



---

# METODOLOGÍA PARA SANEAMIENTO DE ACUÍFEROS PROFUNDOS POR DERRAME DE HIDROCARBUROS

Alfonso Alvarez-Manilla Aceves  
Guadalupe E. Itandehui Martínez Peña  
Miguel Antonio Flores Puente  
Paul Garnica Anguas

Publicación Técnica No. 196  
Sanfandila, Qro, 2002



---

---

**SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES**  
**INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE**

**Metodología para saneamiento de acuíferos  
profundos por derrame de hidrocarburos**

**Publicación Técnica No. 196**  
**Sanfandila, Qro, 2002**



# Presentación

---

En la División Laboratorios de la Coordinación de Infraestructura, las áreas de Geotécnia Ambiental y Medio Ambiente han desarrollado una sencilla técnica para realizar la remediación de acuíferos profundos que han sido contaminados por derrames de hidrocarburos.

El Documento fue elaborado para el Instituto Mexicano del Transporte por los investigadores Alfonso Alvarez Manilla Aceves, Guadalupe Evangelina Itandehui Martínez Peña y Miguel Antonio Flores Puente.

Se cuenta con varias imágenes proporcionadas amablemente por Petróleos Mexicanos y Aeropuertos y Servicios Auxiliares.

---



# Índice

---

Índice de figuras.	III
Lista de símbolos.	V
Resumen.	VII
Abstract.	IX
Resumen ejecutivo.	XI
Introducción.	1
<b>CAPÍTULO 1      Generalidades, antecedentes y objetivos.</b>	<b>3</b>
1.1      Generalidades.	3
1.2      Antecedentes y conceptos generales.	3
1.3      Objetivo.	4
<b>CAPÍTULO 2      Características fisicoquímicas del medio y de los compuestos orgánicos.</b>	<b>5</b>
2.1      Dispersión de contaminantes en suelos y acuíferos.	5
2.2      Propiedades fisicoquímicos de los compuestos orgánicos.	8
2.2.1      Presión de vapor.	8
2.2.2      Solubilidad.	8
2.2.3      Concentración.	8

2.2.4	Densidad.	9
2.3	Propiedades de las zonas vadosa y saturada.	9
2.3.1	Espesor de la zona vadosa.	9
2.3.2	Retención.	9
2.4	Las poblaciones de microbios y bacterias, su influencia.	10
2.5	Expresiones sencillas para los cálculos de volumen, ascensión capilar, espesor de hidrocarburos y extensión de la pluma de contaminación.	12
<b>CAPÍTULO 3</b>	<b>Metodología para el saneamiento de acuíferos profundos.</b>	<b>15</b>
3.1	Metodología propuesta para sanear acuíferos profundos.	16
<b>CAPÍTULO 4</b>	<b>Caso de aplicación y comprobación de la teoría.</b>	<b>19</b>
	Conclusiones y recomendaciones.	31
	Bibliografía.	35

## Índice de figuras

---

<b>Figura 2.1</b>	Modelo conceptual de un derrame, procesos de migración y dispersión en el suelo y la atmósfera.	6
<b>Figura 2.2</b>	Distinción de las regiones del ambiente REDOX (Reducción-Oxidación) en el entorno de un pozo.	7
<b>Figura 2.3</b>	Esquema para el cálculo de la longitud de la pluma de los hidrocarburos flotando sobre el agua bajo un gradiente hidrodinámico.	14
<b>Figura 4.1</b>	Fuga de gasolina en la fractura de una tubería por cambios volumétricos del suelo al variar el contenido de agua (expansión-contracción).	19
<b>Figura 4.2</b>	Imágenes importantes del video del pozo de agua profundo.	20
<b>Figura 4.3</b>	Ambiente REDOX en la vecindad de un pozo de extracción.	21
<b>Figura 4.4</b>	Espectro resultante de los análisis BETEX, agua de pozo.	22
<b>Figura 4.5</b>	Perforación y medición de la concentración de hidrocarburos volátiles y explosividad.	22
<b>Figura 4.6</b>	Configuración de la concentración de hidrocarburos volátiles, ppm.	23
<b>Figura 4.7</b>	Configuración de la explosividad en %, LEL.	23

<b>Figura 4.8</b>	Vista del equipo para la prueba de aforo; determinando el tiempo de abatimiento y recuperación del tirante de gasolina.	24
<b>Figura 4.9</b>	Columna geológica, registros geofísicos e imágenes de las rocas.	25
<b>Figura 4.10</b>	Tubos y coples enroscados para evitar chispas en la boca del pozo que activen una explosión.	26
<b>Figura 4.11</b>	Pozo de extracción con la bomba de bajo gasto instalada.	26
<b>Figura 4.12</b>	Cromatografía de gases (BETEX) para el agua del acuífero ya saneado.	27
<b>Figura 4.13</b>	Imágenes del pozo mostrando el estado del acuífero antes y después de su limpieza.	28

## Lista de símbolos

---

SÍMBOLO	SIGNIFICADO
$A_g$	Área de la superficie del agua en la que flota el HC.
$g$	Aceleración de la gravedad.
$h_o$	Zona de saturación por capilaridad.
$m$	Gradiente hidrodinámico.
$n$	Porosidad.
$r_p$	Radio del poro.
$r_t$	Radio de la tortuosidad.
$S_o$	Fracción del coeficiente de almacenamiento.
$t_{hc}$	Cálculo del espesor verdadero.
$T_s$	Tensión interfacial entre el hidrocarburo y el agua.
$V_o$	Volumen del derrame.
$V_s$	Volumen de suelo.
$Z_c$	Altura de la ascensión capilar del hidrocarburo.
$\theta$	Ángulo entre la horizontal y la pendiente de flujo.
$\gamma_{hc}$	Peso específico del hidrocarburo en cuestión.
$\gamma_w$	Peso específico del agua.
$\lambda$	Longitud de la pluma.



## Resumen

---

Dependiendo de la porosidad y fracturas de los materiales geológicos los derrames y fugas de hidrocarburos provenientes de la corrosión o ruptura de los tanques y tuberías llegan a contaminar los acuíferos profundos.

Los especialistas en remediación, tanto de EUA como de Canadá, invierten grandes sumas de dinero en sanear acuíferos someros (profundidades menores a 10 metros) mediante la técnica de biorremediación.

Hasta la fecha no había sido desarrollada una técnica para limpiar acuíferos profundos por derrame de hidrocarburos; en este trabajo de investigación aplicada se presenta una muy simple, la cual consiste en extraer con bombas de bajo gasto toda la gasolina posible hasta dejar una película delgada de hidrocarburos, posteriormente se agitará para oxigenarla permitiendo el desarrollo de organismos autótrofos que se alimentarán de los hidrocarburos y después entre ellos mismos dejando limpio el acuífero tal y como lo demuestran los espectros de análisis BETEX antes y después del saneamiento.

Con esta técnica de bajo costo, los acuíferos profundos se pueden sanear sin necesidad de extraer grandes volúmenes de agua, basta recordar que un litro de gasolina contamina un metro cúbico de agua.



## **Abstract**

---

Many of the storage tanks and conduction pipes related to petroleum by product have contaminated deep aquifers and no special technique had been developed for treating.

Shallow aquifers and soils contaminated by hydrocarbons are easily remediated astride opening trench enforcement autotrophos and heterotrophos microbial techniques.

Deducting a simplified technique after many process of observation and verification, the methodology for treating deep contaminated aquifer by hydrocarbons is: measurement of the plume of contamination, known the thickness of the gasoline, diesel or oil, hydraulic properties of the geological material, pumping just low rates of hydrocarbons, grow up the bacteria using the hydrocarbons compounds and washing the aquifer employing Chloride and agitating the aquifer formation.

The proposal technique is cheap, it is not necessary pump many cubic meters of groundwater to clean up a few liters of gasoline and the final remediation is using the thin skin of gasoline floating on the water table.



## Resumen Ejecutivo

---

Los hidrocarburos se utilizan para generar la energía que impulsa diferentes motores y también como fluidos de limpieza en estaciones de ferrocarril, autobuses, puertos y aeropuertos. Estos se almacenan en tanques y se mandan a diferentes destinos mediante líneas de conducción y autotanques.

De manera accidental o deliberada, los hidrocarburos pueden llegar al suelo, subsuelo y acuífero. Estos hidrocarburos pueden migrar hasta los campos donde los pozos de agua bombean para satisfacer el consumo humano, por lo que los derrames se erigen como un peligro potencial para la salud.

Existe una gran variedad de técnicas probadas para el saneamiento de acuíferos y suelos someros contaminados por hidrocarburos o compuestos orgánicos que van desde la extracción directa, construyendo trincheras o por biorremediación.

En algunas de las cuencas de nuestro país donde existe una gran actividad agrícola, industrial y urbana los acuíferos son profundos, cuyos niveles de agua varían entre 30 metros y 150 metros de profundidad. Tales acuíferos se encuentran en los valles de la Faja Volcánica Transmexicana entre los que se encuentran: Puebla, Celaya, León, Pachuca, Querétaro, Irapuato, y otros como el de Aguascalientes.

Cuando los suelos son arenosos, limosos o una combinación de ellos, los derrames de hidrocarburos llegan directamente al acuífero.

Con el entendimiento de la teoría de flujo no saturado, procesos tanto de transporte como químicos, se desarrolló una técnica sencilla para sanear los acuíferos profundos contaminados por hidrocarburos.

Lo más importante es que con esta técnica no es necesario bombear agua e hidrocarburos a la superficie para desasociarlos por algún método, sino que se extrae con una bomba de bajo gasto el mayor volumen de hidrocarburo posible a través de los pozos que sean necesarios.

Cuando queda una delgada capa de compuestos orgánicos en la sima del acuífero se erradican aireando al fomentar el crecimiento de poblaciones de bacterias y microbios que se alimentan de hidrocarburos y, una vez desaparecido el compuesto orgánico, se consumen entre ellos.

Después, tendrá que hacerse una investigación posterior para comprobar que la contaminación residual por hidrocarburos en la zona vadosa pueda removerse o dejarla fija.

Se adoptan los conceptos fisicoquímicos de trabajos en otros países y se desarrolla la teoría propia para las condiciones del País.

Se considera este trabajo una contribución tecnológica importante para el saneamiento de los acuíferos profundos como los que se tienen en los Estados Unidos Mexicanos.

# Introducción

---

Los derrames de hidrocarburos ocasionan impactos negativos a los ecosistemas enteros, además, representan importantes pérdidas económicas y son un peligro potencial para la salud.

La distribución de los productos derivados del petróleo se realiza en un 70% a través de la red de ductos que recorre gran parte del territorio nacional y que comunica a las diferentes estaciones y subestaciones de distribución y venta con las refinerías y plantas petroquímicas del país. El 30% restante se transporta por medio de autotanques. Los productos transportados, ya sea por ductos o autotanques son: productos de gasolina, diesel, combustóleo, turbocina y keroseno.

Existen tres formas en que suceden los derrames: la primera corresponde a aquellos producidos por los accidentes carreteros o ferroviarios; la segunda a las fugas en los tanques de almacenamiento o líneas de conducción y la tercera forma obedece a aquellos sitios donde de manera deliberada se construyen tomas clandestinas en ductos y que en la mayoría de los casos quedan fuera de control produciendo el derrame.

Dependiendo de los procesos de transporte de los contaminantes, asociados a las propiedades hidráulicas de las rocas del medio, los derrames pueden alcanzar en un tiempo determinado el nivel de las aguas subterráneas, produciendo la contaminación.

Estos impactos ambientales pueden generar que hábitats completos se afecten de forma importante y que su recuperación se realice en periodos de tiempo extremadamente largos, ya que la degradación de forma natural de la más simple de estas sustancias, sucede en teoría, en varias decenas de años después.

Los componentes de estos combustibles como el Benceno, Tolueno y Xileno tienen la característica química de la "aromaticidad" y la peculiaridad de ser "cancerígenos" para los humanos y los animales. El cuerpo humano no los puede degradar, pero tampoco desechar, de modo que son absorbidas por algún tejido provocando la mutación de sus células y dando como resultado diferentes tipos de cáncer.

Por estas razones este proyecto de investigación se efectuó para encontrar una metodología sencilla, económica y rápida para evitar el deterioro de la calidad de vida en la población.



## Generalidades, antecedentes y objetivos.

### 1.1 Generalidades.

De la masa total de la Tierra ( $5.98 \times 10^{24}$  kg), aproximadamente el 7% es agua que se encuentra en la atmósfera, corteza y océanos. El 97% de ese volumen se encuentra como agua salada en el mar, el 2.3% corresponde al agua que forma los hielos en las zonas polares y el 0.7% es el agua de los ríos, lagos y "acuíferos", estos últimos recursos hídricos no se encuentran distribuidos de manera uniforme en el planeta.

Por naturaleza, los geomateriales y fluidos se combinan en el subsuelo en forma de tres fases principales: Fase sólida (granos del suelo o líticos de la roca); Fase líquida (agua) y la Fase gaseosa. Este trabajo de investigación se ocupa exclusivamente del agua y de los geomateriales.

### 1.2 Antecedentes y conceptos generales.

Según la distribución del agua en el subsuelo, aparecen dos zonas: la saturada por debajo del nivel estático y la vadosa; en el contacto de ellas se forma la franja capilar por donde asciende el agua por diferencia de presión.

La Zona saturada se encuentra por debajo del nivel estático, los poros y las tortuosidades están completamente llenos de agua. En la Zona Vadosa, el agua se encuentra a tensión negativa, se le denomina zona de aireación y su potencial está regulado por la succión, la cual puede ser mátrica, osmótica, turgencia, etc..

El 0.7% del agua disponible se ve afectado por las actividades del hombre; remarcando que los recursos hídricos más vulnerables son los superficiales por estar en contacto directo con el medio. El agua subterránea experimenta peligros potenciales transitorios de acuerdo a las características hidráulicas de los materiales geológicos, la profundidad a la que se encuentran los acuíferos y la cercanía a los centros donde se desarrollan actividades industriales, agrícolas, antropogénicas y de infraestructura del transporte.

Una gran variedad y cantidad de compuestos orgánicos (derivados del petróleo) e inorgánicos (fluidos mineros e industriales) son fuente de peligros potenciales para la salud cuando, de manera accidental o deliberada, migran hasta donde se encuentra el acuífero cuando éste es la fuente principal de suministro de agua para una población.

Los compuestos, que de manera deliberada, entran al subsuelo son los fertilizantes y pesticidas los cuales aparecen en el agua subterránea en diferentes estados químicos.

Los compuestos orgánicos viajan en el subsuelo, ya sea por derrames accidentales o fugas en líneas de conducción y tanques de almacenamiento.

### **1.3 Objetivo.**

Las técnicas para el saneamiento de acuíferos someros y suelos están ampliamente probadas, pero ***¿qué pasa en aquellas zonas donde el acuífero se encuentra a profundidades mayores a cien metros y estas técnicas de remediación se ven totalmente limitadas?*** Los objetivos del trabajo de investigación fueron desarrollar la teoría para limpiar acuíferos profundos y los geomateriales, así como aplicarla en un caso práctico para determinar su bondad.

Este trabajo de investigación presenta la “**metodología para limpiar acuíferos profundos por derrame de hidrocarburos**” con un caso de aplicación y comprobación en los tanques de almacenamiento de un aeropuerto del país.

# Características fisicoquímicas del medio y de los compuestos orgánicos.

### 2.1 Dispersión de contaminantes en suelos y acuíferos.

Una vez que ha ocurrido un derrame de contaminantes en el suelo, los fenómenos de capilaridad y gravedad los conducen hacia las aguas subterráneas, por ello, se hace necesario entender la forma del transporte.

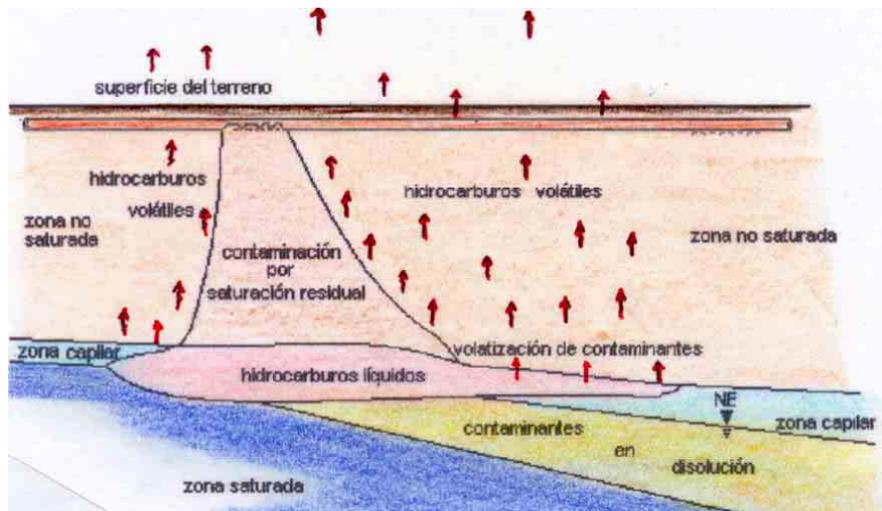
En términos generales, el comportamiento de los contaminantes está en función de sus características fisicoquímicas en las que se incluyen principalmente densidad, solubilidad, viscosidad, además de las características del medio que los rodea como son: el tipo de suelo, adsorción, permeabilidad, tamaño de las partículas, contenido de humedad y de materia orgánica, succión, profundidad del nivel del agua entre otros.

Los factores climatológicos como la temperatura y las precipitaciones pluviales también tienen influencia; todos los fenómenos fisico-químicos definen el tamaño y distribución de la pluma de contaminación en una zona.

De acuerdo a su densidad, los compuestos orgánicos se clasifican en dos grupos: aquellos cuya densidad es menor a la del agua se denominan ligeros; mientras que a los que poseen una densidad mayor a la del agua se les conoce como densos.

La densidad determina los procesos de transporte en el acuífero, por ejemplo: los ligeros tienden a formar una capa en forma de nata en el nivel freático y se mueven horizontalmente en la dirección del flujo del agua subterránea, tal y como lo hacen las gasolinas, aceites y el petróleo crudo; en cambio los densos migran hacia la base del acuífero creando una columna a partir de la cual pueden viajar en la dirección del flujo de agua subterránea contaminando el acuífero, sus representantes son los Bifenilos Policlorados.

Para formarse el modelo conceptual de un derrame, su migración y dispersión; se hace el análisis del esquema que aparece en la figura 2.1.



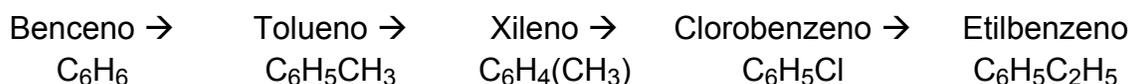
**Figura 2.1 Modelo Conceptual de un derrame, procesos de migración y dispersión en el suelo y la atmósfera.**

Suponiendo que una tubería de conducción de gasolina sufrió corrosión debido a la presencia de sulfatos en el sitio donde estaba alojada, a través del tiempo se da la fuga y los hidrocarburos migran verticalmente por efecto de la gravedad hasta el nivel estático.

Existe la zona de agua capilar donde el hidrocarburo, por diferencia de densidad y su incapacidad para desalojar el agua intersticial, da origen a los procesos de dispersión y difusión; la mayor parte de los hidrocarburos se acumulan directamente sobre el nivel del agua y bajo la fuga, extendiendo una pequeña cuña hacia la zona de menor gradiente hidráulico y viceversa.

Un pequeño volumen de contaminantes viaja disuelto en el agua a través de la zona vadosa y por debajo de la fuga queda un volumen de geomateriales con la denominada "contaminación residual", que se define como aquella sustancia que queda adherida a los granos de suelo de manera estable y que no puede ser removida por ningún procedimiento físico o químico.

Los hidrocarburos, cualesquiera que sean, comienzan a experimentar transformaciones químicas en sus cadenas por los procesos de oxidación (oxigenación) y reducción (hidrogenación). El proceso de reducción produce hidrocarburos aromáticos de la forma:



El ambiente REDOX se aprecia en la figura 2.2, en la que dos importantes regiones se generan: la Zona Óxica y la Zona Anóxica.

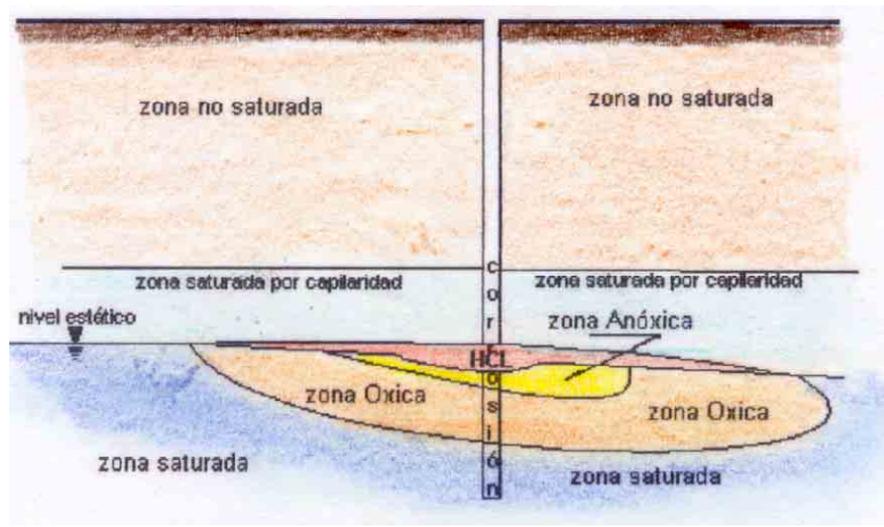


Figura 2.2 Distinción de las regiones del ambiente REDOX (Reducción-Oxidación) en el entorno de un pozo.

La Zona Óxica se divide en dos porciones: “contra” y “hacia” el gradiente hidráulico del nivel del agua. En la primera se produce Bióxido de Carbono como resultado de las actividades metabólicas de respiración de los microorganismos presentes, disolución de carbonatos y Aluminosilicatos; en la segunda porción aparece la precipitación de Carbonatos, Silicatos y Óxido de Hierro.

En la Zona Anóxica existe la disolución del cuarzo, movilización del Hierro y Manganeseo, así como el blanqueamiento por precipitación de carbonatos.

En función de las observaciones de campo a través de cámaras de televisión submarina se ha podido evaluar el comportamiento transitorio de los hidrocarburos, los productos finales por transformación química de los hidrocarburos, las interacciones químicas entre el suelo-agua-hidrocarburo, la evolución de las poblaciones de microorganismos, etc.

Conforme viaja el hidrocarburo a través de una región desplaza el aire pero no el agua, dejando una contaminación residual (figura 2.1) por debajo del núcleo del derrame; el porcentaje del hidrocarburo que permanece inmóvil varía entre 7% y 20% dependiendo de la naturaleza química del medio.

Si la cantidad de hidrocarburo derramada en el suelo es menor a la requerida para llenar los espacios de los poros, juntas o fracturas interconectadas, entonces el compuesto nunca llegará al nivel estático permaneciendo como un volumen colgante arriba del techo del acuífero.

## **2.2 Propiedades fisicoquímicas de los compuestos orgánicos.**

A continuación se hace una breve descripción de las propiedades fisicoquímicas que deben estudiarse para dar seguimiento a un derrame o fuga desde su aparición hasta el final de la etapa de saneamiento.

### **2.2.1 Presión de vapor.**

Es un compuesto orgánico con alta presión de vapor que se presenta en los poros, fracturas y juntas en algún grado de fase de vapor, por ello, los combustibles volátiles como las gasolinas se evaporan rápidamente formando una envolvente de vapores de hidrocarburos justamente sobre el núcleo del derrame y sobre la traza en la dirección de su movimiento. Esta condición se aprovecha para hacer el mapeo desde la superficie de la forma de un derrame y del peligro potencial a través de las mediciones de hidrocarburos volátiles "HCV" en partes por millón y el grado de explosividad en porcentaje, unidades LEL (Lower Explosión Limit).

### **2.2.2 Solubilidad.**

La solubilidad de una sustancia se define como la máxima cantidad de esa sustancia que se puede disolver en un solvente dado, generalmente la solubilidad de las diferentes sustancias se refiere en agua, aunque existen tablas de solubilidades en diferentes solventes orgánicos e inorgánicos. Determina también la razón de cambio a la cual un hidrocarburo se puede mover en la zona vadosa según los valores de "succión".

En los experimentos realizados en 1984 por Pfannkuch muestran que los derrames de hidrocarburos con diferentes solubilidades se disolverán diferencialmente produciendo de manera simultánea un efecto de envejecimiento y lixiviado en el derrame

### **2.2.3 Concentración.**

La concentración de una solución se refiere a la cantidad de una sustancia dada que se encuentra disuelta en un volumen específico de solvente, generalmente se representa en unidades de partes por millón para el caso de contaminantes en suelo o agua. La concentración de un hidrocarburo constituye el mecanismo más relevante para el transporte de los vapores de hidrocarburos desde el derrame flotando sobre el nivel estático hasta la superficie de la tierra. Se forman gradientes en las direcciones principales: x, y, z.

### **2.2.4 Densidad.**

La densidad de una sustancia es la relación intrínseca que existe entre su masa y su volumen, la densidad se expresa en unidades de gramo sobre mililitro o libras sobre galón, para el caso de la gasolina su densidad es de 0.913-0.101 gr/mililitro (5.7-6.3 lb/gal). La densidad del hidrocarburo y la solubilidad del agua son las características más importantes que determinan la forma de la migración del contaminante en el acuífero. De ello depende la miscibilidad, flotación, transporte y radio de acción

### **2.3 Propiedades de las zonas vadosa y saturada.**

Las propiedades fisicoquímicas del medio son importantes para todos los procesos químicos que se llevan a cabo, así como para la velocidad del transporte, evaporación, etc. El aire presente en los poros, el contenido natural de agua, el tipo y cantidad de materia orgánica, la textura del suelo, forma y espacio de los poros, temperatura en el subsuelo, variaciones del nivel estático, dirección del flujo del agua subterránea, columna estratigráfica, posición dentro de ella de los estratos permeables, semipermeables e impermeables son entre otras, las propiedades más relevantes para estudiar el medio.

Los siguientes parámetros se mencionan por separado debido a su importancia.

#### **2.3.1 Espesor de la zona vadosa.**

La extensión de la pluma de contaminación de un hidrocarburo es mayor cuando el nivel estático se encuentra cerca de la superficie, esto es que la capa de la zona vadosa es delgada; el volumen de adsorción disminuye y la retención decrece. Un inconveniente de las zonas vadosas espesa se da por el tiempo que tardan en llegar los vapores de hidrocarburos a la superficie procedentes de niveles estáticos muy profundos y su concentración puede estar por debajo del nivel límite de los aparatos de medición.

#### **2.3.2 Retención.**

Dependiendo de la solubilidad de los hidrocarburos, textura del suelo y granulometría, un cierto porcentaje del hidrocarburo será “retenido”, tanto en los poros como en los granos del suelo por humectación. McKee (1972), Iniestra G., S. y Velázquez M., A. (1998) muestran que la retención varía entre 7% y 20% según las pruebas realizadas en modelos a escala con diferentes suelos y compuestos orgánicos.

### **2.4 Las poblaciones de microbios y bacterias, su influencia.**

Durante décadas los procesos biológicos se han empleado para el “*composteo*” y tratamiento de aguas residuales de origen municipal e industrial. En los últimos años el uso de agentes biológicos para el tratamiento de desechos se ha incrementado, ya que puede ser utilizado en diferentes ambientes.

Este tipo de procesos biológicos por sí solos o combinados con otro tipo de tecnologías se comparan favorablemente con los de corte físico o químico tanto en costos como en la eficiencia de la transformación química de los residuos o contaminantes al llevarse a cabo de una forma más completa.

El costo de la biorremediación es generalmente mucho menor que los métodos de confinamiento de residuos. Por ejemplo: la limpieza mediante biorremediación de una laguna contaminada cerca de Houston Texas fue estimada en cerca de 50 millones de dólares, comparada con 120 millones de dólares que costaría por incineración.

En las zonas donde se encuentran los acuíferos someros formados por deshielos, cuya profundidad máxima a la superficie del agua llega a ser de 5 metros, como los que se encuentran en los países de EUA y Canadá, a los microbios y bacterias presentes (autótrofos) se les puede desarrollar para ser utilizados en la biorremediación local.

El uso de microorganismos para realizar la limpieza de sitios contaminados, provee una tecnología efectiva y de bajo costo. Esto es cierto en casos cuando solamente se requiere un pequeño ajuste en el medio ambiente afectado, tal como la adición de nutrientes.

Los tratamientos biológicos también ofrecen la posibilidad de completar la transformación del contaminante orgánico; los tratamientos de tipo físico, por ejemplo: la extracción, absorción, solidificación, encapsulamiento y filtración, solamente separan pero no destruye al contaminante.

Los procesos térmicos, tales como la incineración, también destruyen completamente al contaminante o reducen su volumen, pero también producen gases tóxicos y productos volátiles que pueden dirigirse fácilmente hacia la atmósfera causando muchas veces problemas mayores que el original. Del mismo modo, los tratamientos de tipo químico pueden producir reacciones que resultan aún más peligrosas que los efectos iniciales.

La biodegradación de materiales de desechos peligrosos o contaminantes como los hidrocarburos ocurre de manera natural en los sistemas acuáticos; sin embargo, se realizan a velocidades en extremo lentas para ser considerada como una opción de limpieza. La biorremediación se fundamenta en la premisa de que la velocidad natural de degradación de los contaminantes puede acelerarse.

Una biorremediación efectiva requiere de un proceso de caracterización extensivo y adecuado, especialmente para los factores que se sabe afectan el metabolismo microbiano y, como consecuencia, la velocidad de degradación de los contaminantes, tales como: la temperatura, el pH, la actividad potencial microbiana, la toxicidad de los contaminantes hacia los microorganismos, la biodisponibilidad del contaminante, etc.

La presencia de hidrocarburos en los acuíferos profundos genera automáticamente microorganismos de los tipos: heterótrofos y autótrofos; entre otros organismos se encuentran: pseudomonas, acinetobacterias y micrococcus.

Según las reacciones REDOX, los heterótrofos reducen el Oxígeno, Nitrato y Sulfato, así como algunos bicarbonatos, mientras que los autótrofos reducen el Manganeseo, Hierro, Bicarbonatos y Nitrógeno.

Mediante el estudio de los videos de pozos se puede apreciar los nódulos de Manganeseo adheridos al ademe, así como bacterias anaerobias reductoras del Azufre y algunas aerobias como las bacterias del Hierro. En los balances siguientes se presentan algunas reacciones de oxidorreducción representativas:



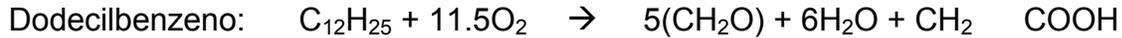
Una de las formas en que las reacciones de reducción y oxidación se manifiestan es con la aparición de una “fem” o fuerzas electromotrices, que son corrientes eléctricas fácilmente mesurables en superficie con la técnica geofísica conocida como “potencial natural” utilizando voltímetros de alta impedancia.

Al registrar los pozos con una cámara de televisión submarina durante un proceso de monitoreo y saneamiento, se puede ver que para que aparezca la población de microbios se requiere de un período promedio de tres semanas, siempre y cuando se den las condiciones apropiadas para su desarrollo como son: pH, temperatura, nutrientes y aireación óptimos.

La aireación es muy importante para que se den los procesos de oxidación y descomposición de los hidrocarburos. De los estudios realizados por Raymond en 1983, se estimó que se requiere un total de 1.6 kg (3.5 libras) de Oxígeno para degradar 0.45 kg (1 libra) de gasolina.

La velocidad a la cual el Oxígeno se esparce a través de la pluma del hidrocarburo controlará la cantidad de descomposición y transformación del hidrocarburo.

A continuación se presentan las reacciones de descomposición de algunos hidrocarburos aromáticos con ayuda de bacterias:



Según datos reportados por Jaimson, et al. 1975, así como Iniestra G., S. y Velásquez M., A. (1998), manifiestan que el benceno, tolueno y xileno, se degradan totalmente por la acción de las colonias de bacterias y microbios. Por esta razón, los compuestos antes mencionados no pueden ser buenos trazadores para monitorear la pluma de contaminación bajo las condiciones antes señaladas.

Las poblaciones de bacterias y microbios encabezan la degradación de hidrocarburo presente en el agua subterránea, así como la fase de vapor alojada en la zona vadosa, el cual puede ser degradado a una velocidad mayor a la que se pueda esparcir hacia la superficie.

***Con esto se puede visualizar que el hidrocarburo presente en acuíferos profundos se puede degradar por la presencia de colonias bacterianas que reciban el nutriente apropiado (compuestos orgánicos y de hidrocarburos), aireación (agitación del agua por medio de equipos de equipos aforo) y condiciones propicias de los potenciales REDOX.***

## **2.5 Expresiones sencillas para los cálculos de volumen, ascensión capilar, espesor de hidrocarburos y extensión de la pluma de contaminación.**

Hobson en 1954 desarrolló una expresión para evaluar la altura ( $Z_c$ ) de la ascensión capilar cuando los hidrocarburos saturan un medio poroso, esta es:

$$Z_c = \frac{T_s \left( \frac{l}{r_t} - \frac{l}{r_p} \right)}{[g (\gamma_w - \gamma_{hc})]} \quad (1)$$

donde:

$T_s$	Tensión interfacial entre el hidrocarburo y el agua
$r_t$	Radio de la tortuosidad
$r_p$	Radio del poro

$g$	Aceleración de la gravedad
$\gamma_w$	Peso específico del agua
$\gamma_{hc}$	Peso específico del hidrocarburo, ya sea gasolina, diesel, petróleo, etc.

Considerando que la tensión superficial máxima se ha desarrollado en el poro, la zona de saturación por capilaridad ( $h_o$ ) desde el nivel estático está dada por la expresión:

$$h_o = \frac{2T_s}{\rho * \gamma_w} \quad (2)$$

El cálculo del espesor verdadero ( $t_{hc}$ ) del producto bajo condiciones hidrostáticas en un medio poroso fue propuesta por Abdul en 1989 y está dada por:

$$t_{hc} = \frac{4(Z_c + h_o)}{100} \quad (3)$$

Debe tenerse en cuenta que este espesor varía considerablemente porque es una cantidad dinámica, además debe considerarse la afectación por las fluctuaciones del nivel estático.

Existe una gran variación de los valores reportados tanto del espesor verdadero calculado como del ascenso capilar debido a que el drenaje de los hidrocarburos por efecto de las fuerzas de cuerpo es un proceso hidrodinámico, el cual varía de muy rápido, durante la etapa temprana del derrame, a lento y en continuo decremento conforme pasa el tiempo.

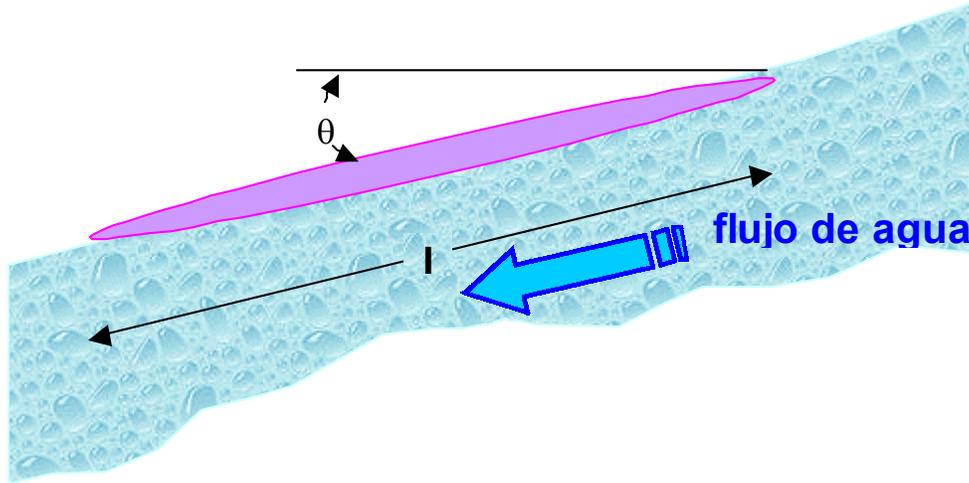
Por la razón anterior los vacíos saturados por hidrocarburos se toman como un parámetro adimensional denominado "fracción del coeficiente de almacenamiento" ( $S_o$ ) que para gasolinas vale 0.10; diesel y similares, 0.15 y para petróleos pesados es de 0.20.

Para saber qué volumen de suelo " $V_s$ " está ocupado por el derrame " $V_o$ " de hidrocarburos en función de la porosidad " $n$ ", Dietz, en 1970, propuso la expresión:

$$V_s = \frac{V_o}{(n * S_o)} \quad (4)$$

Para evaluar el área “ $A_g$ ” de la superficie del agua que abarca de derrame de un volumen de hidrocarburos “ $V_g$ ” de espesor “ $h_o$ ” es:

$$A_g = \frac{V_g}{(n * h_o * S_o)} \quad (5)$$



**Figura 2.3 Esquema para el cálculo de la longitud de la pluma de hidrocarburos flotando sobre el agua bajo un gradiente hidrodinámico.**

Al observar la figura 2.3 se deduce que de acuerdo al gradiente hidrodinámico “ $m$ ”, que afecta a una pluma de hidrocarburos sobre el nivel del agua, la longitud “ $\lambda$ ” de la pluma se calculará por la expresión dada por Tissot B. Y Welte D., 1978 como:

$$\lambda = \frac{2\gamma_{h_h} \left( \frac{l}{r_t} - \frac{l}{r_p} \right)}{[g (\gamma_w - \gamma_{h_c}) * \text{sen } \theta]} \quad (6)$$

El empleo adecuado de estas ecuaciones permite cuantificar el volumen total de hidrocarburos que llegan hasta el manto acuífero, el porcentaje que se queda como contaminación residual, el espesor de la pluma de contaminación y su extensión, datos fundamentales para el procedimiento de extracción y remediación.

### **Metodología para el saneamiento de acuíferos profundos.**

En los siguientes párrafos se explica la “metodología desarrollada” para limpiar los acuíferos profundos cuando el hidrocarburo, debido a un derrame o fuga, se encuentra “flotando” sobre la superficie del agua de un acuífero profundo.

La “metodología” es el resultado de la observación de varios acuíferos profundos de la Faja Volcánica Transmexicana contaminados por derrames y fugas, del planteamiento de la evolución del comportamiento, la presentación de una hipótesis físico-química, nuevamente observación para la constatación de los fenómenos, la propuesta de la teoría y finalmente su verificación

Para la metodología de limpieza de los acuíferos profundos por derrames y fugas de hidrocarburos, se hacen las siguientes consideraciones:

- Los hidrocarburos se consideran inmiscibles.
- Los hidrocarburos flotan sobre el nivel estático.
- Los hidrocarburos se mueven en la dirección del cono de abatimiento, propiciado ya sea por el efecto del bombeo de un pozo o por conjunto de pozos.
- Los hidrocarburos que se quedan como contaminación residual en el medio que sirvió de trayectoria se pueden degradar, evaporar o sufrir ambos efectos.
- Los hidrocarburos son la fuente alimenticia de ciertas poblaciones de bacterias y microbios.
- En el medio, siempre habrá posibilidad de que se desarrollen poblaciones de bacterias autótrofas, heterótrofas y otras.

La hipótesis de la metodología se basa en que:

Los hidrocarburos de un derrame que fluyen hasta el nivel estático: parte de ellos se evapora; otro porcentaje queda como contaminación residual en la zona vadosa y los que alcanzan el nivel del agua tienden a sufrir las transformaciones en aromáticos prescritas anteriormente y un buen volumen de ellos será extraído mediante una bomba de bajo gasto, sin sacar agua del acuífero, pues su manejo se tornaría difícil por el proceso de separación de los hidrocarburos; por lo que el hidrocarburo remanente que flota en el agua y que se encuentra en la zona de mezcla, será removido mediante el fomento al crecimiento de bacterias y microbios por efectos de la aireación dada mediante la agitación en la cámara de bombeo mediante una prueba de aforo. La limpieza final consistirá en un aforo con sus etapas de limpieza y desarrollo, aplicando antes productos bactericidas y surfactantes.

### **3.1 Metodología propuesta para sanear acuíferos profundos.**

En función de la integración e interpretación de la teoría y lo observado en acuíferos contaminados. la metodología propuesta para sanear acuíferos profundos es:

- 1. Determinar el tipo de hidrocarburos.** Ligeros o pesados ya que de ello dependerá su transporte, difusión, dispersión, etc.
- 2. Establecer la columna geológica y los espesores de cada capa.** Ayuda a establecer el potencial de permeabilidad de las unidades geológicas. Para construir la columna geológica se analizan los cortes litológicos de los pozos cercanos y se hacen visitas a los afloramientos de rocas para poder observar la existencia de grietas, juntas, tortuosidades y poros.

Esto permite tener el tipo de estructuras geológicas que se encuentran en el subsuelo, así como las posibles barreras que enfrentará el hidrocarburo.

- 3. Ubicar en la columna geológica posición y espesor de cada una de las Unidades Geológicas, marcando sus características hidráulicas.** La intercalación de estratos con diferente permeabilidad ocasionará que el flujo de los hidrocarburos observe trayectorias diversas.
- 4. Establecer la profundidad del nivel estático o el NAF de aguas colgadas.** Dado que la cercanía a la superficie del acuífero ocasiona que el hidrocarburo se esparza con mayor rapidez, se deberá investigar en norias y pozos los niveles del agua, ya que en cada uno de esos aprovechamientos hidráulicos se indican las presencia de diferentes almacenamientos de agua como son los acuitardos y acuíferos.

5. **Análisis fisicoquímicos, determinación de materia orgánica, tanto del agua subterránea como del suelo.** Dependiendo de los aniones y cationes disueltos, el pH del medio, la presencia de materia orgánica, la demanda de oxígeno, etc., se dará la transformación de los hidrocarburos.
6. **Pruebas de bombeo en pozos y de filtración.** Para determinar el valor de la permeabilidad en la formación acuífera, el parámetro de la fracción del coeficiente de almacenamiento y la velocidad de filtración en la zona vadosa se harán pruebas de bombeo y de filtración.
7. **Construcción de uno o más pozos para extracción y monitoreo de los hidrocarburos.** Se deberán construir uno o más pozos, según la necesidad para hacer la extracción de los hidrocarburos y monitorear mediante cámara submarina su evolución a través del tiempo.

Las perforaciones se tendrán que hacer con equipos del tipo neumático, que usan solamente aire y detergentes y así evitar el fraguado de la bentonita en el entorno del pozo y darse cuenta de la presencia de los hidrocarburos.

8. **Extracción de los hidrocarburos con una bomba de bajo gasto.** Se sabe que por cada litro de hidrocarburo se contamina un metro cúbico de agua; entonces, para sacar un litro de hidrocarburo se tiene que tratar por lo menos un metro cúbico, lo cual incrementa mucho los gastos de limpieza del acuífero, además de verter agua todavía con compuestos en los canales de aguas residuales.

Una vez evaluado el espesor del hidrocarburo se instalarán bombas de bajo gasto ( $< 1$  litro/min ) en cada unos de los pozos construidos para la extracción; la profundidad de la bomba se ajustará de manera continua de tal manera que extraiga solamente los hidrocarburos.

Lo relevante de esta técnica es que no se tiene que instalar una bomba de extracción de agua que genere un cono de abatimiento para que viajen los hidrocarburos y que sean extraídos con otra de menor gasto.

9. **Fomentar la población de colonias de bacterias y microbios.** Una vez que se ha extraído el mayor volumen de hidrocarburos, comprobando el espesor de ellos con cámara de televisión submarina, entonces se procede a instalar un equipo de aforo. El equipo de aforo debe tener la capacidad de permitir la agitación del agua en la cámara de bombeo para provocar la aireación y por ende el crecimiento de las bacterias y microbios que se comen el petróleo y posteriormente entre ellos.

**10. Limpieza final del acuífero.** Al comprobar que la cantidad de hidrocarburos ha sido consumida considerablemente por las poblaciones de bacterias y microbios, mediante análisis cromatográficos y con cámara de televisión, se procederá a realizar la limpieza final del acuífero clorando, pistoneado y cepillando el pozo en toda su longitud; para que finalmente se haga un aforo con las etapas de limpieza y desarrollo hasta que el agua esté prácticamente limpia.

### Caso de aplicación y comprobación de la teoría.

#### 4.1 Antecedentes.

En una de tantas plantas de almacenamiento de combustibles ubicadas en la Faja Volcánica Transmexicana, una tubería de conducción subterránea de gasolina sufrió una fractura por la acción de los movimientos en la capa activa debido a los cambios volumétricos por la variación de la humedad volumétrica (Pérez R., M. L. 1993), tal y como se muestra en la figura 4.1.



**Figura 4.1 Fuga de gasolina en la fractura de una tubería por cambios volumétricos en el suelo al variar el contenido de agua (expansión–contracción).**

En el agua de los servicios comenzaron a manifestarse tanto el olor como la presencia de gasolina, por lo que se procedió a realizar un registro con cámara de televisión submarina al pozo, reportando con base en las imágenes de la figura 4.2 la descripción siguiente:

A partir de 172	ft	el ademe está humedecido por la presencia de la gasolina que le ha provocado cierta corrosión,
291	ft	¡nivel de gasolina!,
291-297	ft	espesor aparente de gasolina,
297-301	ft	alguna fase de hidrocarburo más denso,
301	ft	Nivel estático, zona de mezcla.

Dadas las características de densidad de la gasolina y porosidad de los materiales geológicos, la ascensión capilar hasta la altura crítica  $Z_c$  medida fue de 11.7 metros; mientras que el espesor de hidrocarburos " $h_o$ " es de 3 metros considerando un área de 10,000 m<sup>2</sup>.

Respecto a las imágenes que aparecen en la figura 4.2 sacadas al fotografiar la cinta de video original se comenta lo siguiente:



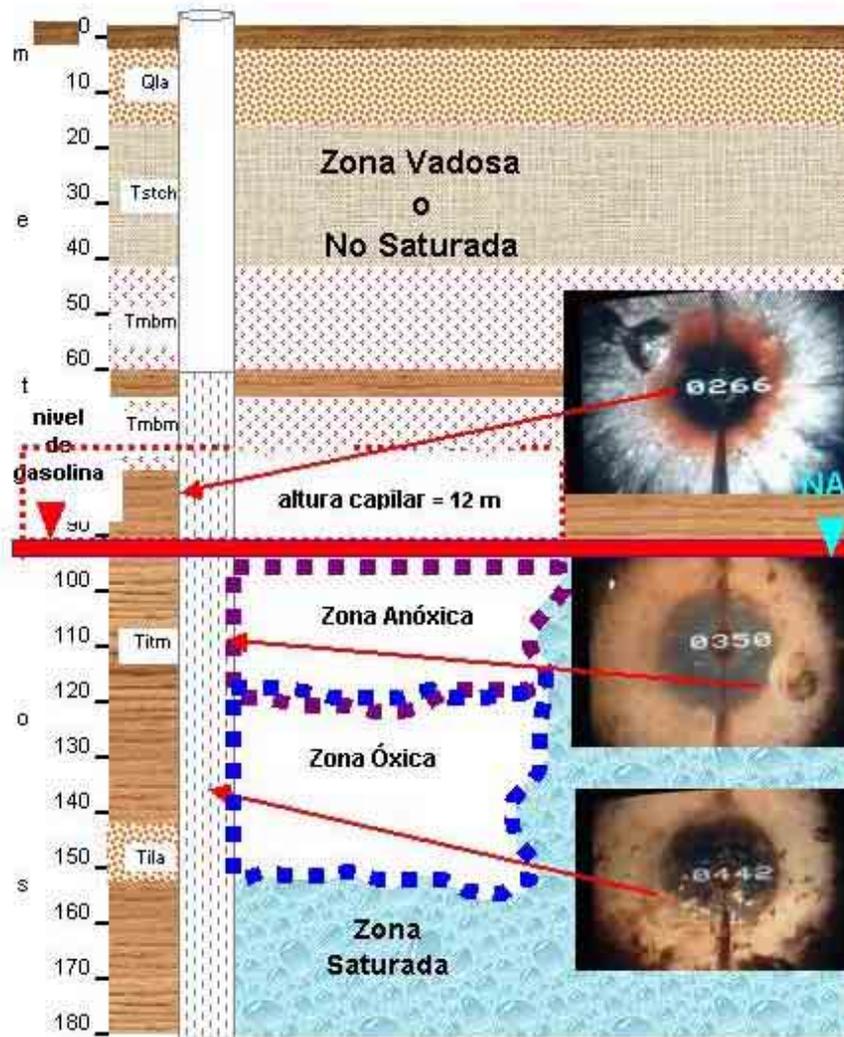
**Figura 4.2 Imágenes importantes del video del pozo de agua profundo.**

A la profundidad de 290 ft (88.4 m) se observa el nivel de gasolina, el ademe es de ranuras verticales; la imagen de 295 ft (90 m) muestra el cuerpo de la gasolina aún sin sufrir transformación, es notar el color rojo de la gasolina magna; a 297 ft (90.5 m) la gasolina está en contacto con hidrocarburos pesados y descompuestos, de ahí su coloración negra; de 300 (91.4 m) a 301 ft (91.7 m) se considera una zona de mezcla con hidrocarburos traslúcidos.

A 365 ft (111 m) y 378 ft (115 m) es de notarse las poblaciones de bacterias que se han desarrollado, en esos intervalos se llevan a cabo procesos REDOX. A 483 ft (147 m) de profundidad está el fondo del pozo y la imagen muestra las colonias de bacterias y microbios en suspensión.

A través del registro de un video del pozo viejo, el ambiente de reducción-oxidación del medio se comprobó por los resultados de los análisis fisicoquímicos practicados al agua y al material incrustado en el ademe del pozo.

**Ambiente REDOX (Oxidación-Reducción) en el entorno del pozo**



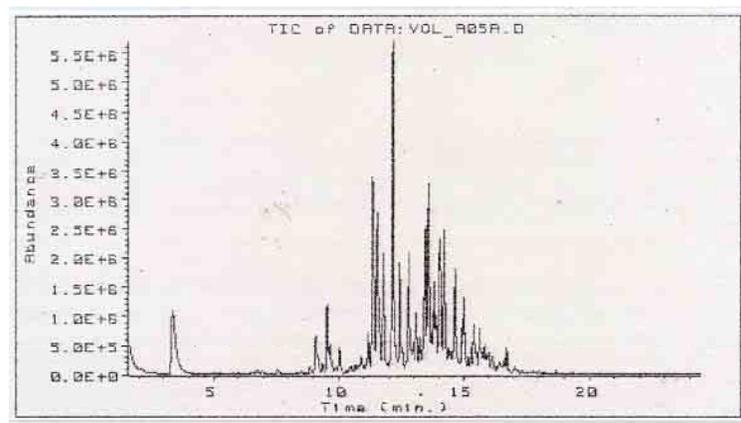
**Figura 4.3 Ambiente REDOX en la vecindad de un pozo de extracción.**

La figura 4.3 exhibe la columna geológica que será discutida en un párrafo posterior y las zonas: vadosa, saturada, anóxica y óxica. Las imágenes muestran que a las profundidades de 266 ft (81 m) y 350 ft (107 m) existen nódulos de Manganeso que aparecen por las reacciones expuestas en el capítulo 2.

En la zona anóxica y por debajo del nivel de gasolina se formaron colonias de bacterias anaerobias tornando la consistencia del agua en gelatinosa en ese intervalo, mientras que para la profundidad de 442 ft (136 m) se comienzan a gestar poblaciones de organismos heterótrofos o autótrofos.

Las imágenes de las fotografías del pozo a diferentes profundidades se pueden correlacionar con el esquema construido en la figura 2.2. Por arriba del nivel de gasolina la tubería del pozo está completamente lisa.

Del análisis BETEX, mediante la cromatografía de gases, se obtuvo el espectro (figura 4.4) correlacionándose la presencia de compuestos aromáticos.



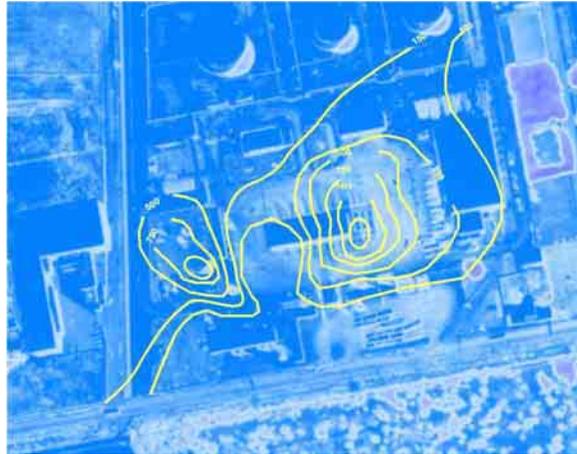
**Figura 4.4 Espectro resultante de los análisis BETEX, agua del pozo.**

Para determinar las dimensiones de la pluma de hidrocarburos flotando sobre el nivel estático se procedió a medir las concentraciones de hidrocarburos volátiles y de explosividad, tal y como se muestra en las fotografías de la figura 4.5.

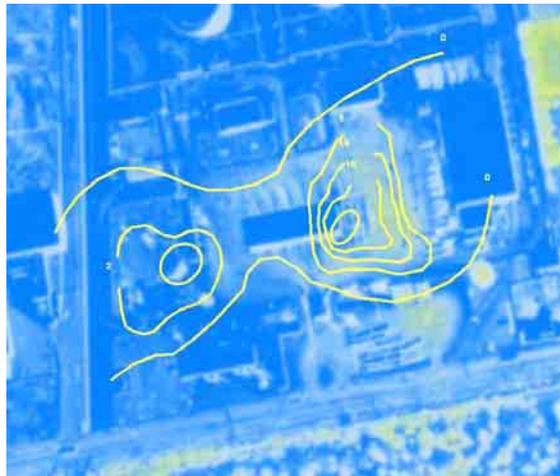


**Figura 4.5 Perforación y medición de la concentración de hidrocarburos volátiles y explosividad.**

Las figuras 4.6 y 4.7 muestran las configuraciones respectivas, se nota de inmediato que efectivamente, el área de los tanques de almacenamiento está limpia y libre de hidrocarburos.



**Figura 4.6 Configuración de la concentración de hidrocarburos volátiles, ppm.**



**Figura 4.7 Configuración de la explosividad en %, LEL.**

Las zonas anómalas resultan ser el sitio donde se fracturó la tubería, midiendo concentraciones hasta de 4,000 ppm y explosividad potencial del 25%. Esta última debe considerarse alta debido a la relación de profundidad al acuífero o espesor de la zona vadosa.

Otro cierre anómalo se presenta en la vecindad del pozo de extracción, donde seguramente por efecto del bombeo se generó el gradiente hidráulico que ocasionó el flujo de la gasolina hacia él, la concentración mayor medida en ese momento fue de 600 ppm, mientras que la explosividad apenas fue de 5%.

Los valores de los potenciales de fondo en todo el predio de la Planta y de las manzanas circundantes variaron entre 10 ppm y 15 ppm; mientras que el potencial de fondo para la explosividad fue menor a 3% para la misma región.

Con los cortes litológicos de los pozos de agua vecinos y del propio, se construyó la columna geológica, diferenciado cuatro Unidades Geológicas:

- Qla** Depósitos de arcillas del tipo lacustre con intercalaciones de estratos delgados de arenas y limos, su espesor es en promedio de 2 metros.
- Tstch** Corresponde a tobas de caña libre, los granos de pómez le confieren una permeabilidad muy alta, es la Formación del acuífero libre.
- Tmbm** Rocas intermedias de andesitas y basaltos intensamente fracturados, y presentan concentraciones importantes de clorita. En la parte central del valle funciona como almacenamiento de agua subterránea.
- Titm** Tobas depositadas en un medio acuoso, presenta tres miembros (lítico, arenoso y arcillo-limoso) y los tres tienen buena permeabilidad; actualmente, bajo el subsuelo de la Zona Industrial Benito Juárez es el único estrato saturado y que almacena agua para abastecer a los pozos industriales y potables. Estos materiales descansan sobre otro basalto denominado viejo, que es el basamento geohidrológico y que no tiene permeabilidad.

En el pozo antiguo se realizó una prueba de aforo para extraer únicamente la gasolina (figura 4.8) y definir la profundidad de instalación de la bomba de bajo gasto para extraer exclusivamente el hidrocarburo y no agua; al ajustar la profundidad del cuerpo de tazonas, se conectó a la boquilla de salida una manguera para verter la gasolina en un tanque de almacenamiento. Se midió el tiempo de abatimiento y recuperación, datos que sirvieron para plantear el ritmo de la extracción.

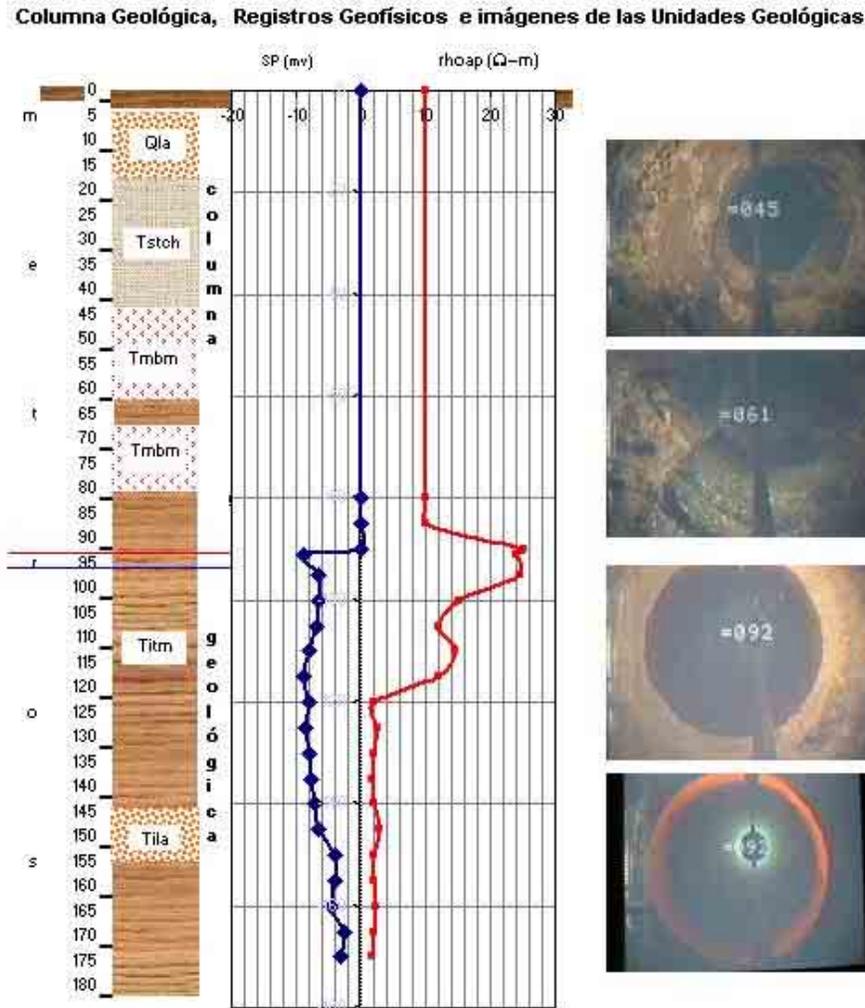


**Figura 4.8 Vista del equipo para la prueba de aforo; determinando el tiempo de abatimiento y recuperación del tirante de gasolina.**

Con la demarcación de la pluma principal de gasolina, y sabiendo que migra verticalmente debido a las fuerzas de gravedad bajo el núcleo del derrame y a la alta permeabilidad de los materiales geológicos, se proyectó la construcción del pozo para la extracción de la gasolina.

La figura 4.9 muestra la columna geológica, el nivel de gasolina, su espesor, el nivel estático, las imágenes de las Unidades Geológicas en sus puntos más interesantes y las gráficas de los registros geofísicos del pozo.

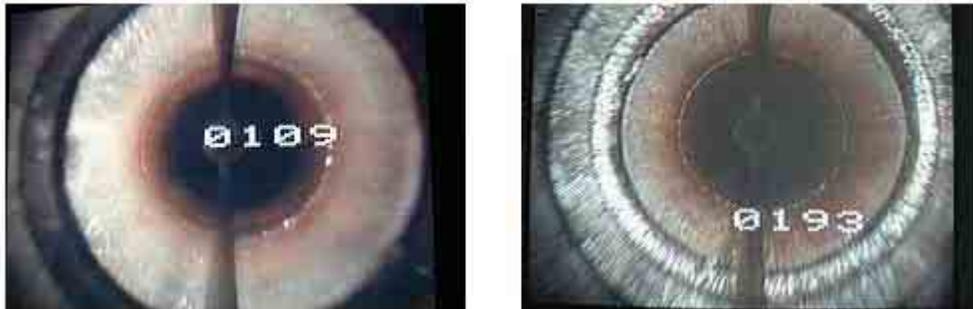
Las imágenes de las Unidades Geológicas a diferentes profundidades se pueden apreciar porque el pozo fue perforado con un equipo neumático, ya que es una técnica limpia y permite hacer fielmente la interpretación geológica de los estratos cortados y de las familias de fracturas, porosidad, zonas de filtración y niveles de interés.



**Figura 4.9** Columna geológica, registros geofísicos e imágenes de las rocas.

Otra de las dificultades encontradas en la construcción del pozo de extracción de gasolinas fue la alta explosividad >>>100% LEL en la boca del pozo, impidiendo el uso de la soldadora eléctrica, pues una chispa podía provocar una explosión.

Una opción era instalar ademe de plástico, pero por las profundidades de instalación, los empujes de suelo y roca provocarían su colapso; por esa razón, se procedió a construir en la fábrica de tubería de ademe, “coples” que permitieron enroscar los tubos de acero directamente sobre el pozo eliminando el riesgo potencial. La figura 4.10 presenta uno de estos tubos y sus coples.



**Figura 4.10 Tubos y coples enroscados para evitar chispas en la boca del pozo que activen una explosión.**

Finalmente, el pozo de extracción con la bomba de bajo gasto y línea de conducción de la gasolina quedó como se muestra en la figura 4.11.

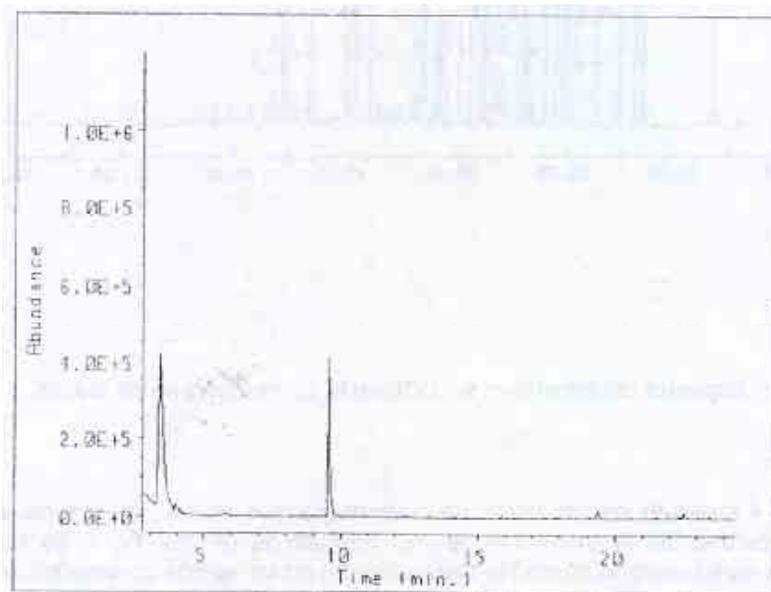
En la misma figura se observa la mesa en donde se va fijando la profundidad de la bomba para la extracción solamente de hidrocarburos; la manguera amarillenta sirvió para conducir el agua hasta los tanques de almacenamiento.



**Figura 4.11 Pozo de extracción con la bomba de bajo gasto instalada.**

El volumen de la fuga fue de 95,000 litros de gasolina y en tres semanas de bombeo se recuperaron 80,000 litros que se pudieron volver a utilizar. Entre el producto evaporado que sirvió para el inicio del crecimiento de las colonias bacterianas y el que se quedó como contaminación residual fija e inamovible, fueron 15,000 litros que corresponden a un 16% del volumen total derramado; dato que es conforme con lo encontrado por McKee (1972), Iniestra G., S. y Velásquez M., A. (1998).

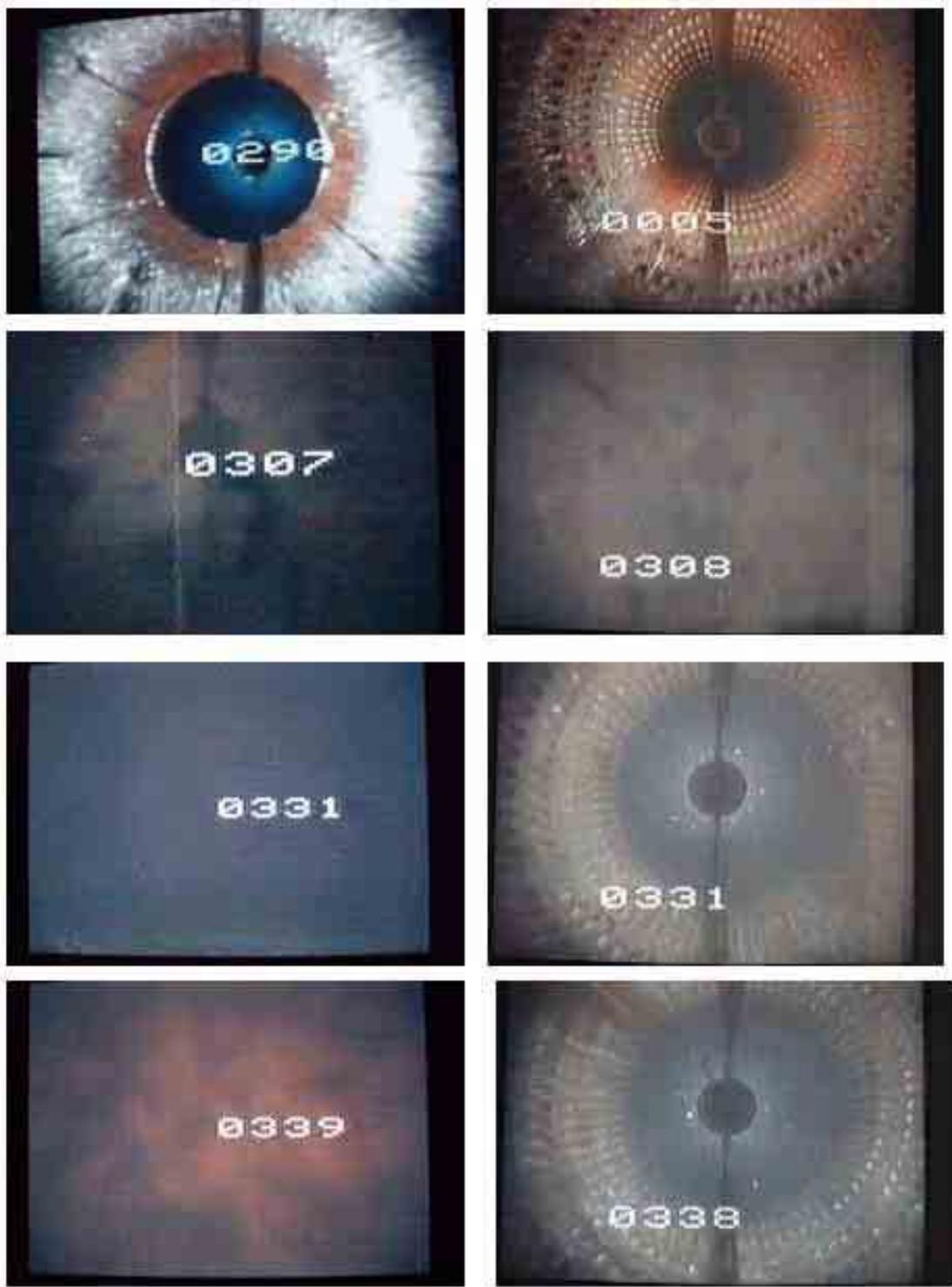
La cromatografía de gases del análisis BETEX para el agua del pozo posterior a la remediación (figura 4.12) muestra solamente trazas de los hidrocarburos aromáticos, confirmado la limpieza casi total del acuífero.



**Figura 4.12 Cromatografía de gases (BETEX) para el agua del acuífero ya saneado.**

En la serie de fotografías de la figura 4.13 a diferentes profundidades, se hace una comparación entre el pozo con la presencia de hidrocarburos y ya saneado con la metodología propuesta en este trabajo de investigación.

El tiempo que duró la remediación fue de siete meses aproximadamente, y es el lapso que hay entre uno y otro registro de la cámara de televisión submarina. Vale comentar que en ese tiempo el nivel estático descendió de 301 ft (92 m) a 307 ft (94 m) abatiéndose aproximadamente 2 metros. Se decidió instalar ademe tipo canastilla a lo largo de toda la longitud perforada para que en la zona vadosa los vapores de la gasolina fluyeran más fácilmente al interior y se escaparan a la atmósfera y en la zona saturada para que el hidrocarburo fluyera y se aireara más rápidamente.



**Figura 4.13** Imágenes del pozo mostrando el estado del acuífero antes y después de su limpieza.

A la profundidad de 307-308 ft (93.6-93.9 m) aparece en la imagen del lado izquierdo el agua con población de bacterias y en la parte derecha el agua solamente un poco turbia, la cual con la limpieza química se mejoró notablemente.

Las fotos a la profundidad de 338-339 ft (103.0-103.3 m) muestran el pozo con una zona de mezcla entre el agua y la gasolina, mientras que en la parte derecha el agua está ligeramente turbia, pero libre de los aromáticos.

Entre 362-363 ft (110.3-110.6 m) de profundidad al inicio de la remediación aparecen colonias de bacterias y microbios no diferenciados, posteriormente, al final de la remediación la imagen muestra al agua prácticamente clara, pudiéndose observar un cople roscado de la tubería.

El pozo, a pesar de que se perforó hasta 180 metros por el diseño de la estructura y como era de prueba, se dejó terminado a 150 metros (491 ft). Entre 475 ft (144.8 m) y 483 ft (147.2 m) se puede observar la gran cantidad de organismos heterótrofos o autótrofos, mientras que ya saneado se vuelve a ver clara el agua comprobando la bondad de esta sencilla técnica de remediación de acuíferos profundos.

Finalmente, para evitar fugas, se decidió instalar tuberías elevadas en la planta para conservar y mantener en óptimas condiciones las líneas de conducción, atendiendo a las normas de PROFEPA y SEMARNAP el pozo de extracción se quedó para monitorear el subsuelo construyendo dos pozos más en lugares cercanos a los tanques de almacenamiento, en ninguno se encontró rastro alguno de hidrocarburos. Se construyó un nuevo pozo para el agua de servicios.



## **Conclusiones y recomendaciones**

---

Con el análisis, interpretación e integración de las investigaciones aplicadas se concluye y recomienda lo siguiente:

### **Conclusiones.**

- Los acuíferos profundos se ven afectados por los derrames accidentales o deliberados de compuestos orgánicos en el suelo y subsuelo, mediante la fuga de tanques de almacenamiento, tuberías de conducción, volcaduras de pipas, etc.
- Un acuífero, entre más cerca esté de la superficie, más vulnerable se torna.
- La permeabilidad y espesor de la zona vadosa juega un papel importante para el flujo de contaminantes debido a que en ella se queda la contaminación residual y se llevan a cabo los procesos de retención y transformación.
- Por los ensayos de laboratorio y lo observado en campo como resultado de la investigación aplicada, la “retención” varía entre 7% y 20% del volumen total derramado.
- Con técnicas sencillas y económicas, como es el “potencial natural”, se pueden definir las plumas de contaminación de los hidrocarburos detalladamente sin importar la profundidad a la que estos se encuentren, ya que se aprovecha el halo de alteración y la generación de una fuerza electro motriz que se da al entrar en contacto fluidos de diferentes densidades.
- Los derrames siempre migran de manera vertical debido a las fuerzas de gravedad.
- Las zonas anómalas delineadas por las configuraciones de concentración de hidrocarburos volátiles y de explosividad, definen claramente el núcleo del derrame.
- Si el área que señala la configuración de concentración de hidrocarburos volátiles es muy grande, significa que las capas de suelo son intercalaciones de estratos diferentes o bien, que es uno solo con una permeabilidad muy baja.
- Siempre se forma una zona óxica y otra anóxica debido a los potenciales de reducción y oxidación, estas zonas favorecen la aparición de bacterias

autótrofas y heterótrofas que se comen los compuestos orgánicos y posteriormente entre ellas mismas.

- Por cada litro de hidrocarburo presente en el agua se contamina un metro cúbico de agua; pensando en ese aspecto, los saneamientos de acuíferos a poca profundidad siempre se han realizado sacando una cantidad de agua considerable para después separarla en superficie por dispersión.
- El manejo de tales volúmenes de agua se considera poco eficiente, por lo que debe de considerarse solamente extraer el hidrocarburo y conformar las condiciones óptimas para que las poblaciones de bacterias hagan la biorremediación en los tiempos prescritos.

### ***Recomendaciones.***

- Para sanear los acuíferos profundos por derrames de hidrocarburos, se recomienda la siguiente metodología:
  1. Determinar el tipo de hidrocarburos
  2. Establecer la columna geológica y los espesores de cada capa.
  3. Ubicar en la columna geológica posición y espesor de cada una de las Unidades Geológicas marcando sus características hidráulicas.
  4. Establecer la profundidad del nivel estático o el NAF de aguas colgadas.
  5. Análisis físicoquímicos, determinación de materia orgánica tanto del agua subterránea como del suelo.
  6. Pruebas de bombeo en pozos y de filtración.
  7. Construcción de uno o más pozos para extracción y monitoreo de los hidrocarburos.
  8. Extracción de los hidrocarburos con una bomba de bajo gasto.
  9. Fomentar la población de colonias de bacterias y microbios por aireación (agitación del agua en la cámara de bombeo).
  10. Limpieza final del acuífero.
- Con esta técnica no se extraen considerables volúmenes de agua, de los cuales, es muy difícil su manejo.
- El tiempo en que se llevó a cabo el saneamiento del acuífero bajo la planta en la Zona Industrial Benito Juárez, fue el tiempo que le tomó a las colonias bacterianas “autóctonas” acabar con el hidrocarburo y consumirse entre ellas.

- Respecto a la contaminación residual en la zona vadosa, se recomienda, aprovechando la retención, solubilidad, densidades, etc., hacer pruebas con la inyección de vapor, que es una técnica similar a la empleada para la recuperación secundaria en la industria petrolera.



## Bibliografía

---

- Alvarez Manilla A. A., 1997. "*Saneamiento de acuíferos profundos por derrame de hidrocarburos*". Primera Reunión Nacional de la Asociación Geohidrológica Mexicana. Mérida Yucatán.
- Baver L. D., Gardner W. H. and Gardner W. R., 1972. "Física de suelos". UTEHA.
- Benson R. C. and Van Ee J., 1989. "Geophysical techniques for sensing buried wastes and waste migration" Environmental Monitoring Systems Laboratory Office of Research and Development. US Environmental Protection Agency. Las Vegas Nevada.
- Brady N. C., 1990. "*The nature and properties of soils*". Maxwell Macmillan International .Editions.
- Devitt D. A., Evans W. A., Starks J. and Starks T. ans others, 1987. "Soil sensing for detection and mapping of volatile organics. National Water Well Association. Dublin, Ohio.
- Geo Ingeniería Alfvén, SA de CV. 1994. "Análisis de riesgo por derrame de hidrocarburos en Santiago de Querétaro, Qro".PEMEX.
- Velásquez Montero. A., e Iniestra González S. M., 1998. "*Estudio del comportamiento de hidrocarburos en suelos del tipo adosol en columnas empacadas a nivel de laboratorio*". Tesis Mancomunada para obtener el Título de Ingeniera Química. Facultad de Química. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Weyer K. U., 1992. "*Subsurface contamination by immiscible fluids*". Weyer K. U. Editor. Balkema.
- Weyer K. U., 1992. "*Subsurface contamination by immiscible fluids*". Weyer K. U. Editor. Balkema.
- Wise L. D. And Trantolo D. J., 1994. "*Remediation of Hazardous waste contaminated soils*". Wise and Trantolo Editors. Dekker.



**CIUDAD DE MEXICO**

Av. Patriotismo 683  
Col. Mixcoac  
03730, México, D. F.  
Tel. (55) 56 15 35 75  
55 98 52 18  
Fax (55) 55 98 64 57

**SANFANDILA**

Km. 12+000, Carretera  
Querétaro-Galindo  
76700, Sanfandila, Qro.  
Tel. (442) 2 16 97 77  
2 16 96 46  
Fax (442) 2 16 96 71

Internet: <http://www.imt.mx>  
[publicaciones@imt.mx](mailto:publicaciones@imt.mx)