

2ej



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
ZARAGOZA.

**COMPUESTOS ORGANICOS VOLATILES (BTEX) EN SUELO Y AGUA  
INTERSTICIAL COMO INDICADORES DE CONTAMINACION EN EL  
GRAN CANAL Y RIO DE LOS REMEDIOS.**

**T E S I S**  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO QUIMICO  
P R E S E N T A:  
**MAGALI VERONICA GARDUÑO G.**

ASESORA: DRA. MARIZA MAZARI HIRIART



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN MEXICO, D.F., 1999

28/247



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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.

**Compuestos Orgánicos Volátiles (BTEX) en Suelo y  
Agua Intersticial como Indicadores de  
Contaminación en el Gran Canal y Río de los  
Remedios**

**MAGALI VERÓNICA GARDUÑO GUTIÉRREZ**

**ASESOR: Dra. MARISA MAZARI HIRIART**



FACULTAD DE ESTUDIOS  
SUPERIORES  
\*ZARAGOZA\*

JEFATURA DE LA CARRERA  
DE INGENIERIA QUIMICA

OFICIO: JCIQ/176/99.

**ALUMNA MAGALI V. GARDUÑO GUTIERREZ**  
*Presente.*

*En respuesta a su solicitud de asignación de jurado, la jefatura a mi cargo, ha propuesto a los siguientes sinodales:*

<b>Presidente:</b>	<b>M. en C. Lourdes Castillo Granada</b>
<b>Vocal:</b>	<b>Dra. Marisa Mazari Hiriart</b>
<b>Secretario:</b>	<b>I.Q. Andrés Aquino Canchola</b>
<b>Suplente:</b>	<b>I.Q. Gonzalo Rafael Coello García</b>
<b>Suplente:</b>	<b>I.Q. Gabriel Cruz Zepeda.</b>

*Sin más por el momento, reciba un cordial saludo.*

**A T E N T A M E N T E**  
**"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"**  
**México, D. F., 30 de Junio, de 1999.**

**ING. ARTURO E. MENDEZ GUTIERREZ**  
**JEFE DE LA CARRERA**

## *Dedicatorias*

*A mi Madre Magdalena Gutiérrez Nuñez  
A mi Padre Gonzalo Garduño Colín  
y a mis hermanos Magdalena y Gonzalo*

*Gracias*

*Por ser mi familia, que me ha enseñado a trabajar, a vivir y  
luchar.*

# *Agradecimientos*

*Mi principal agradecimiento es a Dios.*

*A todos mis maestros y compañeros*

*A todas las personas que han hecho posible la realización de este trabajo en especial a la Dra. Marisa Mazari Hiriart, al Ing. Francisco Rojo Callejas, al Ing. Andrés Aquino Canchola y al H. Jurado.*

# INDICE

<b>RESUMEN</b>	1
<b>INTRODUCCION</b>	2
<b>OBJETIVO</b>	3
<b>CAPITULO 1. Zona de Estudio</b>	3
1.1 Cuenca de México	4
1.2 Zona Metropolitana de la Ciudad de México	4
1.3 Abastecimiento de Agua	7
1.3.1 Agua Subterránea	9
<b>CAPITULO 2. Fuentes Contaminantes</b>	11
2.1 Contaminación en la ZMCM	12
2.1.1 Microbiológica	13
2.1.2 Química	14
2.2 Disposición de Aguas Residuales	14
2.3 Contaminación de Agua Subterránea	18
2.4 Remediación	24
2.5 Legislación	26
<b>CAPITULO 3. Materiales y Métodos</b>	30
3.1 Método de Campo	30
3.1.1 Sitio de Muestreo	30
3.1.2 Muestreo	32
3.1.3 Procesamiento de Muestras	37
3.2 Métodos Experimentales	40
3.2.1 Cromatografía de Gases	40
3.2.1.1 Curva de Calibración	44
3.2.1.2 Procesamiento de Muestras	45
<b>CAPITULO 4. RESULTADOS</b>	46
4.1 Resultados	46
4.2 Análisis de Resultados	51
4.3 Conclusión	58
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	60

## INDICE DE TABLAS Y FIGURAS

Figura 1. La Cuenca de México y la Zona Metropolitana de la Ciudad de México	5
Figura 2. Zonas geológicas en la Cuenca de México	6
Figura 3. Pozos de abastecimiento para la ZMCM	8
Figura 4. Sistema de Drenaje de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México	15
Figura 5. Comportamiento de los compuestos LNAPL y DNAPL	19
Figura 6. Área de estudio. Intersección del Gran Canal y Río de los Remedios	31
Figura 7. Toma de muestras en ángulo	33
Figura 8. Equipo utilizado en la extracción de agua intersticial (exprimidor)	38
Figura 9. Equipo utilizado en la extracción de agua intersticial de material geológico (prensa).	39
Figura 10. Esquema básico de un cromatograma	42
Figura 11. Representación de un cromatograma típico	42
Tabla 1. Desechos industriales generados en la ZMCM	13
Tabla 2. Compuestos volátiles y semivolátiles en agua residual superficial del Gran Canal.	22
Tabla 3. BTEX en agua intersticial del Gran Canal	22
Tabla 4. Límites permisibles de contaminantes en suelo y agua subterránea en algunos estados de los E. U.	29
Tabla 5. Muestreo en el Gran Canal (GC1)	34
Tabla 6. Muestreo en el Gran Canal (GC2)	34
Tabla 7. Muestreo en el Gran Canal (GC7)	35
Tabla 8. Muestreo en el Río de los Remedios (RR4)	35
Tabla 9. Muestreo en el Río de los Remedios (RR6)	36
Tabla 10. Muestreo en el sitio control (SC)	36
Tabla 11. Identificación, número de muestras analizadas y número de muestras positivas.	48
Tabla 12. BTEX en Suelo (GC2)	49
Tabla 13. BTEX en Suelo (GC7)	50
Tabla 14. BTEX en Suelo (RR4)	50
Gráfica 1. Muestras analizadas GC1	46
Gráfica 2. Muestras analizadas GC2	47
Gráfica 3. Muestras analizadas GC7	47
Gráfica 4. Muestras analizadas RR4	48
Gráfica 5. Muestras analizadas RR6	48
Gráfica 6. Muestras analizadas SC	49
Gráfica 7. Benceno en GC2	51
Gráfica 8. Tolueno en GC2	52
Gráfica 9. Etilbenceno en GC2	52
Gráfica 10. m y p - Xileno en GC2	53
Gráfica 11. o - Xileno en GC2	53
Gráfica 12. Tolueno en GC7	54
Gráfica 13. m y p - Xileno en GC7	54
Gráfica 14. o - Xileno en GC7	55
Gráfica 15. Tolueno en RR4	55



Gráfica 16. Etilbenceno en RR4  
Gráfica 17. m y p Xileno en RR4  
Gráfica 18. o - Xileno en RR4

56  
56  
57

## Resumen

Se determinó la concentración de compuestos Orgánicos Volátiles Aromáticos (COVA's), Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xileno en suelo y agua intersticial provenientes del Gran Canal y Río de los Remedios, que forman parte de la red de drenaje que transporta aguas residuales de origen doméstico e industrial en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

Las muestras de suelo se tomaron en ángulo entre 22° y 50°, con respecto a la vertical, utilizando un muestreador de barril. El agua intersticial se extrajo utilizando un exprimidor de acero inoxidable, colocando las muestras en viales de vidrio borosilicatado. Este proceso se realizó en un cuarto frío a una temperatura de 4 °C.

Para el análisis de muestras se utilizó un Cromatografo de Gases HP Modelo 5890 Serie II, con detector de ionización de flama (FID), con una Columna Capilar Ultra 1 (25m\*0.2\*mm\*0.33µm). Las condiciones del método cromatográfico fueron: Rampa de temperatura, iniciando a 40 °C durante 4 minutos, incremento de temperatura de 10 °C/min hasta 70 °C manteniéndose constante por 8 minutos. Se utilizó la técnica de Headspace, que permite inyectar compuestos volátiles de manera eficiente y automatizada.

Los resultados indican que los Compuestos Orgánicos Volátiles Aromáticos, Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xileno (BTEX), han penetrado en forma descendente el acuitardo arcilloso.

A pesar de que las concentraciones detectadas son bajas, los resultados muestran evidencia de la presencia y migración de estos compuestos, y que representan una fuente potencial de contaminación de suelo y agua. Debido a que el Río de los Remedios es el que tiene mayor aporte de aguas residuales de origen industrial, se esperaría que las concentraciones detectadas en este sitio fueran mayores a las detectadas en el Gran Canal, lo que no resulto cierto. Es posible que la existencia de fracturas, la composición geológica y la presencia de organismos degradadores influya en la distribución y concentración a la que se encontraron estos compuestos.

## INTRODUCCION

El abastecimiento de agua potable y la eliminación de aguas residuales para la creciente población de la Ciudad de México representa un gran reto. El problema del continuo crecimiento urbano ha limitado la capacidad para extender la red de abastecimiento de agua a las áreas que carecen del servicio, para reparar fugas y para tratar las aguas residuales. El 75% del abastecimiento de agua a la ciudad proviene del sistema acuífero localizado bajo la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM), el cual está sujeto actualmente a una severa sobreexplotación. Los niveles de agua subterránea del subsuelo han disminuido considerablemente en el transcurso de los últimos años, por lo que existen problemas de hundimiento del subsuelo en la región. Esto ha propiciado condiciones para que existan más inundaciones en la ciudad, lo que ha su vez provoca daños a la infraestructura, especialmente a las redes de abastecimiento de agua potable y drenaje. Estas dificultades combinadas con el manejo inadecuado de desechos peligrosos, provocan que el acuífero y el sistema de distribución sean vulnerables a la contaminación, con los consecuentes riesgos para la salud pública.

Una limitada cantidad de aguas residuales de origen urbano reciben tratamiento, se estima que más del 90% de los desechos líquidos que se generan en la ZMCM equivalente a 1.5 millones de toneladas anuales se vierten directamente al sistema de drenaje sin previo tratamiento (*DDF 1990*).

Las aguas residuales de origen doméstico, industrial y pluvial, se vierten en redes de canales y colectores semiprofundos y profundos que cruzan la ciudad, muchos de los canales no están revestidos por lo que no cuentan con una barrera física para impedir la infiltración hacia el subsuelo; el presente trabajo pretende que a través del análisis de suelo y agua intersticial provenientes del Gran Canal y Río de los Remedios se puede conocer la concentración de los compuestos orgánicos volátiles, benceno, tolueno etilbenceno y xileno (BTEX), como producto de la infiltración de aguas residuales, lo que representa una fuente de contaminación hacia el sistema de agua subterránea, y un riesgo para la salud.

## **OBJETIVO**

Determinar la concentración de compuestos orgánicos volátiles Aromáticos tales como benceno, tolueno, etilbenceno y xileno (BTEX), en suelo y agua intersticial ya que estos representan un indicador de contaminación proveniente del Gran Canal y Río de los Remedios.

# **CAPITULO 1**

## **Zona de Estudio**

### **1.1 Cuenca de México**

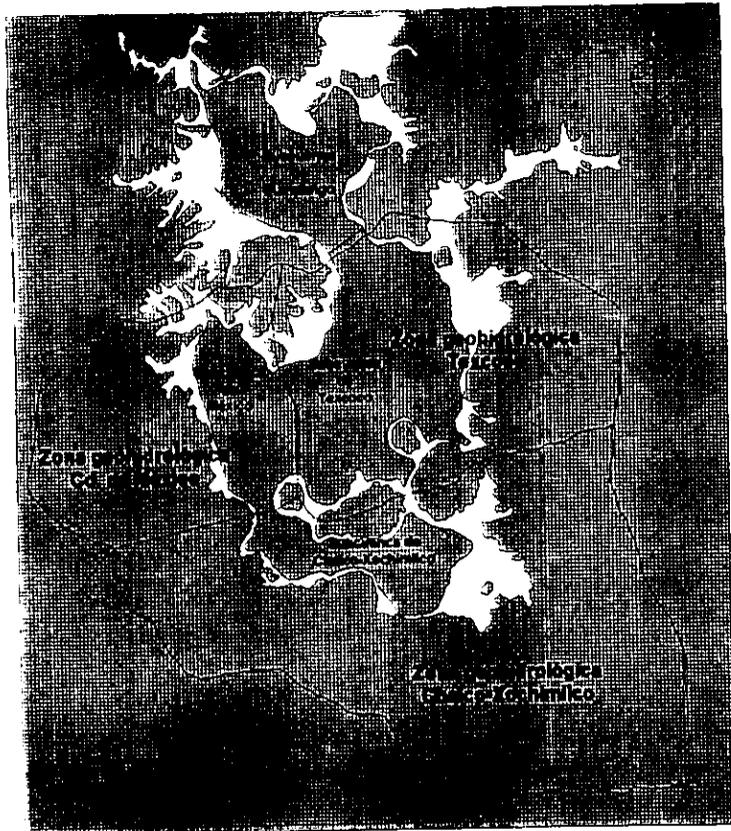
La Cuenca de México fue originalmente una cuenca cerrada, actualmente descarga sus aguas a la cuenca del río Pánuco por los drenajes de Nochistongo, Tequisquiác y el Drenaje Profundo; ha sido motivo de diversos estudios hidrológicos por estar ubicada en ella la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM). La superficie de la Cuenca es de aproximadamente 9000 km<sup>2</sup> Figura 1, con una precipitación media de 763 mm<sup>3</sup> (Ramirez, 1990).

En la Cuenca de México se ha presentado a lo largo del tiempo un cambio del sistema lacustre, que comprendía cinco lagos, a un sistema urbano, que actualmente ocupa gran parte de lo que fue la zona lacustre. Desde el punto de vista geológico la Cuenca de México comprende tres zonas: la zona lacustre, la zona de transición y la zona montañosa, Figura 2. El área entre las arcillas lacustres y la zona montañosa es denominada zona de transición que en general presenta una permeabilidad mayor que la zona lacustre, por lo tanto, la mayor parte de la recarga de los acuíferos es a través de esta zona (DDF, 1988).

### **1.2 Zona Metropolitana de la Ciudad de México**

Es el área urbana e industrializada más grande del país, en ella se encuentra el 25% de la población, también se localiza el 50% de la actividad industrial nacional. La ciudad alberga casi todas las oficinas de gobierno, los centros de negocios nacionales e internacionales, las actividades culturales, las universidades y los institutos de investigación más importantes. El rápido crecimiento en los últimos 50 años se ha caracterizado tanto por la expansión de áreas urbanas y residenciales planeadas para las clases media y alta, como por las invasiones ilegales de tierra y los asentamientos no planificados en las áreas periféricas.

Según las estimaciones la población de la ZMCM es de 15 millones de habitantes, según el censo de 1990 (INEGI, 1990), pero de continuar su crecimiento al ritmo actual, se prevee que para el año 2000 la ZMCM tendrá 25 millones de habitantes.



-  Zona Lacustre
-  Zona de Transición
-  Zona de Montaña

Figura 2. Zonas Geológicas en la Cuenca de México.

La explosión demográfica y el desarrollo han acarreado dificultades para planear el aprovisionamiento de los limitados recursos de agua disponibles. Mientras que el crecimiento de la población en las áreas urbanizadas del D.F han disminuido a partir de los años ochenta, la inmigración a las zonas aledañas, especialmente el Estado de México, ha sido en gran medida responsable del aumento significativo de la población y de la expansión urbana. Las distintas formas de asentamientos irregulares han significado una preocupación particular al planificar la explotación de los recursos hídricos.

### 1.3 Abastecimiento de Agua

En la ZMCM el abastecimiento de agua es un problema crítico, ya que se abastece aproximadamente en un 75% de agua subterránea de la propia Cuenca y el otro 25% se importa de fuentes externas (Río Lerma y Cutzamala) siendo uno de los problemas más importantes, la sobreexplotación de los acuíferos (*Mazari, et. al. 1992 DDF, 1991*).

El uso de agua en la ZMCM es aproximadamente  $72\text{m}^3/\text{seg}$  (*DDF, 1996*). Aproximadamente  $45\text{m}^3$  se obtienen de distintas baterías de pozos que se encuentran explotando el sistema de acuíferos de la Cuenca de México. La mayoría de los pozos de abastecimiento están localizados en la zona de transición, sus profundidades están alrededor de 100m y 300m, Figura 3. Actualmente están registrados aproximadamente 1200 pozos, de los cuales el 40% son usados en épocas de sequías (*Lesser, 1987*).

El acuífero de la Cuenca de México puede ser dividido en distintos subsistemas: Xochimilco-Tlahuac-Chalco, Zona Metropolitana, Lago de Texcoco y Teoloyucan-Tizayuca-Los Reyes-Chiconautla. En los que se tienen los siguientes volúmenes de velocidad de extracción: Xochimilco  $27\text{m}^3/\text{seg}$ , Zona Metropolitana,  $8.3\text{m}^3/\text{seg}$ , Texcoco  $5.2\text{m}^3/\text{seg}$  y Chiconautla  $4.5\text{m}^3/\text{seg}$ .

Hoy en día la recarga natural del acuífero es mucho más lenta que la extracción en la Cuenca. La extracción de agua subterránea de la Cuenca es de  $45\text{m}^3/\text{seg}$  y la recarga es de  $25\text{m}^3/\text{seg}$ , por lo que la sobreexplotación es de  $20\text{m}^3/\text{seg}$ . Entonces el 45% de las extracciones contribuyen a la sobreexplotación del acuífero.



Figura 3. Pozos de abastecimiento de agua para la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.



El agua superficial de la Cuenca de México contribuye aproximadamente  $1.5\text{m}^3$  al abastecimiento de la ZMCM. El río Magdalena proporciona agua para el Distrito Federal, mientras que la presa Madín, en el río Tlalneptla, abastece al Estado de México. Cuando se encuentran disponibles, se emplean los pequeños arroyos y manantiales naturales, fuentes que también ingresan directamente al sistema de distribución.

### 1.3.1 Agua Subterránea

La fuente fundamental de recarga de agua subterránea es la precipitación, esta puede penetrar a través del suelo a los sistemas de acuíferos, o puede correr por medio de sistemas superficiales y eventualmente infiltrarse. Cabe aclarar que el agua que llega a infiltrarse depende de otros tipos de almacenamiento temporal, como la intercepción por parte de la vegetación, las construcciones, y la humedad del suelo, antes que pueda penetrar al subsuelo. Sólo durante periodos de alta precipitación se puede proporcionar agua que ayude a la recarga del acuífero.

Las condiciones geológicas determinan la forma en como el agua de lluvia llega a la zona de saturación del subsuelo, para formar los depósitos subterráneos. Si el nivel freático, que limita la zona de saturación, se encuentra cerca de la superficie del suelo, puede existir una considerable infiltración, mientras que la existencia de capas impermeables arriba de esta zona pueden evitar el paso del agua.

Las formaciones que contienen y conducen agua subterránea se conocen como acuíferos. La cantidad de agua que puede extraerse de un área determinada depende de las características del acuífero y las posibilidades de recarga, que dependen a su vez de la porosidad del terreno.

La porosidad no indica necesariamente que el acuífero puede producir grandes volúmenes de agua que se extrae a través de un pozo, pues el agua susceptible a extraerse es la que puede fluir libremente por gravedad hasta la zona perforada. En ocasiones, materiales con una alta porosidad, como la arcilla, tienen un grano tan fino que no permiten el paso de grandes cantidades de agua hacia el pozo. Por otro lado, la piedra caliza tiene una porosidad muy baja, pero suele encontrarse fracturada o formando cavernas, lo cual permite el paso libre de agua.

Los acuíferos más importantes desde el punto de vista de su explotación comercial son los depósitos de arena o grava, cuya producción es generalmente alta (*Leffe, 1992*).

El acuífero principal en la Cuenca de México está compuesto de sedimentos aluviales y volcánicos con espesores de 100m a 500m. Es una combinación heterogénea de limo, arena y grava incrustadas directamente a las arcillas lacustres (*Marsal y Mazari, 1969; Ortega, 1989*).

## CAPITULO 2

### Fuentes Contaminantes

Debido a las dimensiones y a la gran densidad de población de la ZMCM, así como el hecho de que casi tres cuartas partes del área dependen del acuífero para el abastecimiento de agua potable, la protección de la calidad del agua subterránea es de la mayor importancia. Los desechos originados por la actividad doméstica, industrial y comercial, contienen diversos gérmenes patógenos y contaminantes tóxicos que si no se manejan en forma adecuada pueden llegar a representar riesgos para la salud. La posibilidad de que estos contaminantes se filtren al agua subterránea depende de muchos factores, tales como la composición de los suelos, el nivel freático y otros factores ambientales como la precipitación pluvial y la temperatura, que influyen en la movilidad o la degradación de los contaminantes. (NRC 1993).

En la ZMCM, estos elementos varían en cada una de las zonas hidrológicas, lacustre, transición y montaña.

La zona de transición merece especial atención, debido a que en ella se combinan la permeabilidad natural, la rapidez del crecimiento urbano y el incremento del número de pozos de abastecimiento que no cuentan con instalaciones adecuadas, así como un mal manejo del almacenamiento y desecho de materiales peligrosos (DDF, 1988; Ortega, 1989). En la zona montañosa la urbanización es menor en comparación con la zona de transición, sin embargo los asentamientos humanos irregulares en las laderas de las montañas aumentan la posibilidad de contaminación.

Por otro lado, el transporte de contaminantes a través de vías directas conllevan a alteraciones importantes en las propiedades del agua subterránea, esto depende de varios factores incluyendo la extensión y la interconexión de fracturas, los gradientes hidráulicos de los suelos, el tamaño de partícula y las propiedades del acuífero, la localización de los pozos de extracción, la localidad, los tipos, y la cantidad de contaminantes generados por las actividades humanas.

Las fracturas en el suelo son el resultado del proceso de hundimiento, en adición a las fallas en las formaciones geológicas, bajo algunas circunstancias, son el resultado de la escasez de lluvias en un periodo de sequía. Es importante saber que tan profundas son las fracturas y si es que estas persisten (Rudolph y Cherry, 1991).

Teóricamente las fracturas en los suelos son cerradas a determinada profundidad por la compresión y las características plásticas de los suelos, esto no permite el llenado por otro tipo de materiales. Por ello, varios depósitos de arcillas que están a lo largo de la ZMCM no brindan protección al acuífero como se esperaba. (*Mazari y Mackay, 1993*).

Estudios recientes sugieren que las grietas o fracturas existen en varias partes de la Cuenca, por ejemplo en el Lago de Texcoco, a lo largo del Río Churubusco, y en el Valle de Chalco (*Alberro y Hernández, 1990*).

## **2.1 Contaminación en la ZMCM**

A través de los años ha existido una gran variedad de actividades en la Cuenca de México, como excavaciones y construcciones subterráneas, estas actividades afectan la integridad de las arcillas lacustres. El sistema de Drenaje Profundo y el Sistema de Transporte Colectivo (Metro) son un ejemplo, para su instalación fueron necesarias extensas excavaciones, las cuales hicieron que el acuífero se hiciera más propenso a recibir contaminantes de la superficie.

En la Ciudad de México se generan aproximadamente 19 mil toneladas de residuos sólidos por día, 48% son de origen industrial y 52% de origen doméstico, para el año 2000 se calcula que se producirán 25 mil toneladas por día (*DDF 1990*). En la Tabla 1 se mencionan los desechos industriales y sus porcentajes. Las fuentes industriales de contaminación originalmente se encontraban fuera de la zona urbana, pero la ciudad ha crecido y ha rodeado estas fuentes acarreado con esto la exposición a compuestos tóxicos para los habitantes de estas áreas.

Tabla 1. Desechos industriales generados en la ZMCM.

Residuo	Porcentaje
Disolventes	36.2
Aceites y Grasas	12.89
Pinturas y Barnices	7.71
Soldadura plomo-estaño	5.63
Acidos y Bases	2.72
Derivados del petróleo	2.46
Resinas	4.45
Metales pesados	2.01
Adhesivos	1.69
Freón	1.15
Lodos	1.15
Silicón	0.54
Tintas	0.35
Plásticos	0.26
Otros	20.79

(Departamento del Distrito Federal, 1996)

Se han efectuado estudios en el mundo en áreas similares a la ZMCM, de ellos, es sabido que existen una gran variedad de fuentes potenciales de contaminación que afectan la calidad del agua subterránea, los tipos de contaminación más importantes son:

### 2.1.1 Microbiológica

Los microbiológicos son los contaminantes de mayor interés e impacto, incluyendo los parásitos, bacterias y virus. En México las enfermedades infecciosas y parásitas están entre las causas más comunes de muerte en el país especialmente para los infantes. Algunos de estos problemas son causados por la mala calidad del agua de consumo humano, esto debido en parte a la mezcla de contaminantes con el agua en las tuberías, estas son un medio de transporte potencial para microorganismos hacia los depósitos de agua subterránea (OPS, 1990).

Las fuentes más comunes de bacterias y virus que afectan a los humanos, son los desechos domésticos que se vierten ya sea en forma sólida o líquida.

En la Ciudad de México estos desechos en algunos lugares son almacenados localmente, muchas veces en pozos, letrinas o fosas sépticas. Por otro lado existen lugares de disposición final, que no cuentan con las instalaciones adecuadas y estas condiciones producen lixiviados, que representan otra fuente potencial de contaminación de agua subterránea con microorganismo patógenos que se infiltran por medio de las fracturas.

### **2.1.2 Química**

En México la contaminación del agua por compuestos químicos tóxicos (al igual que la contaminación del aire y el suelo) va en aumento. Los compuestos químicos más preocupantes son los nitratos, metales pesados, disolventes orgánicos volátiles y semivolátiles y los plaguicidas agrícolas. Son contribuyentes potenciales los lixiviados tóxicos originados por los restos químicos depositados en forma indebida, las fugas en el almacenamiento subterráneo de productos industriales o generadores de energía, el agua de lluvia contaminada por la mala calidad del aire. Algunos compuestos químicos pueden provocar toxicidad aguda o crónica y otros pueden tener efectos cancerígenos.

## **2.2 Disposición de Aguas Residuales**

En la ZMCM, existe un solo sistema de drenaje tanto para el Distrito Federal como para el Estado de México. Cada área de servicio tiene su propia red de drenaje; sin embargo, todos descargan eventualmente en los interceptores generales del sistema de drenaje, el cual conduce las aguas residuales por cuatro salidas artificiales localizadas en el extremo norte de la Cuenca. En el Distrito Federal la red del sistema abarca cerca de 10,000 kilómetros de largo, con 68 estaciones de bombeo, numerosos diques y lagunas para controlar el flujo, 111 kilómetros de canales abiertos, 42 kilómetros de ríos utilizados principalmente para drenaje y 118 kilómetros de túneles (*NRC, 1995*) Figura 4.

Según el censo de 1990, el 82% de los 15 millones de habitantes de la ZMCM recibe el servicio de drenaje, el 6%, aproximadamente, utiliza fosas sépticas y alrededor del 9% no posee ningún sistema de drenaje. Sin embargo, las diferencias en el interior de las áreas de servicio son notables, y en algunas delegaciones el sistema de drenaje sirve a menos de la mitad de los residentes.

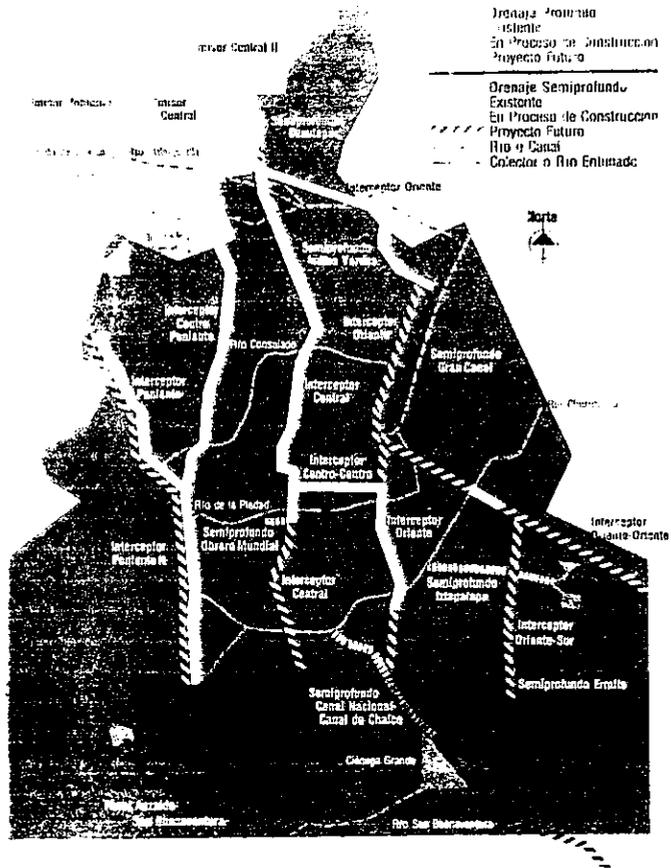


Figura 4. Sistema de Drenaje de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. (DDF, 1990)

Las descargas de aguas residuales domesticas e industriales, así como el agua de lluvia, se recolectan en una red secundaria consistente de un pequeño sistema de tuberías por vecindario; después, son conducidas a través de la red principal al sistema general de drenaje, para ser expulsadas de la cuenca hacia el norte. En el Estado de México el flujo total en el tiempo de secas para la ZMCM (flujo que consiste principalmente en aguas residuales municipales sin tratar) se estima en  $44.4\text{m}^3/\text{s}$  (Comisión Estatal de Aguas y Saneamiento, 1993). En época de lluvias, la región recibe muchas tormentas de gran intensidad y corta duración. Una sola tormenta puede producir hasta 70 milímetros de lluvia, lo que representa un 10% del total de la precipitación anual. Debido al patrón de lluvias y a lo irregular del terreno, el sistema de drenaje fue diseñado para transportar  $200\text{m}^3$  en un periodo de 45 horas (Departamento del Distrito Federal 1969).

Sin el conjunto de obras del sistema de drenaje, no sería posible dar una mejor solución al desalojo de las aguas de la ciudad. A partir de 1975, año en que se concluyó la primera etapa del Drenaje Profundo, este se convirtió en uno de los componentes más importantes del sistema de desagüe. Consta de varios interceptores que fluyen hacia un mismo conducto para evacuar las aguas. Actualmente, el Drenaje Profundo está compuesto por las estructuras que se describen a continuación

### **El Emisor Central**

La función más importante del Emisor Central es conducir fuera de la cuenca del valle de México las aguas de los interceptores Centro-Poniente, Central y Oriente.

### **Interceptor Centro-Centro**

Este interceptor une los interceptores Oriente y Central. Se inicia en la lumbrera 1, ubicada en la esquina de las calles Dr. Durán y Dr. J.M. Vertiz, y termina en la lumbrera 4, en Agiabambo y Francisco del Paso y Troncoso.

### **Interceptor Central**

Este conducto beneficia a las delegaciones Gustavo A. Madero, Azcapotzalco, Cuauhtémoc y parte de la Benito Juárez.



### **Interceptor Oriente**

La función principal de este túnel es aliviar al Gran Canal del desagüe, del cual depende para su drenaje gran parte del centro y norte del Distrito Federal, beneficia una parte de la delegación Gustavo A. Madero.

### **Interceptor Centro-Poniente**

Beneficia a gran parte de las delegaciones Miguel Hidalgo y Azcapotzalco. Además alivian al interceptor del poniente

### **Interceptor Oriente-Sur**

Su finalidad será captar el agua residual y pluvial de gran parte de la delegación Iztapalapa. En una segunda etapa, este interceptor se interconectará con el interceptor Oriente. Beneficiará a las delegaciones Iztacalco y Venustiano Carranza.

### **Interceptor Oriente-Oriente**

Su trazo se inicia en la esquina norponiente de la laguna de regulación "El Salado", para concluir, en la esquina de Canal de San Juan e Ignacio Zaragoza. Por medio de cuatro lumbreras captará los colectores que drenan la zona nororiente de la Delegación Iztapalapa.

En cuanto a la infraestructura de colectores semiprofundos, destacan:

#### **Colector Semiprofundo Canal Nacional-Canal de Chalco**

Contará con 5.9 kilómetros de longitud y 3.10 metros de diámetro. Su caudal será conducido hacia el interceptor Oriente o al Río Churubusco, con esta obra se Beneficiara a los habitantes de las delegaciones Coyoacan e Iztapalapa, y una parte de la delegación Xochimilco.

#### **Colector Semiprofundo de Iztapalapa**

Capta gran parte de las aguas residuales de la delegación Iztapalapa, conduce las aguas hasta la planta de bombeo Central de Abastos II, que las incorpora al río Churubusco, que beneficia la parte noreste de esta delegación.

## Colector Semiprofundo Obrero Mundial

Tiene una longitud de 800 metros, diámetro de 3.20 metros y dos lumbreras captará, en un futuro próximo, los escurrimientos de la zona poniente de la delegación Benito Juárez a través del colector Pestalozzi, actualmente en proyecto, para descargarlos posteriormente en la lumbrera 4 del interceptor Central. (DGCOH 1990)

### 2.3 Contaminación de Agua Subterránea

La alteración en la calidad de agua extraída de pozos de abastecimiento es una manera de notar el impacto en agua subterránea. Sin embargo, en los pozos de extracción o abastecimiento se diluye el contaminante, por lo que no es la mejor manera de detectar el problema en sus primeras etapas. En otros casos es posible que el contaminante esté presente, pero en concentraciones menores al límite de detección de la técnica analítica y cuando este llega a ser detectado el problema ya alcanzó grandes dimensiones. En algunos casos aún cuando se elimine la fuente de contaminación, el compuesto queda en el suelo y se libera lentamente, lo cual provoca la formación de una pluma contaminante (Mackay y Cherry, 1989).

Las fuentes potenciales de contaminación que pueden afectar los sistemas de agua subterránea pueden ser puntuales y no puntuales. Se consideran fuentes puntuales las fábricas, refinerías, tintorerías, gasolineras, aeropuertos, tiraderos de basura, tanques enterrados, así como derrames que suceden al transportar compuestos químicos, entre otras. Como ejemplo de fuentes no puntuales se consideran la aplicación de plaguicidas en zonas agrícolas, los canales de drenaje, los sistemas de tuberías para el transporte de hidrocarburos, entre otros.

Muchos de los problemas de contaminación ocurren por fugas, derrames y disposición de líquidos orgánicos inmiscibles en la superficie del agua, los cuales se describen como fases líquidas no acuosas (Non Aqueous Phase Liquids) -*NAPL*. (Gillham y Rao 1990) Estos fluidos inmiscibles pueden clasificarse en dos categorías. 1) aquellos cuya densidad es mayor que la del agua (Dense non-aqueous phase liquids)-*DNAPL*, que incluyen los disolventes percloroetileno y tricloroetileno, substancias como bifenilos policlorados y algunos plaguicidas (Cherry, Feenstra y Kueper, 1990) y 2) aquellos más ligeros que el agua (Light non-aqueous phase liquids)-*LNAPL*, que incluyen compuestos como benceno, tolueno, etilbenceno, y xileno (Huling y Weaver, 1991), en la figura 5 se ilustra el comportamiento de estos compuestos.

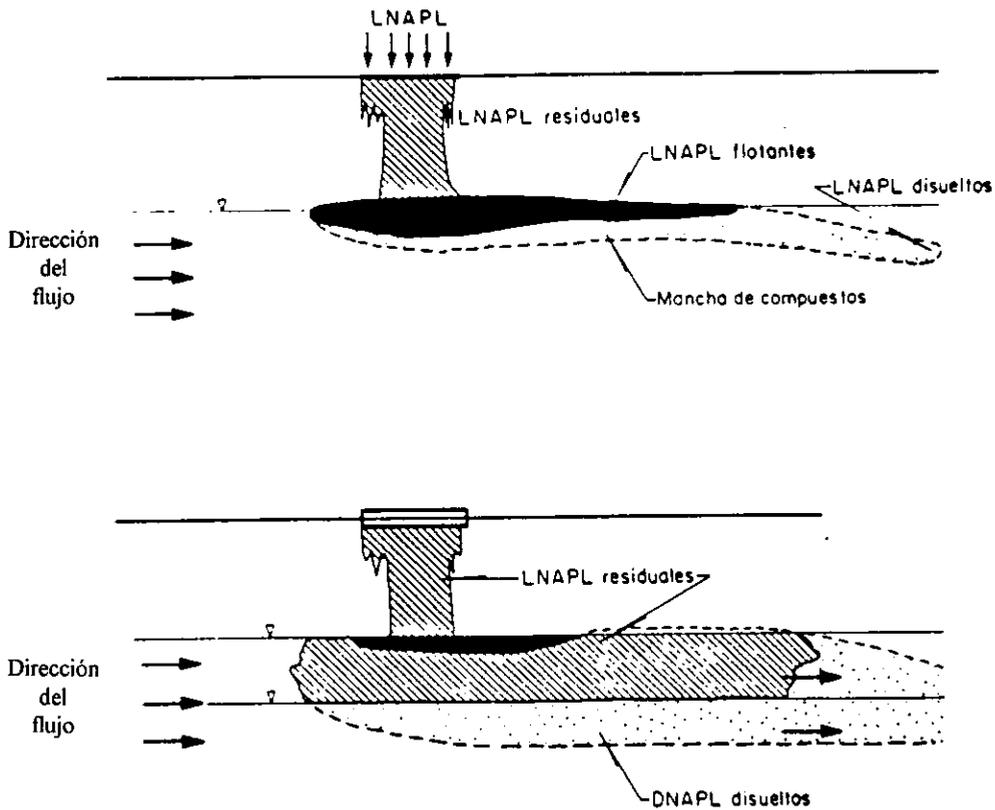


Figura 5. Comportamiento de los compuestos LNAPL y DNAPL. (Palmer and Johnson, 1989)

Los compuestos DNAPL se utilizan comúnmente en tintorerías, preservación de madera, industria electrónica, industria eléctrica, talleres de impresión, producción y reparación automotriz, asfalto y aviación. Debido a sus características, las sustancias LNAPL generalmente se distribuyen cerca de la fuente contaminante y son degradadas por bacterias en un medio aerobio. Por lo tanto los lugares con aguas subterráneas contaminadas se localizan cerca de áreas industrializadas, densamente pobladas, circunstancia que incrementa la posibilidad de exposición humana (*Cherry, 1987; EPA, 1991*).

De los diversos compuestos químicos encontrados en aguas subterráneas, los orgánicos representan un gran riesgo por sus efectos en el ambiente y a la salud humana. Dentro de este grupo de compuestos, los disolventes industriales y los hidrocarburos aromáticos derivados del petróleo son los más comúnmente encontrados en agua subterránea (*Mackay y Cherry 1989, Mackay, Gold, y Leson, 1988*).

Los contaminantes orgánicos detectados en agua subterránea representan un riesgo para la salud. Varias de estas sustancias, como por ejemplo el percloroetileno y tricloroetileno, producen depresión del sistema nervioso central, afectan la función del hígado y riñón, dependiendo de la concentración y el tiempo de exposición. Existen investigaciones que indican que el tetracloruro de carbono y el cloroformo son cancerígenos. Está comprobado que el benceno es un agente cancerígeno en humanos (*Thomas, 1990*).

Los compuestos orgánicos ligeros como las gasolinas aceites y petróleo crudo tienden a formar una capa de nata en el nivel freático y se mueven horizontalmente en dirección al flujo del agua subterránea, contaminando así el acuífero, estos son transportados a través del suelo como: flujo de masa disuelto en agua, difusión líquida y difusión gaseosa. La combinación de las características del subsuelo, contaminantes y condiciones climatológicas del sitio pueden dar lugar a los diferentes procesos de transporte y distribución de los contaminantes. Para entender el transporte y destino de los contaminantes en el subsuelo es necesario realizar una buena caracterización del sitio y conocer los coeficientes de adsorción y permeabilidad del suelo (*Saval, 1995*).

Es necesario considerar que para algunos compuestos volátiles la migración en forma de vapor es igual o más importante que el desplazamiento en forma líquida. Además existe una gran cantidad de desechos en estado sólido, que al descomponerse e infiltrarse con el agua de lluvia producen lixiviados (*Mazari, 1995*).

La difusión del compuesto es afectada por la adsorción dentro de las partículas del suelo. La materia orgánica y el tipo de arcilla influyen en el contenido de compuestos orgánicos volátiles en el suelo. El fenómeno de adsorción se da en suelos que preferentemente adsorben agua y estos pueden adsorber algunos compuestos químicos cuando el contenido de humedad es bajo. En algunos suelos relativamente secos, la superficie puede retener compuestos químicos orgánicos que pueden volatilizarse bajo condiciones de humedad relativamente alta (EPA, 1983).

Investigaciones recientes sugieren que los compuestos con mayor movilidad son los compuestos del petróleo, estos pueden ser encontrados en diferentes fases en el suelo: líquidos, disueltos en agua y absorbidos por el suelo (Lesser, 1995). Estos compuestos pueden ser degradados durante la migración hacia el acuífero, especialmente si hay oxígeno disponible.

El comportamiento de los contaminantes orgánicos está en función de sus características físicas y químicas (densidad, solubilidad, viscosidad, etc.), además de las características del medio como son el tipo suelo, permeabilidad, tamaño de las partículas, contenido de humedad y materia orgánica, así como la profundidad del nivel freático. Otros factores climatológicos como la temperatura y la precipitación pluvial también tienen una gran influencia.

El contenido de humedad afecta la difusión de los contaminantes especialmente aquellos que son relativamente solubles en agua como son los compuestos de anillo aromático, afectando la calidad del agua; es por ello que la presencia de benceno, xileno y tolueno sea más evidente en los suelos. Además que el agua es un medio de transporte en dirección horizontal y vertical, este es más fácil para sustancias menos adsorbentes y más polares como es el caso de los alcoholes seguido por los aromáticos y finalmente los alifáticos (Tölgyessy, 1993).

La migración de BTEX llega a ser detenida en forma natural debido a los siguientes factores: los compuestos son degradados, se limita su movimiento por la presencia de una capa impermeable o alcanzan la zona de capilaridad. Existen casos en los que los hidrocarburos persisten y forman plumas de contaminación de varios kilómetros de largo.

En estudios de muestras de agua residual superficial del Gran Canal (Saval y Garcia, 1997) se han detectado varios compuestos volátiles y semivolátiles, reportados en la tabla 2.

Tabla 2. Compuestos volátiles y semivolátiles en agua residual superficial del Gran Canal

COMPUESTO	CONCENTRACIÓN (µg/L)
2,4-Dinitrotolueno	20
Fenol	100
Hexaclorobenceno	70
Hexacloroetano	50
Nitrobenzeno	500
Pentaclorofenol	101
2,3,4,6-Tetraclorofenol	100
2,4,6-Triclorofenol	100
Tetracloruro de Carbono	0.021
Cloroformo	0.013
Clorobenceno	0.010
Benceno	0.010
Tolueno	0.005
Tricloroetileno	0.010
Tetracloroetileno	0.020

(Saval y Garcia 1997)

En el mismo sitio, se encontraron compuestos orgánicos volátiles aromáticos (BTEX) en agua intersticial, los valores reportados se encuentran en la tabla 3.

Tabla 3. BTEX en agua intersticial del Gran Canal

Profundidad Vertical (m)	BENCENO (mg/L)	TOLUENO (mg/L)	ETILBENCENO (mg/L)	m y p XILENO (mg/L)	o-XILENO (mg/L)
2.55-2.64	0.02	0.047	0.543	0.163	0.045
2.73-2.83	0.02	0.021	0.348	0.091	0.027
3.59-3.72	0.02	0.021	0.331	0.082	0.022
3.85-3.98	0.02	0.002	0.103	0.026	0.005
4.06-4.18	0.37	1.258	1.418	4.164	2.262
4.11-4.24	0.02	0.024	0.318	0.097	0.024
4.43-4.55	0.02	0.005	0.207	0.051	0.011
5.42-5.50	0.02	0.002	0.132	0.024	0.005
5.50-5.58	0.15	0.474	0.809	25.728	1.582

(Saval y Garcia 1997)

Las concentraciones de benceno, tolueno, etilbenceno y o-xileno fueron mayores a una profundidad de 4.06-4.18 m, mientras que el m y p-xileno se presentaron en mayor concentración a una profundidad de 5.50-5.58m.

Con estos datos se deduce que estos compuestos se están infiltrando hacia el subsuelo (*Saval y Garcia, 1997*).

## 2.4 Remediación

Las actividades humanas provocan que se sobrepase la capacidad de autodepuración natural de los ecosistemas, provocando la acumulación de contaminantes y en algunas ocasiones se alcanzan niveles críticos. La forma para minimizar el impacto sobre el ambiente, reside en el control de las emisiones de los contaminantes, así como el acelerar la degradación de los ya presentes (*Lui y Sulfita. 1993*).

Una gran diversidad de técnicas de remediación son posibles en el tratamiento de los desechos del petróleo. Los tratamientos son considerados como: físicos, químicos y biológicos.

Los métodos físicos tales como la extracción, simplemente transfieren los desechos de un medio a otro, sin ofrecer una solución permanente el problema, las técnicas de tratamiento como incineración, son efectivas pero generalmente costosas.

El tratamiento químico está generalmente basado en explotar las diferentes propiedades químicas del suelo y del contaminante, tales como la acidez y el potencial de precipitación. Estos métodos pueden dejar subproductos tóxicos y peligrosos. La estabilización química incrementa el volumen del material tóxico al diluirlo en un material inerte, pero los contaminantes no son eliminados sino simplemente atrapados e inmovilizados dentro de una matriz.

El tratamiento biológico es por tanto una tecnología viable y económica para tratar los desechos del petróleo, sus posibles beneficios y ventajas son extensas e incluyen ahorro de tiempo y recursos económicos. Se prevé, la capacidad de tratar *in situ* los contaminantes reduciendo los costos por manipulación o transporte que pudieran necesitarse con otros tratamientos.

La biodegradación de los desechos tiene aceptación pública y puede ser acoplada con otras técnicas de tratamiento para resolver problemas ambientales. Un proceso de tratamiento biológico efectivo depende de una gama de condiciones ambientales. Los microorganismos apropiados capaces de degradar el compuesto deseado deben ser adicionados o estar presentes.

Deben estar presentes las condiciones necesarias para el crecimiento microbiano como: una fuente de energía, nutrientes apropiados, pH y temperatura. Los requerimientos nutricionales de los microorganismos son uno de los factores principales que afectan a la biodegradación.



Muchos de los constituyentes de los desechos petroleros son biodegradables si se proveen las condiciones apropiadas, y ésta adición de nutrientes al medio es considerada como una bioestimulación de las poblaciones de microorganismos existentes (*Leahy, 1990*).

Los microorganismos son considerados como los mejores agentes para destruir compuestos orgánicos presentes en petróleos crudos (*Atlas, 1981*).

Además de los desechos municipales y residuos del proceso del tratamiento de aguas, los microorganismos pueden degradar plaguicidas, compuestos químicos industriales, combustibles, gasolina, diesel y otros componentes derivados del petróleo. Algunos compuestos que en el pasado fueron considerados como no biodegradables, tales como disolventes clorados, bifenilos policlorados (PCB's), clorofluorocarbonos y otros disolventes orgánicos sintéticos estables, están siendo degradados en el laboratorio por cepas selectas o asociaciones de microorganismos. Actualmente, la mayoría de los compuestos químicos, naturales o sintetizados por el hombre, pueden ser degradados por microorganismos, a través de la utilización directa o por co-oxidación (*Lees y Senior, 1995*).

Los hidrocarburos en el ambiente son degradados por bacterias y hongos. En los ecosistemas terrestres y acuáticos, la fracción total de la comunidad heterotrófica representada por bacterias y hongos que utilizan hidrocarburos presenta una gran variación reportada entre 6 a 82% para hongos del suelo; 0.13 a 50% para bacterias del suelo y 0.003 al 1005 para bacterias marinas. Los organismos individuales pueden metabolizar sólo un intervalo limitado de hidrocarburos, así que conjuntos o poblaciones mixta con amplias capacidades enzimáticas son necesarias para degradar mezclas complejas de hidrocarburos en suelos y ambientes acuáticos (*Leahy, 1990*).

La capacidad para degradar y/o utilizar hidrocarburos como sustratos presenta una amplia diversidad de géneros de bacterias y hongos. Las bacterias degradadoras de hidrocarburos más importantes en los ambientes marinos y en suelos son: *Achromobacter*, *Acinetobacter*, *Alcaligenes*, *Arthrobacter*, *Bacillus*, *Flavobacterium*, *Nocardia* y *Pseudomonas* spp (*Leahy, 1990*).

## 2.5 Legislación

El suelo y el agua son parte del patrimonio nacional, independientemente de su valor y de su uso, razón por la que su cuidado es responsabilidad de todos los mexicanos. El artículo 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos establece que: La propiedad de las tierras y aguas comprendidas dentro del territorio nacional corresponden originalmente a la nación - por lo que se dictaran medidas necesarias para preservar y restaurar el equilibrio ecológico... y para evitar la destrucción de los elementos naturales y los daños que puedan sufrir en perjuicio de la sociedad.

Por otro lado, la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección Ambiente (LGEEPA) es el instrumento fundamental que sirve como base para todas aquellas acciones relativas a nuestros recursos naturales. El capítulo IV, y el capítulo III lleva por nombre Prevención y Control de Contaminación del Suelo, consta de 11 artículos, del 134 al 144 inclusive. En su redacción existe poca precisión, menciona que los residuos sólidos son la principal fuente de contaminación del suelo, siendo que son uno de tantos ejemplos de contaminación. La LGEEPA parece no considerar otros contaminantes que se derraman como parte de actividades industriales, como por ejemplo los residuos del procesamiento del petróleo.

La NOM-001-ECOL-1996 establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales y bienes nacionales. No especifica BTEX o solventes, solo: temperatura, grasas y aceites, materia flotante, sólidos sedimentables, sólidos suspendidos totales, (DBO) demanda bioquímica de oxígeno, fósforo total, arsénico, cadmio, cianuro, cobre, cromo, mercurio, níquel, plomo, zinc.

La NOM-002-ECOL-1996 Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal. No especifica BTEX o solventes, solo: grasas y aceites, sólidos sedimentables, arsénico total, cadmio total, cianuro total, cobre total, cromo hexavalente, mercurio total, níquel, plomo, zinc total.

La NOM-CRP-001-ECOL-1996 Establece las características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente. Solo menciona al BENCENO con una concentración máxima permisible de 0.5 mg/l y al TOLUENO con una concentración máxima permisible de 144 mg/l.

La NOM-CRP-002-ECOL-1996 establece el procedimiento para llevar a cabo la prueba de extracción para determinar los constituyentes que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente. No es muy específica pero si diferencia los compuestos volátiles y los no volátiles.

La LGEEPA, es el instrumento fundamental de referencia para realizar las auditorias ambientales, si partimos de la base que la legislación ambiental en materia de suelo es deficiente, las auditorias ambientales que oficialmente se realizan no son adecuadas. De ahí surge la necesidad de contar con una ley precisa en los aspectos considerados y clara en su redacción para evitar interpretaciones erróneas.

Otros instrumentos de referencia necesarios para que la ley pueda aplicarse y que no existen son: un reglamento para la protección del medio ambiente en materia de prevención y control de la contaminación del suelo y del subsuelo y las normas oficiales mexicanas correspondientes (*Saval, 1995*).

Dado que en México no existen normas oficiales mexicanas que establezcan los niveles de limpieza, la evaluación de los sitios contaminados puede llevarse a cabo tomando como referencia normas extranjeras, por evaluación de riesgo o en función del uso que se dará al suelo.

#### **Alternativas para la evaluación de sitios contaminados.**

##### **Normas extranjeras.**

La concentración de contaminantes se expresa a través de un parámetro indicador, que corresponde al contaminante y que está en mayor proporción o que es el más peligroso. Debido a que tampoco contamos con métodos analíticos oficiales para determinar la concentración de contaminantes en México, se acostumbra recurrir a los establecidos por otras instituciones oficiales extranjeras. Las más comunes son los métodos desarrollados por la Environmental Protection Agency (EPA) y American Society for Testing Materials (ASTM), los cuales son identificados por una clave formada por dos números, el primero es progresivo y el segundo indica el año de publicación que en ciertos casos corresponde a una modificación del procedimiento. Cabe aclarar que estos métodos se han desarrollado para países con otro tipo de entorno por lo que no son lo más conveniente para el nuestro.

### **Evaluación de riesgo**

Se refiere a los valores deducidos después de una evaluación de los riesgos del lugar de estudio. Las normas oficiales en los estados de E.U. fueron establecidas bajo este criterio.

Los estudios de evaluación de riesgo son el resultado del análisis de peligrosidad y de exposición de riesgo, con el análisis de peligrosidad se determina la toxicidad de los contaminantes en el sitio, mientras que con el de exposición se evalúan los medios por los cuales un ser humano encuentra los contaminantes que se generan de un sitio.

En el análisis de riesgo, los niveles de exposición humana para un compuesto químico y la toxicidad resultante se comparan con un valor de toxicidad crítica para ese compuesto. El valor de toxicidad crítico generalmente representa un nivel de exposición aceptable.

### **Uso del suelo**

En esta opción se analizan las propiedades de un suelo en función de su uso, también se analiza si la contaminación es un riesgo para la salud de los habitantes aledaños a la zona. Lo más común es pensar que el suelo se va a utilizar como medio para el crecimiento de especies vegetales, aunque no necesariamente como una actividad económica, también se puede usar el suelo como material estructural en una construcción.

La concentración de los contaminantes se puede evaluar de manera global como hidrocarburos totales de petróleo (TPH), o bien se elige el más tóxico de sus componentes. En el caso de las gasolinas se cuantifican los hidrocarburos monoaromáticos totales como BTEX (benceno, tolueno etilbenceno y xilenos) o cada uno de ellos por separado, algunos eligen solamente el benceno por ser el más tóxico. Existen varios métodos para cuantificar un mismo parámetro, pero algunos son específicos para muestras de agua y otros para muestras de suelo.

El ejemplo clásico es tomar como referencia los estándares establecidos por la EPA en Estados Unidos. En este país, no existe un listado de normas único, los gobiernos estatales han establecido sus propios límites permisibles, los cuales fueron definidos de acuerdo a una evaluación de riesgo. En la Tabla 4 se presentan los límites permisibles en algunos de los estados.

Tabla 4. Límites permisibles de contaminantes en suelo y agua subterránea en algunos estados de los E.U. (Saval, 1995)

Estado	Contaminante	Parámetro indicador	Límite Permisible (Nivel de limpieza)	
			Suelo (mg/g)	Agua Subterránea (µg/L)
Alabama	gasolina	benceno	-	5
		tolueno	-	1000
		etilbenceno	-	700
		xilenos	-	10,000
		TPH	100	-
Arizona	gasolina	TPH	-	1
		benceno	0.13	5
		tolueno	200	1000
		etilbenceno	68	700
		xilenos	44	10,000
Arkansas	gasolina	diesel	100-1000	-
		BTEX	0-400	-
California	gasolina	benceno	0.3-1	-
		tolueno	0.3-50	-
		etilbenceno	1-50	-
		xilenos	1-50	-
Idaho	gasolina	benceno	-	5
		tolueno	-	1000
		etilbenceno	-	700
		xilenos	-	10,000
		TPH	40-200	-
Florida	gasolina	benceno	-	1
		BTEX	-	50
Georgia	gasolina	benceno	-	5-71
		tolueno	-	1000-200,000
		etilbenceno	-	700-28,718
		xilenos	-	10,000
		BTEX	20-100	-
Kansas	gasolina	TPH	100-500	-
		benceno	1.4	5
		tolueno	-	1000
		etilbenceno	-	680
		xilenos	-	440

TPH: Hidrocarburos totales de petróleo.

BTEX: benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos.

## **CAPITULO 3**

### **MATERIALES Y METODO**

#### **3.1 METODOS DE CAMPO**

##### **3.1.1 Sitio de Muestreo**

El Gran Canal y el Río de los Remedios transportan el agua residual de la ZMCM. El Río de los Remedios se incorpora al Gran Canal y su cauce sale de la Cuenca de México a través del túnel de Tequisquiác que descarga sus aguas al Río Moctezuma que a su vez desemboca en el Río Pánuco y este desemboca en el Golfo de México.

Los giros industriales de las fuentes de descarga son: industrial, comercial, municipal y de servicio, lo que da como resultado una composición compleja del agua residual que es vertida en ellos, los sitios seleccionados para este estudio fueron el Gran Canal del Desagüe, localizado en el kilómetro 9.5 en el límite entre el Distrito Federal y el Estado de México, al norte de la delegación Gustavo A. Madero, en este sitio se muestrearon tres puntos identificados como GC1, GC2 y GC7, y el Río de los Remedios, en este sitio se muestrearon dos puntos identificados como RR4 y RR6, localizado aproximadamente a 500m de la intersección con el Gran Canal y el lugar seleccionado como Sitio Control localizado a 1 km del Gran Canal. En la Figura 6 se puede apreciar los lugares de muestreo. Los sitios cercanos al canal fueron seleccionados con base a la accesibilidad para el muestreo, ya que en esta parte ambos canales se encuentran a cielo abierto es decir, no están entubados y el sitio control es un lugar que no tiene un contacto directo con el área de los canales.

### 3.1.2 Muestreo

Para el muestreo se contó con maquinaria pesada y apoyo de personal capacitado de la compañía TGC Geotécnia.

Para la obtención de las muestras se utilizó un muestreador de barril el cual se adaptó en la parte superior de un pistón, se colocó el muestreador dentro de un tubo de aluminio de 2" de diámetro y una longitud de 1.80 m, la punta del pistón quedó saliendo del tubo. El muestreador se introdujo al subsuelo en ángulo con respecto a la vertical adyacente al canal donde se muestreo. Se perforó a una profundidad de 15 m en secciones de 1.63 m, una vez extraída la muestra en el tubo de aluminio, este se tapó por ambos lados etiquetando superficie y fondo con respecto a su posición en el suelo. Las muestras se mantuvieron en hielo una vez extraídas, posteriormente fueron transportadas al cuarto frío y almacenadas a una temperatura de 4°C hasta su análisis.

Las perforaciones se realizaron con cierto ángulo de inclinación con el fin de obtener muestras de suelo por debajo del cauce del canal, de preferencia cercano a su centro. El ancho del Gran Canal varía entre 15 y 25 m y el Rio de los Remedios entre 1 y 3 m por lo que el ángulo fue diferente en cada sitio. El sitio control se perforó en forma vertical hasta una profundidad de 15 m. Figura 7.

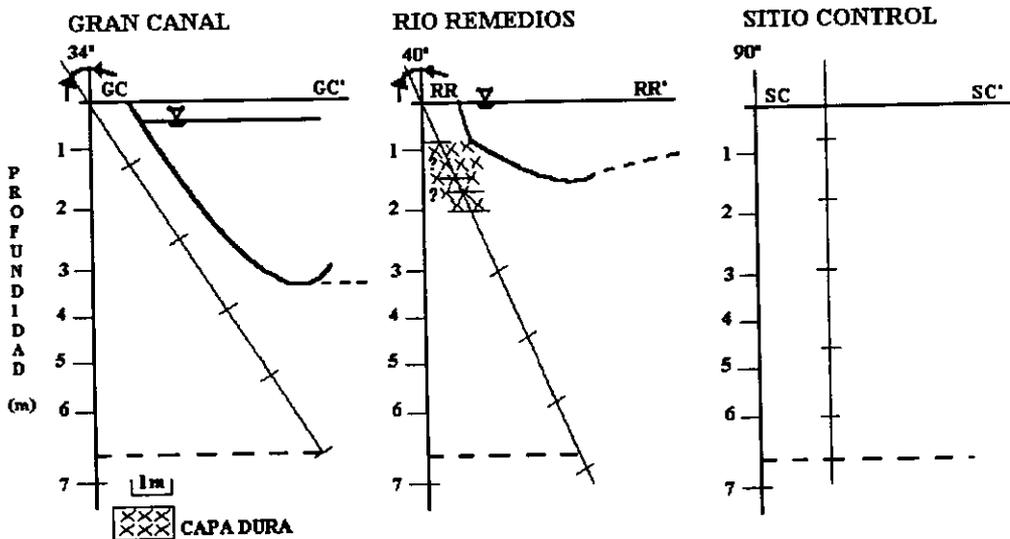


Figura 7. Toma de Muestras en ángulo.





Tabla 7. Muestreo en el Gran Canal (GC7)  
 Fecha de inicio: 08/03/96 Inclinación: 45°

Muestra	Profundidad en ángulo (cm)	Profundidad vertical (cm)	Profundidad promedio(cm)
gc7aVR240	537-552	379-390	385
gc7bVR245	644-659	455-465	460
gc7cVR250	710-725	502-512	507
gc7dVR275	981-996	693-704	698
gc7eVR287	1149-1159	812-819	815
gc7fVR291	1249-1264	883-893	888
gc7fVR297	1307-1322	924-934	929
gc7gVR301	1417-1432	1001-1012	1007
gc7gVR306	1470-1485	1039-1050	1044

Tabla 8. Muestreo en el Río de los Remedios (RR4)  
 Fecha de muestreo: 04/03/96 Inclinación: 40°

Muestra	Profundidad en ángulo (cm)	Profundidad vertical (cm)	Profundidad promedio(cm)
rr4aVR128	332-347	254-265	260
rr4bVR134	457-462	350-353	351
rr4bVR137	482-497	369-380	374
rr4eVR147	712-727	545-556	551
rr4dVR156	801-816	613-625	619
rr4cVR165	964-979	738-749	744
rr4fVR173	1129-1143	865-875	870
rr4gVR177	1219-1231	933-942	938
rr4gVR181	1253-1265	959-968	964
rr4gVR185	1292-1304	989-998	994

Tabla 9. Muestreo el Rio de los Remedios (RR6)  
 Fecha de muestreo: 06/03/96      Inclinación: 50°

Muestra	Profundidad en ángulo (cm)	Profundidad vertical (cm)	Profundidad promedio(cm)
rr6aVR190	332-347	287.6-297.2	292.4
rr6aVR195	442-457	319.7-329.3	324.5
rr6bVR200	457-462	416.6-426.2	421.4
rr6cVR205	712-727	467.3-477.0	472.1
rr6fVR219	1129.5-1143	599.6-609.2	604.4
rr6eVR227	801-816	705.2-656.9	631.0
rr6fVR231	964-979	789.0-796.0	792.5

Tabla 10. Muestreo en el Sitio Control (SC)  
 Fecha de muestreo: 13/03/96      Inclinación: Vertical

Muestra	Profundidad vertical (cm)
sc8cVR331	830-843
sc8gVR378	1383-1398

### 3.1.3 Procesamiento de Muestras

El núcleo de material geológico en el tubo de aluminio se dividió en secciones de 15 cm de longitud para realizar el análisis de las muestras correspondientes a compuestos orgánicos volátiles. Se utilizó el método de *Patterson et al. (1978)* para prensar las secciones y extraer las muestras de agua intersticial. Este método comprende el uso de un equipo de acero inoxidable, Figura 8.

El exprimidor de acero inoxidable permite extraer el agua intersticial que puede contener diversos compuestos orgánicos, ya que el suelo permanece dentro del tubo de aluminio sin alterar la muestra. Esto reduce la posibilidad de contaminación y la pérdida de compuestos de interés de la muestra, el uso del tubo de aluminio como contenedor de la muestra minimiza la sorción de compuestos orgánicos.

En la parte del fondo del exprimidor, se coloca un papel filtro Whatman No.2 entre dos mallas de acero inoxidable para evitar el paso de partículas de arcilla.

Las muestras de agua intersticial se obtuvieron colocando los núcleos en el exprimidor, el cual se colocó en una estructura de metal que sirve como prensa, aplicando presión con un gato hidráulico de 4 Ton, que permite la extracción de agua contenida en las arcillas, Figura 9.

Para evitar el riesgo de contaminar la muestra se desecha aproximadamente el primer mililitro extraído. El agua se colectó directamente dentro de una jeringa hipodérmica de vidrio colocada en la parte inferior del exprimidor. Esta se depositó en un vial de vidrio borosilicatado, el cual se selló con un casquillo de aluminio con septa de silicón recubierta de teflón. El volumen de muestra obtenido fué de aproximadamente 10 mL. Es importante mencionar que el volumen de la muestra varío de acuerdo al tamaño del núcleo y también por la variación en la compresibilidad de los suelos aplicando la presión cada 60 minutos, obteniendo la muestra entre 12 y 24 horas después de iniciado del proceso.

Este proceso se realizó en cuarto frío a una temperatura de 4°C para evitar la volatilización de los compuestos de interés.

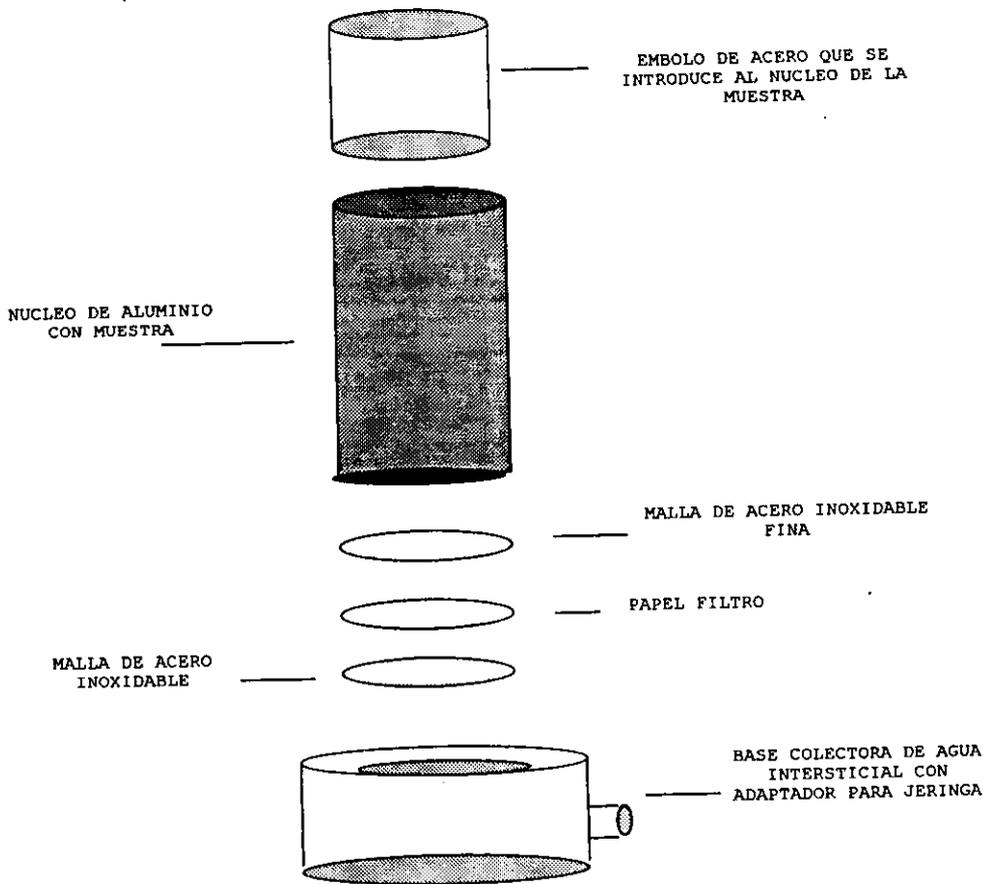


Figura 8. Equipo utilizado en la extracción de agua intersticial (exprimidor).

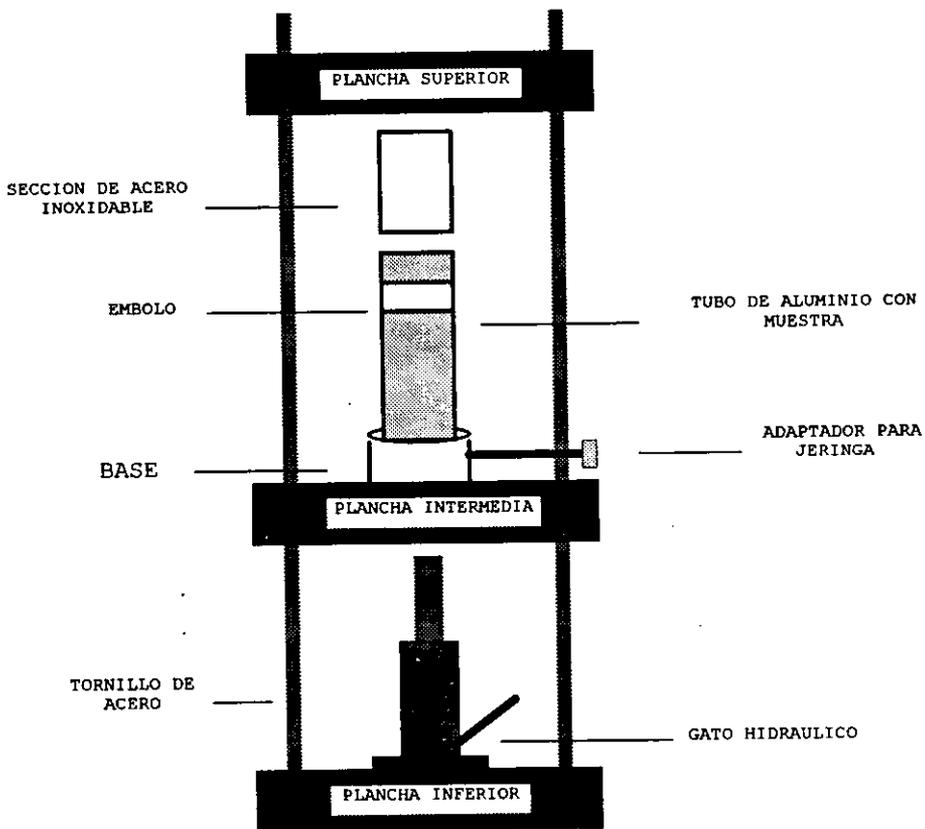


Figura 9. Equipo utilizado en la extracción de agua intersticial de material geológico (Prensa).

## 3.2 METODOS EXPERIMENTALES

### 3.2.1 Cromatografía de Gases

La cromatografía es una Técnica de separación en el que los componentes de la muestra se distribuyen entre dos fases, una estacionaria que presenta una gran superficie de contacto y una fase móvil que pasa a lo largo de la fase estacionaria.

Los métodos cromatográficos de separación se distinguen por su alta selectividad, que es la habilidad de separar componentes de estructura química y propiedades físicas muy similares, que resultan difícil separar por otros métodos.

El fundamento de la Cromatografía de Gases (CG) al igual que otras técnicas cromatográficas es la separación de sus componentes basándose en la afinidad a una fase estacionaria, siendo la polaridad el criterio fundamental.

El esquema básico de un cromatógrafo de gases se muestra en la figura 10 sus elementos constitutivos son:

Gas de arrastre, sistema de inyección, horno, columna, detector, registrador o integrador.

#### Gas de arrastre

El gas portador es la fase móvil en CG y es el que lleva la mezcla de los solutos desde que se introduce en el sistema cromatográfico hasta la salida del detector, pasando a través de la columna donde se produce la separación, debe ser químicamente inerte y no interaccionar ni con la columna ni con los componentes de la mezcla, los gases más utilizados son: nitrógeno, helio e hidrógeno. La elección de uno de ellos va a depender de a) la naturaleza de la columna y b) el tipo de detector utilizado. Otros aspectos a considerar son: costo, pureza y seguridad en el uso. El gas portador utilizado debe estar libre de contaminantes tales como humedad, oxígeno e hidrocarburos.

#### Sistema de inyección

La inyección de la muestra es uno de los pasos principales en el análisis, del cual dependen enteramente los resultados. Reproducibilidad, máxima sensibilidad evitando saturación en las señales, son solo algunas de las características que el analista debe buscar en cada inyección.

## Detector

Los detectores cromatograficos pueden ser clasificados como "universales" "selectivos" o "especificos". En los "universales" la detección de todos los picos eluidos es deseable para algunas aplicaciones, sin embargo, algunas veces es necesario la discriminación de algunos compuestos para llevar a cabo una presentación completa del cromatograma donde solo aparezcan los analitos de interés. Los detectores especificos tienen una alta selectividad y son materialmente "ciegos" a cualquier otro compuesto.

Los objetivos de la detección cromatografica son: la identificación de los compuestos eluidos, así como su cuantificación con bajos limites de detección, reproducibilidad y estabilidad.

Los de mayor uso en cromatografía de gases son: Detector de ionización de flama (FID), y el Detector de Captura de electrones(ECD). ( *McNair y Bonelli 1979*).

## Columnas:

La columna se puede referir una parte fundamental de la cromatografía pues de ella depende el éxito de la separación, de ahí que haya surgido una serie de diferentes columnas que se ajusten a las necesidades de separación. Hoy día se usan fundamentalmente columnas capilares de silice fundida, con las paredes internas recubiertas con diferentes fases estacionarias líquidas (WCOT) o sólidas (SCOT). La selección de estas depende del tipo de compuestos a analizar.

## Cromatograma:

Un cromatograma se usa para ilustrar los resultados que se obtienen en un análisis de CG, Figura 11. Este es el registro gráfico del análisis, en el que se indican los componentes y el grado de concentración en que estaban presentes en determinado tiempo. Cuando sólo sale de la columna el gas portador utilizado como eluente, aparecerá dibujada una línea recta, *la línea base*. Cuando se eluyen los picos de la muestra, se dibuja el perfil de su concentración y así se obtienen dos importantes parámetros de información: el *tiempo de retención* y el *área del pico*.

El área del pico permite determinar la concentración de cada componente separado en la columna.



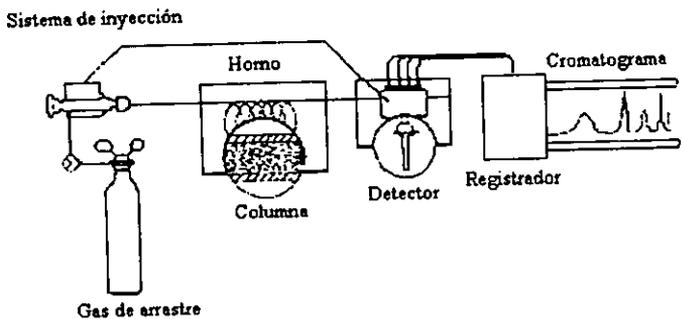


Figura 10. Esquema básico de un Cromatografo.

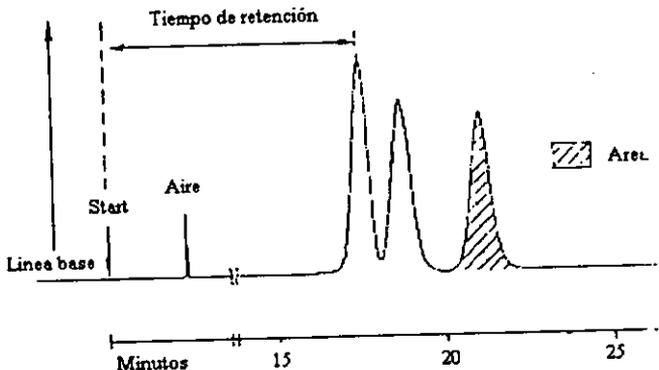


Figura 11. Representación de un Cromatograma típico.

El tiempo de retención ( $t_r$ ) es el tiempo transcurrido desde la inyección de la muestra hasta que se obtiene el máximo del pico. Este tiempo es característico del soluto, de la fase líquida y de la temperatura de la columna. Los tiempos de retención pueden usarse para identificar los compuestos, ya que en condiciones controladas son estables.

#### Ventajas

Las principales ventajas de la cromatografía de gases son: alta resolución, velocidad, sensibilidad y resultados cuantitativos.

#### Limitaciones

Las principales limitaciones de la CG: solo se pueden analizar compuestos con pesos moleculares inferiores a 1000g/mol, muchos compuestos requieren reacciones previas para formar derivados estables. Para el análisis cualitativo se requiere de sistemas acoplados y/o el uso de varias columnas diferentes. (A. Dominguez, 1981)

#### Condiciones Cromatográficas

Las condiciones cromatográficas específicas en este estudio fueron las siguientes: Se utilizó un Cromatografo de Gases HP Modelo 5890 Serie II, con una Columna Capilar Ultra 1 (Crosslinked Metil Silicone Gum) 25mx0.2mmx0.33 $\mu$ m. y con un detector de Ionización de Flama (FID), la extracción de compuestos se realizó con un Headspace HP 7694

Las condiciones para efectuar los análisis fueron las siguientes:

La rampa de temperatura inicia en 40°C manteniendo la temperatura constante por 4 minutos, incrementos de 10°C/min hasta llegar a 70°C manteniendo la temperatura constante por 8 minutos.

Flujo de Gases. Helio: Cromatografo: 15 mL/min, Headspace al Cromatografo: 40 mL/min, Detector: 1.47 mL/min, Flujo total: 53 mL/min, Presión de la Columna: 25 psi  
Detector(FID) Hidrogeno: 12 psi, Aire: 36 psi, Gas Auxiliar: 48 psi.

#### Condiciones Headspace

El Headspace fue programado de la siguiente manera: Oven 75°C, loop 150°C, Tr line 150°C, Cycle time 22min, In. Time 1min, Eq. time 0.15min, Loop fill time 0.08min, Pressure Time 0.13min y Vial eq. Time 20min.

### 3.2.1.1 Curva de Calibración

Para preparar la curva de calibración es necesario primero hacer las soluciones stock para cada uno de los compuestos, benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos, en este caso se prepararon a una concentración de 440 mg/L.

Para preparar la solución stock se siguieron los siguientes pasos:

- \* Etiquetar como stock y el nombre del compuesto un matraz aforado de 100 mL para cada estándar (benceno, tolueno, etilbenceno, o-xileno, m-xileno y p-xileno) en este caso se prepararon seis.
- \* Pesar cada matraz con todo y tapón y llevar el registro.
- \* Agregar aproximadamente 1 mL de Metanol.
- \* Llevarlos a la campana de extracción y allí agregar 0.5 mL de estándar a cada uno.
- \* Volver a pesar cada matraz con todo y tapón para obtener el peso del estándar.
- \* Llevarlos nuevamente a la campana de extracción y aforar con Metanol grado cromatográfico.
- \* Homogeneizar la mezcla con el Vortex por 1 minuto y taparlos perfectamente.
- \* Guardar los matraces en el congelador a una temperatura de  $-20^{\circ}\text{C}$ .

Con los cálculos correspondientes se conoce la concentración de cada solución Stock.

Para preparar la curva de calibración se hace una mezcla de 1 mL de cada solución stock en un matraz de 25 mL esta mezcla se afora con agua bidestilada y se obtiene una concentración de 176 mg/L.

- \* A partir de esta mezcla se preparan seis diluciones en matraces de 10 mL con las siguientes concentraciones: 0.0088 mg/L, 0.022 mg/L, 0.044 mg/L, 0.088 mg/L, 0.44 mg/L, y 0.88 mg/L, estas se aforan con agua bidestilada.
- \* Se agregan 10 mL de cada una de estas soluciones en viales de vidrio borosilicatado y se sellan con una septa de silicón cubierta de teflón
- \* Se llevan al Headspace previamente programado para iniciar su análisis
- \* Los resultados obtenidos sirven como puntos de referencia para la curva de calibración. Los puntos de las curvas de calibración se ajustan a un arreglo lineal con un valor de correlación ( $r$ ) de 0.9999.

### **3.2.1.2 Procesamiento de Muestras**

#### **Muestras de Suelo**

- \* Etiquetar tres viales por muestra con la identificación de esta y la letra A, B y C. Los viales A y B son la muestra y el duplicado y el vial C será el adicionado. El vial C que es el adicionado servirá para evaluar si hay alguna pérdida o ganancia de compuestos de interés al efectuar el análisis cromatográfico.
- \* Pesar cada vial y llevar el registro.
- \* Montar el equipo de extracción para esta muestra.
- \* Quitar el sello de la parte superior del cilindro que contiene la muestra.
- \* Con una espátula quitar aproximadamente 5 mm de la muestra, para evitar que la muestra tomada tenga material oxidado ya que en los extremos del tubo se tiene mayor contacto con el exterior, después de esto se extrae el suelo poco a poco para introducirlo en el vial correspondiente hasta tener 10g de muestra en cada vial.
- \* Sellar rápidamente con los anillos de aluminio con una septa de silicón cubierta de teflón (la parte del teflón hacia adentro del vial) los viales A y B.
- \* Al vial C se le adiciona 1 mL de mezcla de BTEX a una concentración de 440 mg/L y se sella inmediatamente.
- \* Se llevan al Headspace previamente programado y se inicia el análisis.
- \* Al obtener el cromatograma se hacen los cálculos correspondientes para así conocer la concentración de los compuestos de interés.

#### **Muestras de agua**

- \* Etiquetar dos viales con los números 1 y 2. El vial con el número 1 es la muestra y el vial con el número 2 el duplicado.
- \* Esperar la extracción de aproximadamente 10 mL de agua en el exprimidor.
- \* Vaciar los 10 mL en cada vial y sellar enseguida.
- \* Se llevan al Headspace para su análisis.
- \* Al obtener el cromatograma se hacen los cálculos correspondientes para conocer la concentración de los compuestos de interés.

## CAPITULO 4

### 4.1 Resultados

Se determino la concentración de los compuestos orgánicos volátiles aromáticos: benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos en suelo y agua intersticial provenientes del Gran Canal (GC), Río de los Remedios (RR) y del Sitio Control (SC).

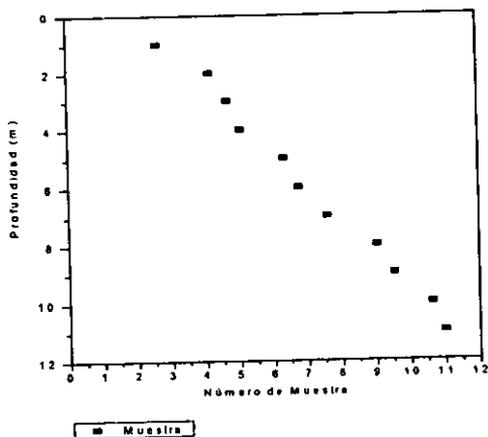
En la Tabla 11 se muestra el sitio, el número de muestras analizadas y el número de muestras positivas obtenidas.

Tabla 11.

Identificación del Sitio	Muestras analizadas	Muestras positivas
GC1	11	0
GC2	9	4
GC7	9	2
RR4	10	3
RR6	7	0
SC	2	0

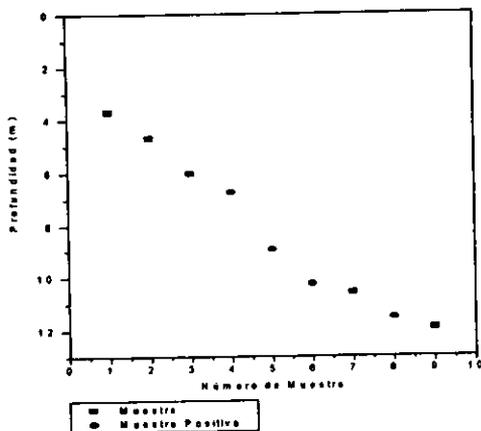
En la gráfica 1, Se muestra la profundidad y el numero de muestras analizadas en el sitio identificado como GC1 de las cuales no se obtuvo ninguna muestra con concentraciones arriba del limite de detección.

Gráfica 1.- Muestras analizadas GC1



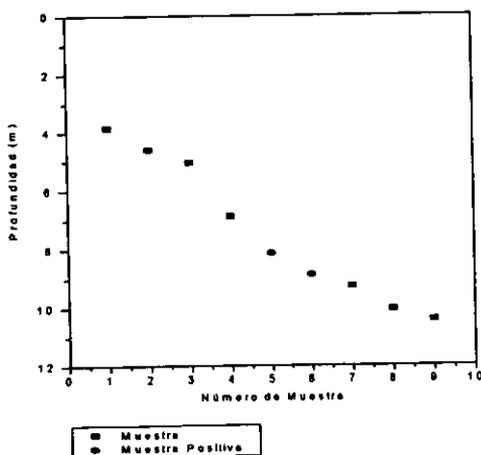
En la gráfica 2, Se muestra la profundidad y el numero de muestras analizadas en el sitio identificado como GC2 de las cuales se obtuvieron 4 positivas.

Gráfica 2.- Muestras analizadas GC2



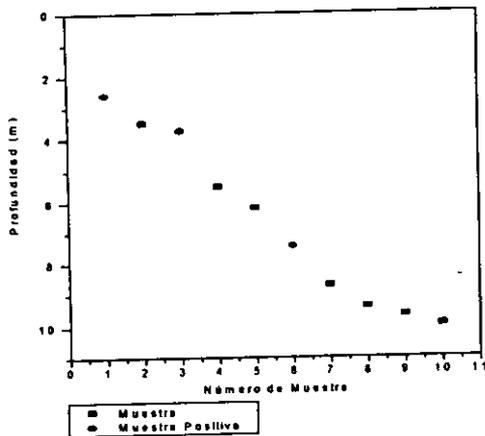
En la gráfica 3, Se muestra la profundidad y el numero de muestras analizadas en el sitio identificado como GC7 de las cuales se obtuvieron 2 positivas.

Gráfica 3.- Muestras analizadas GC7



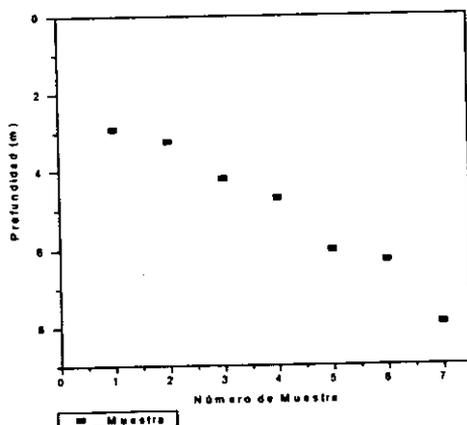
En la gráfica 4, Se muestra la profundidad y el numero de muestras analizadas en el sitio identificado como RR4 de las cuales se obtuvieron 3 positivas.

Gráfica 4.- Muestras analizadas RR4



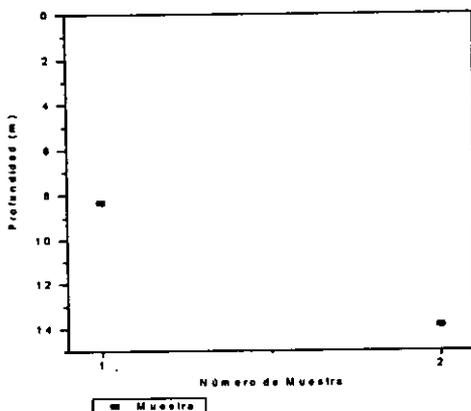
En la gráfica 5, Se muestra la profundidad y el numero de muestras analizadas en el sitio identificado como RR6 de las cuales no se obtuvo ninguna muestra con concentraciones arriba del limite de detección.

Gráfica 5.- Muestras analizadas RR6



En la gráfica 6, Se muestra la profundidad y el numero de muestras analizadas en el sitio identificado como SC de las cuales no se obtuvo ninguna muestra con concentraciones arriba del limite de detección.

Gráfica 6.- Muestras analizadas SC



Del análisis de muestras de los seis sitios identificados como GC1, GC2, GC7, RR4, RR6 y SC. En agua intersticial, no se detectó la presencia de compuestos con concentraciones mayores al límite de detección, estos valores fueron: Para Benceno 0.005 mg/L , para Tolueno 0.003 mg/L, para Etilbenceno 0.004 mg/L y para Xileno 0.003 mg/L.

En la tabla 12, se reporta la identificación de las muestras positivas y la concentración obtenida para cada compuesto en el sitio identificado como GC2.

Tabla 12. BTEX en suelo (GC2)

Muestra	Benceno mg/g	Tolueno mg/g	Etilbenceno mg/g	m y p Xileno mg/g	o- Xileno mg/g
gc2dVR90	0.0136	ND	ND	MLD	0.206
gc2fVR103	0.236	0.383	0.206	ND	MLD
gc2gVR111	ND	ND	0.026	MLD	0.028
gc2hVR119	ND	MLD	0.182	0.136	0.083



En la tabla 13, se reporta la identificación de las muestras positivas y la concentración obtenida para cada compuesto en el sitio identificado como GC7.

Tabla 13. BTEX en suelo (GC7)

Muestra	Benceno mg/g	Tolueno mg/g	Etilbencen o mg/g	m y p Xileno mg/g	o- Xileno mg/g
gc7eVR287	ND	0.025	ND	0.036	0.029
gc7fVR291	ND	0.039	ND	0.028	0.026

En la tabla 14, se reporta la identificación de las muestras positivas y la concentración obtenida para cada compuesto en el sitio identificado como RR4.

Tabla 14. BTEX en suelo (RR4)

Muestra	Benceno mg/g	Tolueno mg/g	Etilbencen o mg/g	m y p Xileno mg/g	o- Xileno mg/g
rr4aVR128	ND	ND	ND	0.032	0.025
rr4bVR137	ND	0.015	MLD	0.026	0.026
rr4eVR165	ND	MLD	0.028	0.027	0.037

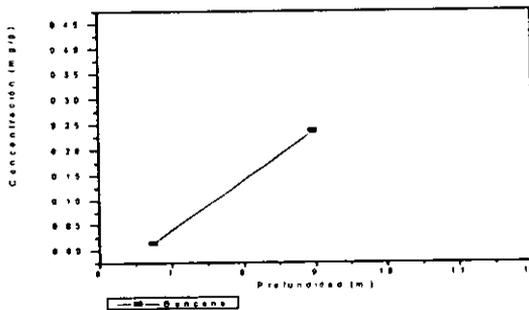
## 4.2 Análisis de Resultados

En las muestras de los sitios GC1, RR6 y SC no se detectaron compuestos que rebasaran el límite de detección. Pero en cambio si se observo la presencia de los compuestos de interés (BTEX) en las muestras de los sitios identificados como GC2, GC7, y RR4 hasta profundidades de 11.54 m.

En el sitio GC2 se observo que la profundidad con mayor número de muestras positivas fue la comprendida entre los 6 y los 11.54 m. En las siguientes gráficas se presenta el comportamiento individual para cada compuesto.

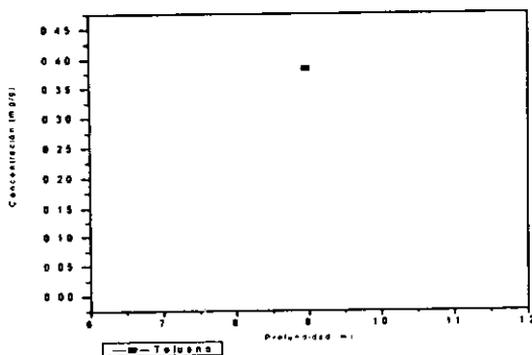
En la gráfica 7, se observa la profundidad y la concentración de las muestras positivas con Benceno 0.0136 mg/g a 6.74 m y 0.236 mg/g a 8.97 m.

Gráfica 7. Benceno en GC2



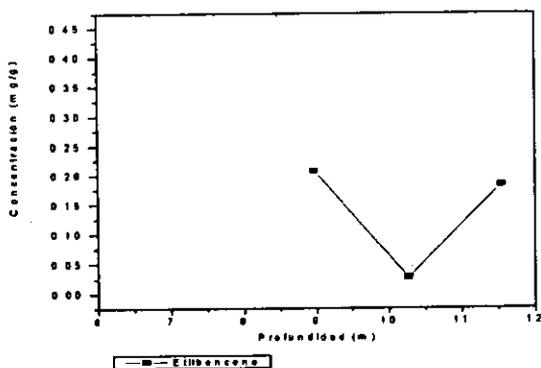
En la gráfica 8, se observa la profundidad y la concentración de la muestra positiva con Tolueno 0.383 mg/g a 8.97 m.

Gráfica 8. Tolueno en GC2



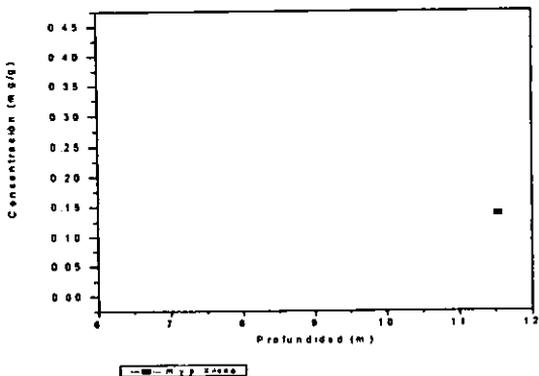
En la gráfica 9, se observa la profundidad y la concentración de las muestras positivas con Etilbenceno 0.206 mg/g a 8.97m, 0.026 mg/g a 10.27 m y 0.182 mg/g a 11.54 m.

Gráfica 9. Etilbenceno en GC2



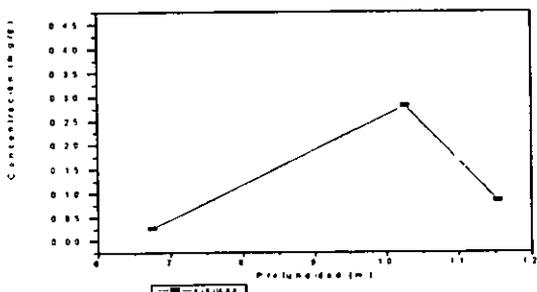
En la gráfica 10, se observa la profundidad y la concentración de la muestra positiva con m y p-Xileno 0.136 mg/g a 11.54 m.

Gráfica 10. m y p Xileno en GC2



En la gráfica 11, se observa la profundidad y la concentración de las muestras positivas con o-Xileno 0.206 mg/g a 6.74 m, 0.028 mg/g a 10.27 m y 0.083 mg/g a 11.54 m.

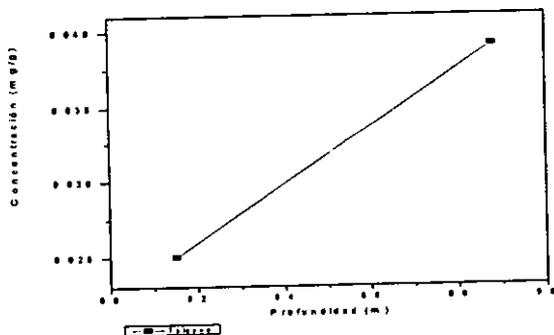
Gráfica 11. o Xileno en GC2



En el sitio GC7 se observo que la profundidad con mayor número de muestras positivas fue la comprendida entre los 8 y los 9 m. En las siguientes gráficas se presenta el comportamiento individual para cada compuesto.

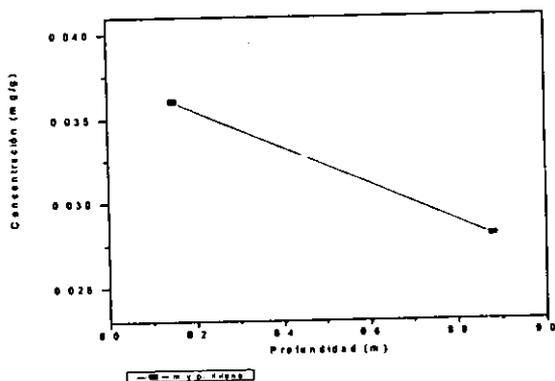
En la gráfica 12, se observa la profundidad y la concentración de las muestras positivas con Tolueno 0.025 mg/g a 8.15 m y 0.039 mg/g a 8.88 m.

Gráfica 12. Tolueno en GC7



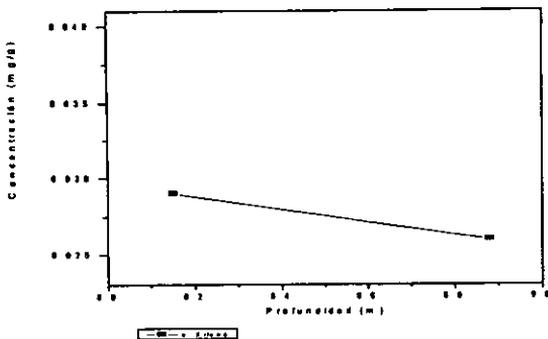
En la gráfica 13, se observa la profundidad y la concentración de las muestras positivas con m y p -Xileno 0.036 mg/g a 8.15 m y 0.028 mg/g a 8.88 m.

Gráfica 13. m y p Xileno en GC7



En la gráfica 14, se observa la profundidad y la concentración de las muestras positivas con o-Xileno 0.029 mg/g a 8.15 m y 0.026 mg/g a 8.88 m.

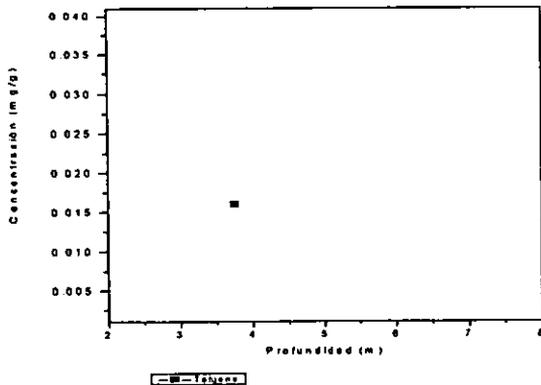
Gráfica 14. o Xileno en GC7



En el sitio RR4 se observó que la profundidad con mayor número de muestras positivas fue la comprendida entre los 2 y los 8 m. En las siguientes gráficas se presenta el comportamiento individual para cada compuesto.

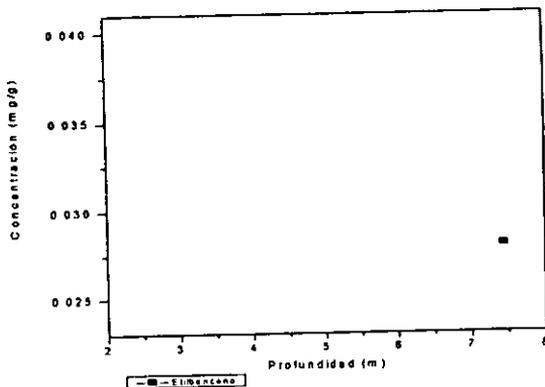
En la gráfica 15, se observa la profundidad y la concentración de la muestra positiva con Tolueno 0.0159 mg/g a 3.75 m.

Gráfica 15. Tolueno en RR4



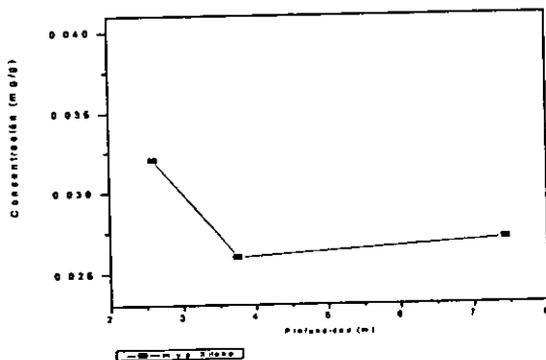
En la gráfica 16, se observa la profundidad y la concentración de la muestra positiva con Etilbenceno 0.028 mg/g a 7.44 m.

Gráfica 16. Etilbenceno en RR4



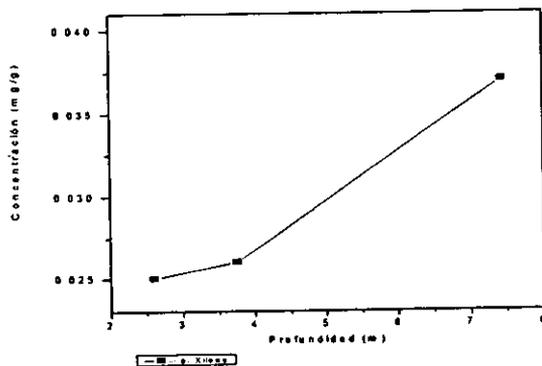
En la gráfica 17, se observa la profundidad y la concentración de la muestra positiva con m y p-Xileno 0.032 mg/g a 2.6 m, 0.026 mg/g a 3.75 m y 0.027 mg/g a 7.44 m.

Gráfica 17. m y p Xileno en RR4



En la gráfica 18, se observa la profundidad y la concentración de las muestras positivas con o-Xileno 0.025 mg/kg a 2.6 m, 0.026 mg/g a 3.75 m y 0.037 mg/g a 7.44m.

Gráfica 18. o Xileno en RR4





A pesar de no encontrar BTEX en los análisis de agua intersticial se puede suponer que puede servir como un medio de transporte para estos contaminantes hacia el subsuelo y probablemente hacia el acuífero; ya que en los análisis realizados se encontró evidencia de estos compuestos en suelo a profundidades de hasta 11.54m, por esta razón el abastecimiento de agua subterránea de buena calidad puede verse afectado por estos compuestos.

### **Recomendaciones**

- En este caso para evitar que estos compuestos (BTEX) se infiltren hacia el subsuelo, los canales debieran ser revestidos y entubados para evitar la exposición a los seres vivos.
- Proponer a las autoridades correspondientes la revisión y mejora de la redacción y contenido de las normas que se aplican en nuestro país en el sentido de disposición de residuos peligrosos y calidad de agua y suelo.
- La contaminación puede ser controlada desde su fuente generadora así que lo mejor es la prevención. Por lo que debiera establecerse para cada una de las industrias un programa de mejora continua, el cual establezca las modificaciones que deben realizarse al proceso de tal manera que se reduzca o elimine el deterioro ambiental que causan; ya sea optimizándolos, minimizando los residuos que producen o por medio de una innovación tecnológica.
- Para resolver problemas que ya se tienen, existe la aplicación de la biotecnología en el área ambiental. La bioremediación es la recuperación de suelos contaminados con algún tipo de sustancias que son difíciles de degradar en condiciones naturales. Los productos generados durante la bioremediación son menores en volumen y con la ventaja de que pueden ser más fácilmente biodegradados por los microorganismos que se encuentran naturalmente en el ambiente. Por otro lado los productos obtenidos son inocuos y en algunas ocasiones hasta se pueden volver a utilizar en la industria o la agricultura, como es el caso de la producción de composta a partir de los residuos orgánicos municipales.

**ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

## BIBLIOGRAFÍA

- Alberro, J.; Hernández, R., 1990. "El Suelo de la Cuenca del Valle de México y su Relación con la Ingeniería de las Cimentaciones a Cinco Años del Sismo"; Ovando, E.; González, F., Eds., Sociedad Mexicana de Suelos, A. C. México. pp. 95-108.
- Atlas, Ronald, M., 1981. "Microbial Degradation of Petroleum Hydrocarbons" an Environmental Perspective. *Microbiological Reviews*, 45, 1: 180-209.
- Cabrera, G., 1990. "Problemas de la Cuenca de México"; Kumate, J.; Mazari, M., Ed. El colegio Nacional. México. pp 31-60
- Escolero, O., 1993. "Panorámica del agua subterránea en México." En *El agua , recurso vital*, Universidad Tecnológica Mixteca: Oaxaca, México.
- Ezcurra, E. and Mazari, M., 1996." A Cautionary tale from México City". *Environmental Geochemistry*. 38,1:95-108.
- Cartwright, N. A., 1991. "Evaluation of contaminated soil remediation technologies at petroleum refineries". At the 1991 National Petroleum Refiners Association, Annual Meeting, March, 17-19 Convention Center, San Antonio Texas.
- Cherry, J. A., 1989. "Hidrogeologic Contaminant Behaviour in Fractured and Unfractured Clayey Deposits in Canada." En *Proceeding International Symposium on Contaminant Transport in Groundwater*, Stuttgart, Alemania.
- Cherry, J. A., Feenstra S., Kueper B.H. y McWhorter D.W., 1990. "Status of in Situ Technologies for Cleanup of acuífers Contaminated with DNAPLS below the Water Table", International Specialty Conference of How Clean is Clean?, Cleanup Criteria for contaminated soil and Groundwater, Air and Waste Management Association, E.U. November.
- Comisión Estatal de Agua y Saneamiento., 1993. "Plan Maestro de Agua Potable", Alcantarillado y Saneamiento del Estado de México 1994-2000 Tomo 2.
- Departamento del Distrito Federal., 1969. "Interceptores Profundos y el Emisor Central. Un Nuevo Sistema para el Distrito Federal". Secretaría General de Obras Públicas. México D.F.

National Research Council., 1993. "Ground Water Vulnerability Assessment": Contamination Potential Under Conditions of Uncertainty. National Academy Press, Washington D.C.

Organization Panamericana De la Salud., 1990. "Health Statistics in the Americas". PAHO Scientific Publication. 524,1:598 Y, Washinton, D.C.

Ortega, A., Farvolden., 1989. R. N. J. Hidrology .110, pp 271-294

Paterson,R.J. S.K. Frape, L.S. Dykes, and R.A. McLeod., 1978. "A coring and squeezing technique for detailed study of subsurface water chemistry" Canadian Journal of Earth Sciences 15:162-169.

Ramírez, S. C., 1990. "El agua en la cuenca de México". En Problemas de la Cuenca de México. Ed. El colegio Nacional. México. pp 61-80

Rudolph, D. L.; Cherry, J. A.; Farvolden, R. N., 1991. Water Resour. Res. 27,9: 2187-2201.

Saval S. B. 1995. "Remediación y Restauración", PEMEX, Ambiente y Energía. México. pp 151-189

Testa, M. S., 1994. "Geological Aspects of Hazardous Waste" Management Lewis Publishers USA.

Thomas, R. D., 1990. "Evaluation of Toxicity of volatile Organic Chemical, General considerations", En significance and Treatment of Volatile Organic Compounds in Water Supplies, Eds. Lewis Publishing Inc. Michigan, E. U. pp 451-463.

Tölgyessy, J., 1993. "Chemistry and Biology of Water", Air and Soil Environmental Aspects. Elsevier. Czechoslovakia.

Valverde, C. y Aguilar, A. G., 1987. "Localización Geográfica de la ciudad de México". En Atlas de la ciudad de México. Departamento del Distrito Federal y el Colegio de México. Departamento de publicaciones de el Colegio de México. México. pp 9-38

Walter, J., 1987. "Analitical Gas Chromatography". Academic Press. Inc San Diego California pp 40-58