



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
INGENIERÍA AMBIENTAL – MATERIALES Y RESIDUOS PELIGROSOS

“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE REMEDIACIÓN DE SITIOS CONTAMINADOS POR  
HIDROCARBUROS”

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
DOCTOR EN INGENIERÍA

PRESENTA:  
M. en I. LUIS ANTONIO GARCÍA VILLANUEVA

TUTOR PRINCIPAL  
DRA. GEORGINA FERNÁNDEZ VILLAGÓMEZ, FACULTAD DE INGENIERÍA-UNAM

COMITÉ TUTOR  
DRA. ROSARIO ITURBE ARGÜELLES, INSTITUTO DE INGENIERÍA- UNAM  
DR. ULISES RUIZ SAUCEDO, SEMARNAT

MÉXICO, D. F. JUNIO 2013



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dra. Iturbe Argüelles Rosario  
Secretario: Dra. Hansen Hansen Anne  
Vocal: Dra. Fernández Villagómez Georgina  
1<sup>er</sup>. Suplente: Dr. Ruiz Saucedo Ulises  
2<sup>do</sup>. Suplente: Dr. Escolero Fuentes Oscar Arnoldo

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Facultad de Ingeniería

**TUTOR DE TESIS:**

DRA. GEORGINA FERNÁNDEZ VILLAGÓMEZ

-----  
**FIRMA**



## CONTENIDO TEMÁTICO

	<b>PÁGINA</b>
<b>DEDICATORIAS Y AGRADECIMIENTOS</b>	
<b>LISTA DE TABLAS.....</b>	<b>i</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>ii</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>iv</b>
<b>ABSTRAC.....</b>	<b>vi</b>
<b>CAPÍTULO I JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA Y OBJETIVOS</b>	
1.1 Justificación del problema.....	7
1.2 Objetivo General.....	10
1.3 Objetivos específicos.....	10
1.4 Hipótesis.....	11
1.5 Alcances.....	11
<b>CAPÍTULO II FUNDAMENTOS TÉORICOS</b>	
2.1 Suelo: Formación del suelo.....	13
2.2 Horizontes.....	19
2.3 Clasificación del suelo por texturas.....	20
2.4 Propiedades físicas del suelo.....	26
Profundidad	
Textura	
Densidad y porosidad	
Estabilidad estructural	
Índice de plasticidad	
Permeabilidad	
Penetrabilidad	
2.5 Transporte de contaminantes orgánicos en medio poroso.....	37
2.6 Métodos de rehabilitación de suelos.....	45
Técnicas de rehabilitación fisicoquímicas	
Lavado de suelos (in situ)	
Lavado de suelos fuera del sitio	
Extracción de vapores	
Electrocinética	
Solidificación/estabilización	
Técnicas de rehabilitación térmicas	
Desorción térmica	
Incineración	
Técnicas de rehabilitación biológicas	
Biorremediación	

Bioestimulación  
 Bioaumentación  
 Biolabranza  
 Bioventeo  
 Fitorremediación

**CAPÍTULO III MARCO JURÍDICO EN MÉXICO PARA SUELOS CONTAMINADOS**

3.1 Marco Legislativo en México.....53

**CAPÍTULO IV CASO DE ESTUDIO: ANTECEDENTES HISTÓRICOS DEL SITIO**

4.1 Geomorfología regional.....60  
 4.2 Hidrología del sitio.....66  
 4.3 Inicios.....72  
 4.4 Grandes Empresas.....75  
 4.5 Transformación de la “Refinería de Azcapotzalco” (1932-1938) a “18 de marzo” (1946-1991).....80  
 4.6 Cierre de la Refinería 18 de Marzo.....86  
 4.7 Desmantelamiento de la Refinería 18 de Marzo.....88

**CAPÍTULO V CONTAMINANTES PRESENTES EN LA ZONA 7: BENCENO Y FRACCIÓN LIGERA (GASOLINA)**

5.1 Historia del benceno.....99  
 5.2 Estructura del benceno.....102  
 5.3 Obtención del benceno  
 5.4 Propiedades fisicoquímicas y toxicológicas del benceno.....103  
 5.5 Propiedades fisicoquímicas y toxicológicas de la fracción ligera (gasolina)  
 .....109

**CAPÍTULO VI METODOLOGÍA DEL BALANCE DE MASAS EN EL SUELO PARA EL BENCENO Y LA FRACCIÓN LIGERA DE HIDROCARBUROS**

6.1 Balance de Masas.....121  
 6.2 Desarrollo e implementación de la metodología del Balance de Masas .....126

**CAPÍTULO VII RESULTADOS Y SU DISCUSIÓN.....133**

**CAPÍTULO VIII CONCLUSIONES.....159**

ANEXO "A" MEMORIA DE CÁLCULO DEL BALANCE DE MASA EN EL SUELO  
PARA EL BENCENO Y LA FRACCIÓN LIGERA DE HIDROCARBUROS  
(disponible solamente en formato electrónico, consultar CD adjunto).....162

GLOSARIO DE TÉRMINOS.....163

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....169

## Lista de Tablas

- Tabla 2.1 Meteorización química de los minerales que comúnmente forman las rocas
- Tabla 2.2 Importancia de la textura
- Tabla 2.3 Clasificación de profundidades del suelo
- Tabla 2.4 Coeficientes de permeabilidad
- Tabla 2.5 Técnicas de rehabilitación
- Tabla 3.1 Normas Oficiales Mexicanas para suelos contaminados
- Tabla 4.1 Evolución geológica de la Cuenca del Valle de México
- Tabla 4.2 Delegaciones y municipios que dependen del acuífero
- Tabla 4.3 Presas, ríos y canales existentes en las zonas hidrológicas
- Tabla 4.3 Descripción de estratos en el área de la Ex – Refinería 18 de marzo.
- Tabla 4.4 Propiedades fisicoquímicas del suelo de la Ex – Refinería 18 de marzo
- Tabla 4.5 Cronograma de la Ex – Refinería 18 de Marzo
- Tabla 4.6 Desarrollo cronológico del desmantelamiento de la Refinería 18 de marzo
- Tabla 4.7 Estudios realizados para la evaluación del suelo en la Ex-Refinería 18 de marzo
- Tabla 5.1 Propiedades físicas del benceno
- Tabla 5.2 Efectos a la salud de acuerdo con la vía de transporte
- Tabla 5.3 Efectos sistémicos del benceno
- Tabla 5.4 Constituyentes de la gasolina
- Tabla 5.5 Propiedades fisicoquímica de la gasolina
- Tabla 7.1 Resultados del balance de masa para el benceno de 1.2 m a 7.2 m antes de la rehabilitación
- Tabla 7.2 Resultados del balance de masa para el benceno de 1.2 m a 7.2 m después de la rehabilitación
- Tabla 7.3 Resultados del balance de masa para la fracción ligera de hidrocarburo de 1.2 m a 7.2 m antes de la rehabilitación
- Tabla 7.4 Resultados del balance de masa para la fracción ligera de hidrocarburo de 1.2 m a 7.2 m después de la rehabilitación
- Tabla 7.5 Riesgo calculado antes de la remediación para el benceno
- Tabla 7.6 Riesgo a la salud calculado para el benceno después de la rehabilitación
- Tabla 7.7 Riesgo a la salud calculado para la fracción ligera antes de la rehabilitación
- Tabla 7.8 Riesgo a la salud calculado para la fracción ligera de hidrocarburo después de la rehabilitación



## Lista de Figuras

- Figura 2.1 Etapas de formación del suelo  
Figura 2.2 Clasificaciones granulométricas  
Figura 2.3 Triángulo de texturas  
Figura 2.4 Barrena para muestreo de suelos  
Figura 2.5 Límites de Atterberg  
Figura 2.6 Ecuación que describe el balance de masa  
Figura 2.7 Diagrama de un derrame de benceno o fracción ligera de hidrocarburo (gasolina)  
Figura 3.1 Evolución de la legislación ambiental en México  
Figura 4.1 Cuenca de México  
Figura 4.2 Cuenca de México y sistema montañoso en 3D  
Figura 4.3 Formación geológica de la Cuenca del Valle de México  
Figura 4.4 Eje Neo volcánico del Valle de México  
Figura 4.5 Cuenca de México y sus subcuencas  
Figura 4.6 Vista panorámica del relieve del Valle de México en 1519, vista poniente  
Figura 4.7 Estratigrafía del suelo de la ex – refinería 18 de marzo a una profundidad de 10 metros.  
Figura 4.8 El coronel Edwin L. Drake,  
Figura 4.9 Simón Sarlat Nova médico y gobernador de Tabasco  
Figura 4.10 Estatutos de algunas de las grandes empresas que surgen en México  
Figura 4.11 Bandera Cia. Mexicana El Aguila  
Figura 4.12 Principales yacimientos petroleros en México, 1930,  
Figura 4.13 Vista panorámica de la Refinería de Azcapotzalco en su inauguración en 1932  
Figura 4.14 Planta de destilación primaria en la Refinería de Azcapotzalco  
Figura 4.15 Vista general de las plantas en la Refinería Azcapotzalco  
Figura 4.16 Torre de fraccionamiento de gases  
Figura 4.17 Planta de desintegración térmica “Dubbs”  
Figura 4.18 Instalaciones de la Refinería 18 de Marzo a su cierre en 1991  
Figura 4.19 Vista de la Refinería 18 de marzo en 1998  
Figura 4.20 Vista de la Refinería 18 de marzo en el 2001  
Figura 4.21 Vista de la Refinería 18 de marzo en el 2002  
Figura 4.22 Vista de la Refinería 18 de marzo en el 2004  
Figura 4.23 Cronología del desmantelamiento de la Refinería 18 de Marzo  
Figura 4.24 Vista de la Refinería 18 de marzo después del desmantelamiento  
Figura 4.25 Vista de la Refinería 18 de marzo después del desmantelamiento.  
Figura 4.26 Caracterización de la Refinería 18 de marzo por polígono y sus contaminantes presentes  
Figura 4.27 Ubicación de la Ex – Refinería 18 de marzo en la Ciudad de México  
Figura 5.1 Estructuras del benceno  
Figura 5.1 Composición de BTEX en la gasolina  
Figura 6.1 Transporte del contaminante en medio poroso

- Figura 6.2 Metodología para realizar el balance de masa en un pasivo ambiental
- Figura 7.1 Masa de benceno antes de la rehabilitación
- Figura 7.2 Masa de benceno después de la rehabilitación
- Figura 7.3 Masa de fracción ligera de hidrocarburo antes de la rehabilitación
- Figura 7.4 Masa de fracción ligera de hidrocarburo después de la rehabilitación
- Figura 7.5 Riesgo a la salud por profundidad calculado para el benceno con una concentración promedio, antes de la rehabilitación
- Figura 7.6 Riesgo a la salud por profundidad calculado para el benceno con una concentración percentil 75, antes de la rehabilitación
- Figura 7.7 Riesgo a la salud por profundidad calculado para el benceno con una concentración percentil 95, antes de la rehabilitación
- Figura 7.8 Riesgo a la salud por profundidad calculado para el benceno con una concentración promedio después de la rehabilitación
- Figura 7.9 Riesgo a la salud por profundidad calculado para el benceno con una concentración percentil 75 después de la rehabilitación
- Figura 7.10 Riesgo a la salud por profundidad calculado para el benceno con una concentración percentil 95 después de la rehabilitación
- Figura 7.11 Riesgo a la salud por profundidad calculado para la fracción ligera de hidrocarburo con una concentración promedio, antes de la rehabilitación
- Figura 7.12 Riesgo a la salud por profundidad calculado para la fracción ligera de hidrocarburo con una concentración percentil 75, antes de la rehabilitación
- Figura 7.13 Riesgo a la salud por profundidad calculado para la fracción ligera de hidrocarburo con una concentración percentil 95, antes de la rehabilitación
- Figura 7.14 Riesgo a la salud por profundidad calculado para la fracción ligera de hidrocarburo con una concentración promedio después de la rehabilitación
- Figura 7.15 Riesgo a la salud por profundidad calculado para la fracción ligera de hidrocarburo con una concentración percentil 75 después de la rehabilitación
- Figura 7.16 Riesgo a la salud por profundidad calculado para la fracción ligera de hidrocarburo con una concentración percentil 95 después de la rehabilitación
- Figura 7.17 Análisis de sensibilidad para el benceno antes de la rehabilitación
- Figura 7.18 Análisis de sensibilidad para el benceno después de la rehabilitación
- Figura 7.19 Análisis de sensibilidad antes de la rehabilitación para la FLH (gasolina)
- Figura 7.20 Análisis de sensibilidad después de la rehabilitación para la FLH (gasolina)

## RESUMEN

La problemática en materia de pasivos ambientales en México, en especial los generados por actividades de explotación, refinación, almacenamiento y transporte del petróleo, es un tema que aqueja de manera importante, ya que por la falta de regulación en este rubro desde sus orígenes hasta la entrada en vigor en el año de 2005 de la NOM-138-SEMARNAT/SS-2003, no se contaba con una norma oficial que definiera cuándo se encontraba contaminado un sitio y cuáles eran los niveles para sanear o rehabilitarlo. Lo que ha generado una falta de acuerdo entre autoridades y los responsables (físicos o morales) de la contaminación de sitios. Teniendo actualmente como una herramienta realizar los estudios de riesgo ambiental, los que permiten conocer y establecer las concentraciones de remanentes que no pongan en riesgo la salud humana y organismos no humanos (flora y fauna). Este marco normativo ha sido ampliado recientemente en esta materia con la publicación del Reglamento de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR), y algunas normas oficiales mexicanas que contienen concentraciones de referencia para la rehabilitación de suelos. A pesar de que existen diversas tecnologías para la solución de la contaminación de suelos y aguas por residuos peligrosos derivados de hidrocarburos y que se aplican de manera regular y autorizada en el país, hasta la fecha no han desarrollado criterios que permitan tanto a las autoridades ambientales como a los responsables de sitios contaminados la determinación de la eficiencia de la rehabilitación de sitios contaminados en específico los denominados pasivos ambientales. Dichas normas no contienen especificaciones técnicas que indiquen cómo evaluar la medida en que han sido eliminados los contaminantes del suelo y cómo han sido eliminados los riesgos asociados a ellos. La reglamentación actual en la materia si bien ofrece ya un esquema claro de cómo debe efectuarse el proceso de la remediación de un sitio, considerando desde la elaboración de los estudios previos a la misma hasta su ejecución, no especifica en el caso particular de los pasivos ambientales de grandes dimensiones cómo evaluar la eficiencia de una remediación en términos cuantitativos asociados a los riesgos inherentes por la presencia de sustancias potencialmente tóxicas para la salud humana.

Un posible camino para identificar la eficiencia de la remediación de un sitio y valorar con mayor detalle los costos, los beneficios y las necesidades es el denominado balance de masa. Sin embargo pocos estudios y trabajos se han enfocado (aun a nivel internacional) en la realización de dicho balance de masas y los aspectos del balance que influyen en los resultados del mismo.

Este trabajo tiene por objetivo plantear un método para la realización de un balance de masa de contaminantes orgánicos en sitios dañados por residuos peligrosos derivados de hidrocarburos. El balance de masa es importante en la rehabilitación de pasivos ambientales que se atenderán con base en un estudio de evaluación de riesgos ambientales (a través del cual se establecen niveles de remediación específicos) porque en estos casos se plantea considerar que en un sitio no se eliminan los contaminantes a los niveles señalados por las normas oficiales mexicanas sino a concentraciones superiores. Por tal motivo se vuelve

relevante determinar los contaminantes que existen en el sitio (en términos de masa) y la cantidad que de esa masa es necesario eliminar para alcanzar niveles de riesgo aceptables.

La metodología es validada en la zona 7 del pasivo ambiental “Ex–Refinería 18 de marzo” localizada al norte de la Ciudad de México. Ahí se consideran como contaminantes prioritarios por su riesgo a la salud al benceno y la fracción ligera de hidrocarburo (FLH) (principalmente por su alta peligrosidad de los BETEX), Considerando hasta una profundidad máxima de 7.2 m, ubicándose dentro de la zona del acuitardo que conforma la estratigrafía del sitio. Los cálculos del balance de masa incluyen la determinación de la masa de los contaminantes para tres diferentes densidades (densidad aparente, densidad real, densidad promedio), tres valores diferentes de concentración de los contaminantes (promedio, percentil 75, percentil 95) considerando lo anterior a diferentes profundidades que comprenden de 1.2 m a 7.2m con un intervalo de 1.2 m. Así mismo se calculó el riesgo a la salud en cada uno de los contaminantes en diferentes concentraciones antes definidas, lo anterior se realizó para conocer la relación que existe con la masa que prevalece en el pasivo ambiental en el suelo.

Los resultados obtenidos consideran un volumen total de suelo de 680 356 m<sup>3</sup> de 7.4 hectáreas, fueron 28 puntos de muestreo para el benceno y 34 puntos para los HFL antes de la rehabilitación, de acuerdo con la NOM-138-SEMARNAT/SS-2003, el número de muestras que se recomienda para un área de 7.4 hectáreas es de entre 33 y 38. Las masas antes de aplicar la técnica de rehabilitación muestran una evidente acumulación de benceno y FLH a lo largo de las diferentes profundidades, los cálculos indican que en la profundidad de 4.8 m se encuentra la mayor masa acumulada, donde el nivel freático, la textura (arcilloso) y la propiedad física del contaminante (solubilidad) tienen un rol importante en la retención de los contaminantes. Sin embargo, la masa se vuelve a elevar hasta la profundidad de 7.2 m. Las cargas de masa calculadas con densidad aparente y concentración promedio antes de la remediación para benceno fueron de 10 139 kg y 437 090 kg de HFL, después de la remediación 1 092 kg de benceno así como 34 992 kg de HFL. Con respecto al riesgo a la salud el punto donde sobre pasa el riesgo aceptable coincide con la profundidad de mayor masa retenida que llega a ser de 1.3E-05 siendo el riesgo aceptable de 1.0E-06 para el benceno y para la FLH se tiene un riesgo calculado de 3.1E-6 ligeramente por arriba del aceptable. Para ambos casos, el riesgo a la salud se disminuye considerablemente alcanzando valores de 1.0E-07.

Adicionalmente se recomienda dar seguimiento en la zona saturada de la zona 7 del pasivo ambiental con la finalidad de verificar que las concentraciones de los contaminantes en el agua subterránea sean mínimas y no represente un riesgo a la salud. Con el objeto de corroborar que las fluctuaciones en el nivel freático realmente propician la biodegradación de los contaminantes que migraron a profundidades mayores quedando retenidos en los poros del suelo hasta 7.2 m, se sugiere realizar el análisis del agua.

## ABSTRACT

The problematic in the field of environmental liabilities in Mexico, particularly those generated by operating activities, refining, storage, and transportation of oil, is a topic that afflicts so important, because by the lack of regulation in this area from its origins to the entry into force in the year 2005 of the NOM-138-SEMARNAT/SS-2003, there was not official norm that define when it was a contaminated site and what were the levels to sanitize or rehabilitate it. What has generated a lack of agreement between authorities and the responsible (physical or moral) of the contamination of sites. Taking today as a tool perform the studies of environmental risk, which can help you learn and establish the concentrations of remnants that do not pose a danger to human health and non-human organisms (flora and fauna). This regulatory framework has recently been expanded in this area with the publication of the Regulation of the General Law for the prevention and comprehensive management of the waste (LGPGIR), and some official Mexican standards contain reference concentrations for the restoration of soils. In spite of the fact that there are several technologies for the solution of the contamination of soils and waters by hazardous waste derived from hydrocarbons and applied on a regular basis and authorized in the country, to date have not developed criteria which allow both the environmental authorities as to the responsible for contaminated sites the determination of the efficiency of the rehabilitation of contaminated sites in the so-called specific environmental liabilities. These rules do not contain technical specifications that indicate how to assess the extent to which they have been eliminated pollutants in the soil and have been deleted as the risks associated with them. The current regulations governing this area while already offers a clear outline of how the process should be carried out for the remediation of a site, considering from the elaboration of the previous studies to the same until his execution, not specified in the particular case of the environmental liabilities of large dimensions how to evaluate the efficiency of a remediation in quantitative terms associated with the risks inherent in the presence of potentially toxic substances to human health.

A possible way to identify the efficiency of the remediation of a site and to assess in greater detail the costs, benefits and needs is the so-called mass balance. However few studies and work have focused (even at the international level) in the carrying out of this mass balance and the aspects of the balance sheet that influence the results of the same.

This work has the objective of presenting a method for the realization of a mass balance of organic pollutants in sites damaged by hazardous waste derived from hydrocarbons. The mass balance is important in the rehabilitation of environmental liabilities that will be dealt with based on a study of environmental risk assessment (through which levels are set specific remediation) because in these cases consider that arises in a site not the contaminants are eliminated to the levels indicated by the official Mexican standards but at higher concentrations. For this reason it becomes important to determine the contaminants that exist on the web

site (in terms of the mass) and the amount of mass that is necessary to eliminate to achieve acceptable levels of risk.

The methodology is validated in zone 7 of the environmental liability "Ex-Refinery 18 march" located to the north of Mexico City. There are considered as priority pollutants by its risk to the health to benzene and the fraction of light hydrocarbon (FLH) (mainly due to the high danger of BETEX), considering up to a maximum depth of 7.2 m, reaching within the area of the aquitard that makes up the stratigraphy of the site. The calculations of the mass balance include the determination of the mass of the pollutants for three different densities (apparent and real density, average density), three different values of concentration of the pollutants (average, 75TH percentile, 95TH percentile) considering the above at different depths that include 1.2 m to 7.2m with in range of 1.2 m. It is also calculating the risk to health in each of the pollutants at different concentrations defined above, the above was carried out to know the relationship that exists with the earth that prevails in the environmental liability at the ground.

The results considered a total volume of soil of 680 356 m<sup>3</sup> of 7.4 hectares, were 28 sampling points for benzene and 34 points for the HFL before the rehabilitation, in accordance with the NOM-138-SEMARNAT/SS-2003, the number of samples to be recommended for an area of 7.4 hectares is between 33 and 38. The masses before applying the technique of rehabilitation show obvious accumulation of benzene and FLH along the different depths, the calculations indicate that in the depth of 4.8 m is the largest aggregate mass, where the water table, the texture (clay) and the physical property of the contaminant (solubility) have an important role in the retention of contaminants. However, the earth returns to raise up to the depth of 7.2 m. Loads of earth calculated with bulk density and average concentration before the remediation to benzene were 10 139 kg and 437 090 kg of HFL, after the remediation 1 092 kg of benzene as well as 34 992 kg of HFL. With regard to the risk to the health of the point where on becomes the acceptable risk coincides with the depth of higher mass retained that becomes 1.3E-05 being the acceptable risk of 1.0E-06 for benzene and for the FLH is a calculated risk of 3.1E-6 slightly above the acceptable. For both cases, the risk to health is noticeably decreased reaching values of 1.0E-07.

In addition it is recommended to follow up in the saturated zone of the zone 7 of the environmental liability for the purpose of verifying that the concentrations of the contaminants in the groundwater are minimal and does not represent a risk to health. In order to corroborate that the fluctuations in the water table really conducive to the biodegradation of pollutants that migrated at greater depths being retained in the pores of the soil up to 7.2 m, it is suggested that the analysis of the water.

# **CAPÍTULO I: JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA Y OBJETIVOS**

*Definir los lineamientos del trabajo de investigación de Doctorado es crucial para no perder la visión del fundamento de lo que se desea presentar como aportación a la ciencia.*

*En el presente capítulo se definen la justificación del problema, los objetivos los alcances, la hipótesis, que son indispensables para el desarrollo, aportación e implementación del trabajo de investigación.*

## 1.1 JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

México concentró su desarrollo económico inicialmente en la industria minera hasta la mitad de la década de los años 70's, posteriormente hacia la segunda mitad de dicha década, viro de manera sustancial a la petroquímica, siendo parte importante hasta nuestros días.

El desarrollo industrial de México ha estado aparejado al desenvolvimiento de la industria minera. La explotación del petróleo en México, en particular, tuvo, a lo largo del siglo XX, distintos periodos de expansión y contracción, los cuales han influido de manera sustancial en el desarrollo económico del país (Salinas, 1997; Quadri y Provencio, 1994).

La falta, en el pasado, de regulaciones ambientales en México durante este periodo de industrialización ha conducido a la generación de daños ambientales, que a la fecha no han sido identificados y cuantificados. Las actividades relacionadas con la explotación, producción y comercialización de los productos derivados del petróleo siguen siendo hasta ahora parte importante de la economía del país.

Se estima que en México las actividades relacionadas con la industria del petróleo son las que más contribuyen al deterioro ambiental, siendo la petroquímica básica la de mayor contribución a la contaminación, con ello, se incorpora al mismo efecto, la producción de fibras sintéticas, resinas, fertilizantes, plásticos, pinturas y pigmentos así como gases industriales (Salinas, 1997; Quadri y Provencio, 1994).

La industria petrolera en su conjunto ha tenido un efecto poco favorable al ambiente, y resulta complicado evaluar cuantitativamente la contaminación involucrada en todas las fases que involucran el sector petrolero (Saval, 1995).

Aun en el presente es complicado el evaluar cuantitativamente los efectos que sobre el medio ambiente tiene la industria petrolera en su conjunto. Esta evaluación también es complicada aun cuando se desea examinar la contaminación y los daños ocasionados por alguna de las distintas actividades involucradas en el sector petrolero, por ejemplo la explotación, la refinación o la comercialización (Saval, 1995).

Por las diferentes actividades industriales que efectúan en la industria petrolera, existe un potencial de contaminación del ambiente por la emisión de humos, polvos, gases y descargas de aguas residuales generadas durante la perforación de pozos petroleros, por la extracción de líquidos, por su refinación y producción de petroquímicos. Además, la transportación de petróleo crudo y productos refinados por buques tanque y tuberías, tiene implícita la posibilidad de derrames que pueden contaminar suelo, agua y atmósfera.

Así mismo, cada actividad del sector petrolero tiene un potencial específico en lo que se refiere a la contaminación y a los daños al medio ambiente. El subsector de



la refinación por ejemplo puede generar emisión de humos, polvos, gases, descargas de aguas residuales o derrames de productos desde tanques de almacenamiento en el suelo y cuerpos de agua. El subsector de exploración y producción puede generar residuos de manejo especial y residuos peligrosos (por ejemplo aguas y lodos de perforación) durante las actividades de perforación. El subsector de la transportación puede generar derrames de petróleo o sus derivados ya sea en las líneas de conducción o durante el transporte por carretera (Salinas, 1997; Ruiz, 1988).

Todos los eventos de derrame accidental en los que se encuentran involucrados materiales o residuos peligrosos y que generan la contaminación de sitios (suelos y cuerpos de agua), son conocidos como emergencias ambientales. Todos estos eventos implican siempre algún riesgo para el ambiente o para la salud de la población.

De acuerdo con estadísticas de la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente, cada año se presentan en México un promedio de 550 emergencias ambientales relacionadas con materiales y residuos peligrosos.

Dentro de los materiales y residuos peligrosos más comúnmente involucrados en emergencias ambientales, se encuentran el petróleo y sus derivados (gasolinas, combustóleo, diesel, turbosina, petróleo crudo, BTEXs, etc), compuestos orgánicos volátiles (COVs) como por ejemplo acetona, compuestos orgánicos volátiles (COV) halogenados por ejemplo Dicloroetano, compuestos orgánicos semivolátiles (COS) halogenados y no halogenados por ejemplo Askareles y BPCs, agroquímicos, gas LP y natural, compuestos inorgánicos por ejemplo metales pesados, ácidos, bases y diferentes tipos de sales y otros elementos inorgánicos (INE, 2005; Van Deuren *et al.*, 1997).

En lo que se refiere a las emergencias ambientales relacionadas con hidrocarburos según datos de SEMARNAT, se tienen en promedio de 160 – 180 emergencias de este tipo por año (SEMARNAT, 2006).

Otro de los problemas que han contribuido a la contaminación del medio ambiente es la disposición inadecuada de residuos peligrosos lo cual ha ocasionado graves problemas de contaminación de sitios. Es frecuente que estos residuos se depositen de manera ilegal o inadecuadamente en terrenos baldíos, patios traseros de las industrias, basureros municipales, barrancas, drenajes municipales y cuerpos de agua, lo cual provoca también el deterioro no solo del suelo sino también de cuerpos de agua como consecuencia de la migración de los contaminantes desde el suelo hacia estos medios (INE, 2005; Volke y Velasco, 2002).

Actualmente, México cuenta con una legislación ambiental a partir de finales de los años ochentas, sin embargo la legislación no consideraba los aspectos de rehabilitación de los daños y la contaminación ocasionados por las actividades

industriales. Solo recientemente se han incorporado al marco normativo mexicano regulaciones específicas a este tema (LGPGIR, 2003).

Este marco normativo ha sido ampliado recientemente en esta materia con la publicación del Reglamento de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR), (RLGPGIR, 2006) y algunas normas oficiales mexicanas que contienen concentraciones de referencia para la rehabilitación de suelos.

A pesar de que existen diversas tecnologías para la solución de la contaminación de suelos y aguas por residuos peligrosos derivados de hidrocarburos y que se aplican de manera regular y autorizada en el país, hasta la fecha no han desarrollado criterios que permitan tanto a las autoridades ambientales como a los responsables de sitios contaminados la determinación de la eficiencia de la remediación de sitios contaminados en específico los denominados pasivos ambientales.

Si bien las normas oficiales mexicanas vigentes en la materia (NOM 138, NOM 147, NOM 133) contienen concentraciones o límites permisibles que sirven para determinar cuándo un suelo debe ser o no rehabilitado. Dichas normas no contienen especificaciones técnicas que indiquen cómo evaluar la medida en que han sido eliminados los contaminantes del suelo y cómo han sido eliminados los riesgos asociados a ellos.

La reglamentación actual en la materia ofrece ya un esquema claro de cómo debe efectuarse el proceso de la rehabilitación de un sitio, considerando desde la elaboración de los estudios previos a la misma hasta su ejecución, no especifica en el caso particular de los pasivos ambientales de grandes dimensiones cómo evaluar la eficiencia de una rehabilitación en términos cuantitativos asociados a los riesgos inherentes por la presencia de sustancias potencialmente tóxicas para la salud humana.

Un posible camino para identificar la eficiencia de la rehabilitación de un sitio y valorar con mayor detalle los costos, los beneficios y las necesidades es el denominado balance de masa. Sin embargo pocos estudios y trabajos se han enfocado (aun a nivel internacional) en la realización de dicho balance de masas y los aspectos del balance que influyen en los resultados del mismo.

Este trabajo tiene por objetivo plantear un método para realizar un balance de masa de contaminantes orgánicos en sitios dañados por residuos peligrosos derivados de hidrocarburos, validarlo con datos de un caso real y examinar en la medida en que los parámetros involucrados en el balance de masas influyen en el resultado.

El balance de masa es importante en la rehabilitación de pasivos ambientales que se atenderán con base en un estudio de evaluación de riesgos ambientales (a través del cual se establecen niveles de remediación específicos) porque en estos

casos se plantea considerar que en un sitio no se eliminan los contaminantes a los niveles señalados por las normas oficiales mexicanas sino a concentraciones superiores. Por tal motivo se vuelve relevante determinar los contaminantes que existen en el sitio (en términos de masa) y la cantidad que de esa masa es necesario eliminar para alcanzar niveles de riesgo aceptables.

## 1.2 OBJETIVO GENERAL

- Realizar la evaluación de la eficiencia de la remediación de sitios contaminados mediante la aplicación de una metodología para la determinación de la carga total de contaminantes orgánicos validándola en un caso específico.

## 1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar la evolución de la contaminación por benceno y fracción ligera de hidrocarburos en la zona 7 de la Ex – Refinería 18 de marzo consultando documentos históricos.
- Desarrollar la metodología de balance de masa en el suelo contaminado con benceno y fracción ligera de hidrocarburos, en función de las concentraciones a cada 1.2 m hasta una profundidad máxima de 7.2 m.
- Aplicar la metodología en la zona 7 del pasivo ambiental de la Ex–Refinería 18 de marzo de la Ciudad de México, mediante el cálculo de su masa a cada 1.2 m de profundidad del suelo y considerando los límites máximos permisibles reportados en la Norma Oficial Mexicana NOM-138-SEMARNAT/SS-2003.
- Determinar la masa de benceno y fracción ligera de hidrocarburos considerando tres concentraciones distintas: promedio, percentil 75 y percentil 95. Así como la influencia de la densidad del suelo a diferentes valores: densidad real, densidad promedio, y densidad aparente en la masa del contaminante presente en la zona 7 del pasivo ambiental.
- Estimar y analizar el riesgo a la salud del contaminante presente a distintas profundidades antes y después de la rehabilitación considerando tres distintos valores de concentración de los contaminantes.
- Evaluar los resultados de la aplicación de la metodología al caso de estudio mediante el análisis de sensibilidad del balance de masas.

## 1.4 HIPÓTESIS

- Haciendo uso del balance de masa se puede determinar el destino de los contaminantes en pasivos ambientales en los cuales se realiza la rehabilitación.

## 1.5 ALCANCES

- Los datos de los análisis fisicoquímicos utilizados para el trabajo serán proporcionados por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales de los estudios entregados a la Dirección General de Gestión Integral de Materiales y Actividades Riesgosas.
- Se desarrollará la metodología del balance de masa como herramienta para evaluar la rehabilitación de sitios contaminados.
- El sitio de estudio será la zona 7 contaminada por benceno y fracción ligera de hidrocarburo (FLH) dentro del predio del pasivo ambiental “Ex-Refinería 18 de marzo” en la Ciudad de México.
- El balance de masa se realizará para determinar la masa total del benceno y la fracción ligera de hidrocarburos en cada estrato hasta una profundidad de 7.2 metros.

## **CAPÍTULO II: FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

*Es relevante e importante conocer los fundamentos teóricos que envuelven el mundo de los suelos contaminados, y muy específicamente por derivados de hidrocarburo. Dentro de los principales que hay que conocer son, origen del suelo, clasificación del suelo, propiedades fisicoquímicas del suelo y del contaminante orgánico.*

*Conocer el transporte del contaminante orgánico en medio poroso es importante, ya que de ello se parte para comprender el comportamiento del mismo. Los factores que afectan a dichos fenómenos son importantes para conocer e interpretar de la mejor manera los resultados que se obtengan en la investigación del presente proyecto.*

*Así como obtener de forma general las diversas técnicas de remediación para sitios contaminados.*

## 2.1 SUELO: Formación del suelo

La palabra suelo se deriva del latín “SOLUM” con la que se denominaba a la superficie sólida de la Tierra. Sin embargo, en la Grecia clásica, Empédocles (438-430 a.c.) concibe el suelo, juntamente con el fuego, agua y aire, como materia básica del Universo. Los conceptos de tierra y suelo eran sinónimos, y la idea de que el suelo fuera uno de los componentes básicos de cualquier materia fue aceptada por muchos años (Crosara, 2009).

Teofrasto (370-287 a.c.), quién fuera alumno de Aristóteles, definió el suelo con el término “EDAPHOS” para diferenciarlo de la tierra como cuerpo cósmico, y lo dividió en varias capas (Crosara, 2009):

***Superficial: con un contenido variable de humus.***

***Subsuperficial: que suministraba nutrientes al sistema radicular herbáceo.***

***Sustrato: que alimentaba las raíces de los árboles.***

***Por debajo: el dominio del reino de la oscuridad.***

La aplicación de los métodos y técnicas en el siglo XVIII, permitieron efectuar los primeros trabajos científicos del suelo. Así Wallerius, en su obra “Chemical Foundations of Agriculture”, afirmaba que las plantas se alimentaban de humus del suelo, sin embargo, también distingue la parte mineral y propone una mezcla importante de ambos que proporcionaría un óptimo desarrollo (Crosara, 2009).

Tiempo después para el siglo XIX, Berzelius definió al suelo como “el laboratorio químico de la naturaleza, en el cual tienen lugar reacciones de descomposición y síntesis”. Para 1817, Springel da su definición del suelo y lo declara de la siguiente manera “una masa de material derivado de minerales, que contiene los productos de descomposición de plantas y animales”. A los 65 años luego de Springel, llega Dokutchaev en 1882, que inicio estudios sobre evaluación agrícola y la capacidad de uso de la tierra del que se desprenden catorce volúmenes en las que propone una clasificación de suelos y acuña algunos de los nombres del suelo: chemozen, solonchak, sierozem y podzol.

Springel también considera las numerosas relaciones e interrelaciones que existen entre rocas, geomorfología, suelos, aguas superficiales y freáticas, clima, flora fauna y hombre. Una gran aportación al conocimiento se presenta cuando realiza cortes verticales a los que denominó, perfiles; en ellos observó una secuencia de capas horizontales a los que llamó horizontes, nombres que hasta nuestra actualidad se siguen usando. Para él, el suelo era un cuerpo natural con expresión variable en el espacio y el tiempo (Crosara, 2009).

Finalmente Springel definió los suelos como: “Las formaciones superficiales minerales y orgánicas, más o menos coloreadas por el humus, que constantemente se manifiestan ellas mismas como un resultado de la actividad combinada de los siguientes agentes: clima, organismos vivos y muertos (plantas y animales), material originario y tiempo” (Crosara, 2009).

Ya en el siglo XX, Marbut es uno de los investigadores más conocidos en la edafología mundial y fundador de la escuela americana de Edafología. Define el suelo como “la capa externa de la corteza de la tierra, usualmente consolidada que varía en espesor desde una fina película a varios metros, que difiere del material subyacente en color, estructura, textura, constitución física, composición química, características biológicas y, probablemente también, en procesos químicos, reacción y morfología” (Crosara, 2009).

Jenny (1941) (citado por Crosara, 2009), considera el suelo como un “sistema físico abierto, en el que las sustancias pueden ser adicionadas o extraídas de él y que se caracteriza por un conjunto de propiedades que se pueden designar por símbolos”.

El suelo es un cuerpo natural, no consolidado, compuesto por sólidos (material mineral y orgánico), líquidos y gases, que se caracteriza por tener horizontes o capas diferenciales, resultado de las adiciones, pérdidas, transferencias y transformaciones de energía y materia a través del tiempo, y cuyo espesor puede ir desde la superficie terrestre hasta varios metros de profundidad (Sposito, 1989).

Bien, cabe ahora preguntarse sobre los factores que condicionan los cambios en los materiales originales hasta formar el suelo. Está claro que la roca, con su aporte masivo de minerales, será un factor importante en la formación del suelo. El suelo se forma además de a partir de una roca también de unos restos de vegetales y animales, por tanto, los organismos constituyen un factor importante. Si se comparan los suelos de las regiones húmedas y los de las regiones áridas saltan a la vista el importante papel que juega el clima en la formación del suelo. Por otra parte, analizando la distribución de los suelos en una zona montañosa, se observa cómo se encuentran los suelos escalonados en el paisaje. Por último, es evidente que los cambios que se producen en el material para pasar de roca a suelo necesitan para desarrollarse, que transcurra un determinado tiempo y este tiempo representa el quinto y último factor en la formación del suelo (Dorrnsoro, 2009).

El suelo puede ser considerado como una determinada combinación de sus factores formadores. Esta concepción del suelo fue expresada por primera vez por Jenny en 1940 según la siguiente ecuación (Dorrnsoro, 2009):

$$S = f (cl, o, r, p, t)$$

Donde:

"S": es el suelo

"f" : es una función

"cl": es el clima

"o": son los organismos

"r": es el relieve

"p": es la roca madre

"t": es el tiempo

Esta ecuación es muy importante pues representa que para una determinada combinación de los factores formadores sólo puede existir un tipo de suelo (la misma combinación de factores originará siempre el mismo tipo de suelo independientemente del lugar geográfico en que se encuentre). Igualmente importante es que la magnitud de cualquiera de las propiedades del suelo, tales como pH, contenido en arcillas, porosidad, etc, está determinada por la combinación de estos factores formadores.

Para evaluar la influencia de cada factor formador en las propiedades del suelo, basta en teoría con mantener constantes todos los demás, (hecho que frecuentemente es difícil de encontrar en la práctica). Así para ver la importancia del tiempo, la ecuación fundamental quedaría así (Dorronsoro, 2009):

$$S = f(t) \text{ } cl, o, r, p$$

**Siendo:**

***cl, o, r, p, = constantes***

Lo que quiere decir que la variación de cualquier propiedad del suelo depende exclusivamente del tiempo. Así, en el tiempo cero, suelo y material original se funden uno en el otro. Variando el tiempo irán apareciendo una serie de tipos de suelos, cada vez más evolucionados, cuyas propiedades serán una consecuencia directa de la edad y se obtendría lo que se llama una cronosecuencia. Por otra parte, aislando el factor roca madre (manteniendo constantes el resto de los factores) se tendría una litosecuencia. Aislando el factor relieve se tiene una toposecuencia o catena, si es el clima el único factor variable se tiene la climosecuencia y finalmente la acción de los organismos vendría representada en una biosecuencia (Dorronsoro, 2009).

En la Figura 2.1 se muestra los factores que dan como resultado la formación del suelo y que se pueden distinguir básicamente en dos etapas que se explican con mayor detalle a continuación.



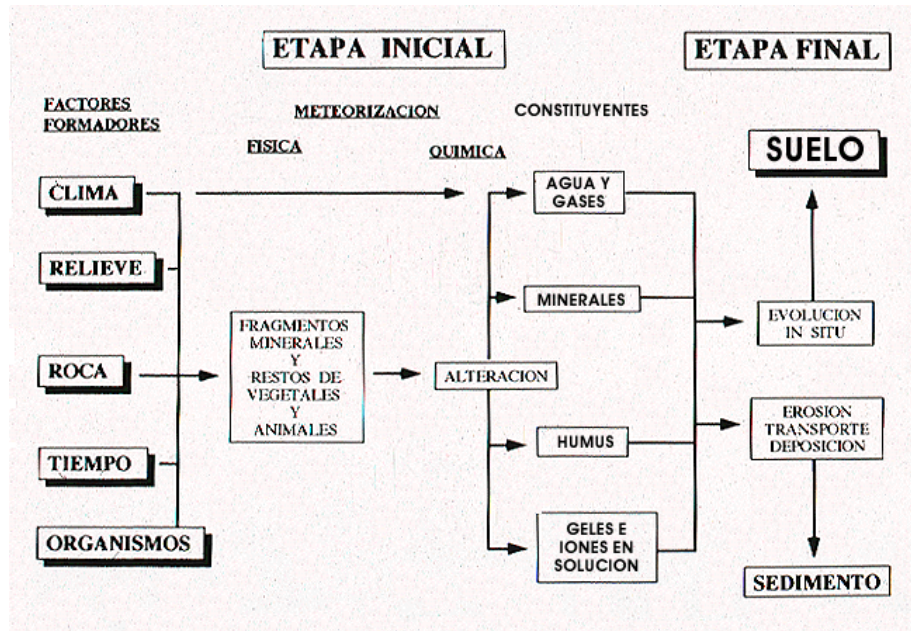


Figura 2.1 Etapas de formación del suelo  
Fuente. Dorronsoro, 2009

Por lo anterior, a los suelos se les considera como sistemas naturales abiertos y muy complejos que se forman en la superficie de la corteza terrestre donde habitan las plantas y grandes variedades de seres vivos y cuyas características y propiedades se desarrollan por la acción de grandes agentes climáticos y bióticos actuando sobre los materiales geológicos durante un periodo de tiempo, y todos los factores mencionados con anterioridad interactúan entre sí dándole una elevada complejidad (Crosara, 2009).

Las rocas son el principal constituyente de la corteza terrestre las cuales para su formación geológica se ha tomado millones de años. La superficie rocosa ha tenido la dinámica continua de desintegración y descomposición por el fenómeno de la meteorización. Por causas de factores atmosféricos como son lluvias que generan inundaciones, actividad glacial y los fuertes vientos, un gran porcentaje de los fragmentos que resultan de la meteorización ha sido arrastrada, sometida a abrasión y más fragmentación que posteriormente es depositada, ejemplo, a lo largo del ciclo de los ríos, en lagos y océanos y durante el ciclo de los glaciares. Debido a los cambios climáticos y a las variaciones de los niveles del mar que tiene contacto con la superficie terrestre, este fenómeno de erosión, transporte y formación de depósitos se ha repetido innumerables veces durante decenas de miles de años (Berry y Reid, 1993).

Por lo anterior, gran parte de la superficie terrestre actual lecho rocoso relativamente inalterado, se encuentra cubierto por una acumulación de materiales sin cementación o muy poco cementado, a menudo por naturaleza y espesor variable; este material es conocido dentro de la ingeniería como **suelo** (Berry y Reid, 1993).

La destrucción gradual de la materia rocosa durante grandes periodos es atribuible a dos procesos importantes: meteorización física y meteorización química. Se denomina así a la primera, al proceso de fragmentación física o desintegración de la materia rocosa. Que puede ser atribuible a factores de esfuerzo inducidos, tales como la retracción debida al enfriamiento, la liberación de esfuerzo luego de la remoción de una capa de material más superficial, o el plegamiento y las fallas. Ya que se encuentra fracturada la roca el nuevo estado lo hace vulnerable para otros fenómenos de meteorización física y meteorización químicas (Berry y Reid, 1993).

Dentro de los factores más relevantes para la formación del suelo, se encuentra el clima (aporta agua, oxígeno y dióxido de carbono) su influencia es infinitamente más rápido y poderoso que la lenta descomposición química de las rocas. La erosión física de los suelos por parte del clima es quizás el condicionante más fuerte. Es producida por el agua que crea un valle, o por la que se infiltra por las rocas calizas hasta producir cuevas, como por la temperatura que en las regiones secas evapora el agua por lo tanto desaparece la erosión producida por los ríos y en las regiones frías ayuda a la misma a congelarse lo que facilita la fractura de las rocas. La erosión eólica es un fenómeno menor pero si desplaza pequeñas cantidades de materiales de unas zonas a otras (Berry y Reid, 1993).

Por otro lado a la meteorización química se le denomina así al proceso de descomposición química de algunos o de todos los minerales que constituyen la materia rocosa. Por ejemplo, el dióxido de carbono cuando se disuelve por efecto de las lluvias forma una solución de ácido carbónico mismo que puede atacar a muchos de los materiales que conforman las rocas, o el oxígeno de la atmósfera y de las aguas de las lluvias pueden causar oxidación, principalmente en aquellas rocas que contengan hierro. En la Tabla 2.1 se muestra la meteorización química de los minerales que se encuentran en el lecho rocoso (Berry y Reid, 1993).

Cuando la materia orgánica fresca, constituida por residuos vegetales y animales, se incorpora al suelo, sufre transformaciones más o menos activas bajo la influencia de factores biológicos: una parte se mineraliza y libera compuestos gaseosos ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ), mientras que la otra se humifica, formando compuestos relativamente estables y generalmente unidos por mecanismos físico químicos a los coloides minerales (Artigas, 2003).

Tabla 2.1 Meteorización química de los minerales que comúnmente forman las rocas

Material que forma la roca	Composición química	Susceptibilidad a la meteorización química	Suelo derivado principal
Cuarzo	Dióxido de silicio	Altamente resistente	Grava, arena y partículas de limo
Ortosa	Aluminio-silicatos de potasio	Moderadamente susceptible	Partículas de mineral de arcilla de los grupos de la caolinita y la illita
Plagioclasa	Aluminio-silicatos de sodio y calcio		Partículas de mineral de arcilla de los grupos de la montmorillonita y la illita.
Mica	Aluminio-silicatos de potasio, magnesio y hierro.		
Hornablenda	Silicatos principalmente de magnesio y hierro.		
Augita		Altamente susceptible	
Olivino			

*Fuente. Berry y Reid, 1993*

La acumulación de la materia orgánica es quizá el principal rasgo que diferencia a los suelos de los muchos llamados sedimentos no consolidados y formaciones superficiales, cuya composición es exclusivamente mineral. Por lo tanto, la existencia de materia orgánica es una propiedad de los suelos así como su acumulación y evolución, que se presenta bajo diferentes condiciones y en diversas modalidades (Artigas, 2003).

La velocidad de las transformaciones de los residuos orgánicos frescos varía según las condiciones ambientales de humedad y temperatura, pero también la fauna juega un rol importante, sobre todo en la fragmentación mecánica y en la incorporación de los residuos. A su vez, la naturaleza de éstos condiciona también la velocidad de la descomposición: los restos frescos se descomponen más rápidamente que los secos o pajizos, una hoja de roble se descompone en menos de un año, en tanto que una acícula de pino persiste hasta diez años en la hojarasca forestal (Duchaufour, 1968; Artigas, 2003).

## 2.2 HORIZONTES

La formación y evolución del suelo bajo la influencia del clima, lleva a la diferenciación de capas horizontales que se les da el nombre de “**horizontes**”, que presentan propiedades y características determinadas que los hacen diferentes entre sí. Y al conjunto de horizontes se nombra **perfil** (Crosara, 2009).

Como la edafización actúa desde la superficie y va perdiendo su intensidad conforme se profundiza en el perfil del suelo, el material se altera de un modo diferencial y como resultado de la actuación de estos procesos de meteorización y translocación se pasa de un material homogéneo o uniforme, como es la roca, a un material heterogéneo, estratificado en capas con diferentes propiedades como es el suelo; es decir, se produce la horizonación del material. Y es precisamente esta característica, representada por la variación regular de las propiedades y constituyentes del suelo en función de la profundidad, la característica más representativa de los suelos, el cual es un rasgo que los diferencia claramente de las rocas (Crosara, 2009).

Los horizontes constituyen las unidades para el estudio y para la clasificación de los suelos. Los horizontes edáficos son capas aproximadamente paralelas a la superficie del terreno. Se establecen en función de cambios de las propiedades y constituyentes (que son el resultado de la actuación de los procesos de formación del suelo) con respecto a las capas inmediatas (Crosara, 2009).

Los horizontes se ponen, normalmente, de manifiesto en el campo, en el perfil del suelo, pero los datos de laboratorio sirven para confirmar y caracterizar a estos horizontes. Generalmente bastan solo tres propiedades para establecer la **horizonación** de un suelo: color, textura y estructura, aunque otras propiedades, como la consistencia, son a veces de gran ayuda. El más mínimo cambio detectado (en una sola o en varias de estas propiedades) es suficiente para diferenciar un nuevo horizonte (Crosara, 2009).

Por lo que, en un principio se denominaban **horizontes superiores** a los que se encuentran cerca de la superficie terrestre, y se caracterizan por gran actividad biológica, alto contenido de materia orgánica y pérdida de materia en solución y suspensión, le siguen, los **horizontes medios** que tienen mayor influencia biológica reciben y retienen los materiales lavados de los horizontes superiores y finalmente, los **horizontes inferiores** los cuales presentan materiales relativamente inalterados y pueden tener acumulaciones de carbonato de calcio así como de sulfato de calcio (Crosara, 2009)

## 2.3 CLASIFICACIÓN DEL SUELO POR TEXTURAS

En una búsqueda por diferenciar los suelos, desde tiempos muy antiguos se intentó clasificar los suelos, los granjeros de los tiempos pasados reconocieron diferentes tipos de suelos y les dieron nombres que generalmente se referían a sus diferentes texturas. Para poder clasificar los suelos, como cualquier otro conjunto de elementos, existe una gran variedad de métodos. Se pueden clasificar de acuerdo con su color, su contenido en materia orgánica, su textura, y así sucesivamente, cada uno de estas clasificaciones tiene un cierto valor (Robinson, 1967).

Cuando se habla de un suelo en general se puede afirmar que se encuentran presentes las tres fases: sólido, líquido y gaseoso. Para condiciones ideales, el 50% de los componentes corresponden a la fase sólida, de 15% a 35% a la fase líquida y de 15% a 35% a la fase gaseosa. Las variaciones de contenido de los dos últimos componentes se debe a la cantidad de agua presente (Gavande, 1991).

Enfocándose a la fase sólida del suelo como se sabe está formada por una estrecha relación entre constituyentes orgánicos e inorgánicos. El conjunto de éstos forma lo que se llama “esqueleto del suelo”, y la disposición o arreglo de las partículas sólidas determina la porosidad, la estructura y la densidad aparente del suelo. La materia orgánica ejerce una gran influencia en las propiedades físicas del suelo tales como: la estructura, la penetración-retención del agua y composición. (Gavande, 1991).

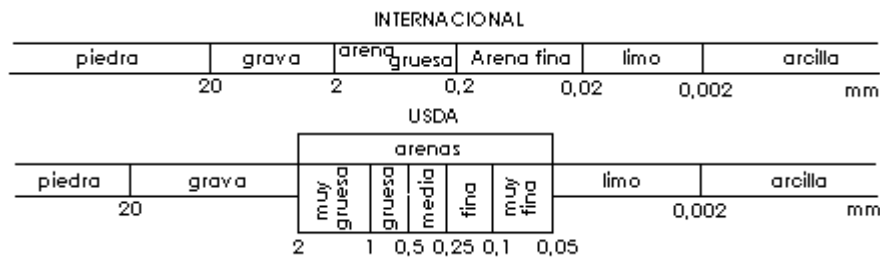
El tamaño de las partículas varía y van desde los coloides (menos de 0.5 micras) hasta las gravas gruesas y fragmentos rocosos. La distribución del tamaño de las partículas en el interior del suelo es un parámetro que no es afectado por el tiempo en condiciones normales. Lo que sí, es que existe una relación directa entre el tamaño de las partículas del suelo y su superficie específica (área de superficie por unidad de masa de material). Varias de las propiedades físicas y químicas del suelo están asociadas con la extensión y la actividad de su superficie específica. Es por eso que la distribución del tamaño de las partículas se haya adoptado como medio básico para caracterizar y clasificar las partículas sólidas del suelo (Gavande, 1991).

La textura del suelo está relacionada con el tamaño de las partículas minerales. Específicamente se refiere a la proporción relativa de los tamaños de varios grupos de partículas del suelo. Esta propiedad ayuda a determinar no sólo la facilidad de abastecimiento de nutrientes, sino también agua y aire (Gavande, 1991).

Por esta razón, (Gavande, 1991) menciona que la proporción de los tamaños de los varios grupos de las partículas de un suelo llamado **textura** adquiere tanta importancia. No puede alterarse y, de esta forma se le considera propiedad fundamental del suelo que determina, en alto grado, su valor económico.

La textura de un suelo es la proporción de cada elemento en el suelo, representada por el porcentaje de arena, arcilla y limo. La textura del suelo depende de la naturaleza de la roca madre y de los procesos de evolución del suelo, siendo el resultado de la acción e intensidad de los factores de formación de suelo (Crosara, 2009).

Para lograr el estudio de las diversas partículas minerales del suelo, se clasifican por lo general en grupos convenientes y en función de su tamaño. A los que se les denomina **fracciones**. Y el método analítico mediante el que se separan se llama **análisis mecánico o granulométrico**, que es una determinación de la distribución de los tamaños de las partículas. Para clasificar a los constituyentes del suelo según su tamaño de partícula se han establecido muchas clasificaciones granulométricas. Básicamente todas aceptan los términos de grava, arena, limo y arcilla, pero difieren en los valores de los límites establecidos para definir cada clase. La mayoría de las propiedades físicas, químicas y fisicoquímicas están influenciadas por la granulometría : estructura, color consistencia, porosidad aireación, permeabilidad, hidromorfía, retención de agua, lavado, capacidad de cambio, reserva de nutrientes. De estas escalas granulométricas, son la de Atterberg o Internacional (llamada así por haber sido aceptada por la Sociedad Internacional de la Ciencia del Suelo) y la americana del USDA (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos) las más ampliamente utilizadas. Ambas clasificaciones se reproducen en la siguiente Figura 2.2.



*Figura 2.2 Clasificaciones granulométricas*  
*Fuente: Dorronsoro, 2009*

El análisis mecánico no sólo sirve para describir, en líneas generales las propiedades físicas del suelo, sino también para determinar el nombre de su textura: si es arenoso, limoso, arcilloso limoso u otro. El método de identificación se muestra en la figura 2.3, el diagrama reitera que el suelo es una mezcla de diferentes clases de partículas y que existe una alta correlación entre la distribución de éstas y las propiedades de los suelos (Gavande, 1991; Dorronsoro, 2009).

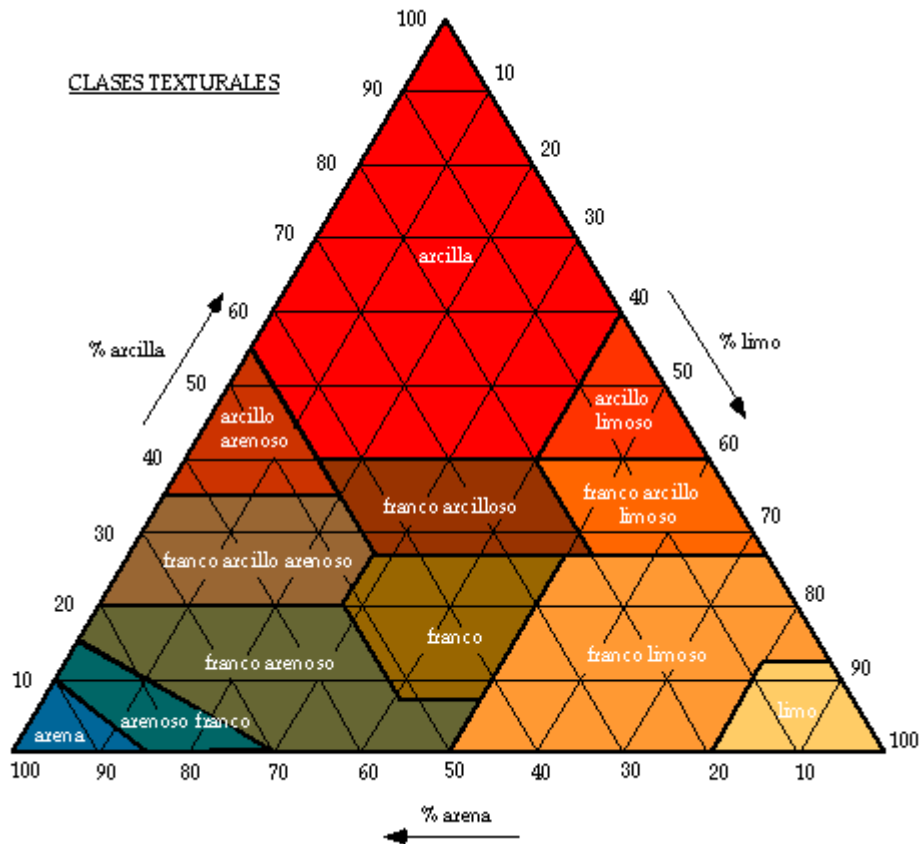


Figura 2.3 Triángulo de texturas  
Fuente: Dorronsoro, 2009

En cada lado del triángulo, se sitúa una de las fracciones cuyo valor cero corresponde al 100 de la anterior y su 100 con el cero de la siguiente, siempre según el movimiento de las agujas del reloj. Cada muestra de suelo viene definida por un punto del interior del triángulo, dicho punto se obtiene trazando una paralela al lado anterior desde la escala que señala el contenido en la correspondiente fracción; con solo dos líneas queda definido el punto representativo, porque la tercera componente es función de las primeras al tener que ser 100 la suma de todas ellas (García, 2005).

El triángulo se divide en una serie de áreas que corresponden a las diversas clases texturales, que representan grupos de texturas con aptitudes o propiedades análogas. Las clases suelen asociarse en cuatro grupos principales que corresponden a las texturas arcillosas, limosas, arenosas y francas o equilibradas; según exista un componente dominante o una proporción adecuada de todos ellos (García, 2005).

Cada fracción tiene un comportamiento diferente, pero su incidencia en el conjunto no es la que se esperaría de su proporción, sino que algunas tienen más carácter o peso que las restantes; así observamos que una textura es arcillosa cuando el contenido en ese componente supera el 40% o el 35%, mientras que para considerar el carácter arenoso se requiere como mínimo un 70% de arena o un 80% de limo para otorgar este carácter a la muestra (García, 2005).

La actividad de la arcilla es mucho mayor que la de las otras fracciones y pequeños contenidos se hacen notar de inmediato. Las arcillas están constituidas básicamente por silicatos de aluminio hidratados que se encuentran en las rocas ígneas y metamórficas, y por acción de los agentes químicos llegan al producto final que se conoce como **arcilla**. Las texturas arcillosas dan suelos plásticos y difíciles de trabajar que se conocen como suelos pesados o fuertes. Su tempero es muy corto, si se labran más húmedos se forman grandes terrones que impedirán el crecimiento de las semillas; si se labran en seco, son muy duros y se destruye la estructura quedando una capa polvorienta que al humedecerse y secarse forma un encostramiento superficial (García, 2005; Juárez, 1975).

Otra consecuencia de su elevada plasticidad es la posibilidad de formar capas muy compactas inmediatamente debajo de la capa arable, que se conocen como "suelas de labor"; éstas se producen por el peso de la maquinaria usada en las labores y constituyen un impedimento al paso del agua y de las raíces (García, 2005; Juárez, 1975).

Retienen gran cantidad de agua y de nutrientes iónicos, debido al predominio de la microporosidad, en el primer caso, y a su elevada capacidad de intercambio iónico, mayor o menor según el tipo de arcilla (García, 2005; Juárez, 1975).

Presentan una permeabilidad baja, salvo que estén bien estructurados y formen un buen sistema de grietas, su velocidad de infiltración del agua se sitúa entre tres y siete milímetros por hora, por lo que una precipitación de mayor intensidad tiende a encharcarlos o a provocar arroyadas superficiales (García, 2005; Juárez, 1975).

La textura arenosa es la contrapuesta a la arcillosa. Cuando en superficie hay una textura arenosa, los suelos se conocen como ligeros, dada su escasa plasticidad y su baja dureza, que los hace muy fáciles de trabajar. Su tempero es muy largo y los riesgos de encostramiento son prácticamente nulos, si bien son muy propensos a que las plantas se descabalguen, o pierdan el contacto entre la raíz y el suelo (García, 2005; Juárez, 1975).

Presentan una excelente aireación porque al ser las partículas dominantes de gran tamaño dejan grandes huecos entre ellas, por donde penetra fácilmente el aire. Por los motivos anteriores les otorgan una gran permeabilidad, que se manifiesta por una velocidad de infiltración que va de 13 a 20 mm/h, por el contrario no es capaz de retener al agua ni a los nutrientes iónicos, para lo que se necesita la



presencia de algún coloide. y solo ante unas lluvias extremadamente intensas se puede provocar su encharcamiento, pero en estos suelos es muy peligroso porque, si están en zonas con ligera pendiente, sufren una erosión laminar selectiva que elimina los escasos coloides presentes y acrecienta aún más el problema (García, 2005).

Cuando se tiene una textura limosa, se presenta la peor de las situaciones, el limo provoca impermeabilidad y mala aireación, no tiene carácter coloidal y no forma agregados estructurales, además sus partículas son suficientemente finas para tupir los huecos dejados por las mayores. Su capacidad para retener agua e iones es muy baja. De igual manera como en el caso de la arena interesa conocer su relación con la arcilla porque influye sobre la estructura (García, 2005).

Por último, las texturas francas o equilibradas al tener un mayor equilibrio entre sus componentes, gozan de los efectos favorables de las anteriores sin sufrir sus defectos, el estado ideal sería la textura franca, y a medida que se desvía de ella se van mostrando los inconvenientes derivados de la dirección seguida en esa desviación (García, 2005).

Una manera rápida para determinar la textura en el campo, es usando el método de Textura a Mano. La muestra se humedece y amasa entre los dedos hasta formar una pasta homogénea. Posteriormente se toma entre el dedo índice y pulgar y se presiona sobre éste último tratando de que se forme una cinta, en la cual se observará la presencia de brillo, si la cinta es lisa o escamosa, si el tacto es áspero. En la tabla 2.2 se muestra la importancia de la textura del suelo. (Crosara, 2009; Gavande, 1991).

Tabla 2.2 Importancia de la textura

	ARENOSO	FRANCO	FRANCO-LIMOSO	ARCILLOSO
Tacto	Aspero	Aspero	Suave	Terronoso o plástico
Identificación	Suelto	Cohesivo	Mancha al tacto	Da rayas brillantes
Drenaje interno	Excesivo	Bueno	Suave	Suave a pobre
Agua disponible para las plantas	Baja	Media	Alta	Alta
Labranza	Fácil	Fácil	Media	Difícil
Potencial del agua de desagüe	Bajo	Bajo a medio	Alto	Medio a alto
Agua de separación	Alta	Media	Media	Bajo
Agua transportable	Baja	Media	Alta	Alta
Erosión eólica	Alta	Media	Baja	Baja

*Fuente: Kohnke, 1968 citada por Gavande, 1991.*

## 2.4 PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO

Como se ha explicado, el suelo es una mezcla de materiales sólidos, líquidos (agua) y gaseosos (aire). La adecuada relación entre estos componentes determina la capacidad de hacer crecer las plantas y la disponibilidad de suficientes nutrientes para ellas. La proporción de los componentes determina una serie de propiedades que se conocen como **propiedades físicas o mecánicas del suelo** como son: **Profundidad, Textura, Densidad, Porosidad, Estabilidad estructural, Índice de plasticidad, Velocidad de infiltración (permeabilidad) y Penetrabilidad**. Las propiedades físicas del suelo dependen directamente de la masa total del mismo. Son una función de sus componentes tanto en lo que se refiere al tamaño como a su naturaleza, por ello una de las más influyentes es la distribución por tamaños de las partículas del suelo (García, 2005).

Estas partículas se unen para crear edificios cuya forma, tamaño y consistencia modifican el comportamiento de las partículas aisladas. Todo ello crea un entramado sólido que deja un gran espacio poroso que puede ser ocupado por aire o agua (García, 2005).

Son propiedades que se miden en laboratorio y permiten evaluar las condiciones de aireación y drenaje, que junto con propiedades químicas, biológicas y mineralógicas, se determina la productividad del suelo (FUNPROVER, 2009; Hernández, 2008; Calderón, 2002; SAP, 2005)

Cada uno de estos aspectos merece una consideración individual aunque la interrelación entre todos ellos es evidente, solo hay una característica independiente que es la distribución por tamaños de los componentes del suelo y su naturaleza, que son función del material original y de los restantes factores formadores del suelo (García, 2005).

### **Profundidad**

La profundidad del suelo es muy importante porque de ella depende el volumen de agua que el suelo puede almacenar. Un suelo de textura y estructura uniforme de 0.60 m de profundidad puede almacenar doble cantidad de agua que un suelo de 0.30 m de profundidad (Herrera, 2009; FUNPROVER, 2009).

Un suelo debe tener condiciones favorables para recibir, almacenar y hacer aprovechable el agua para las plantas, a una profundidad de por lo menos del metro. En un suelo profundo las plantas resisten mejor la sequía, ya que a más profundidad mayor capacidad de retención de humedad. De igual manera, la planta puede usar los nutrimentos almacenados en los horizontes profundos del subsuelo, si éstos están al alcance de las raíces (Herrera, 2009; FUNPROVER, 2009).

Cualquiera de las siguientes condiciones puede limitar la penetración de las raíces en el suelo:

- Roca dura sana
- Cascajo (pedregosidad abundante)
- Agua (nivel, napa o manto freático cercano a la superficie)

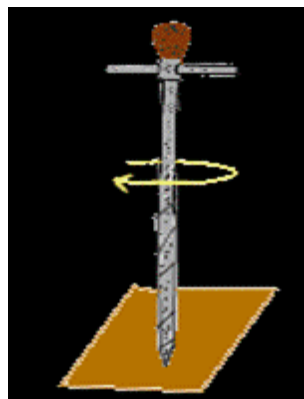
Con frecuencia a mayor profundidad mayor densidad aparente y menor porosidad de tamaño medio y grande. En la siguiente tabla 2.3 se muestran algunos parámetros de clasificación de la profundidad hasta la roca o estrato cementado (Herrera, 2009; FUNPROVER, 2009).

Tabla 2.3 Clasificación de profundidades del suelo

CLASE	PROFUNDIDAD (cm)	DESCRIPCIÓN
1	0 – 30	Muy poco profundo
2	30 – 90	Somero
3	60 – 90	Profundidad moderada
4	90 – 120	Profundo
5	>120	Muy profundo

*Fuente: (FUNPROVER, 2009)*

Esta determinación se puede hacer abriendo un perfil de al menos un metro de profundidad o haciendo uso de una barrena o sonda de suelos como se muestra en la figura 2.4.



*Figura 2.4 Barrena para muestreo de suelos*  
*Fuente: (Herrera, 2009)*

## Textura

Se conoce la textura como la relación existente entre los contenidos de las diferentes fracciones granulométricas que constituyen el suelo (García, 2005).

La textura de un suelo es la proporción de los tamaños de los grupos de partículas que lo constituyen y está relacionada con el tamaño de las partículas de los minerales que lo forman y se refiere a la proporción relativa de los tamaños de varios grupos de partículas de un suelo. Esta propiedad ayuda a determinar la facilidad de abastecimiento de los nutrientes, agua y aire que son fundamentales para la vida de las plantas.

Para el estudio de la textura del suelo, éste se considera formado por tres fases: sólida, líquida y gaseosa. La fase sólida constituye cerca del 50 % del volumen de la mayor parte de los suelos superficiales y consta de una mezcla de partículas inorgánicas y orgánicas cuyo tamaño y forma varían considerablemente. La distribución proporcional de los diferentes tamaños de partículas minerales determina la textura de un determinado suelo. La textura del suelo se considera una propiedad básica porque los tamaños de las partículas minerales y la proporción relativa de los grupos por tamaños varían considerablemente entre los suelos, pero no se alteran fácilmente en un determinado suelo. La textura varía de uno horizonte a otro, es pues una característica propia de cada uno de ellos más que del suelo en su conjunto (García, 2005; Gavande, 1991).

A veces el concepto textural se aplica a la totalidad del suelo pero hay casos en que se hace con referencia a una determinada zona del mismo, que si es utilizada con carácter taxonómico se establece sobre lo que se conoce como sección control, que varía con el tipo de suelo y la clasificación utilizada. Cuando se expresa con fines agronómicos, se utiliza el promedio de otra sección control que varía en función del tipo de cultivo, ya sea herbáceo o arbóreo, variando principalmente el límite inferior de la misma (García, 2005).

Cuando se tiene que analizar un corto número de parámetros lo más sencillo es recurrir a algún tipo de representación gráfica, de modo que queden delimitadas una serie de posiciones definidas. Como se ha descrito en el punto 2.3, el procedimiento analítico mediante el que se separan las partículas de una muestra de suelo se le llama análisis mecánico o granulométrico y consiste en determinar la distribución de los tamaños de las partículas. Este análisis proporciona datos de la clasificación, morfología y génesis del suelo, así como, de las propiedades físicas del suelo como la permeabilidad, retención del agua, plasticidad, aireación, capacidad de cambio de bases, etc. Todos los suelos constan de una mezcla de partículas o agrupaciones de partículas de tamaños similares por lo que se usa su clasificación con base en los límites de diámetro en milímetros. (García, 2005).

## Densidad y porosidad

En el suelo se distinguen dos tipos de densidad, la aparente ( $\rho_{ap}$ ) y la real ( $\rho_{re}$ ). Mientras la densidad real es una función aditiva de las densidades de los constituyentes del suelo, la densidad aparente varía según el estado de agregación del suelo y la proporción del volumen aparente ocupado por los espacios intersticiales, que existen incluso en los suelos más compactados (Robinson, 1967; Jiménez, 1951).

La ( $\rho_{re}$ ) de un suelo depende principalmente de la proporción de la materia orgánica e inorgánica presente. La ( $\rho_{ap}$ ) refleja el contenido total de porosidad en un suelo y es importante para el manejo de los suelos (refleja la compactación y facilidad de circulación de agua y aire). También es un dato necesario para transformar muchos de los resultados de los análisis de los suelos en el laboratorio (expresados en % en peso) a valores de % en volumen en el campo (Ingaramo, 2003; Alvarado, 2005).

Si se considera cierto volumen de suelo en sus condiciones naturales, es evidente que sólo cierta proporción de dicho volumen está ocupada por el material del suelo. El resto lo constituyen espacios intersticiales, que están ocupados en parte por agua y en parte por aire. El peso de la unidad de volumen de suelo con espacios intersticiales da la densidad aparente. Los factores que afectan a la densidad aparente son la composición y la estructura (Ingaramo, 2003; Alvarado, 2005; García, 2005).

La ( $\rho_{ap}$ ) del suelo es un buen indicador de importantes características del suelo, tales como porosidad, grado de aireación y capacidad de drenaje. (Ingaramo, 2003; Alvarado, 2005; García, 2005).

La ( $\rho_{ap}$ ) se incluye dentro del grupo mínimo de parámetros a medir para evaluar la calidad de un suelo, como indicador de la estructura, la resistencia mecánica y la cohesión del mismo. Los cambios en la densidad aparente reflejan cambios en la estructura del suelo, debido a la relación existente entre la densidad aparente y la porosidad total ( $n$ ). Con un incremento de la densidad aparente, la resistencia mecánica tiende a aumentar y la porosidad del suelo tiende a disminuir (Ingaramo, 2003; Alvarado, 2005; García, 2005).

La **porosidad** del suelo ( $n$ ) viene representada por el porcentaje de huecos existentes en el mismo frente al volumen total.

La porosidad depende de la textura, de la estructura y de la actividad biológica del suelo. Cuanto más gruesos son los elementos de la textura mayores son los huecos entre ellos, salvo si las partículas más finas se colocan dentro de esos huecos o si los cementos coloidales los obturan. No obstante lo más esperado es que los suelos con elementos gruesos presenten poros también gruesos y los suelos limosos y arcillosos, huecos muy numerosos pero de pequeño tamaño. La

materia orgánica contribuye a aumentar sensiblemente la porosidad. Son por tanto los suelos coloidales los que tienen la mayor porosidad (García, 2005; Whitlow, 1998).

La influencia de la estructura es tan evidente que a menudo se utiliza el valor de la porosidad para dar una idea de la estructura del suelo; además los agentes que destruyen la estructura disminuyen la porosidad, como por ejemplo el apisonado.

El tercer factor que tiende a desarrollar la porosidad es la actividad biológica del suelo, especialmente la de la microfauna. En los suelos cuya actividad biológica es intensa se observa con frecuencia, al lado de las huellas del recorrido de las lombrices, un gran número de canalículos finos que resultan del trabajo de pequeños insectos. Cuando este tipo de poros resulta predominante se dice que el suelo tiene una porosidad tubular (García, 2005).

La porosidad constituye el dominio natural de las fases líquida y gaseosa del suelo, siendo la primera la que por su variabilidad limita el espacio ocupado por la segunda. (García, 2005; Jiménez, 1951).

Luxmoore (1981), citado por Boulding (1994), propone una clasificación de la porosidad del suelo en tres categorías basada en la dinámica del agua (Boulding, 1994):

- **Microporosidad:** (< 0.01 mm) donde el flujo capilar es dominante. Este tipo de porosidad es tan pequeña para ser fácilmente reconocido en campo.
- **Mesoporosidad:** (0.01 a 1mm) donde el flujo gravitacional se presenta en los suelos insaturados. Esto es aproximadamente a los tamaños de clases de poros finos y muy finos.
- **Macroporosidad:** (> 1 mm) donde el canal de flujo a través del suelo es dominante cuando el suelo es saturado. Estos incluyen los tamaños de poro de clase mediano, grueso y muy grueso.

La relación entre la densidad real ( $\rho_{re}$ ) y la densidad aparente ( $\rho_{ap}$ ) con el espacio poroso es evidente considerando lo siguiente. Si el porcentaje de poros o espacios intersticiales es  $P$ , entonces el volumen real de 100 cm<sup>3</sup> de suelo será 100-  $P$ , y el peso (100 -  $P$ ) ( $\rho_{re}$ ). La densidad aparente será, por tanto (100 -  $P$ ) ( $\rho_{re}$ ) / 100, ó  $\rho_{re} - P\rho_{re} / 100$ . El espacio de poros expresado en términos reales o aparentes de intensidad se da por  $P= 100(\rho_{re} - \rho_{ap}) / \rho_{re}$  (Robinson, 1967).

### Estabilidad estructural

La estructura es la forma en que se asocian las partículas elementales del suelo para formar agregados. Es una consecuencia del estado de los coloides del suelo, cuando están floculados forman agregados más o menos estables. Por el contrario cuando están dispersos los componentes texturales quedan aislados (García, 2005; Gavande, 1991).

La estructura afecta a un numeroso grupo de características físicas del suelo pero sobre todo controla la porosidad del mismo, la cual permite la circulación del agua,

la renovación del aire y la penetración de las raíces. La circulación del agua favorece la distribución de los nutrientes y a la vez la hace llegar hasta los lugares de almacenamiento con lo que se incrementan las reservas de la misma. La favorable infiltración impide que se formen láminas superficiales, que generarían escorrentías; de este modo se incrementa la resistencia a la erosión. Un correcto intercambio entre la fase gaseosa del suelo y la atmósfera libre, así como una buena aireación del mismo, no solo favorece el desarrollo radicular de las plantas superiores sino la actividad de los microorganismos y el correcto establecimiento de la microfauna. Por último, ejerce una acción positiva sobre la consistencia del suelo, que en superficie permite la emergencia de las plantas tras la germinación, al impedir la formación de encostramientos, al mismo tiempo que facilita las labores agrícolas (García, 2005; Gavande, 1991).

Volviendo al mecanismo de formación, se tiene que dentro de los coloides del suelo se puede distinguir dos grandes grupos según su carga. En primer lugar están los coloides electropositivos o basoides que están representados por los óxidos de hierro y aluminio, más o menos hidratados, que se comportan como bases débiles y se encuentran dispersos en medio ácido y coagulado en medio alcalino. En segundo lugar tenemos los coloides electronegativos o acidoides, cargados negativamente y que son los más abundantes en el suelo; están representados por los minerales arcillosos, los complejos ferro-silícicos y las sustancias húmicas; se comportan como ácidos débiles y se encuentran dispersos en medio alcalino y flocculan en medio ácido (García, 2005; Gavande, 1991).

Dentro de estos últimos las arcillas se comportan como hidrófobas (nula afinidad con el agua) y se hallan rodeadas de una delgada capa de agua, mientras que las sustancias húmicas son hidrófilas (afinidad con el agua) y presentan una gruesa capa de agua. Existen también una serie de coloides que son realmente anfóteros y cambian de signo según que el pH esté por encima o por debajo de su punto isoeléctrico, así la caolinita que sería un coloide electronegativo, se hace electropositivo cuando el pH está por debajo de cuatro aproximadamente, en ese punto su susceptibilidad para floccular es máxima (García, 2005; Gavande, 1991).

La estructura del suelo no se debe confundir con la textura. Y se entiende de manera general como la disposición o el arreglo de las partículas fundamentales del suelo (arena, limo y arcilla). De las cuales se conocen diferentes tipos de estructura: granular, laminar, subangular y prismática (García, 2005; Gavande, 1991).

Estabilidad estructural: Es la resistencia de los granos a disgregarse en condiciones de humedad (García, 2005; Gavande, 1991; Jiménez, 1951; Sanglerat, 1975; Robinson, 1967).

Según el grado de desarrollo de los agregados, la estructura puede ser (FUNPROVER, 2009; Gavande, 1991; Jiménez, 1951; Sanglerat, 1975; Robinson, 1967):



- **Fuerte:** agregados duraderos, con separación bien definida cuando el suelo se seca.
- **Moderada:** agregados relativamente bien formados y diferenciados, de duración media.
- **Débil:** agregados poco diferenciados, que sólo se distinguen cuando el suelo está húmedo.
- **Sin estructura:** agregados que no se distinguen por falta de aglomeración, como ocurre en los suelos arenosos.

### Índice de plasticidad

Para comprender la plasticidad existe un término basado en los límites de Atterberg o límites de consistencia, concepto de los suelos finos presentes en la naturaleza. Pueden encontrarse en diferentes estados, dependiendo del contenido de agua. Así un suelo se puede encontrar en un estado sólido, semisólido, plástico, semilíquido y líquido. La arcilla, por ejemplo al agregarle agua, pasa gradualmente del estado sólido al estado plástico y finalmente al estado líquido (Jiménez, 1951; Juárez, 1980; Robinson, 1967; Sanglerat, 1975; Gavande, 1991).

El contenido de agua con que se produce el cambio de estado varía de un suelo a otro y en mecánica de suelos interesa fundamentalmente conocer el rango de humedades, para el cual el suelo presenta un comportamiento plástico, es decir, acepta deformaciones sin romperse (plasticidad), es decir, la propiedad que presenta los suelos hasta cierto límite sin romperse. El método usado para medir estos límites de humedad fue ideado por Atterberg a principios de siglo XX a través de dos ensayos que definen los límites del estado plástico (Jiménez, 1951; Juárez, 1980; Robinson, 1967; Sanglerat, 1975; Gavande, 1991).

Los límites de Atterberg son propiedades índices de los suelos, con que se definen la plasticidad y se utilizan en la identificación y clasificación de un suelo y se presenta en la Figura 2.5.

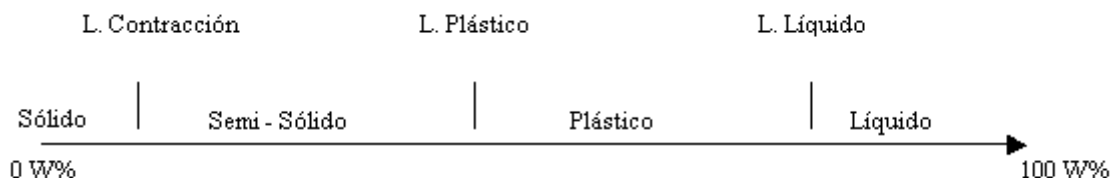


Figura 2.5 Límites de Atterberg  
*Fuente (Gavande, 1991)*

Plasticidad es la propiedad que tienen algunos suelos de deformarse sin agrietarse, ni producir rebote elástico. Los suelos plásticos cambian su consistencia al variar su contenido de agua. De ahí que se puedan determinar sus estados de consistencia al variar si se conoce las fronteras entre ellas. Los estados de consistencia de una masa de suelo plástico en función del cambio de humedad son sólidos, semisólido, líquido y plástico. Estos cambios se dan cuando

la humedad en las masas de suelo varía. Para definir las fronteras en esos estados se han realizado muchas investigaciones, siendo las más conocidas las de Terzaghi y Atterberg (Jiménez, 1951; Juárez, 1980; Robinson, 1967; Sanglerat, 1975; Gavande, 1991).

Para calcular los límites de Atterberg el suelo se tamiza por la malla N°40 y la porción retenida es descartada. La frontera convencional entre los estados semisólido y plástico se llama límite plástico, que se determina alternativamente presionando y enrollando una pequeña porción de suelo plástico hasta un diámetro al cual el pequeño cilindro se desmorona, y no puede continuar siendo presionado ni enrollado. El contenido de agua a que se encuentra se anota como límite plástico (Jiménez, 1951; Juárez, 1980; Robinson, 1967; Sanglerat, 1975; Gavande, 1991).

La frontera entre el estado sólido y semisólido se llama límite de contracción y a la frontera entre el límite plástico y líquido se llama límite líquido y es el contenido de agua que se requiere adicionar a una pequeña cantidad de suelo que se colocará en una copa estándar, y ranurará con un dispositivo de dimensiones también estándar, sometido a 25 golpes por caída de 10 mm de la copa a razón de 2 golpes/s, en un aparato estándar para límite líquido; la ranura efectuada deberá cerrarse en el fondo de la copa a lo largo de 13 mm (Jiménez, 1951; Juárez, 1975; Robinson, 1967; Sanglerat, 1975; Gavande, 1991).

En los granos gruesos de los suelos, las fuerzas de gravitación predomina fuertemente sobre cualquiera otra fuerza; por ello, todas las partículas gruesas tienen un comportamiento similar (Jiménez, 1951; Juárez, 1975; Robinson, 1967; Sanglerat, 1975; Gavande, 1991).

En los suelos de granos muy finos, sin embargo fuerzas de otros tipos ejercen acción importantísima; ello es debido a que en estos granos, la relación de área a volumen alcanza valores de consideración y fuerzas electromagnéticas desarrolladas en la superficie de los compuestos minerales cobran significación. En general, se estima que esta actividad en la superficie de la partícula individual es fundamental para tamaños menores que dos micras (0,002 mm) (Jiménez, 1951; Juárez, 1975; Robinson, 1967; Sanglerat, 1975; Gavande, 1991).

Para medir la plasticidad de las arcillas se han desarrollado varios criterios de los cuales se menciona el desarrollado por Atterberg, el cual dijo en primer lugar que la plasticidad no es una propiedad permanente de las arcillas, sino circunstancial y dependiente de su contenido de agua. Una arcilla muy seca puede tener la consistencia de un ladrillo, con plasticidad nula, y esa misma, con gran contenido de agua, puede presentar las propiedades de un lodo semilíquido o, inclusive, las de una suspensión líquida. Entre ambos extremos, existe un intervalo del contenido de agua en que la arcilla se comporta plásticamente. En segundo lugar, Atterberg hizo ver que la plasticidad de un suelo exige, para ser expresada en forma conveniente, la utilización de dos parámetros en lugar de uno.

Según su contenido de agua en forma decreciente, un suelo susceptible de ser plástico puede estar en cualquiera de los siguientes estados de consistencia, definido por Atterberg (Jiménez, 1951; Juárez, 1975; Robinson, 1967; Sanglerat, 1975; Gavande, 1991).

- Estado líquido, con las propiedades y apariencias de una suspensión.
- Estado Semilíquido, con las propiedades de un fluido viscoso.
- Estado Plástico, en que el suelo se comporta plásticamente.
- Estado semi sólido, en el que el suelo tiene la apariencia de un sólido, pero aún disminuye de volumen al estar sujeto ha secado.

## **Permeabilidad**

Todos los suelos son más o menos permeables. El agua se filtra tanto a través de la arcilla como a través de la grava, pero este fenómeno se manifiesta con intensidades muy diferentes. El mismo granito no es absolutamente impermeable y permite el paso del agua; si a veces está seca su superficie es porque los fenómenos de evaporación eliminan más agua que la permeabilidad de la roca ha permitido pasar (Sanglerat, 1975).

Es una característica asociada a la porosidad la permeabilidad o facilidad que tiene el suelo para dejarse penetrar por los fluidos. No solo los valores absolutos de porosidad bastan para estimar la permeabilidad del suelo sino algunos otros factores como la geometría del sistema poroso. Así una estructura hojosa deja una gran porosidad pero dificulta notablemente la circulación del agua, al igual que sucede cuando no existe una buena interconexión entre los componentes de la macroporosidad (García, 2005; Hillel, 1982; Jiménez, 1951; Juárez, 1975).

Se indica por la velocidad de circulación del agua de gravedad o conductividad hidráulica, y es tanto más elevada cuanto la porosidad no capilar sea más grande. Esto se explica fácilmente al recordar que el agua de gravedad circula a través de los macroporos del suelo, esto es de los huecos no capilares del mismo (García, 2005; Hillel, 1982; Jiménez, 1951; Juárez, 1975).

Sobre la permeabilidad influyen tres factores primordiales del suelo: la textura, la estructura y el contenido en materia orgánica. Los suelos con estructuras estables son en general permeables, mientras que los suelos con estructuras inestables o degradadas, son poco permeables, sobre todo cuando la composición física del suelo, su granulometría, está mal equilibrada. Los suelos arenosos pueden presentar también, en ciertos casos, una permeabilidad reducida, debido a la colmatación de los poros grandes por partículas de limo y por la ausencia casi total de materia orgánica. Así Feodoroff (1961), ha comprobado que una arena situada en una columna de percolación y humedecida en superficie, no se seca incluso después de cinco meses. Ehvzald (1961) señala las irregularidades de infiltración de las aguas de lluvia en los suelos arenosos (García, 2005; Hillel, 1982; Jiménez, 1951; Juárez, 1975).

La presencia de coloides en el suelo afecta indirectamente a la permeabilidad, pues favorece la formación de agregados dejando espacios lagunares por los que el agua puede circular fácilmente. Así en el suelo el tránsito gravitacional no es posible más que en los huecos capilares cuyo diámetro sea superior a los 30 mm. En los suelos muy porosos, la permeabilidad se reduce, pues se comportan como esponjas, reteniendo una gran cantidad de agua por influencia de sus fuerzas de unión. En la mayoría de los suelos la permeabilidad depende de la estructura, como ya se mencionó, y de todos los factores que la condicionan. Así cuando existen coloides, además del factor formador de estructura ya considerado, hay que tener en cuenta su hinchamiento a causa de la humectación. Si tenemos un suelo seco y agrietado, en principio la permeabilidad es enorme; con el paso del agua, los coloides se hinchan y van cerrando las grietas y poros, disminuyendo notablemente la permeabilidad y si éstas se encuentran en gran cantidad, suelos muy arcillosos, pueden volverse impermeables (García, 2005; Hillel, 1982; Jiménez, 1951; Juárez, 1975).

La impermeabilidad de los horizontes minerales puede conducir a una saturación total por el agua de lluvia, de los poros del suelo, sobre todo en periodos húmedos (García, 2005; Hillel, 1982; Jiménez, 1951; Juárez, 1975).

En ocasiones el suelo presenta zonas de permeabilidad mayor que se conocen como zonas preferentes de flujo. El suelo está constituido por varios horizontes, y que, generalmente, cada uno de ellos tiene propiedades físicas y químicas diferentes. Para determinar la permeabilidad del suelo en su totalidad, se debe estudiar cada horizonte por separado (García, 2005; Hillel, 1982; Jiménez, 1951; Juárez, 1975).

El tamaño de los poros del suelo reviste gran importancia con respecto a la tasa de filtración (movimiento del agua hacia dentro del suelo) y a la tasa de percolación (movimiento del agua a través del suelo). El tamaño y el número de los poros guardan estrecha relación con la textura y la estructura del suelo y también influyen en su permeabilidad (García, 2005; Hillel, 1982; Jiménez, 1951; Juárez, 1975).

Para medir la conductividad hidráulica en el laboratorio se utilizan unos tubos de PVC o material similar con un diámetro comprendido entre 5 y 10 cm y una longitud de alrededor de los 50 cm. El tubo se rellena con tierra fina, o material menor de 2 mm, procedente de un horizonte concreto y hasta una altura semejante al espesor del horizonte. Una vez relleno se humedece y se deja secar para procurar que recupere su estructura original. En esta operación puede bajar el nivel inicial por lo que sería necesario volver a añadir material. Se puede repetir el proceso de humedecimiento y secado varias veces hasta conseguir el espesor deseado y una estructura adecuada.

Una vez preparada la muestra se va añadiendo agua hasta formar una pequeña lámina en la superficie del suelo que debe mantenerse constante mediante una

botella de Mariotte o dispositivo similar. El agua añadida se va recogiendo bajo la base del tubo durante un tiempo determinado, que suele estar comprendido entre una y dos horas. Transcurrido ese tiempo se mide el agua percolada a través del suelo y se aplica la **Ley de Darcy**:

$$K = (C \cdot V)/(H \cdot S) \text{ cm/h}$$

K= Conductividad hidráulica (cm/hr)

C y H= Representan las alturas correspondientes a la columna de suelo y al nivel de la lámina de agua respectivamente y expresadas ambas en (cm)

S= Sección del tubo (cm<sup>2</sup>)

V= Volumen de agua recogido en una hora (cm<sup>3</sup>)

Valores de K inferiores a 0.04 cm/hora indican suelos u horizontes fuertemente impermeables. Si esta constante no alcanza el valor de 0.2 cm/hora se habla de horizontes o suelos poco permeables. Los consideramos permeables cuando se supera el valor anterior pero no se rebasa el de 2 cm/hora, superado el cual los considera como muy permeables. Valores por encima de 5 cm/hora deben considerarse como excesivamente permeables (García, 2005; Hillel, 1982; Jiménez, 1951; Juárez, 1975).

La ley de Darcy admite entonces la proporcionalidad de la velocidad de filtración y el gradiente hidráulico. El coeficiente de proporcionalidad **K** tiene la dimensión de una velocidad que recibe el nombre de coeficiente de permeabilidad y depende a la vez del medio poroso y del fluido. A continuación se muestra una escala aproximada de los valores de este coeficiente de permeabilidad **K** según la naturaleza del terreno (Sanglerat, 1975).Tabla 2.4

Tabla 2.4 Coeficientes de permeabilidad (K)

Material	Coeficiente de permeabilidad (k) en cm/s
Grava	$10^{-1} < k < 10^2$
Arena	$10^{-3} < k < 10^{-1}$
Limo y arena arcillosa	$10^{-7} < k < 10^{-3}$
Arcilla	$10^{-11} < k < 10^{-7}$
Rocas aparentemente no fisuradas	$10^{-10} < k < 10^{-8}$

NOTA: Para poder fácilmente centrar el orden de magnitud de estos coeficientes se dirá que  $10^{-6}$  cm/s representa una velocidad aproximada de 30 cm por año.

Fuente: Sanglerat, 1975

## Penetrabilidad

La penetrabilidad del suelo permite conocer la facilidad con que un objeto puede ser introducido en él, es decir, la resistencia mecánica que ofrece el suelo a la expansión lateral y al corte que produce dicho objeto. Esa resistencia no es

propiedad particular del material, sino que es la suma de los efectos de diferentes características y propiedades, tales como densidad aparente, contenido de humedad, resistencia a la penetración y al corte, las cuales a su vez, son consecuencia de la distribución del tamaño de partículas, de la estructura, y de la composición mineral y orgánica presentes en el suelo (Forsythe, 1985; Nacci, 1992; Sanglerat, 1975).

Cada vez más la caracterización de las propiedades físicas de los suelos es requerida para tomar decisiones de manejo y para determinar los efectos de las prácticas agrícolas sobre las propiedades de los suelos. Un primer nivel de la caracterización puede ir desde evaluaciones u observaciones visuales de propiedades seleccionadas del perfil, hasta complejas y sofisticadas medidas de campo y laboratorio. La decisión de las variables a ser caracterizadas depende de las razones u objetivos del estudio, así como de la disponibilidad de laboratorios y equipos y de la experiencia del personal (Nacci, 1992).

Finalmente, la penetrabilidad es un índice que puede ser evaluado a través de una determinación sencilla, rápida, y que puede ser hecha directamente sobre el terreno, permitiendo así realizar un alto número de mediciones que contrarrestan el problema de variabilidad espacial, la penetración de un pistón en el suelo es la combinación de falla tangencial, compactación y flujo plástico (Forsythe; 1985; Nacci, 1992; Sanglerat, 1975).

## **2.5 TRASPORTE DE LOS COMPUESTOS ORGÁNICOS EN MEDIO POROSO**

Existen fenómenos de transporte tanto para el benceno como para la fracción ligera de hidrocarburos, en el suelo del caso de estudio (Ex Refinería 18 de marzo), a continuación se describen cada uno de éstos fenómenos en el medio poroso.

No hay que olvidar que la contaminación ambiental producida por material peligroso o en su defecto residuo peligrosos, se puede presentar en cualquiera de las fases de gestión de los mismos (producción, almacenamiento, transporte, tratamiento y disposición final) en el presente caso se define que se origina en dos puntos específicos identificados por estudios previos realizados por SEMARNAT, en el área de producción donde el benceno es materia prima, y el segundo caso es en el almacenamiento, puntualmente en los tanques de almacenamiento de éste.

De lo anterior se identifican básicamente tres tipos de liberación del contaminante, que no precisamente se presentaron las tres en el caso de estudio, ya que pudo ser uno o el resultado de la combinación entre ellas (Iturbe y Silva, 1992; LaGrega *et al.*, 1994; Watts, 1997; Ministry for Environmental, New Zealand, 1988; ISWA, UNEP, Secretaría del Convenio de Basilea, 2002).

- Descargas controladas, tales como emisiones resultantes de las etapas de producción, tratamiento y disposición final (por ejemplo: lixiviados,, efluentes o emisiones gaseosas)
- Descargas no controladas o derivadas de prácticas inadecuadas de tratamiento y disposición de residuos (por ejemplo: vertidos cuerpos de agua, enterramientos, operación inapropiada de vertederos o quemas a cielo abierto)
- Descargas accidentales durante el almacenamiento, transporte y operaciones de manejo en general

El transporte de contaminantes en el medio es el vínculo entre la liberación del contaminante por una fuente y el contacto con el receptor en el punto de exposición. Las características del suelo que influyen en el transporte del contaminante pueden ser: tipo de suelo, contenido de materia orgánica, la profundidad del nivel freático, porosidad y permeabilidad. Para comprender mejor se tiene que en suelos con partículas gruesas se favorece la migración del contaminante y está directamente relacionado con la permeabilidad de tal manera que presentan una permeabilidad que va de media a alta, y estos casos se presenta en las arenas, gravas y en rocas porosas. Otro factor relevante es la biota, misma que está conformada por hongos, algas, bacterias, etc., y que es un aspecto importante que influye en sus propiedades físicas y químicas, dichos microorganismos tienen una cualidad peculiar, que es, la capacidad de degradar (transformar) los contaminantes depositados en el medio poroso (Iturbe y Silva, 1992; LaGrega *et al.*, 1994; Watts, 1997; Ministry for Enviromental, New Zealand, 1988; ISWA,UNEP,Secretaría del Convenio de Basilea, 2002).

Para determinar el comportamiento de un contaminante una vez que se ha liberado al medio poroso, es necesario conocer -al igual que el suelo como se mencionó anteriormente- sus propiedades fisicoquímicas y su comportamiento ambiental. Algunos de los procesos que se desarrollan en el medio poroso una vez que se libera el contaminante pueden atenuar el impacto o retardar la transferencia de contaminante, estos son la volatilización y adsorción principalmente limitando su movilidad. Sin embargo el contaminante puede seguir migrando a lo largo del perfil del suelo e incluso alcanzar el nivel freático a través de la disolución o dispersión. Finalmente puede ser detenido por reacciones químicas al interactuar con los componentes minerales o biológicos generando la degradación química o biológica (Iturbe y Silva, 1992; LaGrega *et al.*, 1994; Watts, 1997; Ministry for Enviromental, New Zealand, 1988; ISWA,UNEP,Secretaría del Convenio de BASilea, 2002).

En la Figura 2.6 se muestran los procesos llevados a cabo en el transporte del contaminante en el medio poroso así como sus variables en cada proceso que influyen.

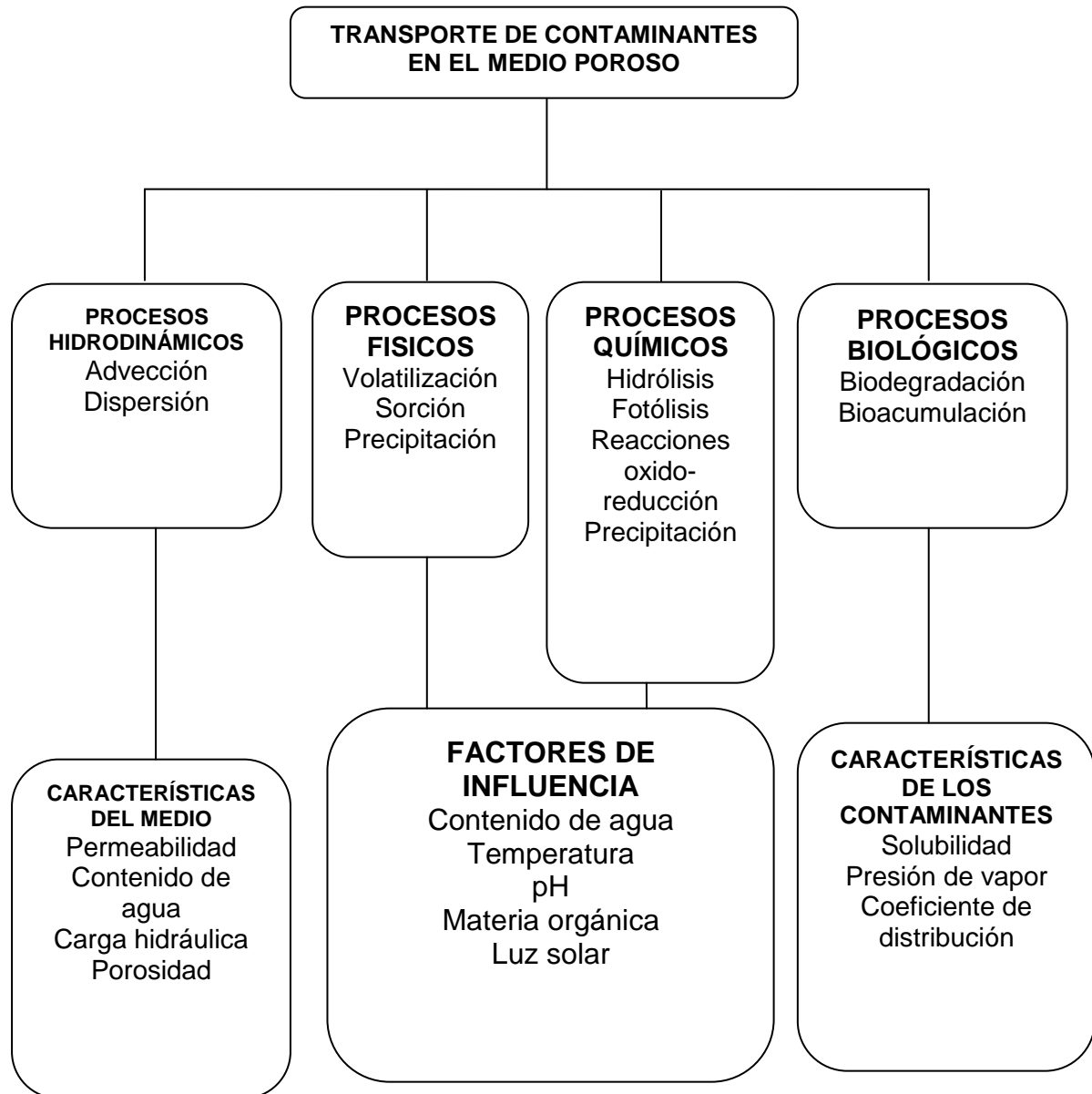


Figura 2.6 Transporte del contaminante en medio poroso.

Fuente: Iturbe y Silva, 1992; LaGrega *et al.*, 1994; Watts, 1997; Ministry for Environmental, New Zealand, 1988; ISWA, UNEP, Secretaría del Convenio de Basilea, 2002.



## Fenómenos de transporte en el medio poroso

Ya se ha mencionado de manera general cómo un contaminante se puede propagar en un medio poroso. Ahora se analizará de manera particular cada uno de los fenómenos de transporte que se hacen presentes durante la migración de un contaminante a través del suelo. Por lo que, hay que comenzar por mostrar la ecuación general de transporte para un medio poroso y que se muestra en la ecuación 2.1

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - V \frac{\partial C}{\partial C} - \frac{\rho_b}{n} \frac{\partial C_s}{\partial t} + \left( \frac{\partial C}{\partial t} \right)_r \quad \text{Ec. 2.1}$$

Donde:

D, coeficiente de dispersión hidrodinámica

V, velocidad lineal del agua subterránea

$\rho_b$ , densidad aparente del suelo

n, porosidad

C, concentración en solución

$C_s$ , concentración adsorbida

t, tiempo

$\left( \frac{\partial C}{\partial t} \right)_r$ , término para degradación

## Dispersión

Los procesos hidrodinámicos de advección (o convección) y dispersión están muy involucrados en el transporte de contaminantes dentro del suelo. La advección se refiere al transporte del soluto a una velocidad equivalente a la del movimiento del agua subterránea. Este transporte ocurre por el movimiento bruto del agua que fluye.

En condiciones de flujo, el transporte de un compuesto, en una dimensión, por advección es:

$$V = \frac{K}{n_e} \frac{\partial h}{\partial z}$$

Donde:

V, velocidad lineal del agua subterránea

K, conductividad hidráulica

$n_e$ , porosidad efectiva

$i = \frac{dh}{dz}$ , gradiente hidráulico

Este proceso se debe al movimiento del fluido, ya sea aire o agua (convección, término similar, normalmente se asocia al movimiento vertical de advección debido a diferencias de densidad). Luego un elemento químico presente en el aire o en el agua será pasivamente llevado por este movimiento advectivo de masas (Oyarzún, 2007).

El movimiento advectivo es descrito matemáticamente por la dirección y la magnitud de su velocidad, dado que a pesar de la ocurrencia de dispersión, el centro de masa del elemento químico que es transportado por advección, se mueve a la velocidad promedio del fluido, siempre y cuando no se produzca adsorción y retardo (que será tratado más adelante) (Oyarzún, 2007).

La tendencia del soluto a extenderse hacia afuera de la línea de flujo por advección, se conoce como dispersión hidrodinámica. Esto causa la dilución del soluto y ocurre por el mezclado mecánico durante la advección y debido a la difusión molecular por la energía termo cinética de las partículas del soluto.

El transporte de un contaminante en términos prácticos se estima por la velocidad promedio del agua subterránea. Sin embargo, a nivel microscópico la velocidad real del agua es variable de un punto a otro debido a diversas condiciones:

- Tamaño de los poros
- Distribución de partículas. La velocidad del flujo es mayor a medida que la trayectoria de flujo es menor.
- Fricción en las partículas del suelo. El agua que fluye cerca de las partículas del suelo presenta velocidades menores debido a la fricción.

Debido a las diferencias de velocidad ocurre el mezclado a lo largo de la trayectoria de flujo. Esta mezcla se denomina dispersión mecánica o hidrodinámica. La mezcla que se lleva a cabo en esta trayectoria longitudinal se denomina dispersión longitudinal y la tendencia a extenderse en dirección transversal a esta trayectoria, se denomina dispersión transversal. Ambas son función de la velocidad promedio.

## **Sorción**

La sorción es uno de los procesos abióticos más ampliamente estudiados en suelos contaminados. Se inició para plaguicidas en suelos agrícolas; sin embargo, en la actualidad se aplica para todo tipo de problemas de contaminación. Los términos de sorción, adsorción y absorción se refieren a fenómenos muy similares; los dos primeros se utilizan indistintamente por muchos autores (Weber et al, 1991).

La adsorción es un proceso en el que un compuesto soluble (adsorbato) se remueve de la solución por contacto con una superficie sólida (adsorbente). El adsorbente puede ser material poroso, y va a tener mayor influencia a mayor

contenido de carbono orgánico, debido a que las partículas de suelo pueden presentar un área superficial muy alta.

La adsorción también se define como la acumulación de un compuesto químico en una superficie (Adamson, 1982) y las interfases de más interés en la superficie son: líquido-sólido y gas-sólido.

Weber (1972) define la adsorción como la acumulación que ocurre en una superficie; la absorción como la distribución en dos fases y la sorción como la suma de adsorción y absorción. Sin embargo, muchos autores (Knox, 1993) consideran indistintamente la adsorción y la sorción.

Las reacciones de sorción se clasifican de dos formas, motivadas por el sorbente o motivadas por el sorbato. La sorción motivada por el sorbente ocurre cuando hay una atracción entre el sorbente (material poroso) y el soluto (contaminante) el cual se acumula en la superficie debido a la afinidad del sorbente por el contaminante.

La sorción motivada por el solvente ocurre cuando el contaminante es hidrofóbico (repulsión por el agua). En la sorción motivada por el solvente la acumulación del contaminante en el material poroso se debe al rechazo del contaminante en fase disuelta en el agua subterránea.

La adsorción puede clasificarse en tres categorías: intercambio, fuerzas físicas y fuerzas químicas (Weber, 1972). La adsorción por intercambio se refiere a la acumulación del químico en una superficie debido a la atracción electrostática entre las cargas del suelo y las cargas del compuesto. La adsorción física (fisiosorción) es el resultado de la intervención de fuerzas de Van der Waals. La adsorción química (quimiosorción) es el resultado de una reacción química entre la superficie sólida y el compuesto químico.

Los principales factores que afectan la adsorción son:

**Solubilidad:** A mayor solubilidad menor adsorción

**Estructura molecular:** Los compuestos de cadena ramificada se adsorben más que los de cadenas lineales.

**Peso molecular:** Las moléculas más grandes se adsorben mejor que las moléculas de menor tamaño

**Polaridad:** A mayor polaridad menor adsorción

Existen varios modelos de adsorción pero los tres de mayor aplicación son los siguientes:

## Modelo lineal

La expresión más simple de la sorción en equilibrio es la sorción lineal ecuación 2.2:

$$C_s = K_d C_e \quad \text{Ec. 2.2}$$

Donde:

$C_s$ : Masa del compuesto adsorbido por la masa del suelo (mg/kg)

$K_d$ : Coeficiente de distribución (ml/g)

$C_e$ : Concentración del químico en la fase líquida (mg/l)

Esta ecuación considera que una gráfica en la que se represente  $C_s$  en las ordenadas con  $C_e$  en las abscisas resultará en una línea recta y la pendiente corresponderá al coeficiente de adsorción  $K_d$ . Si la curva resulta curvilínea se deberá probar el modelo de Freundlich o el de Langmuir.

En la figura 2.7 se muestran la curva del modelo lineal y la de Freundlich.

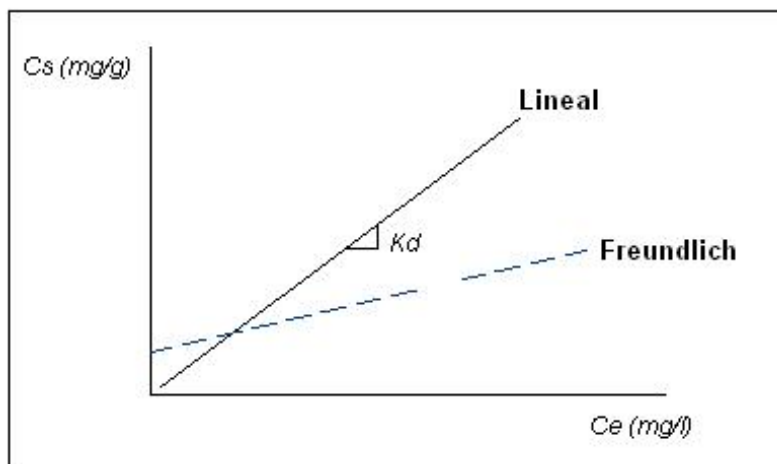


Figura 2.7 Isoterma Lineal y de Freundlich  
Fuente: Iturbe, 2008

## Modelo de Freundlich:

Que sigue la ecuación 2.3

$$C_s = K_d C_e^N \quad \text{Ec. 2.3}$$

Donde:

$K_d$ : Coeficiente de distribución de Freundlich

$N$ : Coeficiente exponente de Freundlich

Para hacer lineal la ecuación 2.3 se aplican logaritmos a la misma y se obtiene lo siguiente ecuación 2.4:

$$\log C_s = \log K_d + N \log C_e \quad \text{Ec. 2.4}$$

La pendiente de la gráfica correspondiente es N y la ordenada al origen es  $\log K_d$ .

El tipo de curva que se pueda obtener en una isoterma de adsorción va a depender del tipo de sorbente, del químico y del intervalo de concentraciones que se consideren. Esto puede confirmarse al analizar la curva no lineal en la figura 3.3, donde se aprecia que para bajas concentraciones el comportamiento es lineal.

### Modelo de Langmuir

El modelo de Langmuir considera que existe un número de sitios de adsorción disponibles y que la adsorción es reversible (Langmuir, 1918). A mayor número de sitios del sorbente que se ocupen, decrece la probabilidad de que el compuesto químico, aún en solución, encuentre un sitio para adsorberse. Esto considera que para altas concentraciones sólo quedan disponibles los sitios de adsorción menos favorables ya que los más adecuados ya están ocupados.

El modelo de Langmuir se representa por la siguiente ecuación 2.5:

$$C_s = \frac{(aK_L C_e)}{(1 + K_L C_e)} \quad \text{Ec. 2.5}$$

Donde:

- a: Masa del químico requerido para saturar una unidad de masa del suelo
- $K_L$ : Constante de Langmuir

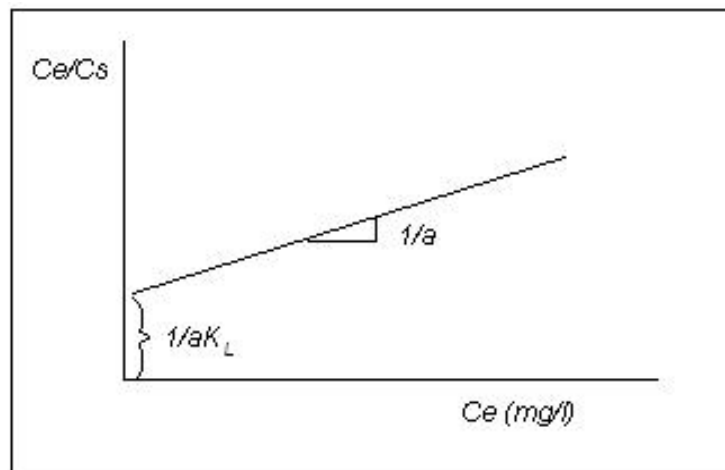


Figura 2.8 Isotherma de Langmuir

La ecuación de Langmuir corresponde a un modelo de crecimiento limitado, similar a los utilizados para representar una población microbiana dinámica. (Knox, 1993).

Un método para dar solución a la ecuación de Langmuir es su linealización, lo cual se puede obtener al invertir la ecuación 2.6:

$$\frac{C_e}{C_s} = \frac{C_e}{a} + \frac{1}{aK_L} \quad \text{Ec. 2.6}$$

## Difusión

Muchos estudios han mostrado que la difusión molecular es el principal mecanismo de transporte de solutos en depósitos arcillosos (Goodall and Quigley, 1977; Desaulniers *et al*, 1981; Gray and Weber, 1984; Johnson *et al*, 1989), por lo que los coeficientes de difusión son clave para predecir el transporte de solutos. Este parámetro depende de la naturaleza física y química de los compuestos y del medio poroso (Shackelford, 1991).

La difusión considera la migración de los contaminantes debido a la existencia de un gradiente de concentración. El movimiento se presenta de la zona de mayor concentración a la de menor concentración y deja de presentarse si no hay gradiente.

La difusión se caracteriza por la primera ley de Fick ecuación 2.7:

$$F_d = -D^* \frac{dC}{dx} \quad \text{Ec. 2.7}$$

Donde:

F<sub>d</sub>: Masa difusiva

D\*: Coeficiente de difusión efectiva

dC/dx: Gradiente de concentración

De la primera ley de Fick y la ecuación de continuidad, la velocidad a la que el contaminante se puede difundir en el suelo se representa por la ecuación 2.8:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D^* \frac{d^2 C}{d x^2} \quad \text{Ec. 2.8}$$

Donde:

C: Concentración del soluto en solución

X: Dirección de difusión [L]

D\*: Coeficiente de difusión molecular

## Volatilización

La volatilización es el proceso en el cual un compuesto químico pasa a la fase de vapor. La volatilización es un proceso de transferencia de masa muy importante. El proceso de transferencia de la fuente (cuerpo de agua, sedimentos, suelo) a la atmósfera depende de las propiedades físicas y químicas del compuesto, de la presencia de otros compuestos, las propiedades físicas del medio y de las condiciones atmosféricas.

Las características más importantes para determinar la volatilidad de un químico son:

- Constante de la ley de Henry que da una medida de la distribución química de equilibrio entre el aire y el agua. Este valor indica la tendencia de un compuesto a volatilizarse de la solución acuosa a la atmósfera, con base en la presión de vapor y la solubilidad en agua se tiene la ecuación 2.9.

$$C_a = H C_w \quad \text{Ec. 2.9}$$

Donde:

H: Constante de Henry

Ca: Concentración en la fase gaseosa

Cw: Concentración en la fase disuelta

Los contaminantes con bajos valores de esta constante tenderán a quedarse en la fase acuosa y se volatizarán hacia la atmósfera más lentamente que los compuestos con valores altos de la constante de la ley de Henry. Como una guía, valores de H entre  $10^{-7}$  a  $10^{-5}$  (atm-m<sup>3</sup>/mol) representan baja volatilidad; valores entre  $10^{-5}$  y  $10^{-3}$  (atm-m<sup>3</sup>/mol) representan una volatilidad media y  $H > 10^{-3}$  (atm-m<sup>3</sup>/mol) implica una rápida volatilización.

- **Presión de vapor:** Es la presión ejercida por un vapor químico en equilibrio con un sólido o un líquido a cualquier temperatura. Es una medida relativa de la volatilidad de un químico en estado puro y es determinante en la velocidad de volatilización. A mayor presión de vapor mayor volatilidad del compuesto. Los compuestos con valores altos de presión de vapor tenderán a migrar del suelo al agua subterránea y después a la atmósfera.

## Contaminación del suelo por benceno y fracción ligera de hidrocarburo (gasolina)

La contaminación, desde un punto de vista ambiental, es la alteración de las características físicas, químicas o biológicas de los factores ambientales en grado tal que supongan un riesgo inaceptable para la salud humana o los ecosistemas (Sabroso, 2004).

De acuerdo con la norma oficial mexicana **NOM-138-SEMARNAT/SS-2003, límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y las especificaciones para su caracterización y remediación**. Se define un suelo contaminado como: *“Aquel en el cual se encuentran presentes hidrocarburos que por sus cantidades y características afecten la naturaleza del suelo.”*

Para entender cómo se comporta el benceno en el ambiente es necesario conocer cierta información sobre las propiedades físico-químicas de la molécula y su mecanismo de transporte, así como la geohidrología del sitio. Con la gran complejidad y cantidad de datos requeridos, los científicos no siempre pueden predecir exactamente lo que ocurrirá con una cantidad de benceno cuando éste ha entrado en el ambiente. A este problema, se suma el hecho de que los datos de las investigaciones son obtenidos bajo condiciones controladas de laboratorio y con cantidades conocidas de benceno, lo cual no ocurre en la naturaleza (Schnoor, 1996).

A pesar de lo complejo del problema, los científicos han logrado determinar ciertas características físico-químicas cuantificables para el benceno, como es la solubilidad, presión de vapor, Constante de la Ley de Henry, el Coeficiente de Carbono orgánico (Koc) y el Coeficiente de Partición Octanol-Agua (Kow). Con esta información pueden predecir el lugar donde pudiera encontrarse benceno en altas concentraciones (Schnoor, 1996).

Por otra parte, la molécula de benceno no permanece intacta por tiempo indefinido en el medio ambiente, ya que con el tiempo sufre una degradación influenciada por microorganismos, actividad química, pH, clima, y contenido de materia orgánica del suelo (Schnoor, 1996; Sabroso, 2004).

Los derrames de benceno se dispersan superficialmente sobre el agua o el suelo formando en este último un charco que lentamente se adsorbe a las partículas del mismo, al tiempo que se liberan vapores a la atmósfera en forma continua. Cuando se derrama sobre el agua, la capa de ellos se dispersa gradualmente dado que es menos denso que ésta y solamente ligeramente soluble en ella. Por lo anterior, solo una pequeña fracción de los BTEXs derramados se disolverán en el agua y el resto se evaporarán (Schnoor, 1996; Sabroso, 2004).

En el caso de derrames de benceno y fracción ligera de hidrocarburo (gasolina) sobre el suelo, éste se adsorbe a sus partículas a una tasa que dependerá del tipo de suelo y del contenido de agua del mismo. El transporte vertical de ellos puede conducir a la contaminación del agua subterránea (Schnoor, 1996; Sabroso, 2004).



El comportamiento de un derrame de estos contaminantes puede estar influenciado por los siguientes factores:

- a) Si el derrame proviene de un contenedor:
  - Tasa de descarga
  - Porcentaje de benceno remanente en el tanque
- b) Si existe una liberación a la atmósfera:
  - Tasa de emisión de vapores
  - Zona de riesgo
- c) En el caso de los derrames en el agua
  - Grado de difusión
- d) En el caso de derrames sobre el suelo
  - Profundidad y tiempo de penetración

Es importante señalar que, debido a la naturaleza aproximada de los cálculos para el transporte de contaminantes, la estimación de los parámetros críticos en dichos cálculos es conservadora de manera que las predicciones obtenidas están enfocadas a los escenarios del “peor caso” para cada medio que se analiza (Schnoor, 1996; Sabroso, 2004).

Dada la alta volatilidad del benceno, el venteo directo de vapores a la atmósfera, a través de un orificio, en un contenedor perforado, no representa un riesgo inmediato viento abajo del punto de emisión. Por lo anterior, únicamente se analizará el escenario de vapores emitidos de un charco formado por el derrame de benceno en el suelo o en la superficie del agua (Schnoor, 1996; Sabroso, 2004).

El benceno, tiene un punto de ebullición de 80.1°C a 1 atmósfera de presión, por lo que cuando se derrama en el suelo por debajo de esa temperatura la evaporación que se presenta es limitada. Para un charco de benceno a 20°C la tasa de evaporación será del orden de 2.3 g/(m<sup>2</sup> s). El benceno remanente se infiltrará en el suelo y continuará evaporándose a una tasa menor.

Cuando un derrame de benceno en el suelo se expone a la precipitación pluvial, su transporte dentro del mismo se vuelve un fenómeno multifases. Estas fases incluyen al benceno y al agua tanto en su fase líquida como en su fase vapor, y la adsorción en las partículas del suelo. Desde luego que el principal motivo de preocupación lo constituye el transporte del benceno hacia el agua subterránea.

De manera general se considera un patrón de movimiento vertical en el suelo para fluidos no miscibles, como el benceno, a través de su comparación con derrames

de petróleo. Se considera que cuando ocurre el derrame, el suelo se encuentra a capacidad de campo (la cantidad máxima de agua que el suelo retiene después de haber drenado el agua en exceso), condición que prevalece hasta llegar al nivel del agua subterránea. El benceno derramado llena los poros de la superficie del suelo y comienza a penetrar en forma vertical. La tasa de infiltración es dependiente de la conductividad hidráulica de saturación ( $K_0$ ). Durante el movimiento vertical, el benceno deja tras de sí una cantidad residual constante ( $S_0$ ) dentro de los poros del suelo (Schnoor, 1996; Sabroso, 2004).

El transporte vertical del benceno continuará hasta que el volumen derramado por unidad de área ( $B_0$ ) iguale la cantidad retenida en el suelo como  $S_0$ . La dispersión horizontal también se producirá en algún grado debido a la acción capilar. Si  $B_0$  es mayor que el volumen, éste puede retenerse como  $S_0$  por encima del nivel del agua subterránea y el exceso de benceno se dispersará como una pasta dentro de la franja capilar saturada del agua subterránea. La zona contaminada resultante consistirá en una "columna vertical" y una "pasta horizontal" de suelo, que contendrá cantidades diversas de benceno residual,  $S_0$ , dicho comportamiento se puede ver más detalladamente en la Figura 2.7. (Schnoor, 1996; Sabroso, 2004).

La adsorción en las partículas del suelo, la evaporación y la biodegradación pueden influenciar el comportamiento subsecuente del benceno. Las velocidades de transporte a través del suelo se basan en las leyes de Darcy considerando un flujo pistón saturado. Durante un derrame de benceno en el suelo, se presentan varias propiedades físicas y químicas del contaminante en el suelo como se detallan a continuación y muestran en la Figura 2.7 (Moyer, 2004; Schnoor, 1996; Sabroso, 2004).

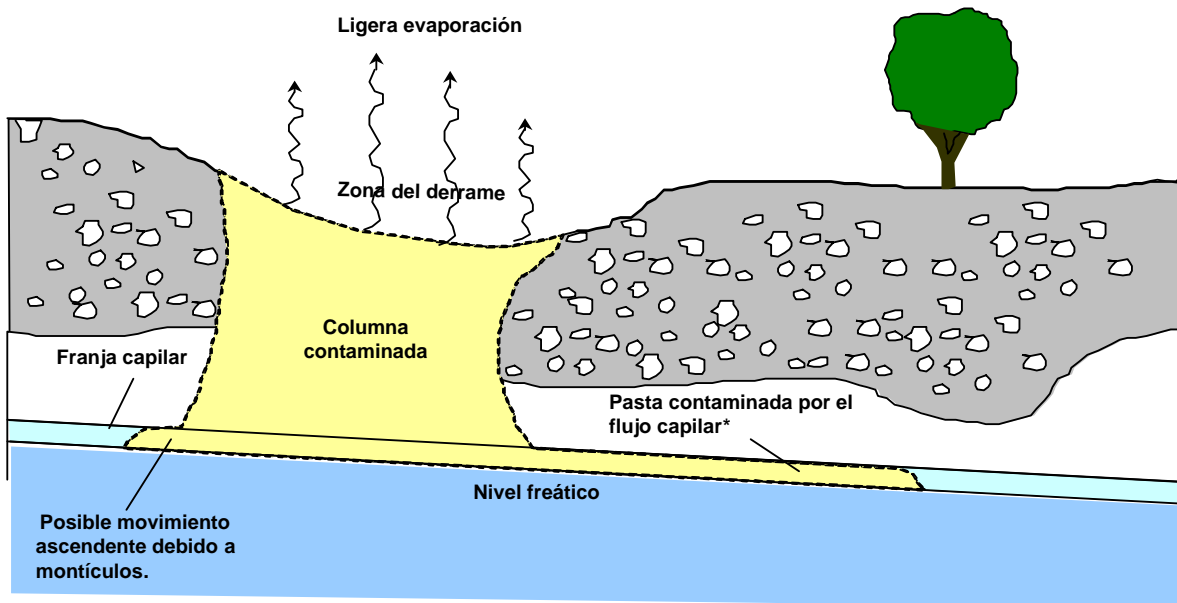


Figura 2.7 Diagrama de un derrame de benceno o Fracción ligera de hidrocarburo (gasolina) Fuente. Schnoor, 1996

## 2.6 METODOS DE REHABILITACIÓN DE SUELOS

El aumento continuo de la población, su concentración progresiva en grandes centros urbanos, el desarrollo industrial y agrícola ocasionan, día a día, la contaminación de los suelos, que radica en la presencia de sustancias (basura, fertilizantes, hidrocarburos, plaguicidas...) extrañas de origen humano en él. A menudo se considera al suelo, normalmente como tierra, como algo muerto, donde se puede colocar, acumular o tirar cualquier producto sólido o líquido que ya no es de utilidad o que se sabe que es tóxico.

El suelo es un medio receptivo por excelencia, puesto que interacciona con la litosfera, la hidrosfera y la atmósfera y recibe el impacto de los seres vivos que, de manera directa o indirecta, pueden romper el equilibrio químico establecido en su seno. Es importante notar que el suelo posee una capacidad de auto-depuración, en sus horizontes más contaminados, que le permite asimilar una cierta cantidad de contaminantes. Los contaminantes edáficos o del suelo pueden clasificarse en endógenos y exógenos. Los endógenos son aquellos que provienen del mismo suelo, mientras que los exógenos son aquellos que provienen del exterior. La presencia de un contaminante endógeno genera cuando se produce un desequilibrio natural que conduce a la proliferación de un componente a niveles nocivos para las especies vivas (CICEANA, 2009).

La contaminación del suelo se define como la acumulación en éste de compuestos tóxicos persistentes, productos químicos, sales, materiales radiactivos o agentes patógenos, que tienen efectos adversos en el desarrollo de las plantas y la salud de los animales. La creciente cantidad de fertilizantes y otros productos químicos agrícolas que fueron aplicados a los suelos después de la II Guerra Mundial, sumada a las prácticas de vertido de residuos industriales y domésticos, llevó a una progresiva preocupación por la contaminación de los suelos a mediados de la década de 1960. Aunque el empleo de fertilizantes que contienen nutrientes primarios, nitrógeno, fósforo y potasio, no ha producido contaminación de los suelos, la aplicación de elementos traza sí lo ha hecho (Veracruz, 2009).

Dependiendo del uso del suelo es como se manifiesta el tipo de contaminación, puede ser por el uso de plaguicidas para la agricultura; el riego con agua contaminada; el polvo de zonas urbanas y las carreteras; o por los jales mineros y desechos industriales derramados en su superficie, depositados en estanques o enterrados (Veracruz, 2009).

Cuando en el suelo se deposita de forma voluntaria o accidental diversos productos como papel, vidrio, plástico, materia orgánica, materia fecal, solventes, plaguicidas, residuos peligrosos o sustancias radiactivas, etc., se afecta de manera directa las características físicas, químicas de éste, desencadenando con ello innumerables efectos sobre seres vivos (Veracruz, 2009).

La mayoría de los procesos de pérdida y degradación del suelo son originados por la falta de planificación y el descuido de los seres humanos. Las causas más comunes de dichos procesos son (Veracruz, 2009):

**Erosión:** La erosión corresponde al arrastre de las partículas y las formas de vida que conforman el suelo por medio del agua (erosión hídrica) y el aire (erosión eólica). Generalmente esto se produce por la intervención humana debido a las malas técnicas de riego (inundación, riego en pendiente) y la extracción descuidada y a destajo de la cubierta vegetal (sobrepastoreo, tala indiscriminada y quema de la vegetación).

**Contaminación:** La contaminación de los suelos se produce por la inadecuada disposición de sustancias químicas y basuras. Las primeras pueden ser de tipo industrial o domésticas, ya sea a través de residuos líquidos, como las aguas servidas de las viviendas, o por contaminación atmosférica, debido a las partículas que luego cae sobre el suelo.

**Compactación:** La compactación es generada por el paso de animales, personas o vehículos, lo que hace desaparecer las pequeñas cavernas o poros donde existe abundante microfauna y microflora.

**Expansión urbana:** El crecimiento horizontal de las ciudades es uno de los factores más importantes en la pérdida de suelos.

La pérdida de la fertilidad de los suelos, de su capacidad biodegradadora y otras funciones, asociada a dicha contaminación, es una de las más grandes amenazas para la supervivencia de la flora y fauna que dependen directamente de estos procesos, e incluso para los seres humanos, dadas las estrechas interrelaciones entre los diferentes elementos que constituyen a los ecosistemas (Medina, 2001).

Al fenómeno anterior se agrega el deterioro creciente de las fuentes de abastecimiento de agua, ya sea subterránea o superficial, derivado también de la contaminación de los suelos por materiales peligrosos y todo tipo de residuos. Lo más grave es la dificultad y el enorme costo que representa para la sociedad la remediación o restauración de los suelos y cuerpos de agua contaminados y deteriorados, haciéndose patente que resulta más caro remediar que prevenir. Es por esto, que diversos países han establecido políticas tendentes a prevenir la contaminación y deterioro de los suelos, combinando diversos instrumentos de gestión que vinculan, hacen más consistentes y complementan las disposiciones regulatorias y los actos de autoridad relacionados con los materiales peligrosos, los diversos tipos de residuos y la gestión de los suelos y el agua (Medina, 2001).

La gran diferencia que existe en los sistemas jurídicos de los países pioneros en materia de protección de los suelos y el agua y la remediación de sitios contaminados, así como en sus ordenamientos legales relativos al control de los materiales y residuos peligrosos, los residuos municipales e industriales no

peligrosos, hacen necesario tener cautela al tratar de usarlos como modelo para sustentar una Política Nacional, dadas las peculiaridades de México (Medina, 2001).

Evidentemente se puede aprender de las experiencias de otros países, sobre todo en lo que se refiere al establecimiento de prioridades de acción basadas en la evaluación y ponderación de los riesgos asociados a la contaminación de sitios, al igual que los enfoques innovadores tendentes a prevenir y detener la liberación al ambiente de los materiales y residuos peligrosos (Medina, 2001).

Por todo lo anterior que altera la composición del suelo y provoca una deficiencia en el uso del suelo, se tienen una serie de tecnologías que ayudan a la rehabilitación de suelos y como consecuencia también a los acuíferos contaminados.

Dichas tecnologías más usadas para la rehabilitación pueden ser llevadas a cabo tanto en el mismo sitio del problema como fuera de él, por lo que varios autores los dividen en dos primeras clases, in situ y tratamientos fuera del sitio. De igual manera las tecnologías se clasifican de acuerdo al tipo de proceso aplicado, en: físicos, químicos, biológicos y térmicos como se muestran en la Tabla 2.5 (Iturbe, 1998).

**Tabla 2.5 Técnicas de rehabilitación de suelos contaminados**

<b>TÉCNICAS DE REHABILITACIÓN FÍSICOQUÍMICAS</b>	
<b>Técnica</b>	<b>Aplicación</b>
<b>Lavado de suelos (in situ)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se aplica en zona saturada y no saturada, saneando agua y suelo contaminado.</li> <li>• Se puede llevar a cabo por pozos de inyección o bien con la inundación de la superficie y la recuperación en zanjas aguas abajo.</li> <li>• Utiliza soluciones con agentes químicos que ayudan a desorber el contaminante del suelo.</li> <li>• Depende de la permeabilidad del suelo para su aplicación.</li> <li>• Se usa para suelos y agua contaminada con compuestos orgánicos e inorgánicos (plaguicidas y metales pesados) predominando para orgánicos volátiles y semivolátiles.</li> </ul>
<b>Lavado de suelos fuera del sitio (ex situ)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se usa para la zona vadosa.</li> <li>• Se excava el suelo para ser tratado con soluciones de agentes químicos en instalaciones adecuadas.</li> <li>• Requiere de manipulación mecánica para el mezclado del suelo con las soluciones de lavado.</li> <li>• Agentes: surfactantes, alcoholes, ácidos, bases, quelantes.</li> </ul>
<b>Extracción de vapores (in situ)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se aplica en la zona vadosa contaminada por compuestos orgánicos volátil, semivolátil y los líquidos no acuosos (NAPL) que se ubiquen en la zona no saturada, donde se encuentra como producto en fase libre.</li> <li>• Se aplica vacío al suelo a través de pozos para introducir un flujo controlado y continuo de aire, removiendo así contaminantes volátiles y semivolátiles del suelo.</li> </ul>
<b>Electrocinética (in situ)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se aplica en ambas zonas saturada y no saturada, para suelos contaminados con metales pesados.</li> <li>• Tiene como objetivo separar y extraer contaminantes orgánicos e inorgánicos (metales) de suelos, lodos y sedimentos, con el uso de un campo eléctrico que permite remover las especies cargadas (iones).</li> <li>• Implica la aplicación de una corriente directa de baja intensidad entre un electrodo positivo y uno negativo.</li> </ul>

<b>Solidificación/ Estabilización (ex situ)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se aplica en la zona no saturada</li> <li>• Para suelo contaminado principalmente por compuestos inorgánicos (Pb, Cd, Zn, Cr, Ni, Ba)</li> <li>• Proceso en el que el suelo contaminado se mezcla con aditivos para inmovilizar los contaminantes, disminuyendo o eliminando la lixiviación.</li> <li>• La solidificación se refiere a las técnicas que encapsulan (atrapan físicamente) al contaminante formando un material sólido y no necesariamente involucra una interacción química entre el contaminante y los aditivos solidificantes.</li> <li>• La estabilización limita la solubilidad o movilidad del contaminante, generalmente por la adición de materiales, como cemento Portland, cal o polímeros, que aseguren que los constituyentes peligrosos se mantengan en su forma menos móvil o tóxica.</li> </ul>
---	---

<b>TÉCNICAS DE REHABILITACIÓN BIOLÓGICAS</b>	
<b>Técnica</b>	<b>Aplicación</b>
<b>Biorremediación</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se utilizan las actividades metabólicas de ciertos organismos (plantas, hongos, bacterias) para degradar (destrucción), transformar o remover los contaminantes a productos metabólicos inocuos.</li> <li>• Dentro de la biorremediación hay varias técnicas de remediación: Bioestimulación, Bioaumento, Biopilas, Biolabranza, Bioventeo, Fitorremediación, y Atenuación Natural.</li> </ul>
<b>Bioestimulación (in situ)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aplicándose en zona no saturada</li> <li>• Circulación de soluciones acuosas (que contengan nutrientes y/u oxígeno) a través del suelo contaminado, para estimular la actividad de los microorganismos autóctonos.</li> <li>• Mejorar así la biodegradación de contaminantes orgánicos o bien, la inmovilización de contaminantes inorgánicos <i>in situ</i>.</li> <li>• La aplicación de este tratamiento depende de la permeabilidad, temperatura, disponibilidad de nutrientes y la presencia de poblaciones microbianas nativas del suelo.</li> <li>• Entre sus limitaciones están la reducción de los porcentajes de biorrestauración debido a la temperatura del suelo, y el riesgo de migración de los</li> </ul>



	<p>contaminantes a las aguas subterráneas.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Se aplica en suelos no saturados.</li> <li>• El tiempo requerido de rehabilitación es de por lo menos seis años, y depende de la extensión de la contaminación</li> </ul>
<b>Bioaumentación (in situ)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• En zona no saturada y saturada</li> <li>• Consiste en la adición de microorganismos vivos que tengan la capacidad para degradar el contaminante en cuestión, para promover su biodegradación o su biotransformación.</li> <li>• El tamaño del inóculo a utilizar, depende de:             <ul style="list-style-type: none"> <li>➢ Tamaño de la zona contaminada</li> <li>➢ Dispersión de los contaminantes</li> <li>➢ La velocidad de crecimiento de los microorganismos degradadores</li> </ul> </li> </ul>
<b>Biopilas (ex situ)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Para la zona no saturada</li> <li>• Dependiendo del grado de contaminación y del tipo de contaminante, se puede combinar con una biodegradación añadiendo una mezcla agua-nutrientes-oxígeno, o con bioventeo, inyección forzada de aire.</li> <li>• Consiste en la formación de pilas de material biodegradable de dimensiones variables, formadas por suelo contaminado en condiciones favorables (nutrientes y aireación) para la biodegradación de los contaminantes.</li> <li>• Pueden ser aireadas de forma activa, volteando la pila, o bien de forma pasiva, mediante tubos perforados de aireación.</li> <li>• Los nutrientes se mezclan con el suelo cuando se construye la pila. El aire se suministra por medio de tuberías colocadas en el fondo y en la parte media de la pila</li> </ul>
<b>Biolabranza (in situ)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Durante este proceso, la superficie del suelo contaminado es tratado en el mismo sitio por medio del arado.</li> <li>• El suelo contaminado se mezcla con agentes de volumen y nutrientes, y se remueve periódicamente para favorecer su aireación.</li> <li>• El sitio debe tener características que permitan prever la migración de los contaminantes a otros</li> </ul>

	<p>sitios. Dentro de estas características están la profundidad del nivel freático, distancias a zonas residenciales y clima.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Se debe cuidar el exceso de humedad, ya que por este puede generarse condiciones ácidas si existen compuestos clorados.</li> <li>• Se requiere sistemas de inyección, galerías filtrantes y rociadores para los sistemas de distribución de los nutrientes, así como extraer agua subterránea para su tratamiento</li> </ul>
<p><b>Bioventeo (in situ)</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Para sanear la zona no saturada</li> <li>• Su objetivo es estimular la biodegradación natural a través de la inyección de oxígeno en pozos para sostener la actividad de los microorganismos degradadores.</li> <li>• Es la combinación de tecnologías de extracción de vapor del suelo con la biorrestauración.</li> <li>• La operación de los sistemas de extracción de vapor del suelo, además de volatilizar Compuestos Orgánicos Volátiles (COV) y Compuestos Orgánicos Semi Volátiles (COSV), estimulan las actividades aerobias de biodegradación en el suelo.</li> <li>• Presenta limitaciones físicas y químicas, como el grado de movimiento del aire a través del suelo.</li> <li>• Las limitaciones químicas involucran el grado de contaminantes volátiles, su biodegradabilidad y solubilidad.</li> <li>• Consiste en una aireación forzada que se va reduciendo en intensidad, ya que primero se busca una volatilización y después el incremento de la biodegradación</li> </ul>
<p><b>Fitorremediación (in situ)</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Es una técnica usada para remover metales pesados en la zona no saturada</li> <li>• Es un proceso que utiliza plantas para remover, transferir, estabilizar, concentrar y/o destruir contaminantes (orgánicos e inorgánicos) en suelos, lodos y sedimentos, puede aplicarse tanto <i>in situ</i> como fuera del sitio.</li> <li>• Consiste en la absorción de contaminantes por las raíces; es la capacidad de algunas plantas para acumular contaminantes en sus raíces, tallos o follaje.</li> <li>• El primer paso para la aplicación de la técnica es la selección de las especies de planta más adecuada para los metales presentes y las características del</li> </ul>

	<p>emplazamiento.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Es una técnica de limpieza pasiva, estéticamente agradable y dependiente de la energía solar.</li> <li>• Se emplean en zonas no muy extensas y donde la contaminación no está a mucha profundidad.</li> <li>• Es una técnica empleada para un amplio rango de contaminantes</li> </ul>
<b>TÉCNICAS DE REHABILITACIÓN TÉRMICAS</b>	
<b>Técnica</b>	<b>Aplicación</b>
<b>Desorción térmica (ex situ)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Para la zona no saturada (vadosa)</li> <li>• Consiste en calentar (90 a 540°C) el suelo contaminado con contaminantes orgánicos, con el fin de vaporizarlos. El calor acelera la liberación y el transporte de contaminantes a través del suelo, para posteriormente ser dirigidos hasta un sistema de tratamiento de gases con el uso de un gas acarreador o un sistema de vacío.</li> <li>• Es un proceso de separación física no destructivo.</li> </ul>
<b>Incineración (ex situ)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Usada en la zona vadosa</li> <li>• Se utilizan altas temperaturas de operación que van desde los 870 a los 1200°C, con la finalidad de volatilizar y quemar compuestos orgánicos y halogenados en presencia de oxígeno.</li> <li>• Los gases de combustión generalmente requieren de tratamiento.</li> </ul>

*Fuente. Iturbe, 1998; Llorca-Llorca y Bautista-Carrascosa, 2004*

## **CAPÍTULO III: MARCO JURÍDICO EN MÉXICO PARA SUELOS CONTAMINADOS**

*Conocer el marco legislativo que rige a México en materia ambiental para suelos contaminados es importante, permite ubicar de manera general las instancias regulatorias y normas oficiales mexicanas que sustentan la toma de decisiones en la remediación.*

*Conocer las Leyes, Reglamentos, Normas que toman carácter obligatorio, es importantes para actuar y apegarse conforme al derecho ambiental.*

### 3.1 MARCO LEGISLATIVO EN MÉXICO

En la actualidad, la regulación y el control del manejo de los materiales peligrosos, los residuos peligrosos y las actividades altamente riesgosas en México es una competencia Federal a cargo de la Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales (SEMARNAT), a través de sus dos órganos desconcentrados el Instituto Nacional de Ecología (INE) y la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA), así como de otras Secretarías con competencia en la materia entre las que destacan la Secretaría de Salud (SSA), de Trabajo y Previsión Social (STPS), de Comunicaciones y Transportes (SCT) y de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural (SAGAR), en lo que concierne a los plaguicidas (INE, 2005).

La legislación ambiental se fundamenta en la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, de donde se desprenden las leyes, reglamentos y normas. Con la promulgación de la Constitución de 1917, surgió legalmente el derecho ambiental y del trabajo como una rama autónoma que fue ubicada dentro del derecho público. Y sus artículos de la constitución en los que se sostiene son:

***En el artículo 4º se menciona el derecho de toda persona a la protección de su salud, señalando que el desequilibrio del ecosistema no afecte a la población y en especial al individuo.***

***El artículo 24º se refiere al uso de los recursos productivos, cuidando su conservación y el medio ambiente.***

***El artículo 27º incorpora el concepto de conservación de los recursos naturales, así como el de prestar atención a los centros de población para preservar y restaurar el equilibrio ecológico.***

***El artículo 73º menciona el aspecto de expedición de leyes en materia de protección al ambiente y de preservación y restauración del equilibrio ecológico.***

En México, al igual que ocurre en otros países, la legislación laboral identifica que la responsabilidad primaria respecto a los riesgos de accidentes y enfermedades laborales, descansa en quienes los crean y se exponen a ellos, por lo cual empresarios y trabajadores deben esforzarse conjuntamente en prevenirlos y controlarlos, con el apoyo de las autoridades y el soporte de los instrumentos reglamentarios y de otro tipo en la materia. Lo anterior se refleja en las disposiciones jurídicas que se refieren a continuación, enmarcadas en la Constitución Política (INE, 2005).

A continuación se presenta en forma de listado, las principales leyes que rigen en los Estados Unidos Mexicanos, de las cuales algunas legislan y regulan directamente actividades ambientales industriales (INE, 2005)

## LEYES

- LEY ORGANICA DE LA ADMISTRACIÓN PUBLICA
- LEY GENERAL DEL EQUILIBRIO ECOLOGICO Y LA PROTECCION AL AMBIENTE
- **LEY GENERAL PARA LA PREVENCIÓN Y GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS**
- LEY DEL TRABAJO
- LEY DE AGUAS NACIONALES
- LEY DE CONSERVACIÓN DEL SUELO Y AGUA
- LEY GENERAL DE SALUD
- LEY FEDERAL SOBRE METROLOGIA Y NORMALIZACIÓN
- LEY FEDERAL DE ARMAS DE FUEGO Y EXPLOSIVOS
- LEY DE PESCA
- LEY FEDERAL DE CAZA
- LEY FEDERAL DE PROCEDIMIENTOS ADMINISTRATIVOS
- LEY FEDERAL DE SANIDAD ANIMAL
- LEY DE SANIDAD VEGETAL
- LEY FEDERAL DEL MAR
- LEY FORESTAL
- LEY GENERAL DE ASENTAMIENTOS HUMANOS
- LEY GENERAL DE BIENES NACIONALES
- LEY MINERA

Por lo anterior, de la ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, Ley de Aguas Nacionales y de la Ley General de Salud, se desprenden los siguientes Reglamentos federales:

### **REGLAMENTOS**

- REGLAMENTOS DE LA LEY DE AGUAS NACIONALES
- REGLAMENTO DE LA LEY GENERAL DEL EQUILIBRIO ECOLOGICO Y LA PROTECCION AL AMBIENTE EN MATERIA DE AUDITORÍA AMBIENTAL
- REGLAMENTO DE LA LEY GENERAL DEL EQUILIBRIO ECOLOGICO Y LA PROTECCION AL AMBIENTE EN MATERIA DE RESIDUOS PELIGROSOS
- **REGLAMENTO PARA LA PREVENCIÓN Y GESTIÓN INTEGRAL DE LOS RESIDUOS**
- REGLAMENTO DE LA LEY GENERAL DEL EQUILIBRIO ECOLOGICO Y LA PROTECCION AL AMBIENTE EN MATERIA DE IMPACTO AMBIENTAL
- REGLAMENTO PARA LA PROTECCIÓN DEL AMBIENTE CONTRA LA CONTAMINACIÓN ORIGINADA POR EL RUIDO

- REGLAMENTO DE LA LEY GENERAL DEL EQUILIBRIO ECOLÓGICO Y LA PROTECCIÓN AL AMBIENTE EN MATERIA DE PREVENCIÓN Y CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN DE LA ATMÓSFERA
- REGLAMENTO PARA PREVENIR Y CONTROLAR LA CONTAMINACIÓN DEL MAR POR VERTIMIENTO DE DESHECHOS Y OTRAS MATERIAS
- REGLAMENTO PARA EL TRANSPORTE TERRESTRE DE MATERIALES Y RESIDUOS PELIGROSOS
- REGLAMENTO FEDERAL DE SEGURIDAD, HIGIENE Y MEDIO AMBIENTE DE TRABAJO
- REGLAMENTO SANITARIO INTERNACIONAL
- REGLAMENTO DE LA LEY GENERAL DE SALUD EN MATERIA DE CONTROL SANITARIO DE ACTIVIDADES, ESTABLECIMIENTOS, PRODUCTOS Y SERVICIOS.

De estos reglamentos, surgen las siguientes normas que son las que rigen a nivel federal para las Auditorías Ambientales y en general para lo que es la Protección Ambiental, Seguridad Industrial y Salud Ocupacional. Las normas ambientales determinan los parámetros y límites máximos permisibles dentro de las cuales se garantizan las condiciones necesarias para el bienestar de la población y la prevención de equilibrio ecológico y la protección al ambiente.

### **NORMAS OFICIALES MEXICANAS**

- NORMAS OFICIALES MEXICANAS EN MATERIA DE DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES
- NORMAS OFICIALES MEXICANAS EN MATERIA DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA
- **NORMAS OFICIALES MEXICANAS EN MATERIA DE SITIOS CONTAMINADOS**
  - NOM-138 SEMARNAT/SS-2003 (Hidrocarburos)
  - NOM-141-SEMARNAT-2003 (Jales Mineros)
  - PROY-NOM-147 SEMARNAT/SS-2006 (Metales Pesados)
  - PROY-NMX-AA-132-SCFI-2006 (Caracterización de suelos contaminados con metales y metaloides)
- NORMAS OFICIALES MEXICANAS EN MATERIA DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA-MONITOREO
- NORMAS OFICIALES MEXICANAS EN MATERIA DE RESIDUOS PELIGROSOS
- NORMAS OFICIALES MEXICANAS DE CARÁCTER EMERGENTE EN MATERIA DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA
- NORMAS OFICIALES MEXICANAS EN MATERIA DE RUIDO
- NORMAS OFICIALES EN MATERIA DE SEGURIDAD E HIGIENE EN EL TRABAJO

- NORMAS OFICIALES MEXICANAS DE LA SECRETARIA DE SALUD
- NORMAS OFICIALES MEXICANAS DE LA SECRETARIA DE ENERGIA
- NORMAS OFICIALES MEXICANAS DE LA SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

En 1971 surgió la Ley Federal de Prevención y control de la Contaminación Ambiental, la cual fue sustituida en 1992 por la Ley Federal de Protección del Ambiente, y que a su vez ésta fue modificada en 1998 publicándose en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 28 de enero de 1988, como Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al ambiente, cuyos objetivos primordiales son preservar, restaurar y mejorar el ambiente, protegiendo los recursos naturales y evitando la contaminación del suelo, aire y agua, mediante disposiciones reglamentarias. Las disposiciones de la última ley de 1988 sugieren mantener un equilibrio ecológico mediante un aprovechamiento racional de los recursos naturales en México. Esta Ley fue modificada, ampliada y publicada en el Diario Oficial de la Federación el 13 de diciembre de 1996 bajo el nombre de Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA).

La LGEEPA se encuentra en seis títulos y compuestas por un total de 214 artículos (incluyendo 10 transitorios); siendo el Título Cuarto “Protección al Ambiente”.

El Título Cuarto de la LGEEPA, consta de lo siguiente:

- Capítulo I “Disposiciones Generales”
- Capítulo II “Prevención y Control de la Contaminación de la Atmósfera”
- Capítulo III “Prevención y Control de la Contaminación del Agua y de los Ecosistemas Acuáticos”
- **Capítulo IV “Prevención y Control de la Contaminación del Suelo”**
- Capítulo V “Actividades y Consideradas como Altamente Riesgosas”
- Capítulo VI “Materiales y Residuos Peligrosos”
- Capítulo VII “Energía Nuclear”
- Capítulo VIII “Ruido, Vibraciones, Energía Térmica y Lumínica, Olores y Contaminación Visual”

Las reformas a la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), publicada en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 13 de diciembre de 1996, constituyen la culminación de un amplio proceso de consulta el cual llevó a precisar y a ampliar algunos de los capítulos de la Ley publicada en 1988. (INE 2005).

Adicional a la LEGEEPA existe la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos (LGPGIR, 2003); en esta ley, se analiza el concepto de “limpieza de un sitio contaminado” y se deja en su lugar el término “remediación”, que no contempla dejar “totalmente limpio” un sitio, y basta con establecer que los



contaminantes presentes no rebasen los límites máximos permisibles estipulados por las Normas Oficiales Mexicanas. En concreto, esta ley proporciona las bases para la clasificación de residuos peligrosos, establece programas para la gestión integral de residuos y fija responsables ambientales acerca de la contaminación y remediación de sitios contaminados (“el que contamina paga”).

Aunado a la anterior ley se encuentra su Reglamento de la LGPGIR (RLGPIR, 2006); en el que se dan las condiciones, los mecanismos y los procedimientos a través de los cuales se debe realizar la remediación de sitios contaminados. De igual manera menciona la “necesidad” de realizar estudios de caracterización previa a las actividades de remediación y en su caso estudios de riesgo ambiental. En la Figura 3.1 se muestra la evolución del marco legislativo mexicano en materia ambiental.

De manera general y considerando las Normas Oficiales Mexicanas y Normas Mexicanas que establecen de manera específica la caracterización, remediación y gestión de los sitios contaminados en México, se muestran en la Tabla 3.1

**Tabla 3.1 Normas Oficiales Mexicanas para suelos contaminados**

NORMA	REFIERE
NOM-052-SEMARNAT-2005	Que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos.
NOM-138-SEMARNAT/SS-2003	Límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y lineamientos generales para la caracterización y remediación de sitios contaminados por hidrocarburos
NOM-141-SEMARNAT-2003	Caracterización de residuos mineros (jales)
NOM-147-SEMARNAT-2005	Límites máximos permisibles de metales pesados en suelos
NOM-133-SEMARNAT-2000	Protección ambiental-bifenilos Policlorados (bpc)-especificaciones de manejo
NMX-AA-132-SCFI-2006	Muestreo y caracterización de suelos contaminados por metales y metaloides
NMX-AA-134-SCFI-2006	Métodos analíticos para la determinación de hidrocarburos en suelos fracción pesada
NMX-AA-141-SCFI-2007	Métodos analíticos para determinar BTEX en suelos
PROY-NOM-AA-105-SCFI-2007	Métodos analíticos para la determinación de hidrocarburos en suelos fracción ligera

*Fuente: Secretaría de Economía, 2011*

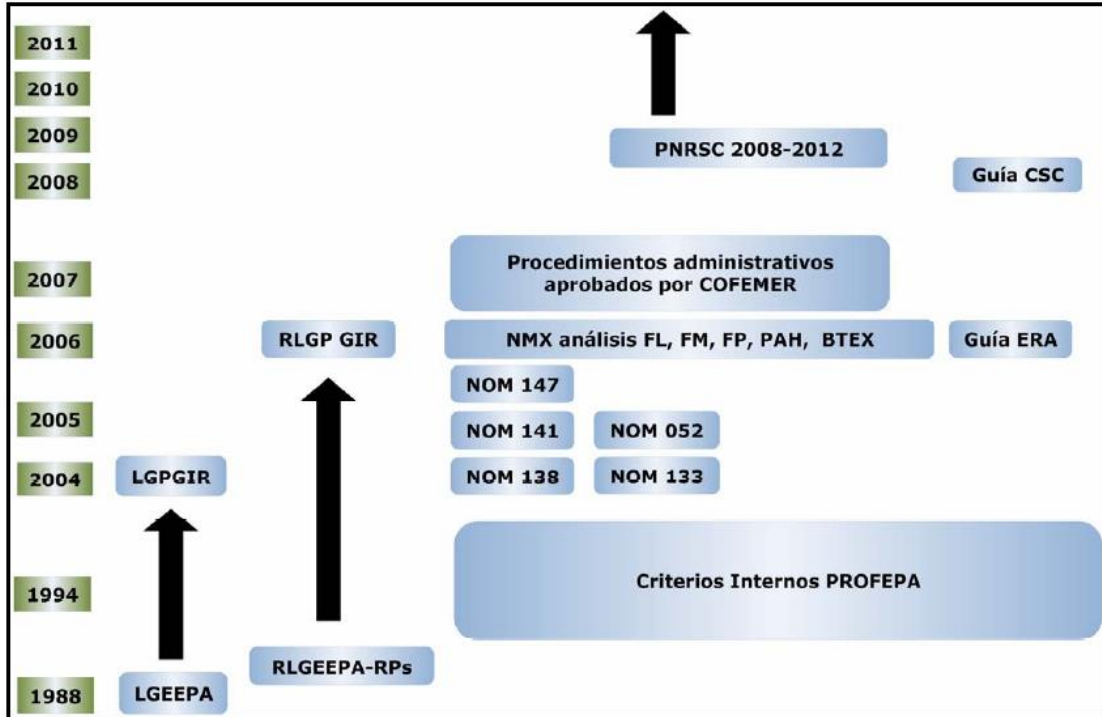


Figura 3.1 Evolución de la legislación ambiental en México. FL: Fracción Ligera; FM: Fracción Media; FP: Fracción Pesada de hidrocarburos; BTEX: Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xilenos totales; HAP: Hidrocarburos Aromáticos Polinucleares; LGEEPA: Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente; LGPGIR: Ley General para la Protección y Gestión Integral de Residuos; ERA: Evaluación de Riesgo Ambiental; CSC: Caracterización de Sitios Contaminados; COFEMER: Consejo Federal para la Mejora Regulatoria; PNRSC: Programa Nacional de Remediación de Sitios Contaminados. PROFEPA: Procuraduría Federal de Protección al Ambiente. Hernadéz, 2010

## **CAPÍTULO IV: CASO DE ESTUDIO**

*El predio que ocupó las instalaciones de la Ex – Refinería 18 de marzo, tuvo hasta el cierre definitivo un uso industrial. Al cierre y derivado de una instrucción del Poder Ejecutivo Federal, se asumió el compromiso de realizar las actividades de saneamiento necesarias para utilizar el predio con fines de uso recreativo, actividades deportivas y parques.*

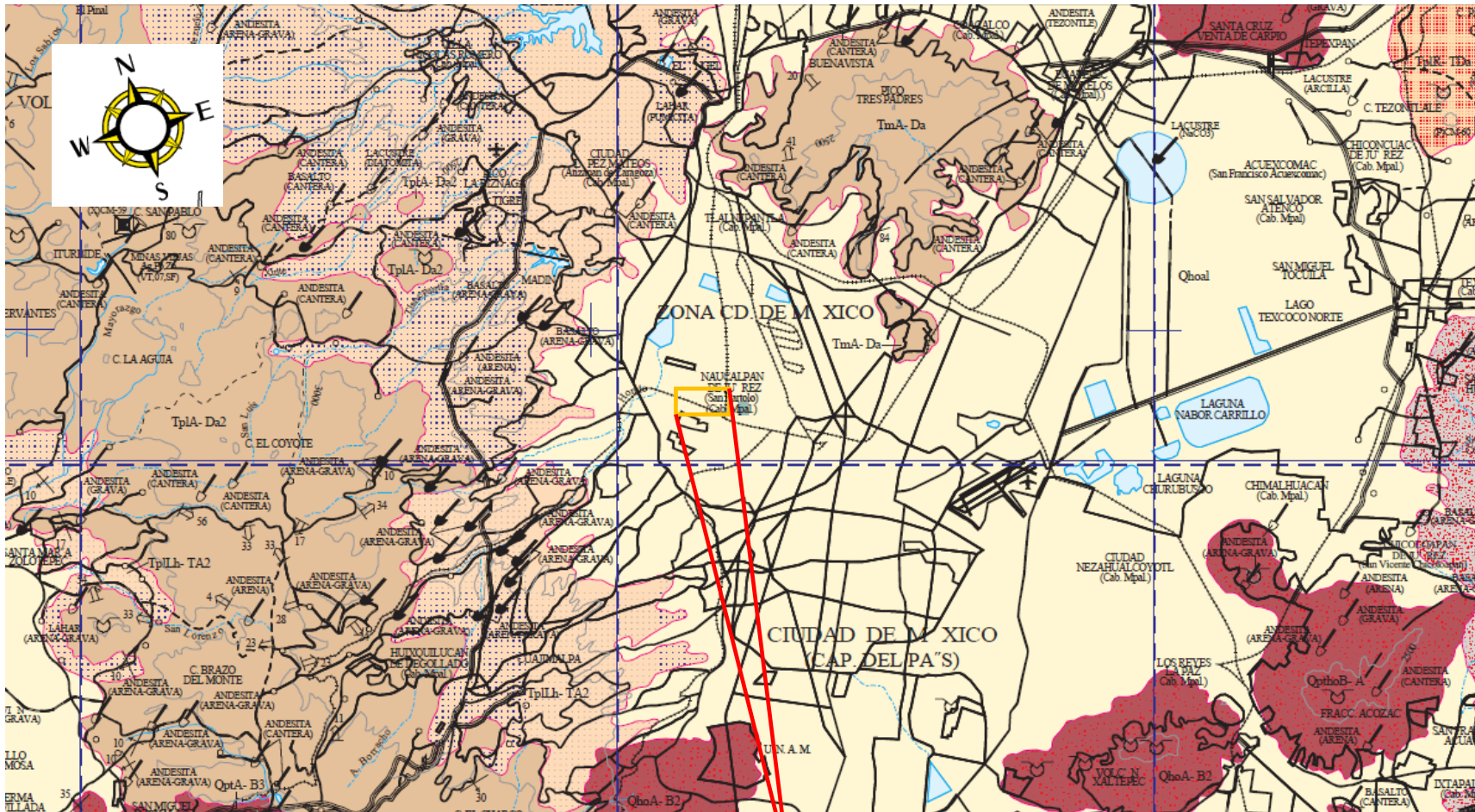
*Para comprender la evolución de la contaminación del sitio, el presente capítulo se enfoca a la descripción geomorfológica así como los antecedentes históricos del sitio que llevaron a la fundación, vida productiva, cierre y desmantelamiento de la que llegó a ser la más grande e importante refinería en México en la década de los años 40s, la conocida Ex – Refinería 18 de marzo en la Ciudad de México.*



El fondo de la Cuenca es una planicie lacustre de 1,431 km<sup>2</sup>, a una altitud que varía entre 2,230 y 2,240 msnm, y se mantiene seca artificialmente. El parteaguas de la cuenca se extiende por la zona montañosa circundante, la que frecuentemente se eleva por encima de los 3,000 msnm (Vera, 2011; INEGI, 2011; Sistema Geológico Mexicano, 2010)

En la figura 4.3, se muestra las características morfológicas de la cuenca. La cuenca está constituida principalmente por material lacustres, aluviales, fluviales y volcánicos (flujos piroclásticos), generando materiales de granulometría variada, (con comportamiento mecánico e hidráulico característicos del materia (Vera, 2011; INEGI, 2011; Sistema Geológico Mexicano, 2010)

Su estratigrafía se ha formado por acumulaciones de lavas, tobas y brechas, las cuales dependiendo de su edad geológica, se hallan en distinto grado de conservación (Vera, 2011; INEGI, 2011; Sistema Geológico Mexicano, 2010).



Ex – Refinería 18 de marzo, Ciudad de México

Figura 4.3 Formación geológica de la Cuenca del Valle de México  
 Fuente: Sistema Geológico Mexicano, 2010



La Zona Metropolitana de la Ciudad de México se encuentra limitada por elevaciones topográficas de origen volcánico como son la Sierra de Guadalupe, el Cerro de Chiconautla y la Sierra Patlachique al norte, la Sierra de Las Cruces al oeste, La Sierra Chichinautzin al sur, el volcán del Ajusco al suroeste y la Sierra Nevada y Río Frío al este. Dentro de este valle existen algunos aparatos volcánicos aislados, siendo los principales los que forman la Sierra de Santa Catarina y existiendo algunos otros que aparecen en forma aislada como son el Peñón del Marqués, el Peñón de los Baños y el Cerro de La Estrella. Figura 4.6 (CONAGUA, 2002; Vera, 2011)

La cuenca, antiguamente drenaba hacia el sur. Las corrientes superficiales que circulaban en dicha dirección fueron interrumpidas por las salidas de productos volcánicos a través de conos que dieron origen a la Sierra de Chichinautzin, dejando el área del Valle de México sin drenaje al exterior quedando confinada en el cuaternario superior, razón por lo que se acumuló agua en la parte central dando origen a los lagos someros como el de Zumpango, Texcoco, Xochimilco y Tláhuac, su eje mayor, desde las Chinampas de Xochimilco al suroeste, hasta las regiones semiáridas de Pachuca al norte, mide unos 110 km su eje menor, desde la Sierra de Las Cruces en el oeste, hasta las cimas del Iztaccihuatl y Popocatepetl en el este, mide unos 80 km. En el extremo oeste del gran lago de Texcoco, se ubica la zona estudiada de la Ex – Refinería le sigue en importancia la Laguna de Zumpango en el noroeste, al sureste el Lago de Chalco, hasta hace poco tercero en importancia, dejó de existir a principios del siglo XX dichos lagos son los últimos vestigios de numerosos lagos mucho mayores que al final de la época glacial, probablemente formaban un solo y gran cuerpo de agua poco profundo (CONAGUA, 2002).

Los materiales que constituyen el subsuelo corresponden a intercalaciones de productos volcánicos tales como lavas, tobas y cenizas que incluyen materiales granulares transportados por ríos y arroyos provenientes de las partes topográficamente altas que circularon hacia los valles. Cubriendo a dichos materiales y en espesores variables, se encuentran arcillas y arenas finas que son el producto del sedimento de los antiguos lagos (CONAGUA, 2002).





Figura 4.5 Cuenca de México y sus subcuencas  
 Fuente. Vera, 2011

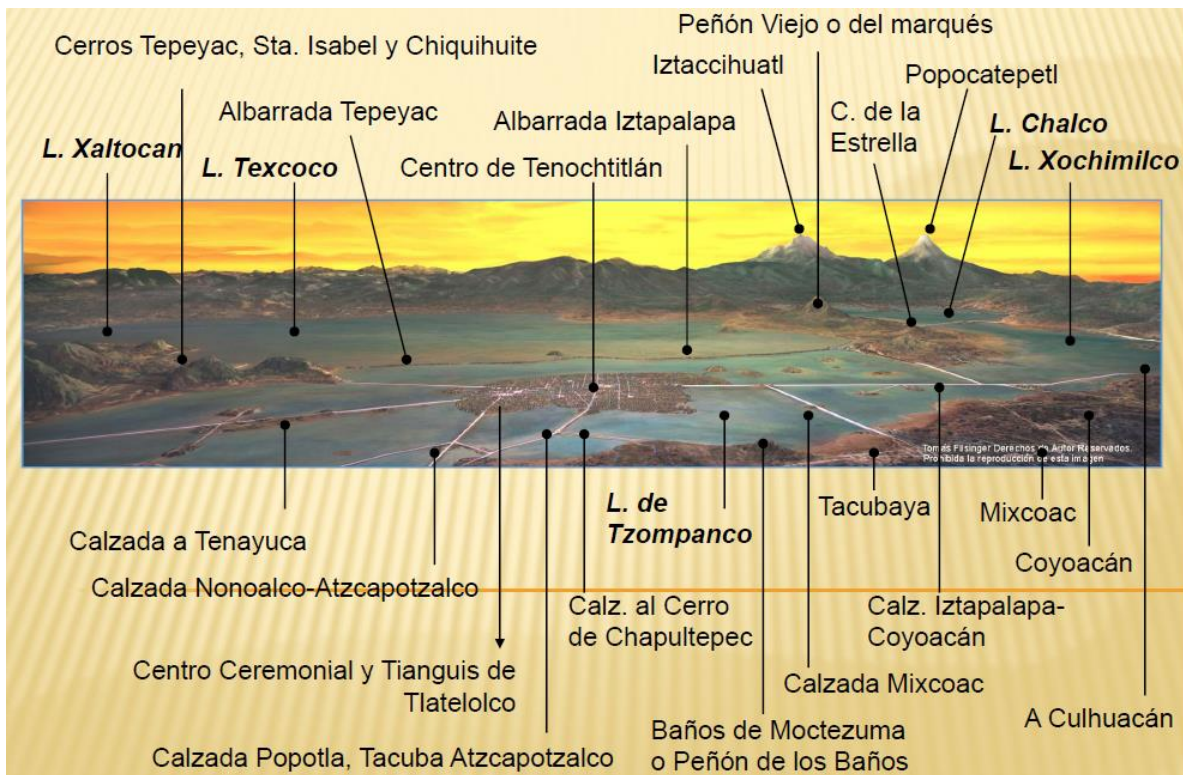


Figura 4.6 Vista panorámica de la relieve del Valle de México en 1519, vista poniente.  
 Fuente. Vera, 2011

## 4.2 HIDROLOGÍA DEL SITIO

El acuífero Zona Metropolitana de la Ciudad de México se encuentra ubicada en el suroeste de la Cuenca del Valle de México, ocupa el 17% de la superficie de la cuenca endorreica. La Ciudad de México y su área conurbada dependen fundamentalmente para abastecimiento de agua potable del suministro del acuífero como se muestra en la tabla 4.1.

Tabla 4.1 Delegaciones y municipios que dependen del acuífero

ESTADO	DELEGACIÓN
D.F.	COYOACAN
	TLALPAN
	XOCHIMILCO
	ALVARO OBREGÓN
	BENITO JUÁREZ
	LA MAGDALENA CONTRERAS
	AZCAPOTZALCO
	CUAJIMALPA DE MORELOS
	CUAUHTEMOC
	GUSTAVO A. MADERO
	IZTACALCO
	MIGUEL HIDALGO
	VENUSTIANO CARRANZA

ESTADO	MUNICIPIO
MÉXICO	ATIZAPÁN DE ZARAGOZA
	HUIXQUILUCAN
	JILOTZINGO
	LERMA
	NAUCALPAN DE JUÁREZ
	TLALNEPANTLA DE BAZ
	XONACATLAN

*Fuente CONAGUA, 2002*

La ciudad y el acuífero están separados, en su mayor parte por un acuitardo arcilloso, el espesor de éste es de alrededor de 50 metros, el acuífero alcanza profundidades mayores a 800 metros; y en él se encuentran pozos con profundidades que oscilan entre 100 y 400 m. (CONAGUA, 2002)

El acuífero Zona Metropolitana de la Ciudad de México pertenece a la región Hidrológica No. 26 Alto Pánuco. La cuenca a la que pertenece el Acuífero Zona Metropolitana de la Ciudad de México es la Cuenca del Valle de México. El acuífero Zona Metropolitana de la Ciudad de México abarca de manera total a las zonas hidrológicas I Xochimilco, II Churubusco, III Ciudad de México y de manera parcial a la región hidrológica VII Texcoco.

La Infraestructura hidráulica que se localiza en las zonas hidrológicas Xochimilco, Churubusco, Ciudad de México y Texcoco; está constituida por presas, ríos y canales entubados en su totalidad; las presas y los ríos se localizan principalmente en la zona poniente del área de estudio, mientras que los canales y ríos entubados se localizan en la porción central de la Ciudad de México. A continuación en la Tabla 4.2 se hace mención de las presas, ríos y canales existentes en las zonas hidrológicas antes mencionadas.

Tabla 4.2 Presas, ríos y canales existentes en las zonas hidrológicas

ZONAS HIDROLÓGICAS	PRESAS, RÍOS Y CANALES EXISTENTES EN LAS ZONAS HIDROLÓGICAS
Zona I Xochimilco	Abarca las cuencas de los ríos que descienden de la Sierra de Chichinautzin, la cual presenta formaciones basálticas de gran permeabilidad. Los principales ríos de la zona son: San Gregorio, Santiago, San Lucas y San Buenaventura. Tiene una superficie aproximada de 522 km <sup>2</sup> , la longitud de las corrientes es de 46.0 km. Carece de información de escurrimientos, los datos disponibles de las dos estaciones hidrométricas consisten básicamente en medición de niveles en las lagunas de Xochimilco y Tláhuac, las corrientes mencionadas tienen un régimen perenne, sus cauces son estables. Los principales canales que se encuentran dentro de esta zona son: Cuemanco, Nacional, Bordo, Apatlaco, Chalco y De Garat, los canales Cuemanco y Apatlaco no se encuentran entubados.
Zona II Churubusco	Comprende principalmente las cuencas de los ríos Eslava, Magdalena, Barrancas San Jerónimo, Anzaldo, Barranca Coyotes, Barranca Texcalatlaco, Barranca Tetelpa, Barranca de Guadalupe, Barranca del Muerto, Tarango y Mixcoac. Debido a las características topográficas y morfológicas de los suelos que se localizan en los cauces son estables, el régimen de la mayoría de estas corrientes es intermitente, sobre todo en su parte alta, ya que aguas abajo las descargas de aguas residuales las han convertido en corrientes perennes, principalmente los ríos Mixcoac, Magdalena y Eslava. A partir de la confluencia de estos últimos se tiene un escurrimiento medio anual de 4.9 millones de m <sup>3</sup> , concentrándose en la época de lluvias, de los meses de julio a octubre, el 81% de estos escurrimientos, la época de estiaje abarca de febrero a mayo, en la que llegan a ser nulos los escurrimientos. Cubre una extensión de 234 km <sup>2</sup> , la longitud de las corrientes principales es de 28 km. Dentro de esta zona se localizan las presas Texcalatlaco y Mixcoac.

Zona III Ciudad de México	Constituida por las cuencas de los ríos Becerra, Tacubaya, Tecamachalco, San Joaquín, Tornillo, Hondo, Sordo, Barranca los Cuartos, Totolica, Chico de los Remedios, San Mateo Nopala, Barranca Tepaxtlaxco, Río de los Remedio, Tlanepantla, y San Javier. Incluye gran parte del área urbanizada de la Ciudad de México y los ríos que bajan hacia ella desde el poniente de la Subregión Valle de México. La gran mayoría de las corrientes son intermitentes, salvo los ríos Tacubaya, San Joaquín, Hondo, y Tlanepantla los cuales tienen escurrimientos perennes.
---------------------------	---

*Fuente CONAGUA, 2002*

La existencia de un acuitardo superior no es más que la secuencia de sedimentos lacustres donde predominan materiales amorfos, vidrio, minerales de arcilla como cristobalita, illita, monmorillonita y allofano, materia orgánica y conchas microfósiles. Este acuitardo de extensión regional tiene mayor espesor hacia el centro de la planicie, y disminuye hacia la periferia de la planicie en donde termina. En la zona de la Ex Refinería 18 de Marzo el acuitardo tiene un espesor de 15 m, y están constituido por sedimentos lacustres, que en superficie están cubiertos por material de relleno de 0.40 a 2.00 m de espesor, que a su vez es cubierto por una capa de concreto de 0.20 a 0.7m de espesor (CONAGUA, 2002).

En la tabla 4.3 se describe de arriba hacia abajo los estratos reconocidos en el área de la Ex-Refinería 18 de marzo se muestra en la figura 4.7 tomados de estudios de caracterización previos.

Tabla 4.3 Descripción de estratos en el área de la ex – refinería 18 de marzo.

ESTRATO	CARACTERÍSTICAS
<b>Primer estrato</b>	Constituido por limo-arcillas y limo-arenas con algunos lentes de arena limosa y arcillosa, la disposición de estos sedimentos imprime cierta heterogeneidad litológica que influye en las propiedades hidráulicas del estrato; se muestra la variación del espesor de este estrato siendo mayor hacia el centro y al oeste de la Ex Refinería. En época seca está subsaturado, en época de lluvia, sobresaturado lo que origina un ascenso del nivel del agua de hasta 2 m. El valor de la conductividad hidráulica (K) varía entre $1.7 \times 10^{-5}$ y $9.1 \times 10^{-6}$ cm/seg. La porosidad de estos sedimentos es de 0.3%, y su almacenamiento especifico es de 0.0005, valores que determinan una velocidad lenta del flujo subterráneo.
<b>Segundo estrato</b>	Está constituido por arena de fina a limosa, por su granulometría es un estrato homogéneo, tiene un espesor promedio de 4.0 m. Este estrato está saturado permanentemente, y constituye un acuífero con un espesor promedio de 2 m. El valor de conductividad hidráulica (K) varían de $1.26 \times 10^{-5}$ a $1.5 \times 10^{-5}$ cm /seg, una porosidad de 0.35% y coeficiente de almacenamiento especifico de 0.03 a 0.005. En época seca el nivel del agua se abate y se recupera en la temporada de lluvia, este horizonte está permanentemente saturado.

<b>El tercer estrato</b>	Constituido por arena de fina a media con minerales de cuarzo y feldespato, en los núcleos obtenidos no se observa la presencia de limos o arcillas. Éste es el estrato de menor espesor 1.70 m en promedio. La conductividad hidráulica (K) varía de $5.1 \times 10^{-5}$ a $2.2 \times 10^{-6}$ cm/seg, su porosidad de 0.4% y coeficiente de almacenamiento específico de 0.0001. Estas propiedades hacen de este estrato un acuífero de productividad baja, pero vulnerable por su conductividad hidráulica.
<b>El cuarto estrato</b>	Caracterizado por ser esencialmente arcilloso no se aprecia intercalaciones de otro tipo de sedimento. Es el estrato de mayor espesor, con base a la información de trabajos precedentes se asignó un espesor de 4m, posiblemente sea aun mayor. La cima de este horizonte arcilloso varía entre 2242 y 2240 msnm. En los núcleos obtenidos de este material se observó abundancia de materia orgánica que origina pequeños micro canales en la arcilla. Los núcleos indican para esta arcilla un grado de saturación de prácticamente 100%, no se manifiesta flujo de agua subterránea. Las propiedades son una conductividad hidráulica $K = 1 \times 10^{-7}$ y $1 \times 10^{-8}$ cm /seg, S de 0.0001, y una porosidad de 0.3 %.

*Fuente: SEMARNAT, 2006 tomado de "Estudios de caracterización"*

## Climatología

Las condiciones climáticas originales de la zona de la Cuenca de México, están hoy día alteradas debido a la carpeta de asfalto que origina un aumento en la irradiación solar, el calentamiento del aire por los automotores e industrias, que además, aportan sustancias gaseosas y sólidas a la atmósfera, la reducción de la cubierta del suelo; todo esto en conjunto ha provocado cambios termodinámicos de la atmósfera (CONAGUA, 2002).

Razón por la cual los elementos del clima como; la temperatura, humedad, precipitación, vientos y evaporación manifiestan variaciones sensibles. La temperatura media anual de 17 °C, mientras que la lluvia media anual es de 750 mm, el volumen promedio de evaporación potencial es de 1558.7566 mm de evaporación potencial (CONAGUA, 2002).

Debido a las características topográficas existentes dentro de la Región XIII Valle de México, se encuentra una gran diversidad de climas. Sin embargo dentro de esta variedad predomina el templado o mesotérmico. Los climas templados se concentran en los valles altos de la parte noroeste del Estado de México, así como en el centro y este de la Subregión Valle de México, ocupando más del 45% de la superficie total de la región XIII; siguen en importancia los climas secos y semisecos que predominan principalmente en la porción centro-norte del Estado de México (CONAGUA, 2002).

Tabla 4.4 Propiedades fisicoquímicas del suelo de la ex – refinería 18 de marzo

	Profundidad (m)	Textura	Densidad Real	Densidad Aparente	Porosidad	Conductividad hidráulica K (cm/seg)	Materia Orgánica
ZONA 7	0.0 - 1.2	Franco arcilloso	2.42	1.55	35.95	3.55*10-6	1.4
	1.2 - 2.4	Arcilla	2.25	1.13	49.78	3.55*10-6	1.3
	2.4 - 3.6	Arcilla	2.35	1.24	47.23	3.55*10-6	2.2
	3.6 - 4.8	Arcilla	2.49	1.14	54.22	3.55*10-6	0.4
	4.8 - 6.0	Limo arcilloso	2.62	1.41	46.18	3.55*10-6	0.9
	6.0 - 7.2	Arena limosa	2.08	0.65	68.75	1.79*10-6	8.1

*Fuente SEMARNAT, 2006*

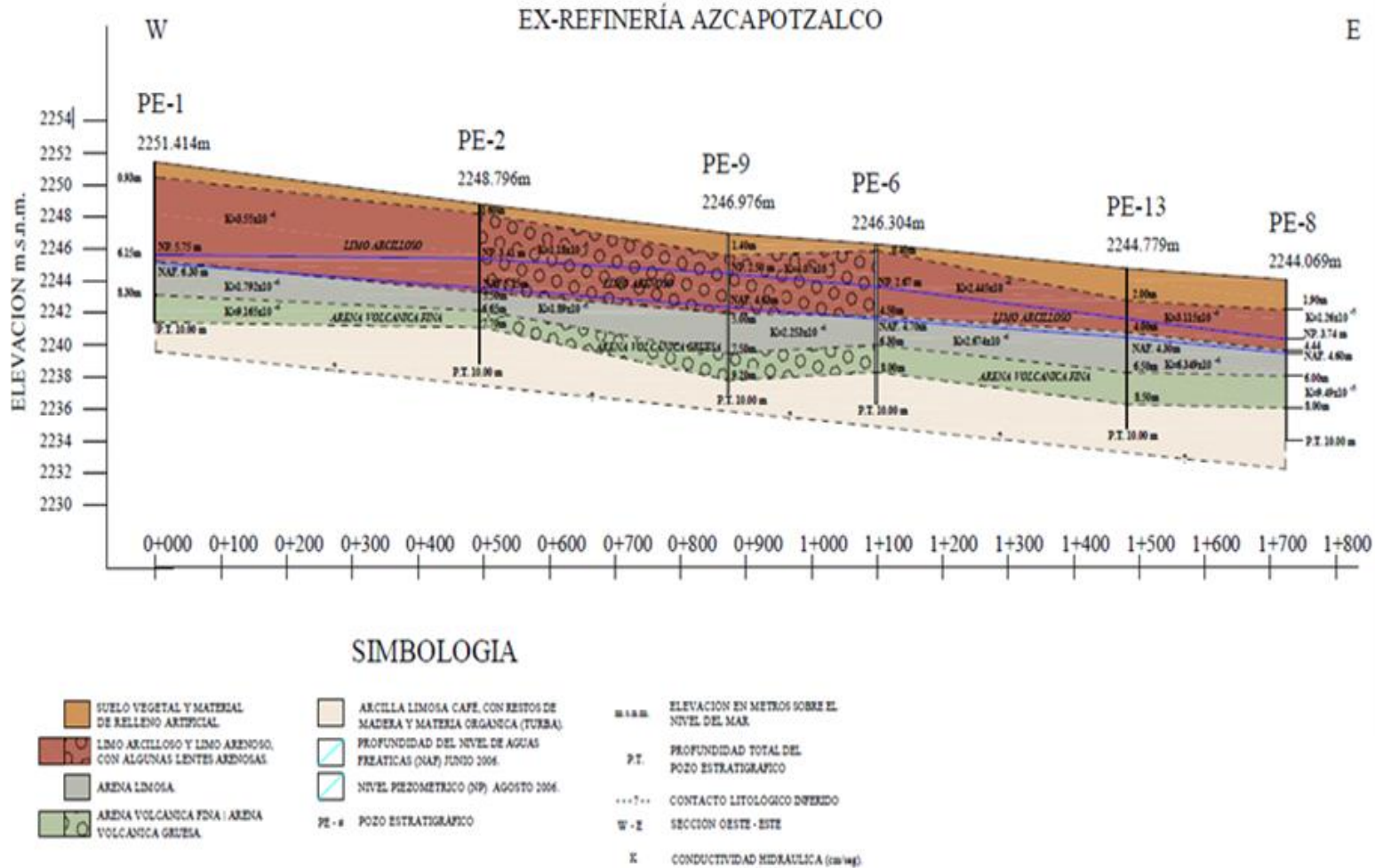


Figura 4.7 Estratigrafía del suelo de la ex – refinería 18 de marzo a una profundidad de 10 metros.  
Fuente. PEMEX, 2006

### 4.3 ANTECEDENTES HISTÓRICOS DEL SITIO: INICIOS

La aparición del petróleo en México de remonta a la época de las culturas Mesoamericanas, en diversas regiones se encontraron huellas de su uso. Pequeñas figuras de arcilla elaboradas principalmente en la zona del Golfo de México con una antigüedad de aproximadamente 2,000 años cuyos rasgos anatómicos y atuendos se resaltaron aplicando chapopote, y son los testimonios prehispánicos más antiguos de su uso. Etimológicamente, el vocablo nahuatl “chapopotli” se forma de dos palabras: **tzouctli**, pegamento o goma, y **popochtli**, perfume u olor. (Celis, 1988; Álvarez, 2006)

El chapopotli se utilizó asimismo, para perfumar el ambiente al quemarse en sahumero junto con el copal, tanto en los hogares como en los templos, en especial durante las celebraciones religiosas; también, fue usado en las mezclas del tabaco que fumaban los antiguos mexicanos para mitigar la fatiga y estimular la digestión, o combinándose con flores olorosas, la vainilla, santamaría, hongos, una o varias raíces y plantas narcóticas, servía para adormecer el organismo. (Celis, 1988; Álvarez, 2006)

Con la llegada de los españoles no existieron cambios importantes en el uso del chapopote, pues debido a su abundancia por naturaleza en la Nueva España y en especial en su costa era vendido a muy bajo precio además, bastaba con el que se encontraba en la superficie para satisfacer la escasa demanda generada por su uso como combustible o pegamento. Mismo recurso que se podía encontrar en la superficie existían manantiales del betún que los conquistadores aprovechaban para brear sus navíos. (Celis, 1988; Álvarez, 2006)

En 1558, los clérigos de la Villa de Guadalupe obtuvieron petróleo de un pozo que brotó dentro de los edificios de La Colegiatura, el que se vendió como medicamento para las reumas y como aceite para hacerlo arder ante las imágenes santas. (Celis, 1988; Álvarez, 2006)

Durante la colonia, el uso del petróleo no fue más variado ni más extendido que en la época precortesiana, y a pesar de que, en sí misma, a la sustancia que se le llamaba betún, pez o alquitrán marino, no fue objeto de una legislación específica, se incluyó dentro del rango que era llamado “**jugos de la tierra**”. El auge que había alcanzado la minería en esos años, llevó a la Corona Española a elaborar un código que regulaba, no solo la explotación de metales si no de cualquier riqueza que pudiese extraerse del subsuelo en la que se incluyeron los jugos de la tierra. Expedidas el 22 de mayo de 1783, las **Reales Ordenanzas para la Minería de la Nueva España** determinaron que, las minas eran propias de la Real Corona, por su naturaleza y origen. Con estas disposiciones vigentes hasta 1884, quedó definido lo que se llamo “dominio inminente” de la Corona Española sobre el subsuelo, al establecerse expresamente que el soberano era dueño absoluto de las riquezas existentes. La noción borbónica de la propiedad, predominó a lo largo



del siglo XIX, cuando a través de la legislación republicana se trasladó el dominio del subsuelo al nuevo soberano: La Nación. (Celis, 1988; Álvarez, 2006)

Para la segunda mitad del siglo XIX, los países industrializados ya buscaban nuevos abastecedores de materias primas, al mismo tiempo que mercados para sus productos. Es entonces cuando comienza la explotación petrolera destinada al comercio internacional. (Celis, 1988; Álvarez, 2006)

Con el desplazamiento de las grasas animales como iluminantes por la sustancia que se nombró como kerosina, junto con la aparición del quinqué, principió la historia moderna del petróleo. Su uso como iluminante propició la búsqueda de nuevos yacimientos de la negra y aceitosa sustancia. (Celis, 1988; Álvarez, 2006)

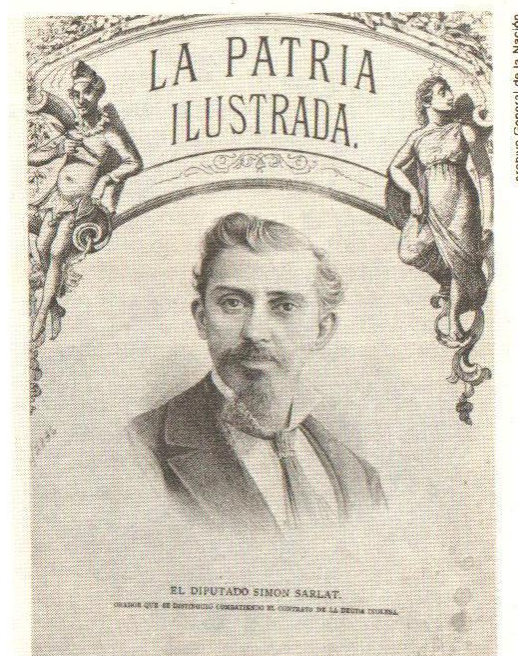
El coronel Edwin L. Drake Figura 4.8 perforó el primer pozo exclusivamente para la extracción de crudo en Titusville, Pensilvania, adoptando la experiencia y tecnología de los perforadores de pozos artesianos. El pozo de Drake resultó un descubrimiento revolucionario, pues demostró que el petróleo podía explotarse en cantidades comerciales al perforar a grandes profundidades bajo el suelo. A partir de entonces la producción de petróleo se incrementó constantemente. Muy pronto el mercado de aceites iluminantes y lubricantes, que hasta 1900 fueron los principales productos derivados, quedó saturado. Las actividades de Drake marcaron el inicio de una nueva industria destinada a transformar la economía mundial, pues la extracción de petróleo, las actividades encadenadas a ésta y los efectos causados en los sistemas de transporte cambiaron por completo las necesidades energéticas tanto humanas como industriales. Asimismo, el surgimiento de la industria petrolera llevó a la conformación de las primeras grandes compañías como la Standard Oil Company, organizada en 1870 por John D. Rockefeller, que hacia finales del siglo XIX controlaba el 90% del refinado, transporte y exportación de petróleo en Estados Unidos. (Celis, 1988; Álvarez, 2006)



Figura 4.8 El coronel Edwin L. Drake,  
Fuente: Celis, 1988

En México, la historia comercial del petróleo se remonta a 1863 cuando un cura de nombre Manuel Gil y Sáenz descubrió un yacimiento superficial, que llamó “Mina de Petróleo de San Fernando”, cerca de Tepetitlán, Tabasco. Gil pensaba comercializar crudo en Estados Unidos y envió diez barriles a Nueva York, donde se comprobó su buena calidad; sin embargo, el auge productivo norteamericano había hecho descender los precios a tal punto que le fue imposible competir dentro de ese mercado. En 1864 Maximiliano intentó promover las actividades petroleras otorgando la primera de una serie de concesiones para la explotación de depósitos naturales. Las concesiones se otorgaron previo denuncia por parte de los solicitantes, tal como lo establecían las ordenanzas de minería de la época colonial, y abarcaron diversas zonas localizadas en Tabasco, norte de Veracruz, sur de Tamaulipas, Estado de México, Istmo de Tehuantepec y Puebla, ninguna de ellas prosperó. (Celis, 1988; Álvarez, 2006)

Simón Sarlat Nova Figura 4.9, médico y gobernador de Tabasco, denunció la “mina” de petróleo de Manuel Gil y reinició su explotación. El petróleo encontrado por Sarlat era de buena calidad, compuesto por un 50% de aceite iluminante. En 1883 formó una compañía cuyo capital de un millón de pesos se reunió con los comerciantes de San Juan Bautista, su pueblo natal, y adquirió equipo norteamericano para las perforaciones. Sarlat terminó por dejar el negocio ante la escasa producción de los pozos y la falta de transportes y mercados. (Celis, 1988; Álvarez, 2006)



Archivo General de la Nación.

Sarlat organizó la primera compañía petrolera en México, hacia 1883.

Figura 4.9 Simón Sarlat Nova médico y gobernador de Tabasco  
Fuente: Celis, 1988

#### 4.4 GRANDES EMPRESAS

El éxito comercial, no obstante, llegó con anterioridad para las actividades dirigidas a la refinación y a la distribución de productos derivados. La primera organización que tuvo resultados económicos positivos en México fue la compañía norteamericana Waters-Pierce Oil Company. Formada en 1873 por Henry Clay Pierce y William H. Waters para comercializar refinados en el suroeste de Estados Unidos, esta firma, subsidiaria de la poderosa Standard Oil, comenzó por exportar sus productos enlatados hacia los mercados mexicanos, pero a partir de 1887 instaló refinerías en las ciudades de México, Tampico, Veracruz y Monterrey. (Celis, 1988; Álvarez, 2006)

Con el general Porfirio Díaz al poder en 1876, México entró en una etapa de estabilidad política luego de vivir una serie de conflictos internos e internacionales que se habían iniciado a partir de la Independencia. La administración de Díaz (1876-1880, 1884-1911) implantó, además, una serie de medidas exitosas encaminadas a sacar al país de un largo periodo de estancamiento económico, entre las cuales figuraba el fomento a la modernización industrial a través de la apertura a la inversión extranjera. Para atraer capitales del exterior, Díaz, continuando el programa liberal iniciado desde tiempos de Juárez, amplió los derechos privados de propiedad reformando el marco jurídico. A partir de mediados de la década de 1880 llegaron a México flujos extraordinarios de recursos financieros que venían principalmente de Estados Unidos y Europa. Las áreas donde estos capitales se invirtieron fueron los ferrocarriles, la minería, las manufacturas industriales, los servicios públicos y el petróleo, entre otras. (Celis, 1988; Álvarez, 2006)

Se da en su gobierno el surgimiento de nuevas industrias, mexicanas o extranjeras, por medio de una política de extensiones fiscales y legislando para abaratar los costos de los combustibles. En este sentido, en 1884 se dio el primer paso para impulsar la producción local de petróleo y carbón a través de una nueva ley minera que revocó el derecho exclusivo de la nación sobre los recursos del subsuelo y lo traspasó al dueño de la superficie. De la misma manera, en 1901 se decretó la primera ley petrolera que autorizaba al ejecutivo a otorgar directamente concesiones de explotación a particulares en terrenos de propiedad federal. (Celis, 1988; Álvarez, 2006)

Por lo tanto, bajo estas nuevas condiciones empresarios extranjeros con capacidad financiera, tecnología avanzada y administración experimentada se sintieron atraídos por la potencialidad de las reservas petroleras y organizaron las primeras grandes empresas, se muestran sus estatutos de algunas de ellas en la Figura 4.10. Estas empresas individuales e independientes centralizaron la producción, transporte, refinación y venta de petróleo por medio de una estructura corporativa de unidades especializadas (divisiones, departamentos y compañías subsidiarias). Los pioneros de la historia industrial del petróleo en México dentro del esquema de la integración vertical fueron el petrolero norteamericano Edward L. Doheny y el constructor británico Weetman D. Pearson, quienes con sus

compañías respectivas, Mexican Petroleum Company y Compañía Mexicana de Petróleo El Águila, dominaron la industria petrolera durante el primer cuarto del siglo XX. La etapa de la producción petrolera a gran escala se inició en México a principios de 1901, cuando la Mexican Petroleum comenzó sus operaciones en El Ébano, San Luis Potosí. En agosto organizó una compañía distribuidora independiente de la S. Pearson & Son, la Compañía de Petróleo El Águila, con la cual entró firme y decididamente al negocio de la distribución al menudeo de productos refinados en el mercado mexicano. Para cuando terminaba el año de 1908, El Águila contaba con 77 agencias de venta y comenzó a construir varios tanques de almacenamiento en las ciudades de México, Puebla, Orizaba y Veracruz y proyectaba poner otros en Celaya, Pachuca y San Luis Potosí. En sus primeros meses de operaciones, El Águila reportó ventas totales por más de 263 000 pesos y de acuerdo con los informes del consejo de administración, el negocio marchaba satisfactoriamente. (Celis, 1988; Álvarez, 2006)



Figura 4.10 Estatutos de algunas de las grandes empresas que surgen en México. Fuente: PEMEX 70 Aniversario, 2008

El creciente éxito de El Águila bajo su bandera que se muestra en la Figura 4.11 como comercializadora le llevó a un enfrentamiento directo con la Waters-Pierce, entonces la mayor distribuidora en el país. La contienda comercial entre las dos compañías consistió en una dramática guerra de precios, que por momentos tuvo tintes de competencia ruinosa, complementada con numerosos ataques publicitarios. En pocos años El Águila terminó por vencer a su competidora, pues contaba con producción propia, pero además, el gobierno de Díaz la apoyó incrementando los impuestos de importación a la Waters-Pierce. En 1909 Pearson hizo los primeros cambios corporativos para fortalecer a su compañía petrolera. Por principio de cuentas traspasó todas las propiedades que la S. Pearson & Son poseía en el norte de Veracruz y conservó la refinería de Minatitlán. De esta manera, El Águila sumaría a sus actividades comerciales las de producir su propio crudo y la firma de ingeniería continuaría controlando las de refinación y exportación de productos derivados. Las propiedades traspasadas a El Águila sumaban 23.1 millones de pesos, con lo cual ésta aumentó su capital a 30 millones de pesos. Asimismo, reorganizó los cuadros directivos de El Águila incluyendo en su consejo de administración a miembros influyentes de la élite política porfirista. Cuando el año llegaba a su fin, El Águila realizó más de 54 000 barriles de productos refinados, 11 700 de gasolina, 3 200 de aceites lubricantes y 530 toneladas de asfalto; tenía 153 agencias de venta distribuidas por todo el país en tres zonas geográficas comerciales (Norte, Central y Sur). Según los informes de los administradores, la compañía dominaba para entonces 50% del mercado nacional. (Celis, 1988; Álvarez, 2006)

No obstante su éxito comercial, El Águila seguía dependiendo del poco petróleo que la S. Pearson & Son producía y del que importaba de Estados Unidos, situación que no duró mucho tiempo. El pozo más productivo que la compañía pudo localizar en toda su historia brotó a finales de diciembre de 1910 en el campamento de Potrero del Llano, al noroeste de Tuxpan. Identificado con el número 4, este pozo alcanzó una profundidad de 1 856 pies (557 metros) y fluyó sin control por algún tiempo con una fuerza de 100 000 barriles diarios. (Celis, 1988; Álvarez, 2006)

La integración de las compañías de Pearson, por otro lado, consistió básicamente en el aumento de las capacidades productivas de El Águila. En 1911 la S. Pearson & Son le traspasó los campos petroleros que poseía en el Istmo y el sureste de México junto con la refinería de Minatitlán, con lo cual la convirtió en una compañía totalmente completa. Respaldada principalmente en la producción de los pozos de Potrero, El Águila construyó una nueva refinería en Tampico que comenzó a operar en 1914 con una producción diaria de casi 8 000 barriles. (Celis, 1988; Álvarez, 2006)

by Thayer Watkins

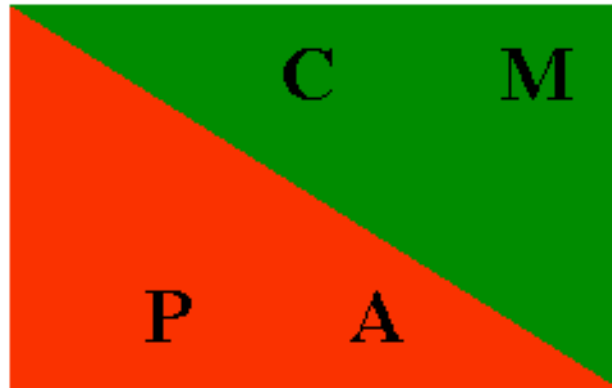


Figura 4.11 Bandera Cia. Mexicana El Aguila  
Fuente: Thayer y Watkins, 2009

A partir de 1928 comenzaron nuevos programas de modernización en las refinerías de Minatitlán y Tampico para atender la creciente demanda interna de productos derivados, especialmente gasolina. El Águila se concentró en desarrollar sus campos del Istmo y del sur de Tuxpan, donde localizó yacimientos importantes en Poza Rica en 1932. Figura 4.12 (Celis, 1988; Álvarez, 2006)



Figura 4.12 Principales yacimientos petroleros en México, 1930,  
Fuente: Thayer y Watkins, 2009

La decisión más sobresaliente de estos años fue la de construir una refinería cerca de la ciudad de México con capacidad inicial de 7 500 barriles diarios. En 1930 y 1931 las autoridades otorgaron los permisos para la instalación del oleoducto que vendría de Palma Sola, Veracruz, y llegaría a Azcapotzalco, luego de recorrer una distancia de 500 kilómetros. La planta fue inaugurada al año siguiente por el Presidente de la República, En la Figura 4.13 se muestra una vista de la Refinería de Azcapotzalco a su inauguración en 1932. El panorama para El Águila era, sin duda, halagüeño, sin embargo la crisis económica mundial dio lugar a una reducción dramática de la demanda de productos petroleros y los precios cayeron nuevamente. En 1931 El Águila operó con pérdidas y suspendió definitivamente las inversiones por falta de capital. En 1934 los precios volvieron a subir y la compañía pudo explotar el rico yacimiento de Poza Rica, que la llevó a ser la productora más importante hasta la expropiación cardenista de 1938. (Álvarez, 2006; PEMEX, 1956)



Figura 4.13 Vista panorámica de la Refinería de Azcapotzalco en su inauguración en 1932.

*Fuente: PEMEX, 2008*

#### **4.5 TRANSFORMACIÓN DE LA REFINERÍA DE AZCAPOTZALCO (1932-1938) A 18 DE MARZO (1946-1991).**

La Ex-Refinería “18 de marzo” inició sus operaciones en 1932 y realizó actividades de refinería, almacenamiento y distribución durante 59 años hasta su cierre el 18 de marzo de 1991. A lo largo de este periodo se generó un pasivo ambiental como consecuencia lógica de décadas de operación durante las cuales existieron fugas y derrames de los hidrocarburos que se manejaban, mismos que impactaron el suelo (SEMARNAT, 2006; Thayer y Watkins, 2009; Álvarez, 2006; PEMEX, 1956)

Hasta antes de 1933 el uso predominante del suelo era con fines agrícolas, destinado principalmente para el cultivo de maíz. La fundación data del año de 1932 e inició en la parte noreste. Para 1936 se amplió el sitio para ese año el uso de suelo industrial tenía un área de 60 ha aproximadamente. Lo que se reflejó en la capacidad instalada que varió de 7500 bls/día a 11,000 bls/día. Nuevamente se presenta un crecimiento importante que se da en los siguientes 10 años periodo comprendido entre 1936 y 1946, alcanzándose una producción de 50,000 bls/día las nuevas instalaciones fueron inauguradas el 20 de noviembre de 1946. Sin embargo el excelente comportamiento que se presentaba en la producción y la demanda hicieron que entre 1938 y 1954 el consumo nacional de combustibles se incrementara en cuatro veces más y por ende la demanda de mayor importancia se reflejaba en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Ejemplo de este fenómeno es que en 1954 el consumo de gasolina de la capital del país y de su zona conurbana fue del doble del consumo nacional que en 1937. (PEMEX, 1956; Ruiz, 1988)

Durante la administración de Efraín Buenrostro en Petroleros Mexicanos (PEMEX), sucedieron grandes problemas de escasez que afectaron a todo México, y una serie de conflictos políticos y sociales que atravesaba el país, se consideró de manera prioritaria la reorientación definitiva de la industria petrolera para la satisfacción de las necesidades de la economía nacional. En este sentido, resultó imprescindible su edificación de la refinería de Azcapotzalco, puesto que además de ser un testimonio de la perseverancia con que se actuó para alcanzar las metas fijadas pese a grandes conflictos, se convierte en la piedra angular para la expansión de la industria petrolera mexicana. (SEMARNAT, 2006; Thayer y Watkins, 2009; Álvarez, 2006; PEMEX, 1956; Ruiz, 1988)

Debido a una gama de contratiempos, la puesta en marcha de la modernización de las instalaciones, originalmente prevista para las postrimerías de 1945, se tuvo que posponer primero al 18 de marzo del año siguiente; posteriormente al 16 de septiembre; pero como en esa fecha los trabajadores de la sección 2 no habían sido capacitados aún en el funcionamiento de la planta, la inauguración formal no fue sino hasta el 20 de noviembre de 1946, siendo señalada por el entonces director de PEMEX como el conjunto de instalaciones de mayor importancia, construidas hasta ese entonces en México para el sector industrial petrolero y se convertía en una gran trascendencia hacia la modernización de la industria. Dando como resultado que la llamada Refinería de Azcapotzalco se rebautizara bajo el



nombre de 18 de Marzo. En 1945 sufrió una modernización total abandonándose prácticamente las instalaciones antiguas y construyéndose una nueva refinería con capacidad de 50,000 barriles diarios. Durante ese (SEMARNAT, 2006; Watkins, 2009; Álvarez, 2006; PEMEX, 1956; Ruiz, 1988)

El crecimiento de la demanda de energéticos continuó de manera vertiginosa y el sector petrolero tuvo como tarea no solo resolver las nuevas demandas sino prever las futuras demandas y una de sus soluciones fue la construcción de nuevas instalaciones. De esta manera en Mayo de 1954 se inicia con una ampliación importante en las capacidades de refinación y a finales de 1955 se ponen en operación nuevas plantas, con ello para 1955 se alcanza la totalidad del área en uso que es de 174 ha, y llega a 100,000 bls/día su producción cifra que no aumenta significativamente para los años 90's, en noviembre de 1958 se ponen en servicio plantas de reprocesamiento que aumentan los rendimientos de crudo mejorando la calidad de los productos. Unidades de proceso que incluyen principalmente una planta para la desintegración catalítica "sistema fluido", con su secuencia de destilación al vacío para proporcionarle carga y plantas para polimerización, concentración y fraccionamiento de los gases producidos. (SEMARNAT, 2006; Thayer y Watkins, 2009; Álvarez, 2006; PEMEX, 1956)

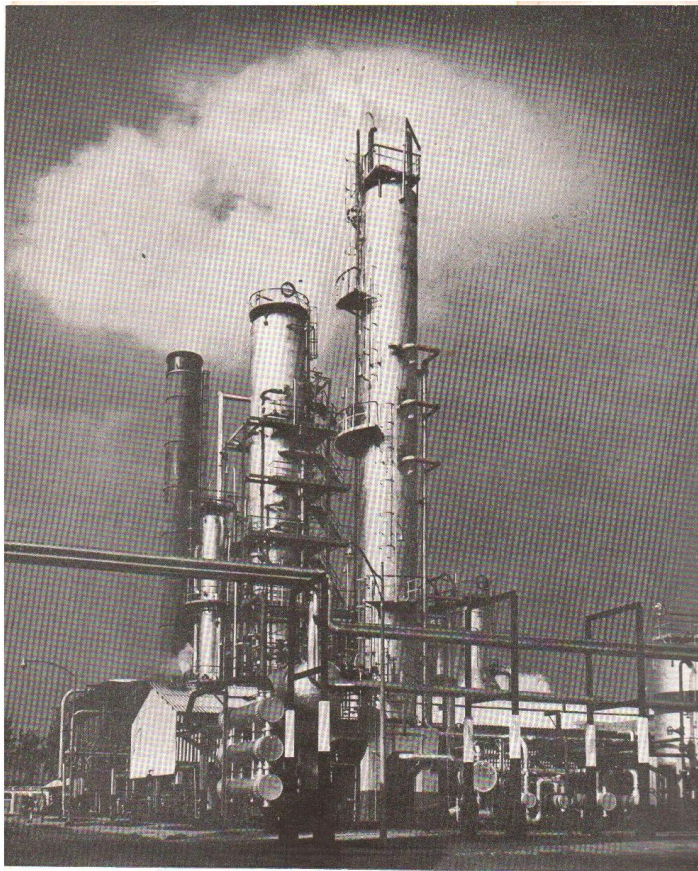
La planta polimerizadora produciría además de gasolina polimerizada, de alto octano, otro polímero que constituye la materia prima básica para la elaboración de detergentes. Como resultado de la operación de esta planta catalítica, se inicia la ampliación de la planta de alquilación ya existente, ampliando la materia prima para la elaboración de de gasaviones. Aunado a ello, se construyen plantas para la concentración de etileno que se usaría en la fabricación de materiales plásticos así como, una nueva planta para la utilización de ácido sulfhídrico separado y recolectado en las diferentes unidades de la refinería. Con estas obras, la Refinería quedaría en condiciones de suministrar al mercado gran variedad de productos, así como gasolinas, para automóviles, de índices de octano mayores, con objeto de estar en condiciones de satisfacer las necesidades futuras de la industria automotriz. (SEMARNAT, 2006; Álvarez, 2006; PEMEX, 1956)

Para lo cual las plantas que integrarían el complejo de la refinería de Azcapotzalco hasta 1958 quedarían de la siguiente manera: (PEMEX, 1956) se muestran algunas Figuras de la 4.14 a la 4.17 de las instalaciones mencionadas.

- 2 desaladoras de crudo
- 2 unidades de destilación primaria
- 1 planta de fraccionamiento de gases
- 1 planta para la desintegración térmica sistema Dubbs
- 2 plantas para desulfuración catalítica de la gasolina con equipo adicional para despentanizar, fraccionar y estabilizar la gasolina
- 1 planta de alquilación
- 1 planta de isomerización de butano

Los productos finales que se obtenían a partir de de procesar 90,000 barriles diarios de una mezcla de 80,000 barriles de Poza Rica y 10,000 barriles de crudo de Ezequiel Ordoñez son los siguientes: (PEMEX, 1956)

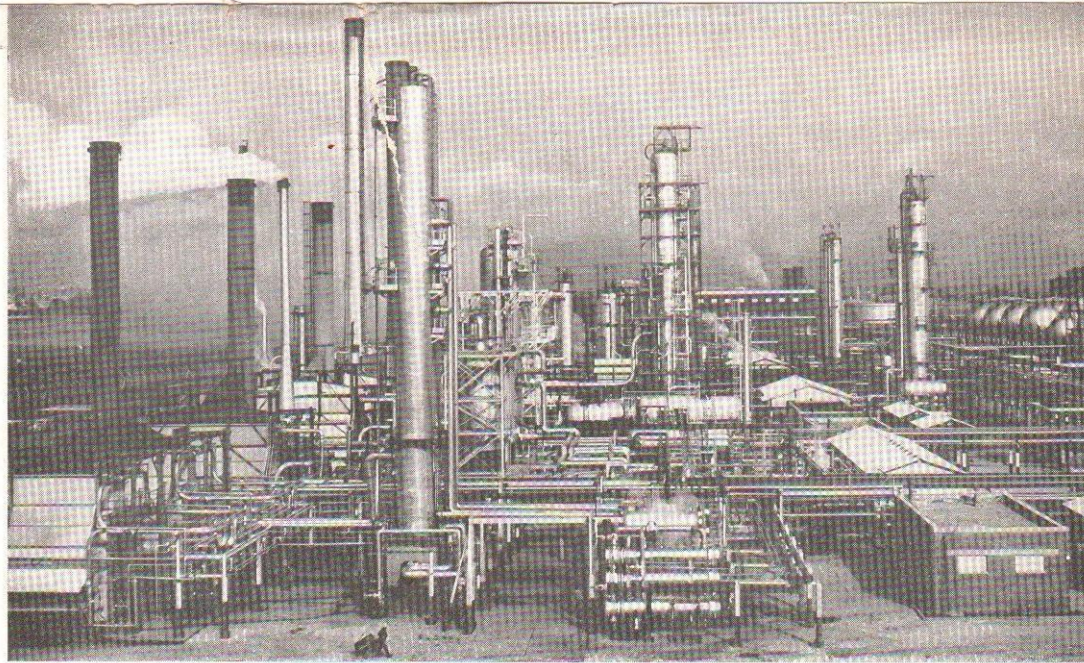
- Gas PEMEX
- Gasaviones
- Gasolinas
- Solventes
- Kerosinas
- Gasóleos
- Combustóleos



*Planta de destilación primaria.*

Figura 4.14 Planta de destilación primaria en la Refinería de Azcapotzalco

*Fuente: PEMEX, 1956*



*Vista general: En primer término Plantas "Perco".*

Figura 4.15 Vista general de las Plantas en la Refinería Azcapotzalco  
*Fuente: PEMEX, 1956*



*Torres de fraccionamiento de gases.*

Figura 4.16 Torre de fraccionamiento de gases  
*Fuente: PEMEX, 1956*



*Planta de desintegración térmica "Dubbs".*

Figura 4.17 Planta de desintegración térmica "Dubbs"  
Fuente: PEMEX, 1956

Con todas estas modificaciones que se le hicieron a la refinería se convierte en la instalación de mayor importancia del sistema petrolero quien llegara a representar el 35% de la capacidad de refinación nacional para 1975 la extensión de las instalaciones de la refinería ya cubrían una superficie de 174 ha, para la década de los 90's con modificaciones y pequeñas ampliaciones se llegó a su máxima capacidad de producción, 105,000 bls/día. Hasta ese momento la refinería se encontraba integrada por 14 plantas de refinación, 3 plantas petroquímicas, servicios auxiliares, casas de bombas, quemadores de campo, 218 tanques de almacenamiento planta de tratamiento de aguas residuales, talleres, almacenes, edificios administrativos, baños vestidores, central contra incendio, laboratorios, terminal de especialidades y lubricantes, colonia de empleados, zona recreativa, campos deportivos y áreas verdes. La misma deja de operar en el año de 1991 del 18 de marzo, su cierre consideró diversos trabajos y acciones tales como son: desmantelamiento y reubicación de instalaciones; saneamiento ambiental del área; construcción de la nueva terminal de almacenamiento y distribución; construcción de un parque ecológico recreativo y un parque ecológico (SEMARNAT, 1998; SEMARNAT, 2006; PEMEX, 1956).

El sitio de la ex-refinería por su estructuración de superficie en una parte norte y otra sur las cuales están debidamente separadas por una avenida de cuatro carriles. En la zona norte se encuentran las que fueran las primeras instalaciones de producción. Al sur se encuentra el sitio de transferencia de la diversidad de productos con talleres y tanques, así como en el extremo de la zona lo que era la planta de azufre (SEMARNAT, 1998; PEMEX, 1956).

Dentro del área norte del sitio se localizaban las siguientes unidades, en su centro, las anteriores instalaciones de producción (planta etílica, planta de alquilación, planta reductora de viscosidad, el quemador de aceites solubles, la planta McKee, planta desulfuradora, planta de estabilizadores, planta fraccionadora de gases, unidades de refrigeración, planta de luz y laboratorios). Hacia el norte siguen los depósitos esféricos elevados que principalmente albergan gases o gases líquidos. Estos colindan con la zona del Parque Ecológico mismo que formó parte de la anterior superficie útil. De su lado norte se localizaba la planta de tratamiento de agua con su separador de aceite API, los estanques de retención, unidades como de bomberos, vestidores, edificios administrativos y unidades de higiene, así como talleres, estación de bombeo y diversas unidades de control (SEMARNAT, 1998; PEMEX, 1956).

En la Tabla 4.5 se listan las principales etapas de la Ex-Refinería “18 de Marzo” (SEMARNAT, 2005; SEMARNAT, 2006).

Tabla 4.5 Cronograma de la Ex – Refinería 18 de Marzo

AÑO	ACTIVIDAD
<1932	Uso del predio con fines agrícolas
1933	Inicia la refinería operaciones con una producción inicial de 7,500 bls/día
1936	Zona agrícola en la mayoría del predio
1938	Primera ampliación en la capacidad de refinación que llega a los 11,000 bls/día
1945	Se procesaban y almacenaban 50,000 bls/día. Se construyen tanques de almacenamiento, algunos operaron hasta el cierre de la refinería en 1991. La extensión de las áreas suman las 100 ha
1958	Se han realizado ampliaciones importantes, se ponen en servicio plantas de reproceso que aumentan los rendimientos de crudo y mejoran la calidad de los productos. La refinería alcanza la cima con una capacidad instalada de 100,000 bls/día
60's	En los inicios se comienza la construcción del tanque TV-7 de 200,000 barriles de capacidad
60's	A mediados, se construye TV-2 y TV-3 similares a TV-7, los cuales operaron hasta el cierre
1975	La refinería alcanza su máxima producción de 105,000 bls/día, así como en la extensión de sus instalaciones con una superficie ocupacional de 174 ha
1991	Cierre de las instalaciones de la refinería 18 de Marzo

Fuente: SEMARNAT, 2005; SEMARNAT, 2006

#### 4.6 CIERRE DE LA REFINERÍA 18 DE MARZO

Durante el sexenio del Lic. Carlos Salinas de Gortari, tras una serie de serios conflictos político-sociales nacionales e internacionales se destacó en el período la noticia del cierre definitivo de la Refinería 18 de marzo ubicada en la Ciudad de México. La acción, por demás justificada, de acabar con uno de los principales focos de contaminación ambiental que existían en la ciudad de México, no evitó sin embargo que se fuera más allá de las razones ecológicas; los detalles prácticos para la aplicación de la decisión presidencial recayeron en la dirección nacional del sindicato, y con este poder, se afectaron derechos laborales, en el más puro estilo corporativo, se aplicaron criterios de modernización industrial. (Bolívar et al, 1991)

Primero se declaró que los 5 mil trabajadores adscritos a la Refinería, 2 mil 600 podrían ser jubilados y el resto liquidados en condiciones superiores a las marcadas por la ley; después, la dirección sindical matizó: del total de personal sujeto a liquidación, existen mil 500 trabajadores transitorios, a éstos, se dijo, se les indemnizará conforme a lo dispuesto por la ley y no conforme a lo estipulado en el contrato colectivo; posteriormente, y en contra de lo expuesto por el primer mandatario el día que anunció el cierre de la Refinería, los líderes sindicales decidieron cerrar también la planta de gas embotellado, la terminal de especialidades y lubricantes y los talleres de fabricación, espacios productivos que por no contribuir a la degradación del medio ambiente se había acordado conservarlos. La unilateral decisión de los jefes sindicales hizo que, además de que se pusieran a disposición de la iniciativa privada las actividades lucrativas y no contaminadoras que se cerraba, se denunció además que unos mil 200 trabajadores transitorios con antigüedad menor a los cinco años, no recibirían indemnización, simple y llanamente serían echados. (Bolívar et al, 1991)

Así, aprovechando el cierre de una planta industrial de gran contaminación, la dirección sindical encontró la ocasión precisa para cobrarse, por un lado, de viejas cuentas con la disidencia sindical en la Refinería -el Movimiento Petrolero Independiente Lázaro Cárdenas-; y por el otro lado, para beneficiarse por intermedio de la compañía Proyectos y Construcciones Sociales 18 de Marzo S.A. de C.V., propiedad -se denunció- del secretario general del sindicato petrolero, Sebastián Guzmán Cabrera, mediante la cual se obtendría el manejo de los tres espacios productivos no contaminantes de la Refinería: gas embotellado; terminal de especialidades y lubricantes y talleres de fabricación. (Bolívar et al, 1991)

Entre los años 40s y 80s la expansión de la mancha urbana de la Ciudad de México hacia el norponiente condujo a que la refinería quedara rodeada de zonas industriales y habitacionales, generando diversas situaciones conflictivas y representando cada vez un riesgo mayor en términos ambientales y de seguridad para la ciudad y sus habitantes. La Refinería 18 marzo era una de las principales industrias contaminantes de la zona metropolitana. Se estimó que emitía a la atmósfera aproximadamente 85,000 toneladas por año de sustancias nocivas,

entre las más importantes: bióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono, partículas en suspensión, compuestos orgánicos volátiles y ácidos fluorhídrico y sulfúrico. Con la suspensión de las operaciones en las plantas de proceso de la Refinería 18 Marzo, se pretendió disminuir el 2% del total de contaminantes emitidos a la atmósfera del Valle de México. En el Informe del Sr. Presidente Carlos Salinas de Gortari, llevado a cabo el 10 de noviembre de 1991, dentro del Capítulo de Acciones Ecológicas, se refirió al cierre de la Refinería "18 de Marzo" en los siguientes términos: (PEMEX, 2006)

*"Desde hace poco más de una década iniciamos en México un proceso institucional, serio y consistente, para atacar los problemas del entorno. Estamos avanzando en la solución de cuestiones ancestrales que han ocasionado la depredación de los recursos naturales y un deterioro progresivo de la calidad de vida en las principales ciudades del país, particularmente en la zona metropolitana de la ciudad de México. Por eso, hemos hecho obligatorio que las diversas dependencias y empresas federales integren el criterio ambiental en todos sus proyectos y actividades. Muestra de ello ha sido la decisión que tomamos de cerrar la Refinería 18 de Marzo, en Azcapotzalco, en cuyo lugar se asentará un parque, espacio de recreación para los habitantes y nuevo pulmón para la ciudad. Esta decisión implicó..."* (PEMEX, 2006)

En 1991 el gobierno federal decidió el cierre de la refinería tras 60 años de operación continua de la misma, llevando a cabo en los años siguientes su desmantelamiento, conservando únicamente la zona de la terminal de distribución de combustibles ubicada en la zona surponiente del área original de la refinería. (PEMEX, 2006)

En la figura 4.18 se muestra el aspecto de la Refinería 18 de Marzo a su fecha de cierre.



Figura 4.18 Instalaciones de la Refinería 18 de Marzo a su cierre en 1991  
Fuente: PEMEX, 2008

#### 4.6 DESMANTELAMIENTO DE LA REFINERÍA 18 DE MARZO

Además del proceso de refinación, se realizaban en ella otros procesos petroquímicos. Funcionaba también un taller de reparación y elaboración de partes de maquinaria para la refinería y otras empresas de Petróleos Mexicanos, una planta de tratamiento de aguas residuales y una central de distribución de combustibles.

La operación de la refinería se suspendió en forma definitiva el 18 de marzo de 1991, como consecuencia de una decisión para detener el deterioro progresivo del medio ambiente y la calidad de vida en la zona metropolitana de la Ciudad de México, que por esas fechas presentaba altos índices de contaminación ambiental.

Durante los años de 1992 a 1999 se llevó a cabo el desmontaje de equipos y desmantelamiento de estructuras propias de la refinería y de los tanques de almacenamiento, hasta quedar en el estado que ahora se encuentra. En las figuras de la 4.19 a la 4.22 se puede apreciar sus diferentes etapas del desmantelamiento de la Refinería 18 de Marzo.



Figura 4.19 Vista de la Refinería 18 de Marzo en 1998  
*Fuente: PEMEX, 2008*





Figura 4.20 Vista de la Refinería 18 de Marzo en el 2001  
*Fuente: PEMEX, 2008*

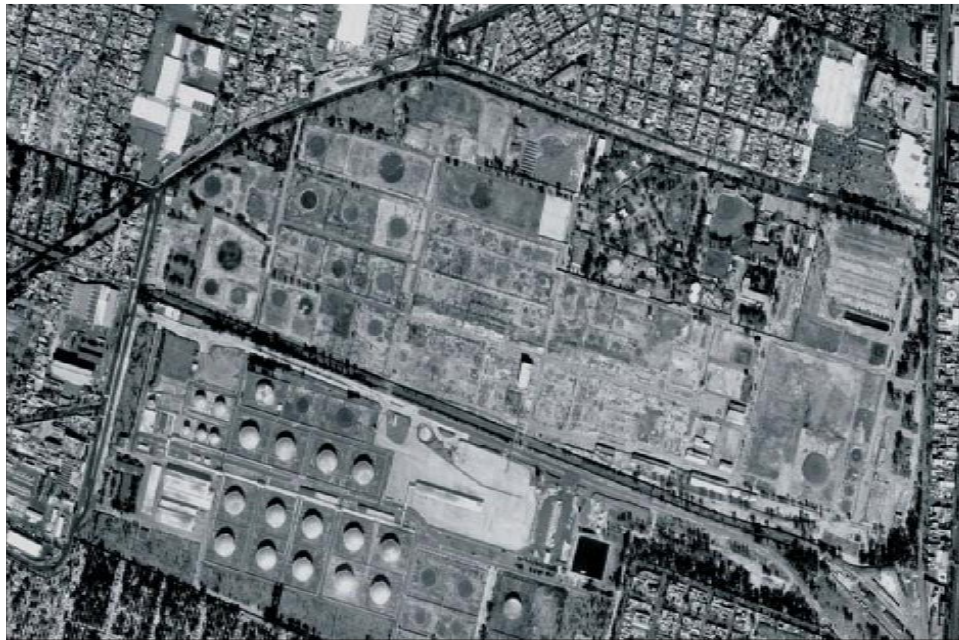


Figura 4.21 Vista de la Refinería 18 de Marzo en el 2002  
*Fuente: PEMEX, 2008*



Figura 4.22 Vista de la Refinería 18 de Marzo en el 2004.  
*Fuente: PEMEX, 2008*

Cabe destacar que desde 1993 se han venido desarrollando trabajos de investigación para determinar la contaminación del suelo del lugar, así como de las aguas subterráneas. (CAMARA DE DIPUTADOS, 2006)

Desde que se decidió cerrar la refinería se consideró la posibilidad de crear un parque, con el objetivo de recuperar áreas verdes para la recreación de los habitantes del valle de México y para mantener el equilibrio de la dinámica urbana y ecológica de la región. (CAMARA DE DIPUTADOS, 2006)

Todo eso ayudaría a dar cumplimiento a diversas disposiciones y ordenamiento ambiental, como el Programa para Mejorar la Calidad del Aire de la Zona del Valle de México. La posibilidad de utilizar el terreno de la antigua refinería de Azcapotzalco para diversos usos alternativos, como el que se menciona, tiene obviamente una relación directa con el riesgo asociado que representa para la población expuesta a las emanaciones que generan, en este caso, los hidrocarburos en el subsuelo, y que han sido detectados mediante estudios realizados por algunas dependencias de la iniciativa privada y pública, en esta última interviniendo en gran medida las instituciones educativas como son universidades. (CAMARA DE DIPUTADOS, 2006)

Al cierre de las instalaciones, se habilitaron las siguientes áreas:

- En la parte sur del predio se habilitó una terminal de almacenamiento y distribución de combustibles, sobre una superficie de aproximadamente de 65 ha
- En el norte del predio, sobre una superficie de 9 ha, se habilitó un Parque Ecológico, actualmente independiente de las demás áreas de la ex-refinería

En la parte sur del área se usó la superficie como almacenamiento para la diversidad de productos así como un lugar de transferencia. La zona sur se caracterizó por instalaciones de carga que principalmente fueron de líquidos ubicados en el centro del área, mismos que se acompañaban de sus respectivas unidades de control y bombeo así como los tanques que la rodeaban hacia el oeste y sur. A ello le seguía la estación de bomberos, el edificio de administración, los talleres y el área de acceso. Parecida a la zona norte también atravesaban diversos ductos de suministro y desalojo. También existen dos sistemas de canalización una enfocada a las aguas residuales industriales y otro para las aguas residuales normales y pluviales. Una particularidad de la zona sur son los numerosos ductos de producto que eran controlados por complejo sistema de supervisión (SEMARNAT, 1998).

En la Tabla 4.6 y figura 4.23 se muestra la secuencia cronológica del desmantelamiento de las diferentes instalaciones que conformaban la Refinería 18 de Marzo, así como el destino de la infraestructura retirada.

Tabla 4.6 Desarrollo cronológico del desmantelamiento de la Refinería 18 de Marzo.

Instalación	Año de desmantelamiento	Destino/Refinería
Planta catalítica (AE)	1991 - 1993	Cadereyta, N.L.
Planta de Tetrámero (AQ)	1992	Salamanca, Gto.
Planta de Alquilación (AR)	1993	Cadereyta, N.L.
Planta primaria No. 2	1993	Salamanca, Gto.
Planta fraccionadora	1993-1994	Ciudad Madero, Tamaulipas
Planta recuperadora de azufre (AX)	1993	Cadereyta N. L.
Planta preparadora de carga (A1)	1994	Salamanca, Gto.
Planta de dodecibenceno (AU)	1994	Salamanca, Gto.
Planta despentanizadora No. 2	1995	Salamanca, Gto.
Planta estabilizadora (AF-2)	1995	Salamanca, Gto.
Planta de tratamiento cúprico de Turbo-RTK	1995	Cadereyta N. L.
Planta estabilizadora (AF-1)	1996	Salamanca, Gto.
Planta etílica	1996	Ciudad Madero, Tamaulipas
Planta reductora de viscosidad (RE)	1997	Venta.
Planta desulfuradora de nafta (RV)	1997	Venta.
Planta fraccionadora de gases (RC)	1997	Venta.
Planta de destilación primaria (RA)	1997	Venta.
Planta termoeléctrica	1997	Venta.
Tanques de almacenamiento verticales y horizontales	1993	Tula, Hidalgo

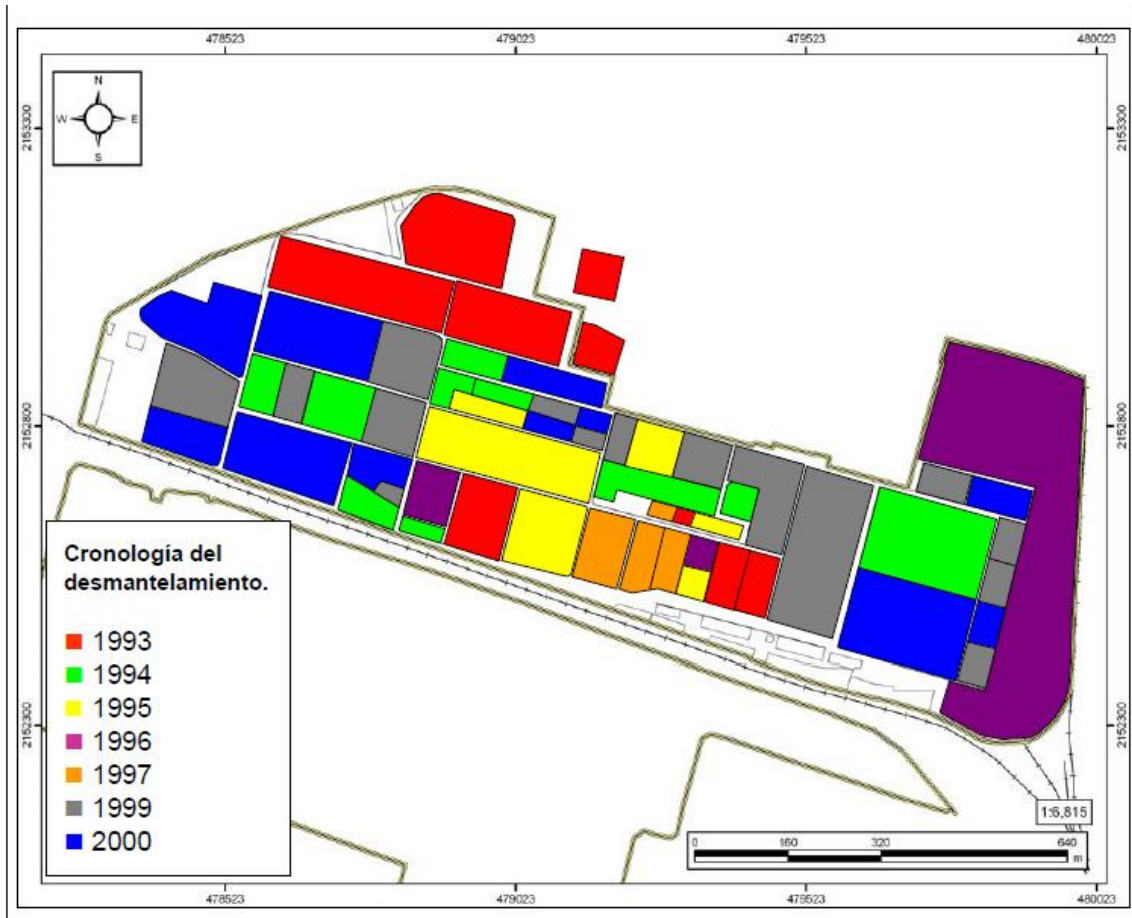


Figura 4.23 Cronología del desmantelamiento de la Refinería 18 de Marzo  
Fuente: PEMEX, 2006

Existen un gran número de de estudios de caracterización del sitio, sin embargo solo se han recibido en SEMARNAT los siguientes estudios para su revisión que se muestran en la siguiente Tabla 4.7:

Tabla 4.7 Estudios realizados para la evaluación del suelo en la Ex-Refinería 18 de Marzo

N°	Fecha	Título del documento	Autor
1	1994, Marzo	Evaluación de la contaminación del suelo y agua subterránea en el área de construcción del campo de béisbol en la zona norte de la Ex-refinería 18 de Marzo.	Instituto Mexicano del Petróleo (IMP)
2	1994, Agosto	Evaluación de la contaminación del suelo en la colonia de Ingenieros de la Ex-Refinería 18 de Marzo.	Instituto Mexicano del Petróleo (IMP)
3	1996, Mayo	Evaluaciones de las condiciones ambientales y análisis de riesgo en el Parque Ecológico de la Ex-Refinería 18 de Azcapotzalco.	Instituto de Ingeniería de la UNAM
4	1997, Julio	Diagnostico de la contaminación del subsuelo del área de embarques y repartos en la Ex-Refinería 18 de Marzo.	Instituto Mexicano del Petróleo (IMP)
5	Sin fecha	Evaluación de áreas impactadas por hidrocarburos en el suelo, subsuelo y mato freático en la ex-refinería 18 de Marzo en Azcapotzalco	Corporación Mexicana de Investigación en Materiales, S.A. de C.V.
6	1997, julio	Estudio de mecánica de suelos del área en que se ubicarán las instalaciones del centro de investigación, capacitación y desarrollo de la franquicia PEMEX	OZTOC Ingeniería, S.A. de C.V.
7	1998, Octubre	Diagnóstico de la contaminación en suelo, subsuelo, manto acuífero somero y profundidad de la totalidad de la superficie de la ex-refinería 18 de Marzo, incluyendo la nueva terminal de almacenamiento y distribución y la primera etapa del parque ecológico, para la elaboración del estudio de riesgo a la salud y medio ambiente y propuesta de alternativas de saneamiento	DMT Gesellschaft für Forschung und Prufung mbH
8	1998, Octubre	Diagnóstico de la contaminación en suelo, subsuelo, manto acuífero somero y profundidad de la totalidad de la superficie de la ex-refinería 18 de Marzo, incluyendo la nueva terminal de almacenamiento y distribución y la primera etapa del parque ecológico, para la elaboración del estudio de riesgo a la salud y medio ambiente y propuesta de alternativas de saneamiento	DMT Gesellschaft für Forschung und Prufung mbH

CONTINUACIÓN...			
9	2001, Noviembre	Detección de la presencia de tanques metálicos enterrados que pudieran contener sustancias tóxicas, a través de métodos indirectos en la Ex Refinería 18 de Marzo (estudio magnetográfico)	Instituto de Geología, UNAM
10	2001, Diciembre	Monitoreo para caracterización actual del subsuelo en el área norte de la ex refinería 18 de marzo, Delegación Azcapotzalco (estudio magnetográfico)	Instituto de Geología, UNAM
11	2001, Noviembre	Detección de la presencia de tanques metálicos enterrados que pudieran contener sustancias tóxicas, a través de métodos indirectos en la Ex Refinería 18 de Marzo, en los centros recreativos Ranchito, Aula Magna, Parque Ecológico y Área Administrativa (estudio magnetográfico)	Instituto de Geología, UNAM
12	2005, Agosto	Actualización de la contaminación por hidrocarburos en el suelo de la ex refinería 18 de Marzo. (preliminar)	Centro de geociencias, UNAM

Actualmente lo que fuera la Refinería más importante de México por su gran producción, luce luego del desmantelamiento como lo muestran las figuras 4.24 y 4.25.



Figura 4.24 Vista de la Refinería 18 de Marzo después del desmantelamiento.

*Fuente:* PEMEX, 2008



Figura 4.25 Vista de la Refinería 18 de Marzo después del desmantelamiento.  
*Fuente: PEMEX, 2008*

Finalmente, el aspecto actual de la refinería 18 de Marzo se muestra en la Figura 4.26 misma que luego de todos los estudios realizados en el predio se tienen cuantificados los contaminantes y se catalogan por polígonos para su mejor identificación, de la misma manera se han realizado los trabajos de remediación en cada uno de ellos.

En la que se localizan las instalaciones para la producción de refinados como: gasolinas, turbosina, diesel, gas-avión, gasóleo, y combustóleo, entre otros, y se ubicaban la mayor parte de los tanques de almacenamiento, así como las siguientes plantas: dos de destilación primaria (McKee RA y AA), dos desulfuradoras, catalíticas (Perco RV y AW), una fraccionadora de gases (RC), dos depentanizadoras (DCS), dos fraccionadoras de gasolinas (AY y FN), una de tratamiento de turbosina (RTK AC), una de alquilación (RH AR), una de dodecilbenceno (AU) y una reductora de viscosidad (RE). Se caracteriza por la instalación de carga de líquidos que está en el centro, con sus unidades de control y bombas, así como los tanques que la rodean hacia el Oeste y Sur. La fracción ligera de hidrocarburo y el benceno, fueron los contaminantes que presentan los principales problemas de contaminación, cuyas plumas de distribución más importantes, parecen tener su origen en las áreas donde se ubicaban las plantas de alquilación y dodecilbenceno, así como del área de almacenamiento de benceno y tetrámeros.

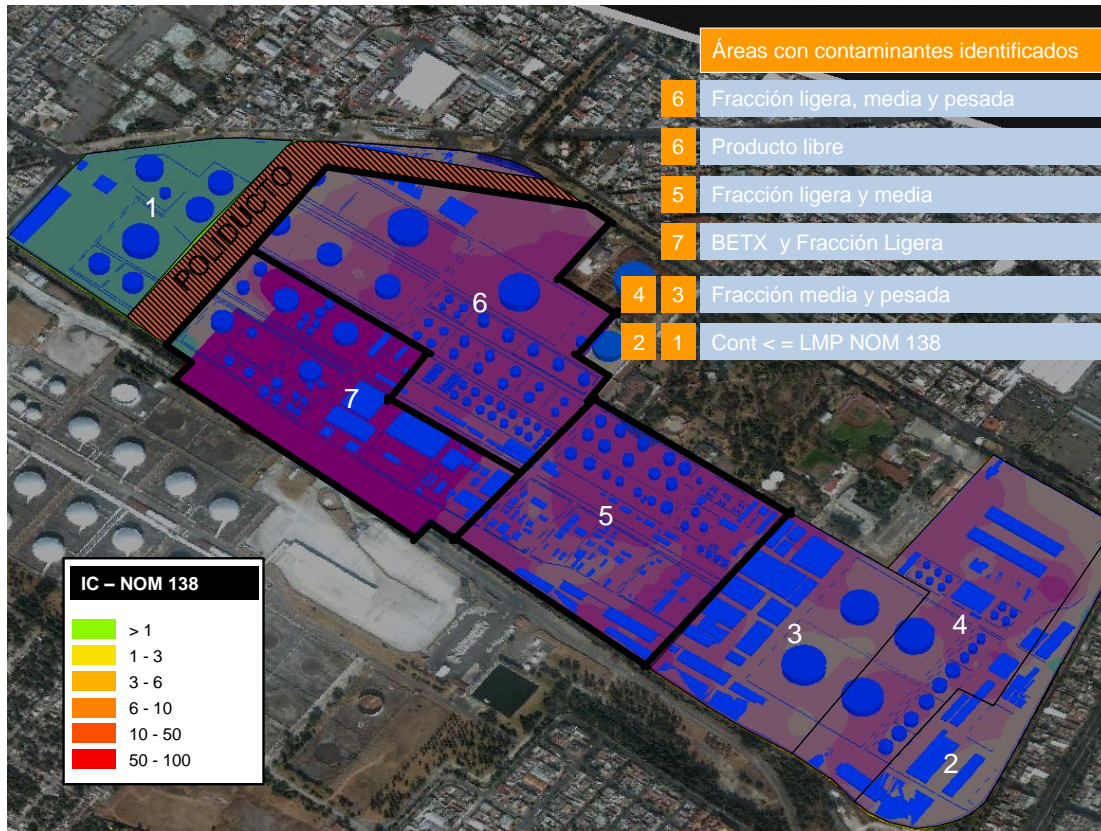


Figura 4.26 Caracterización de la Refinería 18 de Marzo por polígono y sus contaminantes presentes. Fuente: SEMARNAT, 2008

### Ubicación y vías de comunicación actuales.

La localidad motivo del estudio, forma parte de la Ex-Refinería "18 de Marzo" la cual tiene una extensión de 174 hectáreas. Se encuentra ubicada en la Delegación Miguel Hidalgo al noroeste del Distrito Federal como se muestra en la Figura 4.27

Sus colindancias son:

- Al Norte con la Av. 5 de mayo, en la parte central colinda con el Parque Ecológico Delegacional e instalaciones del archivo de PEMEX.
- Al Suroeste con la Terminal de Almacenamiento y Distribución de Azcapotzalco (TADA).
- Al Sureste con la Av. Ferrocarriles Nacionales calle Espuela del Ferrocarril y más al sur con la calle de Cañito.
- Al Oeste con terrenos propiedad de PEMEX.
- Al Este con la Av. Ferrocarriles Nacionales.





Figura 4.27 Ubicación de la Ex – refinería 18 de marzo en la Ciudad de México  
Fuente: Google Earth, 2010

## **CAPITULO V: CONTAMINANTES PRESENTES EN LA ZONA 7**

*Debido a una serie de derrames que ocurrieron en la ex – refinería 18 de marzo durante su operación se sabe que la fracción ligera de hidrocarburo y el benceno, son los contaminantes que presentan los principales problemas de contaminación al suelo del predio, y que parecen tener su origen las grandes plumas en las áreas donde se ubicaban las plantas de alquilación y dodecibenceno, así como del área de almacenamiento de benceno y tetrámeros. Por lo que conocer las propiedades de ambos contaminantes es relevante para inferir en el comportamiento del mismo a través de todo el tiempo en que no se realizó una remediación y los riesgos a la salud a la que estuvo expuesto el personal que laboraba en el predio.*

## 5.1 HISTORIA DEL BENCENO

Uno de los descubrimientos químicos más importantes de la época renacentista, fue el benceno. El desarrollo de la evolución del conocimiento a cerca de la estructura molecular de benceno, ha sido estudiada por varios autores: Devore, Fessenden, Morrison, Boyd; debido a la gran importancia de esta molécula en química orgánica ya que las propiedades de este hidrocarburo vinieron a ser atributos generales para los compuestos aromáticos (Tobares, 2003).

*"La historia del descubrimiento del benceno es interesante. En 1812-1815, en Londres apareció por primera vez el alumbrado a base de gas. El gas de alumbrado obtenido de fuentes naturales (de la grasa de animales marinos), Venía en botellas de hierro, estas botellas se colocaban por lo general en el sótano de las casas. El gas por medio de unos tubos se distribuía por toda la vivienda. Se había notado que durante los fríos fuertes el gas perdía su capacidad de producir llama al arder. En 1825 los propietarios de la fábrica de gas se dirigieron a Faraday para que les diera un consejo. Faraday descubrió que la parte componente del gas que produce llama viva al arder se acumula, en frío en el fondo de las botellas, formando una capa de líquido trasparente. Al examinar este líquido Faraday descubrió un hidrocarburo nuevo, El benceno." (Curso de química orgánica, B Paulov y A. Tebentiev,).*

En 1825, Faraday aisló un compuesto puro que presentaba un punto de ebullición de 80°C, a partir de una mezcla aceitosa que condensaba del gas del alumbrado, que era el combustible que se empleaba en las lámparas de gas. El resultado del análisis elemental realizado a dicho compuesto mostraba una proporción de carbono e hidrógeno de 1:1, lo cual resultaba ser inusualmente pequeña, ya que teóricamente corresponde a una fórmula empírica de CH (Rakoff, 1980; Morrison, 1998; Morrison, 1976; Fessenden, 1982; Brewster, 1983; Brown, 2002).

Posteriormente Mitscherlich sintetizó el mismo compuesto, calculó la densidad de vapor, lo que le permitió obtener el peso molecular que era aproximadamente 78, el cual corresponde a una fórmula molecular de C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>. Como dicho compuesto se había obtenido a partir de la goma *benjuí*, se le denominó *bencina* y a partir de ahí derivó el nombre a benceno como actualmente se le conoce (Rakoff, 1980; Morrison, 1998; Morrison, 1976; Fessenden, 1982; Brewster, 1983; Brown, 2002).

Ya a finales del siglo XIX se fueron descubriendo muchos otros compuestos que parecían estar relacionados con el benceno pues tenían bajas relaciones de hidrógeno a carbono y despedían aromas agradables, además presentaban la peculiaridad de que se podían convertir en benceno o compuestos afines. A este grupo de compuestos se le llamó *aromáticos* por presentar aromas agradables. Posteriormente el estudio de la estabilidad que presentaban estos compuestos, llevó consigo que el término *aromático* se utilizara para designar a compuestos que presentaban una estabilidad muy similar, independientemente de su olor. Como consecuencia a los otros compuestos orgánicos que no presentaban estas características (alcanos, alquenos, alquinos) se les denominó *alifáticos* que

significa *semejantes a las grasas* (Rakoff, 1980; Morrison, 1998; Morrison, 1976; Fessenden, 1982; Brewster, 1983; Brown, 2002).

En general, se puede decir que los compuestos aromáticos están constituidos por el benceno y todos aquellos compuestos que presentan un comportamiento químico similar y que dan lugar a la *serie aromática*, la cual se construye a partir del benceno, fundamentalmente de dos formas (Rakoff, 1980; Morrison, 1998; Morrison, 1976; Fessenden, 1982; Brewster, 1983; Brown, 2002):

1.- Mediante la simple sustitución de los átomos de hidrógeno del núcleo bencénico por otros sustituyentes (*bencenos sustituidos*).

2.- Mediante la unión de uno o más anillos adicionales (aromáticos o no), con sustituyentes o no, a una o más posiciones del anillo bencénico progenitor (*derivados aromáticos polinucleares*).

Durante esta época renacentista, la influencia de Aristóteles comenzó a debilitarse. La simple observación del comportamiento de la materia y la teoría en la que el mundo estaba compuesto por solamente 4 elementos, comenzaba arrojar dudas sobre las explicaciones simples de carácter filosófico, astrológico y místico que Aristóteles había proporcionado. El nacimiento de la ciencia experimental guarda relación con el descubrimiento de que existen técnicas muy precisas para dominar racionalmente el curso de la experiencia, es decir, para provocar ciertos fenómenos que pueden repetirse a voluntad y medirse con exactitud matemática, en condiciones controladas por el intelecto. Fue necesario un profundo cambio filosófico para inducir a los espíritus cultos a estudiar ordenada y seriamente dichas técnicas, es decir, para superar el doble prejuicio de que toda actividad práctica resultase demasiado inferior para ser digna de investigación racional, o demasiado recóndita y misteriosa para ser accesible a las fuerzas humanas. (Dampier, 1950; Geymonat, 1971).

## 5.2 ESTRUCTURA DEL BENCENO

Aunque el benceno se conoce desde 1825, y sus propiedades físicas y químicas son mejor conocidas que la de cualquier otro compuesto orgánico, su estructura no pudo ser determinada de forma satisfactoria hasta 1931. El principal problema era debido no a la complejidad de la molécula en sí, sino que era consecuencia del limitado desarrollo de la teoría estructural alcanzado en aquella época (Rakoff, 1980; Morrison, 1998; Morrison, 1976; Fessenden, 1982; Brewster, 1983; Brown, 2002).

Se conocía su fórmula molecular ( $C_6H_6$ ), pero el problema estaba en conocer como se disponían los átomos en la estructura. En 1858 **Kekulé** propuso que los átomos de carbono se podían unir entre sí para formar cadenas. Posteriormente en 1865 propuso para poder resolver el problema del benceno, que estas cadenas carbonadas a veces se pueden cerrar formando anillos. Para representar la

estructura del benceno se propusieron las siguientes que se muestran en la Figura 5.1 (Rakoff, 1980; Morrison, 1998; Morrison, 1976; Fessenden, 1982; Brewster, 1983; Brown, 2002):

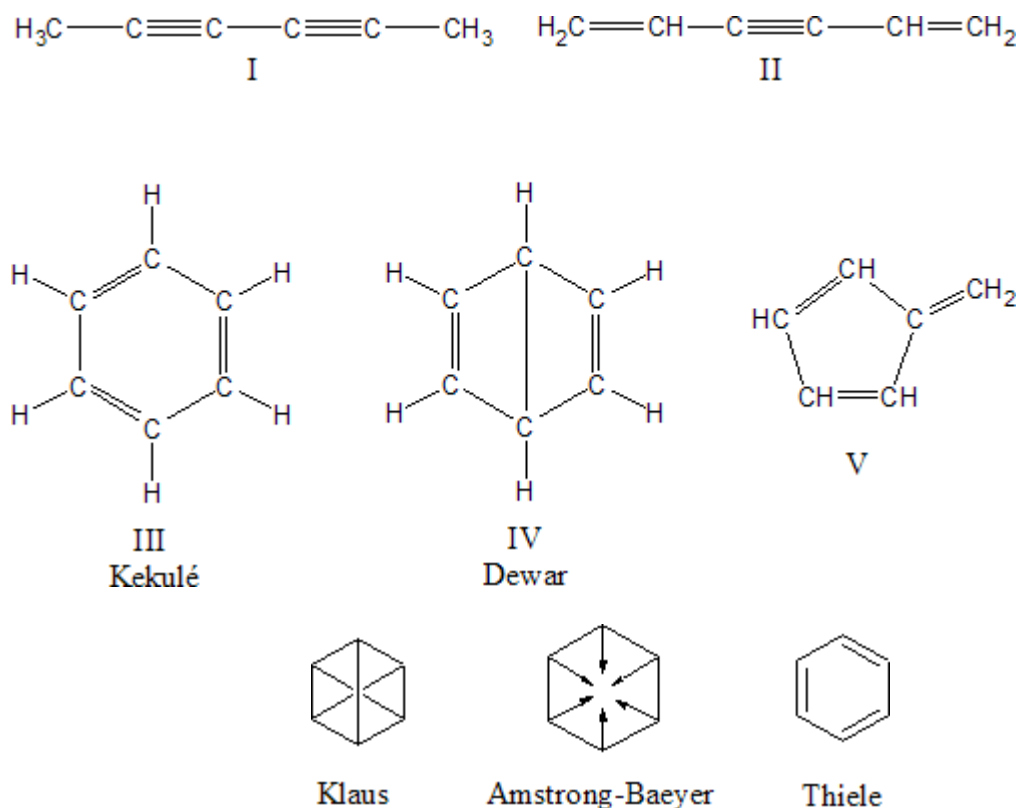


Figura 5.1 Estructuras del benceno Fuente, *Textos científicos*, 2005

Entre 1858 y 1861, August Kekulé, Archibald Scott Couper y Alexander M. Butlerov, trabajando independientemente, sentaron las bases de una de las teorías más importantes de la química orgánica: la teoría estructural. Dos son las premisas fundamentales (Tobares, 2003):

1- Los átomos de los elementos en los compuestos orgánicos pueden formar un número fijo de enlaces. La medida de la capacidad se llama valencia. El carbono es tetravalente, es decir, los átomos de carbono forman cuatro enlaces. El oxígeno es divalente, los átomos de oxígeno forman dos enlaces. El hidrógeno y por lo general los halógenos son monovalentes, sus átomos forman solamente un enlace.

2- Un átomo de carbono puede usar una o más de sus valencias para formar enlaces con otros átomos de carbono.

La estructura del benceno propuesta por Kekulé, se usó de forma generalizada por mucho tiempo. No fue sino hasta que se desarrolló la mecánica cuántica en el año 1920 que comenzó a comprenderse el comportamiento y la estabilidad poco usual del benceno (Rakoff, 1980; Morrison, 1998; Morrison, 1976; Fessenden, 1982; Brewster, 1983; Brown, 2002).

La estructura aceptada actualmente no es resultado de nuevos descubrimientos sobre el benceno, sino que es la consecuencia de una ampliación de la teoría estructural, que corresponde al concepto de resonancia y orbital molecular (Rakoff, 1980; Morrison, 1998; Morrison, 1976; Fessenden, 1982; Brewster, 1983; Brown, 2002).

El benceno es una molécula plana, con todos los carbonos e hidrógenos ubicados en el mismo plano. Además, es una molécula muy simétrica, con todos los carbonos en los vértices de un hexágono regular. Cada ángulo de enlace mide  $120^\circ$ . Cada orbital de enlace es cilíndricamente simétrico alrededor de la línea de unión de los núcleos atómicos, por lo que estas unidades se designan como enlaces  $\sigma$  (Rakoff, 1980; Morrison, 1998; Morrison, 1976; Fessenden, 1982; Brewster, 1983; Brown, 2002).

### 5.3 OBTENCIÓN DE BENCENO

Las principales fuentes de obtención de hidrocarburos aromáticos son el alquitrán de la hulla y el petróleo. Cuando se calienta la hulla en ausencia de aire se descompone dando tres productos principales que son: gas de coquería, alquitrán de hulla y el coque. El gas de coquerías está constituido fundamentalmente por metano (32%) e hidrógeno (52%) se purifica haciéndolo pasar a través de unas columnas y luego se utiliza como combustible doméstico e industrial. El coque que es carbono casi puro, se emplea en la reducción del mineral de hierro en los altos hornos. El alquitrán de hulla se somete a un proceso de destilación fraccionada y a procesos de separación química con el fin de recuperar los constituyentes aromáticos y heterocíclicos que contiene (Rakoff, 1980; Morrison, 1998; Morrison, 1976; Fessenden, 1982; Brewster, 1983; Brown, 2002).

De esta manera y en diferentes intervalos de destilación se obtienen una primera fracción de la que se extrae por destilación fraccionada la mezcla BTX (Benceno, Tolueno, Xileno), así como etilbenceno. En las siguientes fracciones y por extracción con NaOH se obtiene fenoles y un residuo. Finalmente en las siguientes fracciones y por procesos de cristalización se obtienen naftaleno y fenantreno (Rakoff, 1980; Morrison, 1998; Morrison, 1976; Fessenden, 1982; Brewster, 1983; Brown, 2002).

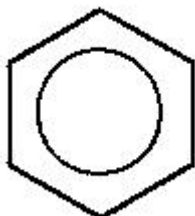
La otra fuente fundamental de aromáticos la constituye el petróleo. El propio petróleo en cada yacimiento contiene hidrocarburos aromáticos en cantidades variables, aunque en algunos yacimientos este contenido es bastante considerable. Los principales compuestos aromáticos que se obtienen del petróleo son el benceno, tolueno y xilenos, y en menor medida, naftaleno y antraceno. La

mayor parte de las mezclas BTX que se producen en las refinerías se suelen obtener por los procesos de reformado catalítico y craqueo al vapor fundamentalmente (Rakoff, 1980; Morrison, 1998; Morrison, 1976; Fessenden, 1982; Brewster, 1983; Brown, 2002).

#### 5.4 PROPIEDADES DEL BENCENO

Fórmula Molecular:  $C_6H_6$

Estructura Molecular



CAS: 71-43-2

Número UN: 1114

Clase de Riesgo Primario UN: 3 (líquidos inflamables)

#### Sinónimos

Benzol; Nafta de Carbón; Ciclohexatrieno; Pirobenzol; Hidruro de Fenilo; Benzene (Inglés); Benzolo (Italiano).

#### Descripción

A temperatura ambiente, el benceno es un líquido incoloro o amarillo claro con olor dulce y aromático. Es altamente inflamable. Se volatiliza muy rápido en el aire y se disuelve poco en agua por sus características no polares, aunque es muy soluble en la mayoría de solventes orgánicos. Debido a su volatilidad, puede esparcirse por el aire hasta cualquier fuente de ignición distante.

El benceno está presente en el aire, agua y suelo, y como su densidad es menor a la del agua, en medio acuático, permanece en la superficie de ésta. El benceno que se encuentra en el ambiente proviene tanto de procesos naturales como de actividades humanas. Las fuentes naturales incluyen volcanes e incendios forestales; el benceno también es componente natural del petróleo crudo y la gasolina además del humo de cigarrillos. La mayoría de las personas pueden percibir el olor del Benceno en el aire a concentraciones de 1.5 – 4.7 ppm y percibir su sabor en el agua a 0.5 – 4.5 ppm.

## Composición / información de los ingredientes

El benceno comercial 535 refinado es libre de sulfuro de hidrógeno y dióxido de azufre, pero contiene un máximo de 1 ppm de tiofeno y un máximo de 0.15% de no aromáticos. El benceno de grado de nitración es libre de sulfuro de hidrógeno y dióxido de azufre. También se encuentra disponible comercialmente libre de tiofeno, 99% molar, 99.94% molar.

En la tabla 5.1 se presentan las propiedades físicas del benceno.

Tabla 5.1 Propiedades físicas del benceno

Peso Molecular (g/mol)	78,11
Estado Físico	Líquido
Punto de Ebullición(°C)	5,5
Punto de Fusión (°C)	80,1; 760 mmHg
Presión de Vapor (mmHg)	75; 20 °C
Gravedad Específica (Agua = 1) (g/l)	0,8787
Densidad del Vapor (Aire = 1)	2,7
pH	No Reportado
Solubilidad en Agua (g/l)	1.7
Koc (l/kg)	62
Constante de la Ley de Henry	5,5X10-3 atm/m3*mol
Límites de Inflamabilidad (% vol)	1,2 – 7.8
Temperatura de Autoignición (°C)	498
Punto de Inflamación (°C)	-11; copa cerrada
Factor de Lixiviación suelo-agua LFsw (mg/L)/(mg/k g)	1.21E-01

Fuente, Moyer, 2004; Smallwood, 1996; Rakoff, 1980; Morrison, 1998; Morrison, 1976; Fessenden, 1982; Brewster, 1983; Brown, 2002; Potter T L and. Simmons K E, 1998. (Citada por PEMEX, 2006 *Evaluación del Riesgo a la Salud y Establecimiento de Criterios de Limpieza en la Exrefinería 18 de Marzo*)

El benceno (C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>) es el principal miembro de los compuestos monoaromáticos. Es un líquido claro e incoloro, muy inflamable a temperatura ambiente. Sus vapores son más pesados que el aire, por lo que con facilidad pueden alcanzar una fuente de ignición y ocasionar una explosión. Tiene un aroma agradable al olfato y es fácilmente detectable a concentraciones de 1.5 a 4.7 ppm. agroquímica (Bayliss *et al.*, 2002; Wilbur, 2005).

El 85% de la producción de benceno se emplea como intermediario en la producción de otros compuestos químicos, tales como el estireno, cumeno (resinas) y en la síntesis del ciclohexano (para la producción de nylon y otras fibras); es materia prima en la producción de sintéticos como caucho, gomas, lubricantes, tintes; y en la producción farmacéutica y agroquímica (Bayliss *et al.*, 2002; Wilbur, 2005).



El benceno es un componente natural del crudo y del petróleo refinado, la disminución en el contenido del tetraetilo de plomo en la gasolina ocasionó que se incrementara la concentración de la fracción aromática en los combustibles, esto con el fin de mantener el nivel de octanaje y las propiedades antidetonantes (Bayliss *et al.*, 2002).

El benceno se absorbe rápidamente por vía inhalatoria e ingestión. La absorción a través de la piel es rápida pero no extensiva, esto se debe a que se evapora rápidamente. En un estudio realizado con personas voluntarias indicó que aproximadamente el 0.5% de las dosis de benceno aplicadas sobre la piel fue absorbida, mientras que en un estudio *in vitro*, la absorción fue solo del 0.2%. En los seres humanos, aproximadamente el 50% del benceno inhalado se absorbe después de cuatro horas de exposición a 50 ppm de benceno en el aire. La absorción oral no ha sido estudiada en seres humanos, pero en estudios realizados en animales, al menos el 90% del benceno fue absorbido después de la administración oral de una dosis de 340 a 500 mg/kg/día (Bayliss *et al.*, 2002; Wilbur, 2005).

El benceno se distribuye y acumula en todo el cuerpo, pero principalmente en tejidos con alto contenido de lípidos. En autopsias realizadas a personas que fallecieron después de una exposición aguda se encontraron altas concentraciones de benceno en los tejidos grasos, el cerebro, el riñón y el hígado (Bayliss *et al.*, 2002; Wilbur, 2005).

El benceno se clasifica como “Carcinógeno Humano, categoría A” de acuerdo a las Guías de Evaluación de Riesgo Carcinógeno, publicadas por la Agencia de Protección al Ambiente de los Estados Unidos de Norteamérica (por sus siglas en inglés USEPA) en 1996 (IRIS, 2006). Estudios epidemiológicos proveen evidencia clara de una asociación causal entre la exposición a benceno y el incremento en la incidencia de riesgos de diferentes tipos de leucemia entre trabajadores crónicamente expuestos al benceno en la industria química, en las fábricas de calzado y las refinerías (ATSDR, 2003; IRIS, 2006).

### **Propiedades químicas**

El benceno es una sustancia altamente inflamable, y sus vapores forman mezclas explosivas con gran facilidad. Cuando se quema benceno, se liberan vapores y gases tóxicos como monóxido de carbono, entre otros. La sustancia ataca algunas formas de plástico, cauchos y recubrimientos (OSHA, 1988).

### **Incompatibilidades**

El benceno reacciona de forma explosiva con oxidantes fuertes como percloratos, ácido nítrico, cloro, bromo con hierro, oxígeno y muchos fluoruros (ATSDR, 2003; OSHA, 1988).

## Efectos sobre la salud

Frases de Riesgo

Puede causar cáncer.

Fácilmente inflamable.

Tóxico: riesgo de efectos graves para la salud en caso de exposición prolongada por inhalación, contacto con la piel e ingestión.

La absorción, distribución, metabolismo y excreción del benceno se ha investigado de forma extensa, tanto en animales como en humanos. El benceno se absorbe rápidamente por ingestión y por inhalación. La absorción por contacto con la piel también es muy rápida, pero se considera inferior debido a la rápida volatilización del benceno en contacto con el aire. El benceno se distribuye rápidamente a través del cuerpo después de cualquier tipo de exposición o contacto con la sustancia y se observa acumulación en los tejidos grasos (EPA, 2002, ATSDR, 1997).

Respirar niveles de benceno muy altos puede causar la muerte, mientras que niveles moderados pueden causar somnolencia, mareo, aceleración del ritmo cardíaco, dolor de cabeza, temblor, confusión y pérdida del conocimiento. Comer o tomar altos niveles de benceno puede causar vómitos o irritación del estómago, mareo, somnolencia o convulsiones; en casos severos se presenta aceleración del ritmo cardíaco y la muerte (EPA, 2002; ATSDR, 1997).

El efecto principal de la exposición de larga duración (365 días o más) al benceno se presenta en la sangre. Produce efectos nocivos en la médula ósea y puede causar una disminución en el número de glóbulos rojos, lo que conduce a la generación de anemia. El benceno también puede producir hemorragias y daño al sistema inmunológico, aumentando así las posibilidades de contraer infecciones (EPA, 2002; ATSDR, 1997).

En algunos estudios con mujeres que respiraron altos niveles de benceno por varios meses tuvieron menstruaciones irregulares y el tamaño de sus ovarios disminuyó. No se sabe si la exposición al benceno afecta al feto durante el embarazo o la fertilidad en hombres. Estudios en animales que respiraron benceno durante la preñez han descrito bajo peso del crío, retardo en la formación de hueso y daño en la médula ósea. En la Tabla 5.2 se presentan efectos a la salud de acuerdo con la vía de transporte (OSHA, 1988).

Tabla 5.2 Efectos a la salud de acuerdo con la vía de transporte

VÍA	EFECTOS
Inhalación	La principal ruta de exposición a benceno generalmente ocurre por inhalación directa o de materiales que contienen benceno. Estudios consultados indican que la absorción de benceno en humanos debida a una exposición por vía respiratoria es aproximadamente el 50% de la cantidad inhalada, aunque esta disminuye al incrementar los niveles de exposición debido probablemente a la saturación del metabolismo y por lo tanto, la excreción de una mayor cantidad de benceno sin metabolizar. Una exposición corta a concentraciones muy altas (10000 – 20000 ppm) puede causar la muerte. Bajos niveles de benceno (700 – 3000 ppm) pueden provocar somnolencia, mareo, incremento del ritmo cardiaco, dolor de cabeza, temblores, confusión e inconsciencia. En la mayoría de los casos, los síntomas desaparecen al dejar de respirar la sustancia y respirar aire fresco.
Contacto piel / ojos	Estudios consultados permitieron determinar que la absorción de benceno a través de la piel es probable. El contacto con la piel, además de contribuir con la sintomatología presentada por la exposición por inhalación, causa enrojecimiento de la piel y generación de úlceras. El contacto de benceno con los ojos causa irritación general y daño en la córnea.
Ingestión	El consumo de alimentos o bebidas que contengan altos niveles de benceno puede causar vómito, irritación del estómago, mareo, somnolencia, convulsiones, incremento del ritmo cardiaco, coma e incluso la muerte. No se conocen los efectos causados en la salud debido al consumo de alimentos o bebidas con niveles bajos de benceno durante largos periodos de tiempo.

Fuente, EPA, 2002; ATSDR, 1997; ATSDR, 2003; OSHA, 2003

Una exposición crónica a benceno en el aire puede causar cáncer de los órganos productores de sangre; esta condición se denomina leucemia. Se ha asociado la exposición a esta sustancia con un tipo de leucemia. No se conocen los efectos en la salud presentados después de una exposición crónica a comida y agua contaminada con benceno (EPA, 2002; ATSDR, 1997).

Se ha reportado que exposiciones crónicas a benceno producen anomalías neurológicas que sugieren que la sustancia puede inducir efectos tóxicos en el sistema nervioso, involucrando los nervios secundarios o la columna vertebral (EPA, 2002; ATSDR, 1997).

En la tabla 5.3 Efectos sistémicos del benceno

<b>SISTEMA</b>	<b>EFEECTO</b>
Cardiovasculares	No se encontraron estudios relacionados con los efectos cardiovasculares después de inhalación, ingestión o contacto con la piel con benceno, sin embargo, se ha propuesto la fibrilación ventricular como la causa de la muerte en algunos envenenamientos en humanos.
Hematológicos	El benceno causa problemas en la sangre. Las personas expuestas a benceno durante períodos largos de tiempo pueden experimentar efectos perjudiciales en los tejidos que producen las células sanguíneas, especialmente la médula ósea. Estos efectos pueden trastornar la producción normal de sangre y provocar un decrecimiento en los componentes importantes de la sangre. La reducción en otros componentes puede causar sangrado excesivo. La producción de sangre puede volver a la normalidad después de detener la exposición a benceno.
Musculares	Se han reportado casos de trabajadores afectados por mielofibrosis (acumulación de fibras y células sanguíneas anómalas en la medula ósea) y neutropenia (disminución de glóbulos blancos en la sangre) a consecuencia de exposiciones bajas durante períodos largos de tiempo.
Hepáticos	No se encontraron reportes de efectos adversos específicos referidos a la inhalación, contacto con la piel o ingestión de benceno, sin embargo, se han reportado casos de crecimiento del hígado en trabajadores expuestos de forma crónica.
Renales	Se encuentra disponible muy poca información acerca de los efectos renales en humanos después de la inhalación de benceno. En un caso de dosis letal consultado se encontró congestión aguda de los riñones.
Endocrinos	Estudios de laboratorio realizados en animales permitieron determinar que no se producen lesiones en las glándulas salivares, la tiroides, paratiroides, páncreas y glándula pituitaria después de inhalación o ingestión de benceno. No se encontraron estudios referidos a los efectos endocrinológicos debidos al contacto de benceno con la piel.
Inmunológicos	La exposición excesiva a benceno puede ser perjudicial para el sistema inmunológico, generando un incremento en las posibilidades de contraer cualquier enfermedad y quizás aumenta las probabilidades de generación de cáncer.
Neurológicos	Se han reportado casos en los cuales se presentaron síntomas que indicaron efectos adversos en el sistema nervioso central después de una exposición aguda. Estos síntomas se presentaron a niveles de benceno de 300 a 3000 ppm, e incluyeron somnolencia, mareo, dolor de cabeza, vértigo, temblor, delirio y pérdida de la conciencia. La exposición aguda que produce la muerte está asociada con daños en los vasos sanguíneos en el cerebro.

Fuente, EPA, 2002; ATSDR, 1997; ATSDR, 2003; OSHA, 2003  
 Información toxicológica

Concentración Letal (CL50) (Inhalación, ratas): 43770 mg/m<sup>3</sup>/4 horas  
Concentración Letal (CL50) (Inhalación, ratas): 32600 mg/m<sup>3</sup>/7 horas  
Concentración Letal (CL50) (Inhalación, ratones): 61125 mg/m<sup>3</sup>/2 horas  
Dosis Letal (DL50) (Ingestión, ratas de 14 días de vida): 3000 mg/kg peso corporal  
Dosis Letal (DL50) (Ingestión, ratas adultas): 3300 mg/kg peso corporal

Tanto la Agencia Internacional de Investigación en Cáncer (por sus siglas en inglés IARC) como el Departamento de Salud y Servicios Humanos de los Estados Unidos (por sus siglas en inglés DHHS) han determinado que el benceno es un reconocido carcinógeno en seres humanos. La exposición de larga duración a altos niveles de benceno en el aire puede producir leucemia que consiste en un tipo de cáncer a los tejidos que fabrican las células de la sangre. La exposición a benceno puede ser perjudicial para los órganos reproductivos, aunque no se conocen los efectos de dicha exposición en el desarrollo fetal en mujeres embarazadas y en la fertilidad de los hombres (EPA, 2002; ATSDR, 1997; ATSDR, 2003)

### **5.5 COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA FRACCIÓN LIGERA (GASOLINA)**

La gasolina o fracción ligera es una mezcla compleja de hidrocarburos, donde predominan compuestos que contienen entre cuatro y doce átomos de carbono, con un rango de ebullición de 50 a 200 °C. Entre éstos se ubican alcanos, alquenos, isoalcanos, cicloalcanos, cicloalquenos, compuestos aromáticos y poliaromáticos (Harper y Liccione, 1995; Kaplan, 1997)

En la Tabla 5.4 se presentan los principales constituyentes de la gasolina y la Figura 5.1 se muestra de manera grafica el porcentaje que representan los compuestos monoaromáticos (benceno, tolueno, etilbenceno y xileno) (Harper y Liccione, 1995; TPHCWG, 1997; Kaplan, 1997).

Tabla 5.4 Constituyentes de la gasolina

Componente	No. de carbonos	No. equivalente de carbonos	Peso (%)
Alcanos de cadena lineal			
Propano	3	3	0.01 – 0.14
Butano	4	4	3.93 – 4.7
Pentano	5	5	5.75 – 10.92
Hexano	6	6	0.24 – 3.5
Heptano	7	7	0.31 – 1.96
Octano	8	8	0.36 – 1.43
Nonato	9	9	0.07 – 0.83
Decano	10	10	0.04 - 0.5
Undecano	11	11	0.05 – 0.22
Dodecano	12	12	0.04 – 0.09
Alcanos de cadena ramificada			
Isobutano	4	3.67	0.12 – 0.37
Dimetilbutano	6	5.5	0.8 – 2.4
Trimetilbutano	7	6.36	0.01 – 0.04
Neopentano	5	4.32	0.02 – 0.05
Isopentano	5	4.75	6.07 – 10.17
Metilpentano	6	5.8	2.91 – 3.85
Dimetilpentano	7	6.5	0.6 – 5.9
Trimetilpentano	8	7.3	0.6 – 9.9
Dimetil,etilpentano	9	-	0.03 – 0.07
Metilhexano	7	6.7	0.7 – 3.3
Dimetilhexano	8	7.5	0.7 – 1.7
Etilhexano	8	7.79	0.01
Componente	No. de carbonos	No. equivalente de carbonos	Peso (%)
Metil, etilhexano	9	-	0.04 – 0.13
Trimetilhexano	9	8	0.4 – 7.4
Metilheptano	8	7.7	1.3 – 3.1
Dimetilheptano	9	8.5	0.3 – 1.2
Trimetilheptano	10	-	0.1 – 1.8
Etil heptano	9	8.77	0.02 – 0.16
Metiloctano	9	8.7	0.6 - 2
Dimetiloctano	10	9.32	0.06 – 0.12
Metilnonano	10	9.8	0.2 – 1.0

Cicloalcanos			
Ciclopentano	5	5.66	0.19 – 0.58
Metil ciclopentano	6	6.27	-
Metil etilciclopentano	8	-	0.1 – 0.2
Dimetilciclopentano	7	7	0.1 – 0.3
Trimetilciclopentano	8	7.6	0.1 – 0.5
Etilciclopentano	7	7.34	0.14 – 0.21
Propilciclopentano	8	7.1	0.01 – 0.06
Isopropilciclopentano	8	-	0.01 – 0.02
Dimetilciclohexano	8	7.99	0.05 – 0.12
Etilciclohexano	8	8.38	0.17 – 0.42
Ciclohexano	6	6.59	0.08
Alquenos de cadena lineal			
Butano	4	4.2	0.3 – 0.4
Centeno	5	5	1.3 – 2
Hexeno	6	6.1	0.6 – 0.9
Septeno	7	7	0.2 – 0.3
Alquenos de cadena ramificada			
Metilbuteno	5	4.9	1.3 – 2.1
Dimetilbuteno	6	5.7	0.08 – 0.1
Metilpenteno	6	5.89	1.3 – 1.8
Dimetilpenteno	7	6.4	0.05 – 0.07
Etilpenteno	7	7.07	0.03 – 0.04
Cicloalquenos			
Ciclopenteno	5	5.55	0.12 – 0.18
Metilciclopenteno	6	6.1	0.03 – 0.08
Ciclohexeno	6	6.74	0.03
Continuación...			
Componente	No. de carbonos	No. equivalente de carbonos	Peso (%)
Alquilbencenos			
Benceno	6	6.5	0.12 – 3.5
Tolueno	7	7.58	2.73 – 21.8
Etilbenceno	8	8.5	0.36 – 2.86
xileno	8	8.7	3.2 – 8.3
Metiletilbenceno	9	9.6	0.7 – 4.4
Metilpropilbenceno	10	-	0.1 – 0.9
Metilbutilbenceno	11	10.92	0.07 – 0.24

Dimetiletilbenceno	10	10.7	1.0 – 2.7
Dimetilbutilbenceno	12	-	0.02 – 0.16
Trimetilbenceno	9	9.8	1.0 – 4.9
Tetrametilbenceno	10	11.2	0.2 – 1.9
Dietilbenceno	10	10.5	0.05 – 0.38
Propilbenceno	9	9.47	0.08 – 0.72
Isopropilbenceno	9	9.13	<10.01 – 0.23
Butilbenceno	10	10.1	0.05 – 0.57
Isobutilbenceno	10	9.96	0.01 – 0.08
Pentilbenceno	11	11.49	0.01 – 0.14
Isopentilbenceno	11	-	0.07 – 0.17
Benzonaftenos			
Indano	9	10.27	0.25 – 0.34
Metilindano	10	11.3	0.2 – 0.7
Tetrahidronaftaleno	10	11.7	0.01 – 0.14
Alquilnaftalenos			
Naftaleno	10	11.69	0.09 – 0.49
Aromáticos polinucleares			
Pireno	16	20.8	-
Benzo (a) antraceno	18	26.37	-
Benzo (a) pireno	20	31.34	0.19–2.8 (mg/kg)
Benzo (e) pireno	20	31.17	-
Benzo (ghi) perileno	22	34.01	-
Aditivos			
Tetraetilo de plomo, Metilciclopentadienil tricarbonilo de manganeso, Metil terbutil éter (MTBE), Etil terbutil éter (ETBE), Teramil metil éter (TAME).			

*Fuente: Gustafson J. E., Tell J.G. and Orem, D. eds. Amherst, 1998. (Citada por PEMEX Refinación, 2006 Evaluación del Riesgo a la Salud y Establecimiento de Criterios de Limpieza en la Exrefinería 18 de Marzo)*



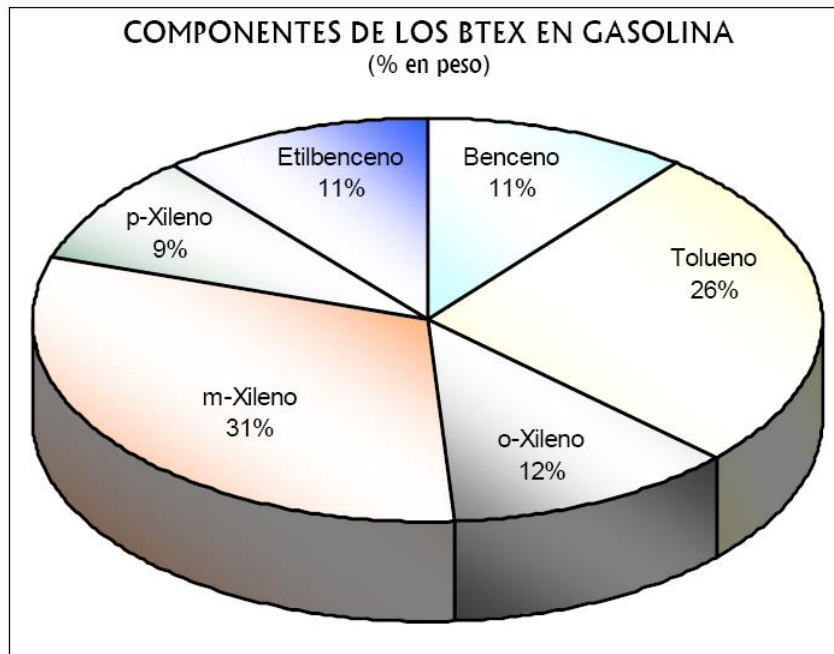
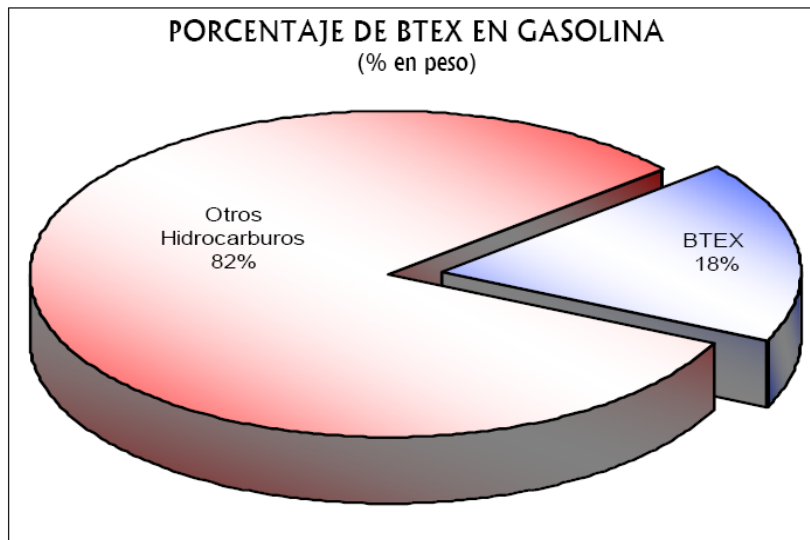


Figura 5.1 Composición de BTEX en la gasolina  
*Fuente: PEMEX, 2006*

## 5.5 PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DE LA FRACCIÓN LIGERA (GASOLINA)

Su composición varía ampliamente dependiendo del crudo utilizado, del proceso de refinación aplicado y de las especificaciones del producto (Harper y Liccione 1995). La Tabla 5.5 contiene las principales propiedades físicas y químicas de la gasolina.

Tabla 5.5 Propiedades fisicoquímica de la gasolina

Propiedad	Valor/Descripción
Peso molecular	1081 g/mol
Color	rosa - café pálido
Estado físico	líquido
Punto de ebullición	39 - 204 °C
Densidad	0.7 - 0.8 g/cm <sup>3</sup>
Solubilidad en agua a 20°C	Insoluble
Solvente orgánico	alcohol, éter, cloroformo, benceno
Log Kow	2.13 - 4.87c
Log Koc	1.81 - 4.56c
Presión de vapor	465 - 773 mmHg
Constante Ley de Henry a 20 °C	4.8X10 <sup>-4</sup> - 3.3 m <sup>3</sup> /mol <sup>3</sup>
Temperatura de autoignición	280 - 486 °C
Punto de inflamación	-46 °C
Límites de inflamabilidad	1.4 - 7.4 %
Límites de explosividad.	1.3 - 6.0 %

Fuente: Harper, C. 1995. (Citada por PEMEX Refinación, 2006 *Evaluación del Riesgo a la Salud y Establecimiento de Criterios de Limpieza en la Exrefinería 18 de Marzo*)

### Toxicología de los principales compuestos y de las fracciones específicas de la gasolina.

#### n-Hexano

El n-hexano es un hidrocarburo alifático muy volátil, es constituyente de la fracción

parafínica del petróleo crudo y del gas natural. Es una mezcla de hidrocarburos de seis átomos de carbono, incluye a sus isómeros, 2 metil pentano, 3 metilpentano así como pequeñas cantidades de otros hidrocarburos (Harris y Corcoran, 1999).

Este compuesto se usa como solvente y agente limpiador en la industria textil, mobiliaria y del calzado; también se emplea como medio de reacción en la síntesis de poliolefinas, caucho sintético y productos farmacéuticos, además de ser componente de adhesivos, selladores, pinturas, cemento y gasolina. En los productos comerciales preparados a partir de la destilación del petróleo, el n-hexano tiene un uso especial como solvente y medio de extracción de compuestos orgánicos no polares, particularmente en su forma de mayor pureza (CCOHS, 2006).

La principal vía de exposición a este compuesto es la vía respiratoria debido a su alta volatilidad, por lo que se absorbe rápidamente en los pulmones a través del mecanismo de difusión en las membranas celulares epiteliales. Su distribución se ve facilitada por su alta afinidad lipídica y baja solubilidad en agua, es distribuido rápidamente en el organismo a través del torrente sanguíneo, se acumula principalmente en el tejido graso, hígado, cerebro, músculo, riñón, corazón, pulmón y en menor proporción, en el tejido sanguíneo.

En una exposición aguda a elevadas concentraciones de n-hexano por la vía respiratoria, puede causar depresión del sistema nervioso central, manifestándose por medio de mareo, náusea, dolor de cabeza y pérdida del conocimiento. En tales situaciones, cuando la concentración de n-hexano llega a ser muy elevada, puede desplazar el oxígeno y provocar síntomas de somnolencia, fatiga, pérdida en la coordinación del movimiento, confusión y, en casos de intoxicación grave, se puede presentar colapso respiratorio y la muerte por asfixia (CCOHS, 2006).

Ambientalmente el n-hexano cuando es liberado en cuerpos de agua forma una capa sobre la superficie, debido que es un líquido ligero de fase no acuosa (LNAPL) y de baja solubilidad en agua, bajo estas circunstancias se presenta volatilización. En aguas con turbulencia, como en los ríos, se estima que la vida media es de menos de 3 horas, mientras que en aguas con menos turbulencia, permanece hasta por un lapso de una semana (Harris y Corcoran, 1999).

Cuando ocurre un derrame de n-hexano en la superficie del suelo, se presenta el fenómeno de volatilización, esto debido a que tiene una capacidad moderada de absorción a partículas del suelo, sin embargo, cuando se trata de sitios donde se han presentado varios derrames y que además se tenga la presencia de acuíferos poco profundos, esta sustancia puede dispersarse hasta cubrir un volumen considerable de suelo (Harris y Corcoran, 1999).

## Benceno

El benceno ( $C_6H_6$ ) es el principal miembro de los compuestos monoaromáticos. Es un líquido claro e incoloro, muy inflamable a temperatura ambiente. Sus vapores son más pesados que el aire, por lo que con facilidad pueden alcanzar una fuente de ignición y ocasionar una explosión. Tiene un aroma agradable al olfato y es fácilmente detectable a concentraciones de 1.5 a 4.7 ppm.

El 85% de la producción de benceno se emplea como intermediario en la producción de otros compuestos químicos, tales como el estireno, cumeno (resinas) y en la síntesis del ciclohexano (para la producción de nylon y otras fibras); es materia prima en la producción de sintéticos como caucho, gomas, lubricantes, tintes; y en la producción farmacéutica y agroquímica (Bayliss *et al.*, 2002; Wilbur, 2005).

El benceno es un componente natural del crudo y del petróleo refinado, la disminución en el contenido del tetraetilo de plomo en la gasolina ocasionó que se incrementara la concentración de la fracción aromática en los combustibles, esto con el fin de mantener el nivel de octanaje y las propiedades antidetonantes (Bayliss *et al.*, 2002).

El benceno se absorbe rápidamente por vía inhalatoria e ingestión. La absorción a través de la piel es rápida pero no extensiva, esto se debe a que se evapora rápidamente. En un estudio realizado con personas voluntarias indicó que aproximadamente el 0.5% de las dosis de benceno aplicadas sobre la piel fue absorbida, mientras que en un estudio *in vitro*, la absorción fue solo del 0.2%. En los seres humanos, aproximadamente el 50% del benceno inhalado se absorbe después de cuatro horas de exposición a 50 ppm de benceno en el aire. La absorción oral no ha sido estudiada en seres humanos, pero en estudios realizados en animales, al menos el 90% del benceno fue absorbido después de la administración oral de una dosis de 340 a 500 mg/kg/día (Bayliss *et al.*, 2002; Wilbur, 2005).

Existen cuatro procesos primarios que controlan el destino y comportamiento del benceno en el ambiente, estos son: a) la evaporación o volatilización, b) la adsorción al suelo, esencialmente con la materia orgánica, c) la degradación ambiental, y d) la lixiviación por arrastre con el agua de lluvia a través de una zona no saturada. La infiltración del benceno derramado en el suelo ya sea como una solución pura o como parte del combustible, llena los poros del suelo adyacentes al derrame y migra con una velocidad que depende de la conductividad hidráulica del benceno en el suelo. La migración vertical continuará hasta que el volumen derramado sea igual al volumen retenido dentro de la zona no saturada o hasta que la pluma alcance al acuífero o una capa impermeable, en este punto la migración vertical cesa y predomina la migración horizontal. La volatilización de la zona no-saturada puede ser el principal proceso de transporte que contribuya a la

remoción del benceno en el suelo, el cual se reporta una vida media menor a 2 días (NGSOEC, 2004).

El contenido de materia orgánica en el suelo, regula la fracción retenida por la fase sólida. Los residuos de hidrocarburos derivados del petróleo se comportan como un componente del carbono orgánico en el suelo y afectan directamente la partición del benceno. El carbono orgánico actúa como un medio de partición, mientras que la materia mineral actúa como un absorbente convencional (NGSOEC, 2004).

### **Etilbenceno**

Este compuesto es un líquido inflamable, incoloro, de olor similar a la gasolina que se encuentra en productos naturales tales como el carbón y el petróleo, así como en productos de manufactura como tinturas, insecticidas y pinturas. El etilbenceno se emplea principalmente en la síntesis de estireno. Otros usos incluyen como solvente, en combustibles y en la manufactura de otros productos químicos (Taylor, 1999).

El etilbenceno se absorbe de manera rápida por vía oral e inhalatoria; en cuanto a la vía dérmica, la absorción es rápida cuando se tiene este compuesto en estado líquido, mientras que la absorción en forma de vapor es mínima. En estudios realizados en humanos para observar el comportamiento del etilbenceno por exposición inhalatoria, cerca de un 49 - 64% de la dosis inhalada es retenida (Taylor y George, 1999).

La exposición al etilbenceno es muy probable que ocurra en lugares densamente poblados, en zonas industriales, esencialmente por la inhalación de vapores producidos por la quema de combustibles o por descargas provenientes del sector industrial. Para las personas que trabajan en estaciones de servicio de combustibles, la exposición puede presentarse ya sea por el contacto dérmico con combustibles o por la inhalación de sus vapores. Otros puntos de exposición de importancia toxicológica son los sitios contaminados por derrames de productos o sustancias que contienen etilbenceno, principalmente productos derivados del petróleo como la gasolina (Taylor y George, 1999).

La exposición inhalatoria a bajas concentraciones el etilbenceno causa irritación de ojos, piel, garganta y mucosas. La sintomatología que se presentan durante una exposición aguda son: alteraciones de la coordinación, narcosis, convulsiones, irritación severa de mucosas y pulmonar, conjuntivitis y depresión del sistema nervioso central (MADEP, 1994; RAIS, 2006).

Cuando se presenta exposición dérmica con el etilbenceno en estado líquido ocurren eritemas e irritación cutánea. En estudios realizados en animales expuestos crónicamente al etilbenceno, los principales efectos tóxicos observados se presentaron en el hígado y el riñón (RAIS, 2006).

El etilbenceno posee una relativa alta presión de vapor, por lo que experimenta una fuerte tendencia a difundirse hacia la atmósfera a partir de su estado líquido o cuando es vertido sobre el suelo durante un derrame. De igual modo, el valor del Koc del etilbenceno lo clasifica como un compuesto de baja movilidad en el suelo, esto debido a que tiene una gran afinidad por el carbono orgánico, así, en suelos de tipo arcilloso presenta una alta capacidad de absorción, mientras que los arenosos, favorecen su migración vertical (Taylor y George, 1999).

### **Tolueno**

El tolueno o metilbenceno es un líquido incoloro, de olor agradable. Se obtiene por destilación del petróleo y se utiliza como solvente en pinturas, en la fabricación de adhesivos, tintas, productos farmacéuticos; también se emplea para aumentar el octanaje de combustibles y como materia prima en la producción de compuestos orgánicos como cresoles, ácido benzoico y fenoles (RAIS, 1994).

De acuerdo con estudios realizados, este compuesto ha mostrado la capacidad para absorberse en gran parte del tracto respiratorio y del digestivo, con una eficiencia del 85 a 90%. Por contacto dérmico la absorción es muy baja, de apenas el 1 % (Dorsey *et al.*, 2000).

Después de una exposición inhalatoria, el tolueno se distribuye rápidamente a través del plasma y de los eritrocitos y se almacena preferentemente en tejidos con alto contenido lipídico y muy vascularizados. (Dorsey *et al.*, 2000; Flowers *et al.*, 2005)

Los principales efectos tóxicos inducidos por el tolueno se presentan cuando ocurre exposición por inhalación o por ingestión. Durante una exposición aguda predominan los efectos de disfunción neurológica, se manifiesta depresión, narcosis y falla en la coordinación motora, problemas visuales, auditivos y arritmias cardíacas (Dorsey *et al.*, 2000).

En exposiciones de tipo ocupacional, se pueden manifestar daños renales. En mujeres expuestas a vapores de tolueno durante el embarazo, se han reportado abortos espontáneos, así como defectos en el neonato, entre los que sobresalen: la microcefalia, disfunción en el sistema nervioso central, desarrollo anormal, anomalías craneofaciales y daños renales reversibles (Dorsey *et al.*, 2000).

### **Xileno.**

El xileno comprende una mezcla de tres isómeros, el o-, m- y p-xileno. Es un compuesto líquido, incoloro e inflamable que se utiliza como solvente en la imprenta, en adhesivos y en la síntesis química de productos agrícolas. Se presenta de forma natural en el petróleo y es un constituyente de la gasolina (RAIS, 2006 a)

Este compuesto se absorbe principalmente por vía oral (90 %) e inhalatoria (60%) en seres humanos que han sido expuestos a vapores de xileno a concentraciones de entre 100 – 1300 mg/m<sup>3</sup>. La absorción por la vía dérmica es baja, pues

representa entre el 1-2% de la cantidad absorbida por los pulmones, sin embargo, el contacto dérmico puede tener importancia toxicológica si la exposición ocurre cuando el compuesto se presenta en estado líquido (Fay, 2005). Después de llevarse a cabo la absorción del xileno, su distribución a través de la sangre es muy rápida y luego es depositado principalmente en los tejidos adiposos (RAIS, 2006 a; RAIS, 1994).

La exposición aguda tiene efectos sobre el sistema nervioso central provocando dolores de cabeza, irritación de ojos y mucosas, náuseas, confusión, mareos, temblores, pérdida del conocimiento, pudiendo llegar hasta el coma, dependiendo de la dosis y de la duración de la exposición (MADEP, 1994).

En las exposiciones ocupacionales crónicas se han reportado casos en los que son frecuentes los dolores de cabeza y del pecho, fiebre, confusión, disfunción pulmonar, disnea y anormalidades electrocardiográficas. Finalmente, si se presenta el contacto por vía dérmica con este compuesto en estado líquido, se puede presentar dermatitis (Fay *et al.*, 2005).

## **CAPÍTULO VI: METODOLOGÍA DE BALANCE DE MASAS EN SUELO**

*Se describe el desarrollo de la metodología del balance de masas en un suelo, en ella se muestran las ecuaciones que la fundamentan paso a paso.*

*Mostrar la metodología desarrollada ayuda en la comprensión de los resultados que se muestran en el siguiente capítulo.*

*Es importante resaltar, que la metodología que aquí se muestra por las características en que fue planteada puede ser aplicable para cualquier pasivo ambiental.*



## 6.1 BALANCE DE MASAS

Referirse a un balance de masa, no es otra cosa que aplicar la ley de la conservación de la materia “La materia no se crea ni se destruye solo se transforma”. Para efectuar un balance de materia de un proceso, lo primero es especificar en qué consiste el sistema para el cual se realizará el balance de materia al que se delimita su frontera.

Un balance de masa no es más que una contabilización del material y se representa como se muestra en la figura 6.1.

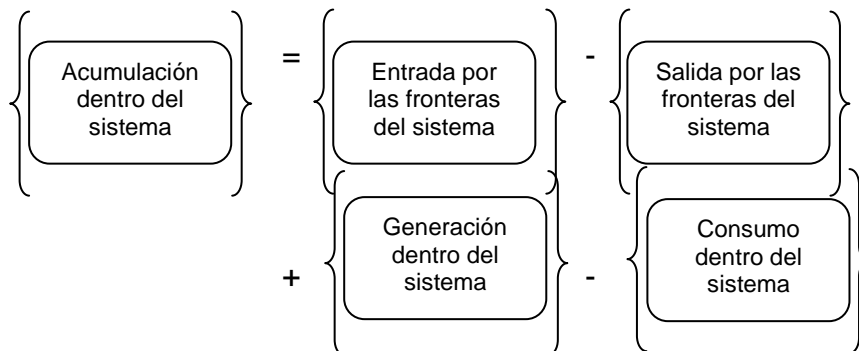


Figura 6.1 Ecuación que describe el balance de masa  
Fuente. Himmelblau, 2002

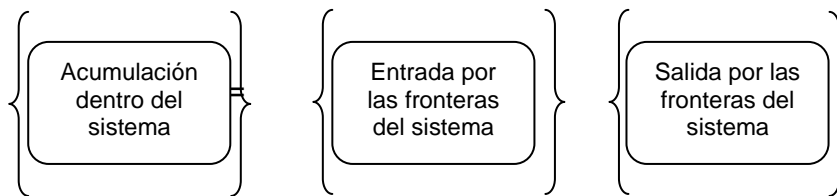
La figura 6.1 describe lo que es un balance de masa en término general, sin embargo, también se puede referir a un balance en un sistema para:

- La masa total
- El total de moles
- La masa de un compuesto químico
- La masa de una especie atómica
- Los moles de un compuesto químico
- Los moles de una especie atómica

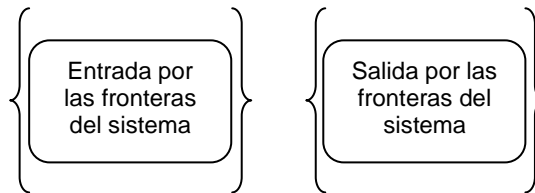
Analizando la ecuación de la figura 6.1 –que sigue la Ley de la conservación de la masa- se tiene inicialmente el significado de los tres primeros términos, el término de **acumulación** se refiere a un cambio de masa o moles (positivo o negativo) dentro del sistema respecto al tiempo, en tanto que la **transferencia a través de las fronteras del sistema** se refiere a las entradas y salidas del sistema. Para el término **generación** indica la cantidad de componente que se produce (por reacción química) a partir de otro que desaparece (por la misma reacción), si no

hay reacción química, el término **generación** es nulo. Cuando aplica el balance de masa a un elemento, también será nulo el término **generación**, ya que no sólo no hay variación de masa, sino tampoco de la naturaleza del elemento aunque éste pase a formar parte de diferentes compuestos. Si el sistema opera en régimen estacionario, es decir, las propiedades fisicoquímicas no varían con el tiempo en el interior del sistema, el término **acumulación** será nulo, ya que no puede haber acumulación de materia en el sistema. Para realizar el balance de masa, es necesario considerar todos y cada uno de los términos implicados, expresándolos en las mismas unidades (Himmelblau, 2002; McCabe, 2004).

Si no hay generación de o consumo de materia en el sistema la ecuación de la figura 6.1 quedaría de la siguiente forma:



Si no existe acumulación o consumo dentro del sistema, se dice que está en estado estacionario o uniforme



Si no existen flujos de entrada y salida, se reduce al concepto básico la conservación de la materia dentro de un sistema cerrado o aislado.

El método general para resolver balances de masa es simple (Himmelblau, 2002; McCabe, 2004):

- 1.- Definir el sistema. Dibujar un diagrama de proceso.
- 2.- Colocar en el diagrama los datos disponibles.
- 3.- Observar cuales son las composiciones que se conocen, o que pueden calcularse fácilmente para cada corriente.
- 4.- Determinar las masas que se conocen, o que pueden definirse fácilmente, para cada corriente. Una de estas masas puede usarse como base de cálculo (que será a la que se referirán todos los cálculos en el balance, en la que para seleccionarla se deben considerar los siguientes aspectos:

- Una determinada cantidad de uno de los componentes de la mezcla que no sufra reacción química y que entre y salga del sistema con el mismo caudal y que forme parte de la misma corriente
  - Una determinada cantidad de una de las corrientes de entrada o salida del sistema: puede elegirse aquella de la que se conoce el mayor número de datos. ).
- 5.- Seleccionar una base de cálculo adecuada. Cada adición o sustracción deberá hacerse tomando el material sobre la misma base.
- 6.- Asegurarse de que el sistema esté bien definido.

Una vez logrado lo anterior, se está preparado para efectuar el número necesario de balances de materia, que pueden ser un balance total o para cada componente presente.

Para el caso de un suelo contaminado, se tiene el sistema (suelo) que cuenta con entradas y salidas y en el inter de dichas variables existen procesos que se pueden estudiar de manera independiente como son ( adsorción, difusión, volatilización, biodegradación, etc) cada uno de ellos representa un proceso que se convertiría en una variable para el sistema en estudio que queda en función de masa (concentración), pero para que se presenten los procesos anteriores se debe definir una de las variables más importantes que es el contaminante, que será el motivo de estudio y a controlar en el sistema durante el balance de masa, ya que dicho balance se puede aplicar de infinitas maneras para obtener información suficiente que refleje el estado en el que se encuentra el suelo en función del contaminante presente.

Para los mecanismos de dilución se reduce la concentración del contaminante por dispersión e incluso por procesos tales como la volatilización, difusión y convección. La degradación del contaminante ocurre por vía biológica (biodegradación por bacterias, hongos u otros organismos) o por mecanismos químicos (reacciones redox, hidrólisis, fotólisis). En el caso de los hidrocarburos la biodegradación es el principal proceso para degradarlos ya que dichas moléculas son químicamente estables en tales ambientes. Para contaminantes orgánicos pese a que la biodegradación es lo más usado, de acuerdo con varios trabajos realizados se ha demostrado que para una mayor eficiencia en la degradación se debe hacer una combinación de técnicas. (Schneider *et al.*, 2006; Nathwani y Phillips, 1977; Brady y Weil, 1998; Bhupathiraju *et al.*, 2002)

Los procesos antes mencionados han sido estudiados alrededor del mundo por especialistas en el campo de conocimiento aportando resultados que han ayudado a la toma de decisiones en situaciones similares para dar remediación a sitios contaminados.

Para conocer cómo es que la masa del contaminante que prevalece en el suelo se transporta y el destino que sigue, se hace uso de una herramienta que es el **balance de masas** donde la aplicación es diversa. Yaron *et al.* (1988) y Nathwani y Phillips (1977), discuten el tema de adsorción-desorción de vapores orgánicos e hidrocarburos en el suelo, en ambos trabajos no se menciona como tal la

aplicación del balance de masa, sin embargo, los resultados se presentan en tablas que muestra una diferencia de masa en función del remanente, lo que se infiere un balance de masa global.

Garg y Rixey (1998) menciona que una transferencia de masa que se presenta en una mezcla de compuesto definidos como poco solubles, es un caso donde el balance de masa se describe de manera puntual y se requiere de la herramienta del balance para comprender la variación de la mezcla de líquido poco soluble en saturación con respecto al tiempo en la que la relación del cambio de los líquidos orgánicos no acuosos en saturación de la región se determina con la suma de los cambios de las concentraciones individuales de los “n” componentes de la mezcla de los líquidos orgánicos no acuosos, el balance de masa global se representa por dicha suma.

Yang *et al.* (1999) afirma que el balance de masa se ve aplicado específicamente en la técnica de remediación de extracción de vapores del suelo, la transferencia de masa que se da se ve limitada por la difusión molecular en lo que respecta a la fase acuosa, dicho sistema fue evaluado para conocer el porcentaje de remediación del contaminante, el modelo para conocer dicho porcentaje se establece en función de las concentraciones. Wang (2007) realiza un modelado para el transporte de un soluto considerando procesos de transferencia de masa donde la aplicación del balance de masa se usa para determinar la diferencia de concentraciones que se van a obtener bajo las condiciones del sistema en estudio con la técnica de extracción de vapores del suelo.

Una aplicación distinta a las anteriores mencionadas se tiene en lo reportado por Genovese *et al.* (2008) que comenta sobre una biorremediación mediante una biopila para un suelo contaminado con compuestos orgánicos volátiles y enfoca el balance de masa desde el punto de vista del consumo de oxígeno por los microorganismos que es el reflejo de su actividad de éstos para la degradación del hidrocarburo. Sui *et al.* (2005) concluye de igual manera en la aplicación de la técnica de bioventeo donde es más específico el término de balance de masa, ya que la aplicación del balance permite la relación de la biodegradación con la volatilización, la masa que se obtiene al finalizar el balance se representa en porcentaje, que es finalmente el porcentaje de remediación que arroja la técnica aplicada. Chapman *et al.* (1997) hace uso del balance de masa en función de la diferencia de masa en su estudio de la biorremediación de agua subterránea contaminada con BETX.

De igual manera Margesin *et al.* (2003), Abreu *et al.* (2009), Davis *et al.* (2009) y Chapelle (1999) tienen trabajos relacionados con hidrocarburos y BETX, aplicando biorremediación en el primero se evalúa dicha remediación; el segundo y tercero es la inyección de aire. Abreu *et al.* (2009), Davis *et al.* (2009) y Chapelle (1999) proponen la aplicación del balance de masa de manera similar y se basa en la medición de la concentración de oxígeno que se inyecta y en la variación de la misma con respecto a la profundidad y su relación con la concentración del hidrocarburo presente.

Finalmente se reportan dos estudios con aplicaciones del balance de masa en suelos con mayor puntualidad, Gocht *et al.* (2007) explica el destino de los contaminantes en suelos de áreas rurales, como resultado de la difusión de los contaminantes basados en el balance de masa, lo relevante es la aplicación del balance como parte del objetivo fundamental donde se plantea una ecuación para obtener el contaminante acumulado por horizonte (a distintas profundidades), delimitando que el balance de masa es como una caja negra donde siguiendo el principio de la conservación de la materia, se sabe que lo que entra debe ser igual a lo que sale, mas sin embargo, pese a que no se estudia lo que sucede en la caja negra, se tiene el conocimiento que se llevan a cabo una serie de procesos internos tales como, transporte, degradación o acumulación. Bajo éste principio, se dan resultados experimentales que se reportan a diferentes profundidades y de manera global.

Liu *et al.* (2001) presenta su trabajo donde se ve más claro el balance de masa, que a diferencia de Gocht *et al.* (2007) muestra una ecuación de balance de masa, donde dicha masa de encuentra distribuida en las tres fases (suelo, aire, agua) el contaminante. Dicha ecuación no solo aporta la distribución de la masa del contaminante en estudio, sino, también el destino que sigue. Aunque Liu (2001) lo considera de manera general se puede hacer una relación entre éstas dos ecuaciones desarrolladas por Liu *et al.* (2001) y Gocht *et al.* (2006), lo que dará como resultado la propuesta del balance de masa por estrato para el caso de estudio que se está desarrollando en la presente tesis, siguiendo el principio de ello se presenta a continuación el planteamiento del balance de masa en estratos contaminados por benceno presente en el pasivo ambiental de la ex – refinería 18 de marzo en la Ciudad de México.

Cada uno de ellos aplica el balance de masas de manera distinta, Abreu (2009) hace referencia a una magnitud de degradación del contaminante presente, lo mide mediante la relación del oxígeno. Para Genoves *et al.* (2008) una manera de medir la biodegradación del contaminante es mediante la relación de respiración y presencia de las bacterias, donde a la relación que hace se considera como un balance de masa. Ya para Gocht *et al.* (2007), considera que un balance de masa en el suelo es como una caja negra en la que no se sabe que pasa, pero si se sabe que la cantidad de masa debe ser la misma que sale a la que entra, sin embargo, hace muy puntual que la carga de contaminante puede ser determinada por horizonte. Lui *et al.* (2001), en su publicación, hace una acotación importante referente al uso de un balance de masas, menciona que puede ser usado para calcular la distribución de la masa en el suelo, agua, aire y fase libre de la mezcla del contaminante. Una aplicación diferente en el uso de un balance de masa se hace referencias en el trabajo de Sui *et al.* (2005), en que se usa una técnica de biorremediación que es el bioventeo, en este caso la aplicación del balance está en función de la medición de CO<sub>2</sub>. Para Wang *et al.* (2007), se definen puntos importantes tales que los movimientos de los contaminantes están gobernado por advección y dispersión en regiones móviles (zona no vadosa) y por la difusión para la transferencia de masa entre regiones móviles e inmóviles (zona

vadosa y no vadosa). Yang *et al.* (1999), publica en su trabajo que la evaporación y la adsorción del suelo son dos mecanismos de transferencia de masa que controlan el porcentaje de recuperación del contaminante para un sistema de extracción de vapor del suelo, también, que los contaminantes se distribuyen en tres fases, principalmente en: partículas del suelo, agua intersticial y vapor del suelo, hace también una conclusión importante que durante la transferencia de masa de contaminantes de los sitios de adsorción en una corriente de vapor de convección implica desorción, difusión a través de agua intersticial, y la vaporización del vapor en el suelo.

Los trabajos anteriores mencionados son estudios que han utilizado como contaminante el benceno, que éste al igual que la fracción ligera de hidrocarburo se estudia en la presente tesis. Es importante a resaltar, que los estudios han sido realizados de manera experimental y a escala piloto en laboratorios, esto conlleva a que las variables tales como masa inicial del contaminante se sabe y las condiciones son controladas, caso diferente al que se presenta en ésta tesis, en la que se usa el balance de masas para determinar la eficiencia de la remediación del suelo contaminando por benceno y fracción ligera de hidrocarburo en un pasivo ambiental como lo es la Ex – Refinería 18 de marzo en la Ciudad de México, así como su relación de la masa de los contaminantes con el riesgo a la salud de la población civil. Para lo cual, se propone una metodología que permite evaluar la rehabilitación de un pasivo ambiental de grandes dimensiones como lo es en un caso real.

## 6.2 DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE BALANCE DE MASAS

La metodología tiene como objetivo obtener la masa (kg) del contaminante presente en la profundidad indicada –antes y después de la rehabilitación-, para ello, se inicia delimitando un caso real de estudio que se ha denominado pasivo ambiental que por definición de la NOM-138-SEMARNAT-2003 es ***“Sitio contaminado, que no ha sido remediado, en el que pueden, además, encontrarse depósitos o apilamientos de residuos sólidos, de manejo especial o peligrosos, los cuales deben de ser manejados conforme a la legislación vigente.”*** Se presenta un diagrama de la metodología para realizar el balance de masa, dicho diagrama consiste en 3 etapas.

En la primera etapa se enuncia la información básica necesaria que se debe generar a partir de la caracterización del contaminante, es decir, mediante los estudios realizados previamente se determina el contaminante orgánico presente en el suelo.

Como el contaminante es orgánico, los estudios realizados deberán indicar la composición, masa molecular, densidad, solubilidad, factor de volatilización y el

$K_{ow}$ ; mientras que si se trata de un contaminante inorgánico, se requiere conocer la composición, masa molecular, densidad y solubilidad. De igual forma se requiere cierta información referente al suelo, es decir, se necesitan conocer las propiedades fisicoquímicas del suelo, ya que éstas definirán el comportamiento del contaminante a través del suelo. Por lo que se recomienda hacer un análisis mecánico de suelos y un análisis estratigráfico, esto con la finalidad de conocer la textura, densidad aparente, densidad real, porosidad, fracción orgánica, conductividad hidráulica, pH, capacidad de retención, entre otras. Cabe mencionar que las más importantes para el caso de suelos considerados como pasivos ambientales, son la densidad real y la densidad aparente, pues a partir de estas densidades se determina la porosidad, que es la principal propiedad que influye en el mecanismo de adsorción que se presenta comúnmente en estos pasivos (LaGreg *et al.*, 2001).

Teniendo conocimiento de esta información base, es necesario que se realice un estudio de muestreo en el sitio contaminado, dicho estudio proporcionará otra parte fundamental de los datos necesarios a utilizar en la etapa 2 de la metodología propuesta.

En esta etapa 2 de la figura 6.2, es necesario que los datos generados de los estudios previamente realizados, posean un alto grado de representatividad y de confiabilidad, lo cual dará una reproducibilidad de los resultados finales, puesto que sobre estos datos se harán los cálculos y determinaciones necesarias para la etapa 3. En primer lugar, en esta segunda etapa, se recopilan los datos de concentración del contaminante que se encuentra presente a cada una de las profundidades (previamente establecidas). Se recomienda georreferenciar los pozos de muestreo en coordenadas (x,y), no es necesario hacer esta georreferenciación con las coordenadas que proporciona un equipo GPS, basta con establecer un par de ejes X y Y arbitrarios, el eje Z se conformará con los datos de concentración obtenidos con anterioridad.

Con el dato del área de suelo contaminado ( $A_{sc}$ ), se comienza con los cálculos correspondientes a la etapa 3 de la figura 6.2, la cual involucra las ecuaciones necesarias para determinar la carga total del contaminante en el suelo.

A partir del  $A_{sc}$ , se determina el volumen de suelo contaminado ( $V_{sc}$ ) con la ecuación 6.1 para cada nivel de estudio.

$$V_{sc} = (A_{sc}) * (P) \quad (6.1)$$

Dónde:

$V_{sc}$  es el volumen de suelo contaminado ( $m^3$ ).

$A_{sc}$  es el área de suelo contaminado ( $m^2$ ).

P es la profundidad (m).

El volumen total de suelo contaminado se determina con la ecuación 6.2, en la cual se realiza la suma de los valores de volumen de suelo contaminado para cada profundidad  $i$ .

$$V_{Tsc} = \sum_{P=i}^{P=n} V_{sci} \quad (\text{ecuación 6.2})$$

Se procede a determinar la masa de suelo contaminado a partir del valor de  $V_{sc}$  y con la ecuación 6.3.

$$M_{sc} = (V_{sc}) * (\rho_{ap}) \quad (\text{ecuación 6.3})$$

Donde:

$M_{sc}$  es la masa de suelo contaminado (kg).  
 $\rho_{ap}$  es la densidad aparente del suelo ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).

La masa total de suelo contaminado se determina sumando los valores de  $M_{sc}$  para todas las profundidades, ecuación 6.4.

$$M_{Tsc} = \sum_{P=i}^{P=n} M_{sci} \quad (\text{ecuación 6.4})$$

Para obtener la masa de contaminante presente en el suelo, se necesita el valor de masa de suelo contaminado ( $M_{sc}$ ) y la ecuación 6.5.

$$M_{cp} = (M_{sc}) * (C_x) \quad (\text{ecuación 6.5})$$

Donde:

$M_{cp}$  es la carga del contaminante (kg).  
 $C_x$  es la concentración del contaminante (kg de contaminante/kg de suelo).



La carga total de contaminante presente (MT<sub>cp</sub>) en todo el suelo se determina con la ecuación 6.6, la cual suma los valores de M<sub>cp</sub> para cada profundidad.

$$M_{T_{cp}} = \sum_{P=i}^{P=n} M_{cp_i} \quad (\text{ecuación 6.6})$$

## METODOLOGÍA

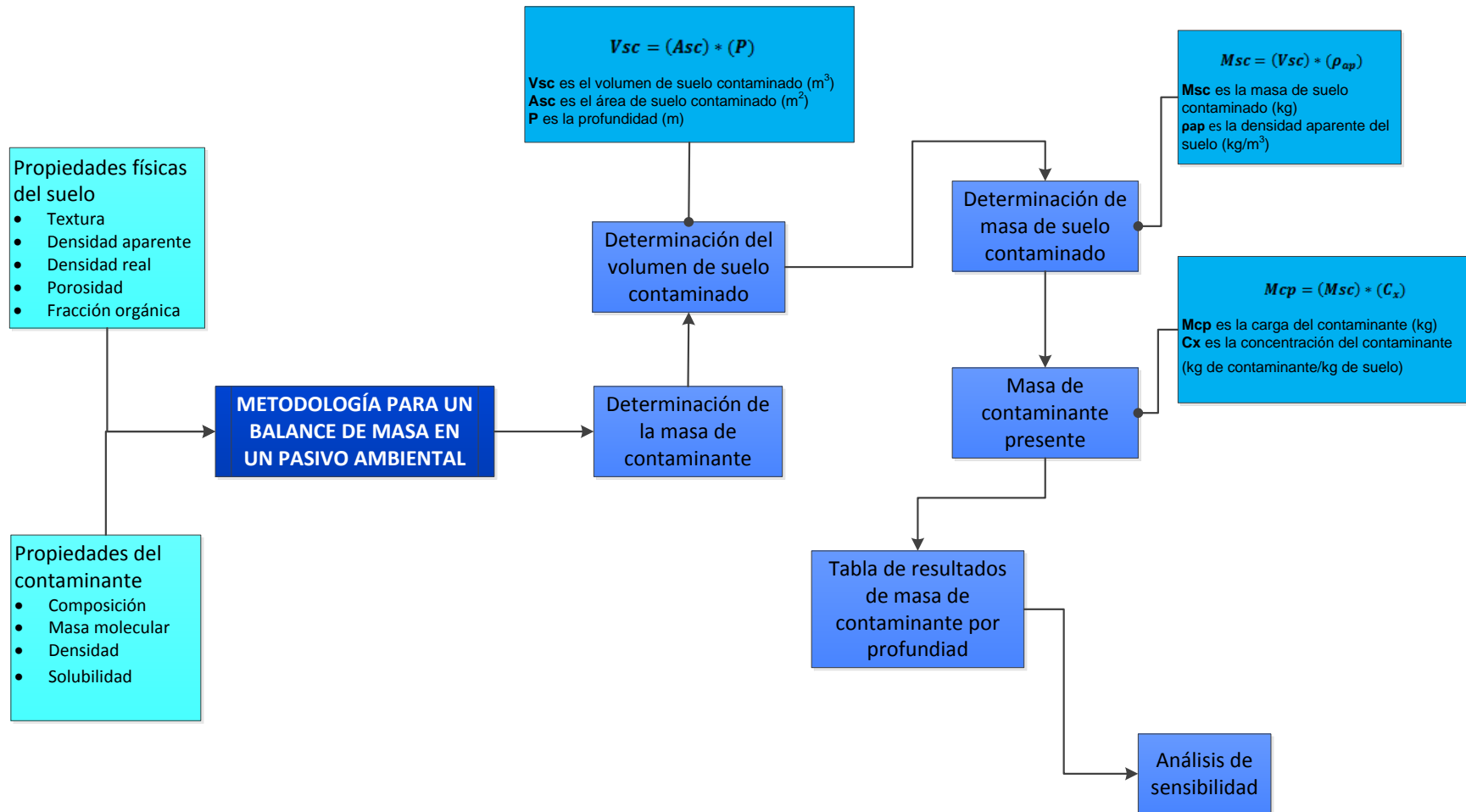


Figura 6.2 Metodología para realizar el balance de masa en un pasivo ambiental

## **CAPÍTULO VII: RESULTADOS DEL BALANCE DE MASA Y SU DISCUSIÓN**

*Los resultados que se obtuvieron en el presente trabajo de investigación, es dividido en dos secciones, la primera es la presentación de la metodología desarrollada para realizar el balance de masa en el suelo de un pasivo ambiental contaminado con derivado de hidrocarburo. En ella se describe paso a paso la implementación.*

*Como segunda sección de resultado y su discusión, es lo relacionado a la masa de contaminante obtenido por profundidad, densidad de suelo distinta y el riesgo a la salud asociado al remanente en el pasivo ambiental. La teoría que se ha revisado es la base para sustentar los resultados obtenidos y dar seguimiento en las mejoras.*

Los resultados del balance de masa realizado al pasivo ambiental “ex –Refinería 18 de marzo” en la Ciudad de México, contaminado por benceno y fracción ligera de hidrocarburos (gasolina) que se derramaron en el suelo en un periodo de tiempo de 44 años (1937-1991), desde su inicio hasta su cierre. Durante este periodo los fenómenos de transporte –volatilización, difusión, dispersión, adsorción- se desarrollaron de manera continua hasta quedar un remanente de contaminante adsorbido en el suelo. Por lo anterior, el objetivo del presente estudio es cuantificar la masa del contaminante presente en el pasivo ambiental mediante el balance de masa, con ello permitirá conocer la masa del contaminante presente antes y después de la rehabilitación y si realmente representa un riesgo a la salud el remanente.

Para aplicar la metodología se tomaron los datos recopilados de los estudios de caracterización elaborados por firmas especializadas y entregadas a la Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Se definió considerar la profundidad máxima de 7.2 m con intervalos de 1.2 m, también tres valores de concentraciones distintas: promedio, percentil 75 y percentil 95; y finalmente tres densidades del suelo distintas, densidad aparente, densidad real y densidad promedio (entre la aparente y la real), se considera un total de 642 muestras de 122 perfiles de suelo para un volumen total de suelo de  $680\ 356\ m^3$  de 7.4 hectáreas. Fueron 28 puntos de muestreo para el benceno y 34 puntos para los HFL antes de la remediación, de acuerdo con la NOM-138-SEMARNAT/SS-2003, el número de muestras que se recomienda para un área de 7.4 hectáreas es de entre 33 y 38. Todo lo anterior con la finalidad de comprender como afecta cada una de las variables en la determinación de la masa de contaminante presente en el suelo del pasivo ambiental.

En las tablas 7.1 y 7.2 se muestran los resultados del balance de masa por profundidad y global para el benceno, en la 7.1 se muestran antes de la rehabilitación y la 7.2 después de la rehabilitación, así mismo para tres valores distintos de concentración (promedio, percentil 75 y percentil 95).

Tabla 7.1 Resultados del balance de masa para el benceno de 1.2 m a 7.2 m antes de la rehabilitación

Profundidad (m)	Densidad aparente			Densidad media			Densidad real		
	Media	per75	per95	Media	per75	per95	Media	per75	per95
	Masa (kg)	Masa (kg)	Masa (kg)	Masa (kg)	Masa (kg)	Masa (kg)	Masa (kg)	Masa (kg)	Masa (kg)
1.2	48	37	128	61	47	164	75	58	200
2.4	404	28	662	425	30	698	804	56	1319
3.6	1103	76	2814	1513	105	3859	1922	133	4903
4.8	4554	1056	7593	7256	1682	12090	8634	2001	14390
6.0	592	312	3710	943	496	5907	1293	680	8103
7.2	3438	45	15060	4912	64	21520	6387	83	27990
<b>Masa total</b>	10139	1554	29968	15110	2424	44238	19115	3011	56905

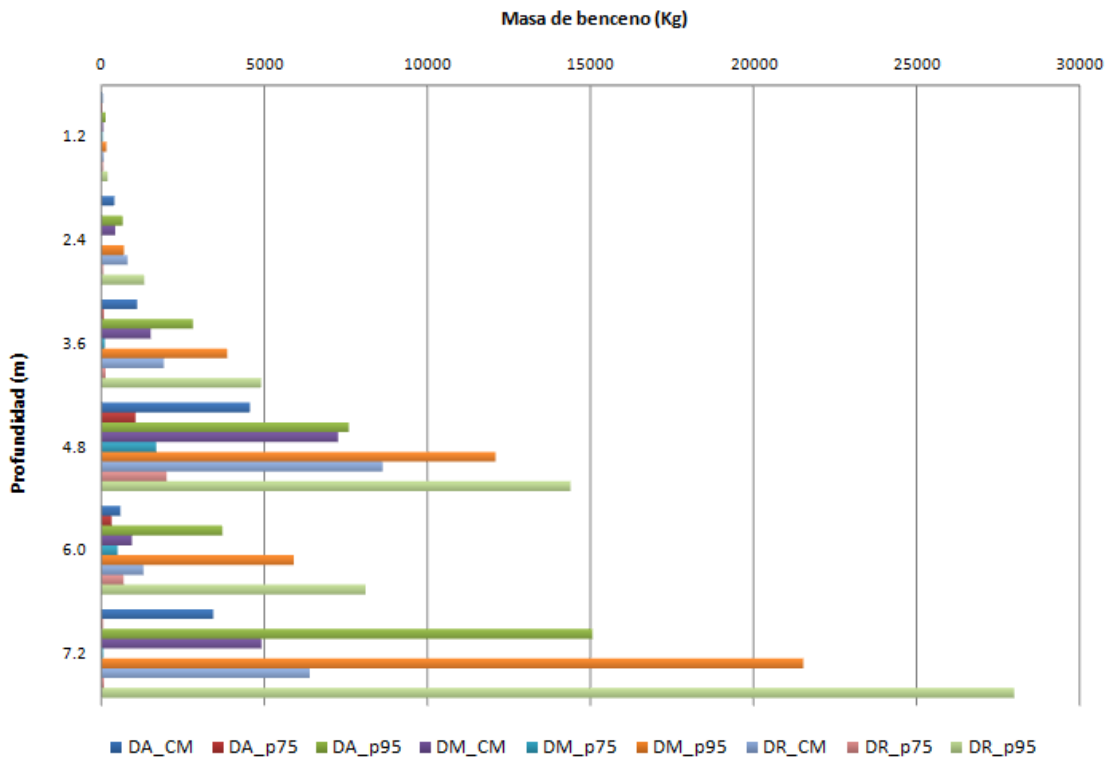
Tabla 7.2 Resultados del balance de masa para el benceno de 1.2 m a 7.2 m después de la rehabilitación

Profundidad (m)	Densidad aparente			Densidad media			Densidad real		
	Media	per 75	per95	Media	per 75	per95	Media	per 75	per95
	Masa (kg)	Masa (kg)	Masa (kg)	Masa (kg)	Masa (kg)	Masa (kg)	Masa (kg)	Masa (kg)	Masa (kg)
1.2	222	279	308	284	358	394	346	436	480
2.4	158	200	214	166	211	225	314	398	426
3.6	172	234	257	236	320	353	300	407	449
4.8	148	215	233	235	343	372	280	408	442
6	222	200	212	220	319	338	302	438	463
7.2	171	243	267	244	347	382	318	452	496
<b>Masa Total</b>	1092	1371	1491	1385	1898	2063	1859	2538	2756

Se presentan las figuras 7.1 y 7.2, en las que se muestra la masa (kg) antes y después de la rehabilitación del suelo.

Se puede apreciar claramente la distribución de la masa del contaminante a lo largo de la estratigrafía y la influencia de los factores tales como nivel freático, textura del suelo, mecanismos naturales del suelo (expansión-compresión) y actividades antropogénicas desarrolladas en el sitio. Considerando la figura 7.1 se puede ver muy bien la zona en la que se encuentra retenida la mayor masa de contaminante a 4.8 m de profundidad, que va siguiendo un comportamiento ideal de acuerdo con lo reportado en la literatura, y disminuye a la profundidad de 6.0 m que es menor a lo retenido a nivel freático por que solo se puede disolver una tercera parte del contaminante y éste es menor, sin embargo a la profundidad de 7.2 se vuelve a elevar la masa del contaminante por arriba de lo que es retenido en la zona fonicular. Para la figura 7.2 después de la rehabilitación y considerando la curva de la densidad aparente con concentración de percentil 95, se puede apreciar un abatimiento de la masa de contaminante a la profundidad de 7.2 m, quedando un comportamiento más homogéneo de masa remanente.

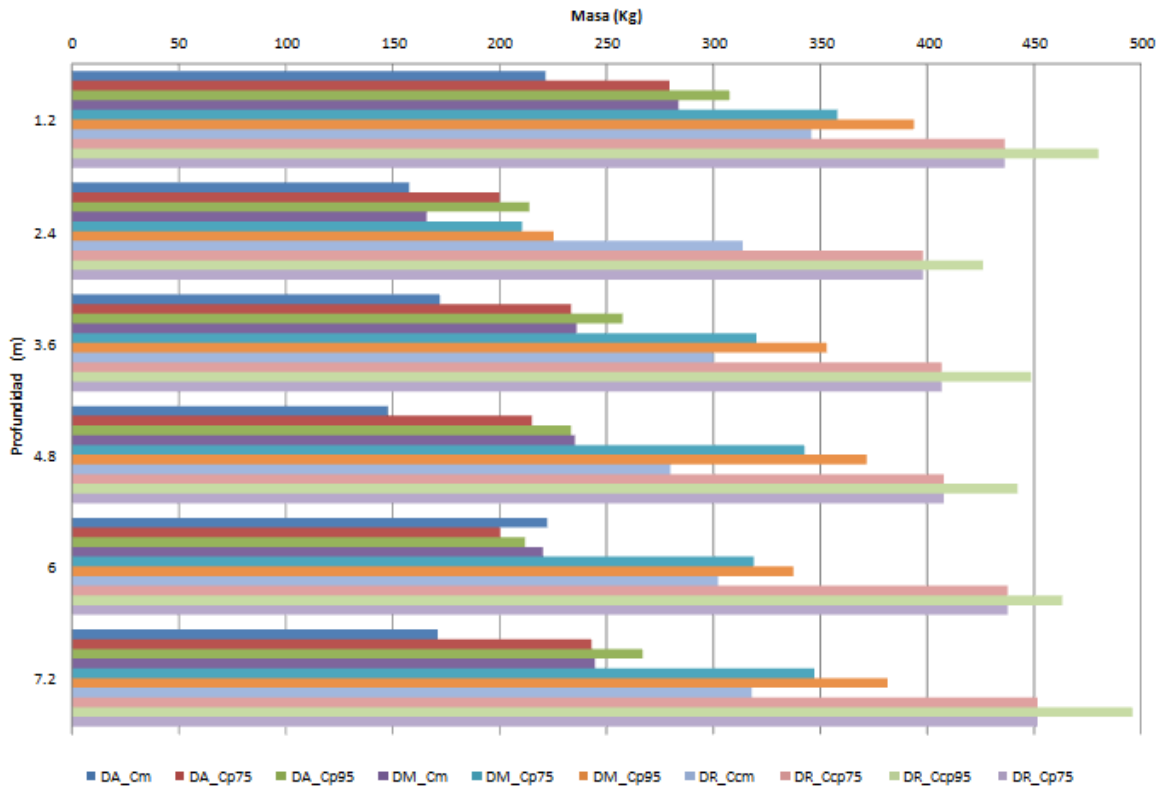
### Masa de benceno antes de la remediación



DA\_CM: Densidad Aparente\_Concentración Media; DA\_Cp75: Densidad Aparente\_Concentración percentil 75; DA\_Cp95: Densidad Aparente\_Concentración percentil95; DM\_CM: Densidad Media\_Concentración Media; DM\_Cp75: Densidad Media\_Concentración percentil 75; DM\_Cp95: Densidad Media\_Concentración percentil95; DR\_CM: Densidad Real\_Concentración Media; DR\_Cp75: Densidad Real\_Concentración percentil 75; DR\_Cp95: Densidad Real\_Concentración percentil95

Figura 7.1 Masa de benceno antes de la rehabilitación

### Masa de benceno después de la remediación



DA\_Cm: Densidad Aparente\_Concentración media; DA\_Cp75: Densidad Aparente\_Concentración percentil 75; DA\_Cp95: Densidad Aparente\_Concentración percentil95; DM\_Cm: Densidad Media\_Concentración media; DM\_Cp75: Densidad Media\_Concentración percentil 75; DM\_Cp95: Densidad Media\_Concentración percentil95; DR\_Cm: Densidad Real\_Concentración media; DR\_Cp75: Densidad Real\_Concentración percentil 75; DR\_Cp95: Densidad Real\_Concentración percentil95

Figura 7.2 Masa de benceno después de la rehabilitación

Para comprender mejor la situación que se presente de acuerdo con los resultados obtenidos en el balance de masas, se comienza por ver la distribución de la masa de los contaminantes del benceno y del FLH a través del perfil estratigráfico por profundidad que va de 0 a 7.2 m, de manera general se aprecia una carga significativa de masa de benceno en la profundidad 4.8 m y nuevamente a 7.2 m como ya se mencionó. Lo anterior es de esperarse ya que de acuerdo con la estratigrafía entre los 4 y 5 m inicia lo que es el nivel freático del acuitardo, el cual se prolonga más allá de los 7.2 m, otro factor relevante es la textura que existe en el mismo, que es limo-arcilloso, que es significativo para retener una gran cantidad de contaminante en dicha zona, y que por una de sus propiedades de dicha textura es el área superficial o superficie específica, lo que permite que el contaminante pueda ser retenido con mayor facilidad (García, 2010), además de que existe una zona de oscilación por temporada de lluvias y sequías, lo que hace que el fenómeno natural influya en el arrastre del benceno por gravedad y que tiene un valor de movilidad de  $1.259 \text{ gr/m}^2$  que de acuerdo a la

tabla de contaminantes orgánicos en el suelo (Shineldecker, 1992) se posiciona en el rango de un contaminante “muy móvil” dicho valor fue calculado con los parámetros del caso de estudio.

Díaz-Rodríguez, (2006) reporta en su trabajo “Los suelos lacustres de la Ciudad de México”, que es un suelo muy característico y con propiedades no muy comunes en otra parte del mundo, ya que son sedimentos heterogéneos, volcánicos, lacustres con una proporción y variedad de microfósiles. Donde predominan suelos finos limo-arcilloso, que lo constituyen minerales muy específicos como la Cristobalita (Cr), feldespatos (fd) y calcita (Ca). Con la descripción dada por Díaz-Rodríguez, (2006), se puede iniciar el análisis de la carga del contaminante retenido en a cada profundidad dada en un intervalo de 1.2 m de diferencia cada uno desde 0 a 7.2 m.

Una vez que se ha descrito la textura del suelo del sitio de estudio, es importante mencionar que el espesor de la zona limo-arcillosa aumenta conforme se va adentrando al centro de la Ciudad, es decir, de oeste a este, lo que va acompañado de igual manera, con el flujo del agua subterránea que lleva el mismo sentido. Y para este trabajo el espesor que interesa es de 0 a 7.2 m.

Existen trabajos dedicados a la parte de evaluar la remediación de suelos contaminados por BTEXs, pese a que son estudios realizados en laboratorio empenado columnas de suelo preparado y con las variables controladas, permiten dar una comprensión mayor frente a lo que se tiene en un pasivo ambiental en el que se trabaja bajo condiciones reales y existen variables que no se pueden controlar.

Margesin *et al.* (2003) reporta para un suelo franco limoso la secuencia de sorción de los BTEX, donde se incrementan de la siguiente manera Benceno<Tolueno<Etilbenceno<Xileno, factor importante que dependiera del tiempo de residencia de los contaminantes en el suelo antes de su infiltración al agua subterránea, el cual es influenciada por las propiedades físicas y químicas del suelo. Por lo que la capacidad de sorción del suelo en el presente caso de estudio se considera como primer factor en la retención a diferentes profundidades, y que se ha mencionado que es fracción fina, donde propiedades como el área de contacto, capacidad de intercambio catiónico, entre otras, juegan un rol importante en la retención del contaminante.

Se analizarán en tres fases principales para comprender mejor la distribución de la masa de benceno y fracción ligera de hidrocarburo (gasolina): zona no saturada, zona de transición y zona saturada. Los fenómenos que se presentan en cada una de las zonas de estudio son muy específicos y se describen a continuación (Rucks *et al.*, 2004; Testa y Winegardner, 1991; Lyman *et al.*, 1992; Hern y Melancon, 1986)

La zona no saturada es una zona donde los espacios porosos se encuentran parcialmente saturados por agua que se conoce como “humedad”, por su alta



movilidad del benceno, es el componente que logra llegar hasta las aguas subterráneas, en la literatura se conoce que el benceno es “inmiscible” en agua, sin embargo las condiciones en la parte subterránea cambian su propiedad, ya que se ve influenciado por factores como son, las partículas del suelo, espacio poroso, y lo que determina lo más importante que exista una solubilidad del contaminante en el agua es el tiempo de contacto y la concentración del contaminante, ya que existe una relación directamente proporcional (Testa y Winegardner, 1991). La carga de contaminante retenido en la zona no saturada se debe a la adsorción que se presenta principalmente por la textura del suelo por las propiedades mencionadas anteriormente y al contenido de materia orgánica, que son factores que van a ser determinantes para su retención. Durante los 11 años siguientes a partir del cierre de la ex – refinería se presentó la liberación a la atmósfera, por volatilización del benceno y componentes de la fracción ligera de hidrocarburo (FLH) quedando una menor masa de benceno retenida. (Rucks *et al.*, 2004; Testa y Winegardner, 1991; Lyman *et al.*, 1992; Hern y Melancon, 1986)

Para comprender la migración de los contaminantes a zonas más profundas y del por qué existe la mayor cantidad de masa de contaminante a 4.8 m, nuevamente se observa que existe un factor importante a dicha profundidad, que es, el nivel freático del acuitardo, por lo que antes de este nivel, en la zona fonicular se encuentra la mayor concentración como fase libre, y es muy sencillo de explicar, de acuerdo con Testa y Winegardner (1991), entre la zona no saturada y la zona saturada existe la zona fonicular donde dos terceras partes de los poros se encuentran saturados por agua, quedando solo disponibles una tercera parte para el contaminante, y es aquí donde se lleva a cabo el fenómeno de adsorción nuevamente con las partículas, el contaminante ocupará esa tercera parte totalmente, hasta que la concentración del contaminante se iguale, una vez que esta concentración aumente de manera significativa, comenzará un desplazamiento del agua de poro, y es aquí donde el tiempo de contacto con las partículas del suelo y las del agua, la concentración del contaminante comenzará a incrementar su solubilidad, sólo se disolverá en promedio la tercera parte del benceno y la fracción ligera de hidrocarburo que han sido adsorbidos en la zona fonicular, el resto quedará por arriba del nivel freático como fase libre y se dispersará. (Rucks *et al.*, 2004; Testa y Winegardner, 1991; Lyman *et al.*, 1992; Hern y Melancon, 1986)

Finalmente en la zona saturada se encontrara disuelto un porcentaje del contaminante que inició su solubilidad en la zona fonicular, y comienza su difusión en el agua subterránea. Todo lo anterior se ve reflejado a una profundidad de 4.8 m en la zona saturada, sin embargo, existe un aspecto muy marcado para los contaminantes, en el que de acuerdo con la teoría, la migración es limitada en primera instancia por la textura del sitio, seguido por los fenómenos de transporte que en este caso predomina la sorción seguida por la difusión, pese a todo ello a la profundidad de 7.2 m, la masa de los contaminantes se eleva por arriba de la cantidad de masa retenida en la zona fonicular, de acuerdo con Lesser (2000) y Lesser (2001) que en su trabajo con hidrocarburos en el suelo de la Ciudad de México, menciona que en la geología de la capital de México pueden existir fisuras

geológicas, así como debido a las excavaciones que se hicieron en su momento para la red de tuberías, y en el sitio se tiene una red hidráulica bastante amplia, que se convierte en un factor que permitió la migración del contaminante a profundidades mayores, y eso se puede ver en la profundidad de 6.0 m, donde la masa de benceno es menor y vuelve a incrementarse para 7.2 m. Una propiedad de los limos y arcillas es que por naturaleza tienden a formar grietas en las profundidades debido al flujo del agua, y que en el proceso de expansión compresión se van pronunciando cada vez más, lo que puede ser una vía de migración para un contaminante. (Rucks *et al.*, 2004; Testa y Winegardner, 1991; Lyman *et al.*, 1992; Hern y Melancon, 1986)

Como se muestra más adelante en las figuras para cada uno de los casos de los contaminantes, el factor más importante a considerar en la retención de los contaminantes para el pasivo ambiental “ex –Refinería 18 de marzo”, es la sorción (adsorción-desorción), ya que es el fenómeno que sigue presente. De acuerdo con lo que obtiene Nathwani y Phillips (1977), la adsorción en suelos con alto contenido de materia orgánica de constituyentes del petróleo, se da de la siguiente manera n-hexano>o-xileno>tolueno>benceno. Donde la desorción es inversamente proporcional con el contenido de materia orgánica; por lo tanto, a mayor materia orgánica del suelo menor desorción de los componentes en estudio.

Lo que de acuerdo con los porcentajes de materia orgánica del suelo reportadas en los estudios de caracterización para la zona 7 de la Ex – Refinería 18 de marzo, éstas son valores bajos comparados con los que reporta Nathwani y Phillips (1977), por lo que se esperaría una mayor desorción del benceno retenido y de los componentes de la fracción ligera de hidrocarburos (gasolina). Sin embargo no es el único parámetro que se puede considerar pero si influye de manera importante en la movilidad y disponibilidad del contaminante en el suelo, Grasso (1993) menciona que en pequeñas cantidades éste dominará el proceso de sorción porque es el responsable en la mayoría de la adsorción de los compuestos orgánicos volátiles (COV) en los suelos.

Algunos investigadores como Gregg y Sing (1982) y Fuller y Thomson (1987) mencionan que el proceso de adsorción esta fuertemente influenciado por la naturaleza de la sustancia química, tamaño de poro y la forma de los poros. Con lo anterior Seri-Levy y Avnir (1993) mencionan que la geometría de la superficie heterogénea sólo afecta el proceso de adsorción, así como el área superficial especialmente en los microporos (Chen y Wu., 1995).

Otro factor de importancia es el contenido de agua en el suelo (mejor conocida como humedad), el cual es uno de los factores que influyen en la migración de los compuestos orgánicos volátiles (COV) como lo son los BTEX en el subsuelo.

Por lo anterior, al incrementarse la humedad del suelo provoca una disminución en la porosidad de la misma y por consecuencia disminuye la adsorción del contaminante drásticamente, lo anterior se debe a la competencia entre el agua y

las moléculas orgánicas por los sitios disponibles de adsorción del suelo y por la disminución de los poros libres disponibles para la difusión del gas debido al incremento del contenido de agua (Poulsen *et al.*, 1999), de acuerdo con Yaron *et al.*, (1989), el cambio de orden de preferencia de adsorción confirma su hipótesis que la superficie interna de las arcillas no está disponible cuando el suelo está muy seco. La hidratación parcial del sistema expande las rejillas de las arcillas lo que incrementa el número de sitios disponibles de adsorción. Considerando trabajos realizados con hidrocarburos totales de petróleo (HTP), muestran que en una baja humedad del suelo no se presenta una biodegradación significativa (Viñas *et al.*, 2005). Por lo que resulta que el contenido de agua en el suelo es un factor clave en la biodegradación del contaminante.

Considerando lo reportado por Alves *et al.*(2010), la materia orgánica del suelo muestra un impacto negativo incrementando su tiempo de rehabilitación, lo que refleja una fuerte adsorción del benceno en el suelo incrementando entre 75% y 62% los tiempos de remediación. Por lo tanto el contenido de agua (humedad) la materia orgánica y propiedades del suelo son determinantes en el destino de los contaminantes orgánicos volátiles.

Una vez aplicada la remediación en la zona 7 del sitio, se realizó nuevamente el balance de masa bajo los mismos parámetros aplicados a los datos previos a la rehabilitación, siguiendo la metodología desarrollada para el presente proyecto se puede apreciar el comportamiento de la masa remanente luego de la rehabilitación donde las masas (kg) disminuyeron considerablemente, proyectando así un porcentaje de remoción de masa de benceno entre el 89 y 95% alcanzando el punto máximo en las zonas de mayor masa de benceno retenida. En la figura 7.3 hay una distribución más homogénea de la masa retenida sin presentar variabilidad significativa de la masa.

La densidad aparente es una propiedad del suelo, en la que se encuentra inalterada la muestra que considera el volumen ocupado por las partículas y los poros, que a diferencia de la densidad real donde solo considera el peso de la muestra entre el peso de las partículas (Rucks *et al.*, 2004), considerando lo anterior se tienen los resultados para los cálculos con densidad aparente (DA), real (DR), y una media (DM) entre ellas, esto permite observar un comportamiento de la masa del contaminante retenido a cada profundidad donde la densidad aparente da masas menores que la real y esto es precisamente por considerar el volumen de los espacios porosos que disminuyen la densidad, y se puede ver cómo afecta de manera directa la cantidad de masa, quedando de la siguiente manera  $DA < DM < DR$ .

En la tabla 7.3 y 7.4 se presenta el resultado del balance de masa para la fracción ligera de hidrocarburo (FLH) presente en la zona 7. En la tabla 7.3 se presentan los resultados antes de la remediación y la tabla 7.4 para después de dicha remediación. Al igual que en el caso del contaminante benceno, se realizó para las tres densidades y las tres diferentes concentraciones,

Tabla 7.3 Resultados del balance de masa para la fracción ligera de hidrocarburos de 1.2 m a 7.2 m antes de la rehabilitación

Profundidad (m)	Densidad aparente			Densidad media			Densidad real		
	Media	per75	per95	Media	per75	per95	Media	per75	per95
	Masa (kg)	Masa (kg)	Masa (kg)	Masa (kg)	Masa (kg)	Masa (kg)	Masa (kg)	Masa (kg)	Masa (kg)
1.2	25660	24080	124800	32860	30840	159800	40060	37590	194800
2.4	62530	94430	192700	65850	99450	202900	124500	188000	383700
3.6	96540	144300	257000	132400	197900	352400	168200	251400	447800
4.8	125100	153700	259300	181200	222500	375300	237200	291300	491400
6	93200	110800	215700	148400	176400	343500	203600	242000	471200
7.2	34060	32620	162000	48670	46610	231500	63280	60610	301000
<b>Masa Total</b>	<b>437090</b>	<b>559930</b>	<b>1211500</b>	<b>609380</b>	<b>773700</b>	<b>1665400</b>	<b>836840</b>	<b>1070900</b>	<b>2289900</b>

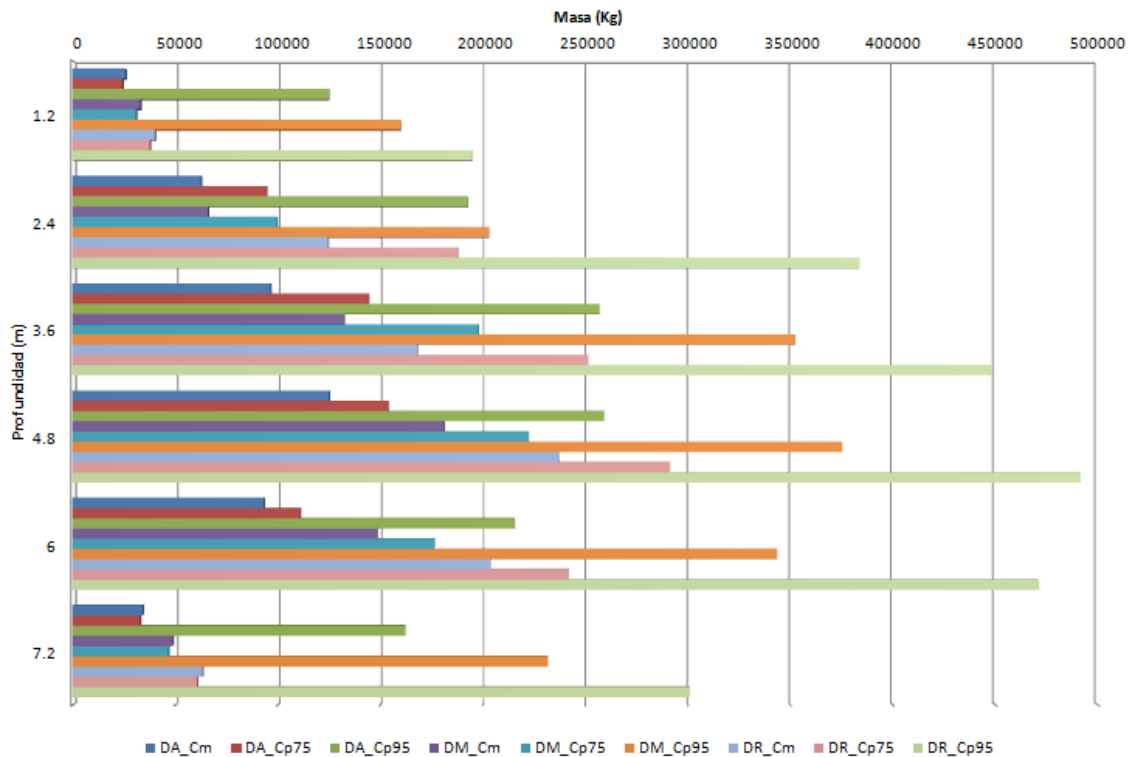
Tabla 7.4 Resultados del balance de masa para la fracción ligera de hidrocarburos de 1.2 m a 7.2 m después de la rehabilitación

Profundidad (m)	Densidad aparente			Densidad media			Densidad real		
	Media	per75	per95	Media	per75	per95	Media	per75	per95
	Masa (kg)	Masa (kg)	Masa (kg)	Masa (kg)	Masa (kg)	Masa (kg)	Masa (kg)	Masa (kg)	Masa (kg)
1.2	9262	12270	23900	11860	15710	30610	14460	19150	37320
2.4	10010	9136	22400	10540	9621	23210	19930	18190	43880
3.6	15720	18860	38620	21550	25860	52950	27380	32860	67290
<b>Masa Total</b>	<b>34992</b>	<b>40266</b>	<b>84920</b>	<b>43950</b>	<b>51191</b>	<b>106770</b>	<b>61770</b>	<b>70200</b>	<b>148490</b>

Se presentan las figuras 7.3 y 7.4, la figura 7.3 es antes de la remediación y la figura 7.4 después de la rehabilitación del suelo.

Al igual que la densidad en ambos contaminantes existe una notoria influencia de la variación del valor de la densidad, de la misma forma se tiene una fuerte influencia en los valores de las concentraciones calculadas, en este caso, se consideran los valores de concentración de percentil 95, ya que permite analizar el peor de los escenarios y obtener resultados que permitan tomar medidas con una sobrestimación y que asegure un menor riesgo.

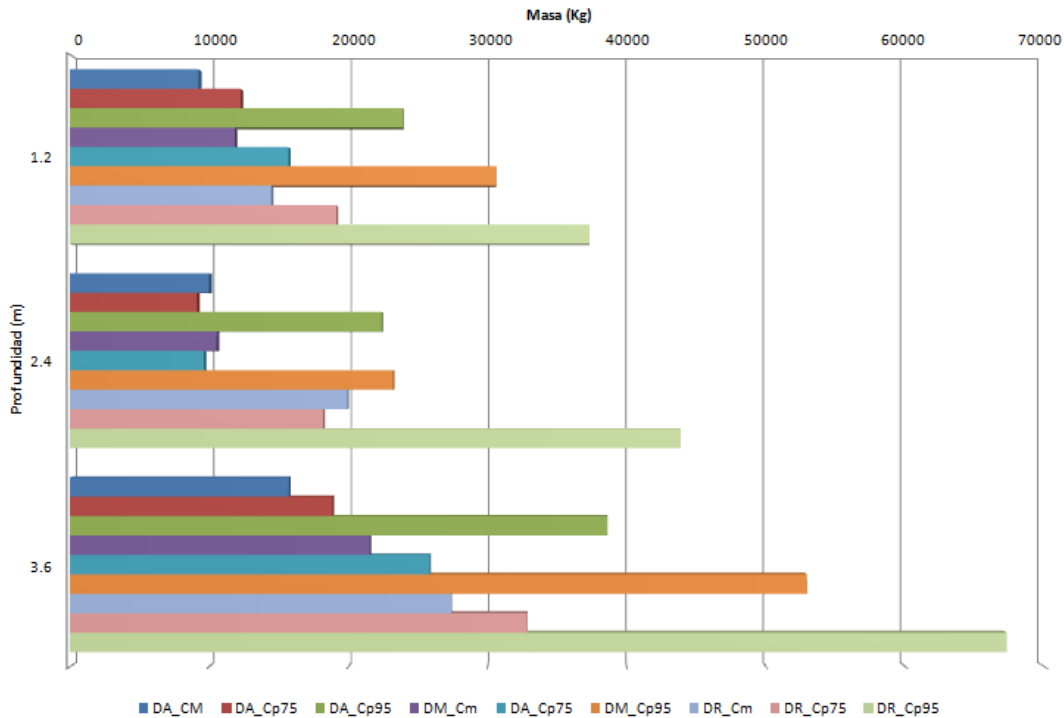
### Masa de fracción ligera de hidrocarburo antes de la remediación



DA\_Cm: Densidad Aparente\_Concentración media; DA\_Cp75: Densidad Aparente\_Concentración percentil 75; DA\_Cp95: Densidad Aparente\_Concentración percentil95; DM\_Cm: Densidad Media\_Concentración media; DM\_Cp75: Densidad Media\_Concentración percentil 75; DM\_Cp95: Densidad Media\_Concentración percentil95; DR\_Cm: Densidad Real\_Concentración media; DR\_Cp75: Densidad Real\_Concentración percentil 75; DR\_Cp95: Densidad Real\_Concentración percentil95

Figura 7.3 Masa de fracción ligera de hidrocarburos antes de la rehabilitación.

Masa de fracción ligera de hidrocarburo después de la remediación



DA\_CM: Densidad Aparente\_Concentración Media; DA\_Cp75: Densidad Aparente\_Concentración percentil 75; DA\_Cp95: Densidad Aparente\_Concentración percentil95; DM\_CM: Densidad Media\_Concentración Media; DM\_Cp75: Densidad Media\_Concentración percentil 75; DM\_Cp95: Densidad Media\_Concentración percentil95; DR\_CM: Densidad Real\_Concentración Media; DR\_Cp75: Densidad Real\_Concentración percentil 75; DR\_Cp95: Densidad Real\_Concentración percentil95

Figura 7.4 Masa de fracción ligera de hidrocarburos después de la rehabilitación.

Siguiendo el comportamiento de la curva en la figura 7.3 para una concentración con percentil 95 y una densidad aparente del suelo de fracción ligera de hidrocarburos presente en el suelo antes de la rehabilitación, se puede observar que los resultados con mayor cantidad de masa presente de (FLH) se encuentra al igual que el benceno en la zona de oscilación del nivel freático del acuitardo, y donde la FL tiende a retenerse por su propiedad química de insolubilidad en el agua, y que sigue el comportamiento reportado en la diversas investigaciones reportadas así como la literatura disponible consultada, se tiene masa de FLH por debajo de nivel freático, ésta masa presente en la zona saturada simplemente es el porcentaje correspondiente que se disuelve de acuerdo con la teoría y no sigue el mismo comportamiento que el caso del benceno, lo anterior se puede atribuir a que la fracción ligera de hidrocarburo mejor conocida como gasolina, está constituida por lo menos de 120 compuestos químicamente diferentes, por lo que para la gasolina existen hidrocarburos típicos, de ahí que cuando se detectan contaminación en suelos y acuíferos, éstos se buscan como indicadores de la presencia de combustible. Principalmente se buscan aquellos que por sus características puedan representar un riesgo a la salud de la población. Para el

caso de la gasolina los indicadores usados son los BTEX, y son los que se monitorean en la detección de gasolinas en el suelo bajo la cromatografía (Lesser, 2001). Como la FLH es una mezcla de hidrocarburos volátiles, en los primeros metros de profundidad se volatiliza de manera significativa reteniéndose en la zona de transición no saturada y saturada de manera libre. Y de igual manera por las propiedades físicas del suelo limo-arcilloso, queda retenido el contaminante de manera distinta para los BTEX, como se discutió anteriormente en el caso del benceno.

La masa calculada después de la rehabilitación se presentan en la figura 7.4. La remediación es evidente al ver la disminución considerable de la masa de FLH presente, sin embargo existen solo reportes después de la remediación solamente hasta una profundidad de 3.2 m. Esto puede deberse a que no se encontró FL pasando los 3.2 m de profundidad, o que la que se hayó no era significativa para reportarla, sin embargo no se encuentra una justificación en los reportes que lo sustenten. La figura 7.5 es la muestra clara que se disminuye la masa de contaminante remanente en el suelo, todo de acuerdo con lo datos reportados luego de la remediación aplicada al pasivo ambiental, la cual se ajustó la escala para poder ver de manera significativa el abatimiento de las masas. Finalmente el porcentaje de masa removida para el benceno y la FLH de acuerdo con la metodología fue de entre 89 y 95%.

Es importante conocer el riesgo a la salud que representa el benceno y la fracción ligera de hidrocarburo, ya que se conoce que son componentes cancerígenos especialmente el benceno. Por lo que, se logró obtener a partir de la masa remanente el riesgo a la salud que representa éste mediante la siguiente ecuación:

$$R_c = (\text{Conc.}/\text{NRECal}) * \text{Riesgo aceptable}$$

$R_c$  = Riesgo calculado

Conc(mg/kg) = Concentración

NRECal (mg/kg) = Nivel de remediación calculado

Riesgo aceptable = 0.00001

En la tabla 7.5 se muestra el riesgo calculado para las tres concentraciones de benceno (promedio, percentil 75 y percentil 95), así como en la figura 7.7, 7.8 y 7.9 se muestra su comportamiento gráfico por profundidad del riesgo calculado de acuerdo a la concentración remanente

Tabla 7.5 Riesgo calculado antes de la rehabilitación para el benceno

Profundidad (m)	Rcpro	RCp75	RCp95
1.2E+00	6.3E-08	4.9E-08	1.7E-07
2.4E+00	7.3E-07	5.1E-08	1.2E-06
3.6E+00	1.7E-06	1.2E-07	4.4E-06
4.8E+00	7.5E-06	1.7E-06	1.3E-05
6.0E+00	1.1E-06	5.6E-07	6.7E-06
7.2E+00	5.0E-06	6.5E-08	2.2E-05

De la figura 7.5 a la 7.7 se muestran las curvas del riesgo a la salud que se presentan para el benceno en el rango de profundidad analizado (0-7.2m), considerando el valor de riesgo aceptable=0.00001 para el benceno indican un bajo riesgo asociado antes de la remediación, si consideramos el peor escenario que sería con percentil 95 en la figura 7.9, se puede ver que es directamente proporcional con el comportamiento de las masa reportadas en el balance, lo que indica que donde existen los dos picos más elevados de masa que son a 4.8 y 7.2 m el riesgo a la salud es elevado y sobrepasan el nivel de riesgo a la salud aceptado. Sin embargo para las curvas que se muestran en las figuras 7.5 y 7.6 con concentraciones promedio y percentil 75, no siguen el mismo comportamiento debido a que las concentraciones obtenidas no superan significativamente el riesgo a la salud.



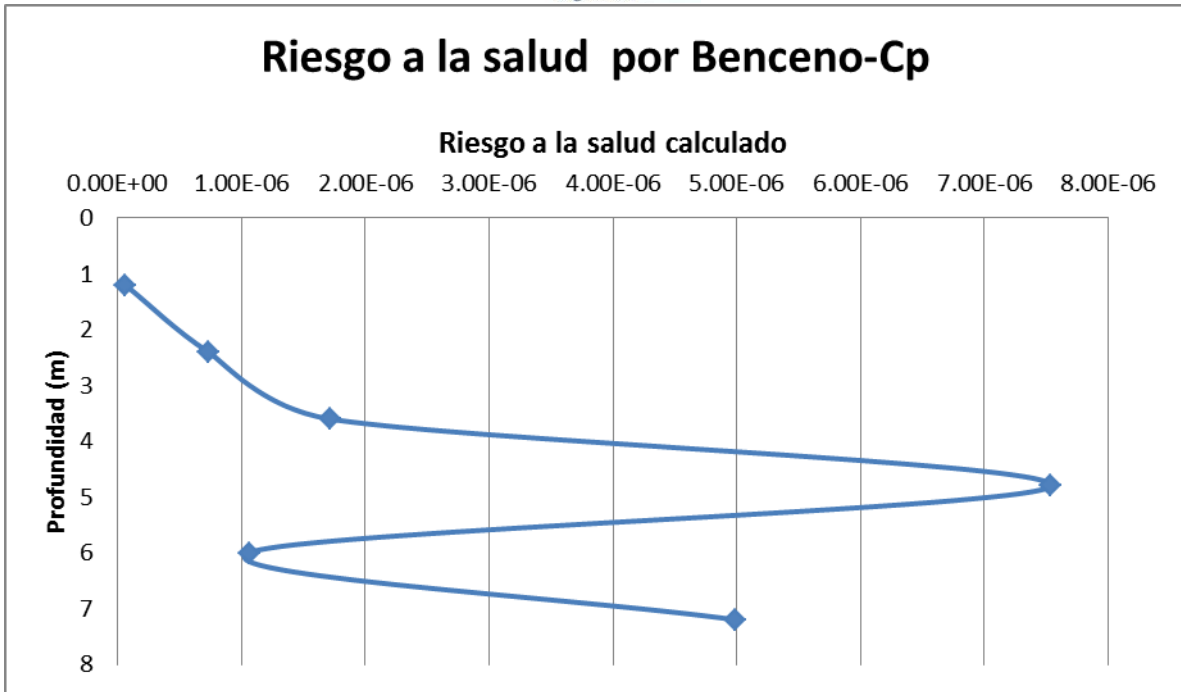


Figura 7.5 Riesgo a la salud por profundidad calculado para el benceno con una concentración promedio (Cp), antes de la rehabilitación

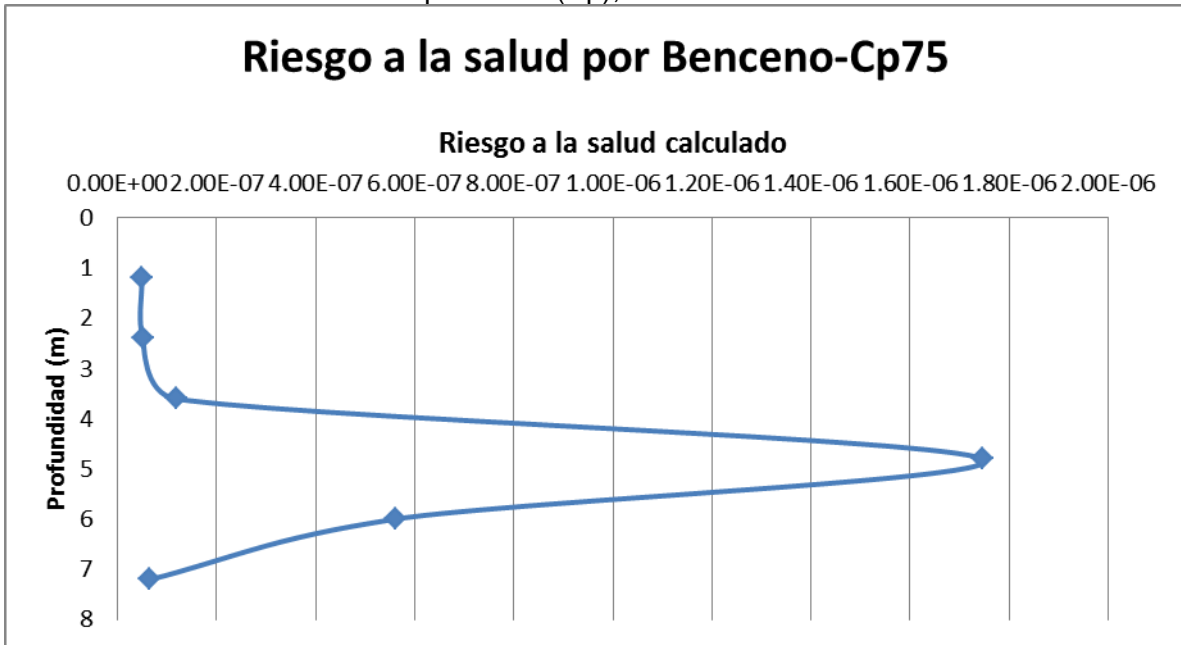


Figura 7.6 Riesgo a la salud por profundidad calculado para el benceno con una concentración percentil 75 (Cp75), antes de la rehabilitación

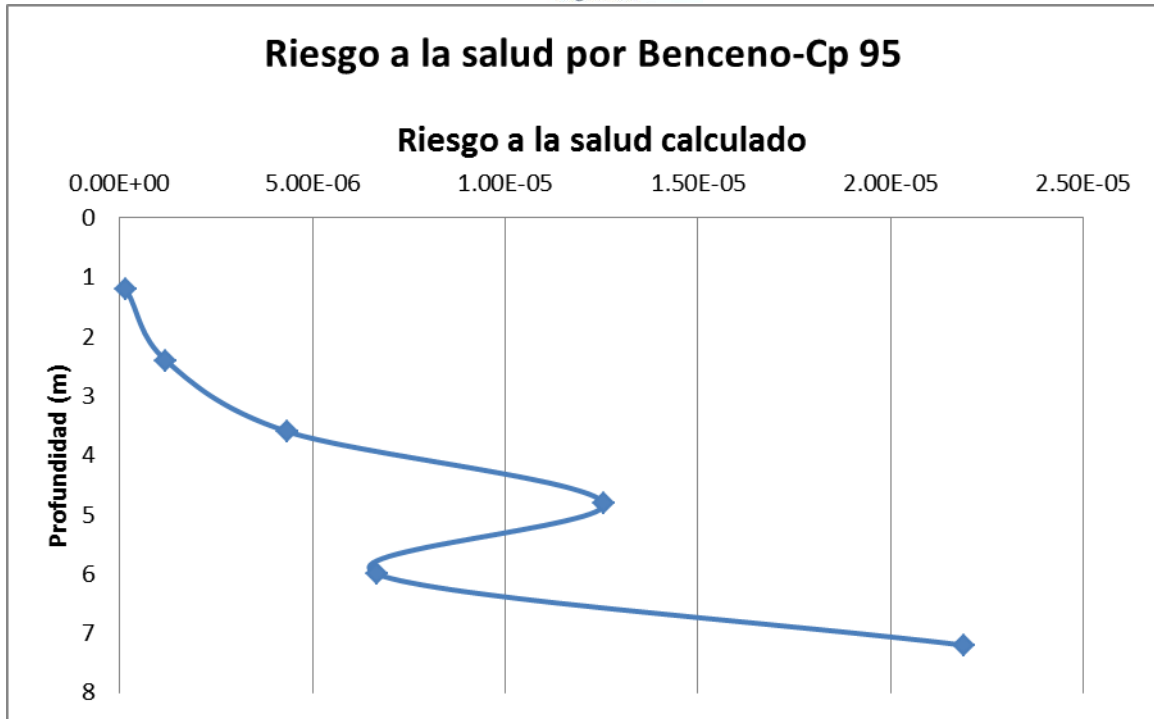


Figura 7.7 Riesgo a la salud por profundidad calculado para el benceno con una concentración percentil 95 (Cp95), antes de la rehabilitación

En la tabla 7.6 se muestran los resultados del riesgo a la salud calculado para el benceno una vez que se ha aplicado la rehabilitación en el sitio, en ella se puede ver de inicio que se disminuye el riesgo para cualquiera de los tres posibles escenarios con concentraciones: promedio, percentil 75 y percentil 95.

Tabla 7.6 Riesgo a la salud calculado para el benceno después de la rehabilitación

Profundidad (m)	RCpro	RCp75	RCp95
1.2	2.9E-07	3.7E-07	4.1E-07
2.4	2.9E-07	3.6E-07	3.9E-07
3.6	2.7E-07	3.6E-07	4.0E-07
4.8	2.4E-07	3.6E-07	3.9E-07
6	2.5E-07	3.6E-07	3.8E-07
7.2	2.5E-07	3.5E-07	3.9E-07

En las figuras 7.8 a la 7.10, se muestra el comportamiento del riesgo a la salud para el benceno después de la rehabilitación, se presentan por profundidad en tres posibles escenarios: concentración promedio, concentración percentil 75 y concentración con percentil 95. De manera general para los tres se ve una clara disminución del riesgo a la salud por debajo del aceptado. En los tres escenarios existe una representación gráfica homogénea con la clara tendencia a ir disminuyendo conforme la profundidad aumenta, y comparado con el peor escenario antes de la rehabilitación que se muestra en la figura 7.9, se puede ver claramente que el riesgo se abate.

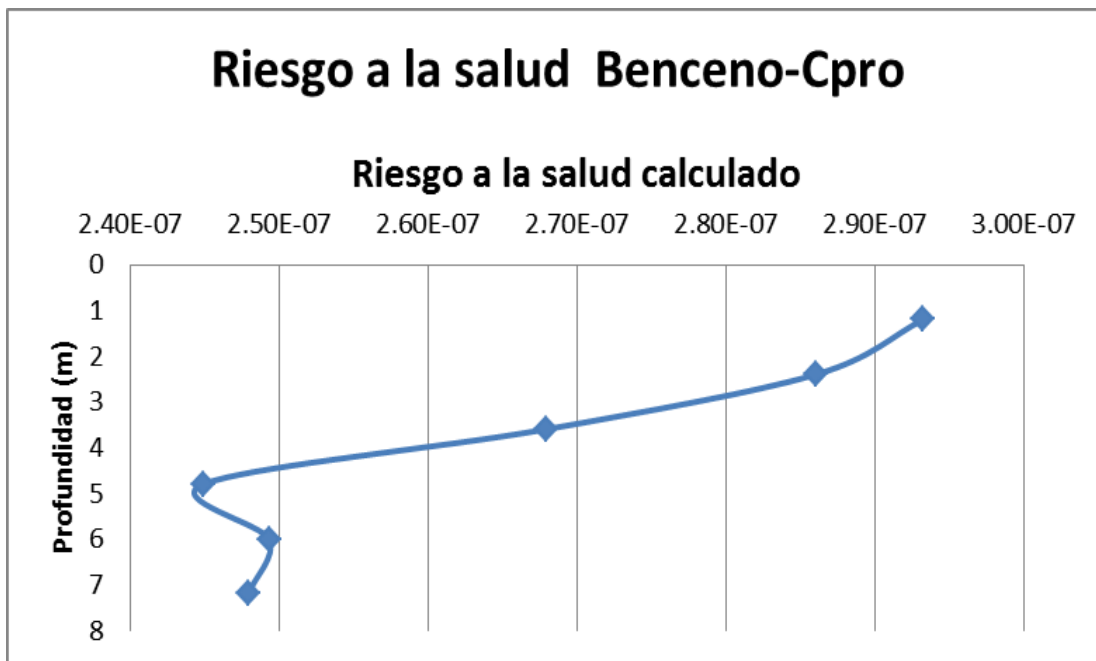


Figura 7.8 Riesgo a la salud por profundidad calculado para el benceno con una concentración promedio(Cp), después de la rehabilitación

## Riesgo a la salud Benceno-Cp75

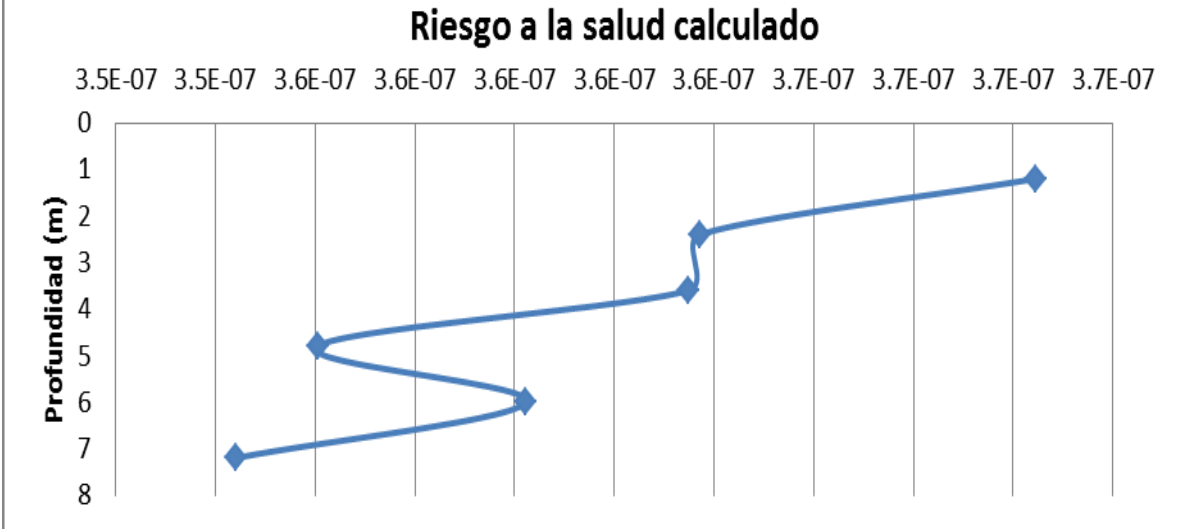


Figura 7.9 Riesgo a la salud por profundidad calculado para el benceno con una concentración percentil 75(Cp75), después de la rehabilitación

## Riesgo a la salud Benceno-Cp95

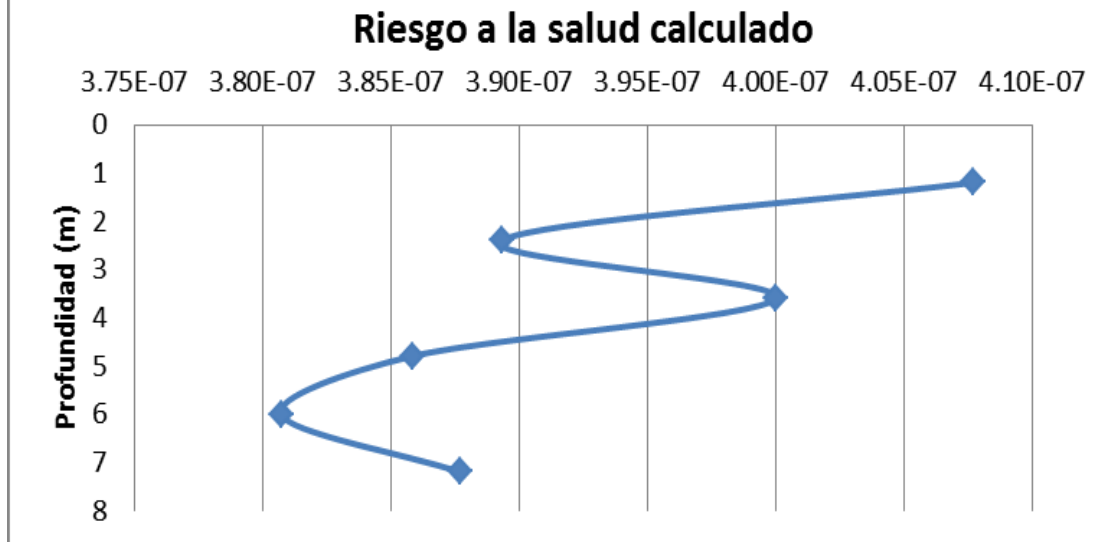


Figura 7.10 Riesgo a la salud por profundidad calculado para el benceno con una concentración percentil 95 (Cp95), después de la rehabilitación

Para obtener el riesgo a la salud en la fracción ligera de hidrocarburos se consideró el mismo valor que el del benceno, ya que de acuerdo con lo reportado por Lesser, (2001) los BTEX son indicadores para detectar la presencia de gasolina en el suelo y son los que representan un riesgo a la salud, por tal motivo se consideró el contaminante con mayor riesgo a la salud que es el benceno. La tabla 7.7 indica el riesgo a la salud antes de la rehabilitación para la FLH para los tres tipos de concentración: promedio, percentil 75 y percentil 95.

Profundidad (m)	RCpro	RCp75	RCp95
1.2	2.5E-07	2.3E-07	1.2E-06
2.4	8.3E-07	1.2E-06	2.5E-06
3.6	1.1E-06	1.6E-06	2.9E-06
4.8	1.5E-06	1.9E-06	3.1E-06
6	1.2E-06	1.5E-06	2.8E-06
7.2	3.6E-07	3.5E-07	1.7E-06

Tabla 7.7 Riesgo a la salud calculado para la fracción ligera antes de la rehabilitación

En la figura 7.11 a la 7.13 antes de la rehabilitación no sobrepasaban el valor del riesgo a la salud aceptable y la profundidad de 4.8 es el punto donde existe la mayor concentración del contaminante y que es el único punto donde se alcanza la mayor masa de fracción ligera de acuerdo con los resultados mostrados previamente en el balance de masa, y que no sobrepasa el riesgo aceptable, Considerando lo anterior y comparando con los datos de riesgo después de la remediación, los valores se abaten significativamente con valores por debajo de  $4.0E-7$ , lo que hace ver que el riesgo está por debajo. Se puede apreciar en las tres figuras que siguen el mismo comportamiento por lo que sí se considera el peor de los escenarios, a pesar de eso el riesgo a la salud no es significativo.

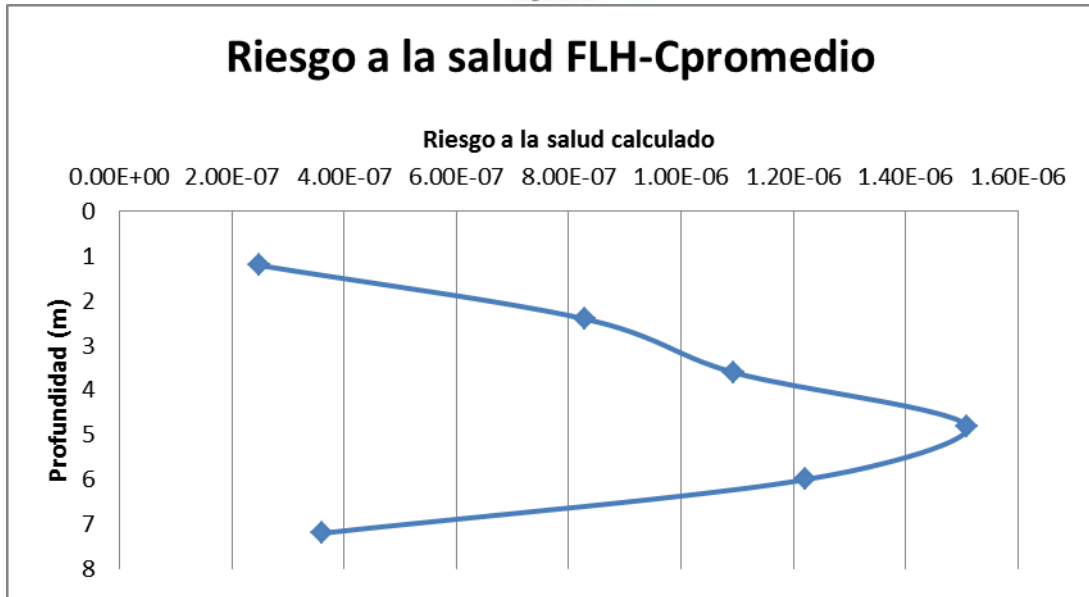


Figura 7.11 Riesgo a la salud por profundidad calculado para la fracción ligera de hidrocarburo con una concentración promedio ( $C_p$ ), antes de la rehabilitación.

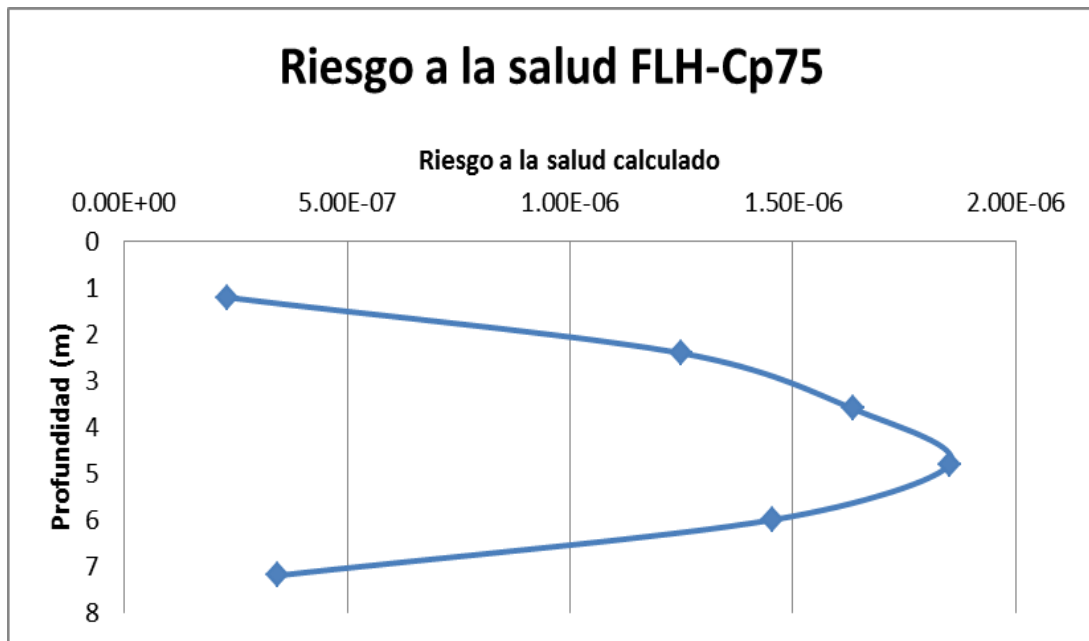


Figura 7.12 Riesgo a la salud por profundidad calculado para la fracción ligera de hidrocarburo con una concentración percentil 75 ( $C_{p75}$ ), antes de la rehabilitación.

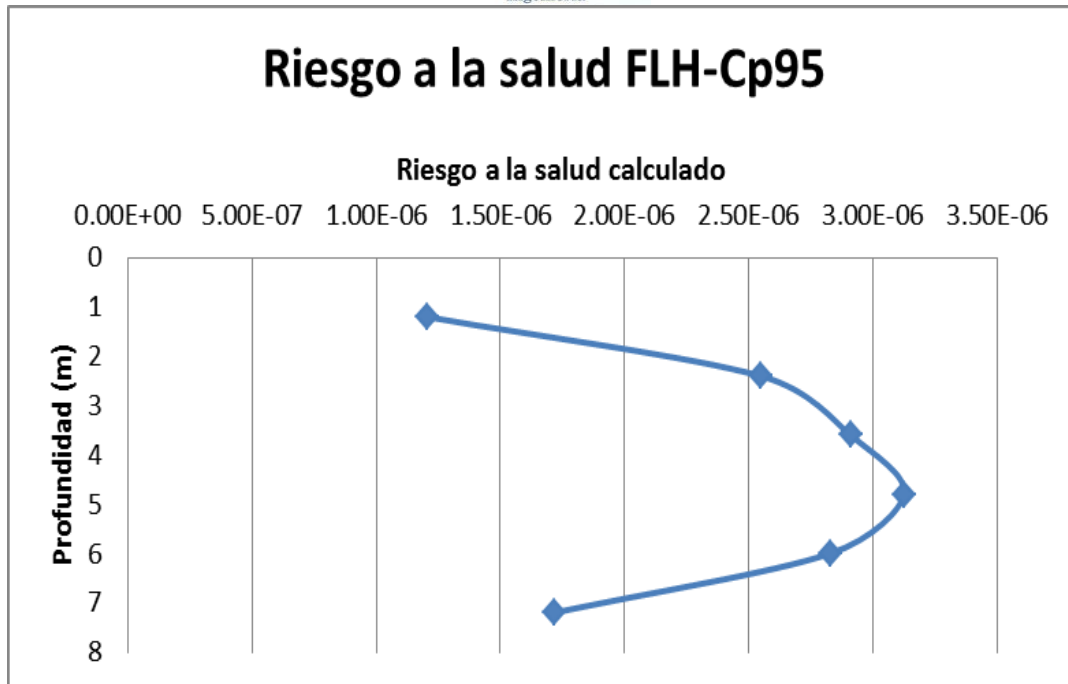


Figura 7.13 Riesgo a la salud por profundidad calculado para la fracción ligera de hidrocarburo con una concentración percentil 95 (Cp95), antes de la rehabilitación.

Finalmente en la tabla 7.8 se muestra el riesgo calculado para la FLH después de la remediación, en la cual solo se puede ver una máxima profundidad de 3.6 m, razones que se explican con anterioridad de su falta de información. Y que de primera instancia se puede apreciar que el riesgo se disminuyó notablemente con respecto a la tabla 7.7, en la cual no se sobrepasaba el riesgo a la salud.

Tabla 7.8 Riesgo a la salud calculado par la fracción ligera de hidrocarburo después de la rehabilitación.

Profundidad (m)	RCpro	RCp75	RCp95
1.2	8.9E-08	1.2E-07	2.3E-07
2.4	1.3E-07	1.2E-07	2.9E-07
3.6	1.8E-07	2.1E-07	4.4E-07

Las figuras 7.14 a la 7.16 reflejan un comportamiento del riesgo muy homogéneo que por cuestiones de escala se tuvo que recortar el rango, sin embargo, siguen el mismo comportamiento para los tres escenarios analizados, donde lo importante es resaltar que en ningún momento el riesgo a la salud aceptable es superado.

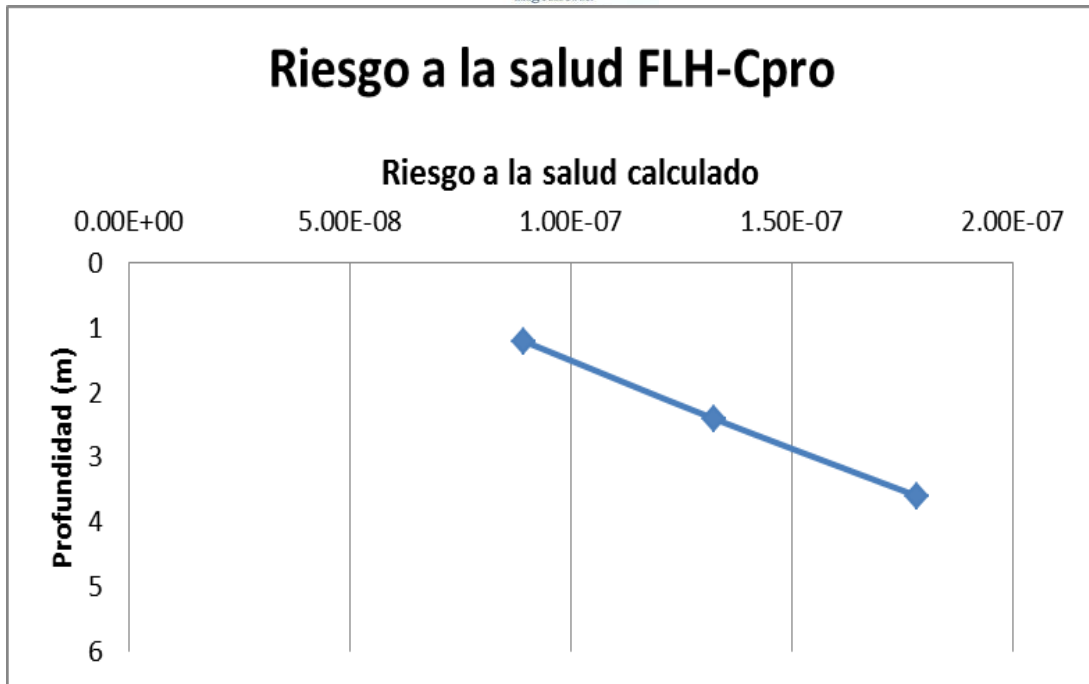


Figura 7.14 Riesgo a la salud por profundidad calculado para la fracción ligera de hidrocarburo con una concentración promedio (Cp), después de la rehabilitación

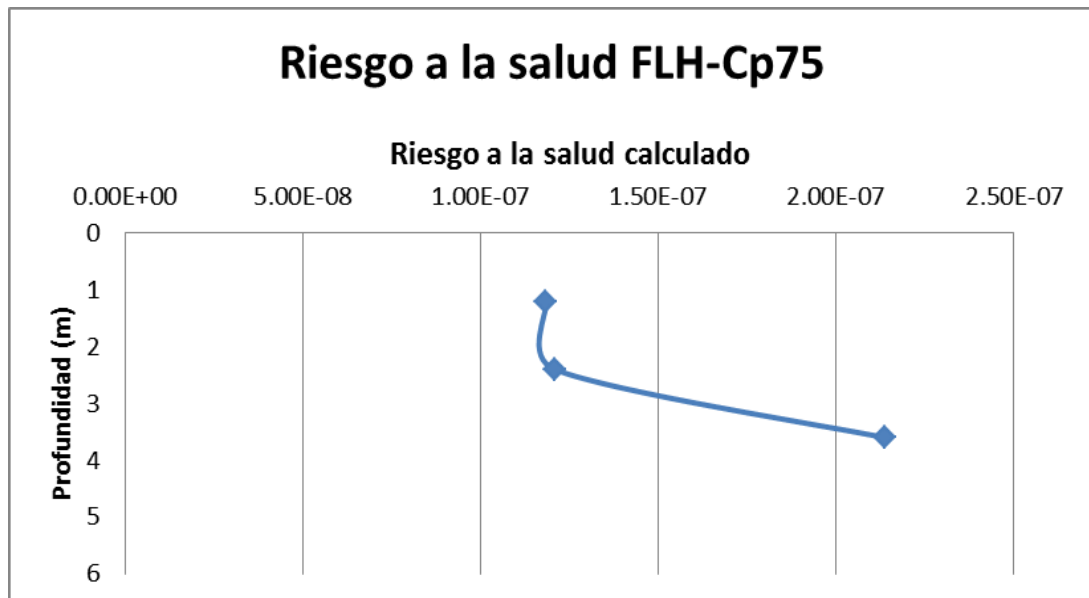


Figura 7.15 Riesgo a la salud por profundidad calculado para la fracción ligera de hidrocarburo con una concentración percentil 75 (Cp75), después de la rehanilitación



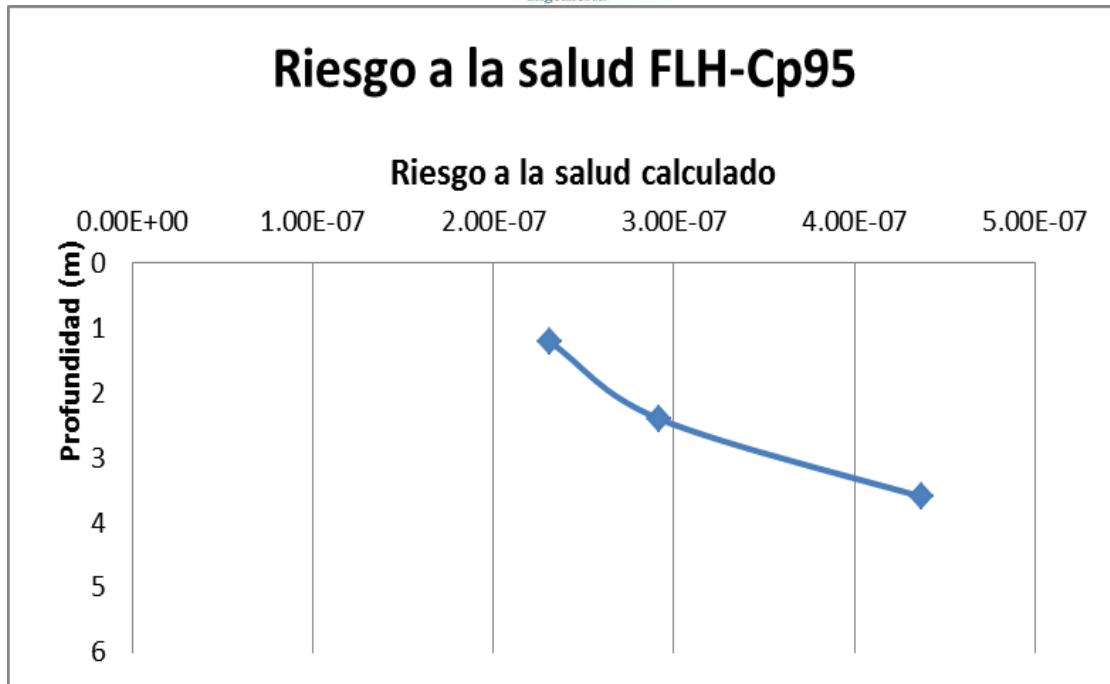


Figura 7.16 Riesgo a la salud por profundidad calculado para la fracción ligera de hidrocarburo con una concentración percentil 95 (Cp95), después de la rehabilitación

Los resultados aquí mostrados solo consideran el benceno y la fracción ligera de hidrocarburos presente en el suelo. En las gráficas de masa como de riesgo a la salud muestran un comportamiento de disminución en ambos, sin embargo, para alcanzar una mayor certeza en los resultados, resulta necesario realizar el mismo cálculo para el caso del agua subterránea, ya que no se está considerando la masa y el riesgo a la salud para la zona saturada, es relevante y de importancia conocer y saber el equilibrio que existe del contaminante disuelto en el agua y así como la disminución en estos dos factores para saber de manera integral las condiciones que guarda el pasivo ambiental, teniendo la referencia de que será un sitio de esparcimiento para la población.

Finalmente se presenta de la figura 7.17 al 7.20 el comportamiento del análisis de sensibilidad (antes y después de la remediación) que considera solamente la variable del cálculo de la masa, ya que las demás variables son determinísticas. Para poder hacer el análisis de sensibilidad se decidió considerar más o menos 10, 20 y 30% del valor de la densidad aparente.

Las figuras reflejan una variación que resulta ser directamente proporcional al cambio de la densidad aparente del suelo, y esto es lógico ya que el planteamiento del cálculo de la masa es directamente proporcional a la concentración por el volumen por la densidad aparente, por tal motivo la cantidad de masa que aumenta o disminuye es proporcional al porcentaje de sensibilidad que se colocó en la variable de la densidad aparente y este mismo comportamiento siguen los balances para la FLH antes y después de la remediación.

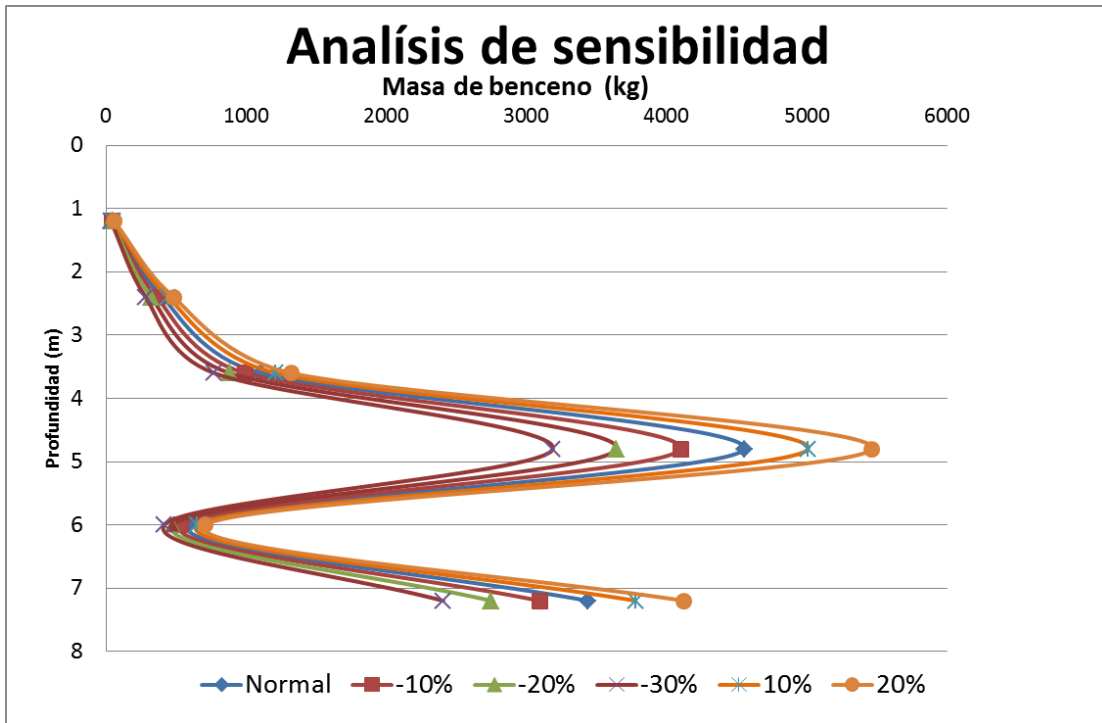


Figura 7.17 Análisis de sensibilidad para el benceno antes de la rehabilitación

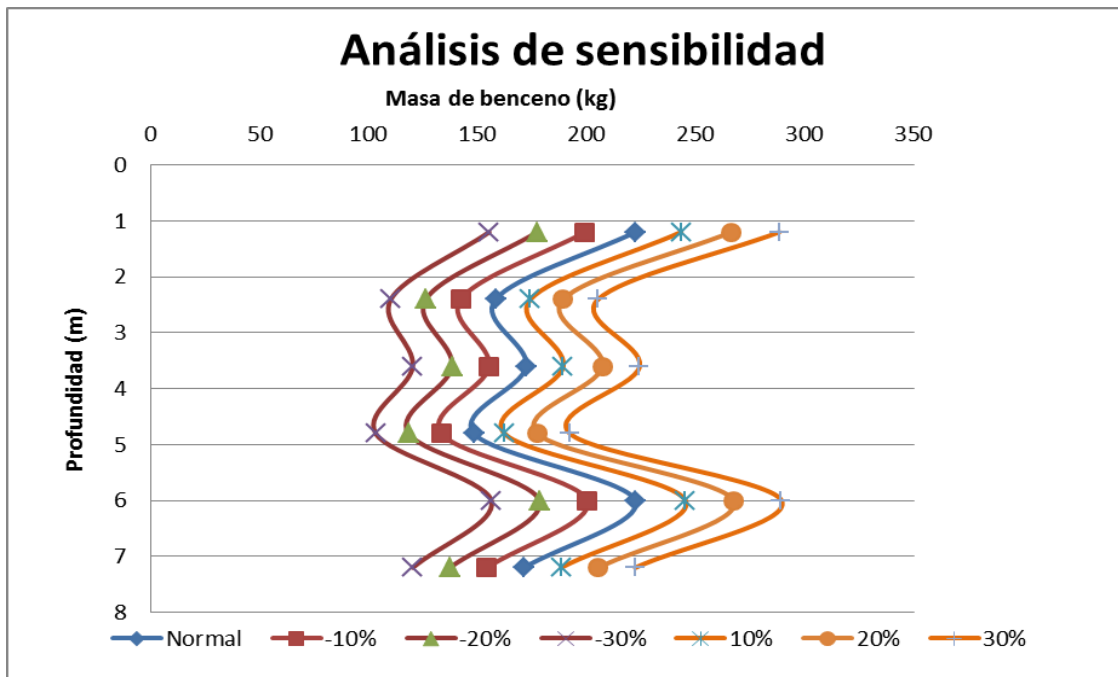


Figura 7.18 Análisis de sensibilidad para el benceno después de la rehabilitación

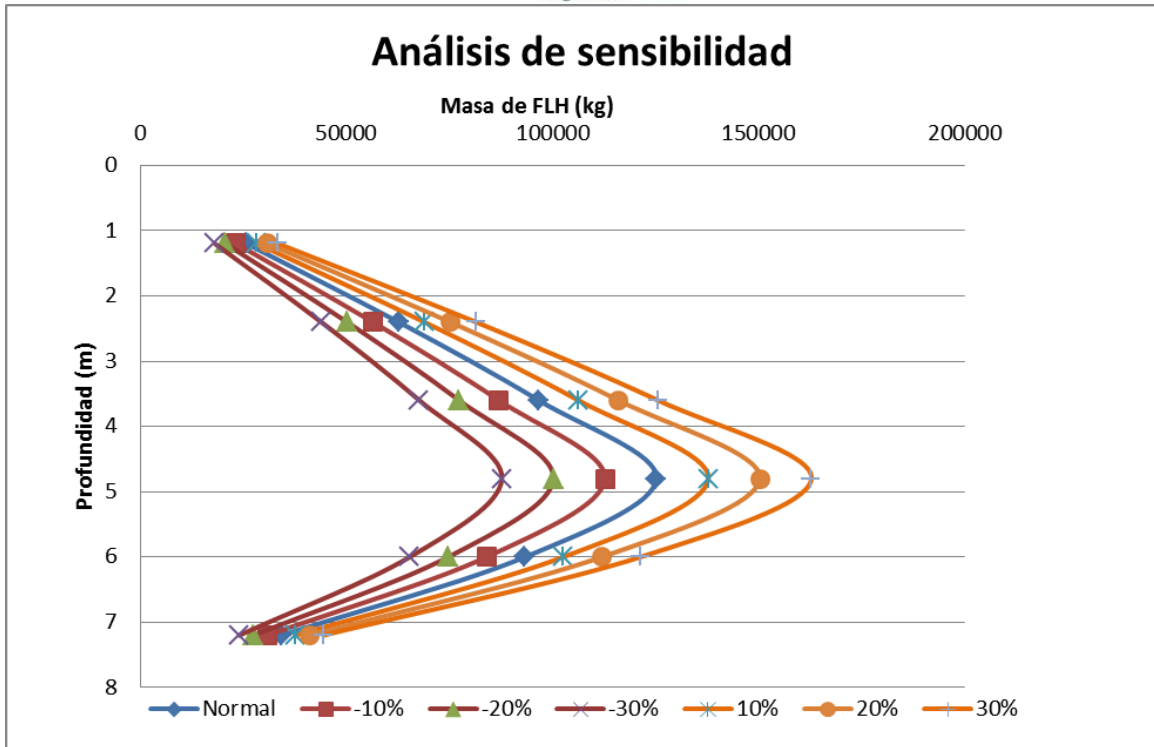


Figura 7.19 Análisis de sensibilidad antes de la rehabilitación para FLH (gasolina)

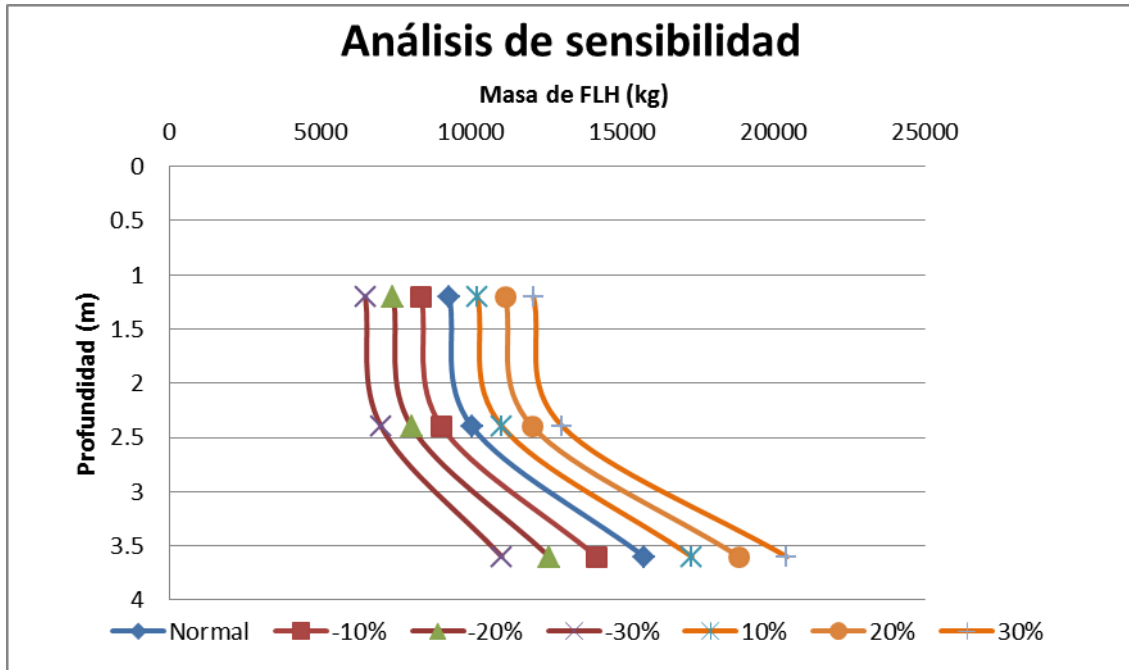


Figura 7.20 Análisis de sensibilidad después de la rehabilitación para FLH (gasolina)

Los resultados anteriormente mostrados, reflejan el estado que guarda el suelo sin considerar el agua en la zona saturada. El proyecto cuenta con reportes de concentración de benceno y fracción ligera de hidrocarburo en agua realizados por empresas particulares. Sin embargo, una vez que se aplicó la rehabilitación de la zona 7 de la Ex-Refinería 18 de marzo se tienen reportados solamente concentraciones para la fracción ligera de hidrocarburos hasta una profundidad de 3.6 m que coincide con el nivel freático. Lo anterior se puede deber a que los remanentes del contaminante se encuentran por debajo del nivel de riesgo y de los niveles máximos permisibles para agua potable reportados por la Agencia de Protección al Ambiente de los Estados Unidos de Norteamérica, por sus siglas en inglés USEPA, que para niveles de saneamiento iguales a  $1.0E-6$  se reportan para benceno 5.0mg/L, Etilbenceno 7.0E2 mg/L, Xileno 2.3E4 mg/L y Tolueno 1.5E3 mg/L.

Factores como la gravedad, el volumen del contaminante derramado, las propiedades del contaminante y del suelo, favorecen la migración de los contaminantes, además de los anteriores, existe un factor importante que hace migrar al contaminante hasta llegar al nivel freático y es la lluvia la que los arrastra sin disolverlos, alcanzando la franja capilar, lo que genera un aumento en la concentración de los contaminantes en fase libre, saturando el tercio de espacio poroso disponible en dicha franja, que al ir incrementándose provoca un colapso de la franja capilar llegando al nivel freático y presentándose la disolución (Testa and Winegardner, 1991; Freeze and Cherry, 1979; Boulding and Ginn, 2004; Domenico and Schwartz, 1990; Custodio y Llamas, 1983)

Por otro lado existe un mecanismo de atenuación natural que es la biodegradación, la cual, se ve favorecida por las fluctuaciones en el nivel freático y así lo reportan varios investigadores ( Fry *et al.*, 1997; Lenhard *et al.*, 2004; Kechavarzi *et al.*, 2005.) quienes mencionan que en zonas saturadas con fluctuaciones en el nivel freático, la disolución y la biodegradación de hidrocarburos de fracción ligera se ve favorecida, debido a que cuando desciende el nivel freático el contaminante avanza verticalmente así como de forma horizontal en la franja capilar; es en esta última donde se ve favorecida la biodegradación por el aumento del oxígeno disuelto en dicha zona, lo que permite a las bacterias degradar el contaminante.

Existe la formación de lentes con contaminantes disueltos por debajo de la franja capilar debido a su característica de baja densidad, éstos permanecerán atrapados entre la zona saturada y la franja capilar. Por lo que para el caso del presente proyecto se puede decir que la única forma en la que los contaminantes se puedan mover en la zona saturada del acuitardo es por el descenso del nivel freático por debajo de los lentes formados arrastrando los contaminantes, generando una nueva zona insaturada que se presenta en el proceso (Testa and Winegardner, 1991; Freeze and Cherry, 1979; Boulding and Ginn, 2004; Domenico and Schwartz, 1990; Custodio y Llamas, 1983)

Así mismo se sabe que el volumen de agua presente para la zona 7 es aproximadamente de  $5963 \text{ m}^3$ , con una profundidad de 4 m y existe un descenso del nivel freático de aproximadamente 1 m de acuerdo con los estudios reportados mismos que se realizaron entre los meses de junio y agosto del año 2008.

Lo anterior se fundamenta por diferentes autores (Testa, 1991; Freeze and Cherry, 1979; Boulding and Ginn, 2004; Domenico and Schwartz, 1990; Custodio y Llamas, 1983) quienes mencionan que la biodegradación se ve favorecida en la franja capilar a través de las fluctuaciones del nivel freático.

Existen investigaciones como la de Dobson *et al.*, (2007) donde se hace una comparativa de la distribución y biodegradación de hidrocarburos densamente ligeros en un modelo estático con otro donde existen fluctuaciones en el nivel freático. Como resultados se obtienen que en el modelo de las fluctuaciones existe una mayor difusión del contaminante, pero es en este mismo donde se ve favorecida la biodegradación con el paso del tiempo en comparación con el modelo estático.

Se recomienda dar seguimiento en la zona saturada de la zona 7 del pasivo ambiental con la finalidad de verificar que las concentraciones de los contaminantes permanezca en un valor que no represente un riesgo a la salud.

## **CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES**

*Dar respuesta a los objetivos planteados en un inicio, es la parte que se muestra en el presente capítulo.*

*La contribución se ve ya definido en cada conclusión que se presentan.*

- Se analizó la evolución de la contaminación por benceno y fracción ligera de hidrocarburos en la zona 7 de la Ex – Refinería 18 de Marzo consultando documentos históricos. Dichos documentos fueron proporcionados por PEMEX.
- Se desarrolló la metodología de balance de masa en el suelo contaminado con benceno y fracción ligera de hidrocarburos, en función de las concentraciones a cada 1.2 m hasta una profundidad máxima de 7.2 m. La cual se puede aplicar a cualquier tipo de suelo que se encuentre contaminado, ya que las variables que se consideran no son exclusivas de la metodología, son requerimientos que se obtienen en cualquier caracterización de un sitio. Por lo anterior se propone una difusión de dicha metodología.
- Se aplicó la metodología en la zona 7 del pasivo ambiental de la ex – refinería 18 de marzo de la Ciudad de México, mediante el cálculo de su masa a cada 1.2 m de profundidad del suelo y considerando los límites máximos permisibles reportados en la Norma Oficial Mexicana NOM-138-SEMARNAT/SS-2003.
- Se determinó la masa de benceno y fracción ligera de hidrocarburos considerando tres concentraciones distintas: promedio, percentil 75 y percentil 95. Así como la influencia de la densidad del suelo a diferentes valores: densidad real, densidad promedio, y densidad aparente en la masa del contaminante presente en la zona 7 del pasivo ambiental. Se realizó el balance de masas en función de las concentraciones del benceno a cada 1.2 m de profundidad hasta alcanzar una profundidad máxima de 7.2 m. El muestreo consideró hasta una profundidad máxima de 7.2 m, con intervalos de 1.2 m, trabajando con un total de 642 muestras de 122 perfiles georreferenciados antes y después de la remediación. Fueron 28 puntos de muestreo para el benceno y 34 puntos para los HFL antes de la remediación, de acuerdo con la NOM-138-SEMARNAT/SS-2003, el número de muestras que se recomienda para un área de 7.4 hectáreas es de entre 33 y 38. Haciendo uso del balance de masas solo se puede determinar la masa de los contaminantes en pasivos ambientales retenida antes y después de una rehabilitación, ya que no se conoce los volúmenes que se derramaron realmente.
- Se estimó y analizó el riesgo a la salud del contaminante presente a distintas profundidades antes y después de la rehabilitación considerando tres distintos valores de concentración de los contaminantes. En el monitoreo de la remediación del pasivo ambiental se vuelve relevante la relación masa de contaminante-riesgo a la salud calculado, pues mediante ambos cálculos se puede evaluar si la técnica de rehabilitación cumple con el objetivo de disminuir la masa del contaminante, así como, el riesgo asociado a ésta. Con el balance de masa se puede ver claramente las

variaciones de los niveles de riesgo del pasivo ambiental debido a las cargas del contaminante remanente en el suelo. El cual no representa un riesgo a la población que hará uso del sitio con fines de esparcimiento.

- Se evaluaron los resultados de la aplicación de la metodología al caso de estudio mediante el análisis de sensibilidad del balance de masas. La cual resulta ser que la masa que se obtiene es directamente proporcional con el cambio de densidad del suelo, a mayor densidad mayor masa se obtiene.
- Se realizó la evaluación de la eficiencia de la remediación de sitios contaminados mediante la aplicación de una metodología para la determinación de la carga total de contaminantes orgánicos validándola en un caso específico de la zona 7 de la Ex – Refinería 18 de marzo ubicada en la Ciudad de México. La eficiencia de remediación que se obtuvo mediante el balance de masa para el benceno y la fracción ligera de hidrocarburo se encuentra en el rango de 89-95%.
- Finalmente la hipótesis donde haciendo uso del balance de masa se puede determinar el destino de los contaminantes en pasivos ambientales en los cuales se realiza la remediación es rechazada. Ya que para un caso real como el que es objeto de estudio en el presente trabajo, no se puede determinar el destino de los contaminantes en términos de masa, ya que en primer lugar no se tiene un registro verídico de los eventos de accidentes que se desarrollaron en el sitio y los volúmenes que se derramaron, lo que provocaría un error al realizar los cálculos; en segundo lugar, para poder determinar el destino de los contaminantes sería necesario realizar una simulación del transporte de los contaminantes y éste ha sido muy estudiado a detalle por otros investigadores.
- Se recomienda complementar para mayor alcance, el cálculo de la masa del benceno y la fracción ligera de hidrocarburo presentes en el agua, así como su respectiva evaluación de riesgo a la salud. Lo que permitirá una toma de decisión con mayor certeza en futuras evaluaciones de rehabilitación de pasivos ambientales usando la presente metodología del balance de masas.



**ANEXO "A": BALANCE DE  
MASA DEL BENCENO Y  
FRACCIÓN LIGERA DE  
HIDROCARBURO  
PRESENTE EN EL SUELO.  
(DISPONIBLE SOLO EN  
FORMATO ELECTRÓNICO)**

*Se presenta la memoria de cálculo del balance de masa para su consulta.*

*Sin embargo como se menciona solo se encuentra disponible en formato electrónico para su consulta, se puede encontrar en el CD ubicado en la contraportada de la tesis.*

## **GLOSARIO DE TÉRMINOS**

*Siempre es importante poder comprender los conceptos que suelen ser desconocidos, o recordarlos de la manera más rápida y sencilla.*

*Por tal motivo se presenta en el presente anexo un glosario de términos para comprender lo mejor posible lo que se presenta en la tesis, el objetivo no es volverse experto en el tema, pero si comprenderlo de la manera más fácil.*

## GLOSARIO DE TÉRMINOS

**Abatimiento del nivel del agua.** Descenso del nivel del agua subterránea observado en pozos de extracción, medido en metros y centímetros en un tiempo dado.

**Acuífero.** Es una unidad de suelo y/o de roca que contiene y transmite agua subterránea en cantidad y calidad suficiente y que puedan ser extraídas para su explotación, uso o aprovechamiento bajo un esquema de operación racional.

**Acuífero confinado.** Es aquel acuífero que está limitado en su parte superior por una unidad de baja conductividad hidráulica y el nivel piezométrico presenta una presión superior a la atmosférica.

**Acuífero libre.** Acuífero saturado de agua parcialmente situado sobre una capa impermeable, en la cual el nivel freático se encuentra a una presión igual a la atmosférica.

**Acuífero semiconfinado.** Aquel acuífero que tiene una unidad saturada de baja conductividad hidráulica en su parte superior o inferior que contribuye con un pequeño caudal (goteo) debido a los gradientes inducidos por bombeo del acuífero.

**Acuitardo.** Conjunto de estratos de geológicos de conductividad hidráulica baja (<10-6 m/s) que permiten un flujo muy lento de agua.

**Agua intersticial.** Es aquella que se encuentra en los espacios que existen entre dos rocas.

**Agua subterránea.** Es el agua que fluye en el subsuelo, en unidades de suelo y/o rocas parcial o totalmente.

**Aluvión.** Acumulación de sedimentos acarreados por las corrientes de agua.

**Cadena de custodia.** Registro que acompaña a las muestras desde su obtención hasta su entrega al laboratorio de pruebas y análisis.

**Carga hidráulica.** Es la energía presente en un acuífero, normalmente tiene dos componentes: a) la carga relacionada con la elevación con respecto a un punto de referencia que es normalmente el nivel medio del mar; y b) la carga de presión, o presión de poro.

**Características del sitio.** Características o propiedades físicas, químicas, mecánicas y dinámicas de un suelo y de la(s) sustancia(s) distribuidas en él, así como los procesos que controlan el comportamiento y transporte del contaminante

en el medio en el que se encuentra alojado y que proporcionan la comprensión de éstos para poder predecir su comportamiento futuro en el sitio.

**Caudal.** Volumen de agua que pasa en un punto en un tiempo dado ( $m^3/s$ ).

**Coefficiente de permeabilidad.** La capacidad que tiene un material que, en contacto con agua, u otro fluido, permite el paso de ésta desde la superficie superior hasta la parte de mayor profundidad de él mismo.

**Conductividad hidráulica.** Es la propiedad de un medio geológico de permitir el flujo de agua subterránea en un acuífero o acuitardo (velocidad a la cual fluye el agua), considerando las condiciones de densidad y viscosidad del agua.

**Conductividad hidráulica saturada.** Es la propiedad de un medio geológico que permite el flujo de agua subterránea en un acuífero o acuitardo, considerando las condiciones de densidad y viscosidad del agua en condiciones de saturación.

**Cuenca hidrológica.** Área de captación de los escurrimientos superficiales.

**Derrame.** Cualquier descarga, liberación, rebose, achique o vaciamiento de hidrocarburos que se presente en suelo.

**Descripción estratigráfica.** Es la descripción de los estratos del subsuelo en cuanto a sus propiedades físicas, químicas e hidráulicas, de acuerdo al código de nomenclatura estratigráfica vigente.

**Discontinuidades.** Superficie marcada por modificaciones radicales de las propiedades físicas de las rocas. Estas discontinuidades pueden ser por ejemplo, fallas o fracturas.

**Factor de tránsito de infiltración.** El cociente que refleja la oposición que presenta el suelo, en el sitio elegido, para que el agua se infiltre a través de él.

**Geofísica.** La ciencia que estudia las propiedades físicas de la tierra mediante métodos indirectos para identificar unidades de suelo/roca y diversas estructuras geológicas presentes en la tierra.

**Geología.** Es el estudio de la formación, evolución, distribución, correlación de los diferentes fenómenos presentes y pasados en la tierra.

**Hidrocarburos.** Compuestos químicos, constituidos principalmente por átomos de carbono e hidrógeno.

**Hidrocarburos de fracción ligera.** Mezcla de hidrocarburos cuyas moléculas contengan cadenas lineales entre cinco y diez átomos de carbono (C5 a C10).

**Hidrocarburos de fracción media.** Mezcla de hidrocarburos cuyas moléculas contengan cadenas lineales entre diez y veintiocho átomos de carbono (C10 a C28).

**Hidrocarburos de fracción pesada.** Mezcla de hidrocarburos cuyo peso molecular sea mayor a C18

**Hidrogeología.** Es la ciencia que brinda el conocimiento de las aguas subterráneas y las circunstancias geológicas condicionantes que engloba actividades como perforaciones, determinación de la recarga, profundidades a nivel estático, interacción química agua-roca y propiedades hidráulicas que permiten conocer y localizar los sistemas de aguas subterráneas, su dirección y velocidad de movimiento.

**Hidrogeoquímico.** Relativo a la composición química de las aguas continentales, sus cambios y las causas de los mismos.

**Hidrología.** La ciencia que estudia los componentes primarios del ciclo hidrológico y su relación entre sí. Considera la interacción y dinámica de la atmósfera con cuerpos de agua superficial tales como ríos, arroyos, lagunas, lagos, etc.

**Infiltración.** Introducción suave de un líquido entre los poros de un sólido referido al agua, el paso lento de ésta a través de los intersticios del suelo y del subsuelo.

**Inundación.** Cantidad de agua que excede la capacidad del cauce.

**Laboratorio de pruebas.** Laboratorio con métodos acreditados y aprobados conforme a lo establecido en la Ley Federal sobre Metrología y Normalización.

**Lixiviados.** Horizonte de un suelo en que el agua ha arrastrado algunos de sus elementos líquido que disuelve uno o más componentes.

**Muestra duplicada.** Una de dos o más muestras o submuestras que se obtienen separadamente en el mismo sitio, al mismo tiempo y con el mismo procedimiento de muestreo.

**Muestreo dirigido.** Muestreo que se lleva a cabo sobre puntos específicamente determinados, cuando se cuenta con información previa del sitio, se conoce el producto derramado y es evidente la extensión de la afectación.

**Nivel de fondo.** Concentración en el suelo de los hidrocarburos regulados que no son atribuibles a la fuente de contaminación que se está considerando y que se encuentran de manera natural o fueron generados por alguna fuente antropogénica ajena a la considerada.

**Nivel freático.** Es la superficie de agua que se encuentra en el subsuelo sobre una capa impermeable del terreno, bajo el efecto de la fuerza de gravitación y que delimita la zona de aireación de la de saturación.

**Nivel piezométrico.** Es el valor de la carga hidráulica observado de un acuífero o acuitardo a diferente profundidad en el mismo y en el medio saturado.

**Parámetros hidráulicos.** Son la conductividad hidráulica, la porosidad, la carga hidráulica, los gradientes hidráulicos de una unidad hidrológica, así como su coeficiente de almacenamiento.

**Pasivo Ambiental.** Sitio contaminado, que no ha sido remediado, en el que pueden, además, encontrarse depósitos o apilamientos de residuos sólidos, de manejo especial o peligrosos, los cuales deben de ser manejados conforme a la legislación vigente.

**Percolación.** Es el movimiento descendente de agua a través del perfil del suelo debido a la influencia de la gravedad, especialmente en suelos saturados o casi saturados.

**Permeabilidad.** La propiedad que tiene una sección unitaria de terreno para permitir el paso de un fluido a través de ella sin deformar su estructura bajo la carga producida por un gradiente hidráulico. Es la cualidad de las suelo o de sus horizontes que se relaciona con la transmisión del agua o del aire a todas las partes de su masa.

**Porosidad efectiva.** Es la relación del volumen de vacíos o poros interconectados de una roca o suelo dividido por el volumen total de la muestra.

**Potencial de contaminación.** Es la interacción entre el tipo, intensidad, disposición y duración de la carga contaminante con la vulnerabilidad del acuífero; está definida por las condiciones de flujo del agua subterránea y las características físicas y químicas del acuífero.

**Punto de muestreo.** Es el lugar específico donde se toma la muestra.

**Rocas piroclásticas.** Producto de erupciones volcánicas explosivas, y comprenden fragmentos de orígenes diferentes de muchas formas y diversos tamaños.

**Rocas sedimentarias.** Pertenecen las rocas que se han formado por meteorización, transporte y sedimentación. La causa de su formación son tanto físicas como químicas.

**Sistema de flujo.** Es definido por la dirección de flujo que sigue el agua subterránea, considerando las zonas de recarga y descarga, las cargas y gradientes hidráulicos a profundidad y el efecto de fronteras hidráulicas. Incluye además la interacción con el agua superficial y comprende sistemas locales, intermedios y regionales.

**Sitio de muestreo.** Es el área a muestrear.

**Suelos.** Los suelos son la cubierta superficial de la mayoría de la superficie continental de la Tierra. Es un agregado de minerales no consolidados y de partículas orgánicas producidas por la acción combinada del viento, el agua y los procesos de desintegración orgánica.

**Tobas.** Están formadas principalmente por cenizas (menos de 4 mm) o arenas volcánicas depositadas a una distancia mayor del respiradero que los aglomerados es común denominar tobas según la naturaleza de los fragmentos de roca reconocibles. Las cenizas se convierten en material arcilloso debido a la alteración que sufren.

**Unidades hidrogeológicas.** Conjunto de materiales geológicos que han acumulado agua de manera subterránea.

**Unidades litológicas.** Conjunto de materiales geológicos compuestos predominantemente de cierta asociación de minerales que tienen un origen común.

**Volumen de extracción.** Se refiere a la cantidad de agua subterránea que se extrae de un acuífero a través de pozos o norias.

**Zona de aireación.** La zona que contiene agua bajo presión menor a la de la atmósfera, está delimitada entre la superficie del terreno y el nivel freático.

**Zona de descarga.** Es la porción del drenaje subterráneo de la cuenca en la cual el flujo de agua subterránea fluye de mayor profundidad hacia el nivel freático; es decir el flujo subterráneo es ascendente.

**Zona de inundación.** Área sujeta a variaciones de nivel de agua por arriba del nivel del terreno asociadas con la precipitación pluvial, el escurrimiento y las descargas de agua subterránea.

**Zona de recarga.** Es la porción del drenaje subterráneo de la cuenca en la cual el flujo del agua subterránea fluye del nivel freático hacia mayor profundidad; es decir el flujo subterráneo es descendente.

**Zona de saturación.** El área que se caracteriza por tener sus poros o fracturas llenas de agua, su límite superior corresponde al nivel freático y su límite inferior es una unidad impermeable.

**Zona no saturada.** Es el espesor que existe entre la superficie del terreno y el nivel freático. Es equivalente a la profundidad del nivel freático.

**Zona vadosa.** Porción del acuífero comprendida entre su techo y el nivel piezométrico.

## ***REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS***



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Álvarez, J., (2006), *Crónica del Petróleo en México de 1863 a nuestros días*. PEMEX. México D.F. pp 89
- ATSDR, (2003), Agency for Toxic Substances and Disease Registry *Evaluación de Riesgos en Salud por la Exposición a Residuos Peligrosos*, Atlanta, Georgia.
- ATSDR, (1997), Agency for Toxic Substances and Disease Registry *Evaluación de Riesgos en Salud por la Exposición a Residuos Peligrosos*, Atlanta, Georgia.
- Berry. P., Reid, D., (1993), *Mecánica de Suelos*. Caicedo, B., Arieta, A. (Trad.). Colombia, ed. McGraw-Hill. 415 p.
- Boulding J.1994, *Description and Sampling of Contaminated Soils*. 2<sup>a</sup> edition, Editorial Lewis Publishers, Bloomington, Indiana USA.
- Boulding, J.R. and Ginn, J.S. (2004), *Practical Handbook of Soil, Vadose Zone, and Ground-Water Contamination: Assessment, Prevention and Remediation*. 2nd edn. Lewis Publishers (CRC Press), Boca Raton, FL, 2004. XXIV 691 pp.
- Bowles J., (1992), *Engineering properties of soils and their measurement*. Fourth Edition, McGRAW-HILL,INC. United States of America.
- Brady, N.C. and R.R. Weil. (1998), *The nature and properties of soil*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Brewster R., (1983), *Química Orgánica* , Editorial Continental, México
- Brown, 2002, *Introducción a la Química Orgánica*, 2<sup>a</sup> edición en inglés, Editorial Continental, México.
- CNA (Comisión Nacional del Agua), (1990), *Mecánica de Suelos: Instructivo para ensaye de suelos*. Colección Breviarios del Agua, Serie Educativa. CNA.
- Celis S. L., (1988), *La industria Petrolera en México. Una crónica. I. De los Inicios a la Expropiación. 50 Aniversario*. Tomo I. PEMEX. México D.F. pp. 451
- Chessin R, Tood D, Colman J.(1999), *Toxicological profile for TPH*.
- Dampier, W. C. (1950), *Historia de la Ciencia y sus relaciones con la filosofía y la religión*. Editorial Galatea. México.
- Domenico P.A. and Schwartz F. W. (1990), *Physical and Chemical Hydrogeology*. Jhon Wiley & Sons. USA.

- Duchaufour P., (1968), *L'évolution des sols, essai sur la dynamique des profils*, Masson, Paris.
- Fessenden, R. J., (1982), *Química Orgánica*. 2a ed. Grupo editorial Iberoamérica. México, D.F. 1076pp.
- Forsythe W., (1985), *Manual de laboratorio: Física de los suelos*. 2ª Edición, Editorial IICA. San José de Costa Rica.
- Freeze R. A. and Cherry J.A., (1979), *Groundwater* Prentice-Hall, Inc. USA
- García R. y Suárez B., (2009), *Las Arcillas: Propiedades y Usos*. Universidad Complutense, Madrid España.
- Gavande S., (1991), *La física de los suelos: Principios y Aplicaciones*, Editorial LIMUSA, México. pp 351
- Geymonat, L., (1971), *El pensamiento científico*. Editorial Universitaria de Buenos Aires. vol 37.
- Grasso, D., (1993), *Hazardous Waste Site Remediation, Source Control*. Lewis Publisher, Boca Raton.
- Gregg, S.J., Sing K.S.W., (1982), *Adsorption, surface area, and porosity*, Academic Press Inc, London.
- Hern C. and Melancon M., (1986), *Vadose zone Modeling of Organic Pollutants*, LEWIS PUBLISHERS, INC, USA
- Hernández E. J., (2010), *Tesis Doctoral Estrategia integral de remediación en un sitio contaminado por hidrocarburos: Simulación de los procesos de descontaminación de suelos y acuíferos con modelación matemática y análisis en laboratorio* Madrid España.
- Hernández J., (2008), *Características físicas y propiedades mecánicas de los suelos y sus métodos de medición*. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería Civil. Guatemala.
- Hillel D., (1982), *Introduction to Soil Physics*, Editorial ACADEMIC PRESS, INC. San Diego, California, Estados Unidos de Norteamérica.
- Himmelblau D., (2002), *Basic principles and calculations in Chemical Engineering* Ed. PEARSON, Prentice Hall, Mexico.
- Iturbe R., (1998), *Técnicas de rehabilitación de suelos y acuíferos*. Series del Instituto de Ingeniería 612. ISSN 0185-2345.
- Iturbe R. y Silva A., (1992), *Agua subterránea y contaminación*, D.F, Series del Instituto de Ingeniería
- ISWA, UNEP, Secretaría del Convenio de Basilea (2002), *Manual de formación en gestión de residuos peligrosos para países en vías de desarrollo*.
- Jenny H., (1941), *Factors of soil formation*, McGraw-Hill, New York, NY
- Jiménez J., (1951), *Mecánica del suelo y sus aplicaciones a la ingeniería*. Editorial DOSSAT, Madrid, España.
- Juárez, E., (1980), *Mecánica de Suelos*, 2da Edición. Tomo I Editorial LIMUSA, México.
- Juárez, E., (1975), *Mecánica de Suelos*, Tomo I Editorial LIMUSA, México.

- LaGrega M., Buckingham P.L., Evans J.C., (1994), *Hazardous Waste Management*, 2º Edición, USA, McGraw Hill
- Leiva, M. A., (2006), *El diesel (Productos PEMEX)*. PEMEX.
- LGPGIR, (2003), *Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos y su Reglamento*. SEMARNAT
- Llorca-Llorca, R., Bautista-Carrascosa, I., (2004), “*Atmósfera suelo y agua*”. Universidad Politécnica de Valencia.
- Lyman W.J., Reidy P. J., Levy B., (1992), *Mobility and Degradation of Organic Contaminants in Subsurface Environmental*, C.K. SMOLEY, ICN, USA.
- MADEP. *Interim Final Petroleum Report: Development of health-Based Alternative to the Total Petroleum Hydrocarbon (TPH) parameter*. MADEP. (1994),
- Medina, (2001), *Elementos a considerar para integrar las bases de política para la prevención de la contaminación del suelo y su remediación*. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México
- McCabe, (2004), *Unit Operations Chemical Engineering*. 5<sup>th</sup> Edition McGraw-Hill, USA
- Ministry for the Environment New Zealand, (1998), *Managing Hazardous Waste, A discussion paper*.
- Morrison, (1976), *Química Orgánica* 3ª Edición Fondo Educativo Interamericano. México
- Morrison, (1998), *Química orgánica* 5ª Edición Editorial Pearson Addison Wesley Logman de México
- Moyer E., (2004), *MTBE Remediation Handbook*, ASP (Amherst Scientific Publishers), Massachusetts
- National Fire Protection Agency (NFPA). *Hazard Identification System*. NFPA. 2006.
- PEMEX, (1956), *Refinerías de México*, Petróleos Mexicanos, México D.F. pp. 87
- PEMEX 70 AÑOS, (2008), *Relato Iconográfico*, Petróleos Mexicanos, México D.F. pp. 267
- PEMEX, (2006), *Evaluación del Riesgo a la Salud y Establecimiento de Criterios de Limpieza en la Exrefinería 18 de Marzo*. Programa Ambiental México Desarrollo Institucional para la Gestión de Sitios Contaminados y residuos Peligrosos.
- Potter, T. L. and Simmons, K. E., (1998), *Composition of chemical mixtures*. Total Petroleum Hydrocarbon Criteria Working Group Series 2.
- Quadri, G. y Provencio E., (1994), *Partidos políticos y medio ambiente*. Experiencias internacionales y perspectivas para México, El Colegio de México, México.
- Rakoff, (1980), *Química orgánica fundamental*, Editorila Limusa 7ª Reimpresión México.
- Risher J, Rhodes S., (1995), *Toxicological profile for fuel oils*.

- Robinson G., (1967), *Los Suelos su origen, constitución y clasificación* , Editorial OMEGA, Segunda Edición, Barcelona, España
- Ruiz N. V.M., (1988), *La industria Petrolera en México. Una crónica. II. Gestión y Consolidación de Petroleos Mexicanos. 50 Aniversario. PEMEX. México D.F. pp. 489*
- Rucks, L. García F., Kaplán A., Ponce de León L, Hill M., (2004), *Propiedades Físicas del Suelo*, Universidad de la República, Montevideo-Uruguay.
- Sanglerat, (1975), *Curso práctico de mecánica de suelos*. Ediciones OMEGA, Barcelona, España.
- Saval B. S., (1995), *Remediación y restauración en PEMEX Ambiente y Energía, Los retos del futuro*. UNAM-Petróleos Mexicanos.
- SEMARNAT, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 1998. Estudios de caracterización de la Ex – Refinería 18 de marzo en la Ciudad de México.
- SEMARNAT, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2005. Estudios de caracterización de la Ex – Refinería 18 de marzo en la Ciudad de México.
- SEMARNAT, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2006. Estudios de caracterización de la Ex – Refinería 18 de marzo en la Ciudad de México.
- Schnoor J., (1996), *Environmental Modeling: Fate and Transport of Pullants in Water, Air and Soil*. Edit. Hardcover. USA
- Shineldecker C.L, (1992), *Handbook of Environmental Contaminats A Guide for Site Assessment*. Lewis Publishers USA
- STPS Subsecretaría del Trabajo, Seguridad y Previsión Social Dirección General de Seguridad y Saluden el Trabajo. NOM-018-STPS-2000: *Sistema para la identificación y comunicación de peligros y riesgos por sustancias químicas peligrosas en los centros de trabajo*.
- Salinas E., (1997), *El consumo de gasolina y los instrumentos económicos en México* Gaceta Ecológica # 42, INE SEMARNAT
- SCT Secretaría de Comunicaciones y Transportes, (2003), *Métodos de Muestreo y Pruebas de Matariales (MMP)*. M-MMP-1-06/03. SCT
- Sposito G., (1989), *The Chemistry of Soils*. Oxford University Press, New York, 277 p
- Taylor J, George J., (1999), *Toxicological profile for Ethylbenzene*.
- Testa M. and Winegardner, (1991), *Restoration of Petroleum-Contaminated Aquifers*, LEWIS PUBLISHERS, USA.
- TPHCWG, (1997), *Selection of Representative TPH fractions based on Fate and Transport Considerations. Total Petroleum Hydrocarbon Criteria Working Group Series, Amherst, MA: Amherst Scientific Publishers*.

- Volke T. y Velasco J.A., (2002), *Tecnologías de remediación para suelos contaminados* México: INE-SEMARNAT, 64 pp.
- Watts R.J., (1997), *Hazardous waste: Sources, Pathways, Receptors* @Sons, INC.
- Whitlow, R., (1998), *Fundamentos de mecánica de suelos*. 2ª Edición, Edit. CONTINENTAL S.A. de C.V. México.

## ARTÍCULOS CIENTÍFICOS

- Abreu L., Ettinger R. and McAlary T., (2009), *Simulated Soil Vapor Intrusion Attenuation Factors Including Biodegradation For Petroleum Hydrocarbons*, Ground Water Monitoring and Remediation.
- Albergaria, J.T., Alvim-Ferraz, M.C.M., Delerue-Matos, C., (2006), *Remediation efficiency of vapor extraction of sandy soils contaminated with cyclohexane: influence of air flow rate, water and natural organic matter content*. Environ. Pollut. 143, 146–152.
- Alvarado A., (2005), *Variación de la densidad aparente en órdenes de suelos de Costa Rica*. Agronomía Costarricense 29(1): 85-94. ISSN:0377-9424 / 2005. [http://www.mag.go.cr/rev\\_agr/v29n01\\_085.pdf](http://www.mag.go.cr/rev_agr/v29n01_085.pdf)
- Alves, S.A., Albergaria J.T., Fernandes V., Alvim-Ferraz M.M., Delerue-Matos C., (2010), *Remediation of soil combining soil vapor extraction and bioremediation: Benzene*. Chemosphere, 80(2010) 823-828
- Bhupathiraju Vishvesh K; Krauter Paula; Holman Hoi-Ying N; Conrad Mark E; Daley Paul F; Templeto Alexis S; Hunt James R; Hernandez Mark; Alvarez-Cohen Lisa, (2002), *Assessment of in-situ bioremediation at a refinery waste-contaminated site and an aviation gasoline contaminated site*. Biodegradation. 13:79-90
- Chapelle F., (1999), *Bioremediation of Petroleum Hydrocarbon-Contaminated Ground Water: The Perspective of History and Hydrology*. Ground Water. 37:122-132
- Chapman S.W., Byerley B.T., Smyth D.J.A., Mackay D.M., (1997), *A Pilot Test of Passive Oxygen Release for Enhancement of In Situ Bioremediation of BTEX-Contaminated Ground Water*. Ground Water Monitoring and Remediation GWMR 93-105.
- Chen C., and Wu S., (1995), *The adsorption of benzene, toluene and ethylbenzene on soils near infinite dilution*. Chemosphere Vol. 31 No.10 4225-4235
- Clay, (2002), *Risk-Based Corrective Action of Hydrocarbon Contamination at a Former Major Urban Petroleum Storage Site in the U.K.*, Soil and Sediment Contamination.

- Custodio E. y M. R. Llamas, (1983), *Hidrología Subterránea*. Omega (2 Vol.) 2359 pp
- Davis G.B., Patterson B.M., Trefry M.G., (2009), *Evidence for Instantaneous Oxygen-Limited Biodegradation of Petroleum Hydrocarbon Vapors in the Subsurface*. Ground Water Monitoring & Remediation. 29:126-137
- Díaz-Rodríguez, (2006), *Los suelos lacustres de la Ciudad de México*. Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil Vol6(2) 111
- Fuller, E.L. Jr., Thompson K.A. (1987) *Chemical and geometric factors in physical Adsorption/Desorption of gas on solids*. Langmuir, 3(5), 713-721
- Fry V.A, Selker J.S., Gorelick, S.M., (1997), *Experimental investigations for trapping oxygen gas in saturated porous media for in situ bioremediation*. Water Resources Research 33 (12), 2687-2696.
- Garg S., Rixey W.G., (1998), *The dissolution of benzene, toluene, m-xylene and naphthalene from a residually trapped non-aqueous phase liquid under mass transfer limited conditions*. Journal of Contaminant Hydrology. 36: 313-331
- Genovese M., Denaro R., Cappello S., Di Marco G., La Spada G., Giuliano L., Genovese L., Yakimov M.M., (2008), *Bioremediation of Benzene, toluene, ethylbenzene, xylenes-contaminated soil: a biopile pilot experiment*, Journal of Applied Microbiology. 105:1694-1702
- Gocht, T., Ligouis, B., Hinderer, M. and Grathwohl, P. (2007), *Accumulation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Rural Soils Based on Mass Balances at the Catchment Scale*, Environmental Toxicology and Chemistry. 26:591-600
- González R., (2007), *Atenuación Natural en el Acuífero Yucateco*. Universidad Autónoma de Yucatán. Facultad de Ingeniería. versión impresa ISSN 0188-4999 Rev. Int. Contam. Ambient v.23 n.1 México ene./mar. 2007. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0188-49992007000100001&lng=es&nrm=iso](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992007000100001&lng=es&nrm=iso)
- Ingaramo O., (2003), *Evaluación de la densidad aparente en diferentes sistemas de laboreos de suelo, en el NO de la Península Ibérica*. Facultad de Cs. Agrarias – UNNE. Resumen: A-032. Argentina. <http://www1.unne.edu.ar/cyt/2003/comunicaciones/05-Agrarias/A-032.pdf>
- Kechavarzi C., Soga K., Illangasekare T.H., (2005), *Two-dimensional laboratory simulation of LNAPL infiltration and redistribution in the Vadose Zone*. Journal of Contaminant Hydrology 76 (3-4), 211-233
- Khan, F.I., Husain, T., Hejazi, R., (2004), *An overview and analysis of site remediation technologies*. J. Environ. Manage. 71, 95–122.
- Lenhard R.J., Oostrom M., Dane J.H., (2004), *A constitutive model for air-NAPL-Water flow in the vadose zone accounting for immobile, non-occluded (residual) NAPL in strongly water-wet porous media*. Journal of Contaminant Hydrology 71 (1-4), 261-282
- Lesser J.M., (2000), *Prospección de contaminación de Acuíferos por Hidrocarburos*. Disponible en: <http://lesser.com.mx/esp/pub/95->

[1%20Prospeccion%20de%20Contaminacion%20de%20Acuiferos%20por%20Hidrocarburos.pdf](#) Consultada en Junio de 2011.

- Lesser J.M., (2001), *Principales hidrocarburos contaminantes de suelos y acuíferos: Identificación y características. Contaminación de acuíferos*. División de Educación Continua, Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Liu, B., Banks, M. K. and Schwab, P., (2001), *Effects of Soil Water Content on Biodegradation of Phenanthrene in a Mixture of Organic Contaminants*, *Soil and Sediment Contamination*, 10(6), 633-658.
- López S., (2005), *Mecanismos de fitorremediación de suelos contaminados con moléculas orgánicas xenobióticas*. Departamento de Biotecnología, Universidad Autónoma Metropolitana – Iztapalapa. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 21 (2) 91-100, 2005.  
[http://www.atmosfera.unam.mx/editorial/contaminacion/acervo/vol\\_21\\_2/5.pdf](http://www.atmosfera.unam.mx/editorial/contaminacion/acervo/vol_21_2/5.pdf)
- Margesin, R., Walder G., Schinner F., (2003), *Bioremediation Assessment of a BTEX-Contaminated Soil*, *Act. Biotechnol.* 23 (2003) 1, 29-36
- Nacci S., (1992), *Estudio de la resistencia a la penetración de los suelos con equipos de penetrometría desarrollados en el país*. FONAIAP. Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias. Actualmente en la Universidad Rómulo Gallegos. San Juan de Los Morros. Venezuela. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Agronomía. *Agronomía Tropical*. 42(1-2): 115-132.  
[http://sian.inia.gob.ve/repositorio/revistas\\_ci/Agronomia%20Tropical/at4212/Arti/nacci\\_s2.htm](http://sian.inia.gob.ve/repositorio/revistas_ci/Agronomia%20Tropical/at4212/Arti/nacci_s2.htm)
- Nathwani and C.R. Phillips, (1977), *Adsorption-Desorption of selected hydrocarbons in crude oil on soils*, *Chemosphere*. 6:157162
- Poulsen, T.G., Moldrup, P., Yamaguchi, T., Schjonning, P., Hansen, J.A., (1999), *Predicting soil-water and soil-air transport properties and their effects on oil-vapor extraction efficiency*. *Ground Water Monit. Remediat.* 19, 61–70.
- Reinhard, (2005), *In Situ Biotransformation of BTEX Compounds Under Methanogenic Conditions*, *Ground Water Monitoring and Remediation*.
- Schneider, R. P., Morano, S. C., Gigena, M. A., Missawa, S. K., Rocha, R. C., Da Silva, L. R., (2006), *Contamination Levels and Preliminary Assessment of the Technical Feasibility of Employing Natural Attenuation in 5 Priority Areas of Presidente Bernardes Refinery in Cubatão, São Paulo, Brazil*. *Environmental Monitoring and Assessment*, 116(1-3), 21-52.
- Scow, K.M., Simkins, S., Alexander, M., (1986), *Kinetics of mineralization of organic compounds at low concentrations in soil*. *Appl. Environ. Microbiol.* 51, 1028–1035
- Sery-Levy, A. and Avnir, D., (1993), *Effects of heterogeneous surface geometry on Adsorption*, *Langmuir*, 9 (11), 3067-3076.

- Steven W., (1997), *A Pilot test of passive oxygen release for enhancement of in situ bioremediation of BTEX-Contaminated ground water*, Ground Water Monitoring and Remediation.
- Sui, H., Li, X.-G. and Jiang, B. (2005), *Benzene, Toluene and P-Xylene Interactions and the Role of Microbial Communities In Remediation Using Bioventing*, The Canadian Journal of Chemical Engineering.
- Thomas, R.S., Dakessian, S., Ames, R.N., (1986), *Aggregation of a silty clay loam soil by mycorrhizal onion roots*. Soil Sci. Soc. Am. J. 50, 1494–1499.
- Tobares L., (2003), *Evolución histórica de la estructura molecular del Benceno*. Problemas del conocimiento en Ingeniería y Geología, Vol. 1 130-147.
- Vázquez S., R. Jaimes Palomera, (1989), "Geología de la Cuenca de México", *Geofísica Internacional*, Vol. 28 No 2, México.
- Viñas, M., Sabaté, J., Espuny, M.J., Solanas, A.M., (2005), *Bacterial community dynamics and polycyclic aromatic hydrocarbon degradation during bioremediation of heavily creosote-contaminated soil*. Appl. Environ. Microbiol. 71, 7008–7018.
- Yang Y. J., Gates, T. M. and Edwards, S., (1999), *SVE Design: Mass Transfer Limitation Due to Molecular Diffusion*. Journal of Environmental Engineering. 125(9), 852-860.
- Yaron B., Sutherland P., Galin T., Acher A.J.,(1989), *Soil Pollution by Petroleum Products, II. Adsorption-Desorption of "kerosene" vapors on soils*. Journal of Contaminant Hydrology, 4 (1989) 347-358.
- Wang M. S., Wu S. C., Chen, W. J. and Hsu, H. L., (2007), *Modeling Nonequilibrium Solute Transport in Heterogeneous Soils with Considerations of Mass-Transfer Processes and the Effects of Vadose Zone Properties*. Environmental Engineering Science, 24(4), 535-549.

### PÁGINAS ELECTRÓNICAS

- Artigas D., (2003), Edafología. Departamento de suelos y aguas. Facultad de Agronomía. Universidad de la República. Uruguay. <http://www.fagro.edu.uy/~edafologia/curso/Material%20de%20lectura/Formacion/formacion.pdf>
- Bastida Aguilar Abraham, (2007), "Responsabilidad del Estado frente al daño ambiental" Tesis de maestría, Escuela Judicial del Estado de México. Toluca, México disponible en: <http://www.bibliotecasvirtuales.com/biblioteca/articulos/abrahambastidaaguilar/derechoambiental/introduccion.asp> Consultada en Octubre de 2011
- Bayliss D, Jinot J, Sonawane B., (2002), *Toxicological review of benzene*. <http://www.epa.gov/IRIS/toxreviews/0276-tr.pdf>
- Bolívar A., Méndez L., Romero M., (1991), *Ahora sí un Nuevo Orden Mundial*. No 41. México D.F. Fecha de consulta 10 de Marzo de 2009. Disponible en: <http://www.elcotidianoenlinea.com.mx/doc/4106.doc>



- Caballero C., (2009), Notas sobre estudio, horizontes, tipos y clasificación de suelos para el curso de Ciencias de la Tierra. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México. 2009. <http://www.geofisica.unam.mx/~cecilia/cursos/GuiaNotasEdaf2.pdf>
- Calderón, M., (2002), *Las Propiedades Físicas de los Suelos 1 y 2*. Bogotá, Colombia. <http://www.walcoagro.com/exposiciones/propiedades%20fisicas%20suelos%201.pdf>
- Cámara de Diputados, (2006), (Información Legislativa) *Sobre la construcción del parque ecológico en la ex refinería 18 de Marzo*. México D.F. Fecha de consulta 15 de Marzo de 2009. Disponible en: <http://diputados.pan.org.mx/web/pan/hoycam/despliega.asp?id=578464>
- CCOHS, (2006), CHEMINFO. n-Hexane. Canadian Centre for Occupational Health and Safety. <http://www.intox.org/databank/documents/chemical/nhexane/cie67.htm>
- CICEANA, (2009), Contaminación del Suelo. Centro de Información y Comunicación Ambiental de Norte América, A.C. <http://www.ciceana.org.mx/recursos/Contaminacion%20del%20suelo.pdf>
- CONAGUA, (2002), Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea acuífero (0901) zona metropolitana de la Cd de México. Comisión Nacional del Agua, Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas, Subgerencia de evaluación y ordenamiento de Acuíferos. Disponible es: [http://www.conagua.gob.mx/Conagua07/Aguasubterranea/pdf/DR\\_0901.pdf](http://www.conagua.gob.mx/Conagua07/Aguasubterranea/pdf/DR_0901.pdf) Consultada en Agosto del 2011.
- Crosara A., (2009), *Practicos de Edafología*. <http://edafologia.fcien.edu.uy/archivos/Practico%201.pdf>
- Dorsey A, McClure P, Singh M., (2000), *Toxicological profile for Toluene*. U.S. DEPARTMENT OF HEALTH AND HUMAN SERVICES Public Health Service Agency for Toxic Substances and Disease Registry. <http://www.bvsde.paho.org/bvstox/i/fulltext/toxprofiles/toluene.pdf>
- Dorronsoro C, (2009), *Introducción a la Edafología*, Departamento de edafología y química agrícola, Unidad docente e investigadora de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Granada, España. <http://edafologia.ugr.es/introeda/tema00/progr.htm>
- Educamar, (2009), *Concejalía de Educación-Ayuntamiento de Cartagena. Suelos*. Cartagena. [http://www.educarm.es/templates/portal/images/ficheros/websDinamicas/133/secciones/439/contenidos/5280/suelos\\_tema\\_2..pdf](http://www.educarm.es/templates/portal/images/ficheros/websDinamicas/133/secciones/439/contenidos/5280/suelos_tema_2..pdf)
- EPA, (2002), United States Environmental Protection Agency (EPA). List of IRIS Substances, Toxicological Review of Benzene. Consultada en <Marzo de 2010. Disponible en <http://www.epa.gov/iris/toxreviews/0276-tr.pdf>
- Fay M, Risher J, Wilson J., (2005), *Toxicological profile for Xylene*. U.S. Department of health and human services, Public Health Service Agency for

Toxic Substances and Disease Registry  
<http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp71.pdf>

- FUNPROVER, (2009), *Propiedades físicas del suelo*.  
<http://www.funprover.org/formatos/manualTomate/Propiedades%20Fisica%20del%20Suelo.pdf>
- Flowers L, Boyes W, Foster S, Gehlhaus M., (2005), *Toxicological review of toluene*. <http://www.epa.gov/iris/toxreviews/0118-tr.pdf>
- García A., (2005), *Edafología*. Universidad Extremadura, Departamento de de biología y producción de los vegetales, área de edafología y química agrícola. España.  
<http://www.unex.es/edafo/ECAP/ECAL5PropFisicas.htm>
- Google Earht, (2010), Disponible en <http://www.google.com/earth/index.html> Cnsltada en Septiembre de 2009.
- Harper C, and Liccione J. *Toxicological profile for gasoline*. U.S. Departament of healt and human services, Public Health Service Agency for Toxic Substances and Disease Registry. 1995  
<http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp72.pdf>
- Harris M.O. and Corcoran J., (1999), *Toxicological profile for n-Hexane*  
<http://www.epa.gov/iris/toxreviews/018-tr.pdf>
- Herrera J., (2009), *El Suelo*. Colombia.  
<http://www.monografias.com/trabajos65/propiedades-suelo/propiedades-suelo2.shtml>
- INE, (2005), Instituto Nacional de Ecología. Fuentes de contaminación en México. Disponible en <http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/libros/372/fuentes.html> Consultada en agosto de 2010
- INEGI, (2011), Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas. Instituto Nacional de Geografía y Estadística, México. Disponible en: [http://antares.inegi.org.mx/analisis/red\\_hidro/SIATL/#](http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/SIATL/#) Consultada en Septiembre de 2011.
- IRIS, (2006), Benceno. (CASRN 71-43-2) IRIS.  
<http://www.epa.gov/iris/subst/0276.htm>
- Kaplan, I. R., (1997), "An introduction to environmental forensic geochemistry." 289-317. <http://www.zymaxforensics.com/forensicsprimer/>.
- Miliarium, (2001), Biopilas. Ingeniería Civil y Ambiental.  
<http://www.miliarium.com/prontuario/TratamientoSuelos/Biopilas.htm>
- NGSOEC, (2004), National Guidelines and Standards Office Environment Canada. Canadian soil quality guidelines. Benzene Consultada en Julio de 2009. Disponible en: <http://www.cegg-rcqe.ccme.ca/download/en/259/>
- Occupational Safety and Health Administration (OSHA), (1988), Occupational Health Guideline for Benzene Potential Human Carcinogen 1988. Consultada en Marzo de 2010. Disponible en: <http://www.cdc.gov/niosh/pdfs/0049.pdf>
- Occupational Safety and Health Administration (OSHA), (2003), Chemical Sampling Information, Safety and Health Topics: Benzene. Consultado en

- Marzo de 2010. Disponible en: [http://www.osha.gov/dts/chemicalsampling/data/CH\\_220100.html](http://www.osha.gov/dts/chemicalsampling/data/CH_220100.html)
- Oyarzún R., (2007), Transporte de contaminantes en aguas subterráneas. CEAZA-Chile..  
[http://www.aulados.net/Temas\\_ambientales/Contaminantes\\_aguas\\_subterranas/Transporte\\_contaminantes.pdf](http://www.aulados.net/Temas_ambientales/Contaminantes_aguas_subterranas/Transporte_contaminantes.pdf)
  - PEMEX, (2009), Remediación de la ex Refinería 18 de Marzo. Disponible en <http://www.pemex.com/index.cfm?action=content&sectionid=122> Consultada en junio de 2009.
  - RAIS: Risk Assessment Information System, (2006), *Toxicity summary for ethylbenzene*.  
[http://rais.ornl.gov/tox/profiles/ethylbenzene\\_c\\_V1.shtml](http://rais.ornl.gov/tox/profiles/ethylbenzene_c_V1.shtml)
  - RAIS: Risk Assessment Information System, (1994), *Toxicity summary for toluene*. 1994. [http://rais.ornl.gov/tox/profiles/toluene\\_f\\_V1.shtml](http://rais.ornl.gov/tox/profiles/toluene_f_V1.shtml)
  - RAIS: Risk Assessment Information System, (2006), *Toxicity summary for xylene*. <http://rais.ornl.gov/tox/profiles/xylene.shtml>
  - RLGP GIR, (2006) Reglamento de la Ley General Para la Gestión Integral de Residuos.  
[http://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=reglamento%20lpggir&source=web&cd=1&cad=rja&ved=0CCkQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.aniq.org.mx%2Fcomisiones%2Fdocs\\_cmedioambiente%2Freglamento%2520de%2520a%2520lpggir.doc&ei=ebqSUra-AsjS2AXIoYC4BA&usq=AFQjCNEUF\\_FjKXIbKX0ctMb4YDqoXPZRUA&bv m=bv.50768961,d.b2l](http://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=reglamento%20lpggir&source=web&cd=1&cad=rja&ved=0CCkQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.aniq.org.mx%2Fcomisiones%2Fdocs_cmedioambiente%2Freglamento%2520de%2520a%2520lpggir.doc&ei=ebqSUra-AsjS2AXIoYC4BA&usq=AFQjCNEUF_FjKXIbKX0ctMb4YDqoXPZRUA&bv m=bv.50768961,d.b2l)
  - Sabroso, G. MC., (2004), Guía sobre suelos contaminados CEPYME ARAGON, Zaragoza. Disponible en <http://www.scribd.com/doc/54295054/guia-suelos-contaminados>
  - SAP (Suelo-Agua-Planta), (2005), *Propiedades físicas del suelo*. 2005 [http://www.sap.uchile.cl/descargas/suelos/027Propiedades físicas de los suelo 2005.pdf](http://www.sap.uchile.cl/descargas/suelos/027Propiedades_fisicas_de_los_suelo_2005.pdf)
  - Secretaría de Economía, (2011), Normas Oficiales Mexicanas. Consultada en enero de 2011. Disponible en: <http://www.economia-noms.gob.mx/noms/inicio.do>
  - Sistema Geológico Mexicano, (2010), Carta Geológico- Minera de la Ciudad de México. Disponible en: [http://portalisp.sgm.gob.mx/cartas\\_impresas/productos/cartas/cartas250/geologia/89\\_E14-2GM.html](http://portalisp.sgm.gob.mx/cartas_impresas/productos/cartas/cartas250/geologia/89_E14-2GM.html) Consultada en Septiembre de 2010.
  - Shaxson F., (2005), *Optimización de la humedad del suelo para la producción vegetal, El significado de la porosidad*. Departamento de desarrollo sostenible FAO, Roma, Italia.  
<http://www.fao.org/docrep/008/y4690s/y4690s00.htm#Contents>
  - Textos Científicos, (2005), Estructura del Benceno. Disponible en: <http://www.textoscientificos.com/quimica/benceno/estructura> Consultada en Marzo de 2010

- Thayer W. y Watkins T., (2009), La Industria Petrolera de México. Disponible en: <http://www.applet-magic.com/pemex1sp.htm> Consultada en Marzo de 2009.
- Van Deuren, J., Wang, Z. y Ledbetter, J., (1997), Remediation technologies screening matrix and reference Guide. 3ª Ed. Technology Innovation Office, EPA. <http://www.epa.gov/tio/remed.htm>.
- Veracruz, (2009), Contaminación del suelo. Secretaría de protección Civil. [http://portal.veracruz.gob.mx/portal/page?\\_pageid=1945,4321272&\\_dad=portal&\\_schema=PORTAL](http://portal.veracruz.gob.mx/portal/page?_pageid=1945,4321272&_dad=portal&_schema=PORTAL)
- Vera A. G., (2011), *Naturaleza del Valle (Cuenca) de México y normatividad vinculada con la gestión de residuos*. Disponible en: [http://www.paot.org.mx/centro/cursospaot/materialCurso5/Presentacion\\_2\\_Parte1.pdf](http://www.paot.org.mx/centro/cursospaot/materialCurso5/Presentacion_2_Parte1.pdf) Consultada en Octubre de 2011.
- Wilbur S., (2005), *Toxicological profile for benzene*. U.S. Department of health and human services, Public Health Service Agency for Toxic Substances and Disease Registry. <http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp3-p.pdf>

## NORMA OFICIAL MEXICANA

- Norma Oficial Mexicana **NOM-138-SEMARNAT/SS-2003**, Límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y las especificaciones para su caracterización y remediación
- Norma Oficial Mexicana **NOM-141-SEMARNAT-2003** Que establece el procedimiento para caracterizar los jales, así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y postoperación de presas de jales
- Proyecto de Norma Oficial Mexicana **PROY-NOM 147-SEMARNAT/SSA1-2004** Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plomo, selenio, talio y vanadio.
- Norma Oficial Mexicana **NOM-133-SEMARNAT-. 2000** Protección Ambiental – Bifenilos. Policlorados (BPCS) – especificaciones de **manejo**.