuentra localizada en el río Yenisei, en la república de Khakassia, en la Rusia siberiana.

Antes del accidente era la presa más grande de Rusia y la sexta más grande del mundo. Está operada por RusHydro. (Naymushin, 2009) (Teplyakov, 2009)

Se reportó desde tiempo antes del accidente que la turbina 2 tenía problemas. Después de su instalación en 1979, los primeros problemas aparecieron. Entre 1980 y 1983, se detectaron problemas en los sellos, además de vibraciones en el eje y menos revoluciones por minuto que las esperadas. Entre marzo y noviembre de 2000 se procedió a reacondicionar la turbina. Se encontraron cavidades de más de 12 mm profundidad y grietas de hasta 130 mm de longitud. Muchos otros defectos se encontraron en la turbina, mismos que fueron reparados. También se le realizó mantenimiento en 2005, encontrando defectos similares a los vistos en la anterior reparación.

Entre enero y marzo de 2009, la turbina 2 fue sometida a reparaciones programadas, orientadas especialmente a modernizarlas. Fue la primera y única turbina de la estación que fue equipada con un nuevo regulador electrohidráulico para controlar la velocidad rotacional. En el curso de la reparación, las aspas de la turbina fueron re-soldadas, debido a su largo tiempo de

uso. El eje de la turbina no fue adecuadamente rebalanceado cuando fue colocado, por lo que su vibración fue mucho más alta. Se encontró que la falla en la calibración fue de 0.15 mm. Esto no implica un exceso en las especificaciones, pero es inaceptable en el largo plazo.

La vibración aparente fue mucho más alta para esta turbina que para otras turbinas. Dicha vibración excedió las especificaciones de diseño y aumentó proporcionalmente a la velocidad a la que fue sometida. En la noche del 16 y 17 de agosto, la turbina presentó niveles de vibración muy altos, por lo que en varias ocasiones se buscó detenerla. Se redujo su carga de 600 MW a 100 MW. Después se aumentó nuevamente a 600 MW, por lo que el nivel de vibración aumentó considerablemente, al grado que la instrumentación sísmica de la planta registró estos movimientos. Durante los intentos para apagarla, el rotor de adentro de la turbina fue empujado, por lo que se creó mayor presión sobre la delgada cubierta de la turbina. El gasto promedio que la turbina trabajaba era de 256 m<sup>3</sup>/s. Se cuantificaron vibraciones de 0.84 mm, excediendo importantemente las vibraciones de las otras turbinas. Además, la turbina tenía en funcionamiento prácticamente los 30 años especificados como vida útil. (Teplyakov, 2009)

Las vibraciones concentraron a unas 50 personas alrededor de la turbina. Sin embargo, ninguna de ellas tomó alguna decisión debido a que el director Nikolai Nevolko no se encontraba presente. No se le quiso consultar.

Las turbinas Francis de 16 aspas como las utilizadas presentan una línea de trabajo muy delgada en el régimen de alta eficiencia. Si dicha línea es sobrepasada, la vibración es muy alta, causando una pulsación del flujo, con importantes golpes del agua. Estos problemas fueron recurrentes en la planta.

En el día del accidente, las turbinas trabajaron con una carga de 212 metros, por lo que la potencia recomendada de trabajo es entre los 570 y 640 MW. Una carga mayor está prohibida. Debido a que la turbina 2 trabajó con una potencia que varió constantemente, sucedió un golpe de ariete masivo.

El accidente ocurrió el 17 de agosto de 2009 a las 08:13 hora local. Hubo una fuerte explosión de la turbina 2. La tapa de la turbina se disparó y el rotor de unas 1000 toneladas hizo lo propio. A partir de ello, el agua comenzó a brotar en la sala de máquinas, por lo que se inundó junto con las cámaras inferiores. La energía eléctrica fue interrumpida. Las puertas de acero de las tuberías de entrada a las turbinas fueron cerradas manualmente, en una operación que duró 25 minutos. Asimismo se abrieron las 11 compuertas del vertedero de la presa.

El informe del accidente, publicado dos meses después, señala que la causa fueron las vibraciones de la turbina, conduciendo a la avería por fatiga de los montajes y la cubierta de la turbina 2. Se encontró que faltaban al menos 6 tuercas de los tornillos de seguridad de la cubierta de la turbina. 41 de los tornillos hallados presentaron fatiga.

De acuerdo con el ex director Viktor Bobrovski, el accidente podría haber sido causado por un proceso de arranque de la turbina incorrecto, que se tradujo en un aumento de la carga de la turbina. Dado que la carga de las otras turbinas cesó después del colapso de la turbina 2, ellas probablemente giraron sin carga hidráulica, hasta que se estrellaron. El ex director de la central hidroeléctrica, Valentin Bryzgalov, había alertado que es peligroso operar la planta en su máxima carga cuando las turbinas vibran en dirección axial. Los resultados fueron catastróficos, ya que el sistema de seguridad no funcionó y las reglas de seguridad no se siguieron.

Las turbinas 7 y 9 también fueron dañadas severamente, destruyendo el techo de la sala y causando daños mayores a las turbinas 1 y 3, y menores a las 4, 5, 8 y 10.

Las consecuencias ambientales y financieras fueron catastróficas para la región y para RusHydro. Se espera que la reparación dure cuatro años, con costos de 880 millones de euros.

La falta de resiliencia en el sistema de la presa hidroeléctrica Sayano-Shushenskaya es latente, debido a que no se anticipó correctamente los diferentes problemas que podían derivar en el golpe de ariete catastrófico. A pesar de la monitorización, el accidente ocurrió indistintamente, al no haber una respuesta satisfactoria que esquivara la falla en la turbina 2.

## Sismo en Haití, 2010



El sismo del 2010 que ocurrió en Haití fue un evento catastrófico, con magnitud de 7.0 Mw, con epicentro cerca del pueblo de Léogâne, a unos 25 km de Puerto Príncipe. El sismo ocurrió a las 16:53, hora local el 12 enero 2010. Para el día 24, habían sucedido 52 réplicas de al menos 4.5 Mw. Se estima que hubo más de 3 millones de afectados, con 316,000 fallecidos, 300,000 lesionados, 250,000 residencias dañadas y 30,000 edificios colapsados o con daños significativos. (United States Geological Service, 2010)

Además del daño a edificios históricos o fundamentales para el funcionamiento de la nación, ocurrieron problemas en los sistemas de telecomunicaciones, transporte aéreo, transporte terrestre y marítimo, además de hospitales, redes eléctricas, y redes de abastecimiento de agua, por lo que la ciudad sufrió un desbordamiento.

La zona de la isla La Española es una zona sísmicamente activa, con historial de sismos destructivos. Los más afectados son los de 1692, 1751, 1770, 1842, 1946. Este último produjo un tsunami y fatalidades del orden de 1790 personas.

En 2007, un estudio realizado por C. DeMets y M. Wiggings-Grandison mostró que la zona de falla puede actuar como un ciclo sísmico, el peor de los casos tendió una magnitud de 7.2 Mw.

El día 20 enero se presentó la réplica más fuerte, con magnitud de 5.9 Mw. A pesar de que el pueblo de Petit-Goâve perdió aproximadamente el 15% de sus edificios, no se presentaron pérdidas mortales debido a que la mayor parte de las personas estaban durmiendo en campamentos a la intemperie.

La infraestructura crítica para responder a la amenaza fue dañadas severamente o destruida. Esto incluye los hospitales, los medios de transporte, y los sistemas de comunicación. En el caso de fiscales, muchos de los principales sucumbieron en el sismo. Además los puertos sufrieron daños importantes. En cambio, los caminos, fueron bloqueados con escombros se presentaron abundantes discontinuidades. La infraestructura de comunicaciones sufre un daño considerable, ya que el sistema telefónico fijo no pudo continuar sus operaciones. Además, dos de las compañías proveedoras del servicio celular reportaron que sus servicios fueron afectados por el sismo. La conectividad por fibra óptica fue interrumpida, así como la transmisión de unas 20 de las 50 estaciones de radio del país. Además, 1300 escuelas fueron destruidas total o parcialmente.

Uno de los principales problemas identificados por la comunidad internacional es la baja calidad en los estándares de construcción en Haití, principalmente debido a que el país no cuenta con códigos de construcción. Los ingenieros han mencionado que era muy improbable que los edificios pudieran seguir en pie ante un desastre de dicha magnitud. Las estructuras se construyeron sin estudios de mecánica de suelo, además de que se identificaron cimentaciones insuficientes, trabajos en acero con calidad suficiente, y en pendientes inapropiadas. (United States Geological Service, 2010)

Para el día 14, miles de cuerpos se encontraban en los pavimentos y en las banquetas. Tuvo que recurrir a cementerios masivos, fueron insuficientes debido a la humedad y al calor, por lo que sufrieron una descomposición acelerada. Incluso se habló de falta de dignidad.

La lenta distribución de los recursos resultó en violencia esporádica, con actos continuos de rapiña. En las comunidades, grupos de hombres coordinados actúan como seguridad, especialmente la noche, entre las mujeres estaban a cargo de la comida y de las necesidades de higiene.

Los países de la comunidad internacional se involucraron, enviando personal, medicinas, material, y ayuda de primeros auxilios. Sin embargo, la distribución fue lenta, imperando el caos y con pocas medidas de adaptación. Los esfuerzos de rescate comenzaron de inmediato, privilegiando la atención a sobrevivientes dentro de edificios colapsados. Comenzaron entonces a aparecer personas con lesiones muy graves, que derivaron muchas veces en amputaciones. Asimismo los haitianos participaron activamente en las tareas de rescate. Participaron entidades como los gobiernos de Estados Unidos, Canadá, Holanda, entre otros. También se recibió apoyo de organizaciones internacionales como Cáritas, Médicos Sin Fronteras, las Naciones Unidas, entre otras.

Se concluye que la capacidad de respuesta del gobierno haitiano y de sus sistemas fue paupérrima, ya que se vio rebasada ante este evento con afectaciones mayúsculas para la población. Es evidente la situación precaria de la sociedad haitiana, lo cual amplificó los daños. La resiliencia fue minúscula, especialmente debido a la falta de adaptación, monitorización y actuación efectiva de las diferentes entidades.

De acuerdo con reportes más recientes, seis meses después de la tragedia, el 98% de los escombros no habían sido recogidos. Además, muchos cuerpos continúan atrapados entre los mismos. 1.6 millones de personas vivieron por cierto tiempo en los campos, algunos de los cuales siguen funcionando. A septiembre, se anunció la priorización de la reconstrucción de Puerto Príncipe, con un nuevo centro gubernamental, mismo que no se pudo comenzar en ese momento. Hacia octubre, el estado de emergencia continuaba, además de importantes brotes sociales, liderados por gangsters y miembros de la población inconformes. En ese mes apareció un brote de cólera, con una mortalidad máxima de 50 fallecimientos por día, para un total de más de 3000.

En enero de 2012, 2 años después, se tiene un avance del 43% en la reconstrucción de los proyectos críticos. Muchos de ellos fueron financiados por los gobiernos de Estados Unidos y Venezuela. Se reportó un alza en el precio de la calidad de vida, impulsado por el costo de las rentas y los víveres. Se tiene un avance de 94,000 albergues de transición, constanding el plan de 125,000 personas.

La recuperación en Haití ha sido poco receptiva, afectada principalmente por la magnitud de la tragedia y el daño que causó a la infraestructura que permite la recuperación del país.

## Sismo en Chile, 2010



El 27 febrero de 2010 ocurrió un sismo cerca de la costa de Chile central a 3:34 hrs, con una magnitud de 8.8 Mw con una duración extraordinaria de cerca de tres minutos. El reconocido como el sexto sismo más intenso que haya sido captado por un sismógrafo. La intensidad causó que el 80% de la población en Chile lo sintiera, además de diversas poblaciones en Argentina y Perú. (United States Geological Service, 2010)

Dicho sismo desencadenó un tsunami que devastó varias ciudades costeras en el centro sur de Chile, causando alertas de tsunami en 53 países. La ola llegó a las costas de Japón y a las de California. Inmediatamente, se causó un apagón del orden de días en algunas regiones, que afectó al 93% de la población. La presidenta Michelle Bachelet declaró un estado de catástrofe, enviando militares a las áreas afectadas para tomar su control. Oficialmente, hubo 525 fallecimientos, 25 desapariciones, 370 mil viviendas afectadas -9% de la población asentada en las regiones afectadas perdió sus viviendas-. Se calcula que las pérdidas económicas están estimadas entre 15 y 30 mil millones de dólares.

El sismo ocurrió en la frontera entre las placas tectónicas Sudamericana y Nazca, en una localización donde convergen por apenas 80 mm al año. Se caracterizó por una fall causada por la subducción por cabalgamiento, de la placa Nazca debajo de la Sudamericana.

Este tipo de sismo se han identificado desde la era paleozoica; el inmediato anterior ocurrió en 2007. También se convirtió en el sismo más fuerte que ocurrió en Chile desde el sismo de 1960, con magnitud de 9.5. Fue 500 veces más poderoso que el sismo de Haití.

El 5 de marzo tuvo dos réplicas de más de 6.0 Mw. El 11 marzo tuvo réplicas de 6.9 y 6.7. El 17 marzo tuvo réplicas por 5.2 y 6.2. La región de Biobío una de las más afectadas por las réplicas. También en 2011 se presentaron réplicas de este sismo. Las más importantes fueron de 7.1 Mw tildó de enero seguida por sendas réplicas de 6.9, 6.4, 6.2 y 5.1. (United States Geological Survey, 2012)

Los sismólogos estiman que el sismo fue tan poderoso pudo haber acortado la duración de un día en el orden de microsegundos. En pudo haber movido el eje de la tierra unos 8 cm.

La media de las personas que perecieron fueron encontradas dentro de edificios y adentro de vehículos. Las arterias más importantes se concentraron en las ciudades de Santiago, Curanipe, Concepción y Temuco. Cabe destacar que Santiago fue la ciudad con menos daño a viviendas.

La respuesta después del desastre fue poco controlada. Aproximadamente la mitad de los pueblos del país fueron declaradas zonas de catastro. Al amanecer del día del sismo, muchas ciudades fueron caóticas. Se presentó rapiña en supermercados, especialmente en Concepción. Los robos incluyeron comida, víveres, y artículos de necesidad básica, pero también bienes electrónicos. El gobierno dispuso de las fuerzas de seguridad pública para dispersar el vandalismo. Hubo 160 arrestos. Por los actos de rapiña y vandalismo, la población de las colonias se organizó para vigilar sus pertenencias. También se presentaron fugas en prisiones.

La respuesta del gobierno fue relativamente rápida, pero con errores importantes. Cuatro horas después del suceso, con pocos muertos cuantificados, la Presidenta Bachelet convocó una rueda de prensa, informándole a la comunidad internacional que Chile no necesitaría ayuda. Sin embargo, 2 millones de personas fueron afectadas por el sismo, y 500,000 viviendas fueron inhabitables los primeros días. El gobierno comenzó la distribución de comida y ayuda vital alrededor del país.

A los pocos días, el gobierno anunció un acuerdo con los principales supermercados, que permitiría entregar víveres almacenados a la población afectada. También se reanudó el servicio del metro. Los puertos permanecieron cerrados por varios días. Después, la Presidenta

Bachelet hizo público el préstamo que Chile pidió a entidades financieras internacionales, y calculó que se necesitarían tres o cuatro años para la reconstrucción total del país.

Conforme pasaron los días, los alimentos se volvieron más escasos, por lo que se presentó una inflación muy importante. Los precios de comida, diría, agua, y de necesidades básicas similares, se dispararon.

Por otro lado, el tsunami escrito anteriormente observar en Ecuador, Colombia, la Antártida, Panamá, Costa Rica. Se extendió en alerta a los países del pacífico, que también llegó a Alaska. Lavaré el del mar en los días siguientes es del orden de 25 cm. Cabe destacar que la alerta de tsunami fue emitida antes por agencias internacionales y por la marina chilena, lo cual es reconocido como un error del gobierno

Se concluye que la respuesta de Chile al sismo fue más resiliente que la respuesta de Haití. Es necesario mencionar que fue fundamental que el sismo ocurriera durante la madrugada, hora en que la mayoría de la población se encuentra dormida y vulnerable ante la caída de edificios. De haber sido en el día, las víctimas hubieran sido aún menos. Desde hace décadas, se han actualizado los códigos de construcción de Chile, que es uno de los países latinoamericanos con mayor reconocimiento por sus ingenieros turistas. A diferencia de Haití, las pérdidas humanas fueron mucho menores, aunque grado de desarrollo, las respuestas económicas fueron mucho mayores. Se puede observar que las medidas fueron lógicas, efectivas, y razonables, por lo que la población chilena sufrió menos afectaciones.

## Las 4 Crisis del Japón, 2011



El 11 de marzo de 2011, ocurrió el sismo cerca de la costa de Tohoku, el japonés del pacífico. Tuvo una magnitud de 9.0 Mw, con epicentro 70 km costa afuera. El riesgo se tuvo ubicado de 2 km debajo de nivel del mar. Sucedió a las 14:46 hrs. Es el sismo más fuerte que ha impactado a Japón en la historia y es el síntoma destructor que se haya medido. Generó un tsunami con olas de hasta 40 m de altura y que viajaron hasta 10 km costa adentro.. Se calcula que movió el eje de la tierra entre 10:25 centímetros.

El tsunami causó accidentes nucleares, principalmente la fundición de tres reactores en el complejo nuclear de Fukushima Daiichi, ocasionando la emergencia de nivel siete y afectando la evacuación de cientos de miles de residentes de zonas aledañas. Ocurrió la falla de varios generadores eléctricos, y la explosión de al -3 reactores nucleares debido a la acumulación de gas hidrógeno después de la falla del sistema de enfriamiento. Provocó la evacuación de todos los residentes concentrados en un radio de 20 km. (United States Geological Survey, 2012)

Oficialmente, se contabilizaron 15,850 y cuatro muertes, 26,992 lesionados y 3155 desapariciones. También se contabilizaron 129,225 edificios totalmente colapsados, con

254,200 edificios cerca del colapso y 691,766 edificios parcialmente dañados. Tanto el sismo como el tsunami causaron un excesivo y severo daño estructural en el noreste de Japón, incluyendo alto daño a infraestructura carretera, de ferrocarril, así como incendios en diversas áreas y el colapso de una presa. Fue calificada como la crisis más grave desde 1945, afectando 4.4 millones de viviendas que se quedaron sin energía eléctrica y 1.5 millones más que se quedaron sin abastecimiento de agua potable. (Reuters, 2011)

Las estimaciones primarias se calcularon en el orden de 34.6 1000 millones de dólares. Sin embargo, la adición a la crisis sísmica de la crisis tsunámica, nuclear y económica ha conducido al Banco Mundial a estimar un costo total de 235 mil millones de dólares en pérdidas. Esto lo convierte en el desastre natural más caro de la historia del mundo.

La magnitud del sismo se había reportado inicialmente como de 7.9 Mw, pasando después a 8.8 Mw y finalmente a 9.0 Mw. (National Police Agency of Japan, 2012)

Se reportaron ciento de réplicas. Las más importantes fueron de 7.2, 7.0, 7.4, 7.2 y 4.5 Mw, respectivamente. De acuerdo con la ley de Omori, el número de réplicas disminuye gradualmente, aunque se estima que pueden continuar por años.

Un minuto antes de la llegada del sismo a Tokio, sistema de alerta, que incluye más de mil sismómetros, envió las alertas a millones. Se cree que este sistema salvó miles de vidas. La alerta llegó apenas cuatro segundos después de la detección de la primera onda P, o 31 segundos después de la ocurrencia del fenómeno.

La principal causa del sismo en las fronteras de la Placa del Pacífico, que se comenzó a mover debajo de la Placa Honshu. Debido a que se mueven algunos centímetros por año con respecto a sí mismas, y acumuló presión siente el desencadenamiento del sismo. Una ruptura en el suelo marítimo de varios kilómetros de longitud. Éste evento, fue inesperado, pues pocas veces las placas accidentadas generan sismos tan poderosos.

Se liberó una energía superficial de  $1.9 \times 10^{17}$  Joules, que se disipó como energía sísmica y tsunámica. La energía liberada casi duplicó la del sismo y tsunami de 9.1 Mw que se desató en el Océano Índico en el 2004, causando la muerte de 230,000 personas. La equivalencia es de 600 millones de veces la energía liberada por la bomba atómica.

Los efectos adversos que generó el sismo también incluyen la licuefacción de diversos suelos en las ciudades de Tokio, Urayasu, Chiba, Funabashi, entre otras. Aproximadamente 30 casas y edificios fueron destruidos, y 1046 quedaron dañados.

A los dos días, el volcán Shinmoedake, localizado en Kyushu, hizo erupción. Ya había tenido actividad en 2011, y se sospecha, aunque no se ha comprobado, que tiene correlación con el evento sísmico. (United States Geological Survey, 2011)

Las réplicas también dañaron las plantas nucleares de Higashidori y Rokkasho. Otra réplica de 6.6 Mw ocasionó el colapso de una estructura en la planta de Fukushima, matando a tres personas. Se registraron hasta 1887 réplicas de más de 4.0 Mw.

El tsunami causó en un principio olas de entre 5:08 metros, a un radio de 180 km del epicentro. El tsunami se propagó a través del pacífico, con alertas hacia todo el mundo, desde Alaska hasta Chile, entre todas las ciudades asentadas en el pacífico. La alerta fue emitida como un tsunami mayor, y se calcula que inundó 561 km<sup>2</sup> costa dentro de Japón. A comparación de tsunami del 2004 en el Océano Índico, la zona está más preparada y menos vulnerable ante esta magnitud. Según estudios de las universidades de Tokio, Yokohama y otras colaboradoras, se presentaron olas de más de 40 m, mientras que sólo el 58% de las personas asentadas en las áreas costeras, recibieron alertas de tsunami claras y rápidas. En ese cálculo que en cuarentena por ciento de las personas que no recibieron la alerta tsunámica, recibieron impacto del agua.

Tanto el tsunami como él mismo ocasionaron subsidencia es del orden de entre 30 y 120 cm a lo largo de Japón. (United States Geological Survey, 2011)

El grado y extensión del daño causado por el sismo y el tsunami resultante fue enorme. El daño máximo fue causado por este último. A pesar de que Japón invirtió por décadas miles de millones de dólares en paredes anti tsunami, muchos simplemente fueron barridas y colapsaron posteriormente.

Se estima que 230,000 automóviles fueron dañados o destruidos por el desastre.

Todos los puertos de Japón cerraron inmediatamente después del sismo. Algunos puertos cerca de Tokio, pudieron reincorporarse a sus actividades rápidamente sin embargo, más de 15 puertos resultaron dañados, afectando las actividades comercial, de exportación pesquera. Además, la presa de irrigación de Fuinama falló.

Por otro lado, de las 1.5 millones de personas que no contaron con agua potable después del sismo, apenas pudieron reabastecerse menos de medio millón dentro de los primeros 10 días posteriores a la tragedia. El servicio de electricidad sí se pudo restablecer casi totalmente en los días posteriores al evento. Sin embargo, la línea de transmisión eléctrica sufrieron importantes daños, especialmente las de Nagano y Shizuoka. Se calcula que habrá anomalías eléctricas por años.

Se presentaron incendios en infraestructura críticas energéticas, como la refinería de la Cosmo Oil Company. Se calcula que se incendiaron unos 220,000 barriles por día. También la infraestructura del gas natural fue dañada severamente.

El caso de las plantas nucleares, los complejos de Fukushima Daiichi, Fukushima Daini, Onagawa y Tokai, que suman un total de 11 reactores, fueron apagados inmediatamente después del sismo. En general, se presentó un calentamiento severo, por la falta de empleadores. En Fukushima, las olas del tsunami arrasaron con las paredes de protección, destruyendo los sistemas acumuladores de bio diesel, generando explosiones y una fuga radiactiva. Las de reactores de la planta fueron fundidos y continuaron liberando agua de enfriamiento, generando pánico y la necesidad de evacuación de la población. Los niveles de radiación 1000 veces mayores a los normales, por lo que se tuvo que declarar el estado de emergencia. La crisis nuclear no se había desatado de esta forma desde el accidente de Chernobil. Se espera que tengan que tomar medidas para los próximos años, especialmente el tratamiento del suelo contaminado parcialmente.

Las operaciones de rescate fueron relativamente positivas, aunque se debe tomar en cuenta el tamaño mayor de la crisis. (United States Geological Survey, 2011)

Sin embargo, economía se vio severamente afectada, pues después de sufrir una recesión por varios años, en los que en todo una deflación continua, se paró la productividad por semanas. Se ha catalogado la respuesta del gobierno como lenta e insuficiente, claramente rebasada por estos acontecimientos.

Se calcula que la reconstrucción de Japón requerirá la quema de unos 300,000 barriles de petróleo por día. Esta reactivación económica, aunque muy cara, se ha visto positivamente por algunos economistas, que esperan un cambio en la política de gasto e inversión del gobierno, el futuro se traducirá en una reactivación dinámica de la economía japonesa.

## Sismo en México, 2012

El 20 de marzo de 2012 se presentó un sismo de magnitud 7.4 Mw a las 12:02 hrs. Su epicentro se encontró acerca de Ometepec, en la frontera entre los estados de Guerrero y Oaxaca. Su hipocentro se encontró entre 15 y 20 km debajo del nivel del mar, causando una importante sacudida a lo largo de la costa del Pacífico. Se contabilizaron dos personas fallecidas, y unas 30 mil casas dañadas en los estados mencionados. (United States Geological Survey, 2012) (Servicio Sismológico Nacional, 2012)

A diferencia del sismo de 1985, de mucho mayor magnitud y que ocasionó unos muertos, la Ciudad de México se ha preparado desde hace décadas para enfrentar adversidades de esta naturaleza y de esta magnitud. Éste el movimiento de mayor magnitud desde la ocurrencia del ya mencionado.

Entre las principales afectaciones se encuentran daños estructurales en pocos edificios, conatos de incendios, caos vial, daño a la estructura de pocos puentes, suspensión del servicio de abastecimiento, y caída en el sistema de telecomunicaciones. (Servicio Sismológico Nacional, 2012) (Notimex, 2012)

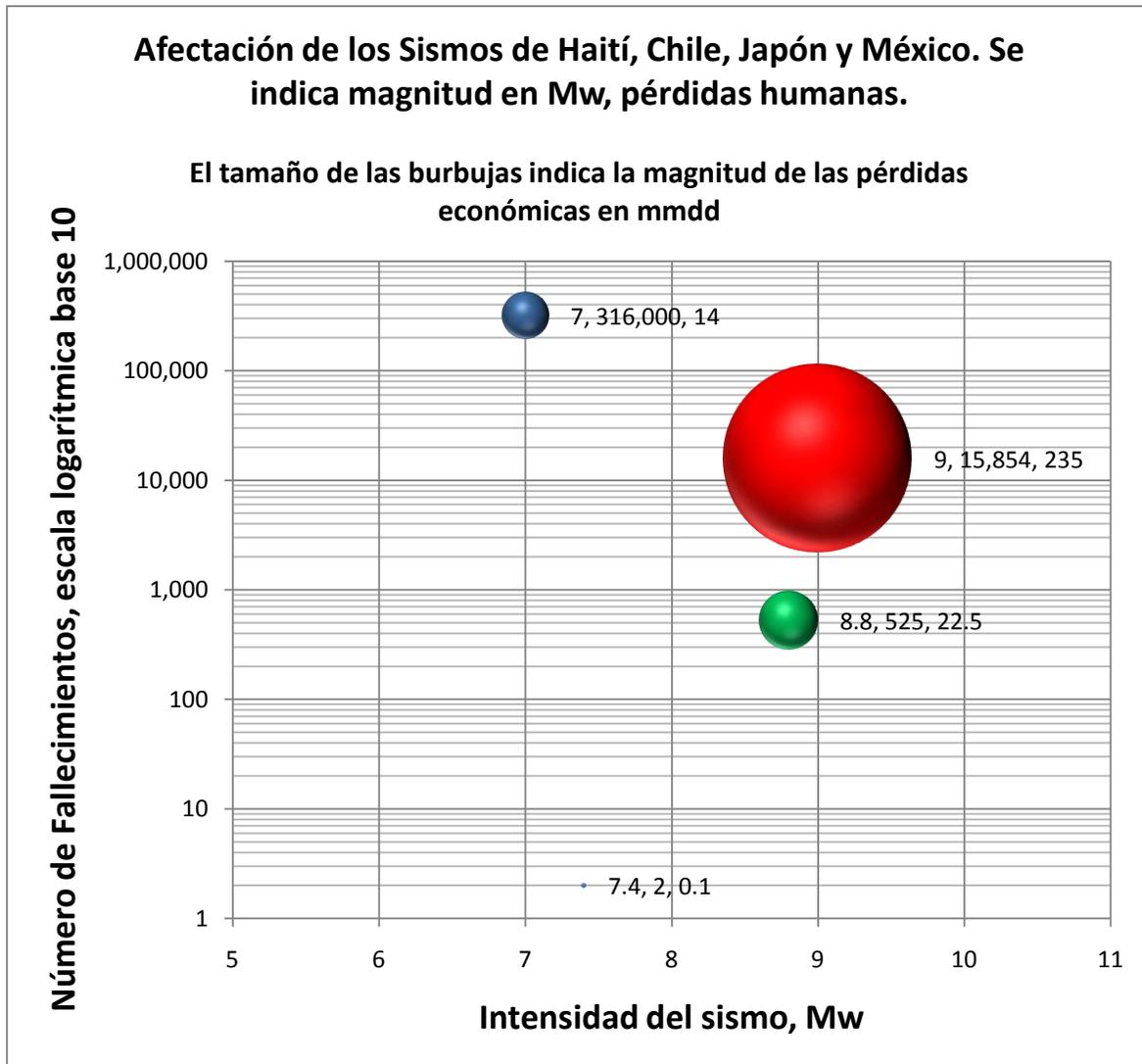
En esta ocasión, las redes sociales activas para dar aviso de la ocurrencia del sismo. Sin embargo, el papel del servicio sismológico nacional fue cuestionado, debido a las continuas informaciones contradictorias y correctivas que emitió en los minutos y horas posteriores al evento. Se ha calculado que las afectaciones serán del orden máximo de 100 millones de dólares. (Vervaeck & Robles, 2012)

A partir de entonces, se ha intensificado la actividad del volcán Popocatepetl, constando de misiones continuas de fumarolas. Asimismo, se han registrado más de 700 réplicas, de las cuales la más fuerte una magnitud de 6.0 Mw.

El comportamiento de la ciudad fue mucho más resiliente que aquel en 1985, aunque también se debe tomar en cuenta la magnitud fue menor. A pesar de ello, la conducta de la población en coordinación con la protección civil fue ejemplar.

## Comparación Final entre Eventos

A continuación se presenta una comparación entre los sismos de magnitud 7.0 en Haití (2010), 8.8 en Chile (2010), 9.0 en Japón (2011) y 7.4 en México (2012). (United States Geological Survey, 2012)



# El Sistema Hidráulico de la Ciudad de México y sus Riesgos

---

## **Descripción del Sistema**

### **La Ciudad de México**

#### ***Ubicación Geográfica***

Según el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), la extensión territorial de sus 1479 km<sup>2</sup> que ocupa la Ciudad de México, se localiza en la subprovincia de Lagos y Volcanes del Anáhuac, pertenecientes al Eje Neovolcánico. Ocupa la mayor parte de los vasos drenados de los lagos de Texcoco, Xochimilco y Chalco.

Está limitado al norte por la sierra de Guadalupe. Contiene en su centro-oriental la sierra de Santa Catarina, mientras que en la planitud del centro del valle se localiza la mayor parte de los habitantes del Distrito Federal. Al sureste se encuentra la zona de peñones que colinda con Puebla, mientras que al oriente se encuentra la sierra del Ajusco, perteneciente al Eje Neovolcánico (o sierra de Chihinauhtzin). Finalmente, al este colinda con el Estado de México. (Instituto Nacional de Geografía y Estadística, 2012)

#### ***Fisiografía***

El Distrito Federal presenta diferentes topoformas, que se agrupan en sierra volcánica, lomeríos, meseta basáltica y llanuras –aluviales y lacustres-.

#### ***Geología y Edafología***

“Hace 600,000 años, el Valle de México era una cuenca abierta que drenaba hacia el sur por dos principales ríos, limitada al oriente y el poniente por sierras de origen volcánico. Esto provocó grandes depósitos de material aluvial en el fondo del Valle. En esa época emergió al sur la sierra del Chichinauhtzin, de origen volcánico, formada por basaltos fracturados y muy permeables por las fracturas. (Capella Vizcaíno, 2000)

Este fenómeno convirtió al Valle de México en una cuenca cerrada donde se formaron los lagos de Zumpango, Xaltocan, Texcoco, Xochimilco y Chalco. Estos lagos permitieron el

depósito de arcillas finas muy impermeables en el fondo, formando una capa de depósitos lacustres de unos 40 m de espesor y un alto contenido de agua. Paralelamente, hace 600, 400 y 200 mil años hubo periodos de actividad volcánica que provocaron el depósito de cenizas, en general permeables, en las faldas de las sierras al poniente y al oriente del Valle. Durante períodos largos de sequía, los lagos quedaban prácticamente secos y sus flujos reconocían el lago de Texcoco donde el agua se evaporaba. Esta es la causa probable de la alta salinidad que tienen las arcillas de esa zona y que en algunos puntos duplica la del agua de mar. La zona sobre los depósitos lacustres es la que se encuentra expuesta a hundimientos del suelo.

El acuífero del Valle de México está formado por los depósitos aluviales, los de cenizas volcánicas y las formaciones de basalto fracturado al sur. Los depósitos aluviales se encuentran cubiertos en su mayor parte por las arcillas impermeables de los depósitos lacustres que lo convierten en un acuífero confinado. Las zonas de recarga del acuífero son principalmente las formaciones de basaltos al sur y las de cenizas volcánicas al oriente y poniente.

La figura siguiente muestra un corte esquemático del Valle de oriente a poniente.”



(Capella: 2000, 11-12)

### **Clima**

La mayor parte del clima es templado, especialmente por las altas montañas que impiden el paso de las nubes de lluvia provenientes de las costas. No existen precipitaciones

sobreabundantes, pues la precipitación anual total es de 600 mm para la región seca y 1200 mm para la región húmeda. La temperatura media es de 16°C, con una mínima de 5°C y con una máxima de más de 25°C.

También se presentan minoritariamente el clima seco y semiseco, y el templado húmedo.

### ***Hidrografía***

El Distrito Federal pertenece en su mayor parte a la Región Hidrológica del Río Pánuco, Cuenca del Río Moctezuma. Además, hacia el oeste, tiene una pequeña parte perteneciente a la R.H. del Río Lerma, Cuenca de Toluca. Tanto en el suroeste como en el sureste, pertenece a la R.H. del Río Balsas, Cuenca del Balsas-Mezcala.

En el norte de se encuentra el río de los Remedios, y al sur de éste se encuentra el Río Consulado, del que se desprende el Río San Joaquín y el Río Tecamachalco. Más al sur, se encuentra el Río de la Piedad, unido con el Río Tacubaya y el Río Becerra. Debajo del Piedad, se encuentra el Río Churubusco, del que emanan los ríos Mixcoac, Barranca del Muerto, Tequilazgo, San Ángel y Magdalena. Más al suroeste se encuentra el río Eslava. Hacia el oriente se encuentra el Canal Nacional, que tiene contacto hacia el extremo oriente con el Canal de Chalco y el Río Amecameca.

Completan el mapa hidrológico del Distrito Federal las Chinamperías de Xochimilco, Tláhuac y Mixquic, además de los humedales de Tláhuac. (Instituto Nacional de Geografía y Estadística, 2012)

### ***División Política***

El Distrito Federal es la sede de los poderes de la Federación, además de los órganos locales, por lo que tiene una doble naturaleza. Se divide en 16 delegaciones y los Delegados se eligen por sufragio desde el año 2000. No cuenta con cabildos, sino con Comités Ciudadanos definidos a partir de unidades territoriales.

El territorio capitalino se divide en 16 delegaciones. Cada una es encabezada por un jefe delegacional desde el año 2000, elegido por sufragio universal. A diferencia de los municipios, las delegaciones no tienen cabildos. En su lugar, la Ley de Participación Ciudadana del Distrito Federal contempla la conformación de Comités Ciudadanos por unidades territoriales.

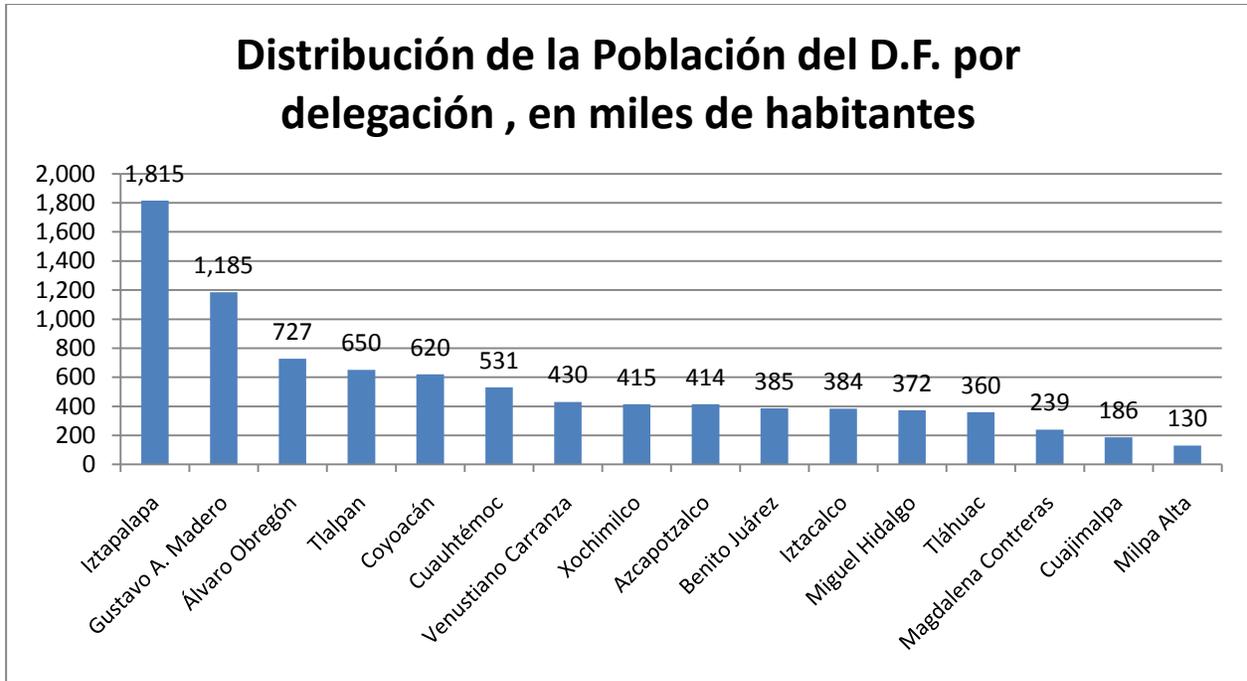
## **Población**

El Distrito Federal, con una población cercana a los 9 millones de habitantes, comparte la Zona Metropolitana de la Ciudad de México con el Estado de México, que tiene 13 millones de habitantes. Presenta en sus 16 delegaciones contaminación, crecimiento demográfico e inseguridad, por lo que la pobreza y la economía informal son una constante.

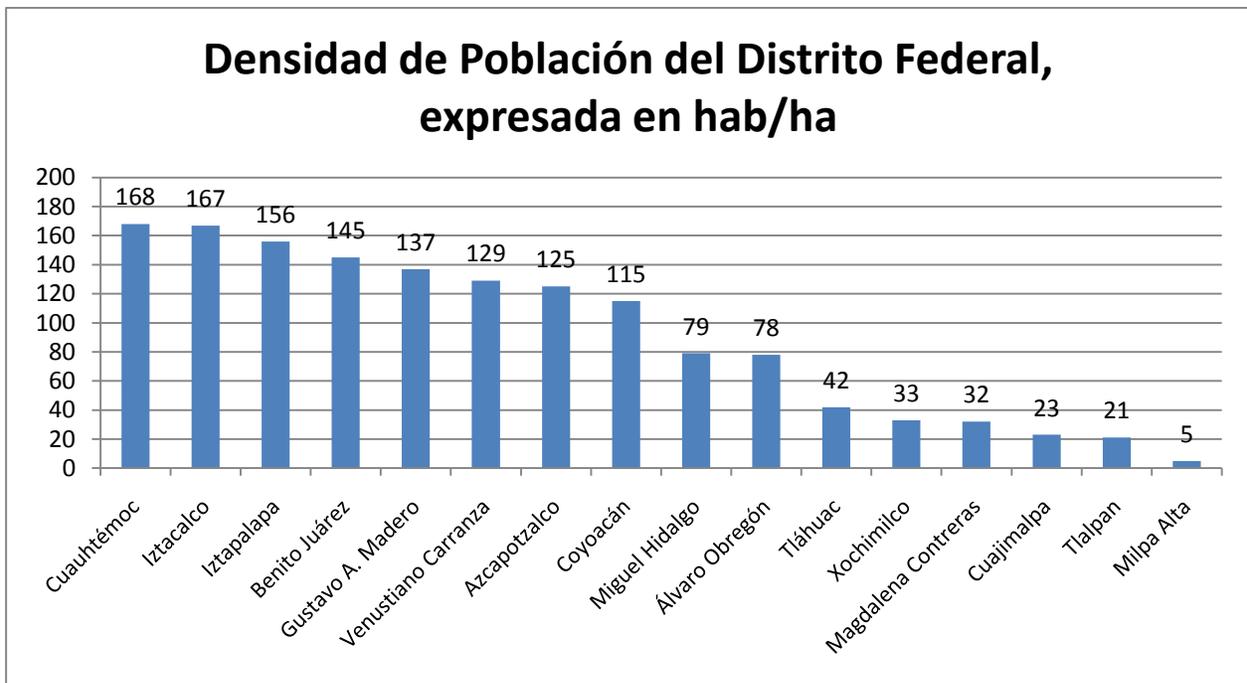
De acuerdo con las cifras oficiales que maneja el Sistema de Aguas de la Ciudad de México, la evolución del tamaño de la población del Distrito Federal es el que sigue, con estimaciones hasta el año 2020: (Sistema de Aguas de la Ciudad de México, 2011)



Es igualmente importante contemplar la distribución de la población por Delegación del Distrito Federal:



Finalmente se presenta la densidad de población del Distrito Federal.



## ***Historia del Manejo del Agua en la Ciudad de México***

### **Época Prehispánica**

- 50 millones de años      Duración del periodo de intensa actividad volcánica en el que se forma la Cuenca de México.
- 6500-750 a.C.      Ocupación de Zohapilco, asentamiento que se benefició de la riqueza biológica de la zona lacustre.

### **Época Posclásica**

- 900-1521 d.C.      La cuenca incluía siete lagos de diferentes propiedades, altimetría y tamaño: Apan, Techac, Tecocomulco, Zumpango, Xaltocan, Texcoco, y Chalco-Xochimilco.
- 1300 d.C.      Se construye la calzada de Tenayuca, que funcionaba también como dique. Poco después de construyó la calzada de Nonoalco.
- 1325 d.C.      Fundación de la ciudad de México-Tenochtitlan.
- 1429 d.C.      Inundaciones recurrentes.
- 1432 d.C.      Se termina la calada de Tepezac.
- 1432 d.C.      Caída de Azcapotzalco; los mexicas construyen la calzada de Iztapalapa.
- 1435 d.C.      Canalización artificial del río Cuauhtitlan
- 1449 d.C.      Inundaciones recurrentes.
- 1449 d.C.      Construcción del Albarradón de Nezahualcáyotl, separando el lago de Texcoco del de México.
- 1466 d.C.      Nezahualcáyotl construye el acueducto que iba de Chapultepec a México-Tenochtitlan.
- 1499 d.C.      Construcción del Albarradón de Ahuízotl, con el fin de evitar más inundaciones.

### **Época Colonial**

- 1536      Construcción del acueducto Santa Fe-Fuente de Mariscal.
- 1555      Primera inundación en la época colonial e intento de restauración del Albarradón de Nezahualcáyotl. Hubo otras tantas inundaciones en 1580, 1607, 1615 y 1623.
- 1607-1608      Enrico Martínez dirige las obras del Socavón de Nochistongo, primer desagüe artificial de la Cuenca.
- S. XVII y XVIII      Construcción de acueductos para uso como fuente de agua potable para la Ciudad de México.

- 1620-1790 Construcción del Acueducto de Arcos de Belén.
- 1623 El Tajo de Nochistongo es clausurado por órdenes del virrey conde de Gelves.
- 1629-1634 Una de las peores inundaciones de la historia de la Ciudad.
- 1640 Se reanudan los trabajos en Nochistongo para convertirlo en un Tajo a cielo abierto.
- 1789 Se concluye la salida de Nochistongo, a tajo abierto y con más profundidad.

### **Siglo XIX**

1857. Francisco de Garay presenta un proyecto para generar transporte, canalización e irrigación de la Ciudad a partir del agua del valle. También se propone la desecación de los lagos.
- 1878 Comienzan los trabajos de un nuevo sistema de drenaje para la Cuenca de México, conformado por el Gran Canal del Desagüe y el Túnel de Tequixquiac.
- 1886-1900 Se construye el Gran Canal, el Túnel de Tequixquiac y otras obras para evitar inundaciones.
- Fines de siglo Comienzan a utilizarse caños de barro cocido, plomo, fierro y piedra para la distribución y abastecimiento de agua potable.
- 1879 Empieza a funcionar el primer abastecedor de agua potable subterráneo de la ciudad.

### **Siglo XX**

- 1900 Se inaugura el Túnel de Tequixquiac.
- 1906 Comienza la construcción del acueducto que transportaría agua de los manantiales de Xochimilco a la ciudad de México. Se cava en Nativitas el primer pozo profundo de la ciudad, que alcanza los nueve metros de profundidad.
- 1920's La ciudad vuelve a inundarse.
- 1927 Se excavan pozos con bombas en los manantiales de San Luis Tlaxialtemalco.
- 1930 Se extraía agua de 350 pozos profundos.
- 1936 Se perforan los primeros 18 pozos profundos, de entre 100 y 200 m, lo que marca el comienzo de la explotación intensiva del manto acuífero.
- 1937-1942 Se construye un túnel adicional al de Tequixquiac.
- 1950 Se extraía el agua de 700 pozos.
- 1950's Graves inundaciones provocadas por las intensas lluvias.
- 1951 Se inaugura el Sistema Lerma.

- 1952 Se crea la Comisión Hidrológica del Valle de México, dependiente de la Secretaría de Recursos Hidráulicos.
- 1953 Se establece la Dirección General de Obras Hidráulicas del Distrito Federal.
- 1967 Comienzan los trabajos del drenaje profundo.
- 1956 Se concluye el sistema de pozos Chiconautla, al norte de la ciudad.
- 1975 Comienza la construcción del Drenaje Profundo.
- 1976 Empiezan los trabajos del Sistema Cutzamala.
- 1980 La pendiente del Gran Canal, que permitía el escurrimiento de las aguas, ha pasado de los 19 cm/km que tenía en 1910, a 0 cm/km.
- 1990's Aumento sustancial en cantidad y proporción de hundimientos en la Ciudad. (Vela, 2004)

### **Siglo XXI**

- 2000's La pendiente del Gran Canal se vuelve negativa.
- 2008 Inundaciones en la zona del Lago de Chalco y desbordes en el río de la Compañía.
- 2010 La ciudad de México requiere de 43 metros cúbicos de agua por segundo. (Espino de la O, 2011)
- 2011 Presentación del Programa Hídrico Visión 2030 para la Región Administrativa XIII, Valle de México y Sistema Cutzamala
- 2011-2012 Una de las peores sequías de los últimos 70 años.
- 2012 Terminación de la construcción del Túnel Emisor Oriente, con capacidad de 150 m<sup>3</sup>/s. Inicio de la ampliación del Sistema Cutzamala.

## Infraestructura de Abastecimiento

Se utilizó el Compendio 2010 del Sistema de Aguas de la Ciudad de México, para obtener la información de esta sección.

### Oferta

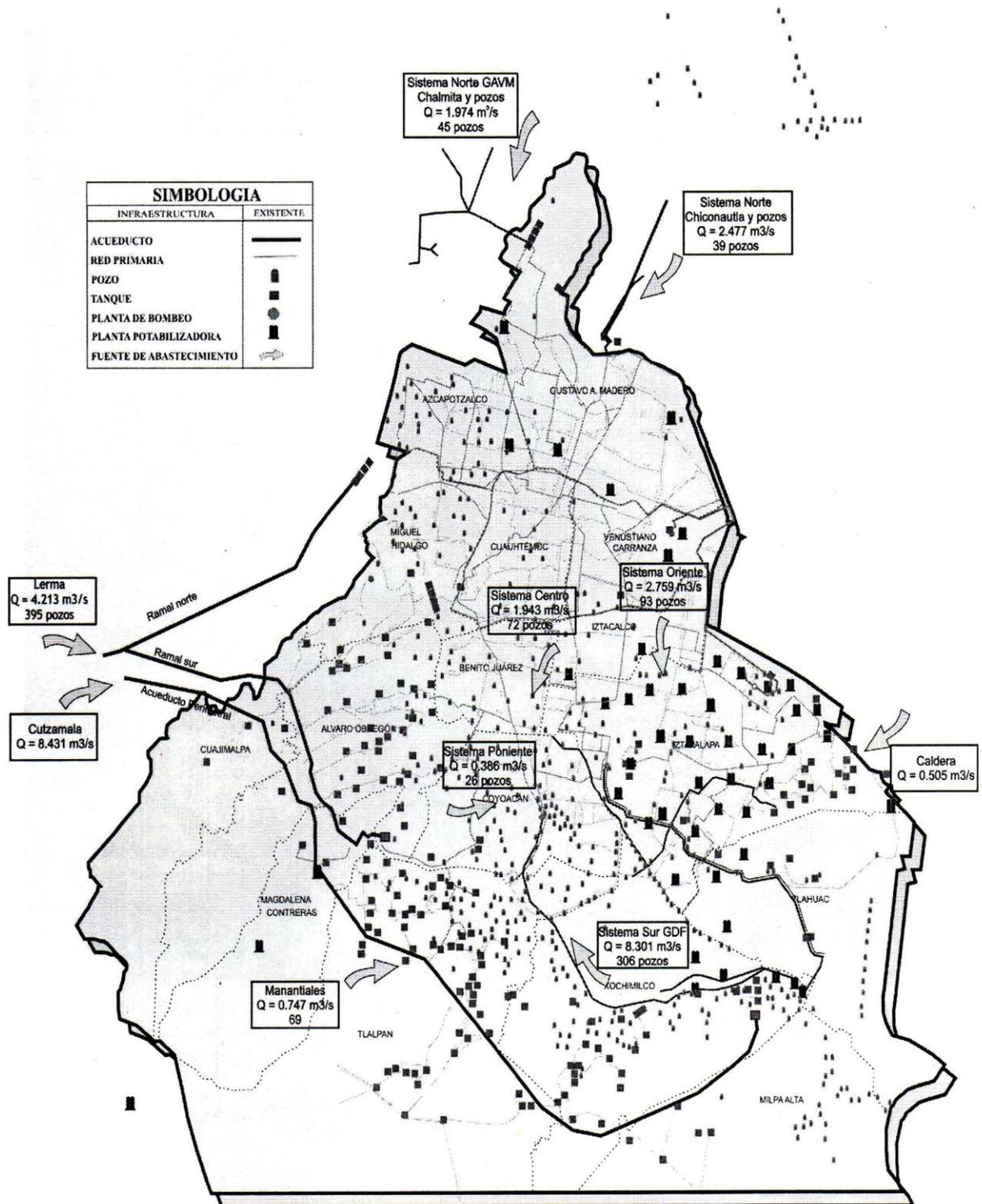
El agua potable suministrada a los habitantes de la Ciudad de México proviene principalmente del agua subterránea –pozos particulares y municipales, manantiales y sistemas de pozos del sureste y norte del Valle de México, además de la Cuenca del Río Lerma- y del agua superficial –Sistema Cutzamala y Río Magdalena-. Se recibe un gasto promedio de 31.2 m<sup>3</sup>/s.

Se ha desarrollado una infraestructura que cuenta con obras e instalaciones integradas por los siguientes componentes:

- 1273 kilómetros de red primaria, con diámetros que van de 20 a 72 pulgadas.
- 11,971 kilómetros de red secundaria, con un diámetro menor de 20 pulgadas
- 34 kilómetros de acueducto perimetral
- 533 kilómetros de acueducto líneas de conducción primarias, que llevan al agua potable desde la zona de captación hasta los tanques de almacenamiento
- 857 kilómetros de tanques de almacenamiento, es o una capacidad total de 1,660,972 metros cúbicos
- 268 plantas de bombeo, con una capacidad instalada de 70.8 metros cúbicos por segundo
- 48 plantas potabilizadoras, de las cuales 40 se encuentran a pie de pozo
- 15 plantas cloradoras
- 976 pozos, con una capacidad instalada de 36.9 metros cúbicos por segundo
- 69 manantiales
- 33 garzas
- 435 dispositivos de cloración
- 10 trifurcaciones
- 98% de cobertura (Sistema de Aguas de la Ciudad de México, 2011)

A continuación se presenta el Plano General del Sistema de Agua Potable:

## Plano General del Sistema de Agua Potable



También se presenta la Infraestructura de Agua Potable por delegación:

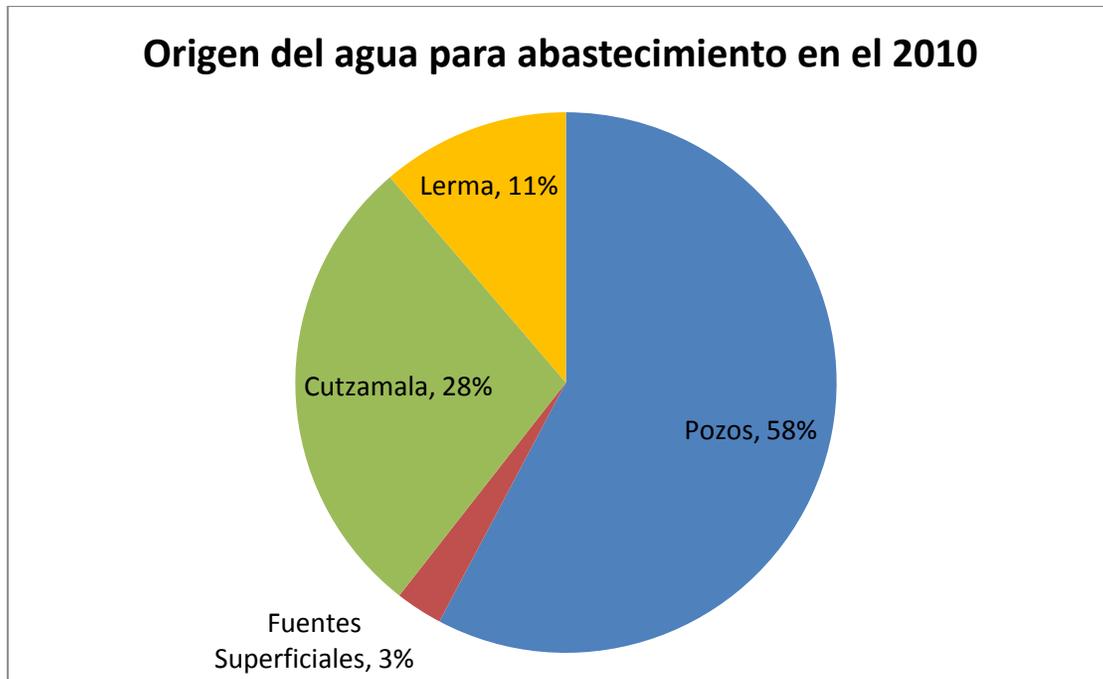
	Red primaria (km)	Red secundaria (km)	Tanques de agua potable	Plantas de bombeo	Potabilizadoras	Pozos
Álvaro Obregón	81.38	818.03	81	19		32
Azcapotzalco	67.16	550.43		3	1	36
Benito Juárez	99.46	802.09				26
Coyoacán	67.07	961.18	3	5		81
Cuajimalpa	33.89	270.83	24	5		3
Cuauhtémoc	80.55	679.86				6
Gustavo A. Madero	151.98	1667.41	25	26	4	9
Iztacalco	49.1	505.09		1	2	8
Iztapalapa	249.68	2045.21	41	32	28	80
Magdalena Contreras	33.51	268.89	31	8	2	6
Miguel Hidalgo	67.86	708.22	13	4		31
Milpa Alta	18.76	236.13	21	7		24
Tláhuac	73.74	458.69	7	10	3	22
Tlalpan	91.22	777.75	56	34		89
Venustiano Carranza	59.83	623.68	1	3	2	7
Xochimilco	48.23	598.17	41	25	5	82

A continuación se encuentra el esquema que describe la capacidad y eficiencia de plantas potabilizadoras para el Distrito Federal –la mayoría de ellas se encuentran en la delegación Iztapalapa:

Nombre	Ubicación	Capacidad instalada (m <sup>3</sup> /s)	Eficiencia (%)
<b>40 p. potabilizadoras a pie de pozo</b>	Varias delegaciones	2399	83%
<b>La Caldera Nueva</b>	Edo. México	750	93%
<b>Almoleya</b>	Edo. México	580	60%
<b>Xaltepec</b>	Iztapalapa	540	78%
<b>Santa Catarina</b>	Tláhuac	500	30%
<b>Acueducto Santa Catarina</b>	Iztapalapa	250	38%
<b>Agrícola Oriental</b>	Iztapalapa	240	75%
<b>Río Magdalena</b>	M. Contreras	210	100%
<b>Río Magdalena 2</b>	M. Contreras	200	98%

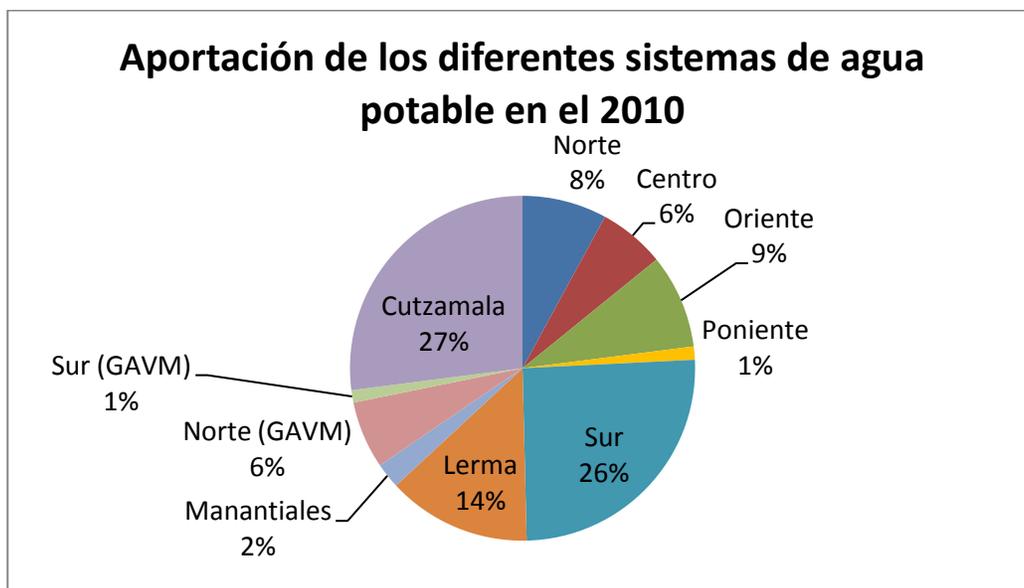
## Fuentes de Abastecimiento

El origen del abastecimiento es como sigue:



Complementando la gran cantidad de agua que se extrae del subsuelo, se importa agua a la Cuenca de México a través de los sistemas Lerma y Cutzamala. Estos son conectados por el Acueducto Perimetral, que se construyó a partir de la descarga del túnel Analco San José. Es un túnel de entre 3.2 y 4 metros de diámetro, con una longitud de 33.7 km que va de la Delgación Cuajimalpa a Xochimilco. El objetivo es distribuir con eficiencia el agua del Cutzamala, especialmente entre los habitantes instalados entre las zonas sur y oriente.

La aportación de los diferentes sistemas de agua potable fue en el 2010:



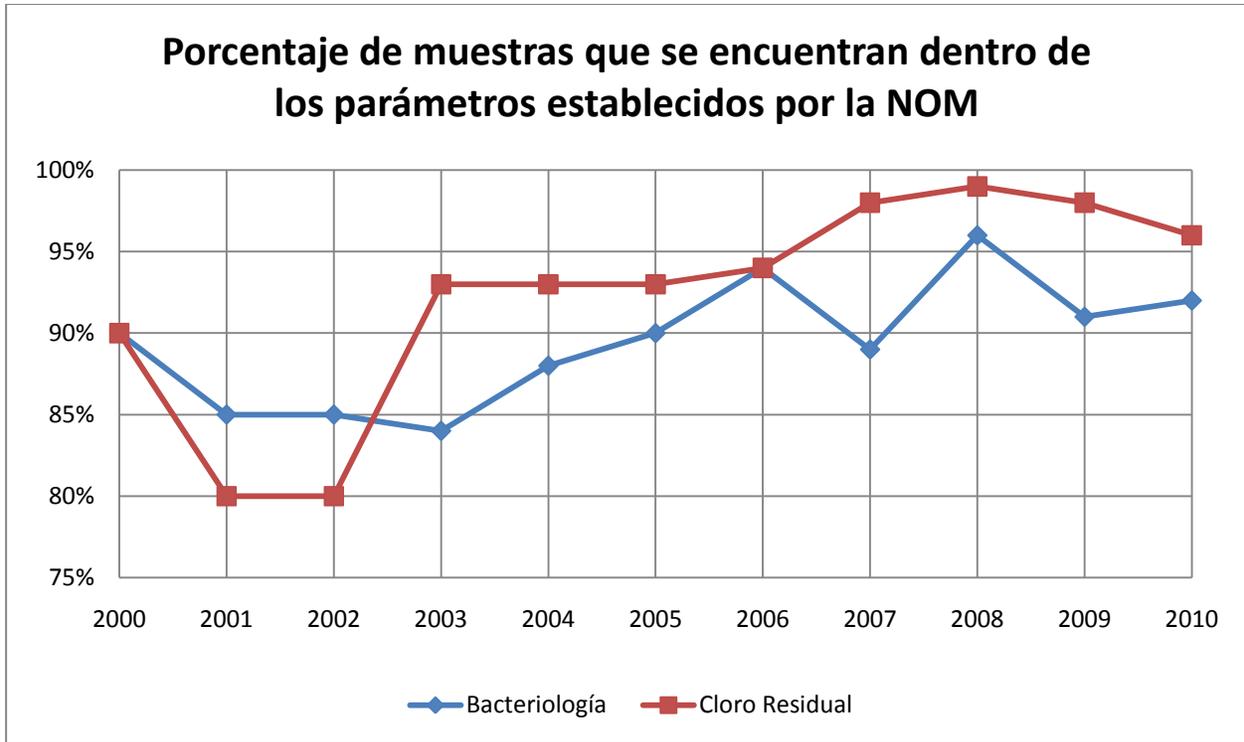
También se presenta el gasto abastecido y su correspondiente dotación por delegación:

	<b>Gasto Abastecido (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Dotación (L/hab/d)</b>
<b>Álvaro Obregón</b>	2.61	310
<b>Azcapotzalco</b>	1.63	339
<b>Benito Juárez</b>	1.67	373
<b>Coyoacán</b>	2.68	373
<b>Cuajimalpa</b>	0.65	303
<b>Cuauhtémoc</b>	2.15	349
<b>Gustavo A. Madero</b>	3.33	243
<b>Iztacalco</b>	1.42	320
<b>Iztapalapa</b>	4.95	237
<b>Magdalena Contreras</b>	0.97	350
<b>Miguel Hidalgo</b>	1.72	397
<b>Milpa Alta</b>	0.45	298
<b>Tláhuac</b>	0.92	221
<b>Tlalpan</b>	2.91	386
<b>Venustiano Carranza</b>	1.6	320
<b>Xochimilco</b>	1.57	328

(Sistema de Aguas de la Ciudad de México, 2012)

### **Calidad**

La vigilancia de la calidad del agua se realiza en distintas fases del proceso de abastecimiento: explotación, conducción, almacenamiento y distribución. En los últimos años se observa una tendencia satisfactoria en la calidad del agua bacteriológica y en concentración de cloro.



En los últimos años, se han realizado entre 19 mil y 52 mil análisis fisicoquímicos de la calidad del agua. Además se han realizado entre 24 mil y 51 mil lecturas de cloro. Se han realizado entre mil y 6 mil inspecciones sanitarias en instalaciones de agua potable.

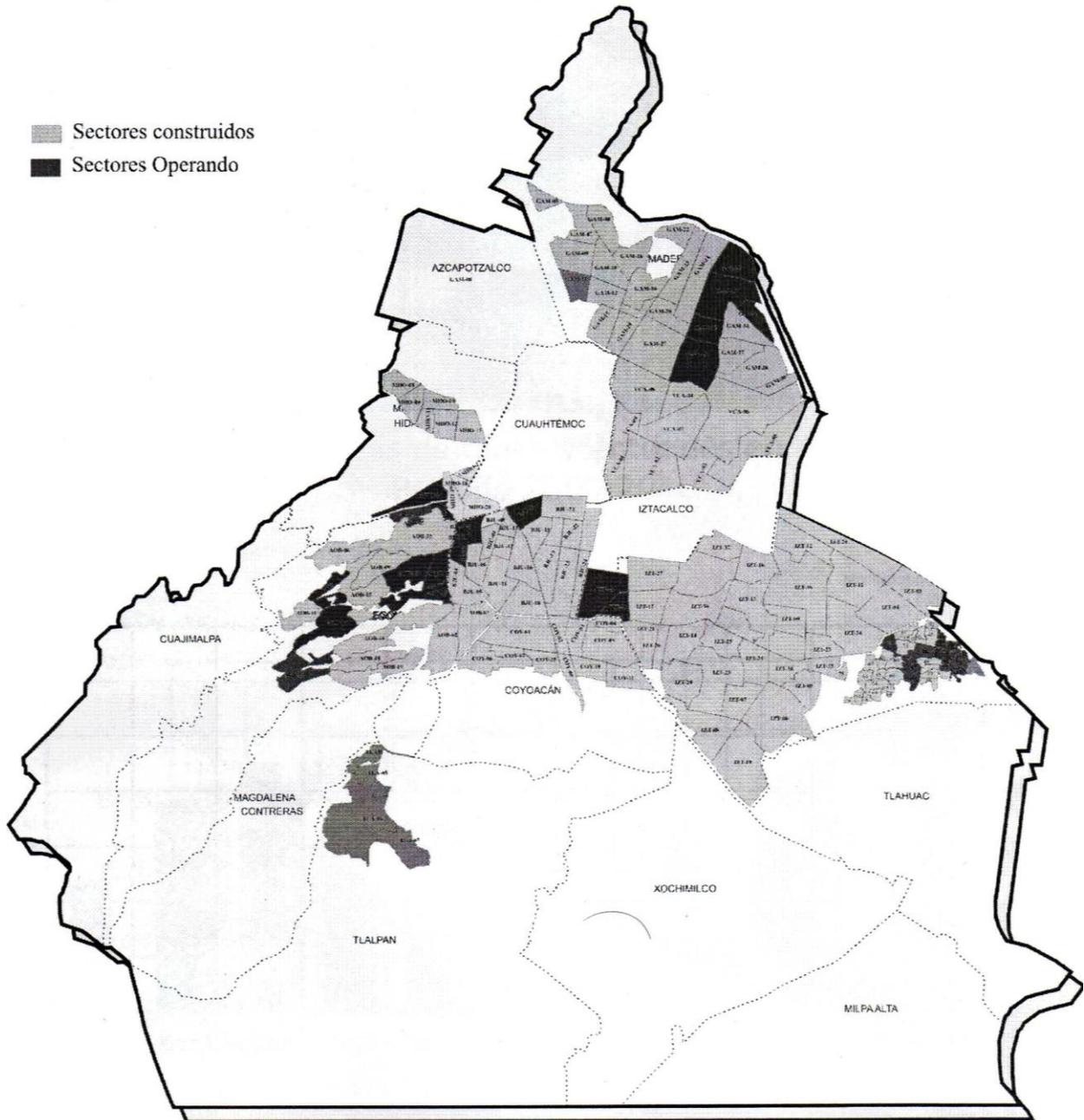
### **Sectorización y Macrosectorización**

Desde hace años, se implementó la política de sectorizar –dividir la red de agua potable– para hacer más eficiente la distribución, con una inversión mínima. Hasta el 2009, se llevaba un avance del 51%, con 172 sectores construidos de un total de 336. Actualmente se construyen 7 macrosectores para distribuir el agua regionalmente, por medio de la operación automatizada de válvulas de control en tiempo real. Se controlarán caudales y reducirán presiones en zonas características, mejorando las condiciones de servicios en zonas con deficiencia de abastecimiento y alto índice de fugas a causa de las sobrepresiones.

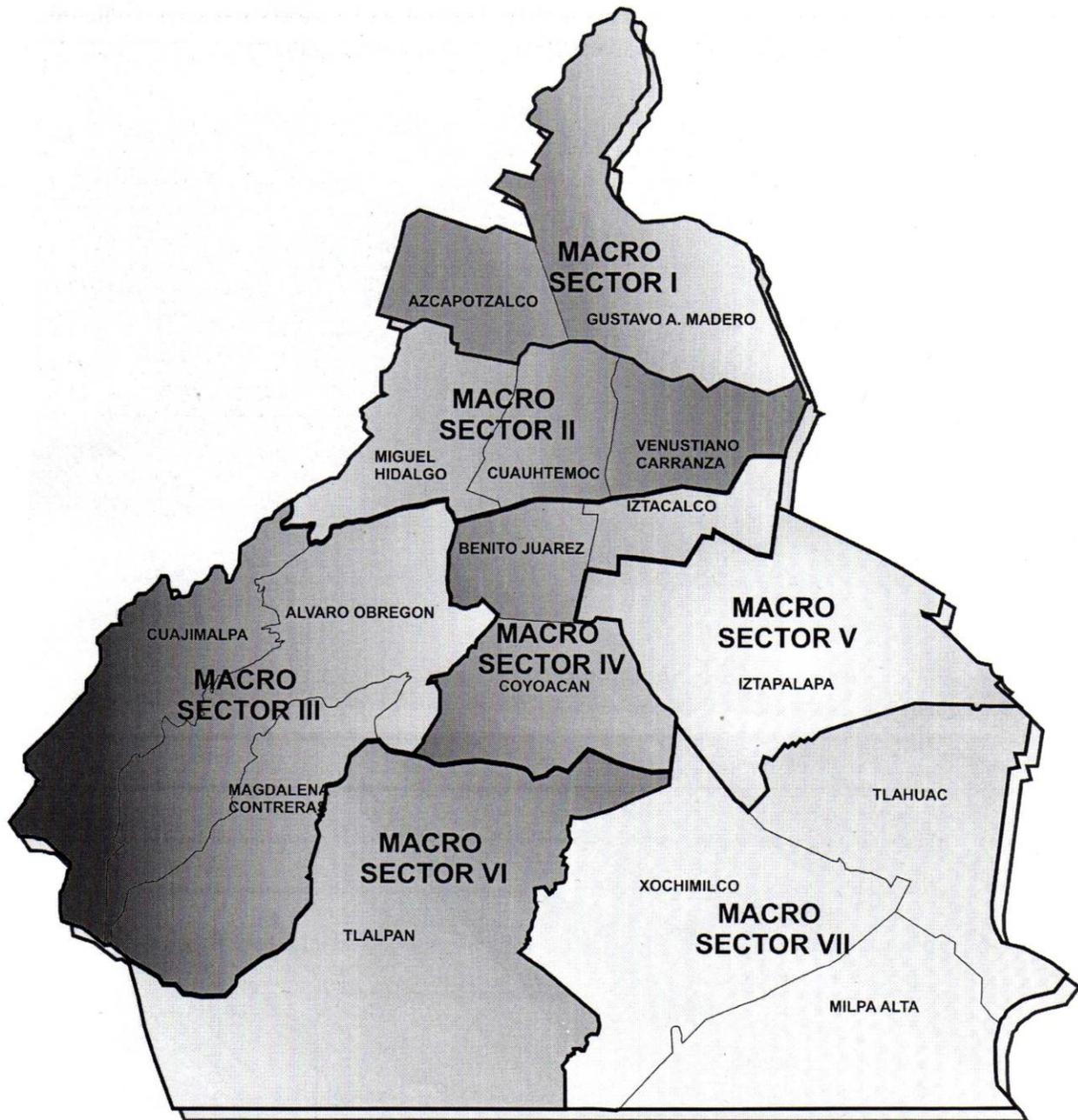
Las zonas de mayor cobertura de sectorización son la centro-sur (delegaciones Benito Juárez, Coyoacán y parte de Álvaro Obregón), oriente (Iztapalapa) y nor-oriente (Venustiano Carranza y Gustavo A. Madero).

A pesar de que ya están construidos 172 sectores, apenas están operando 20, por lo que los restantes se pondrán en marcha en los próximos meses.

A continuación se presenta el plano de Sectorización de la Red de Distribución de Agua Potable:



En 2009 se comenzó el proyecto de Macrosectorización de la red del Distrito Federal en 7 subsistemas independientes, a partir de los cuales se implementarán los 336 sectores propuestos inicialmente. Esto para distribuir de forma controlada los gastos de alimentación de los sectores construidos y por construir.



### **Fugas**

Las fugas constituyen uno de los principales problemas históricos del sistema. Se debe recordar que la ecuación simplificada que se utiliza es: (Capella Vizcaíno, 2000)

$$\text{Abastecimiento} = \text{Consumo} + \text{Fugas en la Red}$$

Según el estudio del informe del Ing. Capella, hacia el 2000 se estimaba un consumo por habitante por día de 220 Litros, incluyendo el uso no doméstico. Se calculó un consumo de:

$$\text{Consumo} = 220 \text{ L/hab/día} * 8.7 \text{ mill. hab.} = 22.15 \text{ m}^3/\text{s}$$

Con un abasto de 35 m<sup>3</sup>/s, se aproximó la cantidad de fugas existente:

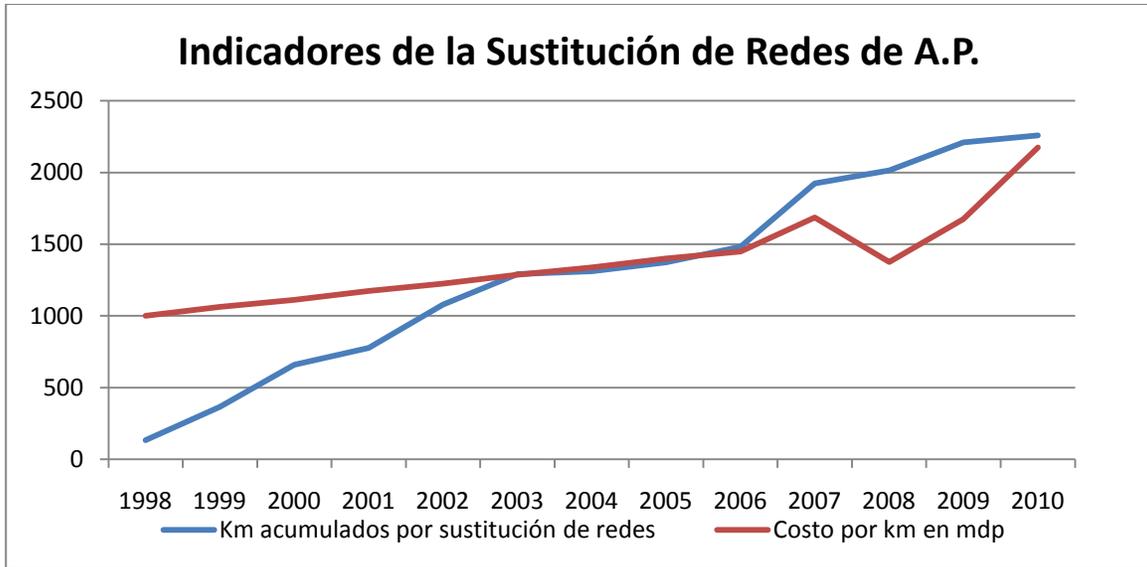
$$\text{Fugas} = \text{Abasto} - \text{Consumo} = 35 - 22 = 13 \text{ m}^3/\text{s} \approx 37\%$$

A continuación se presenta el número de fugas en el 2010, por delegación. (Sistema de Aguas de la Ciudad de México, 2011)

	Número de fugas en 2010	Incidencia 2010 (%)
Álvaro Obregón	5342	16%
Azcapotzalco	1507	5%
Benito Juárez	1108	3%
Coyoacán	3877	12%
Cuajimalpa	756	2%
Cuauhtémoc	946	3%
Gustavo A. Madero	4741	15%
Iztacalco	1087	3%
Iztapalapa	3958	12%
Magdalena Contreras	1486	5%
Miguel Hidalgo	2127	7%
Milpa Alta	96	0%
Tláhuac	496	2%
Tlalpan	3386	10%
Venustiano Carranza	972	3%
Xochimilco	786	2%

### **Sustitución de Redes de Agua Potable**

Desde 1998 se comenzó la sustitución de redes, al cambiar tuberías secundarias con altos índices de fugas y bajas presiones por tuberías de polietileno. Tienen resistencia debido a sus propiedades mecánicas adecuadas al suelo lacustre, soportando fenómenos como hundimientos y actividad sísmica, con una vida útil de 50 años aproximadamente. Se espera recuperar un gasto de 3 m<sup>3</sup>/s.



### **Conclusiones de la Infraestructura de Abastecimiento**

1. Con una densidad de 0.86 km de red primaria y con 8.09 km de red secundaria por cada km<sup>2</sup> de territorio de la Ciudad, se ha alcanzado a dar una cobertura casi total a la población, por lo que la inversión en este rubro debe ser relativamente poca, enfocándose en las nuevas áreas de urbanización.
2. La mayor inversión hacia la red primaria y secundaria debe ser de mantenimiento, pues fueron construidas hace muchas décadas, con materiales que ya se han desgastado. Además, los continuos movimientos de tierra en la región del Centro, han causado el dislocamiento de tuberías, aumentando las fugas y el desabasto.
3. La cuenca de México ofrece muchas alternativas para obtener agua del subsuelo –acuíferos, pozos y manantiales-, y pocas alternativas superficiales –la mayoría de los ríos han sido entubados- por lo que se ha tenido que abusar de la extracción –sin recarga- de los casi mil pozos de agua subterránea, derivando en problemas de agotamiento de acuíferos y posterior subsidencia del suelo.
4. Los problemas de disminución de las pendientes de conducción han llevado a la proliferación extensiva de plantas de bombeo, forma más barata para el transporte del agua.
5. A pesar de las esporádicas polémicas acerca de la calidad del agua, las plantas potabilizadoras y cloradoras han sido una solución eficaz para garantizar en lo general la calidad del agua potable.

6. En los Sistemas Lerma y Sur es donde existen más pozos. Les siguen los sistemas Centro y Oriente, que son las zonas más afectadas por los hundimientos.
7. Se aprecia que el acueducto perimetral que lleva el agua de poniente a oriente de la Ciudad, no tiene conexión con la infraestructura del extremo oriente, ya que termina en la delegación Xochimilco.
8. Las delegaciones con mayor infraestructura de red primaria son aquellas en las que se concentra mayor cantidad de población: Gustavo A. Madero y Álvaro Obregón. Esto mismo sucede para la red secundaria.
9. Álvaro Obregón es, por mucho, la delegación que cuenta con más tanques de agua potable de la Ciudad, ya que tiene una geografía muy accidentada. Otras delegaciones que cuentan con muchos tanques de agua son Iztapalapa y Gustavo A. Madero (debido a la gran población), además de Magdalena Contreras y Tlalpan (por su geografía accidentada).
10. La mayor cantidad de pozos se encuentra en Tlalpan, Iztapalapa, Xochimilco y Coyoacán. Todas ellas, exceptuando Coyoacán, también son las que cuentan con más plantas de bombeo.
11. La delegación con más plantas potabilizadoras es Iztapalapa, que se distingue por ser la que más tiene pozos. Esto permite concluir que es la zona de la Ciudad con los acuíferos más contaminados.
12. Los pozos de extracción son indispensables para el funcionamiento de la Ciudad. En conjunto con la importación de agua a la cuenca a través de los sistemas Lerma y Cutzamala, se suple la casi nula participación del uso de fuentes superficiales para abastecimiento de agua.
13. El tamaño de la población de una delegación es el factor más importante para definir la presencia del problema de escasez de agua. De esta forma, las delegaciones Gustavo A. Madero e Iztapalapa son las que tienen el problema de desabasto más grave. Les sigue Tláhuac, que tiene una geografía muy accidentada.
14. El promedio de eficiencia de las plantas potabilizadoras que abastecen el Distrito Federal es de 76%. Si se compara con otros sistemas, la eficiencia tiende a la normalidad. Sin embargo, es baja si se toma en cuenta que la eficiencia de las plantas del río Magdalena es de prácticamente el 100%. La disminución de la oferta de agua disminuye la eficiencia y hay poco que hacer al respecto. Sin

embargo, debe analizarse la viabilidad de aumentar el factor de eficiencia de cada planta a partir de mejoras en procedimientos y tecnología.

15. La calidad del agua se ha mantenido satisfactoriamente en los últimos años, especialmente en el rubro de cloro residual, rozando el 100% en algunos casos. En cuanto a la bacteriología, ha sido muy buena, aunque oscilante. Lamentablemente, nunca ha sobrepasado el 96% de eficiencia. La calidad del agua se debe cuidar, ya que al ser producto de un proceso dinámico, se deben garantizar sus propiedades en todo momento.
16. La sectorización de la ciudad es un proyecto coherente y viable para mejorar el sistema hidráulico de la ciudad, debido a que permitirá aumentar la independencia de cada sector para maximizar la eficiencia y disminuir los costos de los mismos. La macrosectorización también garantiza eficiencia en el funcionamiento de los sectores, y aumenta su robustez ante situaciones adversas.
17. Las fugas han dado muchos problemas a la Ciudad de México tradicionalmente, pues están presentes en tuberías dislocadas por hundimientos en suelos arcillosos, igualmente que entre basaltos –donde no se puede identificar en qué lugar se encuentra la fuga-. Aparentemente ha habido una disminución en los índices de fuga, que se presume a un consumo aproximadamente constante, con una menor cantidad de suministro y con la suspensión del abastecimiento por mantenimiento o durante la noche, horario donde se presentan más fugas por la alta presión en el sistema.
18. La sustitución de redes de agua potable es necesaria, tomando en cuenta que hay sectores viejos de la Ciudad con tuberías de más de 50 y hasta 80 años. Al mismo tiempo, cada km construido es, en general, más caro, debido a que se deben realizar maravillas aplicando la hidráulica urbana, en colonias totalmente habitadas. Esta tendencia se conservará al comenzar los trabajos de sustitución en otros sectores de la Ciudad.

## Infraestructura de Drenaje

Igualmente se utilizó el Compendio 2010 del Sistema de Aguas de la Ciudad de México, para obtener la información de esta sección.

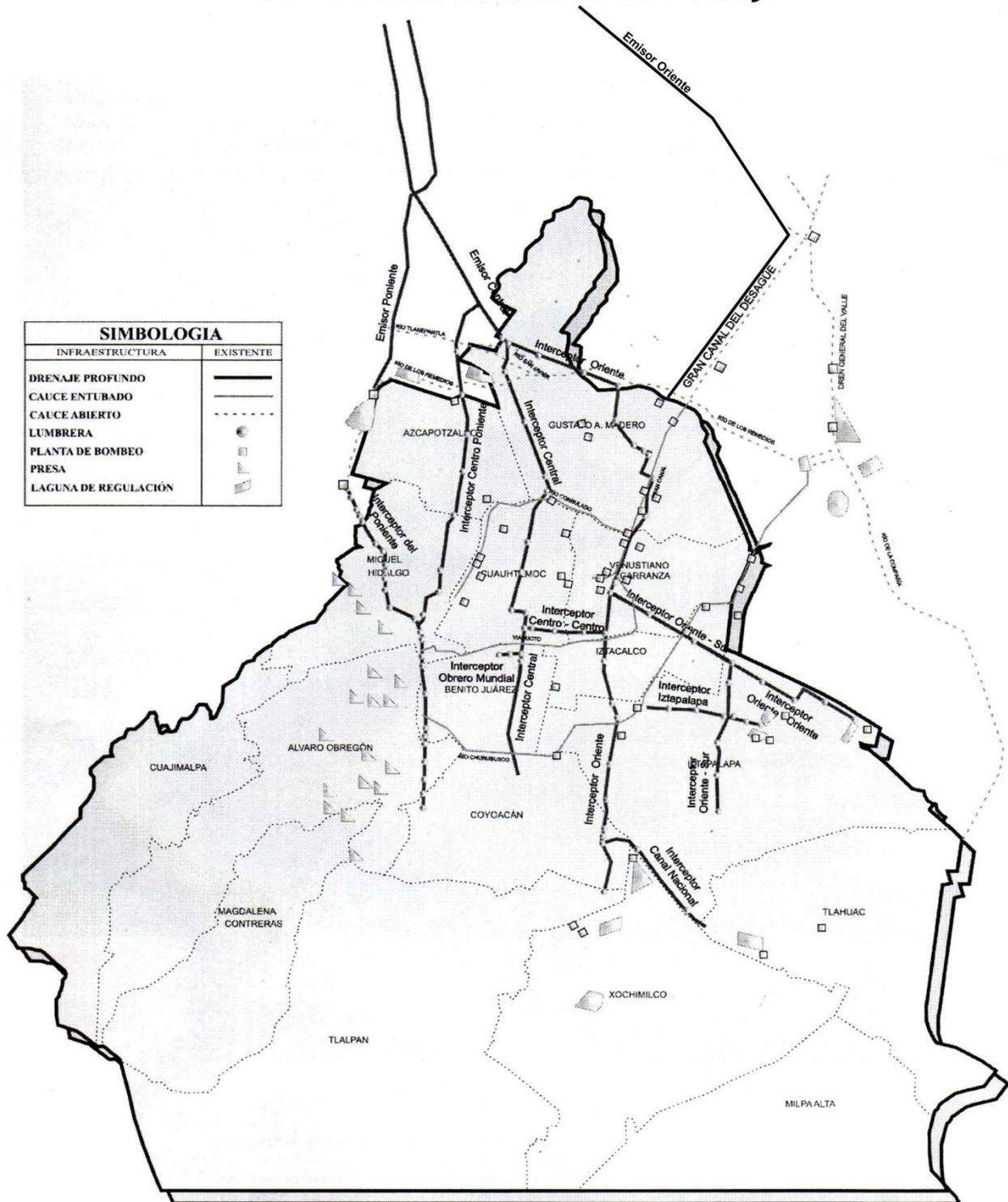
### Oferta

El sistema de drenaje del Distrito Federal utiliza la combinación de los objetivos de desalojar las aguas negras domésticas, industriales y municipales, al tiempo que se disminuye y controla el riesgo de encharcamientos e inundaciones durante la época de lluvias. Se tienen integrados los siguientes componentes:

- 2368 kilómetros de red primaria, con un diámetro superior o igual a 0.60 metros
- 11,626 kilómetros de red secundaria, con un diámetro inferior a 0.60 metros
- 145 kilómetros de colectores marginales
- 93 plantas de bombeo, con capacidad conjunta de 798 metros cúbicos por segundo
- 69 pasos a desnivel vehicular, con capacidad conjunta de 23.61 metros cúbicos por segundo
- 36 pasos a desnivel peatonal, con capacidad conjunta de 0.38 metros cúbicos por segundo
- 124.14 kilómetros de cauces a cielo abierto
- 52.3 kilómetros de ríos entubados
- 19 presas, con capacidad conjunta de 3,567,770 m<sup>3</sup>
- 12 lagunas de regulación
- 168.07 kilómetros de drenaje profundo
- 130 lumbreras
- 94% de cobertura (Sistema de Aguas de la Ciudad de México, 2012)

A continuación se presenta el Plano General del Sistema de Drenaje.

## Plano General del Sistema de Drenaje

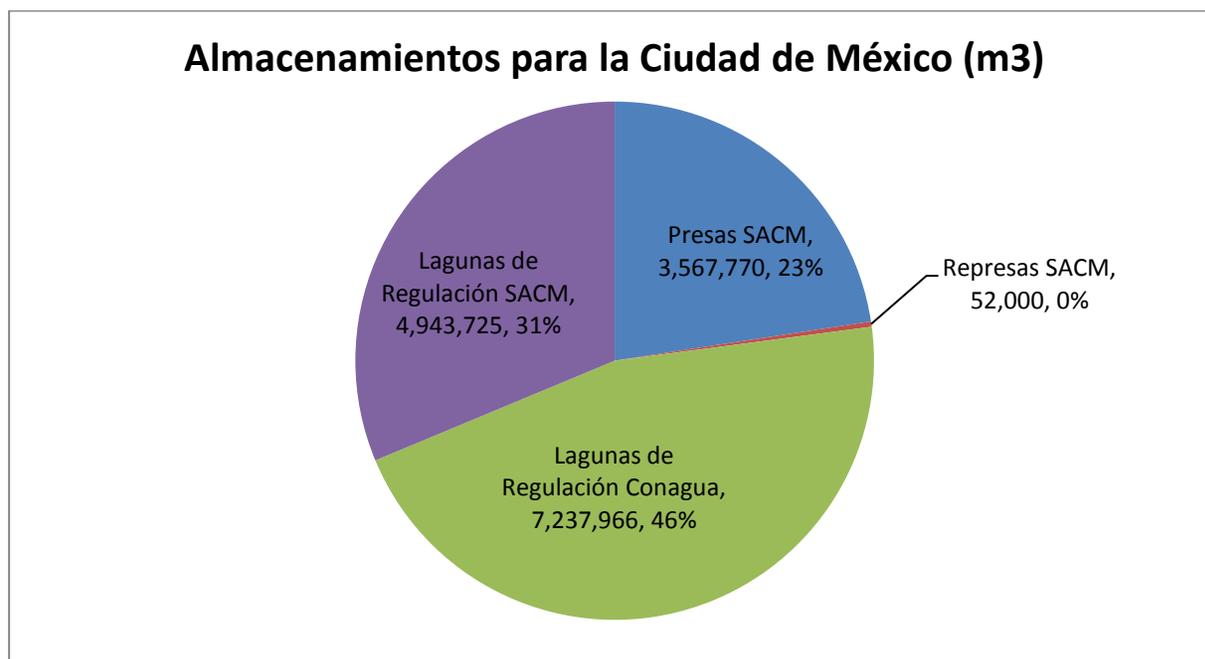


### Redes Primaria y Secundaria

A continuación se presenta la tabla que describe la infraestructura de drenaje por delegación:

	Red primaria (km)	Red secundaria (km)
Álvaro Obregón	148.79	811.01
Azcapotzalco	149.25	606.34
Benito Juárez	126.43	644.06
Coyoacán	199.18	781.96
Cuajimalpa	46.87	310.81
Cuauhtémoc	160.30	708.28
Gustavo A. Madero	320.15	1575.53
Iztacalco	118.39	524.47
Iztapalapa	358.08	1900.14
Magdalena Contreras	47.59	361.71
Miguel Hidalgo	195.31	806.16
Milpa Alta	30.29	268.65
Tláhuac	105.11	519.9
Tlalpan	127.78	639.81
Venustiano Carranza	144.95	650.26
Xochimilco	90.03	517.63

### Tanques de Regulación



### ***Cauces y Drenes***

Se enlistan los diferentes cauces del Distrito Federal:

<b>Nombre</b>	<b>Longitud (km)</b>	<b>Tipo</b>
Gran Canal de Desagüe	37.9	A Cielo Abierto
Churubusco	21.0	Entubado
Río San Buenaventura	17.0	A Cielo Abierto
Río San Javier	15.6	A Cielo Abierto
Río de los Remedios	15.3	A Cielo Abierto
Río Tlalnepantla	13.5	A Cielo Abierto
La Piedad	11.3	Entubado
Consulado	10.4	Entubado
Gran Canal de Desagüe	9.6	Entubado
Canal de Chalco	9.1	A Cielo Abierto
Canal Nacional	9.0	A Cielo Abierto
Río Cuauhtepic	6.8	A Cielo Abierto

Se tienen 19 presas operadas por el sistema de aguas y 3 represas. Además existen 5 lagunas de regulación a cargo de la Conagua y 9 a cargo del SACM. Las capacidades de almacenamiento son las siguientes:

### ***Plantas de Bombeo***

La geografía accidentada en algunas delegaciones, aunada a los continuos hundimientos que ha sufrido el Distrito Federal en las últimas décadas y la pérdida de presión en el sistema por fugas, han obligado a que se tenga que recurrir a la construcción de plantas de bombeo para procurar el correcto desalojo de las aguas del drenaje.

	Plantas de bombeo	Plantas de bombeo en pasos a desnivel vehiculares	Plantas de bombeo en pasos peatonales
Álvaro Obregón	2		
Azcapotzalco	1	2	
Benito Juárez	4	10	22
Coyoacán	8	1	
Cuajimalpa			
Cuauhtémoc	7	18	12
Gustavo A. Madero	15	12	
Iztacalco	2	5	2
Iztapalapa	17		
Magdalena Contreras			
Miguel Hidalgo	4	6	
Milpa Alta			
Tláhuac	5		
Tlalpan	1	4	
Venustiano Carranza	16	11	
Xochimilco	7		

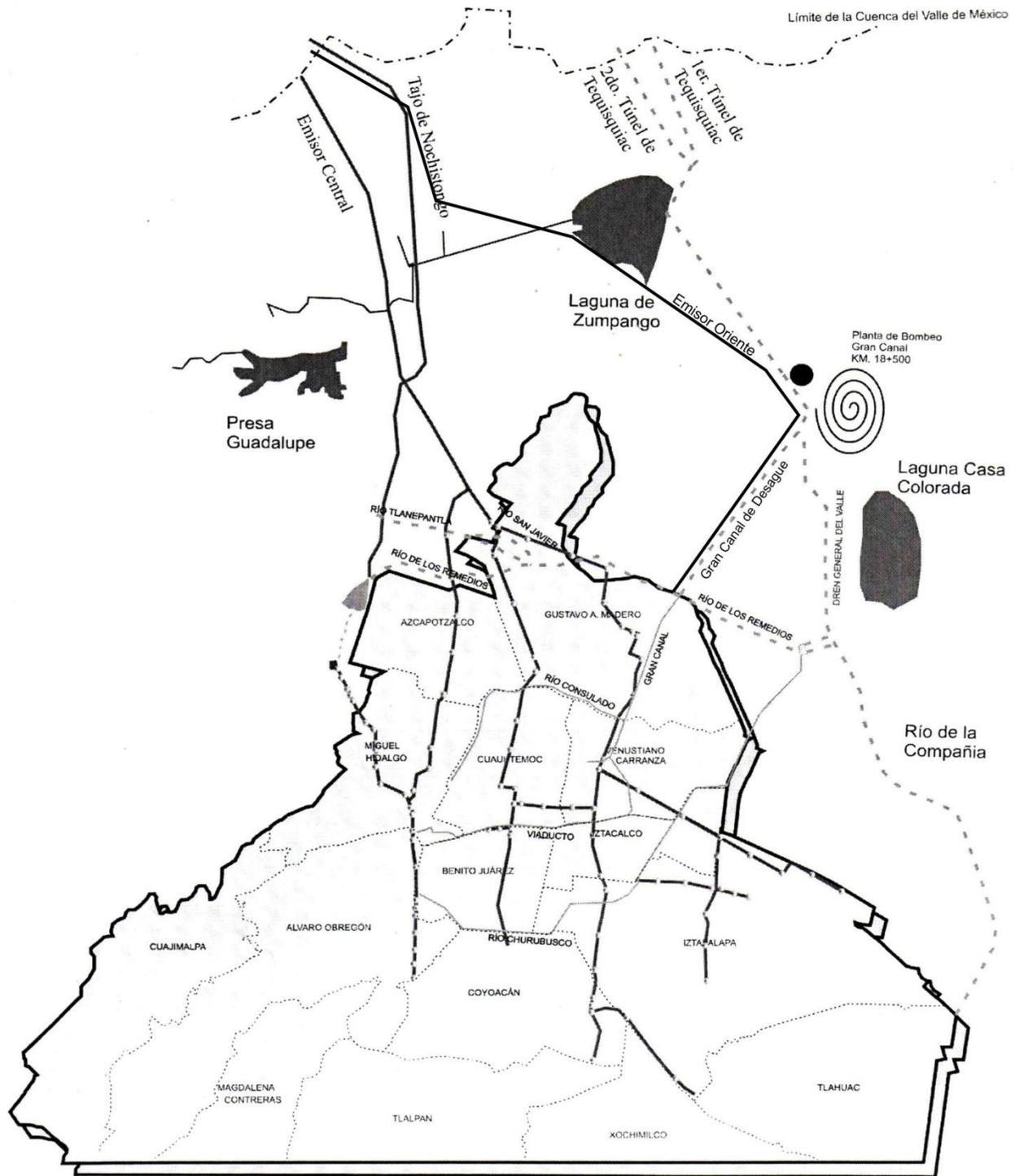
### Drenaje Profundo

En lo que se refiere al drenaje profundo, se compone de los siguientes elementos:

Componente	Longitud (km)	Diámetro (m)	Capacidad (m <sup>3</sup> /s)
Emisor Central	50	6	180
Emisor Oriente	62	7	150
Interceptor Central	16.1	5	90
Interceptor Centro-Centro	3.7	5	90
Interceptor Oriente-Oriente	3.33	5	90
Interceptor Gran Canal	1	3.2	90
Interceptor Oriente	28	5	85
Interceptor Oriente-Sur	13.8	5	80
Interceptor Centro-Poniente	16	4	40
Interceptor del Poniente	16.2	4	25
Interceptor Obrero Mundial	0.8	3.1	20
Interceptor Iztapalapa	5.5	3.2	20
Interceptor Canal Nacional-Chalco	11.64	3.2	20

A continuación se presenta el esquema del sistema de drenaje profundo.

## Sistema de Drenaje Profundo y Salidas Artificiales de la Cuenca del Valle de México



### Encharcamientos

De acuerdo con el SACM, se presenta la cantidad de encharcamientos que se presentaron en el 2011 en el Distrito Federal. Se propone relacionar la población de cada delegación con los encharcamientos atendidos, por lo que se infiere cuántos encharcamientos se produjeron por cada mil habitantes de cada delegación. (Sistema de Aguas de la Ciudad de México, 2012)

	Encharcamientos	Miles de habitantes	Encharcamientos por cada 1000 habitantes
<b>Álvaro Obregón</b>	225	727	0.309
<b>Azcapotzalco</b>	179	414	0.432
<b>Benito Juárez</b>	258	385	0.670
<b>Coyoacán</b>	281	620	0.453
<b>Cuajimalpa</b>	31	186	0.167
<b>Cuauhtémoc</b>	614	531	1.156
<b>Gustavo A. Madero</b>	650	1185	0.549
<b>Iztacalco</b>	116	384	0.302
<b>Iztapalapa</b>	576	1815	0.317
<b>Magdalena Contreras</b>	30	239	0.126
<b>Miguel Hidalgo</b>	373	372	1.003
<b>Milpa Alta</b>	4	130	0.031
<b>Tláhuac</b>	160	360	0.444
<b>Tlalpan</b>	332	650	0.511
<b>Venustiano Carranza</b>	445	430	1.035
<b>Xochimilco</b>	118	415	0.284

### Conclusiones de la Infraestructura de Desagüe y Alcantarillado

1. Se ha garantizado una cobertura bastante buena, con un promedio de 1.60 km de red primaria por km<sup>2</sup> y 7.86 km de red secundaria por cada km<sup>2</sup>. Por ello, existen casi 5 km de red secundaria para abastecer 1 km de red primaria.
2. Los colectores marginales garantizaron por mucho tiempo el desazolve de la ciudad. Sin embargo, los hundimientos que derivaron en la pérdida de pendientes, hicieron necesario el planteamiento del Túnel Emisor Oriente.
3. Las plantas de bombeo que proliferan en la Ciudad se han construido por presiones negativas imperantes en el sistema, especialmente por hundimientos, por lo que destacan las delegaciones cercanas al Centro Histórico.

4. Las presas y vasos de almacenamiento se han concentrado en las zonas de geografía accidentada, por lo que imperan en las delegaciones Álvaro Obregón y Miguel Hidalgo.
5. La política de ríos entubados, que se consideró acertada por mucho tiempo, está ocasionando problemas en las avenidas principales de la Ciudad. Prueba de ello son los constantes encharcamientos en las vialidades que siguen el cauce de los ríos Piedad, Gran Canal y Churubusco.
6. Los cauces a cielo abierto también han presentado problemas de desbordamientos en los últimos años, especialmente los más extensos –el Gran Canal del Desagüe y el Canal de Chalco-.
7. Es favorable que el sistema de presas y represas está funcionando, pues apenas una de las 23 estructuras que componen el sistema está fuera de regulación.
8. Las lagunas de regulación han tenido una utilidad histórica, especialmente debido a su gran cantidad de almacenamiento. Entre las operadas por Conagua y el SACM, acumulan el 77% de la capacidad de almacenamiento del sistema. Sin embargo, con el crecimiento de la Ciudad, resulta prácticamente inviable la habilitación de más lagunas de regulación, especialmente por la gran cantidad de espacio que requieren para funcionar.
9. Los hundimientos siguen mermando el funcionamiento del drenaje, ya que se perdió gran capacidad de trabajo en los últimos años. La recarga de los mantos freáticos y la rehabilitación de los pozos es necesaria, aunque muy cara.
10. Se debe aumentar el mantenimiento al sistema de drenaje, habilitando oferta para dar alivio a los sistemas antiguos. Fue bastante comentado que el Emisor Central no había recibido mantenimiento en décadas.
11. Ha sido comentado el problema que sucedió en la zona noroeste del Área Metropolitana, Valle Dorado, que por un golpe de ariete que afectó a sus habitantes, con pérdidas mortales, inclusive.
12. Las delegaciones Cuauhtémoc, Gustavo A. Madero e Iztapalapa son las que presentan mayor cantidad de encharcamientos por año. Esto se relaciona significativamente con el tamaño de la población. Al relacionar los encharcamientos con la población que habita una delegación, se tiene que las zonas más afectadas por encharcamientos son Cuauhtémoc, Venustiano Carranza y Miguel Hidalgo.

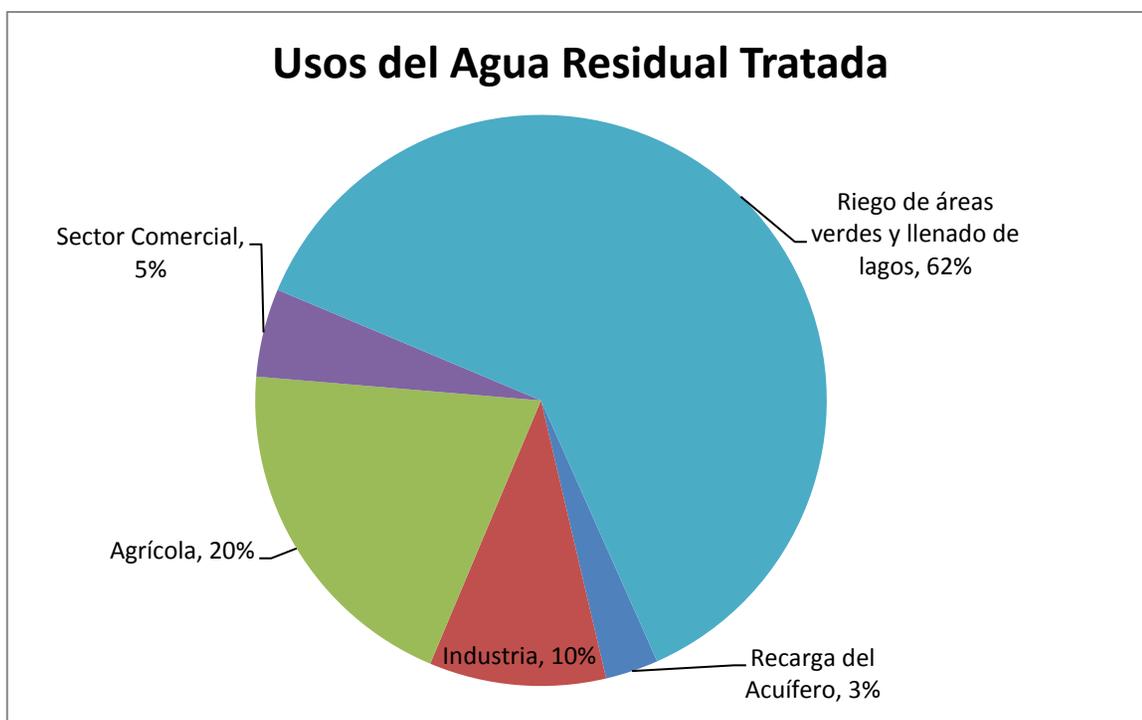
## Infraestructura de Tratamiento y Reúso

### Plantas de Tratamiento

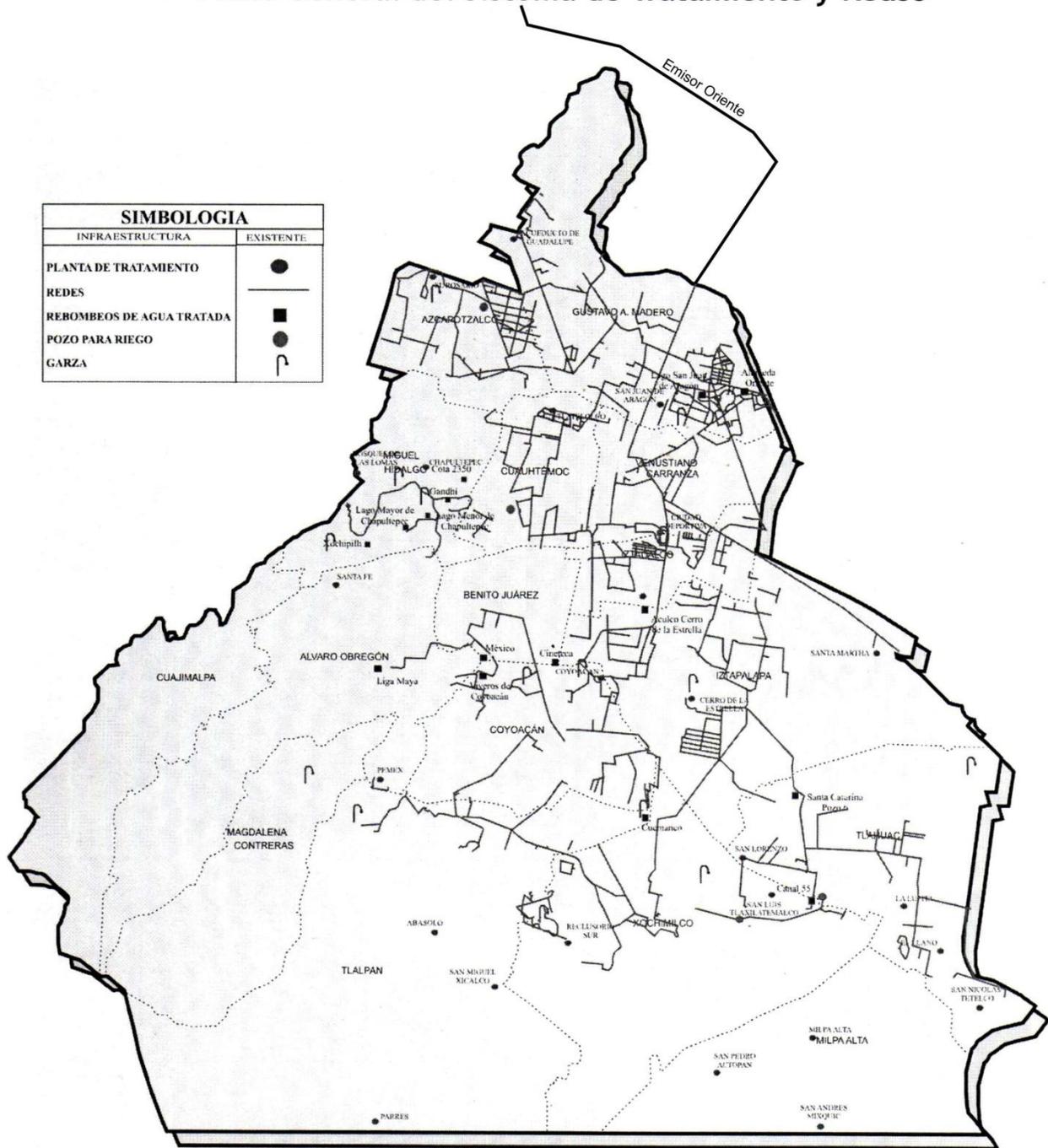
Para esta sección, se utilizará la información suministrada por el Sistema de Aguas de la Ciudad de México. El Sistema de Tratamiento y Reúso se realiza por medio de 25 plantas de tratamiento. El objetivo primordial es tratar las aguas negras domésticas, industriales y municipales, para llenado de lagos y canales y otros usos menores. Está conformado por:

- 25 plantas de tratamiento, con capacidad de producción fue de 2,387 Lps
- 16 km de líneas de conducción
- 174 km de red primaria de agua residual
- 650 km de red secundaria de agua residual
- 6 rebombes de agua residual, con capacidad total de 4,667 Lps, descargan a las plantas de tratamiento
- 14 rebombes de agua residual tratada con capacidad conjunta de 10,360 Lps
- 2 pozos de riego con capacidad de 50 Lps
- 16 garzas de agua tratada (Sistema de Aguas de la Ciudad de México, 2011)

Los usos del agua residual tratada son de la siguiente manera:



## Plano General del Sistema de Tratamiento y Reuso



### Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales

No.	Nombre	Capacidad instalada (Lps)	Capacidad de operación (Lps)	Eficiencia (%)	Proceso de tratamiento
1	Cerro de la Estrella	3000	1564.6	52%	Terciario
2	San Juan de Aragón	500	172.6	35%	Secundario
3	Santa Fé	280	53.9	19%	Terciario
4	Coyoacán	250	112	45%	Secundario
5	El Llano	250	25.6	10%	Terciario
6	Ciudad Deportiva	230	98.7	43%	Secundario
7	San Lorenzo	225	25.8	11%	Terciario
8	Chapultepec	160	69.8	44%	Secundario
9	San Luis Tlaxialtemalco	150	41.9	28%	Terciario
10	Acueducto de Guadalupe	110	80	73%	Secundario
11	San Pedro Atocpan	60	20.2	34%	Terciario
12	Bosques de las Lomas	55	11.2	20%	Secundario
13	Reclusorio Sur	30	15	50%	Secundario
14	San Andrés Mixquic	30	20	67%	Secundario
15	El Rosario	25	12.3	49%	Terciario
16	Tlatelolco	22	11	50%	Secundario
17	Abasolo	15	7	47%	Secundario
18	San Nicolás Tetelco	15	7	47%	Secundario
19	La Lupita	15	12.5	83%	Secundario
20	Santa Martha	14	4	29%	Terciario
21	Iztacalco	13	8.6	66%	Terciario
22	Picacho	13	9.4	72%	Secundario
23	Parres	7.5	1	13%	Secundario
24	San Miguel Xicalco	7.5	3	40%	Secundario
25	Rastro Milpa Alta	7.5	0	0%	Primario
		<b>5484.5</b>	<b>2387.1</b>	<b>49%</b>	

### Conclusiones de la Infraestructura de Tratamiento

1. Con la oferta real de poco más de 2 m<sup>3</sup>/s, se trata alrededor del 9% de toda el agua que se utiliza en el Distrito Federal. Esta capacidad se verá aumentada sustancialmente por la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Atotonilco, buscando en un principio superar el 85% de cobertura de tratamiento de las aguas residuales.
2. La red de tratamiento es mucho más pequeña que las redes de abastecimiento y drenaje. Existe una densidad de 0.01 km de líneas de conducción, 0.12 km de red primaria de agua residual y 0.44 km de red secundaria, por cada km<sup>2</sup> de territorio de la Ciudad. Zen-Tech: Soluciones tecnológicas

3. Después de concluir la PTAR de Atotonilco, la mayor inversión hacia la red primaria y secundaria debe ser en ampliación de la misma, que es claramente insuficiente.
4. El diseño de la PTAR de Atotonilco trajo consigo una fuerte polémica sobre la conveniencia de instalar esa gran capacidad de tratamiento en un solo lugar –en consistencia con las obras faraónicas de infraestructura que recurrentemente se realizan en México-, o bien, distribuirla entre muchas plantas de tratamiento de menor capacidad. Finalmente se optó por la primera opción, debido principalmente al poco espacio disponible en la Ciudad, a las facilidades del gobierno del estado de Hidalgo –gran benefactor del Distrito Federal en materia de aguas residuales al aportar también el espacio para la descarga en la Presa Endhó- y al beneficio político que se le pudiera explotar.
5. Los 20 sistemas de rebombeo, de agua residual tratada y no tratada, han sido una solución eficaz para el traslado del fluido, que debe superar diferencias de altura del terreno y hundimientos que derivan en pendientes negativas.
6. El agua residual tratada se utiliza sobretudo en riego de áreas verdes y llenado de lagos. Le siguen los usos agrícola, industrial, comercial y para recarga de acuíferos. Cabe destacar que es necesario aumentar el uso de agua residual tratada para recarga de acuíferos, pues salvo el inconveniente de lo oneroso que resulta la instalación de las bombas para reinyectar el líquido, contribuye en materia de sustentabilidad y disminución de hundimientos.
7. La delegación Iztapalapa es la que tiene mayor capacidad instalada para el tratamiento de agua, especialmente por la PTAR de Cerro de la Estrella.
8. La mayor parte de las plantas utilizan el proceso secundario de tratamiento (degradación del contenido biológico de forma aeróbica) y son pocas las plantas que utilizan el procedimiento terciario (aumento de la calidad del efluente). Por la incidencia de la PTAR de Cerro de la Estrella, la mayor parte del agua tratada en el Distrito Federal está sujeta al tratamiento terciario.
9. La eficiencia resultante del sistema es del 49%, que es baja. Esto es una disonancia importante, pues la planta más eficiente presenta un índice del 83%. A pesar de que la mayoría de las plantas rondan eficiencias cercanas al promedio, existen plantas con eficiencias de entre el 10% y el 20%.

## Definición de Actores

### Introducción

El manejo y uso del agua en el Distrito Federal está influenciado por diversos actores, que por sus facultades e intereses, participan en particularidades que hacen de la situación actual del agua, un problema único en el mundo. (Mahbub Arelle, 2011) Los actores son:

- 1. Organismos Legales y de Gestión:** (Gobierno de la República, 2012) (Gobierno del Distrito Federal; Secretaría del Medio Ambiente; Secretaría de Obras y Servicios; Sistema de Aguas de la Ciudad de México, 2007) (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2012) (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2012) (Comisión Nacional del Agua, 2012) (Protección Civil del Gobierno del Distrito Federal)
  - a. Gobierno del Distrito Federal (GDF) – Son las autoridades que dirigen, controlan y administran las diferentes instituciones del Distrito Federal.
    - i. Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACM) – Es el organismo Público Descentralizado, sectorizado en la Secretaría del Medio Ambiente, encargado de proporcionar los medios para lograr una eficiente distribución y modernización de los servicios de suministro de agua potable, drenaje, alcantarillado, tratamiento de aguas residuales y reutilización en la Ciudad de México.
    - ii. Protección Civil (PC) y Secretaría de Seguridad Pública (SSP) – Proporcionan protección, seguridad y asistencia para la población ante cualquier tipo de catástrofe, desastre o accidente, salvaguardando los bienes de la misma y del medio ambiente.
    - iii. Delegaciones – Son las dieciséis administraciones de sendas delegaciones que conforman el Distrito Federal, y que en coordinación con (generalmente reciben el apoyo de) los actores mencionados en esta misma sección, realizan acciones de prevención y protección para la población.
  - b. Gobierno Federal (Poder Ejecutivo) – Son las autoridades que dirigen, controlan y administran las diferentes instituciones de la Federación.
    - i. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat) – Es la dependencia encargada de impulsar la protección,

restauración, y conservación de los ecosistemas y recursos naturales y bienes y servicios ambientales de México, propiciando su aprovechamiento y desarrollo sustentable. Se encarga de conservar y aprovechar los ecosistemas y su biodiversidad, previene y controla la contaminación, gestiona integralmente los recursos hídricos y combate el cambio climático.

1. Comisión Nacional del Agua (Conagua) – Administra y preserva las aguas nacionales y sus bienes inherentes, en corresponsabilidad con el gobierno y la sociedad. Determina la disponibilidad de agua, logra el uso sustentable, asegura la preservación de los acuíferos, garantiza la calidad del agua, otorga concesiones, asignaciones y permisos, opera la infraestructura estratégica, además de apoyar y mediar a diferentes entidades de agua (En este caso, la Comisión de Agua del Estado de México y el Sistema de Aguas de la Ciudad de México).
  2. Instituto Mexicano de la Tecnología del Agua (IMTA) – Organismo público descentralizado que enfrenta los retos asociados con el manejo del agua, perfilando nuevos enfoques de investigación y desarrollo tecnológicos para proteger el recurso y asignarlo de manera eficiente y equitativa entre los distintos usuarios.
- c. Poder Legislativo – El Congreso de la Unión, constituido por el Senado de la República y la Cámara de Diputados, aprueba las leyes, impuestos tratados y convenciones en materia de agua.
2. **Población del Distrito Federal** – Son los 8.8 millones de habitantes que habitan las 16 delegaciones de la capital del país. Tienen necesidades en materia de abastecimiento de agua potable, drenaje –pluvial y de desecho- y tratamiento, aunque este último no tiene la visibilidad de las dos necesidades anteriores. Se pueden clasificar en estratos económicos, correspondientes a los sectores bajo (o popular), medio y alto (o residencial).

### 3. Prestadores de Servicios

- a. Públicos – Los trabajadores del Gobierno del Distrito Federal –SACM, Protección Civil, SSP-DF, y de las delegaciones-, y del Gobierno Federal –Semarnat, Conagua, IMTA- que proporcionan servicios en materia de agua para la población, en cualquiera de sus modalidades.
- b. Privados – Los trabajadores de despachos, diseñadores, consultores, constructoras, contratistas, y servicios relacionados al agua en cualquiera de sus modalidades, que son contratados por los organismos públicos para coadyuvar en la atención a la población.

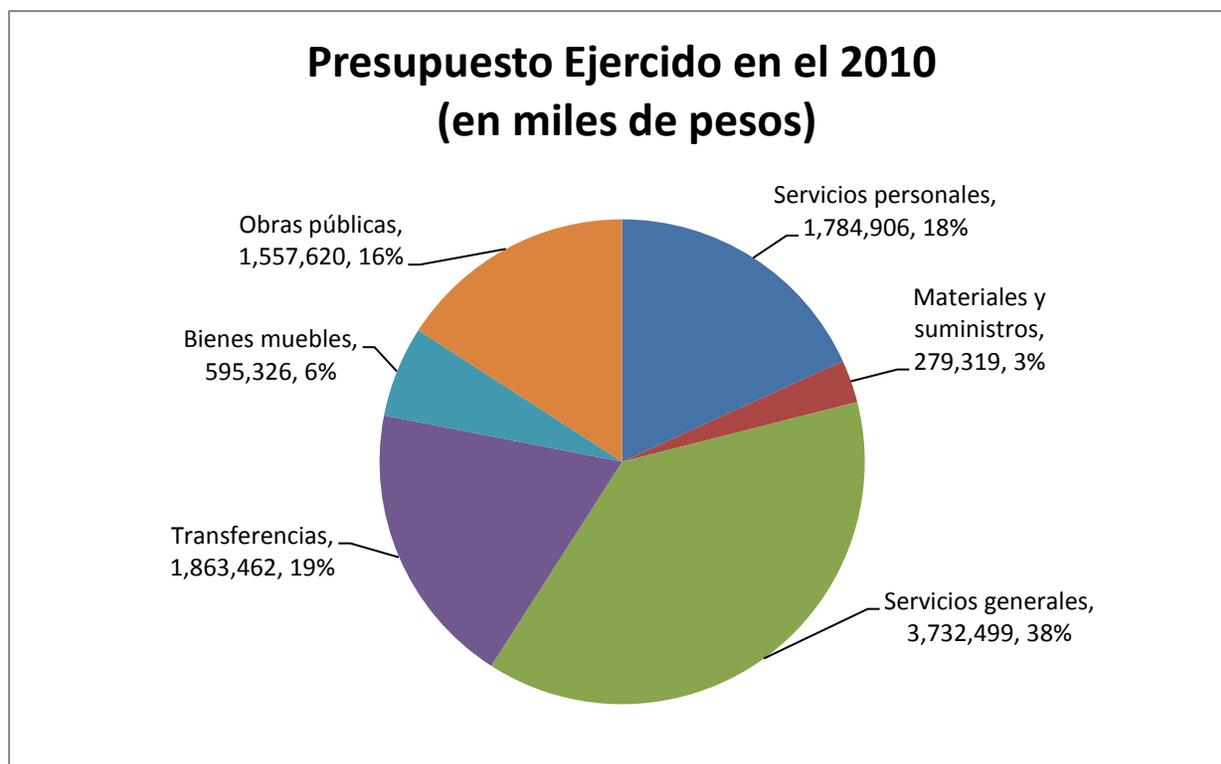
## **Consideraciones para entender e implementar en el Manejo del Agua en la Ciudad de México**

### **Financieras**

1. Si se analiza como un modelo de negocios con fines económicos, el modelo actual no tiene rentabilidad. En cambio, si se analiza como un modelo con fines sociales, es muy rentable por los beneficios que aporta a la población – únicamente si se garantiza el suministro de los servicios en todo momento, para todos los habitantes-.
2. Las tarifas de agua para la población del Distrito Federal están fuertemente subsidiadas. En el año 2011, el subsidio alcanzó el 44% del costo de la misma. En el 2012, se avaló mayor subsidio al agua para los habitantes de la Ciudad. Esto ha provocado fuertes cuestionamientos sobre la conveniencia financiera de agua. (Espinosa, 2011)
3. En los últimos años se ha ejercido un importante apartado del presupuesto, que se ha destinado al mantenimiento y modernización de la red.
4. La recaudación en materia de agua no ha podido ser ni cercana al 100%. Se ha buscado mejorar estos índices, inclusive subcontratando a empresas privadas, sin resultados sustanciales.
5. Conforme las diferentes redes del sistema aumentan su antigüedad y los hundimientos del subsuelo siguen presentándose, se vuelve más oneroso el mantenimiento. También ha aumentado la necesidad de sustitución de redes.
6. En el año 2000, el SACM tenía alrededor de 14 mil empleados. Diez años después, tuvo alrededor de 12 mil empleados. Esta reducción se debe a la jubilación de los mismos en la mayoría de los casos, y minoritariamente a la

mejora en la eficiencia de los procesos y sistemas. Al igual que en otras dependencias gubernamentales, son más los jubilados que con una mayor expectativa de vida, aumentan los costos de pensión año tras año.

7. Los costos inherentes al manejo del agua son muy diversos. Como inversión, se debe tomar en cuenta los espacios físicos, la infraestructura, la tecnología, maquinaria, equipo y oficinas, principalmente. La operación incluye el mantenimiento, la modernización y la reposición de los equipos. El presupuesto ejercido en el año 2010 se realizó de la siguiente manera: (Sistema de Aguas de la Ciudad de México, 2011)



## Sociales

1. Desde el año 2010, el agua potable es considerada un derecho humano universal por la Asamblea General de las Naciones Unidas. Sin embargo, el Distrito Federal no ha tenido una cobertura total de agua para todos sus habitantes a toda hora del año. La falta de agua potable ocasiona importantes inconformidades sociales, que han derivado históricamente en riñas, violencia, saqueos y bloqueos viales. (RDI Press, 2011)
2. A pesar de los niveles aceptables de calidad del agua en el Distrito Federal, se ha cuestionado fuertemente si es potable o no para la población. Sea como

fuere, la mayoría de los habitantes no tomarían un vaso de agua de la llave hoy en día.

3. Anualmente existen desbordes de ríos y cauces que afectan a la población asentada en zonas aledañas a los cuerpos de agua. Además, las llamadas lluvias atípicas, en las que en apenas unas horas se presenta más del 10% de la precipitación anual sobre la ciudad, ocasionan copiosos asentamientos de agua. Sólo en el año 2011, se registraron 4392 encharcamientos, los cuales afectan a las vías de comunicación –automóviles, transportes público y colectivo, y aéreas– además de las propiedades y pertenencias de familias. Esto trae pérdidas millonarias en materia económica y horas-hombre de personas varadas y afectadas por estos problemas.
4. En casos excepcionales como la falla del Emisor Poniente por taponeo y posterior Golpe de Ariete, se han presentado inundaciones en cientos de casas y fallecimientos. También las inundaciones en Chalco han causado la inundación de viviendas por aguas negras. Además, los encharcamientos en las vías de comunicación obstaculizaron la labor de los camiones de basura que transportaban desperdicio al Bordo Poniente, entonces en operación.
5. Invertir en materia hidráulica presenta beneficios a la población muy importantes, aunque no es económicamente rentable como modelo de negocio. Genera efectos importantes como el combate a la pobreza, estimula la equidad de clases y brinda un servicio que cumple el derecho al agua. Crea empleos directos y mano de obra; de forma intangible trae bienestar y tranquilidad social para los beneficiarios.

## **Ambientales**

1. De acuerdo con la Unidad de Investigación Climática del Ministerio de Medio Ambiente de Canadá y la Escuela de Geociencias de la Universidad de Edinburgo (Reino Unido) han analizado las tendencias de precipitación de 1951 a 1999 en el hemisferio norte. Los resultados, publicados en la revista Nature, señalan que emitir más gases tóxicos a la atmósfera ha potenciado las fuertes lluvias en casi los dos tercios del hemisferio. Señalan que “aunque la magnitud de las acciones humanas es incierta, los resultados indican que, en nueve de cada diez casos, las emisiones de CO<sub>2</sub> durante el siglo XX incrementaron el riesgo de inundaciones en ambos territorios en un 20%, y que, en dos de cada

tres casos, el aumento fue de más del 90%”. Por tanto, a mayor contaminación, mayor probabilidad de lluvia que ocasiona inundaciones. (RDI Press, 2011)

2. Así como las inundaciones han aumentado en algunos meses puntuales del año, las sequías han hecho lo propio. Apenas en el año 2012, se tuvo la peor sequía en los últimos 70 años.
3. Se ha hecho un buen esfuerzo por crear conciencia del uso y conservación del agua potable, con el fin de proteger el ambiente. Esto es muy importante, especialmente porque hoy en día existen afectaciones globales que producen impactos adversos en el medio ambiente. Se debe monitorear continuamente la mitigación del impacto ambiental, especialmente los ya mencionados aunados a la cadena de producción –insumos, traslado, transformación, distribución, uso y desecho-.

## Políticas

1. El agua recibe un tratamiento político en México en muchos aspectos. Los más relevantes son:
  - a. Privatización – Si bien se ha manifestado como un interés de particulares –especialmente de la derecha-, ha ocasionado un rechazo rotundo de la ciudadanía. Pocos son los casos de éxito nivel mundial –Londres- y muchos los fracasos –Cochabamba-.
  - b. Subsidios – Los subsidios se tratan de aumentar continuamente, - especialmente promovidos por la izquierda-, mientras que existe un rechazo generalizado cuando se habla de disminuirlos o desaparecerlos.
  - c. Tarifas unificadas – En colonias de algunas delegaciones, se unifican las tarifas de agua como “convenio” con representantes de las autoridades de la delegación. Entonces el consumo se maneja por aportaciones iguales para cada vivienda, sin tomar en cuenta el volumen ni el uso.
  - d. Abastecimiento – Especialmente en las delegaciones, se plantea la solución al problema del abastecimiento en caso de que un candidato resulte ganador. El problema es una constante, a pesar del paso de los gobiernos que prometieron estas soluciones.
  - e. Calidad – Se cuestiona continuamente la calidad del agua. Fue un eje sustancial de la campaña para Jefe de Gobierno en 2006.

- f. Inundaciones – Se realizan obras correctivas para parar las inundaciones, de forma inmediata, de forma que produzcan un efecto mediático inmediato. Ejemplo son los desbordes del Río de la Compañía, el Canal de Chalco y el Emisor Poniente.
  - g. Sequía – Se destinan recursos extraordinarios para el combate a la sequía, que se publicitan como inversión para el desarrollo.
  - h. Infraestructura – Se promete infraestructura correctiva en la mayor parte de los casos para evitar los problemas ya mencionados. Ejemplo es el Túnel Emisor Oriente, que ha sido publicitado como la solución a los problemas de inundaciones en el Distrito Federal.
  - i. Tratamiento – Ante el ínfimo tratamiento de aguas residuales provenientes del Distrito Federal, se han impulsado obras de tratamiento como un plan de sustentabilidad. Sin embargo, la faraónica Planta de Tratamiento de Atotonilco, pagada por particulares, ha traído problemas políticos y rechazo de los pueblos cercanos a los terrenos. Estos problemas se han ido resolviendo poco a poco. (Viejo Zubicaray, 2011, 2012)
2. Además de estas variables políticas, encarnadas en promesas de campaña, intereses partidistas, gubernamentales y electorales, podrían existir intereses personales, encaminados a la privatización del agua o alguna parte del servicio, lo cual implicaría una reforma a las leyes correspondientes o a la Constitución. Sin embargo, cuando el tema sale a debate, existe una oposición quasi-unánime en la población.
  3. El origen del agua potable es materia de controversia política, pues el Distrito Federal no es dueño del agua en bloque que viene de la cuenca del Lerma-Cutzamala. Esta cuenca abastece una parte del agua utilizada en la Ciudad de México, pero es común que los habitantes de la cuenca del Cutzamala se manifiesten como los que más tienen derecho sobre esa agua. Lo mismo pasa por el posible proyecto de abastecer a la Ciudad de México de agua traída de Veracruz.

### **Macroeconómicas**

1. Existen factores económicos que influyen en el manejo del agua para el Distrito Federal. Los principales son:

- a. Inflación – Los niveles de inflación se han mantenido positivos y aceptables desde hace más de 10 años. Es constante la pérdida del poder adquisitivo, pero no ha sido tan grande como en una devaluación. Sin embargo, la inflación sí impacta en el presupuesto que subsidian las entidades gubernamentales en materia de agua.
- b. Inversión – El presupuesto de inversión aumentará invariablemente en los próximos años, debido a las necesidades de ampliación de los alcances y capacidades del sistema, la sectorización de la red y la modernización de las zonas más viejas.
- c. Gasto público – Tiene una fuerte incidencia en el manejo del agua, pues marca la relevancia de la inversión en materia hidráulica y de su infraestructura. Por décadas ha sido materia de inversión prioritaria, pues permite el desarrollo social y económico a través de la urbanización, el establecimiento de redes de agua potable y alcantarillado y por consiguiente, disminución de la pobreza.
- d. Importaciones – Los gastos de importación son altamente incidentes para maquinaria especializada, especialmente las válvulas de control automático de las presiones de la red y tecnologías similares que no se producen en México.
- e. Producto Interno Bruto – El crecimiento del PIB fue marginal, pero positivo en los últimos años. Sufrió una fuerte contracción entre 2008 y 2010 por la crisis económica. Su desempeño, se correlaciona fuertemente con la inversión a realizar en materia de infraestructura hidráulica. (Viejo Zubicaray, 2011, 2012) (Mahbub Arelle, 2011)

## Legales y de Gestión

1. La legislación sobre manejo del agua en la Ciudad de México está claramente establecida en la Constitución, además de diferentes leyes, reglamentos, decretos y normas. Algunas de las más importantes son:
  - a. Artículo 123° Constitucional
  - b. Ley Ambiental del Distrito Federal
  - c. Ley de Adquisiciones para el Distrito Federal
  - d. Ley de Aguas del Distrito Federal
  - e. Ley de Aguas Nacionales

- f. Ley de Desarrollo Urbano para el Distrito Federal
  - g. Ley de Ingresos del Distrito Federal
  - h. Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente
  - i. Ley Federal de Derechos
  - j. Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal
  - k. Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales
  - l. Reglamento de la Ley de Desarrollo Urbano del Distrito Federal
  - m. NOM-179-SSA1-1998: Vigilancia y evaluación del control de calidad del agua para uso y consumo humano, distribuida por sistemas de abastecimiento público.
  - n. NOM-127-SSA1-1994: Salud ambiental, agua para uso y consumo humano, límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.
2. Los principales problemas que se han presentado han sido por la construcción de infraestructuras y competencias en caso de falla. En el primer caso, se han dado en la asignación de espacios para los la construcción de los servicios. Una analogía a este espacio es el “derecho de vía” de las tuberías. En el segundo caso, se refiere a la competencia delegacional, del Gobierno del Distrito Federal o de la Federación, quienes rozan en aspectos de quién se debe ocupar de diferentes cuestiones que aparecen en caso de desastre –generalmente desabastecimiento, inundaciones y sismo-. (Comisión Nacional del Agua, 2012) (Sistema de Aguas de la Ciudad de México, 2012)

## Tecnológicas

1. Buena parte de la red es vieja, o muy vieja. Esto afecta las condiciones de calidad de agua y fugas. En el primer caso, la calidad del agua se puede afectar por la contaminación de partículas desprendidas de la tubería, aunque rara vez los niveles son comprometedores de la calidad general. En el segundo caso, las fugas requieren válvulas reguladoras, que no se producen en México y tienen costos muy elevados.
2. Hace falta inversión tecnológica –muy costosa para el sistema- en medidores para identificar rápidamente fugas en la red y calcular adecuadamente los usos consuntivo y no consuntivo del agua, para su correcta cobranza.

## **Gestión de Recursos Hidráulicos**

### **Introducción**

Dada la definición “Conjunto de actividades necesarias para satisfacer las necesidades hidráulicas de un área al hacer el mejor uso posible de los recursos hidrológicos disponibles”, se debe tomar en cuenta que la gestión de recursos hidráulicos es esencialmente un problema de oferta y demanda. (Findikakis, 2011)

La oferta depende de la cantidad de agua disponible y el grado de desarrollo para potabilizarla, mientras que la demanda incluye el uso de agua para afrontar las actividades domésticas, las actividades económicas de la población, y otros usos inherentes al campo y la ciudad. (Tortajada, 2003) (World Commission on Environment and Development of the United Nations Environment Program, 1987)

El objetivo de la Planeación y Gestión de Recursos Hidráulicos es determinar y conseguir el equilibrio óptimo entre la oferta y la demanda, tomando en cuenta las obligaciones con la sociedad expresadas en la forma de regulaciones y requerimientos de protección al ambiente, y la atención de asuntos socioeconómicos.

### **Gestión Integrada de Recursos Hidráulicos**

La aplicación del enfoque de sustentabilidad a las cuestiones del agua derivó en el concepto de Gestión Integrada de Recursos Hidráulicos. De acuerdo con el Primer Reporte de la Gestión Integrada de Recursos Hidráulicos, se entiende la gestión integrada como “el vehículo que permite la aplicación operacional del concepto de desarrollo sustentable para la gestión de los recursos de agua dulce.” (United Nations, 2000) También se puede entender según la definición de la Asociación Mundial del Agua, que menciona que es el “proceso que promueve el desarrollo coordinado y la gestión del agua, la tierra y los recursos relacionados, con el fin de maximizar los resultados económicos y el bienestar social de forma equitativa, sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas vitales.” (United Nations, 2000) (Global Water Partnership, 2000)

Los principales aspectos de gestión integrada del agua pasan por:

1. La integración del manejo de los recursos hidráulicos superficiales y subterráneos

2. La integración del manejo de la irrigación, la oferta de agua para usos doméstico, industrial y otros usos
3. La integración a través de varias disciplinas, dirigiendo los diferentes problemas que son atendidos por la gestión del agua
4. La integración del manejo del agua con desarrollo sustentable, ambiental, y de gestión de los esfuerzos para la reducción de la pobreza
5. La integración o coordinación del trabajo en diferentes organizaciones y agencias que dirigen diferentes actividades que afectan las actividades de gestión de los recursos hidráulicos
6. La integración de la gestión hidráulica dentro de unidades hidrológicas específicas, en general, cuencas hidrológicas.

(Findikakis, 2011)

Cabe destacar que la Gestión Integrada de Recursos Hidráulicos requiere de la participación de todos los actores, con una comunicación efectiva entre los diferentes grupos involucrados, especialmente los gestores de políticas y de diseños técnicos.

### **Economías de Escala**

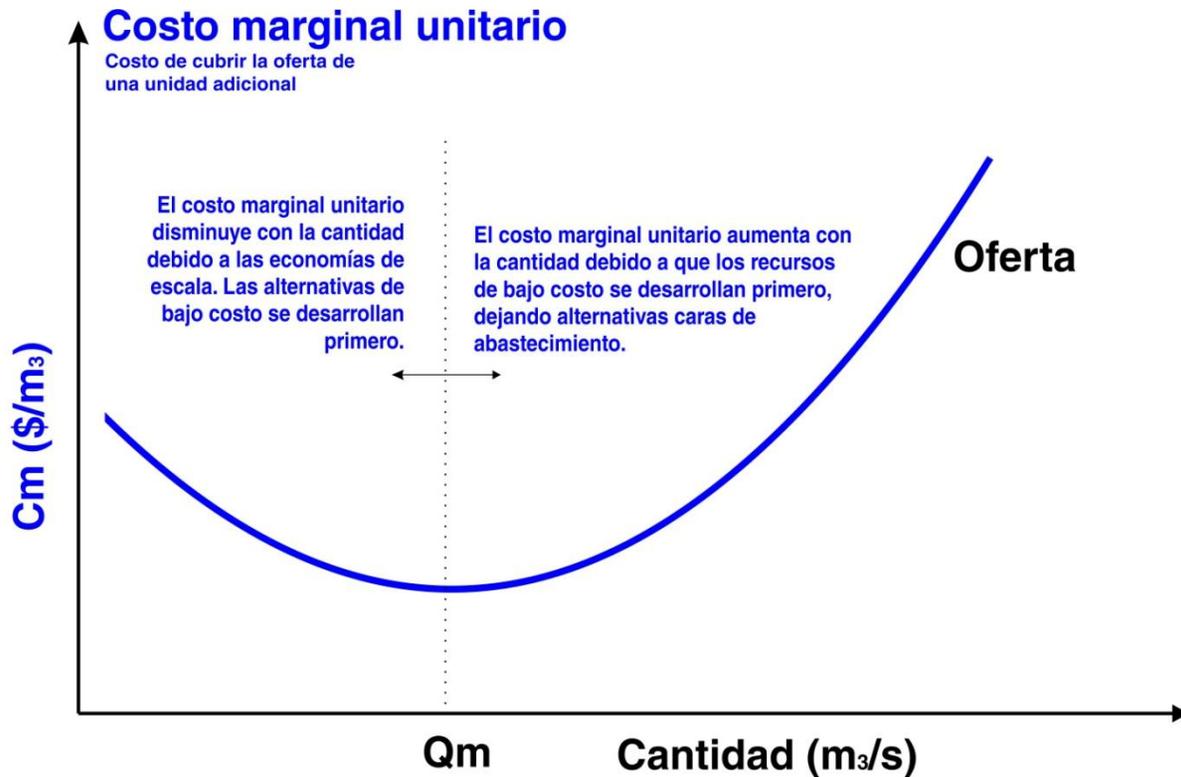
Se deben satisfacer las necesidades hidráulicas de la cuenca de México utilizando los recursos disponibles, con sus respectivas delimitaciones físicas, financieras, ambientales, socioeconómicas, y las que apliquen, que refleja los valores de la sociedad. También se puede entender como el balance de la oferta y la demanda en una forma práctica y viable. (Figueroa Palacios, 2011, 2012)

### **Oferta**

La oferta de agua disponible es importante en volumen, pero no se encuentra diversificada en fuentes de abastecimiento, pues la mayor parte tiene origen subterráneo. Así es como la oferta debe ser aumentada por el desarrollo de procedimientos y políticas orientadas a un manejo más sustentable. Idealmente, será mucho mejor comenzar cuanto antes con la disminución de la extracción de agua potable de primer uso del subsuelo, así como la erradicación de su uso para riego, dando paso al uso de agua tratada y reinyectada al subsuelo para su posterior potabilización de forma natural.

La oferta se ve influenciada por políticas y elecciones específicas. Las más importantes son la importación de agua en bloque para contribuir al abastecimiento y la necesidad de extraerla del subsuelo, de forma que se atienda la demanda.

El comportamiento del costo de la oferta en función del volumen de agua disponible para su uso, se expresa como una función parabólica, que se explica como sigue:



### ***Demanda***

Más importante aún resulta la atención a la demanda, debido a que una falta de conciencia y cultura sobre la disponibilidad del agua y la dificultad del proceso de abastecimiento a la población, ocasionará que los habitantes usarán desmedidamente el vital líquido. Una población que no tiene conciencia sobre el agua, necesitará cantidades infinitas de abastecimiento, lo cual no es viable para ninguna sociedad.

La gestión integrada de la demanda pretende balancear la oferta de agua disponible y su respectiva demanda, delimitándose aspectos sociales, económicos y ambientales. De esta

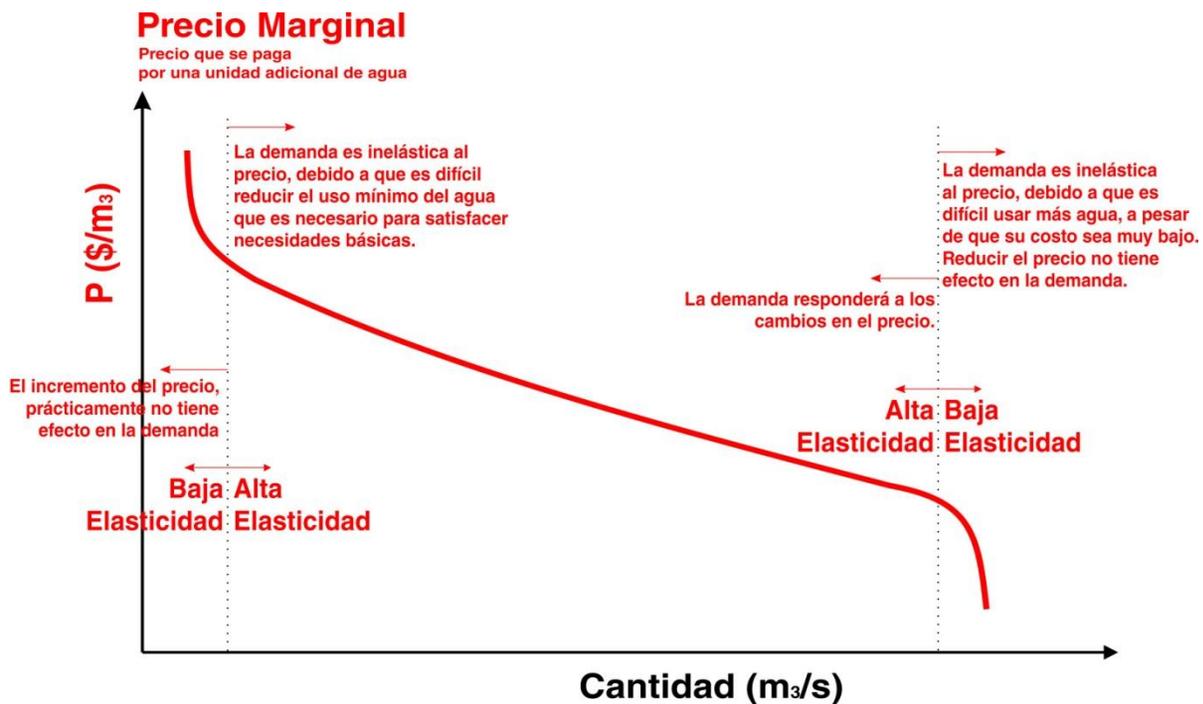
forma, tratar de influenciar la demanda de agua a través de diferentes mecanismos que le brinden un uso eficiente, con un costo -beneficio efectivo para la sociedad.

En primer lugar, se debe tratar el agua como un bien económico, pues satisface tangiblemente las necesidades de un consumidor, por lo que tiene una utilidad económica. Este vital derecho de todos los seres humanos está reconocido en México, por lo que a priori debe motivar la conservación y protección de los recursos hidráulicos por cada habitante de la sociedad. (Findikakis, 2011)

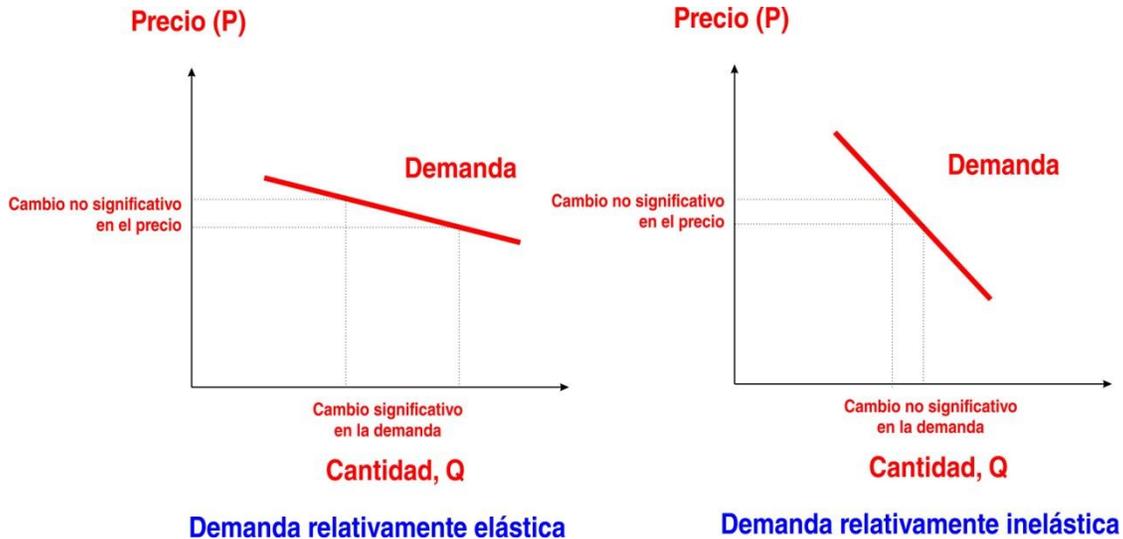
En el contexto del manejo integrado del agua, es necesario conocer el cambio de la demanda en función de la oferta, o elasticidad. La ecuación general está dada por la variación de la cantidad del agua entre la variación en el precio, por lo que se puede expresar de la siguiente forma:

$$\varepsilon = \frac{\frac{\delta Q}{Q}}{\frac{\delta P}{P}}$$

Por tanto, el comportamiento elástico de la demanda de agua es como sigue:



Ya que se introdujeron los conceptos de alta elasticidad –que puede tender al infinito- y baja elasticidad –que puede tender a cero, o a la inelasticidad- se presenta la sensibilidad de la demanda en función del precio. (Findikakis, 2011)



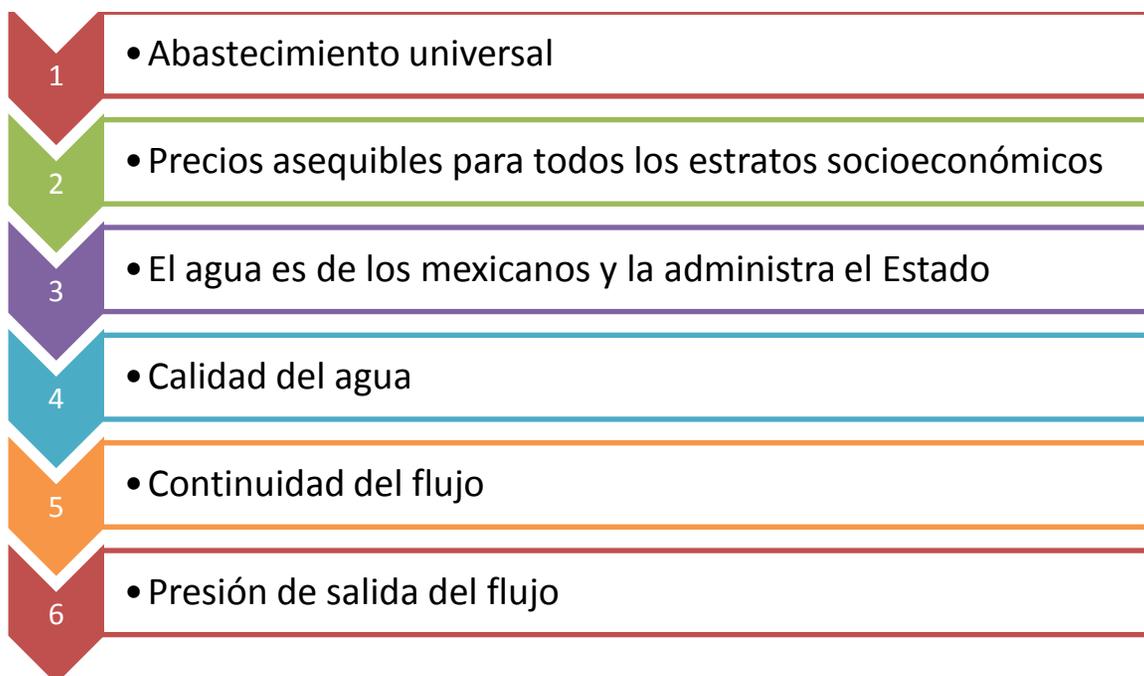
La población del Distrito Federal tiene un comportamiento que origina una demanda elástica, especialmente por los fuertes subsidios sobre el vital líquido. De esta manera, un aumento no significativo en el precio sí tendrá un cambio significativo en la demanda.

La demanda también se ve influenciada por políticas y elecciones específicas. Las más importantes para la cuenca de México son la dotación -ligeramente menor a la requerida-, el subsidio del costo, y la racionalización del suministro en épocas específicas y días críticos.

En otro orden de ideas, además del uso doméstico, las actividades agrícola, industrial, y turística, demandan grandes volúmenes de agua, por lo que cualquier ahorro o mejora en sus procedimientos es bienvenida. (Findikakis, 2011)

### ***Equilibrio***

El equilibrio óptimo entre la oferta y demanda de agua depende de diferentes principios y criterios específicos. Los principios de la Gestión Integrada de Recursos Hídricos reflejan un sistema de valor que es adoptado por las personas que habitan la cuenca. Para el caso del Distrito Federal, se propone que esos valores en orden jerárquico son:



En caso de que se vulneren dichos valores, los habitantes se encargan de manifestarlo, aunque cada vez con menos paciencia, especialmente bloqueando vías principales de comunicación. Esto afecta la circulación vial y diferentes actividades productivas. A su vez, mientras más alta sea la jerarquía del valor vulnerado, la protesta será más enérgica.

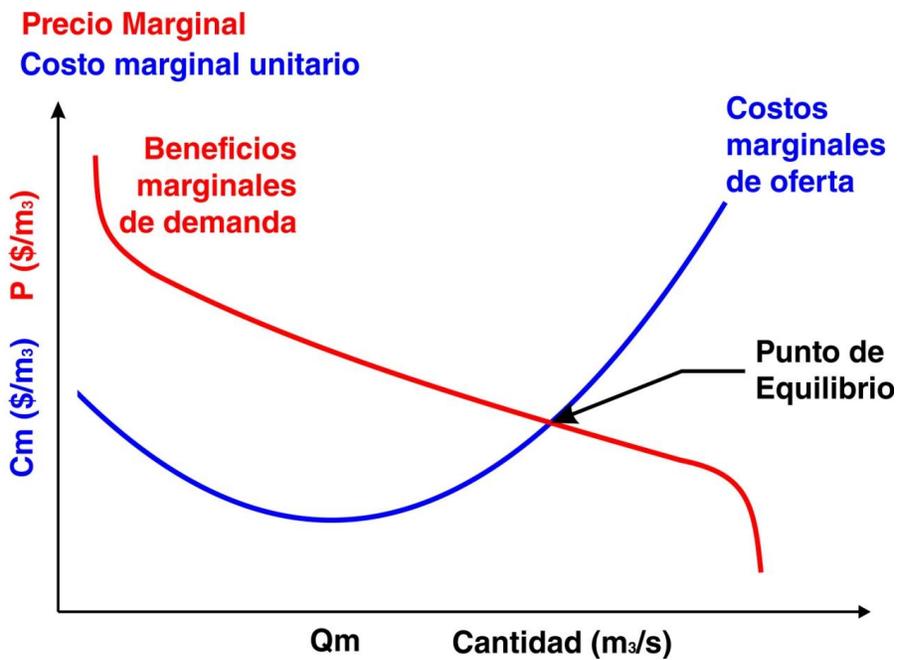
Por tanto, cuando se cumplan cabalmente estos valores inherentes a la sociedad del Distrito Federal, se considerará que existe un punto óptimo de equilibrio. En él, la sociedad estará aliviada de sus problemas de agua. Se sobreentiende que este equilibrio no existe hoy en día.

El problema de la resiliencia en la gestión integrada del agua en el Distrito Federal es un problema referente a un sistema suave que libra un proceso constante para adaptarse a fenómenos adversos continuados. En el manejo de la cuenca se realizan acciones encaminadas al equilibrio, como:

1. Racionalización del recurso en épocas de estiaje o sequía
2. Cierre de sectores del sistema para disminuir los índices de fugas
3. Uso de nuevas tecnologías
4. Futuro aumento sustancial en el reúso de agua tratada
5. Disminución de subsidios en consumo de clases altas
6. Disminución de agua de primer uso para riego

7. Modernización del sistema
8. Conservación de fuentes de abastecimiento
9. Incremento en la eficiencia del sistema

Todos los aspectos que conforman el equilibrio y las diferentes acciones ya mencionadas, pueden ser transformados hasta verse reducidas a dos variables lineales. Para marcar las directrices sobre las políticas del agua y tomar las decisiones orientadas a cumplirlas, se requiere saber cuánto dinero y agua se necesita. Por tanto, se pueden conjuntar de la siguiente forma, obteniendo un punto de equilibrio, que es la intersección entre la oferta y la demanda. Gráficamente, se interpreta como sigue:



### **Valor y Costo del Agua**

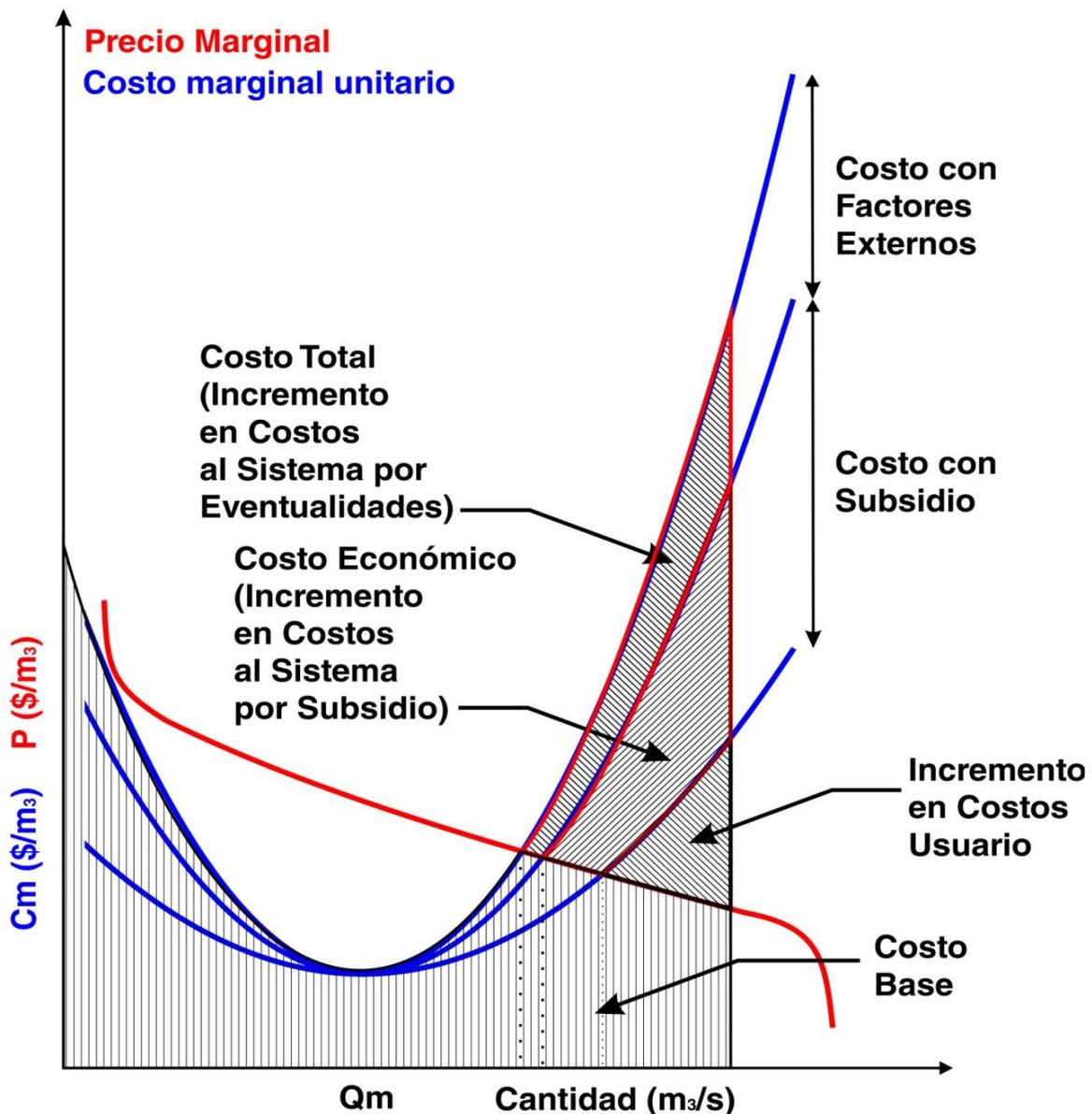
El valor del agua se entiende como la máxima cantidad de dinero que los usuarios están dispuestos a pagar para su uso. Existen variables que influyen en su valor, como el tipo de uso, la fiabilidad del suministro, el nivel de ingreso de los usuarios, la hora del día y la temporada del año. Las principales actividades para las que se utiliza el agua son el abastecimiento municipal, propósitos ambientales, riego de frutas y verduras, energía hidráulica y riego de granos.

El costo total del agua para el Sistema de Aguas de la Ciudad de México incluye:  
(Findikakis, 2011)

$$\begin{aligned}
 \text{Costo Total} &= \text{Costos de Operación y Mantenimiento} + \text{Costo de Capital} \\
 &+ \text{Costo de Oportunidad} + \text{Costo de Externalidades Económicas} \\
 &+ \text{Costo de Subsidios} + \text{Costo de Externalidades Ambientales}
 \end{aligned}$$

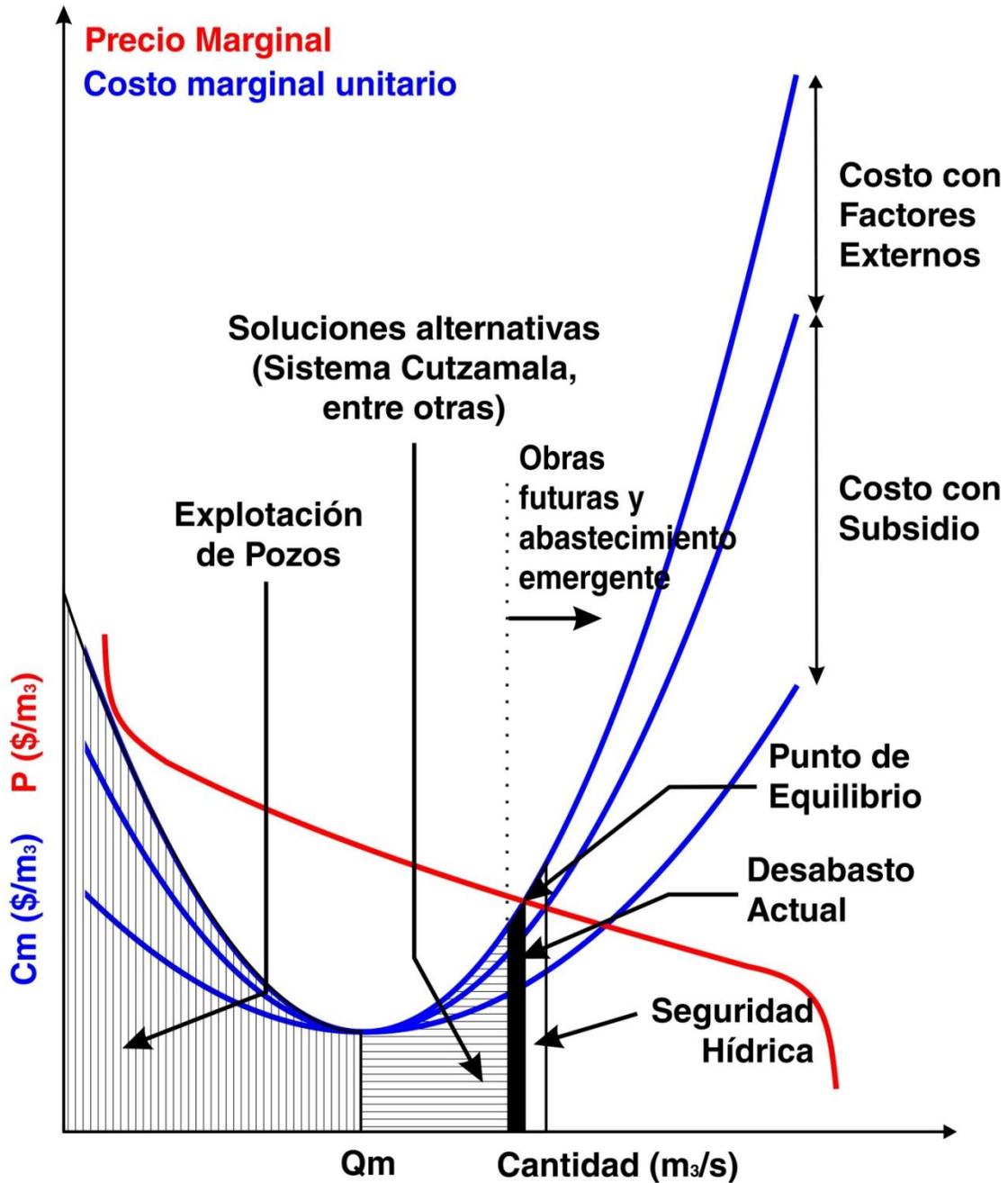
Cabe destacar que el costo de la resiliencia del sistema está incluido en las externalidades económicas y mayormente, en las ambientales.

A continuación se presenta el diagrama de una sociedad idealizada con cobertura total de abastecimiento, y con un margen importante de seguridad del mismo. Para este caso, dicho margen de seguridad hidráulica en el abastecimiento tiene un costo muy alto para la sociedad:



Ahora se presenta el diagrama que describe el estado del arte de la oferta y la demanda para el Distrito Federal. De él se desprenden las siguientes consideraciones:

1. La oferta de abastecimiento no es del 100% ni se ha llegado al punto de equilibrio. La población desabastecida es relativamente pequeña, pero igual de importante.
2. Se recurrió en primera instancia a la explotación de pozos, que es la forma más barata de obtención de agua
3. Las soluciones alternativas comenzaron a ser más caras; la más importante de ellas es el Sistema Cutzamala.
4. Las obras de ampliación de la cobertura serán cada vez más cara
5. Se propone una seguridad hídrica marginal, en consistencia con la cantidad de agua que es posible obtener y el costo de la ampliación del sistema.
6. Los costos de los factores externos y del subsidio serán cada día más impactantes al sistema. Ya que la captación de recursos es menor, hay menos agua disponible al mismo precio.



### Conformación de la Gestión Integrada de Recursos Hídricos

El manejo integrado de recursos hídricos tiene como componentes:

1. El marco institucional
2. Los instrumentos de gestión
3. Desarrollar infraestructura, mantenimiento y operación
4. Manejo de agua en bloque y escalas (Findikakis, 2011)

## 5. Aspectos económicos

Se presenta el siguiente cuadro que ilustra el estado del arte de los componentes de la gestión integrada del recurso para el Distrito Federal.

Manejo Integrado de Recursos Hidráulicos				
Componente General	Aspecto Particular	Existe	Estado cercano al óptimo	Áreas de Oportunidad
Marco Institucional	<i>Leyes, reglamentos, normas, repartición de derecho</i>	Sí	Sí	Mejora de efectividad y eficiencia.
	<i>Estándares (calidad de agua, ambiental, servicio)</i>	Sí	No	Servicio universal de abastecimiento
	<i>Organizaciones</i>	Sí	Sí	Atribuciones; cooperación entre las mismas
Instrumentos de Gestión	<i>Arreglos regulatorios</i>	Sí	Sí	-
	<i>Instrumentos financieros</i>	Sí	No	Uso de más instrumentos para inversiones de largo plazo.
	<i>Mecanismos para participación efectiva</i>	Sí	Sí	Mejora en productividad.
Desarrollo, mantenimiento y operación de infraestructura	<i>Construcción</i>	Sí	No	Servicio universal de abastecimiento; control de inundaciones; actuación efectiva y eficiente en caso de desastre.
	<i>Mantenimiento</i>	Sí	No	Modernización del sistema; control de fugas.
	<i>Operación</i>	Sí	No	Mejora en eficiencia de infraestructuras de abastecimiento, drenaje y tratamiento.
	<i>Retiro</i>	Sí	No	Respeto a la vida útil de las infraestructuras; disposición final de componentes depuestos.
Manejo de Escalas	<i>Políticas de costo de acuerdo con uso del recurso.</i>	Sí	No	Los fuertes subsidios benefician más a la población de consumo medio-alto. Ajuste de precios, pues el agua tiene diferente valor económico según su uso.
	<i>Distribución del Recurso</i>	Sí	No	Servicio universal de abastecimiento; distribución inequitativa.
	<i>Desarrollo Regional</i>	Sí	No	Las cuencas que aportan el recurso no se han beneficiado por su apoyo.
	<i>Problemas entre instituciones</i>	Sí	No	En caso de emergencia, su cooperación es heterogénea.
Asuntos Económicos	<i>Distribución positiva de beneficios y costos</i>	Sí	Sí	Aunque fuertemente subsidiado
	<i>Estimulación por incentivos</i>	Sí	No	Estimulación por cobertura de abastecimiento, drenaje y abastecimiento. Incentivos por eficiencia y productividad.

Se concluye que el Distrito Federal, existe una gestión integrada del recurso, ya que se tienen todos los componentes que atañen a este marco de trabajo. Sin embargo, aún estamos lejos de encontrarnos en un punto óptimo, en el que la población no tenga problemas de agua.

## Sustentabilidad

En la mayor parte del mundo, se reconoce hoy en día que la administración de recursos hidráulicos debe ser consistente con los principios de desarrollo sustentable. Éste se entiende como “el desarrollo que hace frente a las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras de satisfacer sus propias necesidades.” (WCED: 1987) Por tanto, esta filosofía toma en cuenta la interconexión entre el bienestar de los individuos y las necesidades sociales, económicas y ambientales, respetando los intereses de cada uno de los actores.

Para mejorar el desarrollo sustentable en el futuro, es necesario reconocer la necesidad de respetar los intereses de los diferentes actores, especialmente de la población y el Estado, tomando en cuenta los valores de la sociedad para futuras negociaciones. Además, en las directrices, se debe privilegiar las acciones encaminadas a proteger la calidad y el abastecimiento de los recursos de agua potable.

El desarrollo sustentable también es un objetivo blando, pues es un concepto que ha sido aceptado internacionalmente, sin una forma de medición específica de objetivos. En el concierto internacional, no se ha acordado cómo se debe medir el progreso hacia dicho estado. También es difícil comparar los avances, tomando en cuenta los contextos social, económico y ambiental. Además, no existen internacionalmente políticas homogéneas. Por tanto, será necesario encaminarlo para cumplir los valores ya enumerados de la sociedad del Distrito Federal. De forma específica, se debe incorporar el valor de la sustentabilidad del agua, como uno de sus valores indispensables para la tranquilidad de la sociedad.

El desarrollo sustentable tiene como objetivo afrontar las necesidades del presente sin comprometer la capacidad que puedan tener las futuras generaciones para afrontar sus propias necesidades. También se puede entender como la correcta interconexión entre el bienestar de los habitantes de una región, y la satisfacción de las necesidades económicas, sociales, y ambientales de los actores.

El modelo del manejo de los recursos hidráulicos que se implementa actualmente en el Distrito Federal no propicia el desarrollo sustentable. La principal causa es la gran población concentrada en apenas unos cientos de kilómetros cuadrados, es una de las más grandes metrópolis del mundo. A través del tiempo, se ha dado el paso de una ciudad establecida en una cuenca conformada por lagos y ríos, a una zona metropolitana con ríos entubados y

acuíferos profundamente desgastados. Para proveer a los habitantes de sus necesidades básicas, se requiere la importación de agua en bloque, por lo que el modelo no garantiza que las futuras generaciones puedan ser autosuficientes con los recursos propios de la cuenca.

### ***Balance Hídrico del Sistema y Ajuste al Presupuesto Hídrico***

El presupuesto hídrico se conforma de forma general por la ecuación (Capella Vizcaíno, 2000)

$$\text{Presupuesto Hídrico} = \text{Entradas} - \text{Salidas}$$

con su diferentes variaciones. En el caso de las presas y demás estructuras de almacenamiento, se presenta la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} \text{Presupuesto Hídrico en Estructura de Almacenamiento} \\ = \text{Afluencia de Agua} + \text{Escurrimiento Directo} + \text{Precipitación Directa} \\ - \text{Recarga de Agua Subterránea} - \text{Evaporación} - \text{Salida de Agua} \end{aligned}$$

En el caso de los acuíferos, se presenta la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} \text{Presupuesto Hídrico en Acuífero} \\ = \text{Recarga} + \text{Aportaciones y fugas de otras unidades} - \text{Descarga} \\ - \text{Extracciones de Pozos} \end{aligned}$$

Aunado a estos conceptos que constituyen el Presupuesto Hídrico, se debe conocer la huella hídrica de la Ciudad de México. El agua puede tener tres usos principales, que se describen de la siguiente forma:

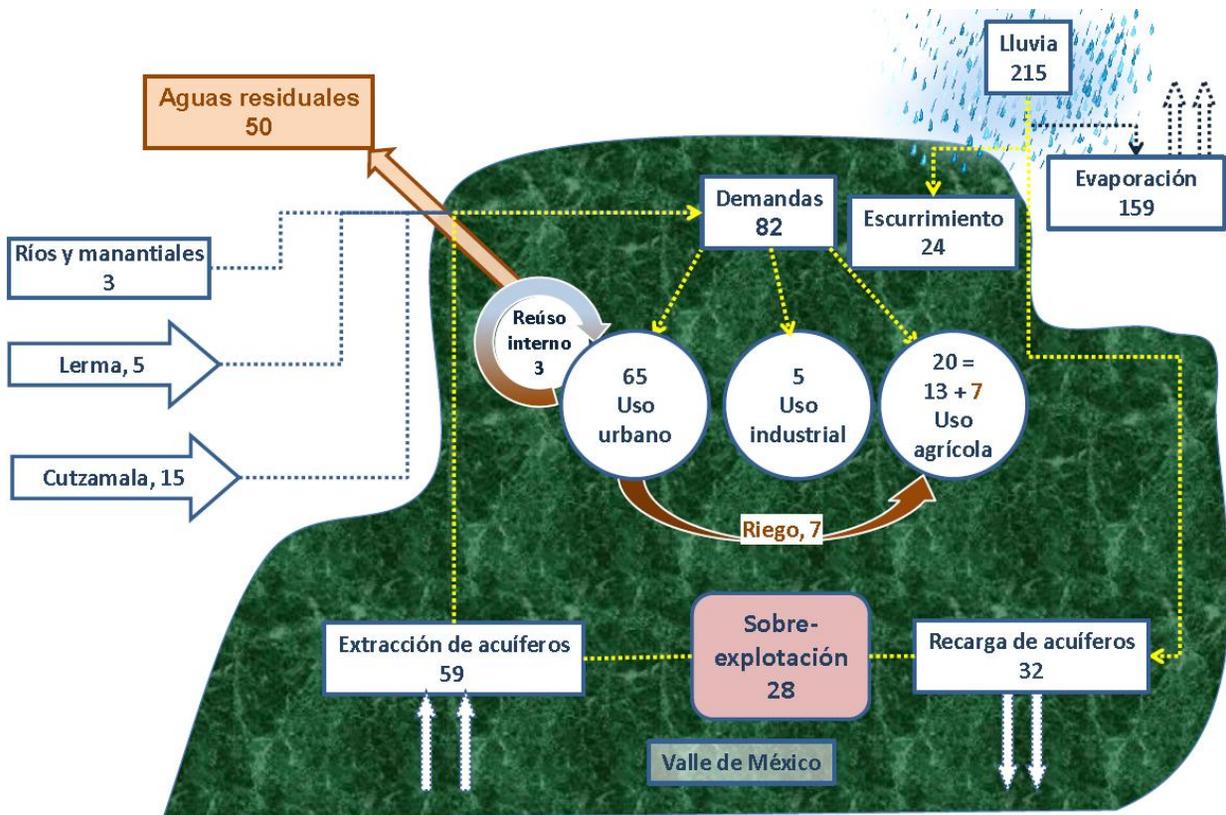
1. Agua azul – Se refiere al volumen de agua dulce que se evaporó de los recursos superficiales y subterráneos para producir bienes y servicios consumidos por un individuo o una comunidad.
2. Agua verde – Agua que se evaporó de los recursos globales verdes – precipitación almacenada en el suelo como humedad-.
3. Agua gris – Volumen de agua contaminada asociada a la producción de bienes y servicios una comunidad. (Findikakis, 2011)

Con estos antecedentes, se presenta la ecuación general de balance hidráulico para describir el flujo de entrada y salida de la Cuenca de México.

*Balace Hídrico*

$$= \text{Recarga Natural} + \text{Recarga Humana} - \text{Descarga Natural} - \text{Descarga Humana}$$

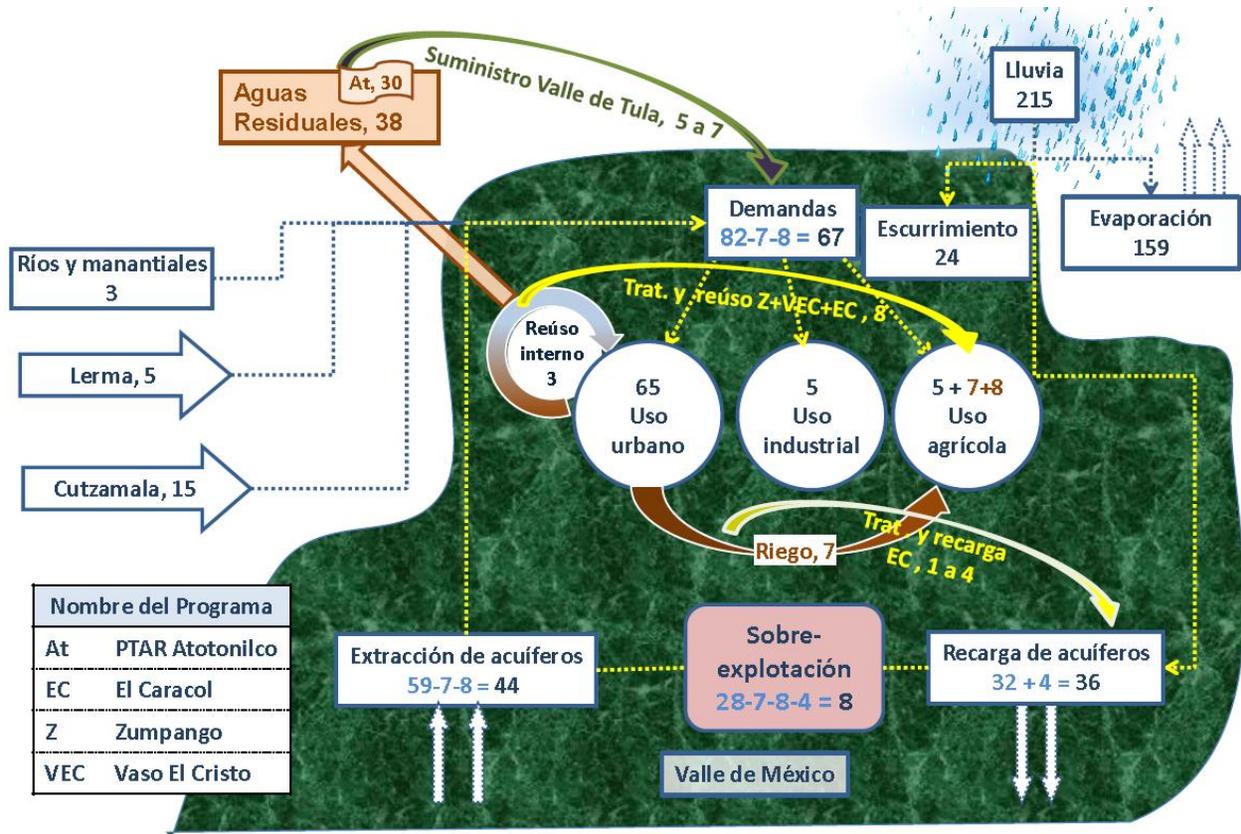
A continuación se presenta el balance hidráulico que realizó la Conagua para el año 2008: (Espino de la O, 2011)



Como parte de las políticas encaminadas a la sustentabilidad, se presentó el Plan de Saneamiento Hídrico de la Cuenca del Valle de México. Se espera que tenga los siguientes resultados:

1. Disminución gradual de la sobreexplotación
2. Disminución gradual de la demanda
3. Misma precipitación, evaporación, escurrimiento, reuso interno, uso urbano y uso industrial
4. Mayor uso agrícola
5. Menor extracción de acuíferos
6. Mayor recarga de acuíferos
7. Mayor tratamiento de aguas residuales

Después de su ejecución, se proyecta que el balance hídrico dé paso al siguiente escenario: (Espino de la O, 2011)



### Escasez de Agua

La escasez de agua se puede presentar forma temporal o permanente, por lo que no tienen la capacidad de satisfacer las necesidades de los habitantes de la cuenca. En el caso del Distrito Federal, se vuelve más vulnerable cuando existe una disminución del recurso con posibles efectos permanentes. Es necesario mejorar los índices que describen el estado de abastecimiento de la población, como el uso de recursos renovables per cápita (Agua dulce / población), el índice de pobreza hídrica, y la proporción de descargas de agua sobre recursos disponibles.

### Manejo de Incertidumbre

La incertidumbre es inherente a los procesos que conlleva el manejo del agua de la cuenca. El sistema se vuelve vulnerable debido a que existen incertidumbres en los aspectos de precipitación, datos y mediciones limitadas, y cambio climático. La resiliencia del mismo es un proceso constante y no un estado específico, por lo que el sistema debe adaptarse a estas

incertidumbres. Esto es, asegurar su adaptación al escenario de exceso de lluvia y escasez de la misma, y al escenario del cambio climático. Por otro lado, debe integrar a las mediciones factores de seguridad en caso de datos limitados.

### ***Rendimiento de la Cuenca***

La cuenca de México ofrece un rendimiento base homogéneo, y un rendimiento total que es variable a lo largo de los años. El rendimiento base o perenne se refiere a la cantidad de agua que puede ser utilizada permanentemente bajo condiciones específicas sin producir un resultado no deseado. Ejemplos de resultados no deseados son la reducción progresiva del recurso, la necesidad de bombeo excesivamente costoso, la degradación de la calidad subterránea, la interferencia con derechos fundamentales sobre el agua y la subsidencia del suelo. Todos estos resultados no deseados se han presentado en mayor o menor grado para la cuenca.

También el rendimiento es diferente en función de si el agua se encuentra debajo o encima de la superficie. El rendimiento del agua subterránea se ve afectado por la cantidad de precipitación, las características físicas del acuífero, la descarga para uso y consumo, el escurrimiento, la deforestación o reforestación y la recarga del acuífero. El rendimiento del agua superficial se ve afectado por la cantidad de precipitación, la descarga para uso de la población y la evaporación.

Es evidente que en los últimos años, la cuenca ha rendido al límite, por lo que conforme pasa el tiempo, hay menos opciones para el abastecimiento de agua, especialmente por la falta de recarga en los acuíferos. Por tanto, el abastecimiento de la cuenca es cada día más vulnerable. (Findikakis, 2011)

### ***Manejo del Agua Subterránea***

Por su importancia en el abastecimiento de agua la Ciudad de México, el agua subterránea es un elemento crítico que requiere un manejo inteligente y a conciencia en los aspectos de calidad, restauración del acuífero y programas de protección.

En el caso de la calidad, es indispensable el monitoreo constante para garantizar que la calidad del agua es la adecuada. Es muy importante identificar desde un proceso temprano, problemas de contaminación en el acuífero. También se debe en realizar programas de protección y prevención de contaminación, al enfocarse en las áreas que se utilizan para abastecimiento de agua, delineando áreas que concentren pozos de recarga, identificando

posibles fuentes de contaminación dentro de estas áreas, removiendo o conteniendo las fuentes sin calidad, desarrollando planes de emergencia ante fugas y derrames, y ampliando las campañas de educación.

En el caso de la restauración del acuífero, que es un procedimiento muy difícil y caro, se deben desarrollar elementos de asesoría para manejo de las fuentes de abastecimiento y programas de protección. Deben delinear un área de protección, realizar un inventario de actividades y fuentes potenciales de contaminación, ampliar los análisis de vulnerabilidad que se aterricen en estrategias de protección. Dichas estrategias deben impulsar:

1. La participación pública en la educación
2. El control y manejo de fuentes potenciales de contaminación
3. El desarrollo de planes de contingencia y emergencia en el caso de contaminación de pozos
4. El monitoreo constante de agua subterránea
5. Requerimientos de conservación por periodos de cinco años
6. Extracciones de agua subterránea habitadas
7. El uso extendido de la recarga artificial
8. La variación de la cantidad y localización del agua que se extrae a lo largo del tiempo
9. El uso conjunto del agua subterránea con el agua superficial

### ***Cuenca Cerrada y Transfronteriza***

La solución al problema del abastecimiento de agua ha exigido la participación de diferentes entidades políticas -delegaciones, entidades federativas, y la Federación-. Esto trae consigo retos especiales, como la competencia de intereses para el uso del agua, prevalecen miento de los marcos institucionales, el establecimiento de mecanismos para la resolución de conflictos, atención cuestiones de distribución de agua aguas arriba y aguas abajo, y atención a cuestiones de calidad del agua aguas arriba y aguas abajo.

El hecho de que el problema y extendido a varias entidades, causa inconvenientes para la transferencia de agua en bloque. Los más importantes son las disputas sobre la distribución del agua y los derechos sobre ella, efectos climáticos, alteración del ciclo hidrológico, impacto en la biodiversidad, cambios en la calidad del agua, cambios morfológicos en los ríos impactos ecológicos. Todos estos son vectores que inducen a la vulnerabilidad en el abastecimiento, ya

que se necesitan grandes espacios para almacenamiento de agua, cooperación y coordinación de esfuerzos entre las entidades con su respectivo control de la misma y cuestiones complejas para tomar una decisión ante tantos intereses.

Finalmente, el hecho de que la cuenca sea cerrada y no pueda drenar hacia otras cuencas adyacentes, ocasiona la concentración de agua en algunos puntos de la misma en donde existe gran cantidad de población asentada, aumenta de forma importante la vulnerabilidad del sistema. (Morales García, 2012) (Figuroa Palacios, 2011, 2012) (Trejo Hernández, 2012)

## Factores de Riesgo y Vulnerabilidad

### *Definición de Riesgo*

Es la cuantificación del potencial de pérdida que ocurre debido a actividades naturales o humanas. Dicho potencial se refiere a las consecuencias de las actividades referidas en forma de pérdida de vida humana, efectos adversos en la salud, pérdida de propiedad y daños al medio ambiente. (Modarres, 2006)

Para gestionar estos riesgos, se debe caracterizar, manejar e informar acerca de su existencia, naturaleza, magnitud, prevalencia, factores contribuyentes e incertidumbres de los potenciales de pérdida. (Modarres, 2006)

### *Peligros Naturales*

Un peligro natural es un evento y proceso de origen natural que es una amenaza potencial para la vida humana y la propiedad. (Keller & De Vecchio, 2012) Según Modarres, los riesgos naturales se clasifican de la siguiente forma:

1. Climáticos y de los Ecosistemas
  - a. Inundación
  - b. Tormenta
  - c. Tornado
  - d. Huracán
  - e. Sequía
  - f. Incendio forestal
  - g. Corrimiento de tierra (Subsidencia, avalancha, caída de rocas, deslave, derrumbe, flujo de arcillas, licuefacción, reptación)
2. De Tierra
  - a. Terremoto
  - b. Erupción volcánica
  - c. Tsunami
  - d. Corrimiento de tierra
  - e. Radiación
3. Espacio
  - a. Rayos cósmicos
  - b. Meteoritos
  - c. Asteroides
  - d. Cometas
4. Biológicos

- a. Enfermedades infecciosas (con origen a partir de bacterias, virus y fungi)
- b. Enfermedades animales
- c. Pestes de plantas
- d. Alérgenos

### ***Peligros Artificiales***

- 1. Químicos
  - a. Inflamables
  - b. Reactivos
  - c. Corrosivos
- 2. Carcinogénicos o tóxicos
- 3. Térmicos
- 4. Mecánicos
- 5. Electromagnéticos
  - a. Alto voltaje
- 6. Magnético
- 6. Radiación ionizante
- 7. Radiación no ionizante
  - a. Microondas
  - b. Radiofrecuencia
  - c. Ultravioleta
  - d. Infrarrojo
  - e. Laser
- 8. Biológico

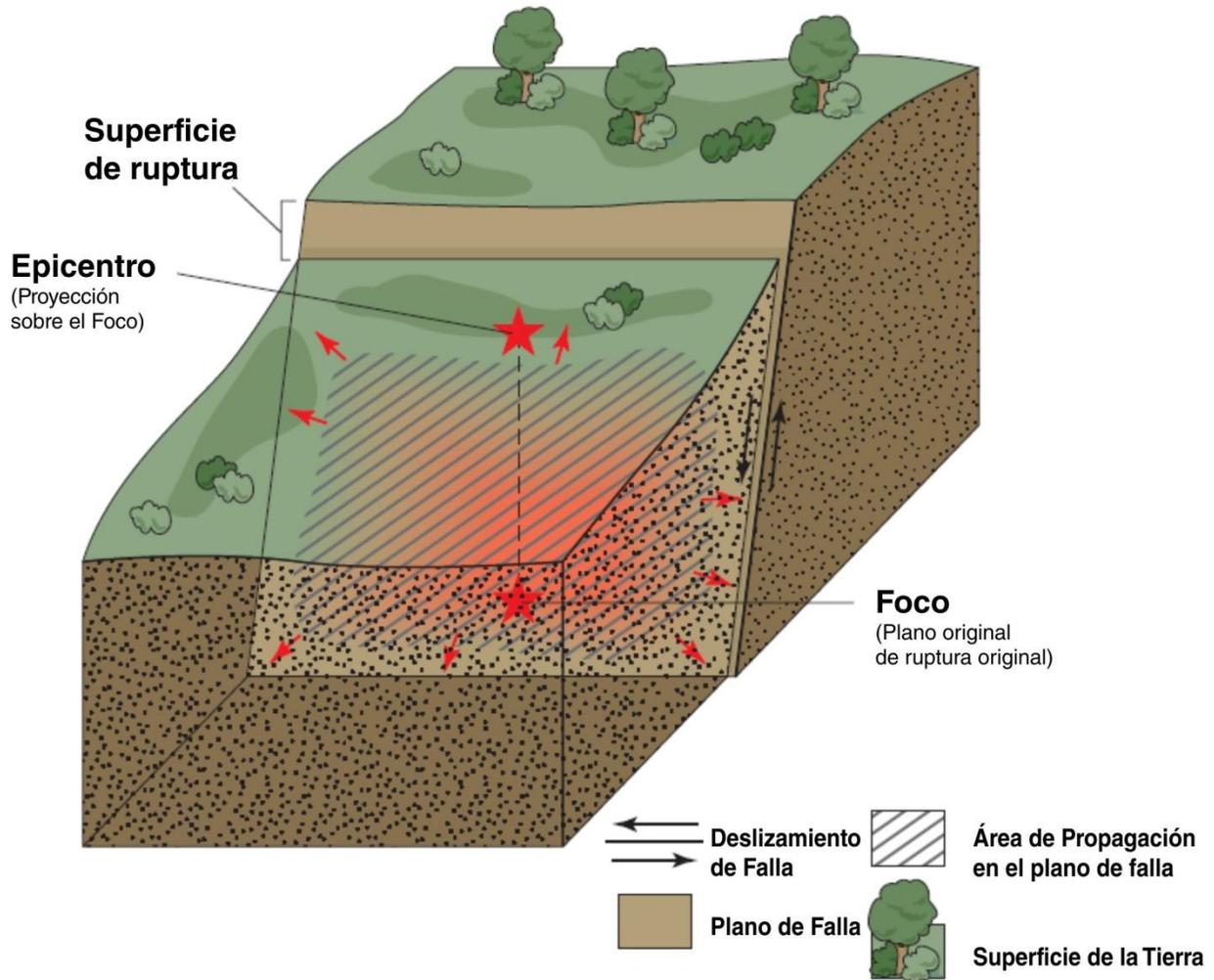
(Modarres, 2006)

### ***Peligros Naturales que propician la Vulnerabilidad***

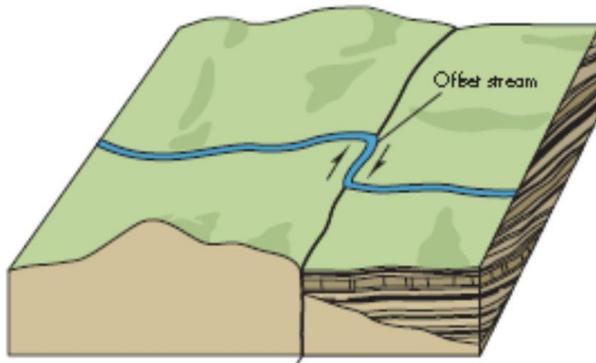
De los peligros enunciados anteriormente, los que tienen más potencial de daño son los naturales. Por la naturaleza de la cuenca de México, históricamente han causado problemas y afectaciones severas. El sistema hidráulico se ve amenazado principalmente por los peligros de Sismo, Inundación, Sequía y Corrimientos de Tierra, mismos que se explicarán a continuación.

#### ***Sismo***

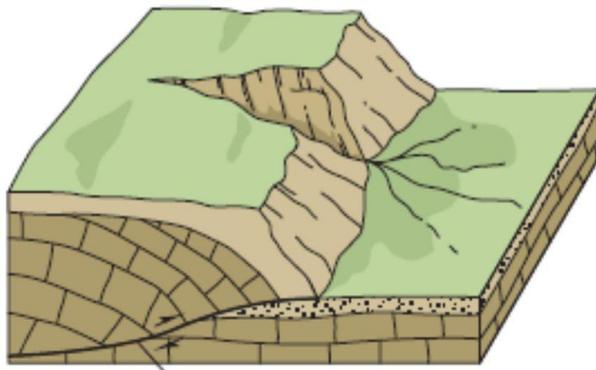
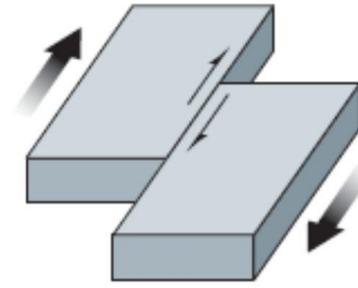
Los sismos son comparados por la cantidad de energía liberada (magnitud) y por sus efectos sobre las personas y estructuras (intensidad). El sismo comienza en el epicentro, que es el lugar sobre la superficie de la Tierra sobre el que las rocas presentaron ruptura. El punto de ruptura inicial es el foco o hipocentro, y está debajo del epicentro. La magnitud de momento es determinada al estimar el área de ruptura a lo largo del plano de falla, además de la cantidad de movimiento o desplazamiento a lo largo de la falla y la rigidez de las rocas cerca del foco. Esta escala se conoce como Escala Mercalli Modificada (MMS), o bien Mw.



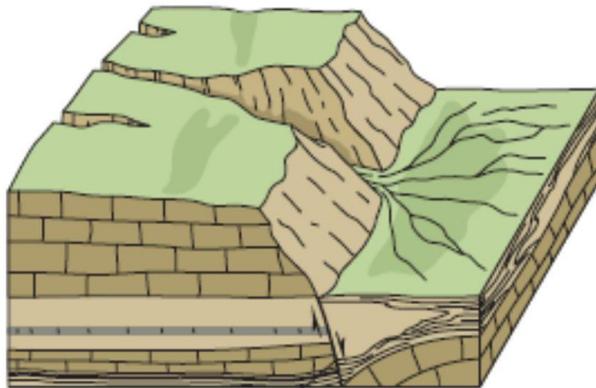
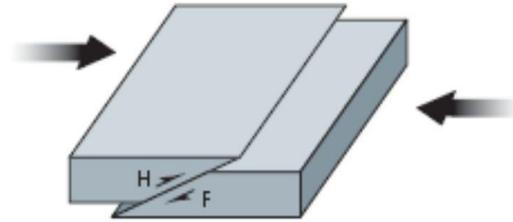
Los sismos resultan del proceso continuo de generación de fallas, que en principio pueden ser del orden de milímetros por año, siglo o milenio. La ruptura de estas fallas produce ondas de choque, u ondas sísmicas, que mueven el suelo. Existen las fallas horizontales, fallas por corrimiento y fallas normales. (Keller & De Vecchio, 2012)



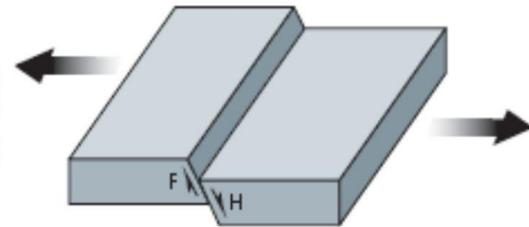
a) Falla Horizontal



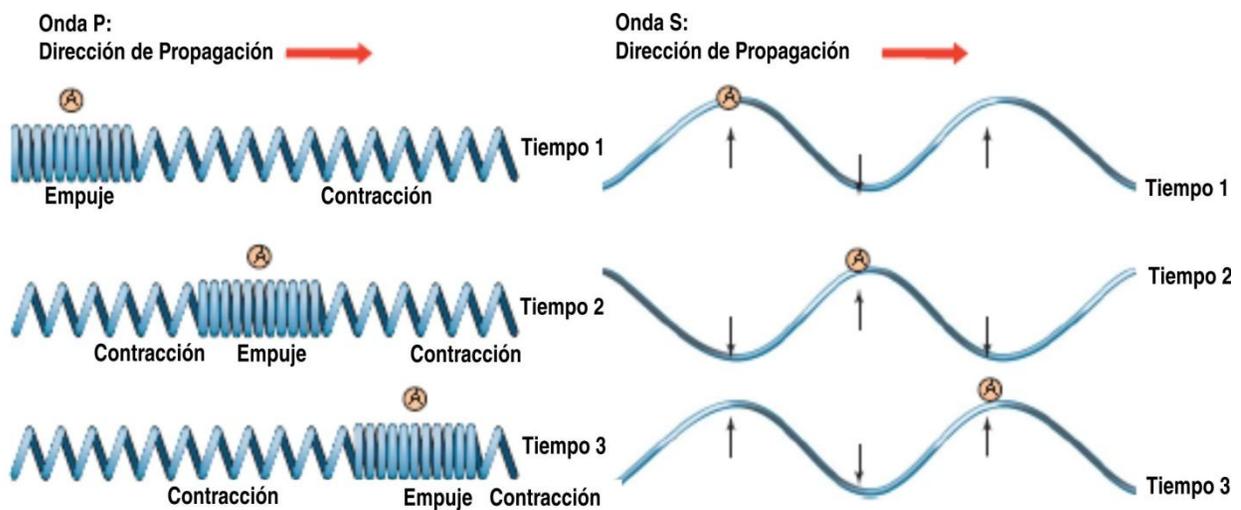
b) Falla por Corrimiento



c) Falla Normal



Algunas de las ondas sísmicas liberadas viajan a través de la superficie de la tierra. Existen las ondas P y las ondas S. Las ondas P son ondas de compresión, o primarias. Viajan muy rápidamente a través de sólido, líquido o gas, especialmente a través de los sólidos. En cambio, las ondas S, que son las secundarias o cortantes, sólo pueden viajar a través de materiales sólidos. Son más lentas, produciendo un vaivén de arriba a abajo, o cortante, en los ángulos rectos hacia la dirección en que se mueve la onda. Las ondas P y S llegarán a la superficie de la Tierra, formando ondas superficiales complejas. Las ondas superficiales producirán un movimiento ondulado, en el que los átomos vibran en dirección perpendicular a la dirección en que se propaga la onda. (Keller & De Vecchio, 2012)



La Ciudad de México se ve altamente influida por la continua subducción de la placa de Cocos, que interactúa con las placas de Norte América y del Caribe. La mayoría de los sismos que resiente se encuentran en los estados de Michoacán, Oaxaca y Guerrero. Estos se ven propagados por los suelos arcillosos y arenosos de la parte centro-norte del Distrito Federal, lo cual los convierte en una zona de muy alta vulnerabilidad. En el sur, el suelo basáltico mejora la interacción roca madre-suelo-estructura.

### **Actividad Volcánica**

La actividad volcánica se relaciona directamente con las placas tectónicas. Esto debido a que continuamente se produce la expansión o contracción de las placas litosféricas en las zonas frontera entre las placas, con interacción de roca fundida –magma cuando se encuentra debajo de la superficie-. El magma se forma principalmente en la astenósfera, que es la capa

delgada existente entre las placas litosféricas. La astenósfera se encuentra a una temperatura cercana al punto de fusión, por lo que fluye continuamente.

Existen tres formas bajo las cuales los silicatos se funden:

- a. Fusión por descompresión, que sucede cuando la presión subyacente ejercida sobre la roca, decrece. Ya que la presión aumenta en función de la profundidad, el gran cambio de la temperatura, hace que las rocas se fundan.
- b. Adición de volátiles, que disminuye la presión de la temperatura de las rocas, contribuyendo al rompimiento de los enlaces químicos entre los silicatos. Las rocas que están cercanas a la temperatura de fusión, se derretirán en la presencia de gases volátiles, como agua y dióxido de carbono.
- c. Adición de calor a las rocas de silicatos, lo cual induce la fusión si la temperatura de las mismas excede el punto de fusión de las rocas en esas profundidades.

Conforme pasa el tiempo, los volcanes incrementan su actividad, generalmente de forma lenta, pero continuamente creciente. (Keller & De Vecchio, 2012)

En el caso de la Ciudad de México, el volcán Xitle hizo erupción hace cientos de años, mientras que en la actualidad presenta mayor actividad el Volcán Popocatepetl, que se encuentra a 55 km al sureste. Cuando emite exhalaciones, algunas delegaciones del Distrito Federal reciben parte de las cenizas.

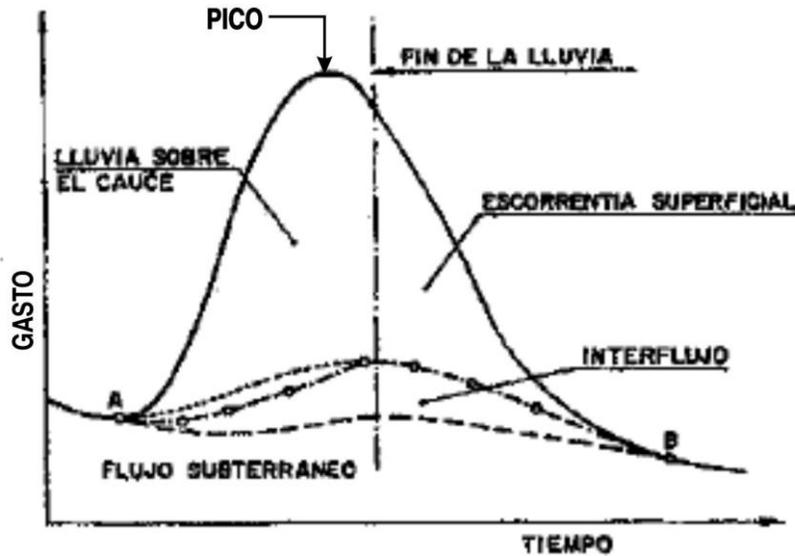
### ***Inundaciones***

Los arroyos y ríos son parte del ciclo hidrológico, en el que el agua se evapora de la superficie terrestre hacia la atmósfera y regresa hacia los océanos por escurrimiento. Cuando los diferentes escurrimientos se mezclan como afluentes, forman un río. Cuando uno o varios ríos se extienden a lo largo de una gran región, forman una cuenca.

La inundación es el proceso natural en el que un río se extiende a través de una gran área, llamada área de inundación. El flujo de un río se puede caracterizar por su gasto, y posteriormente asociarlo con el tiempo. (Keller & De Vecchio, 2012)

La lluvia que precipita es un agente natural para la ocurrencia de inundaciones. A continuación se presentan las principales características de un hidrograma, que es la

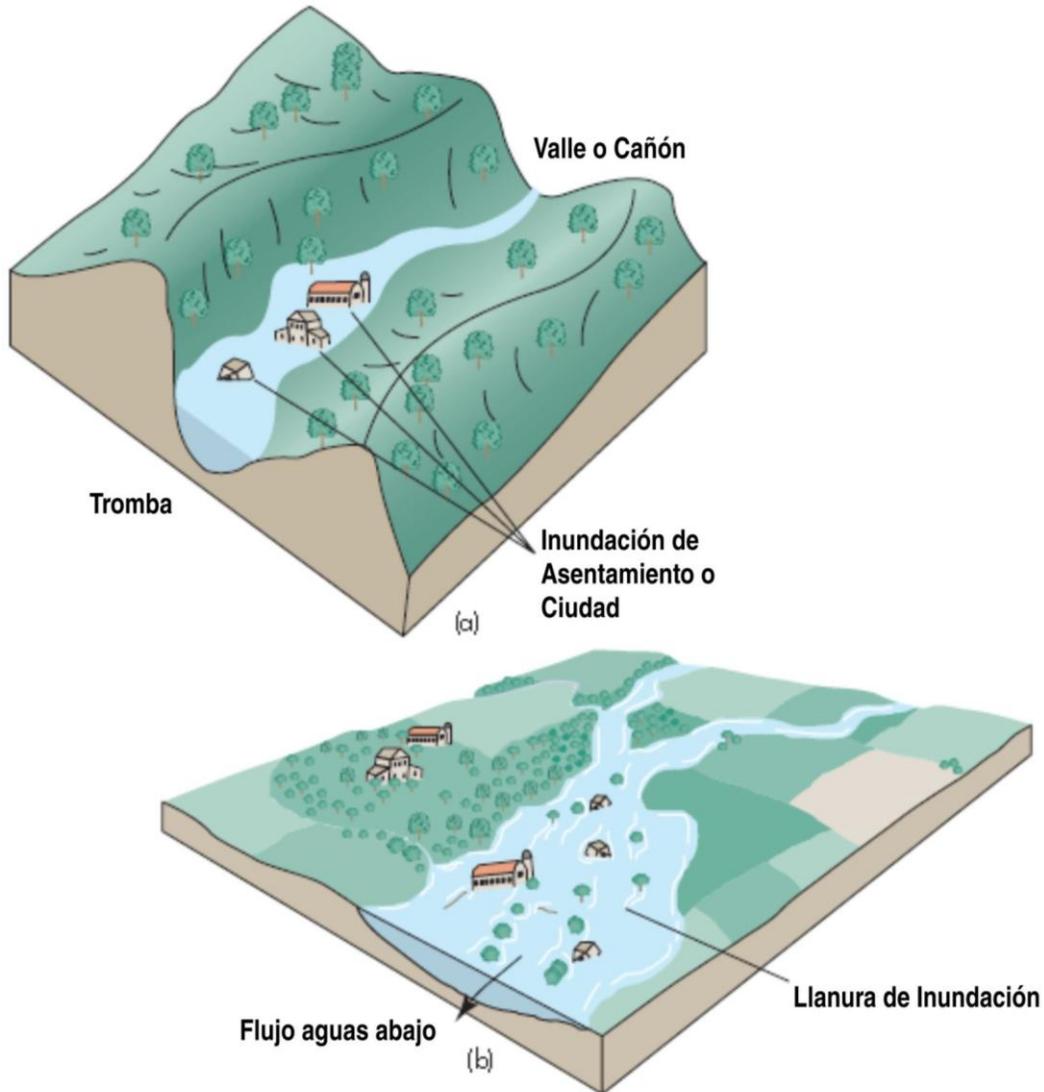
representación gráfica de la variación información hidrológica con respecto al tiempo. (Aparicio Mijares, 2010)



Las inundaciones se pueden caracterizar según el lugar de ocurrencia. A partir de esta premisa, son inundaciones por tromba las que típicamente ocurren en la parte superior de la cuenca y son producidas por una intensa precipitación de corta duración en un área relativamente pequeña. Si estas precipitaciones son abruptas, y con un gran volumen relativo, el pico de la descarga puede ser alcanzado en menos de 10 minutos. Las inundaciones por tromba se producen en regiones áridas y semiáridas, con grandes áreas que tienen una topografía accidentada y con poca vegetación. A pesar de que generalmente no causan la inundación, tienen afectaciones muy importantes, pudiendo dañar carreteras, caminos, puentes, viviendas y negocios.

Las inundaciones por acumulación aguas abajo se refieren a aquellas en las que se presentó una tormenta de larga duración, que saturó el suelo y produjo un incremento en el escurrimiento. La suma de varios escurrimientos produce una gran inundación, con un rápido incremento y decremento de la descarga en un lugar particular. (Keller & De Vecchio, 2012)

A continuación se presenta el diagrama según la ocurrencia de ambos casos. El caso que se presenta más recurrentemente en la Ciudad de México es el primero. Sin embargo, antes de que se secaran los lagos, el caso que se presentaba más frecuentemente era el segundo. (Blaikie, Cannon, Davis, & Wisner, 1994)



La Ciudad de México se encuentra en la Cuenca de México, que es una cuenca cerrada; es decir, no existe un flujo hacia otras cuencas, por lo que la tendencia natural del mismo es concentrarse en las zonas bajas de la Ciudad.

### **Sequía**

Los procesos ambientales que contribuyen a la ocurrencia de sequía son la erosión del suelo, la disminución de la biodiversidad, los incendios forestales, la calidad del agua, contaminación del aire, el cambio climático y la salud ambiental. La sequía se ve agravada con la existencia de presión social, degradación ambiental, disminución de aprovisionamiento, reducción de alternativas para producción de alimentos.

Las sequías también pueden ser resultado de eventos como inundación o falta de precipitación. Si existe la combinación de diversos factores de riesgo con la sequía, entonces se volverá un proceso muy grave para la población. Se debe buscar tener un enfoque analítico en todo momento, pues tiene repercusiones en los niveles local, regional, nacional e internacional. (Blaikie, Cannon, Davis, & Wisner, 1994)

En el caso de la Ciudad de México, la sequía ocurre principalmente por la disminución en los niveles y cantidades de agua en bloque que es transportada de la cuenca del Cutzamala. En caso de que la situación se torne grave, se llega a disminuir considerablemente la cantidad abastecida para los habitantes.

### ***Subsidencia y Problemas en los Suelos***

El suelo es el material sólido que alterado por procesos físicos, químicos y orgánicos, que puede ser removido sin necesidad de realizar voladuras. El estudio de los suelos es un elemento importante para evaluar los peligros naturales y se ve afectado por deslizamientos, inundaciones y sismos, debido a que el suelo varía dependiendo de las áreas y los estratos. El desarrollo de los suelos se asocia con los ciclos hidrológico y de rocas, siendo la intemperización el proceso más importante.

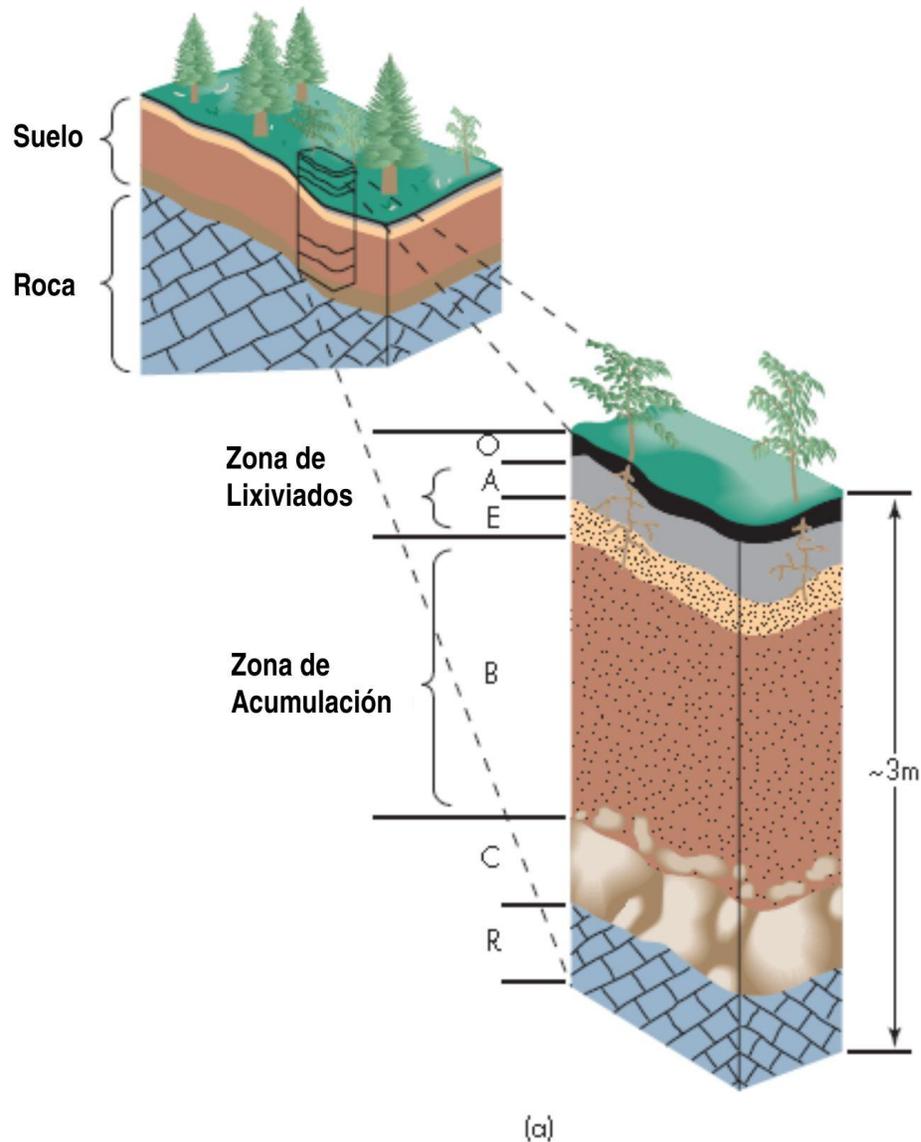
La intemperización es el proceso físico y químico en el que las rocas se descomponen. Las rocas intemperizadas son posteriormente afectadas por los organismos presentes en el suelo, del que se derivan la roca transportada o residual. También el suelo es transportado por agua, viento, entre otros medios. (Keller & De Vecchio, 2012)

El suelo es un sistema abierto que interactúa con componentes del ciclo geológico, como clima, presión, calor, topografía, humedad, procesos orgánicos, tiempo y roca madre.

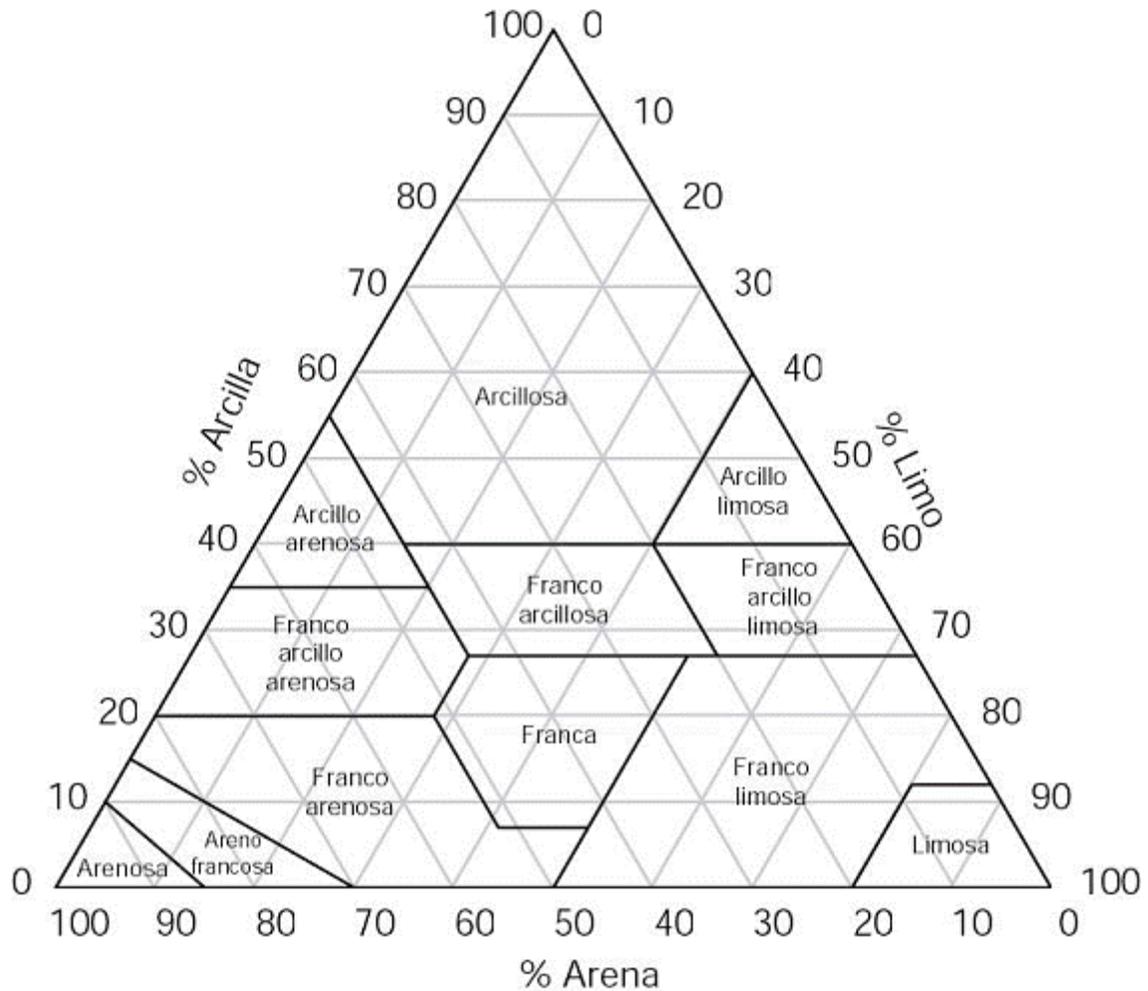
El suelo está dividido en horizontes, que son:

- O. Es el horizonte compuesto por materiales orgánicos, con un color muy oscuro.
- A. Es el horizonte compuesto por materiales orgánicos y minerales. Con un color más claro que el horizonte O. Aquí ocurre la lixiviación, o disolución, lavado o drenado de materiales del suelo por percolación del agua subterránea.
- E. Es el horizonte compuesto por materiales de color claro, a partir de la lixiviación de arcillas, calcio, magnesio y hierro.

- B. Es el horizonte rico en arcillas, óxidos de hierro, silicio, carbonato y otros materiales. Es la zona de acumulación.
- C. Es el horizonte compuesto por roca intemperizada y roca madre. El horizonte está cubierto con óxidos de hierro, generalmente de color rojo.
- R. Roca madre.



Los minerales formadores de rocas se conjuntan, pudiendo ser compuestos por arcillas, limos y arenas, pudiendo clasificarse a partir de estos. Las partículas se conocen como agregados. Mientras un suelo tenga más contenido de arcilla y/o arena, será más propenso a fomentar la vulnerabilidad ante la subsidencia. (Keller & De Vecchio, 2012)



El perfil de desarrollo del suelo puede ser bajo, medio o alto. (Keller & De Vecchio, 2012)

1. El suelo con bajo desarrollo se caracteriza ser de tipo granular, en bloque o prismático. Se localiza entre los estratos O, A, E, B y C. Presenta una alta oxidación. Tiene una edad de unos cientos de años.
2. El perfil de suelo moderadamente desarrollado es de tipo bloque o prismático. Tiene una edad de más de unos 10 mil años.
3. El perfil de suelo bien desarrollado se caracteriza por colores rojizos que se pueden encontrar en el horizonte B. Tiene estructura columnar, y su edad oscila entre los 40 mil y cientos de miles de años.

Los intersticios presentes entre las rocas están generalmente compuestos por aire o líquidos, generalmente agua. Cuando todos estén ocupados por agua, el suelo se encuentra

saturado; de lo contrario es no saturado. La cantidad de agua presente en el suelo es determinante para trabajar con él y comprender sus capacidades de trabajo.

Los suelos que presenten menor estructura orgánica son los que fomentarán la subsidencia, los corrimientos y otras fallas en el suelo. Para que suceda esto, la principal actividad que es agente de debilitamiento de los suelos es la sobreexplotación de pozos.

Conforme han pasado los años, los pozos de abastecimiento han sufrido una mayor demanda en número y extracción. El tiempo de vida de un pozo está fuertemente vinculado a la cantidad de agua que se extrae y la cantidad de agua que puede ofrecer. Los pozos que no son recargados, tendrán un tiempo de vida útil menor a los que sí son reabastecidos.

Debido a que la mayoría de los pozos, no son recargados, se ha derivado desde hace décadas en hundimientos y abatimiento de niveles. Los hundimientos causan afectaciones a estructuras en general; entre las más importantes están el dislocamiento de conductos, afectación al funcionamiento del sistema, encharcamientos y necesidad de bombeo en zonas donde antes no se requería. Asimismo, el abatimiento de niveles altera el comportamiento regular del suelo, ya que propicia sequías en temporada de estiaje y facilita la formación de encharcamientos en época de lluvias. La solución general a este problema ha sido implementada aumentando la carga de bombeo.



# Ingeniería de Resiliencia aplicada para la disminución de la Vulnerabilidad del Sistema Hidráulico de la Ciudad de México

---

## Incidentes en los Últimos Años

### 1. Inundaciones en vías principales

Desde hace muchos años, pero con especial atención mediática desde el 2005, ocurren inundaciones severas en las arterias principales del Distrito Federal. Entre ellas se encuentra Periférico, el Distribuidor Vial de San Antonio y Viaducto. Además del tráfico severo que causan, se da el caso de que se tardan horas e inclusive días para ser descongestionadas. (Velázquez, 2011)

### 2. Hundimientos en el Aeropuerto

Debido a la zona en la que se encuentra asentado, el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México se ve continuamente en la necesidad de ser sujeto de mantenimiento para compensar los hundimientos. Estos han ascendido a niveles de entre 10 y 25 cm por año- (Lesser Illades & Cortés Pérez, 1998)

### 3. Falla en el Túnel Emisor Poniente

El Túnel Emisor Poniente, obra construida en 1964 para descargar las aguas negras de la Ciudad de México, sufrió una ruptura considerable en el año 2009, inundando la zona de Valle Dorado, en Atizapán de Zaragoza, municipio contiguo a la Ciudad de México. Hubo fallecidos en el incidente, que provocó descompensación al sistema de drenaje. Se anunció una obra de reparación posteriormente. (Grupo Reforma, 2010)

### 4. Inundaciones en el Valle de Chalco

El Valle de Chalco, conurbado a la Ciudad de México, ha sufrido importantes inundaciones en los últimos años. Se calcula que presenta un hundimiento de 20 cm por año. Al día de hoy, se calcula que el Valle ha sufrido un hundimiento total de 11 metros, por lo que el Canal de la Compañía se desborda anualmente. La inundación se acelera cuando precipitan trombas y cuando la basura se

concentra cerca de las coladeras. La inundación más grave se produjo en el 2010. (Huerta & Universal, 2011)

5. Inundación en el camino al Bordo Poniente

En el 2011 ocurrió una inundación en buena parte de los 3 km que conducen al Bordo Poniente. Entonces se desató una crisis de la basura en el Distrito Federal, pues miles de camiones quedaron en espera de poder llevar la basura a su depósito oficial. Los municipios aledaños cooperaron, pero tampoco se dieron abasto. Después de varios días en que la Ciudad se llenó de basura, los camiones pudieron llegar a descargarla.

6. Socavones en el suelo Álvaro Obregón

A partir de la importante extracción de agua para uso en el Distrito Federal, se han multiplicado la cantidad de socavones que aparecen, principalmente en la delegación Álvaro Obregón. Generalmente suceden por el reblandecimiento de la tierra o por exceso de lluvias que concentran la carga, y colapsan. Han llegado a tener hasta 15 metros de diámetro, produciendo gran preocupación entre la población. (Milenio Noticias, 2011)

7. Sequía en el año 2012

El Distrito Federal y las cuencas que lo abastecen han sufrido los estragos de la peor sequía que se haya presentado en México los últimos 70 años. Además de la falta de precipitación, se han presentado cuadros de fallecimiento de animales, pérdida de cosechas y deshidratación en la población. Como medida emergente, se anunció en el mes de mayo que el suministro será reducido en un 15%, sin una fecha determinada para el restablecimiento del mismo. (El Economista, 2012)

8. Sismo en marzo de 2012

El sismo del 20 de marzo, de 7.4 grados de magnitud Mw, con sus más de 700 réplicas, tuvo una afectación en el abastecimiento del sistema hidráulico. De acuerdo con el Sistema de Aguas de la Ciudad de México, la población afectada por cortes de agua ascendió a 250 mil personas. Se presentaron 24 fugas de agua en las 48 horas posteriores al sismo, siendo que la población más afectada fue la delegación Iztapalapa. (Grupo Reforma; Animal Político, 2012)

## Análisis FODA del Sistema Hidráulico de la Ciudad de México



## De la Vulnerabilidad y los Peligros a los Riesgos y los Daños

A continuación se presenta el análisis de los factores que pueden llevar a la ocurrencia de los 5 desastres identificados a partir de los peligros naturales. El análisis incluye las causas raíz, las presiones y las condiciones de seguridad que se conjuntan. Además se proponen alternativas para la mitigación de los mismos.

# Sismo (1)

## Causas Raíz

- El sistema está asentado en una zona con muchos peligros de orden sísmico. Los principales peligros provienen de la continua subducción de la placa de Cocos con respecto a las placas de Norteamérica y el Caribe. Existe la amplificación de la actividad sísmica en suelos arcillosos y lacustres, ubicados en la zona norte del Distrito Federal. También existe actividad inherente al Eje Neovolcánico, que incluye actividad volcánica y sismos de magnitud relativamente baja. Además existen importantes discontinuidades y fallas en toda el área de asentamiento humano.

## Presiones del Entorno

- Los asentamientos humanos han proliferado a con explosividad a lo largo de la cuenca. Esta región es una de las más pobladas del mundo.
- Es insuficiente la cobertura de abastecimiento y drenaje, y en mayor grado, la de tratamiento. Las alternativas para ampliar la capacidad del sistema de abastecimiento son limitadas.
- La urbanización produce que las obras sean lentas.
- La poca ampliación que se le dio en las últimas décadas a los sistemas de abastecimiento, drenaje y tratamiento ocasiona que se solucionen con obras de magnitud faraónica.

## Condiciones de Seguridad

- La sobreexplotación de pozos ocasiona un debilitamiento importante del suelo, mismo que aumenta la vulnerabilidad estructural del sistema en caso de sismo.
- Apenas se reactivó el mantenimiento a emisores fundamentales, mismos que no se habían revisado en más de 40 años.
- Aún existen tuberías que fueron colocadas hace 100 años.
- La proporción de tuberías que se comportan flexiblemente en caso de sismo es baja.
- Pocas infraestructuras del sistema tendrían la capacidad de operar en condiciones de falta de suministro eléctrico.

## Consecuencias por Ocurrencia del Desastre

- Saturación y colapso de redes de drenaje, además de destrucción de infraestructura como colectores y emisores
- Incremento de presión hídrica
- Daño a estructuras de abastecimiento, la cual es cortada en algunas partes de la ciudad, además de sufrir dislocaciones de conductos y aumento de fugas
- Daño a estructuras de drenaje, donde los daños se encuentran principalmente en las uniones de los conductos
- Desabasto de agua potable y alimentos
- Discontinuidades en los suelos que provocan agitación, ruptura y deslizamientos de las líneas de conducción.
- Resonancia en caso de existir movimientos horizontales y vibración de líneas de conducción
- Licuefacción de infraestructura ubicada entre arcillas saturadas cercanas a la superficie.

## Medidas de Mitigación

- Elaboración de mapas de riesgo del sistema, que revelen la localización y probables secuelas de un gran sismo en el sistema. Estos mapas de riesgo deben incluir los posibles epicentros, la clasificación y comprensión de las fallas y el trabajo preventivo de protección civil.
- Instalación de un sistema de monitorización del funcionamiento de la red, con más redundancias y exactitud en las mediciones.
- Desarrollo de estructuras seguras ante sismo.
- Desarrollar un plan que contemple la posible necesidad de evacuación total de los operadores del sistema.
- Preparación al sistema ante posibles saqueos, pérdidas económicas y dificultad aguda para mantener los servicios públicos.
- Evaluación un plan para garantizar el funcionamiento del sistema, ya sea que el fenómeno adverso ocurra por la mañana o por la noche.

## Sismo (2) Causas Raíz

### Presiones del Entorno

### Condiciones de Seguridad

- El sistema no tiene, en lo general, forma de amortiguar el daño que realizan las ondas sísmicas; en mayor grado las S y en menor grado las P.

### Consecuencias por Ocurrencia del Desastre

- Deslizamiento de infraestructura cercana a las áreas montañosas.
- Rompimiento de líneas de abastecimiento de energía eléctrica. Esto es agente de incendios en instalaciones del sistema.
- Interrupción de servicios de tratamiento y cloración, que pueden derivar en calidad insuficiente del agua.
- Ruptura de la red de alcantarillado y la red de distribución de agua potable, causando contaminación del agua por organismos patológicos.
- Colapso de estructuras inseguras.

### Medidas de Mitigación

- Desarrollo de un plan para la conservación de las infraestructuras críticas, tanto aquellas irregulares como aquellas que están en etapa de construcción.
- Fortalecimiento de la estabilidad estructural de suelos poco cohesivos que alberguen infraestructura, previniendo desplazamientos, rupturas, subsidencia y cambios abruptos en el volumen del suelo.
- Conexión con la alarma sísmica para garantizar que todos los operadores reciban una alerta temprana, que les permita disponer de entre uno y dos minutos para ejecutar los planes de protección civil.
- Realización simulación de eventos sísmicos de diferentes magnitudes sobre la red.
- Desarrollo de medidas para el desahogo de presión.
- Prevención la ocurrencia de golpes de ariete por los acontecimientos que estén sucediendo.
- Protección de estructuras críticas.
- Aumento de la cobertura de aseguramiento contra pérdidas en el sistema.

## Inundación (1)

### Causas Raíz

- Se da el caso de tormentas continuadas por varios días, de intensidad baja, media y alta. También se da el caso de una precipitación extraordinaria (de hasta el 20% de la precipitación anual total) en unas horas. Esto deriva en encharcamientos e inundaciones. Además, se han presentado granizadas intensas, con duración de más de una hora.
- Debido a que el clima es más seco que en las últimas décadas, las inundaciones tienen más potencial de afectación.
- Los eventos extremos con periodos de retorno muy grandes, o inesperados, son muy difíciles de anticipar. Aún así se pueden tomar precauciones.

### Presiones del Entorno

- Los asentamientos humanos han proliferado a con explosividad a lo largo de la cuenca. Esta región es una de las más pobladas del mundo.
- Es insuficiente la cobertura de drenaje, por lo que las alternativas para ampliar la capacidad del sistema son limitadas.
- La urbanización produce que las obras sean lentas.
- La poca ampliación que se le dio en las últimas décadas a los sistemas de abastecimiento, drenaje y tratamiento ocasiona que se solucionen con obras de magnitud faraónica.

### Condiciones de Seguridad

- Existe poco aseguramiento de los bienes del sistema.
- La sobreexplotación de pozos ocasiona un debilitamiento importante del suelo, mismo que aumenta la vulnerabilidad estructural del sistema en caso de inundación.
- Apenas se reactivó el mantenimiento a emisores fundamentales, mismos que no se habían revisado en más de 40 años.
- Aún existen tuberías que fueron colocadas hace 100 años.
- La proporción de tuberías que se comportan flexiblemente en caso de sismo es baja.
- Pocas infraestructuras del sistema tendrían la capacidad de operar en condiciones de falta de suministro eléctrico.

### Consecuencias por Ocurrencia del Desastre

- Saturación y colapso de redes de drenaje, además de destrucción de infraestructura como colectores y emisores
- inundación con pérdida parcial o total de viviendas
- Flora estropeada y árboles caídos. La acumulación de basura y flora provoca la obstrucción de vías de desfogue, además de ductos y alcantarillas que permiten el regreso del agua a los canales del río.
- Desborde de ríos, alcantarillas y lagunas de regulación
- Incremento de presión hídrica.
- Desabasto de agua potable y alimentos.
- Presencia de diarreas, vómitos e intoxicaciones que derivan en enfermedades gastrointestinales como cólera, dengue y malaria.
- Atrofia de electromaquinaria y otros activos del sistema.
- Destrucción de infraestructura y vivienda
- Pérdidas humanas por ahogamiento y enfermedades gastrointestinales
- Irrupción y destrucción en líneas de conducción, sistemas de bombeo y tanto colectores como alcantarillas.

### Medidas de Mitigación

- Continuación de los esfuerzos para modificar y prevenir los desastres de inundación. Estos esfuerzos incluyen estrategias para reducir la intensidad del peligro, además de la proposición de diferentes formas de intervención preventiva, y mitigación de efectos de inundaciones.
- Las modificaciones de las trayectorias de los flujos de agua deben ser armónicas y bien estudiadas.
- Se debe seguir la construcción de presas y estructuras de control, priorizando que sean muchas y de pequeña a mediana capacidad.
- Reevaluación de la seguridad en las estructuras de gran escala, enfocándose especialmente en los problemas con la capacidad de diseño y acarreo de sedimentos. Además, aseguramiento de los procesos constructivos, localización de los elementos del sistema y actuación ante una precipitación extraordinaria.
- Cobertura total, donde sea necesaria, de los diques artificiales, fomentando la utilización de terraplenes y muros de contención que rodeen áreas específicas.

## Inundación (2)

### Causas Raíz

### Presiones del Entorno

- Las presiones económicas y sociales fuerzan a la población marginada a establecerse en locaciones urbanas proclives a inundaciones. Al regularizar los asentamientos, el costo de las obras se incrementa, ya que las locaciones urbanas generalmente no estaban contempladas en los planes de desarrollo. El suelo está cubierto por superficies impermeables, y los asentamientos que se encuentran en laderas de montañas y cerros incrementa la cantidad de escurrimiento. Las áreas de captación son pequeñas, que ante la ocurrencia de trombas, derivarán en inundaciones exprés. El peligro se incrementa en asentamientos aguas abajo y áreas cercanas a las presas, vasos de almacenamiento, y lagunas de inundación.

### Condiciones de Seguridad

- Se produce la obstrucción de vías terrestres, pudiendo ocasionar muerte de personas que se encuentran en los automóviles, que por la combinación de la flotación y la fuerza lateral, ocasiona el volteo de la unidad.
- En caso de ocurrencia de una inundación exprés, las personas difícilmente tendrán forma de identificar los riesgos emergentes, por lo que difícilmente podrán ser avisadas.
- En caso de precipitación abundante, pero lenta y continua, se puede producir la combinación de inundación urbana con desborde de ríos.
- La falla del sistema derivará en una reconstrucción lenta, costosa y muy difícil.
- En caso de que el sistema se vea rebasado, se producirán nuevas trayectorias entre los cauces, posterior a su desbordamiento, siguiendo la ley del mínimo esfuerzo.

### Consecuencias por Ocurrencia del Desastre

- Fomento de la participación de las colonias, favoreciendo su interacción con el sistema. A partir de ello, asegurar la atención de las necesidades de interacción y seguridad.
- Concientización y educación para que la población coopere con los gestores del sistema de agua. Advertencia en el desarrollo de las medidas de seguridad que la población tiende a ignorar medidas y restricciones en caso de falla del sistema.
- Enfocarse para crear un aviso efectivo y expedito a la población y los operadores del sistema, de forma que la alerta permita administrar mejor el tiempo y las decisiones.
- Fomentar la comunicación y credibilidad entre los operadores del sistema.
- Desarrollo planes de evacuación, tanto para la población como los operadores del sistema.
- Impulso de monitorización y mejora en el control del uso de las planicies aluviales y de inundación, así como de la profundidad y velocidad de flujos de agua, de las subidas y de los periodos de retención de las estructuras.

### Medidas de Mitigación

### Inundación (3)

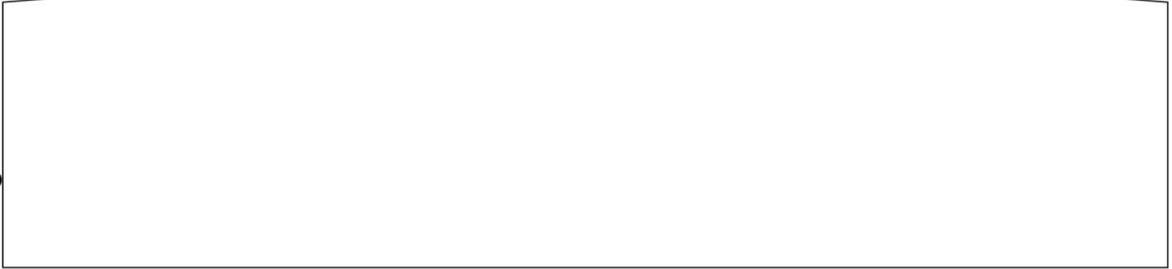
#### Causas Raíz



#### Presiones del Entorno

- Una lluvia atípica que deriva en inundación es difícilmente prevenida.
- Los hundimientos ocasionan la pérdida de pendiente de los principales emisores de la ciudad.

#### Condiciones de Seguridad



#### Consecuencias por Ocurrencia del Desastre

- Falta de lagunas de regulación, drenaje, instalaciones sanitarias, plantas de tratamiento y sistemas sépticos, con desbordamientos de los flujos acarreados.
- Incorporación De desechos, pesticidas, aceites y gasolinas a los flujos de agua del sistema.

#### Medidas de Mitigación

- Optimización de los planes de mantenimiento, ampliación de infraestructura y operación del sistema según la época del año.
- Trabajo directo con Protección Civil, Universidades e Institutos para mejorar la efectividad en los pronósticos, alertas y evacuaciones.
- Fomento de la capacidad de filtración en las áreas pavimentadas, cementadas, edificios y drenajes del sistema.
- Instalación de pozos de reinyección, que amortigüen los hundimientos del sistema.
- Implementación de un programa que identifique los suelos colapsables o expansivos sobre los cuales el sistema se encuentre asentado.
- Actualizar los estudios subterráneos.
- Revisión sobre el estado de drenes subterráneos, alcantarillas, canaletas y cimentaciones de refuerzo.
- Tratamiento en infraestructura pesada de los suelos expansivos, utilizando suelos más resistentes.
- Evaluación de la correcta viabilidad de construcción en áreas con peligros naturales.

## Inundación (4)

Causas Raíz

Presiones del Entorno

Condiciones de Seguridad

Consecuencias por Ocurrencia del Desastre

Medidas de Mitigación

- Mejora en las infraestructuras de contención de material orgánico, sedimentos finos y agentes infecciosos en los cuerpos de agua y posterior depósito de éstos en tierra.
- Revisión de la regulación de las llanuras de inundación.
- Ampliación de la cobertura asegurada ante inundación.
- Aumento en la altura de las cimentaciones del sistema.
- Protección ante los hundimientos presentados.
- Construcción de paredes de contención de inundaciones alrededor de las infraestructuras críticas.
- Ampliación de los programas para instalación de drenes y sistemas de bombeo.
- Revisión de las zonas de riesgo, de forma que se permita ampliar los mapas geológicos y de riesgos.
- Ampliación de la integración de equipos para atención de inundaciones.
- Desarrollo de un programa post-desastre que privilegie la revisión de daños, el contacto con la Comisión Federal de Electricidad, y el lavado del sistema hidráulico.

## Sequía (1) Causas Raíz

- La naturaleza dinámica de la atmósfera deriva en una constante falta de precipitación por periodos prolongados de tiempo. La falta del líquido ocasiona problemas que rápidamente se vuelven tangibles para la población.
- A pesar de no haber sido comprobado hasta sus últimas consecuencias, se sospecha que el cambio climático influye en los cambios de la cantidad de precipitación que se presenta.

## Presiones del Entorno

- El hecho de que existan 9 millones de habitantes en el Distrito Federal y más de 20 millones en el área metropolitana, compartiendo prácticamente los mismos recursos hídricos que les brinda la cuenta, ha derivado en una gran presión sobre el recurso.
- La poca ampliación que se le dio en las últimas décadas al sistema de tratamiento, ha ocasionado que haya sido prácticamente nula la cantidad de agua reciclada, en comparación con toda el agua que se utilizado históricamente.

## Condiciones de Seguridad

- No existen suficientes estructuras de almacenamiento, que puedan brindar una holgura acumulada de agua potable de sequía.
- La cantidad de fugas que se tienen es muy alta, y pasa factura cuando se presenta una época de crisis.
- No existe una cobertura total de cisternas, al menos para uso de las colonias del Distrito Federal.

## Consecuencia por Ocurrencia del Desastre

- Evaporación acelerada del agua superficial
- Extracciones extraordinarias de agua subterránea Recarga prácticamente nula por periodos prolongados de tiempo
- Presión hídrica
- Encarecimiento del recurso y de insumos
- Deshidratación entre la población
- Enfermedades gastrointestinales
- Proliferación de fauna nociva en coladeras y drenajes
- Dificultad para gestión y distribución del líquido
- Olores insoportables
- Descontento social que puede explotar con facilidad.

## Medidas de Mitigación

- Perfeccionamiento las soluciones tecnológicas que han sido insuficientes en el pasado, como contención de inundación e introducción de procedimientos agrícolas.
- Desarrollo mecanismos para anticipar y adaptar el funcionamiento del sistema a niveles de operación menores a los de diseño.
- Promoción de la erradicación de la explotación comercial del recurso hídrico.
- Maximización de la transición del reabastecimiento del agua a la población.
- Incremento de la efectividad de las campañas para uso del recurso.
- Desarrollo de sistemas constantes de monitorización del estado de las lluvias, para anticipar la posible sequía meses antes de su ocurrencia.
- Incorporación de políticas y diseños más sustentables.
- Creación de infraestructura de tratamiento y posterior reinyección de la misma.

## Sequía (2) Causas Raíz

### Presiones del Entorno

- Las presiones económicas y sociales fuerzan a la población marginada a establecerse en locaciones con poca infraestructura de abastecimiento. Al regularizar los asentamientos, el costo de las obras se incrementa, ya que las locaciones urbanas generalmente no estaban contempladas en los planes de desarrollo. El suelo está cubierto por superficies impermeables, por lo que la proporción de captación de agua es muy baja.

### Condiciones de Seguridad

### Consecuencias por Ocurrencia del Desastre

### Medidas de Mitigación

- Desarrollo de planes para la importación de agua en bloque, especialmente de la cuenca de los ríos Santiago y Tecolutla.
- Disminución de flujo aportado a lo largo de todo el año, para que no se tenga que realizar únicamente en periodos críticos, donde la sequía causa paranoia a la población.
- Ampliación de la red de presas y vasos de almacenamiento, ubicándolos especialmente en las áreas conurbadas del norte y oriente de la ciudad.
- Evaluación de la posibilidad de implementar efectiva y con seguridad la siembra de nubes para inducir la creación artificial de nubes.
- Mejora de la efectividad para la monitorización de los niveles de precipitación, evaluando dinámicamente los ajustes que se deben realizar en el consumo de la población.

### Sequía (3)

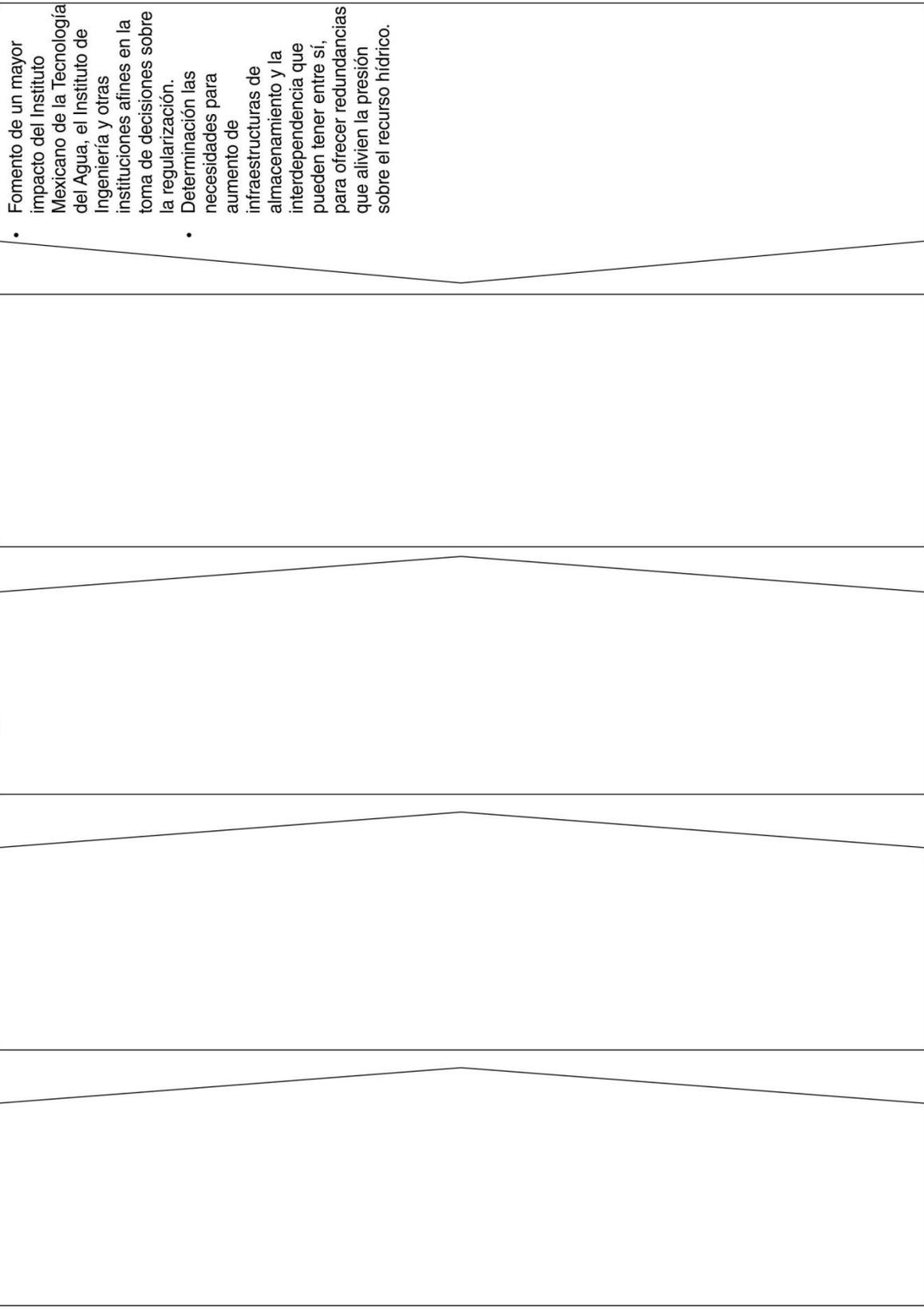
Causas Raíz

Presiones del Entorno

Condiciones de Seguridad

Consecuencias por Ocurrencia del Desastre

Medidas de Mitigación





## Vulcanismo (1) Causas Raíz

- La zona en la que se encuentra ubicado el Distrito Federal ha tenido por siglos una intensa actividad volcánica. Prueba de ello es la erupción del Xitle hace pocos miles de años. En la última década ha tenido actividad el Volcán Popocatepetl.

## Presiones del Entorno

- Las concentraciones de población se encuentran a una distancia media-grande de los volcanes. Las personas han nacido cerca del volcán, o se han instalado cerca al mismo pensando que una erupción no es probable.

## Condiciones de Seguridad

- Las erupciones que se dan a una distancia corta-mediana de concentraciones de población, pueden ser catastróficas.
- Ningún sistema está preparado para soportar en su totalidad la erupción de un volcán.

## Consecuencias por Ocurrencia del Desastre

- El volcán dañará, dependiendo de la magnitud de las emisiones, la infraestructura hidráulica que se concentra en las zonas oriente y sur del Distrito Federal.
- Emisión de gases contaminantes –vapor de agua, dióxido de carbono, nitrógeno, cloruros volátiles, ácidos clorhídrico y sulfhídrico, entre otros-.
- Emisión de magma líquido (lava) a ciertos kilómetros del cráter.
- Emisión, dependiendo el tamaño de la partícula de material piroclástico, de ceniza, lapilli y bombas. El material alcanza una distancia considerable, que llega a afectar a la ciudad. En caso de combinarse con agua producto de la precipitación, tiene la capacidad de tapan el sistema de drenaje.
- Se produce destrucción hasta en una magnitud muy importante.

## Medidas de Mitigación

- Mejora en los sistemas de monitorización: de actividad sísmica, de condiciones térmicas, de condiciones magnéticas, de condiciones hidrológicas, de la superficie para detección de cambios en la estructura del volcán.
- Fomento la comunicación entre gestores de emergencia, científicos, educadores, medios de comunicación y ciudadanos.
- Desarrollo de planes que contemplen la posibilidad de mitigación de emergencia por desviación de cuerpos de agua. Verificación de abastecimiento suficiente de tuberías y bombas, además de suficiencia hidráulica y eléctrica.

## Vulcanismo (2)

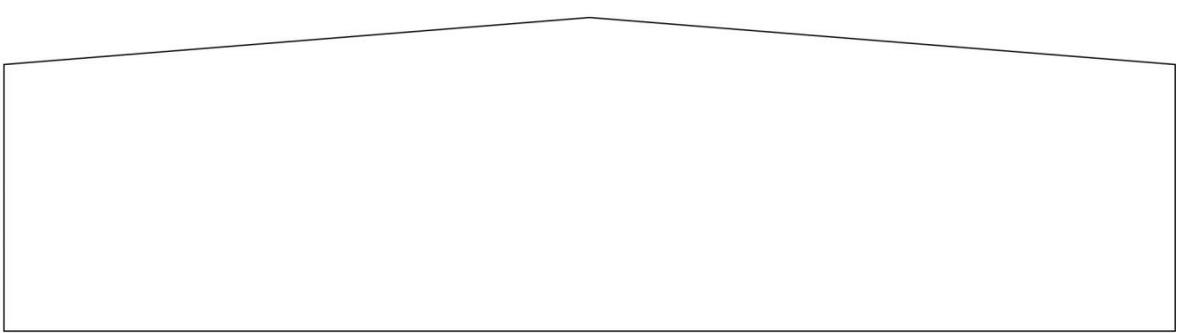
Causas Raíz

Presiones del Entorno

Condiciones de Seguridad

Consecuencias por Ocurrencia del Desastre

Medidas de Mitigación



- Flujo de lava, la actividad piroclástica, la expulsión de bombas y la liberación de gases volcánicos. Los efectos secundarios son causados por los efectos primarios, e incluyen el flujo de detritos, flujos de lodo, deslizamientos de tierra, avalanchas, inundaciones, incendios e inclusive tsunamis.
- Contaminación del agua superficial por sedimentos. Además, la capa de químicos contenida en la ceniza, causa un aumento temporal en la acidez del agua.
- Deslizamientos que podrían afectar el sistema, inclusive en zonas lejanas a su origen.
- Destrucción prácticamente total de las zonas más afectadas.

- Realización una campaña efectiva de concientización para que en caso de exhalación de ceniza, no se utilice agua para removerla de las estructuras, viviendas y demás activos presentes en el Distrito Federal.

# Corrimientos de Tierra (1)

## Causas Raíz

- La intensa actividad sísmica y del hombre asentado en la Ciudad de México, en combinación con su naturaleza lacustre, ocasiona continuamente corrimientos de tierra.
- La principal actividad del hombre que afecta el estado del suelo es la extracción de agua subterránea.
- Los principales fenómenos que se dan son la subsidencia o hundimientos, la licuefacción y los deslizos o derrumbes.

## Presiones del Entorno

- La extracción del agua subterránea se ha incrementado sustancialmente en los últimos años, incapacitando la recarga y degradando la capacidad del suelo.
- Existen cambios abruptos en la humedad de los suelos con abundantes arcillas, por lo que suceden expansiones y contracciones en periodos de tiempo muy cortos.

## Condiciones de Seguridad

- Los cerros con taludes inestables son propensos a derrumbarse después de una alta precipitación.
- Las estructuras asentadas en una zona lacustre sobre acuífero sobreexplotado, sufrirán un hundimiento inherente al cono de abatimiento generado por la extracción de agua, y después de presentarse la subpresión, corresponderá el comenzar el proceso de subsidencia.

## Consecuencias por Ocurrencia del Desastre

- Derrumbes de taludes inestables.
- Subsidencia de infraestructuras de abastecimiento, drenaje y tratamiento.
- Daño e inclusive pérdida de la infraestructuras ya mencionadas.
- Inhabilitación del sistema de drenaje por pérdida de pendiente.
- Alteración del volumen del suelo, afectando a infraestructura asentada en terrenos, ya sea con pendiente o planicies.
- Colapso de elementos de la infraestructura por el proceso de compactación de los materiales que forman el suelo.
- Aparición de socavones y dolinas, o agujeros circulares de varios metros de diámetro, por procesos de compactación o expansión de los materiales.
- Pérdida de estructura interna y colapso de suelos que interactúan con las cimentaciones.
- Aceleración de la subsidencia de infraestructuras por compactación del suelo.

## Medidas de Mitigación

- Desarrollo de un plan que permita el amortiguamiento de los hundimientos en el suelo.
- Implementación de estructuras y cimentaciones resilientes y adaptables, como los pilotes de fricción.
- Actualización de los mapas de riesgo del sistema, revelando la localización y probables secuelas de un gran corrimiento de tierra en el sistema.
- Instalación de sistema de monitorización de movimientos de tierra.
- Desarrollo de un plan que permita la evacuación del sistema en caso de emergencia.
- Ampliación de la cobertura de tratamiento.
- Reinyección grandes proporciones de agua tratada al suelo.
- Disminución de los niveles de bombeo del fluido, de forma que se garanticen los niveles de flotación que amortiguan la subsidencia del suelo.

## Corrimientos de Tierra (2)

Causas Raíz

Presiones del Entorno

Condiciones de Seguridad

Consecuencias por Ocurrencia del Desastre

Medidas de Mitigación

- Aceleración de falla en estructuras del sistema por combinación de sismo-corrimento del suelo.
- Contaminación rápida y con facilidad de las fuentes de agua subterráneas.
- Pérdida de mantos fríaticos, con proliferación de oquedades en el suelo.
- Alteraciones continuas en los niveles de los mantos fríaticos.
- Afectación de conductos, especialmente por parte de los suelos expansivos.
- Aparición de huecos en cimentaciones, paredes, pavimentos y paredes. Estos efectos, pueden ser graves.

- Pruebas a los suelos para identificar las proporciones de intersticios en la tierra, especialmente la arcillosa.

## Estado del Arte en las Delegaciones

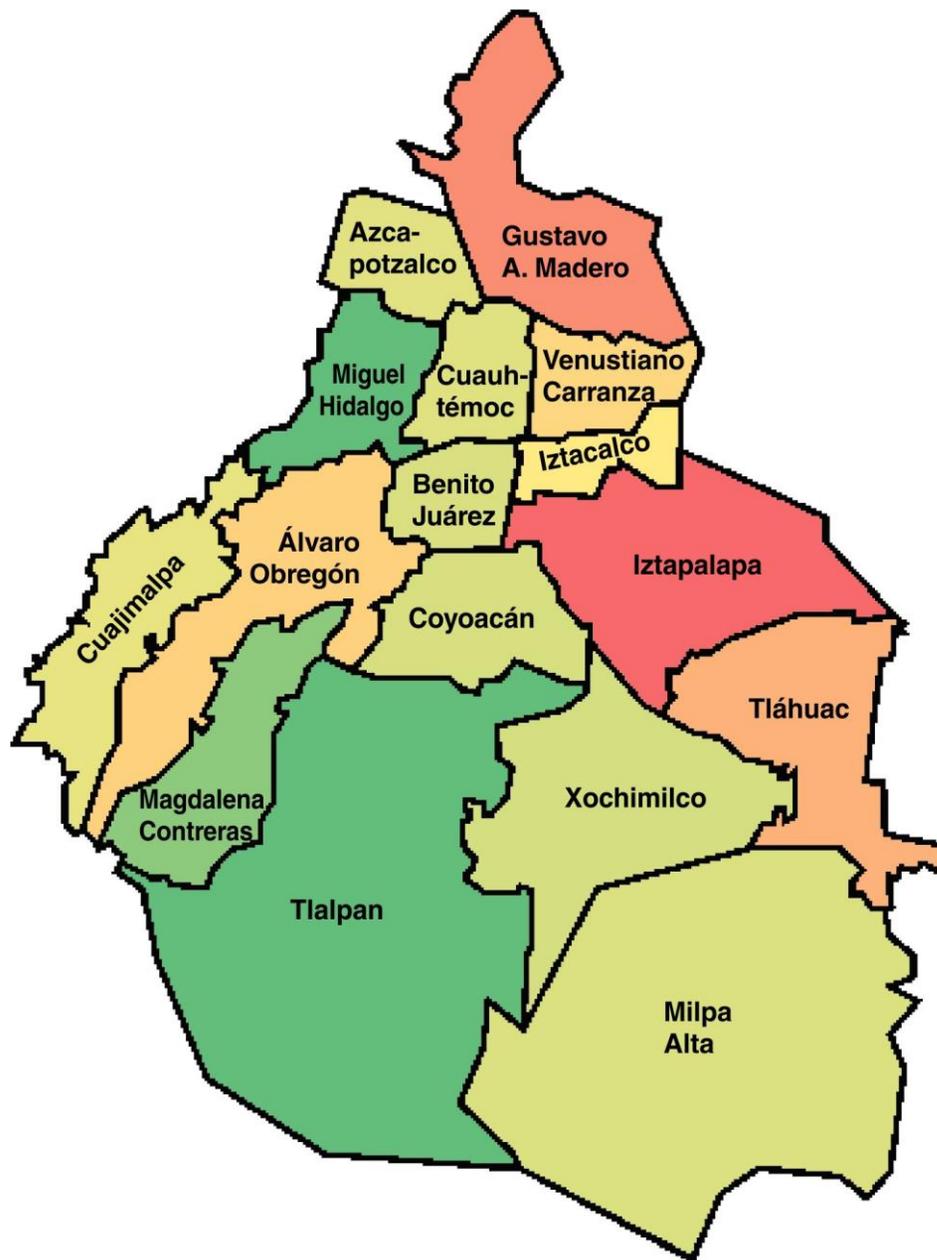
### Sistema de Abastecimiento

Se propone determinar el grado de vulnerabilidad del sistema en función de su afectación a la población. En el caso del abastecimiento, se contemplan las variables dotación diaria y número de habitantes. Acto seguido, se compararon dichas variables con las dispersiones de la media. De esta forma se encuentra que:

	Dotación (L/hab/día)	Población Total (miles)	Dif. Negativa Media Dotación	Dif Media Población	% Dif Negativa Media Dotación	% Dif Media Población	Total
Álvaro Obregón	310	727	12	174	12%	14%	13%
Azcapotzalco	339	414	-17	-139	-17%	-11%	-14%
Benito Juárez	373	385	-51	-168	-51%	-13%	-32%
Coyoacán	373	620	-51	67	-51%	5%	-23%
Cuajimalpa	303	186	19	-367	19%	-29%	-5%
Cuahtémoc	349	531	-27	-22	-27%	-2%	-14%
Gustavo A. Madero	243	1,185	79	632	78%	50%	64%
Iztacalco	320	384	2	-169	2%	-13%	-6%
Iztapalapa	237	1,815	85	1262	84%	100%	92%
Magdalena Contreras	350	239	-28	-314	-28%	-25%	-26%
Miguel Hidalgo	397	372	-75	-181	-75%	-14%	-45%
Milpa Alta	298	130	24	-423	24%	-33%	-5%
Tláhuac	221	360	101	-193	100%	-15%	42%
Tlalpan	386	650	-64	97	-64%	8%	-28%
Venustiano Carranza	320	430	2	-123	2%	-10%	-4%
Xochimilco	328	415	-6	-138	-6%	-11%	-9%

<b>Promedio</b>	<b>322</b>	<b>553</b>		
<b>Desviación de la Media</b>	<b>40</b>	<b>279</b>		
<b>Máximo</b>			<b>101</b>	<b>1262</b>

Representación gráfica de las delegaciones más vulnerables en el aspecto del abastecimiento, donde se destaca la zona Norte-Oriente.



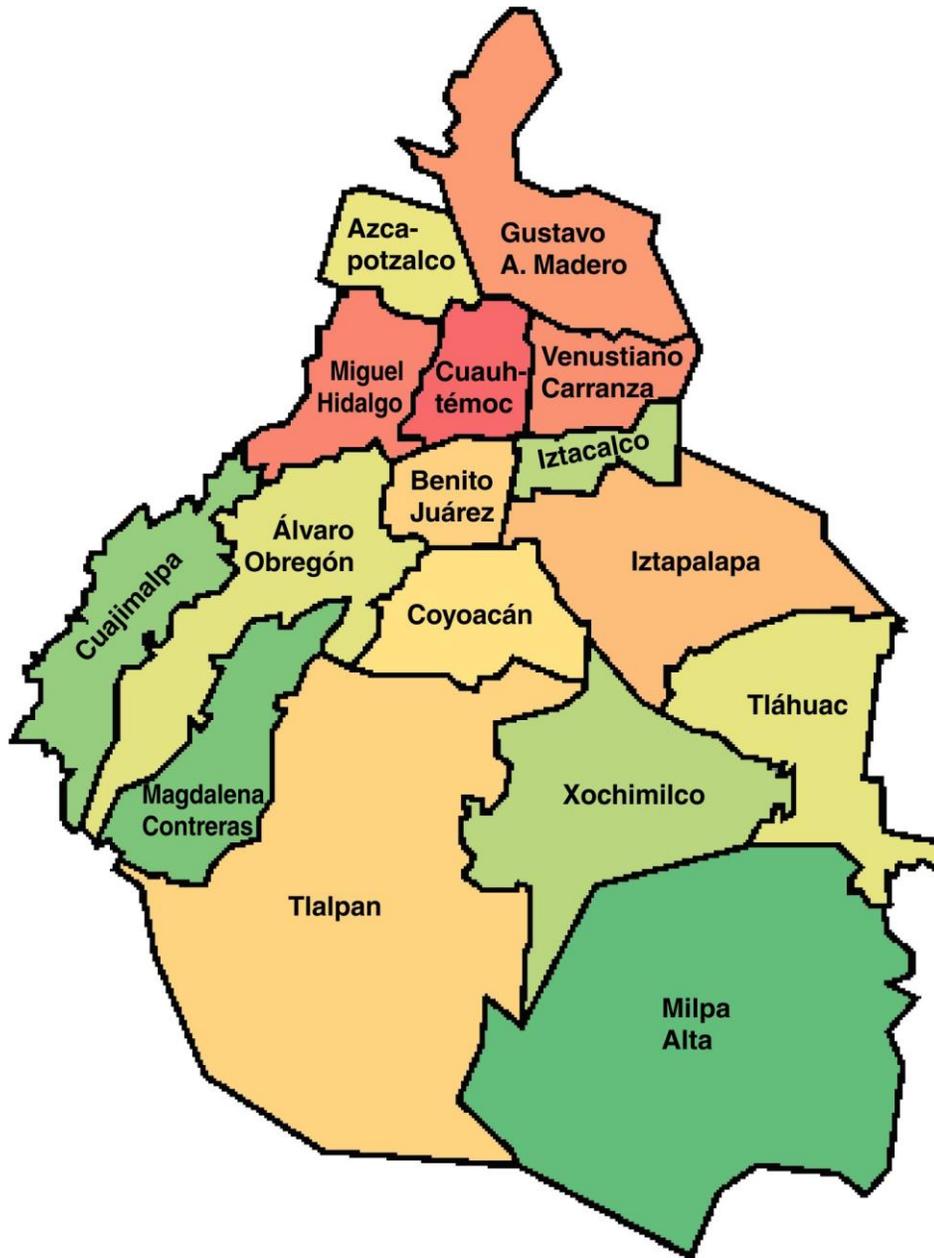
## Sistema de Drenaje

Se propone determinar el grado de vulnerabilidad del sistema en función de su afectación a la población. En el caso del drenaje, se contemplan las variables número total de encharcamientos y número de encharcamientos por cada mil habitantes. Acto seguido, se compararon dichas variables con las dispersiones de la media. De esta forma se encuentra que:

	Encharcamientos	Miles de habitantes	Encharcamientos por cada 1000 habitantes	Encharcamientos - Media Encharcamientos	Encharcamientos - Encharcamientos por cada 1000	Diferencia Porcentual (Encharcamientos - Media Encharcamientos)	Diferencia Porcentual (Encharcamientos - Encharcamientos por cada 1000)	Diferencia Media
Álvaro Obregón	225	727	0.309	-50	-0.177	-13%	-26%	-20%
Azcapotzalco	179	414	0.432	-96	-0.054	-25%	-8%	-17%
Benito Juárez	258	385	0.670	-17	0.183	-4%	27%	11%
Coyoacán	281	620	0.453	7	-0.034	2%	-5%	-2%
Cuajimalpa	31	186	0.167	-244	-0.320	-65%	-48%	-56%
Cuauhtémoc	614	531	1.156	340	0.669	90%	100%	95%
Gustavo A. Madero	650	1185	0.549	376	0.062	100%	9%	55%
Iztacalco	116	384	0.302	-159	-0.185	-42%	-28%	-35%
Iztapalapa	576	1815	0.317	302	-0.169	80%	-25%	27%
Magdalena Contreras	30	239	0.126	-245	-0.361	-65%	-54%	-60%
Miguel Hidalgo	373	372	1.003	99	0.516	26%	77%	52%
Milpa Alta	4	130	0.031	-271	-0.456	-72%	-68%	-70%
Tláhuac	160	360	0.444	-115	-0.042	-30%	-6%	-18%
Tlalpan	332	650	0.511	58	0.024	15%	4%	9%
Venustiano Carranza	445	430	1.035	171	0.548	45%	82%	64%
Xochimilco	118	415	0.284	-157	-0.203	-42%	-30%	-36%

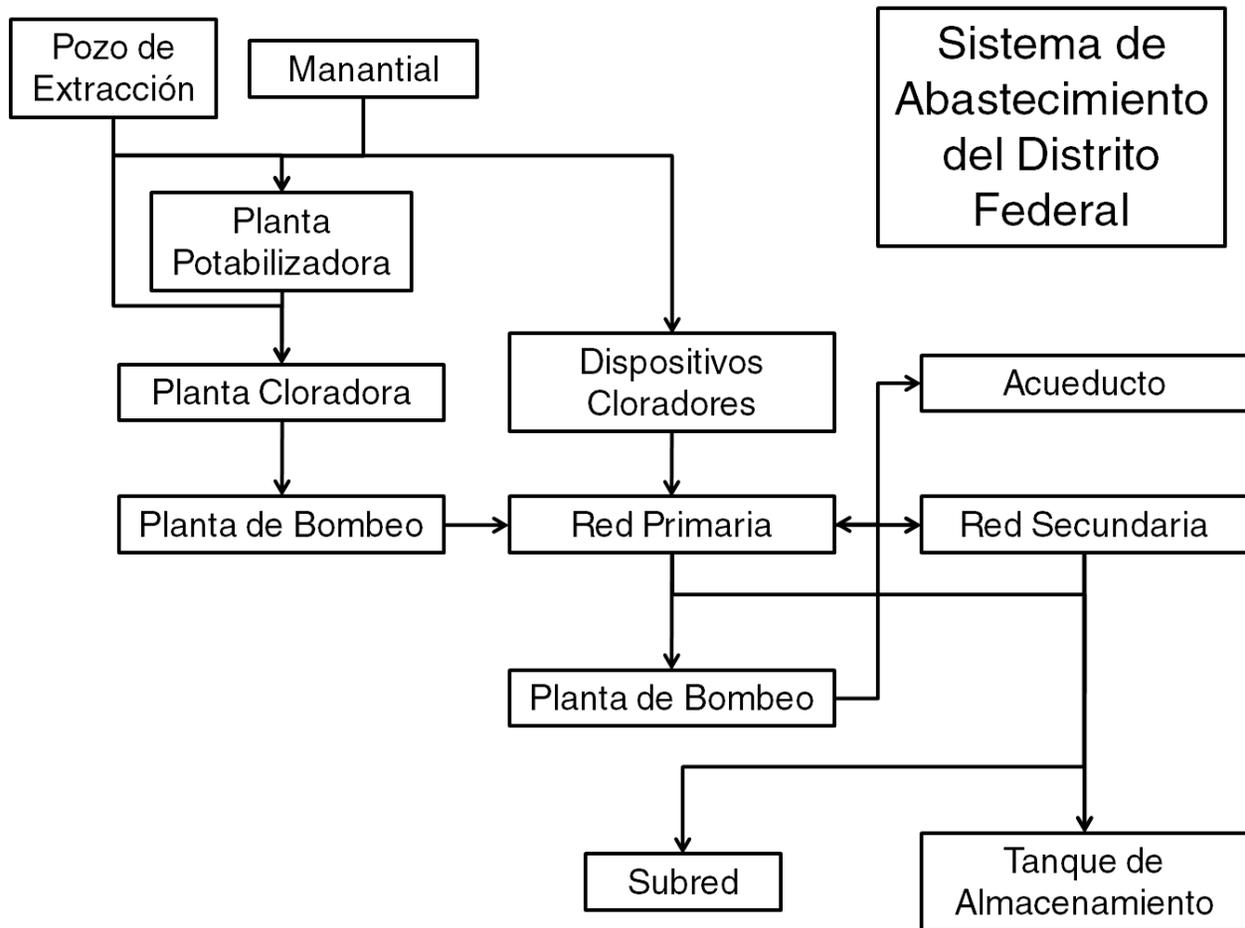
Promedio	275	553	0.487					
Desviación de la Media	169	279	0.250					
Máximo				376	0.669			

Representación gráfica de las delegaciones más vulnerables en el aspecto del drenaje, donde se destaca la zona norte:

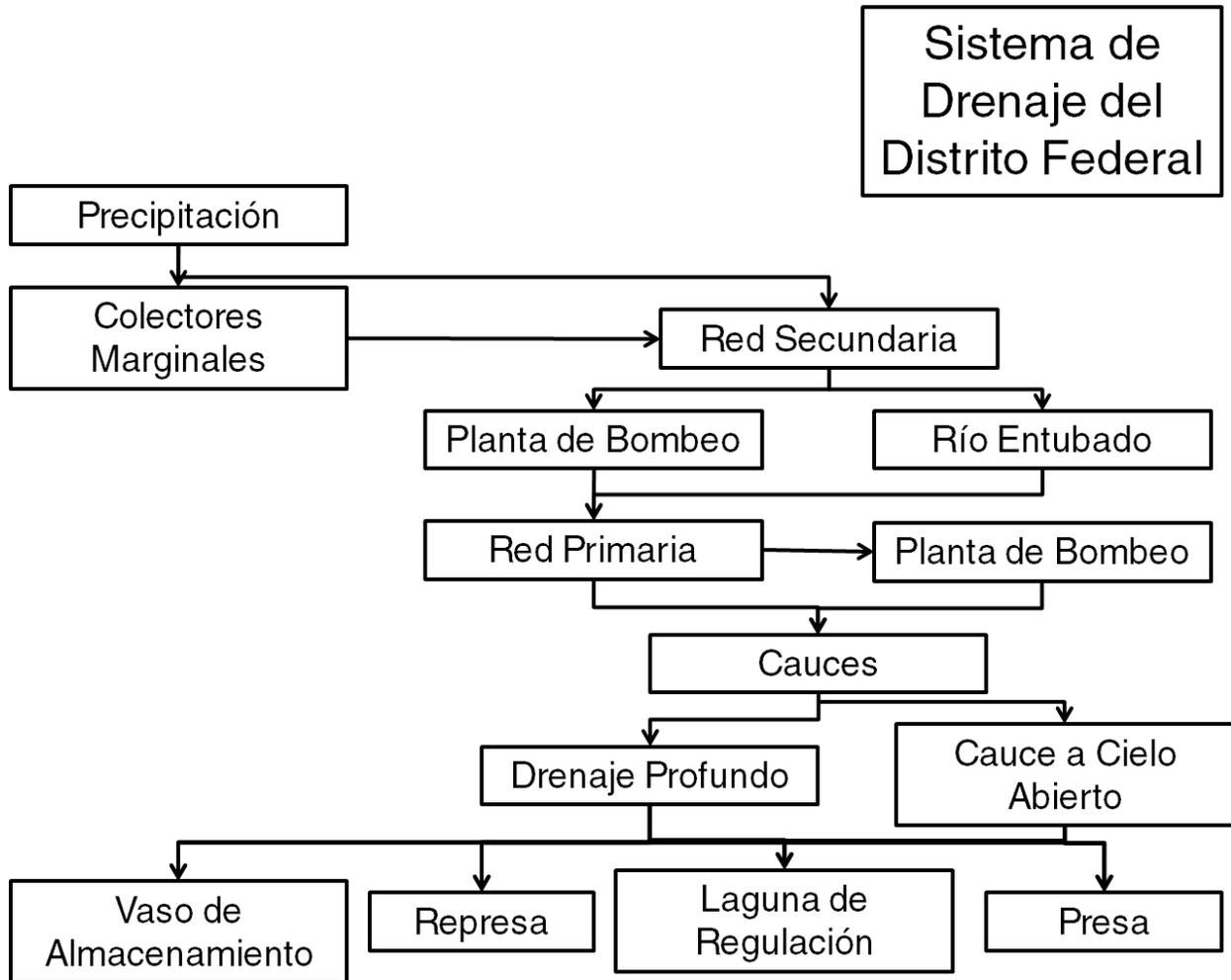


## Funcionamiento del Sistema

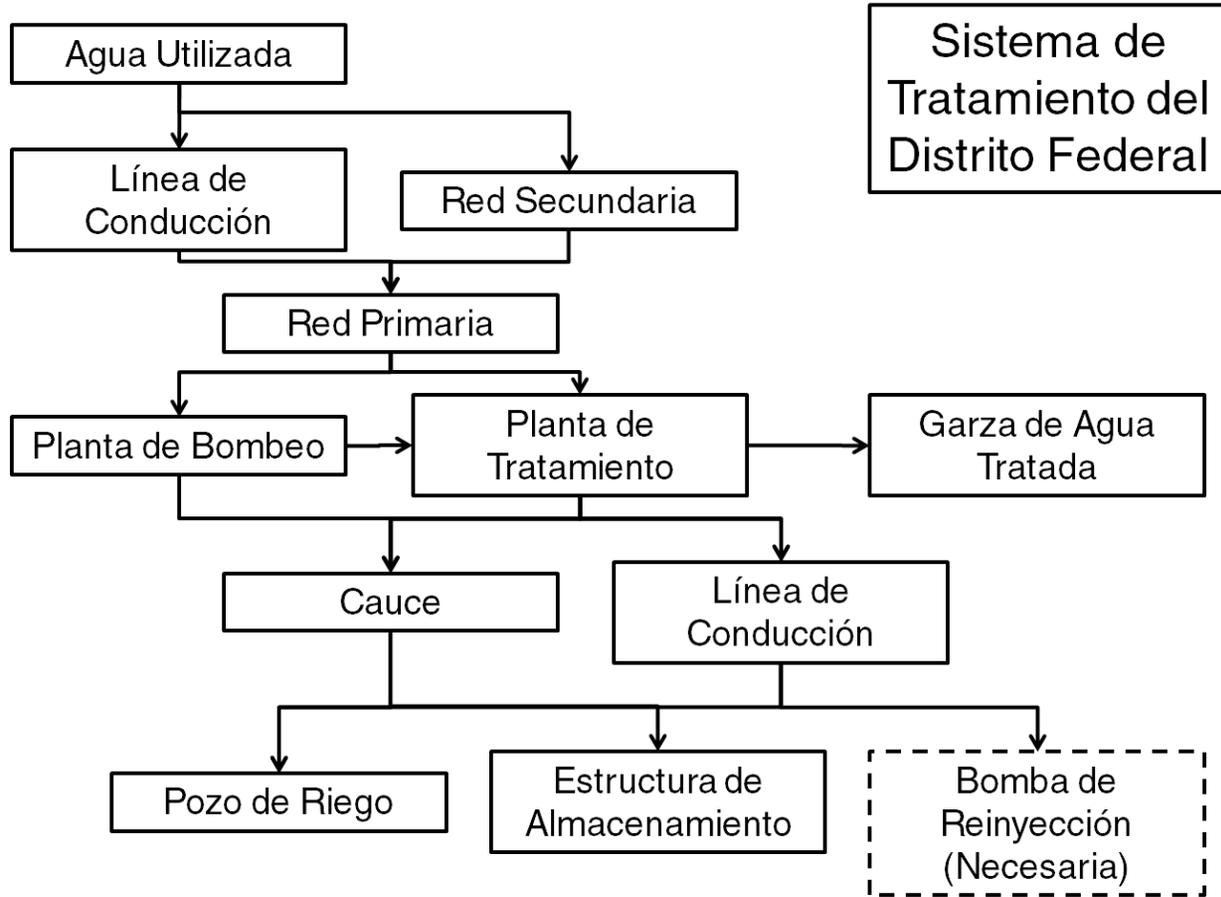
### Sistema de Abastecimiento



### Sistema de Drenaje



### Sistema de Tratamiento



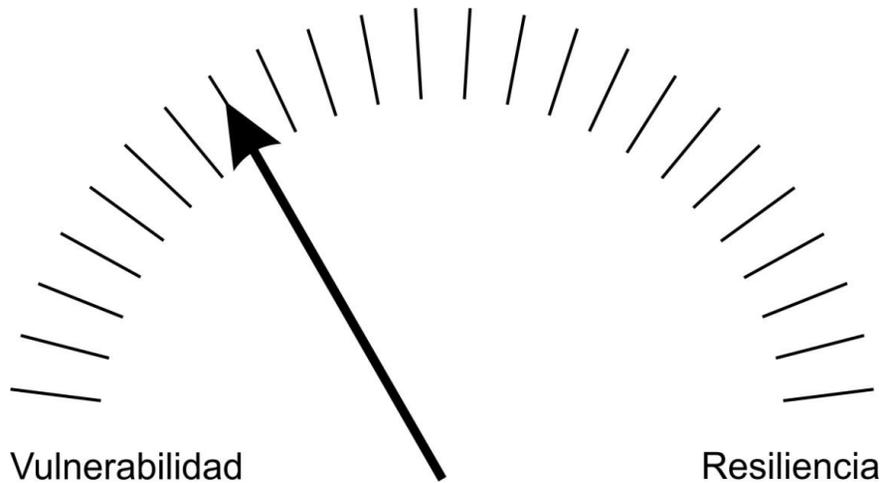


## Evaluación de la Resiliencia

### Sistema de Abastecimiento

<b>Problema: ¿Cuál es la situación actual en la seguridad del Sistema de Abastecimiento?</b>				
<b>Fase del Proceso</b>	<b>Mejor Escenario (Resiliencia)</b>	<b>+</b>	<b>-</b>	<b>Peor Escenario (Fallas que conducen al desastre)</b>
<b>Aprendizaje</b>	Cobertura suficiente		La cobertura del 98% es insuficiente tratándose de un derecho fundamental como el agua.	Cobertura insuficiente
	Existe un compromiso con rediseñar el sistema de forma gradual con una filosofía resiliente.	Generalmente es bien visto de incorporar enfoques modernos en el aspecto de la seguridad.		No existe un compromiso con rediseñar el sistema con filosofía resiliente.
	Análisis adecuado de los éxitos anteriores		A pesar de que se conocen los éxitos anteriores, no se tiene un estudio exhaustivo que analice por qué se tuvieron dichos éxitos y cómo se pueden aplicar en otras partes del sistema.	Análisis inadecuado de los éxitos anteriores
	Las implementaciones y mejoras son introducidas armónica y paulatinamente.		Los proyectos de abastecimiento han sido históricamente muy grandes, con brinco abruptos después de que las obras fueron terminadas.	Las implementaciones y mejoras no son introducidas armónica y paulatinamente.
	Se conocen y analizaron todas las fallas anteriores de sistema.	Se sabe cuándo, cómo, dónde y por qué falló el sistema de abastecimiento en otras		Se conocen y analizaron todas las fallas anteriores de sistema.
<b>Anticipación</b>	Recursos económicos suficientes		Cubrir todas las necesidades de agua potable de la población es muy oneroso, tanto que los recursos asignados al día de hoy son insuficientes.	Recursos económicos insuficientes
	Recursos humanos suficientes		El SACM está rebasado en personal administrativo y técnico.	Recursos humanos insuficientes
	Planeación a futuro	Existen planes a futuro transexenales.		Sin planeación a futuro
	Capacidad para anticipar oportunidades		Se está muy enfocado en asuntos reactivos que en asuntos preventivos.	Incapacidad para anticiparse oportunidades
	El sistema es percibido como seguro para la población y los gestores del mismo	Los usuarios y gestores perciben que el sistema está bajo control y es seguro, aunque la mayoría no bebería agua de la llave.		El sistema es percibido como inseguro para la población y los gestores del mismo
	Identificación de todas las vulnerabilidades reales y potenciales que son parte del sistema		Se han identificado algunas, especialmente críticas, mas no todas las partes vulnerables del sistema.	Incapacidad para identificar todas las vulnerabilidades reales y potenciales que son parte del sistema
	Identificación de todos los peligros reales y potenciales que son parte del sistema		No se conoce qué pasaría si sucedieran situaciones extremas, como una sequía inusitada, una falla en el sistema eléctrico, contaminación interna severa en el sistema, entre otras reales y potenciales.	Incapacidad para identificar todos los peligros reales y potenciales que son parte del sistema
	Predicción de los efectos del cambio en el corto y largo plazo		No se sabe qué efectos tendrían las situaciones extremas mencionadas en el corto y largo plazo.	Desconocimiento de los efectos del cambio en el corto y largo plazo
	Determinación de las consecuencias en grado de daño y permanencia que habría en caso de falla del sistema		No se sabe qué tan graves, en qué sentidos, y cuánto durarán las consecuencias de las situaciones extremas mencionadas.	Incapacidad para determinación todas las consecuencias en grado de daño y permanencia que habría en caso de falla del sistema
<b>Monitorización</b>	Medición que permita parametrizar la situación del sistema en una diferencial de tiempo	Se puede identificar instantáneamente la situación del sistema de abastecimiento, especialmente en redes primarias y secundarias, aunque en menor grado, se podría identificar la presencia de fugas.		Sin medición que permita parametrizar la situación del sistema en una diferencial de tiempo
	Monitorización que permite identificar tendencias que se presentan en el sistema en una diferencial de tiempo	Se puede identificar rápidamente una situación con potencial de escalamiento que se presente en el sistema.		La monitorización no permite identificar tendencias que se presentan en el sistema en una diferencial de tiempo
	Los operadores y gestores del sistema están capacitados para responder adecuadamente a situaciones estocásticas e inesperadas.	El equipo integrado por técnicos e ingenieros tiene capacidad y experiencia para resolver la mayoría de las situaciones que se le presentan.		Los operadores y gestores del sistema son incapaces de responder adecuadamente a situaciones estocásticas e inesperadas.

Respuesta Resiliente	Reacción inmediata, asertiva y efectiva ante la adversidad		La reacción ante un problema que se presentó es generalmente lenta -muchas veces burocrática-.	Reacción lenta, equívoca o insuficiente ante la adversidad
	Amortiguamiento del escalamiento en los efectos de eventos adversos		En caso de una situación adversa, es difícil amortiguar el escalamiento de los efectos adversos, extendiéndose el problema a otras partes del sistema.	Incapacidad de amortiguamiento del escalamiento en los efectos de eventos adversos
	Decisiones flexibles y que se ajustan a la naturaleza dinámica y estocástica de las situaciones adversas		Existe poca capacidad de decisión entre los técnicos y operadores, quienes tienen que informar a sus superiores de las decisiones que estén adoptando. Generalmente no se prepara un plan B para resolver una adversidad.	Decisiones estáticas incapaces de ajustarse a la naturaleza dinámica y estocástica de las situaciones adversas
	Amplio margen de maniobra al trabajar en niveles cercanos a las condiciones frontera del sistema		Cuando el sistema trabaja en niveles cercanos a sus condiciones frontera, existen pocas alternativas por las cuales optar.	Corto margen de maniobra al trabajar en niveles cercanos a las condiciones frontera del sistema
	El sistema es capaz de funcionar correctamente bajo condiciones complejas de trabajo y/o sometido a una alta presión y/o a un alto riesgo	El sistema de abastecimiento está trabajando por muchos días a marchas forzadas, cerca de su máxima capacidad, y en condiciones complejas de trabajo.		El sistema no es capaz de funcionar correctamente bajo condiciones complejas de trabajo y/o sometido a una alta presión y/o a un alto riesgo
	Cuando esté cerca del punto de falla, se toman decisiones que permiten al sistema extender su capacidad de trabajo, y por consiguiente, su punto de falla		Cuando se está cercano al punto de falla, el sistema es incapaz de extender su capacidad de trabajo, por lo que generalmente falla una parte del mismo.	Cuando esté cerca del punto de falla, se toman decisiones que permiten al sistema extender su capacidad de trabajo, y por consiguiente, su punto de falla
	A pesar de las adversidades presentadas, el sistema no deja de funcionar ni se pierde el control del mismo en momento alguno		El sistema llega a estar rebasado por las adversidades presentadas, inclusive perdiendo el control del mismo.	Al presentarse las adversidades, el sistema deja de funcionar o se pierde el control del mismo en algún momento
	El sistema se recupera rápidamente después de sufrir adversidades		Dependiendo de las afectaciones, el sistema tardará ya sea horas, días, semanas o meses en restablecer sus funciones.	El sistema no se recupera rápidamente después de sufrir adversidades
<b>Sumatoria de la Evaluación</b>	<b>8</b>	<b>17</b>		

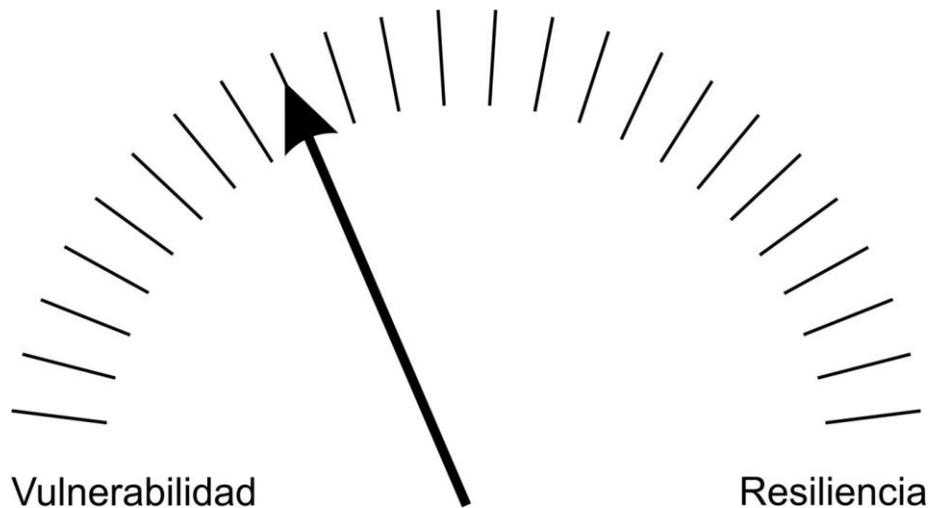


Conclusión: El sistema de abastecimiento es más cercano a la vulnerabilidad que a la resiliencia. Necesitará enfocarse principalmente en generar respuestas resilientes.

## Sistema de Drenaje

Problema: ¿Cuál es la situación actual en la seguridad del Sistema de Drenaje?				
Fase del Proceso	Mejor Escenario (Resiliencia)	+	-	Peor Escenario (Fallas que conducen al desastre)
Aprendizaje	Cobertura suficiente		La cobertura de drenaje en la ciudad es del 94%, índice lejano a las necesidades de la población. En tormentas importantes, siguen ocurriendo encharcamientos con asiduidad.	Cobertura insuficiente
	Existe un compromiso con rediseñar el sistema de forma gradual con una filosofía resiliente.	Generalmente es bien visto de incorporar enfoques modernos en el aspecto de la seguridad.		No existe un compromiso con rediseñar el sistema con filosofía resiliente.
	Análisis adecuado de los éxitos anteriores	Se tiene un conocimiento claro de por qué los emisores del sistema han funcionado a lo largo de las décadas.		Análisis inadecuado de los éxitos anteriores
	Las implementaciones y mejoras son introducidas armónica y paulatinamente.	El Túnel Emisor Oriente (TEO) es la obra más ambiciosa de la actualidad. Sin embargo, muchas obras complementarias, especialmente las destinadas al rebombeo, se realizan en numerosas ocasiones sin ser tan faraónicas, lo cual deriva en una adaptación armónica y gradual.		Las implementaciones y mejoras no son introducidas armónica y paulatinamente.
	Se conocen y analizaron todas las fallas anteriores de sistema.	Se tiene un conocimiento claro de por qué los emisores del sistema han visto mermado su funcionamiento. También se sabe por qué el sistema ha fallado eventualmente en otras ocasiones.		Se conocen y analizaron todas las fallas anteriores de sistema.
Anticipación	Recursos económicos suficientes	El drenaje es una prioridad económica actual y se destinan grandes cantidades de presupuesto a este apartado.		Recursos económicos insuficientes
	Recursos humanos suficientes		Los ingenieros y técnicos que operan, diseñan y resuelven las situaciones inherentes al drenaje no se dan abasto en situaciones límite.	Recursos humanos insuficientes
	Planeación a futuro	Existen planes transexenales en este rubro.		Sin planeación a futuro
	Capacidad para anticipar oportunidades	Los planes desarrollados incluyen planes de la evolución en el comportamiento del drenaje en la cuenca para los próximos lustros.		Incapacidad para anticiparse oportunidades
	El sistema es percibido como seguro para la población y los gestores del mismo		La caída de una tromba es motivo de preocupación, inclusive severa, para la mayor parte de la población.	El sistema es percibido como inseguro para la población y los gestores del mismo
	Identificación de todas las vulnerabilidades reales y potenciales que son parte del sistema		No se conocen todas las vulnerabilidades potenciales del sistema. Los planes existentes son para situaciones puntuales, que en la mayoría de los casos ya pasaron.	Incapacidad para identificar todas las vulnerabilidades reales y potenciales que son parte del sistema
	Identificación de todos los peligros reales y potenciales que son parte del sistema		No se conocen todos los peligros naturales y los posibles efectos de su aparición sobre el sistema.	Incapacidad para identificar todos los peligros reales y potenciales que son parte del sistema
	Predicción de los efectos del cambio en el corto y largo plazo		La percepción es que el sistema podría sufrir una ruptura ante catástrofe, sin embargo no se han muchos más efectos que se podrían presentar en casos adversos.	Desconocimiento de los efectos del cambio en el corto y largo plazo
	Determinación de las consecuencias en grado de daño y permanencia que habría en caso de falla del sistema		A pesar de que se sabe que el sistema podría fallar con consecuencias catastróficas, no se sabría hasta qué grado sería el daño ni cuánto tiempo tardaría en normalizarse la actividad.	Incapacidad para determinación todas las consecuencias en grado de daño y permanencia que habría en caso de falla del sistema
Monitorización	Medición que permita parametrizar la situación del sistema en una diferencial de tiempo	Se tiene la idea de cuál es el gasto que están conduciendo la mayor parte de los sistemas, además del nivel del trabajo en el que se encuentran.		Sin medición que permita parametrizar la situación del sistema en una diferencial de tiempo
	Monitorización que permite identificar tendencias que se presentan en el sistema en una diferencial de tiempo		Resulta imposible en la práctica conocer qué está sucediendo en el drenaje profundo del Distrito Federal.	La monitorización no permite identificar tendencias que se presentan en el sistema en una diferencial de tiempo

<b>Respuesta Resiliente</b>	Los operadores y gestores del sistema están capacitados para responder adecuadamente a situaciones estocásticas e inesperadas.		En caso de ocurrencia de una situación extrema, la respuesta por parte de los operadores -rebasados por el evento- sería estática e insuficiente.	Los operadores y gestores del sistema son incapaces de responder adecuadamente a situaciones estocásticas e inesperadas.
	Reacción inmediata, asertiva y efectiva ante la adversidad		En la caída de trombas, la reacción es tradicionalmente lenta y a veces insuficiente.	Reacción lenta, equívoca o insuficiente ante la adversidad
	Amortiguamiento del escalamiento en los efectos de eventos adversos		En muy pocas ocasiones se produce el amortiguamiento del escalamiento de los efectos provocados por la situación adversa.	Incapacidad de amortiguamiento del escalamiento en los efectos de eventos adversos
	Decisiones flexibles y que se ajustan a la naturaleza dinámica y estocástica de las situaciones adversas		El personal generalmente consulta a sus superiores en situaciones de adversidad.	Decisiones estáticas incapaces de ajustarse a la naturaleza dinámica y estocástica de las situaciones adversas
	Amplio margen de maniobra al trabajar en niveles cercanos a las condiciones frontera del sistema		Cuando el sistema trabaja en niveles cercanos a sus condiciones frontera, existen pocas alternativas entre las cuales se pueda elegir.	Corto margen de maniobra al trabajar en niveles cercanos a las condiciones frontera del sistema
	El sistema es capaz de funcionar correctamente bajo condiciones complejas de trabajo y/o sometido a una alta presión y/o a un alto riesgo	En época de lluvias y desde hace décadas, el sistema funciona bajo condiciones complejas de trabajo, en las que es sometido a alta presión y riesgo.		El sistema no es capaz de funcionar correctamente bajo condiciones complejas de trabajo y/o sometido a una alta presión y/o a un alto riesgo
	Cuando esté cerca del punto de falla, se toman decisiones que permiten al sistema extender su capacidad de trabajo, y por consiguiente, su punto de falla		En general, cuando el sistema está operando cerca del punto de falla, no puede extender su capacidad de trabajo, y falla.	Cuando esté cerca del punto de falla, se toman decisiones que permiten al sistema extender su capacidad de trabajo, y por consiguiente, su punto de falla
	A pesar de las adversidades presentadas, el sistema no deja de funcionar ni se pierde el control del mismo en momento alguno		El sistema deja de funcionar, especialmente las alcantarillas, los sistemas de bombeo y los emisores, que se ven rebasados.	Al presentarse las adversidades, el sistema deja de funcionar o se pierde el control del mismo en algún momento
	El sistema se recupera rápidamente después de sufrir adversidades		El sistema se recuperará horas o días después de la tromba. Además, es muy importante que deje de acumular agua por desalojar.	El sistema no se recupera rápidamente después de sufrir adversidades
<b>Sumatoria de la Evaluación</b>		<b>9</b>	<b>16</b>	

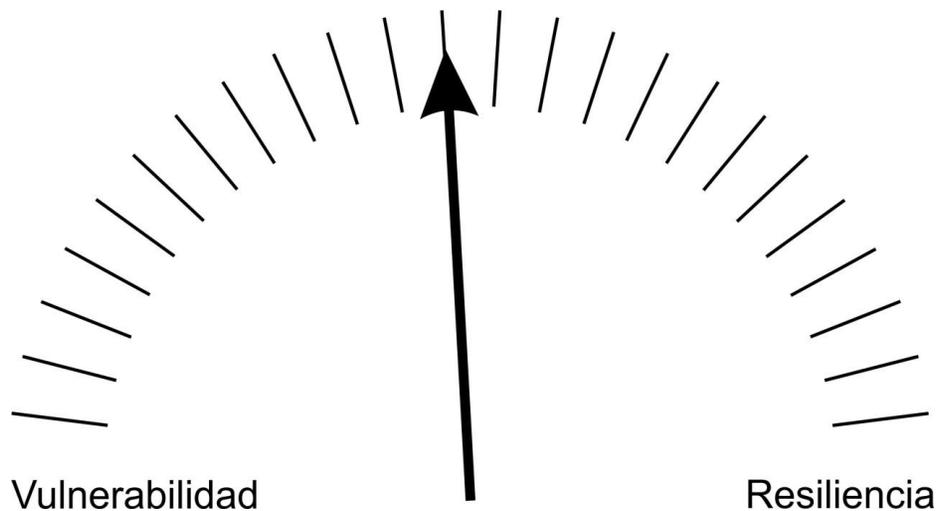


Conclusión: El sistema de drenaje es más cercano a la vulnerabilidad que a la resiliencia. A pesar de ser poco más resiliente que el sistema de abastecimiento, necesitará enfocarse en generar respuestas resilientes.

## Sistema de Tratamiento

Problema: ¿Cuál es la situación actual en la seguridad del Sistema de Tratamiento?				
Fase del Proceso	Mejor Escenario (Resiliencia)	+	-	Peor Escenario (Fallas que conducen al desastre)
Aprendizaje	Cobertura suficiente		Apenas el 9% del agua es tratada hoy en día. Cuando comience la operación de la PTAR de Atotonilco,	Cobertura insuficiente
	Existe un compromiso con rediseñar el sistema de forma gradual con una filosofía resiliente.	Generalmente es bien visto de incorporar enfoques modernos en el aspecto de la seguridad.		No existe un compromiso con rediseñar el sistema con filosofía resiliente.
	Análisis adecuado de los éxitos anteriores	Las plantas de tratamiento en operación funcionan de forma exitosa y se sabe el por qué.		Análisis inadecuado de los éxitos anteriores
	Las implementaciones y mejoras son introducidas armónica y paulatinamente.		El problema del tratamiento de agua fue desatendido por tantos años que se solucionará con una obra de proporciones faraónicas.	Las implementaciones y mejoras no son introducidas armónica y paulatinamente.
	Se conocen y analizaron todas las fallas anteriores de sistema.		Existen elementos que, por atrofiamiento, falta de mantenimiento o mala selección de tecnología, han mermado la capacidad del sistema.	Se conocen y analizaron todas las fallas anteriores de sistema.
Anticipación	Recursos económicos suficientes	El drenaje es una prioridad económica actual y se destinan grandes cantidades de presupuesto a este apartado.		Recursos económicos insuficientes
	Recursos humanos suficientes		Los ingenieros y técnicos que operan, diseñan y resuelven las situaciones inherentes al tratamiento no se dan abasto.	Recursos humanos insuficientes
	Planeación a futuro	Existen planes transexenales en este rubro.		Sin planeación a futuro
	Capacidad para anticipar oportunidades	Los planes desarrollados incluyen aspectos inherentes a la evolución de la infraestructura de tratamiento.		Incapacidad para anticiparse oportunidades
	El sistema es percibido como seguro para la población y los gestores del mismo		Existe aversión a las plantas de tratamiento, especialmente por los olores que desprenden. Esto se da en las plantas más importantes: Cerro de la Estrella y próximamente Atotonilco.	El sistema es percibido como inseguro para la población y los gestores del mismo
	Identificación de todas las vulnerabilidades reales y potenciales que son parte del sistema		No se conocen todas las vulnerabilidades potenciales del sistema. Los planes existentes son para situaciones puntuales, que en la mayoría de los casos ya pasaron.	Incapacidad para identificar todas las vulnerabilidades reales y potenciales que son parte del sistema
	Identificación de todos los peligros reales y potenciales que son parte del sistema		No se conocen todos los peligros naturales y los posibles efectos de su aparición sobre el sistema.	Incapacidad para identificar todos los peligros reales y potenciales que son parte del sistema
	Predicción de los efectos del cambio en el corto y largo plazo		No se sabe qué pasaría en el corto y largo plazo si el sistema de tratamiento fallara.	Desconocimiento de los efectos del cambio en el corto y largo plazo
Determinación de las consecuencias en grado de daño y permanencia que habría en caso de falla del sistema		A pesar de que se sabe que el sistema podría fallar con consecuencias catastróficas, no se sabría hasta qué grado sería el daño ni cuánto tiempo tardaría en normalizarse la actividad.	Incapacidad para determinación todas las consecuencias en grado de daño y permanencia que habría en caso de falla del sistema	
Monitorización	Medición que permita parametrizar la situación del sistema en una diferencial de tiempo	Se sabe cuáles son los niveles de operación y gasto en el sistema.		Sin medición que permita parametrizar la situación del sistema en una diferencial de tiempo
	Monitorización que permite identificar tendencias que se presentan en el sistema en una diferencial de tiempo	Si se presenta una anomalía en el proceso, ésta es detectada rápidamente.		La monitorización no permite identificar tendencias que se presentan en el sistema en una diferencial de tiempo
	Los operadores y gestores del sistema están capacitados para responder adecuadamente a situaciones estocásticas e inesperadas.	Los ingenieros y técnicos tienen capacidad para atender los eventos adversos que se presenten.		Los operadores y gestores del sistema son incapaces de responder adecuadamente a situaciones estocásticas e inesperadas.

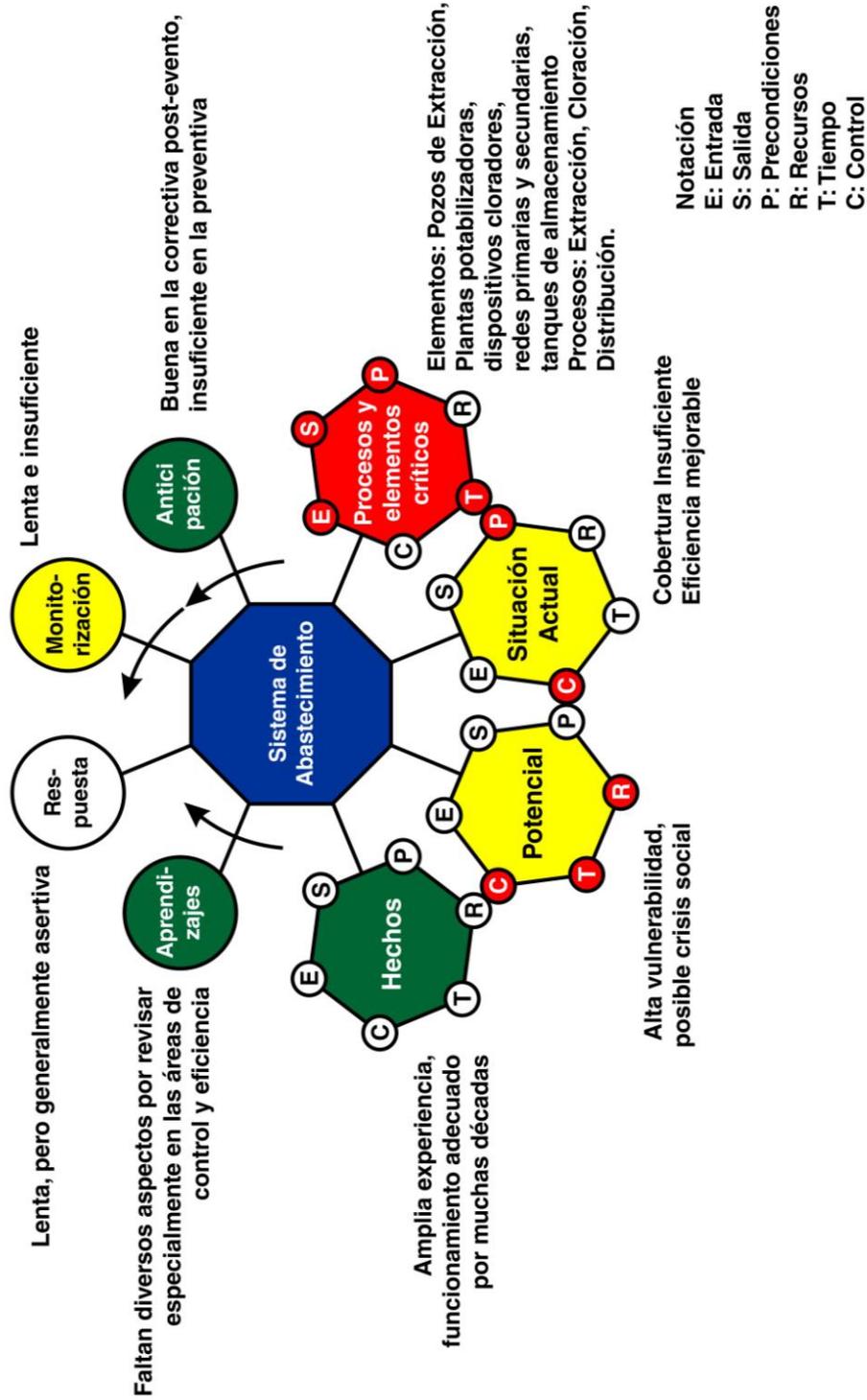
<b>Respuesta Resiliente</b>	Reacción inmediata, asertiva y efectiva ante la adversidad	Debido a la concentración del tratamiento en un espacio relativamente pequeño, comparado con los sistemas de abastecimiento y drenaje, se tendrá una respuesta expedita que atienda correctamente las necesidades.		Reacción lenta, equívoca o insuficiente ante la adversidad
	Amortiguamiento del escalamiento en los efectos de eventos adversos		Difícilmente se amortiguará el escalamiento de los efectos provocados por la situación adversa.	Incapacidad de amortiguamiento del escalamiento en los efectos de eventos adversos
	Decisiones flexibles y que se ajustan a la naturaleza dinámica y estocástica de las situaciones adversas		El personal generalmente consulta a sus superiores en situaciones de adversidad.	Decisiones estáticas incapaces de ajustarse a la naturaleza dinámica y estocástica de las situaciones adversas
	Amplio margen de maniobra al trabajar en niveles cercanos a las condiciones frontera del sistema		Cuando el sistema trabaja en niveles cercanos a sus condiciones frontera, existen pocas alternativas entre las cuales se pueda elegir.	Corto margen de maniobra al trabajar en niveles cercanos a las condiciones frontera del sistema
	El sistema es capaz de funcionar correctamente bajo condiciones complejas de trabajo y/o sometido a una alta presión y/o a un alto riesgo	En época de lluvias y desde hace décadas, el sistema funciona bajo condiciones complejas de trabajo, en las que es sometido a alta presión y riesgo.		El sistema no es capaz de funcionar correctamente bajo condiciones complejas de trabajo y/o sometido a una alta presión y/o a un alto riesgo
	Cuando esté cerca del punto de falla, se toman decisiones que permiten al sistema extender su capacidad de trabajo, y por consiguiente, su punto de falla	El diseño de las plantas de tratamiento en operación puede permitir la variación de los niveles de trabajo, para que dentro del sistema, se pueda extender su capacidad de trabajo.		Cuando esté cerca del punto de falla, se toman decisiones que permiten al sistema extender su capacidad de trabajo, y por consiguiente, su punto de falla
	A pesar de las adversidades presentadas, el sistema no deja de funcionar ni se pierde el control del mismo en momento alguno	El sistema está bajo control en todo momento, especialmente debido a su automatización.		Al presentarse las adversidades, el sistema deja de funcionar o se pierde el control del mismo en algún momento
	El sistema se recupera rápidamente después de sufrir adversidades		La infraestructura quedará dañada con severidad en caso de falla, por lo que el sistema tardará semanas o inclusive meses en recuperar su operación.	El sistema no se recupera rápidamente después de sufrir adversidades
<b>Sumatoria de la Evaluación</b>	<b>12</b>	<b>13</b>		



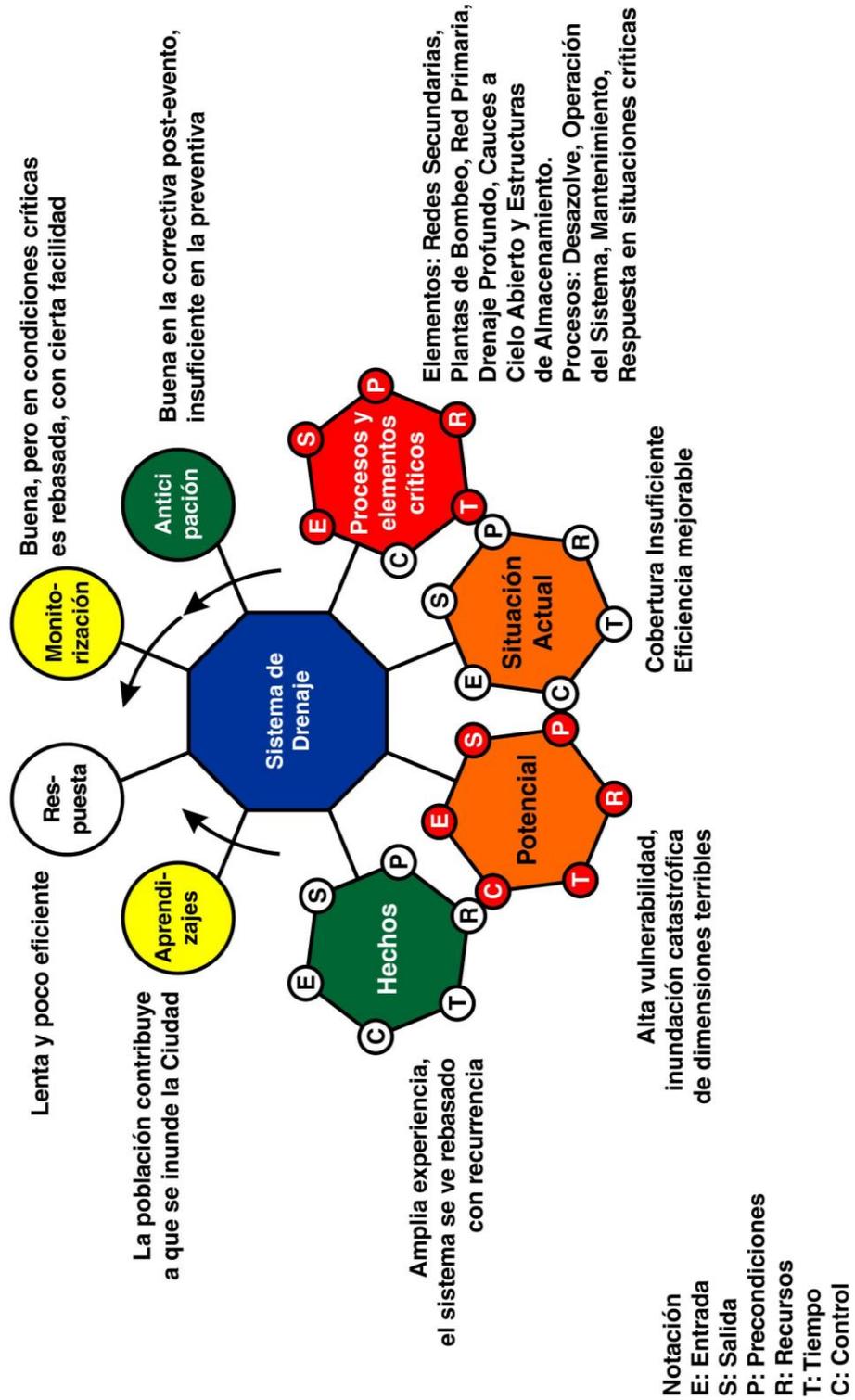
Conclusión: El sistema de tratamiento es el más resiliente de los analizados con anterioridad. Su área de oportunidad se encuentra en la anticipación a los fenómenos adversos que pudieran ocurrir, además de la respuesta resiliente con la que puedan solucionar dichos fenómenos.

## El Proceso de la Ingeniería de Resiliencia aplicado a los Sistemas de Abastecimiento, Drenaje y Tratamiento

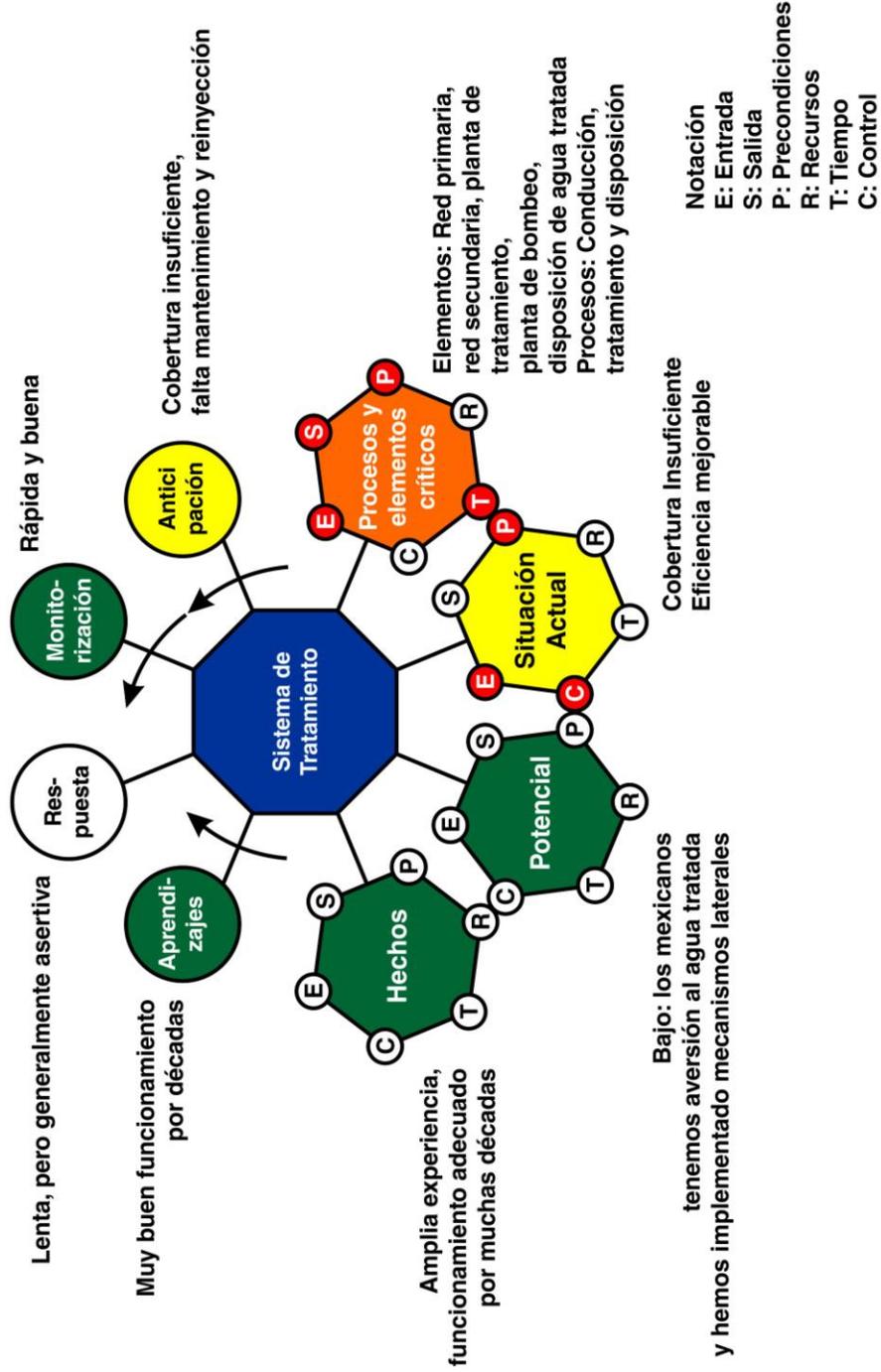
### Análisis del Sistema de Abastecimiento



## Análisis del Sistema de Drenaje



## Análisis del Sistema de Tratamiento



---

# Conclusiones

---

## Evaluación de la Seguridad Hídrica y la Resiliencia del Sistema

A partir de la revisión del Sistema Hidráulico del Distrito Federal, poniendo énfasis en la introducción de los siguientes aspectos:

1. Enfoque de la Ingeniería de Resiliencia
2. Sistemas de abastecimiento, drenaje y tratamiento
3. Peligros naturales. Sismo, inundación, vulcanismo, corrimiento de tierras y sequía

se encontró que el sistema hidráulico es vulnerable ante los peligros naturales.

Esto no es descabellado, especialmente por la modificación de las premisas para el planteamiento de los problemas de seguridad, además de la alta exigencia que presenta la evaluación mediante el enfoque de la Ingeniería de Resiliencia.

Se encontró que el sistema de abastecimiento es más cercano a la vulnerabilidad, en un grado similar al sistema de drenaje. En cambio, el sistema de tratamiento es más resiliente, especialmente por su naturaleza concentrada, aunque evidentemente insuficiente.

La forma en que se ha asentado la población del Distrito Federal, con las presiones que exige la rápida multiplicación de la población, con las necesidades que requiere subsanar y la forma desordenada en la que se ha dado este proceso, incrementan de forma importante la presión sobre los problemas. Esto es, cuando se presenten las adversidades, no vendrán solas, desencadenando problemas que complicarán continuamente la situación.

Cabe destacar que se comprobó que el Distrito Federal está asentado en una zona que presenta muchas adversidades, lo que la convierte en una de las metrópolis más complicadas del mundo. Si se tuviera que refundar, definitivamente no sería un lugar conveniente para hacer este asentamiento.

Se concluye que a pesar de que existe cierta seguridad hídrica en el sistema, y hacia la población, ésta será fácilmente vulnerada cuando se presente una adversidad de consideración.

## Acciones para mejorar la Resiliencia del Sistema

Recordando las preguntas planteadas al inicio del trabajo, se responden las siguientes conjeturas:

- a)           ¿Qué es la seguridad en el sistema hidráulico de la Ciudad de México?
- La seguridad es el conjunto de accidentes que no han ocurrido. En lo general, el sistema de abastecimiento es más seguro que el de drenaje, ya que el abastecimiento a través de pipas es una medida parcialmente resiliente. En cambio, ante una gran tromba, se produce el colapso de la infraestructura de drenaje, mismo que no es resuelto con rapidez. La infraestructura de tratamiento es claramente insuficiente, aunque históricamente ha sido segura.
- b)           ¿Qué partes del sistema son vulnerables?
- Los sistemas más vulnerables son los de abastecimiento y desagüe. El primero es vulnerable en todas sus líneas de transmisión y en la efectividad para cumplir con su cometido. El segundo es vulnerable en situaciones críticas, en las que es exigido, y pocas veces ha respondido en los niveles que se han presentado.
- c)           ¿La Ciudad de México está más cercana a la vulnerabilidad o a la resiliencia?
- En el aspecto del sistema hídrico, la Ciudad de México es más cercana a la vulnerabilidad que a la resiliencia. Requiere acciones más efectivas de aprendizajes –positivos y negativos- , de anticipación a lo que pueda suceder y de monitorización. Sólo hasta haber cumplido con estos factores, podrá brindar respuestas resilientes, como las que requiere.
- d)           ¿Qué medidas se proponen para que el sistema sea más resiliente?
- Las medidas propuestas son de diversas índoles. Contemplan inversión en infraestructura y tecnología, mejora en la comunicación e interacción con la población, flexibilización del sistema y aumento en la capacidad de respuesta. Las propuestas son tanto onerosas como baratas.

Es indispensable concluir que los impactos inesperados en los sistemas pueden ser disminuidos y mitigados pensando de forma holística, y aceptando que la conjunción de los peligros, con la vulnerabilidad expuesta y otros factores, entre ellos los sociales, influirán en el funcionamiento del sistema.

Asimismo, la Ingeniería de Resiliencia claramente se puede extrapolar para todos los sistemas de Ingeniería, por lo que debe ser un elemento a considerar en la planeación de los proyectos de infraestructura que se realizarán en las próximas décadas.

Finalmente, se debe rescatar el valor de la creatividad. Se mostró que existe la perenne sensación de que algo puede salir mal. Sin creatividad, los problemas serían cuadrados y con perspectivas de corto alcance. Entonces nuestra capacidad para aprender, anticiparse y monitorear fenómenos, influirán en una respuesta estática, lenta y errónea, antes que una flexible, expedita, efectiva y asertiva.

### **Sugerencias para Investigaciones Futuras**

La resiliencia es un enfoque tan complejo como apasionante. En este trabajo se expresó de forma cualitativa, tratando de maximizar la filosofía y sus posibles aplicaciones. También se realizó con el interés de que este sea el primer tabique para una pared aditiva, en la que pueda participar mucha gente.

El siguiente aspecto que se sugiere para investigaciones futuras es utilizar un enfoque cuantitativo, con amplia presencia de la probabilidad y modelos de simulación, que permitan predecir el comportamiento de este sistema ante la presencia de factores adversos continuados.

**“POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU”,  
CIUDAD UNIVERSITARIA, 2012**



---

# Listado de Trabajos Consultados

---

1. Aparicio Mijares, F. J. (2010). *Fundamentos de hidrología de superficie*. México Distrito Federal: Limusa.
2. Baca Urbina, G. (2010). *Evaluación de Proyectos* (Sexta edición ed.). México Distrito Federal: Mc-Graw Hill.
3. Bárcenas, P. (s.f.). *Plano Informativo*. Obtenido de Pide SEDESOL no politizar el tema del agua: <http://planoinformativo.com/sanluis/id/181074/t/pide-sedesol-no-politizar-el-tema-del-agua/>
4. Blaikie, P., Cannon, T., Davis, I., & Wisner, B. (1994). *At risk: Natural hazards, people's vulnerability and disasters* (Segunda ed.). London, England: Wisner.
5. Capella Vizcaíno, A. (2000). *Abastecimiento de Agua a la Zona Metropolitana de la Ciudad de México*. México Distrito Federal: Documento Electrónico.
6. CNN USA. (15 de enero de 2009). *Airplane crash-lands into Hudson River; all aboard reported safe; bird strike the cause*. Obtenido de [http://articles.cnn.com/2009-01-15/us/new.york.plane.crash\\_1\\_air-traffic-controllers-bird-strike-pilot?\\_s=PM:US](http://articles.cnn.com/2009-01-15/us/new.york.plane.crash_1_air-traffic-controllers-bird-strike-pilot?_s=PM:US)
7. Comisión Nacional del Agua. (2012). *¿Qué es la Conagua?* Obtenido de Misión, Visión y Visión del Sector Hidráulico: <http://www.conagua.gob.mx/Contenido.aspx?n1=1&n2=27>
8. Congressional Research Service. (2003, 2011). *Critical Infrastructures: Background Policy and Implementation*. Obtenido de <http://www.fas.org/sgp/crs/homesecc/RL30153.pdf>
9. Cruz, H. (12 de septiembre de 2011). *Crónica.com.mx*. Obtenido de Desabasto de agua en el DF toda la semana: [http://www.cronica.com.mx/nota.php?id\\_notas=604662](http://www.cronica.com.mx/nota.php?id_notas=604662)
10. Desarrollo y Sistemas SA. (2012). *Programa Hídrico Visión 2030 para la Región Administrativa XIII, Valle de México y Sistema Cutzamala*. Obtenido de [http://desisa.net/index.php?option=com\\_k2&view=item&id=152:programa-h%C3%ADdrico-visi%C3%B3n-2030-para-la-regi%C3%B3n-administrativa-xiii-valle-de-m%C3%A9xico-y-sistema-cutzamala&Itemid=82](http://desisa.net/index.php?option=com_k2&view=item&id=152:programa-h%C3%ADdrico-visi%C3%B3n-2030-para-la-regi%C3%B3n-administrativa-xiii-valle-de-m%C3%A9xico-y-sistema-cutzamala&Itemid=82)
11. El Economista. (23 de enero de 2012). *México: La peor sequía en 70 años*. Obtenido de <http://eleconomista.com.mx/infografias/sequia/2012/01/22/grandes-secos>
12. Espino de la O, E. (10 de Junio de 2011). *El Programa de Sustentabilidad Hídrica para la Cuenca del Valle de México. Conferencia Dictada en la Torre de Ingeniería*, 54 páginas. Ciudad Universitaria, México Distrito Federal.

13. Espinosa, V. A. (09 de noviembre de 2011). *El Universal, Sección DF*. Obtenido de Bloquean avenida por falta de agua: <http://www.eluniversaldf.mx/home/nota37533.html>
14. Faulkner, B. (2001). *Towards a framework for tourism disaster management*.
15. Figueroa Palacios, E. (Noviembre-Mayo de 2011, 2012). Retroalimentación sobre Vulnerabilidad, Desastres Naturales, Management e Ingeniería de Resiliencia. (J. Arreola Rosales, Entrevistador)
16. Findikakis, A. (2011). *Water Resources Management*. Palo Alto, California, USA: Stanford University.
17. Foreman, P. (2010). *Vulnerability Management*. Boca Raton, Florida, USA: Taylor and Francis Group.
18. Frieden, A. (24 de abril de 2012). *CNN México*. Obtenido de Los fiscales presentan cargos con relación al derrame de crudo de BP: <http://mexico.cnn.com/mundo/2012/04/24/fiscales-presentan-cargos-con-relacion-al-derrame-de-crudo-de-bp>
19. Fulmer, J. (July-August de 2009). What in the World is Infrastructure? *PEI Infrastructure Investor*, 30-32.
20. Gill, V. (25 de febrero de 2010). *BBC News*. Obtenido de Lessons to be learned from Haiti's tsunami: <http://news.bbc.co.uk/2/hi/science/nature/8536561.stm>
21. Gladwell, M. (2005). *Blink: The Power of Thinking Without Thinking*. New York, USA: Little, Brown and Company.
22. Global Water Partnership. (2000). *Integrated Water Resources Management* (Vol. Background paper no. 4). Estocolmo, Suecia: Global Water Partnership.
23. Gobierno de la República. (2012). *Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos*. Obtenido de <http://constitucion.gob.mx/index.php?idseccion=12>
24. Gobierno del Distrito Federal; Secretaría del Medio Ambiente; Secretaría de Obras y Servicios; Sistema de Aguas de la Ciudad de México. (2007). *Programa de Manejo Sustentable del Agua para la Ciudad de México*. Obtenido de [http://www.sma.df.gob.mx/dgpcp/pdf/ProgAgua\\_Cd.pdf](http://www.sma.df.gob.mx/dgpcp/pdf/ProgAgua_Cd.pdf)
25. González, R., Llanos, R., Ramírez, B. T., & Bolaños, Á. (26 de agosto de 2009). *La Jornada, Sección Capital*. Obtenido de En manos de la IP la recaudación por agua aumentó sólo 16%: SACM: <http://www.jornada.unam.mx/2009/08/26/capital/032n1cap>
26. Gopalakrishnan, K., & Peeta, S. (2010). *Resilient Critical Infrastructure Systems*. Chennai, India: Springer.
27. Grotberg, E. (2001). *Nuevas Tendencias en Resiliencia. Descubriendo las propias Resiliencias*. Barcelona, España: Paidós.

- 
28. Grupo Reforma. (6 de mayo de 2010). *Piden complementar Emisor Poniente*. Obtenido de <http://www.reforma.com/edomex/articulo/553/1105405/>
  29. Grupo Reforma; Animal Político. (21 de marzo de 2012). *Reportan 250 mil afectados por cortes de agua, tras el sismo en el DF*. Obtenido de <http://www.animalpolitico.com/2012/03/reportan-250-mil-afectados-por-cortes-de-agua-tras-el-sismo-en-el-df/>
  30. Guerrero, A. L. (2011). *Diario Impacto, Sección Nacional*. Obtenido de Habrá hundimientos y desabasto de agua en el DF: Conagua: [http://impacto.mx/nacional/nota-10898/Habr\\_hundimientos\\_y\\_desabasto\\_de\\_agua\\_en\\_el\\_DF\\_Conagua](http://impacto.mx/nacional/nota-10898/Habr_hundimientos_y_desabasto_de_agua_en_el_DF_Conagua)
  31. Hoekstra, A. e. (2008). *Water footprint definition*. Obtenido de Virtual water trade: Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade, IHE Delft, Netherlands: <http://www.waterfootprint.org/Reports/Report12.pdf>
  32. Hollnagel, E., Pariés, J., Woods, D., & Wreathall, J. (2011). *Resilience Engineering in Practice: A Guidebook*. Surrey, England: Ashgate Publishing.
  33. Hollnagel, E., Woods, D. D., & Leveson, N. (2006). *Resilience Engineering: Concepts and precepts*. Hampshire, England: Ashgate.
  34. Hubbard, D. (2009). *The Failure of Risk Management*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons.
  35. Huerta, J., & Universal, E. (16 de junio de 2011). *Inundaciones en el Valle de Chalco, muy difíciles de solucionar: Centro de Geociencias de la UNAM*. Obtenido de <http://www.eluniversaledomex.mx/chalco/nota18126.html>
  36. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. (2012). *Funciones del IMTA*. Obtenido de [http://www.imta.mx/index.php?option=com\\_content&view=article&id=49&Itemid=159](http://www.imta.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=49&Itemid=159)
  37. Instituto Nacional de Geografía y Estadística. (2012). *Compendio de Información Geográfica Municipal*. Obtenido de <http://mapserver.inegi.org.mx/dsist/prontuario/index2.cfm>
  38. Instituto Nacional de Geografía y Estadística. (2012). *Información Geográfica y Sociodemográfica de la Ciudad de México*. Obtenido de <http://www.inegi.org.mx/>
  39. Jiménez, R. (30 de agosto de 2011). *El Universal.mx*. Obtenido de Viviendas de Valle Dorado vuelven a inundarse: <http://www.eluniversal.com.mx/notas/789866.html>
  40. Jiménez, R. (30 de agosto de 2011). *El Universal.mx*. Obtenido de Viviendas de Valle Dorado vuelven a inundarse: <http://www.eluniversal.com.mx/notas/789866.html>
  41. Keller, E., & De Vecchio, D. E. (2012). *Natural Hazards: Earth's processes as hazards, disasters, and catastrophes* (Tercera Edición ed.). Saddle River, New Jersey, USA: Prentice Hall Pearson.

42. Kreisler, L. (1996). La résilience mise en spirale. *Spirale* , 1; 162-165.
43. Lesser Illades, J. M., & Cortés Pérez, M. Á. (1998). El hundimiento del terreno en la ciudad de México y sus implicaciones en el sistema de drenaje. *Ingeniería Hidráulica en México* , XIII, 13-18.
44. Mahbub Arelle, V. (2011). *Apuntes de la Clase de Evaluación de Proyectos*. Ciudad Universitaria, México Distrito Federal: Facultad de Ingeniería de la UNAM.
45. Maniscalchi, J. (26 de Junio de 2009). *Digital Threat: Vulnerabilities, exploitation, malware, risk, mitigation*. Obtenido de Threat vs Vulnerability vs Risk: <http://www.digitalthreat.net/2009/06/threat-vs-vulnerability-vs-risk/>
46. Milenio Noticias. (06 de septiembre de 2011). *Se abre socavón en Álvaro Obregón*. Obtenido de <http://www.milenio.com/cdb/doc/impreso/9021496>
47. Modarres, M. (2006). *Risk Analysis in Engineering: Techniques, Tools and Trends*. Washington, USA: Taylor & Francis.
48. Morales García, A. (Mayo de 2012). La Hidrología del Valle de México y las implicaciones de la Ingeniería de Resiliencia. (J. Arreola Rosales, Entrevistador)
49. Moreno Abad, J. (29 de julio de 2010). *rfi español*. Obtenido de El agua potable ya es un derecho universal para la ONU: <http://www.espanol.rfi.fr/sociedad/20100729-el-agua-potable-ya-es-un-derecho-universal-para-la-onu>
50. Murray, A., & Grubestic, T. (2007). *Critical Infrastructure Reliability and Vulnerability*. Heidelberg, Germany: Springer.
51. National Police Agency of Japan. (6 de junio de 2012). *Damage Situation and Police Countermeasures: Deaths, injured, missing*. Obtenido de [http://www.npa.go.jp/archive/keibi/biki/higaijokyo\\_e.pdf](http://www.npa.go.jp/archive/keibi/biki/higaijokyo_e.pdf)
52. Naymushin, I. (17 de agosto de 2009). *Reuters*. Obtenido de Russian dam disaster kills 10, scores missing: <http://www.reuters.com/article/2009/08/17/us-russia-accident-sb-idUSTRE57G0M120090817?sp=true>
53. Notimex. (15 de marzo de 2012). *Azteca Noticias*. Obtenido de ALDF avala mayor subsidio a tarifas del agua: <http://www.aztecanoticias.com.mx/notas/estados-y-df/101881/aldf-avala-mayor-subsidio-a-tarifas-del-agua>
54. Pantoja, S., & Archundia, M. (25 de marzo de 2012). *El Universal, sección Metrópoli*. Obtenido de Crece enojo en oriente del DF tras quedar sin agua por sismo: <http://www.eluniversal.com.mx/notas/837919.html>
55. Parnell, G., Driscoll, P., & Henderson, D. (2011). *Decision Making in Systems Engineering and Management* (Segunda edición ed.). Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons.

- 
56. Perló Cohen, M., & González Reynoso, A. (2007). *¿Guerra por el agua en el Valle de México? Estudio sobre las relaciones hidráulicas entre el Distrito Federal y el Estado de México*. Ciudad Universitaria, México Distrito Federal: Instituto de Investigaciones Geográficas de la UNAM.
57. Phillips, B. e. (2010). *Social Vulnerability to Disasters*. Washington, USA: CRC Press Taylor & Francis Group.
58. Pine, J. C. (2009). *Natural Hazards Analysis: Reducing the impact of disasters*. Boca Raton, Florida, USA: Taylor & Francis Group.
59. Protección Civil del Gobierno del Distrito Federal. (s.f.). *Funciones de Protección Civil*. Obtenido de <http://www.proteccioncivil.df.gob.mx/PCWEB/LASPCFunciones.html>
60. Pushkin, Y. (17 de agosto de 2009). *CNN.com/europe*. Obtenido de 10dead, 68 missing in explosion at Russian plant: <http://edition.cnn.com/2009/WORLD/europe/08/17/russia.plant.explosion/>
61. Qualys. (2008). *Vulnerability Management for Dummies*. Sussex, England: John Wiley & Sons.
62. Quintero, J. (8 de septiembre de 2011). *La Jornada, Sección Capital*. Obtenido de Conagua cierra la llave y causa bloqueos y saqueos en la GAM: <http://www.jornada.unam.mx/2011/09/08/capital/037n1cap>
63. Rasmussen, J., & Svedung, I. (2000). *Proactive risk management in a dynamic society*. Karlstad, Sweden: Swedish Rescue Services Agency.
64. RDI Press. (18 de febrero de 2011). *A mayor emisión de CO2, mayor riesgo de inundación*. Obtenido de <http://www.rdiexpress.com/18/02/2011/a-mayor-emision-de-co2-mayor-riesgo-de-inundacion/>
65. Reuters. (12 de abril de 2011). *Japan raises nuclear crisis severity to highest level*. Obtenido de <http://www.reuters.com/article/2011/04/12/japan-severity-idUSTKE00635720110412>
66. Robles, J., & Montes, R. (27 de octubre de 2011). *El Universal, Sección Metrópoli*. Obtenido de Reducirán 40% flujo de agua al DF y Edo. de México: <http://www.eluniversal.com.mx/ciudad/108609.html>
67. Royacelli, G. (29 de Marzo de 2011). *El Universal.mx*. Obtenido de Proponen aumentar subsidio al agua en el DF: <http://www.eluniversal.com.mx/notas/755375.html>
68. RusHydro. (9 de septiembre de 2009). *The Board of Directors of JSC RusHydro takes note of information on the accident at the Sayano-Shushenskaya HPP*. Obtenido de <http://www.eng.rushydro.ru/press/news/7912.html>

69. Rutter, M. (1985). Resilience in the face of adversity: Protective factors and resistance to psychiatric disorder. *British Journal of Psychiatry* , 147, 598-611.
70. Sampedro, J. (17 de febrero de 2011). *El País*. Obtenido de Inundaciones por nuestra culpa: [http://elpais.com/diario/2011/02/17/sociedad/1297897201\\_850215.html](http://elpais.com/diario/2011/02/17/sociedad/1297897201_850215.html)
71. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2012). *¿Qué es la Semarnat?* Obtenido de <http://www.semarnat.gob.mx/conocenos/Paginas/quienessomos.aspx>
72. Servicio Sismológico Nacional. (2012). *Cálculo de la Magnitud Definitiva para el Sismo del 20 de marzo de 2012, en Ometepepec, Guerrero*. Obtenido de <http://www2.ssn.unam.mx/website/jsp/reportesEspeciales/MagnitudDefinitivaSismo20MarzoSSN.pdf>
73. Servicio Sismológico Nacional. (1 de mayo de 2012). *Reporte de Sismos*. Obtenido de Sismo del 20 de marzo de 2012 y sus réplicas: <http://www.ssn.unam.mx/>
74. Sistema de Aguas de la Ciudad de México. (2011). *Compendio 2010*. México Distrito Federal.
75. Sistema de Aguas de la Ciudad de México. (2012). *Reglamentos del Sistema de Aguas de la Ciudad de México*. Obtenido de <http://www.sacm.df.gob.mx:8080/web/sacm/reglamentos>
76. Sistema de Aguas de la Ciudad de México. (2012). *Sistema de Aguas de la Ciudad de México*. Obtenido de ¿Quiénes somos y qué hacemos?: <http://www.sacm.df.gob.mx:8080/web/sacm/sacm>
77. Strickland, E. (12 de abril de 2011). *Fukushima Accident Upgraded to Severity Level 7*. Obtenido de <http://spectrum.ieee.org/tech-talk/energy/nuclear/fukushima-accident-upgraded-to-severity-level-7/>
78. Teplyakov, I. T. (14 de septiembre de 2009). *¿La segunda turbina hidráulica de la Sayano-Shushenskaya vibró durante 10 años?* Recuperado el Traducida con Google Translator, de <http://izvestia.ru/news/352978>
79. The Economist. (2012). Counting the Cost of Calamities. *The Economist* , 60-62.
80. Threat Analysis Group. (3 de Mayo de 2010). *Threat, vulnerability, risk - commonly mixed up terms*. Obtenido de <http://www.threatanalysis.com/blog/?p=43>
81. Tortajada, C. (2003). *Rethinking development paradigms for the water sector*. London, England: Earthscan Publications Ltd.
82. Trejo Hernández, M. (Marzo de 2012). La Ingeniería de Resiliencia dentro de la Construcción. (J. Arreola Rosales, Entrevistador)
83. United Nations Development Programme. (2004). *Crisis Prevention & Recovery*. Recuperado el 2012, de

- 
- <http://www.undp.org/content/undp/en/home/ourwork/crisispreventionandrecovery/overview.html>
84. United Nations. (2000). *The UN World Water Development Report, Water for People, Water for Life*. New York, USA: UN.
85. United States Foreign Assistance. (1990). *Significant Data on Major Disasters Worldwide: 1900-Present*. Washington: United States Foreign Assistance.
86. United States Geological Service. (12 de enero de 2010). *Magnitude 7.0 - Haiti Region*. Obtenido de Initial Report and Updates:  
<http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqinthenews/2010/us2010rja6/>
87. United States Geological Service. (12 de enero de 2010). *Pager M7.0 Haiti Region Earthquake*. Obtenido de Earthquake Shaking Alert Level: Red Alert:  
<http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/pager/events/us/2010rja6/index.html>
88. United States Geological Survey. (2012). *Earthquake Hazards Program*. Obtenido de Earthquakes with 50,000 or more deaths:  
[http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/world/most\\_destructive.php](http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/world/most_destructive.php)
89. United States Geological Survey. (20 de marzo de 2012). *Magnitude 7.4 Earthquake Strikes Oaxaca, Mexico*. Obtenido de  
[http://www.usgs.gov/blogs/features/usgs\\_top\\_story/magnitude-7-4-earthquake-strikes-oaxaca-mexico/](http://www.usgs.gov/blogs/features/usgs_top_story/magnitude-7-4-earthquake-strikes-oaxaca-mexico/)
90. United States Geological Survey. (5 de Abril de 2011). *Magnitude 9.0 - Near the East Coast of Honshu, Japan*. Obtenido de <http://www.webcitation.org/mainframe.php>
91. United States Geological Survey. (3 de marzo de 2011). *USGS Updates Magnitude of Japan's 2011 Tohoku Earthquake to 9.0*. Obtenido de  
[http://www.usgs.gov/newsroom/article.asp?ID=2727&from=rss\\_home#.T-w-rvEf6IA](http://www.usgs.gov/newsroom/article.asp?ID=2727&from=rss_home#.T-w-rvEf6IA)
92. US Airways. (15 de enero de 2009). *Press Release*. Obtenido de US Airways Flight 1549: Official Version and Update: <http://phx.corporate-ir.net/phoenix.zhtml?c=196799&p=irol-newsArticle&ID=1245262>
93. US Army Corps of Engineers. (s.f.). *What are hydraulic structures?* Recuperado el 8 de Noviembre de 2011, de US Army Corps of Engineers:  
<http://chl.erdc.usace.army.mil/hydraulicstructures>
94. Vela, E. (2004). La Ciudad de México vista desde el Agua. *Arqueología Mexicana, Revista de la UDEM*, 80-87.
95. Velázquez, J. (23 de septiembre de 2011). *Cos vial al sur del DF por intempestiva lluvia*. Obtenido de <http://www.aztecanoticias.com.mx/notas/seguridad/73247/caos-vial-al-sur-del-df-por-intempestiva-lluvia>

96. Vervaeck, A., & Robles, C. (13 de abril de 2012). *Earthquake -Report*. Obtenido de Earthquake in Guerrero-Oaxaca, México - 2 people died after Tuesday's Earthquake: <http://earthquake-report.com/2012/03/20/massive-extremely-dangerous-earthquake-in-guerrero-mexico/>
97. Viejo Zubicaray, M. (Noviembre-Junio de 2011, 2012). La Ingeniería de Resiliencia y su aplicación tanto en la Ingeniería como en la Vida. (J. Arreola Rosales, Entrevistador)
98. Woods, D. (2005). *Creating foresight: Lessons for enhancing resilience*. Columbia, USA: Institute for Ergonomics, Ohio State University.
99. World Commission on Environment and Development of the United Nations Environment Program. (1987). *Our Common Future, Report of the WCED transmitted to the UN General Assembly*. New York, USA: WCED UN.
100. World Meteorological Organization. (1992). *World Meteorological Organization*. Recuperado el 8 de Noviembre de 2011, de Declaración de Dublín sobre el agua y el desarrollo sostenible: <http://www.wmo.int/pages/prog/hwrrp/documents/espanol/icwedecs.html#p1>
101. Zuckerfeld, R. e. (2005). *Procesos Terciarios: De la Vulnerabilidad a la Resiliencia*. Buenos Aires, Argentina: Lugar.

---

Luke: I don't, I don't believe it.  
Yoda: That is why you fail.  
(Empire Strikes Back, 1980)

