



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

División de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

2010

*Caracterización hidrogeológica y propuesta técnica – económica de remediación ambiental en un sitio contaminado por un derrame de hidrocarburos, en el estado de Jalisco, México*

Eduardo Emilio  
Sánchez León

Director de Tesis  
Dr. Antonio Hernández Esprú  
Co-Director de Tesis:  
Dr. Luis G. Torres Bustillos

TESIS  
Que para obtener el grado  
de Ingeniera Geóloga  
presenta:

<u>ÍNDICE DETALLADO</u>	<u>Pág.</u>
<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1. Antecedentes	2
1.2. Objetivos y alcances	2
1.3. Justificación	2
1.4. Estructura de la tesis	3
1.5. Localización de la zona de estudio	4
<b>CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA</b>	<b>6</b>
2.1. Recopilación y análisis de información	7
2.1.1. Geología	7
2.1.2. Geofísica	8
2.1.3. Hidrología superficial y subterránea	8
2.2. Trabajo de campo	9
2.2.1. Geología	9
2.2.2. Hidrología	9
2.3. Experimentación en laboratorio	10
2.4. Caracterización ambiental del sitio contaminado	11
2.5. Discusión	11
<b>CAPÍTULO 3. DESCRIPCIÓN DEL ENTORNO NATURAL</b>	<b>12</b>
3.1. Geología	13
3.1.1. Tectónica y geología regional	13
3.1.2. Geología semiregional	17
3.1.3. Geología local y del subsuelo	28
3.2. Edafología	28
3.3. Hidrología	31
3.3.1. Hidrología superficial	31
3.3.2. Hidrología subterránea regional	34
3.3.3. Hidrología subterránea local	45
<b>CAPÍTULO 4. RESULTADOS</b>	<b>46</b>
4.1. Resultados de campo	47
4.1.1. Geología local	47
4.1.2. Geofísica	49
4.1.3. Hidrogeología local	50
4.1.4. Estudio ambiental	52
4.2. Resultados de la experimentación en laboratorio	53
4.2.1. Caracterización del suelo	53
4.2.2. Pruebas de tratabilidad	71
4.2.2.1. Lavado de suelo con surfactante	74
4.2.2.2. Biodegradación asistida	79
4.2.2.3. Lavado vs biodegradación	91
4.2.2.4. Valoraciones finales de las pruebas de tratabilidad	92
<b>CAPÍTULO 5. DISCUSIÓN</b>	<b>95</b>
5.1. De campo	96
5.1.1. Geología local	96
5.1.2. Geofísica	99
5.1.3. Interpretación geológica – geofísica	104
5.1.4. Hidrogeología local	109
5.1.5. Caracterización ambiental	115
5.1.6. Modelo conceptual de la zona de estudio	128
5.2. Propuesta de remediación del sitio contaminado	131
5.2.1. Aspectos técnicos y logísticos de las técnicas de remediación	131

5.2.2. Aspectos económicos		142
5.3. Conclusiones generales de la tesis	145	
<b>ANEXO 1. FORMATOS DE CAMPO</b>		<b><i>i</i></b>
Puntos de verificación geológica	ii	
Puntos de verificación de agua	xii	
<b>ANEXO 2. TÉCNICAS DE LABORATORIO PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL SUELO</b>		
<b><i>xxvii</i></b>		
<b>ANEXO 3. BIOSURFACTANTES</b>		<b>xxx</b>
Goma de mezquite		xxxi
Goma de algarrobo		xxxii
Goma de guar	xxxiii	
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>		

## **RESUMEN**

Esta tesis se basa en el estudio de un sitio contaminado que fue afectado por la fuga de 600,000 litros de diesel de un ducto de 16" de diámetro. El hidrocarburo impactó la zona no saturada y un acuífero libre somero formado por depósitos de cenizas volcánicas y tobas litocristalinas del Cuaternario. Esta investigación se especializa en el tratamiento de la zona vadosa y tiene como objetivo principal el examinar y comparar a nivel de laboratorio (por medio de pruebas de tratabilidad) las eficiencias de remoción de hidrocarburos totales de petróleo (TPH-diesel) en el suelo contaminado, de dos técnicas de remediación diferentes: (a) lavado de suelos con surfactantes y (b) biodegradación asistida con un estudio de microcosmos. El suelo contaminado fue analizado con el método EPA 3540C (extracción Soxhlet) por triplicado y se determinó una concentración inicial de 32,000 mg/kg de TPH fracción diesel. Las eficiencias de los sistemas de remediación se midieron tomando como parámetro de control TPH-diesel. Para el lavado de suelos se prepararon 17 pruebas con un total de 16 surfactantes de diferente naturaleza: 6 iónicos, 5 no-iónicos, 1 zwitteriónico y 3 naturales, adicionalmente a una prueba se le adicionó exclusivamente agua destilada y fue llamada prueba de calibración alcanzando eficiencias de remoción de 40%. Los surfactantes no-iónicos obtuvieron eficiencias de 20-35% siendo descartados para futuros análisis. Los surfactantes iónicos Maranil-Lab y Salen-SDS removieron el 79 y 60% respectivamente. Los tres biosurfactantes alcanzaron tasas de remoción máximas de ~55%, concluyendo que para el proceso de lavado de suelos los surfactantes iónicos resultan ser mejores candidatos. En el proceso de biodegradación asistida se estudiaron 5 surfactantes a tres diferentes concentraciones (2, 20 y 200 mg/kg). Los surfactantes fueron Maranil-Lab, Salen-SDS, Brij-35, goma de guar y goma de algarrobo, siendo los dos últimos, naturales y muy poco estudiados en la literatura. Cada microcosmos se incubó por un periodo de tres meses a 28°C y se hicieron los análisis de TPH-diesel para determinar concentraciones finales. Las eficiencias de remoción alcanzadas por Maranil-Lab, Salen-SDS y Brij-35 fueron de 90%, 66% y 55% respectivamente a una concentración de 200 mg/kg. Los biosurfactantes tuvieron un comportamiento favorable, alcanzando remociones de hasta 85% con una dosis de 2 mg/kg. Los resultados obtenidos sugieren que el proceso biológico asistido por biosurfactantes es la mejor opción para remediar la zona vadosa a nivel de campo, alcanzando remociones del 85% en un periodo de tres meses con la ventaja de no afectar al medio físico por ser derivados de productos vegetales.

Considerando la necesidad actual de implementar una remediación integral que permita atacar el problema en su totalidad, adicionalmente se analizaron las posibles soluciones para remediar el agua subterránea contaminada y la pluma de LNAPL presente en el acuífero.

*Palabras clave:* Remediación de la zona vadosa, lavado de suelos, biodegradación asistida, surfactantes, biosurfactantes.

## **ABSTRACT**

This thesis is focused in the study of a contaminated site, affected by a spill of 600,000 liters of diesel coming from a 16" diameter pipeline. The unsaturated zone and the shallow aquifer were impacted by the hydrocarbon. The dominant lithology at the site is formed by Quaternary volcanic ash deposits and tuffs. This investigation take special interest in the treatment and remediation of the unsaturated zone, therefore the first target is oriented to examine and compare at laboratory level the total petroleum hydrocarbon (TPH-diesel) removal efficiencies of the contaminated soil, with two different techniques: (a) surfactant-enhanced soil-washing and (b) biopiles with assisted biodegradation, studied with microcosms. The contaminated soil was analyzed with the EPA 3540C method (soxhlet extraction) by triplicate and an initial concentration of 32,000 mg/kg of TPH-diesel was determined. Efficiencies of both systems were measured using as control parameter TPH-diesel. 17 vials with a total of 16 surfactants: 6 ionic, 5 nonionic, 1 zwitterionic and 3 biosurfactants were prepared. In addition a control test was **developed** (with only distilled water) which obtain 40 % of removal. Nonionic surfactants reach 20 to 50 % of removal efficiency being discarded for further analysis. Ionic surfactants Maranil-Lab and Salen-SDS gave removals of 79 and 60 % respectively. The three biosurfactants employed got maximum removals of 55 % concluding that ionic surfactants Maranil Lab and Salen SDS are the best option for soil washing. In the biological process 5 surfactants at three different concentrations were analyzed (2, 20 y 200 mg/kg), Maranil-Lab, Salen-SDS, Brij-35, Guar gum and Locust bean gum, being the last two, biosurfactants and rarely studied. Each microcosm created was incubated for 12 weeks at 28°C. At the end of the process, TPH-diesel final concentrations were measured. Removal efficiencies reached by Maranil Lab, Salen SDS and Brij-35 were 90, 66 and 55 % respectively at a concentration of 200 mg/kg. Biosurfactants had favorable behavior, getting removal efficiencies of 85 % with doses of 2 mg/kg. Results suggest that biological process enhanced with biosurfactants is the best option to apply in the unsaturated zone at a field level, obtaining 85 % of TPH removal in 12 weeks, with the advantage of minimum impact of the environment due to the organic origin.

Considering the current need to implement a full remediation system at a contaminated site, which allows to treat the problem completely, additionally, possible solutions were analyzed to attend the contaminated groundwater and the LNAPL plume present in the aquifer.

*Key words: Unsaturated zone remediation, soil-washing, assisted biodegradation, surfactants, biosurfactantes.*



---

# **CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN**

- 1.1. Antecedentes**
- 1.2. Objetivos y alcances**
- 1.3. Justificación**
- 1.4. Estructura de la tesis**
- 1.5. Localización de la zona de estudio**

### **1.1. Antecedentes**

Esta tesis surge como respuesta a la necesidad de aportar desarrollo y conocimiento en el área de geología ambiental, buscando mejorar el manejo, la aplicación y la eficiencia de las técnicas de remediación disponibles, en este caso 2, ampliamente descritas en la literatura: (a) lavado de suelos con surfactantes y (b) biodegradación asistida con surfactantes.

Para el desarrollo del presente trabajo se tomaron datos duros de una campaña de campo realizada en 2004 a nivel de consultoría, enfocada en la caracterización ambiental de un sitio contaminado a consecuencia de una fuga por toma clandestina de alrededor de 500,000 L de combustible (mezcla de gasolina y diesel) en un poliducto de PEMEX que va de Salamanca a Guadalajara. Este evento afectó terrenos aprovechados para el cultivo de agave y actividades de ganadería. Adicionalmente a 250 m aguas abajo del punto de derrame se encuentra un pozo de abastecimiento de agua potable que podría, según se determinará con claridad a lo largo de la tesis, ser impactado por el hidrocarburo derramado. Por acuerdos de confidencialidad no se presentarán coordenadas exactas del sitio contaminado y se establecerá un sistema de referencia arbitrario.

Además de retomar y reinterpretar los datos de laboratorio obtenidos en jornadas de trabajo anteriores, se llevaron a cabo las siguientes actividades: trabajo de campo geológico, hidrogeológico y ambiental, nuevos estudios de laboratorio, interpretación, integración y discusión de toda la información obtenida.

La tesis abarca toda la caracterización del sitio contaminado, incluyendo una descripción geológica, determinación y análisis de las propiedades hidráulicas del medio en cuestión, caracterización del material impactado por el contaminante por medio de diversas pruebas de laboratorio y un cuidadoso análisis de toda la información recolectada

### **1.2. Objetivos y alcances**

El objetivo principal de esta investigación es definir técnicas factibles de remediación para el tratamiento de la contaminación presente en el sitio, contando con suficientes bases científicas, técnicas y económicas que permitan establecer de manera determinante que la propuesta de remediación sugerida es la mejor opción a aplicar a nivel de campo.

Esta tesis retoma información obtenida durante dos proyectos realizados con anterioridad a nivel de consultoría, en donde se llevaron a cabo la instalación de pozos de monitoreo, análisis de muestras de suelo y agua, sondeos eléctricos verticales, censo de pozos y medición de niveles estáticos. La información disponible permitió reinterpretar datos y reconfigurar secciones geoeléctricas y geológicas, piezometrías, plumas contaminantes, con la finalidad de obtener conclusiones particulares de esta investigación.

En general el alcance del trabajo se limita a la remediación de la zona no saturada, describiendo a detalle el comportamiento del contaminante en el suelo y los procesos de remediación aplicados, sin embargo, tomando conciencia de la necesidad de definir un proyecto de remediación integral, que incluye el tratamiento de la zona no saturada, del acuífero contaminado, y la extracción de la fase libre presente, se abordan someramente dos técnicas adicionales: (1) para la extracción de la fase ligera libre no acuosa (LNAPL por sus siglas en inglés) y (2) para el tratamiento del acuífero contaminado.

### **1.3. Justificación**

Una caracterización adecuada y a detalle junto con un plan de remediación bien definido deberían, en teoría, anteceder cualquier proyecto que se piensa realizar. En esta tesis se manifiesta la gran ventaja que representa invertir esfuerzos en estudiar a pequeña escala el

comportamiento del medio y la respuesta al sistema propuesto. Estos análisis son llamados pruebas de tratabilidad y consisten en pruebas de laboratorio que sirven para determinar la eficiencia de un proceso en un tiempo establecido y con características controladas.

Dichas pruebas están encaminadas a responder los siguientes cuestionamientos:

- ¿La ingeniería de remediación propuesta es apropiada para lograr el éxito en el intento de remediación del sitio contaminado, según las características físicas, químicas y biológicas del medio en cuestión?
- ¿Qué tratamiento se puede dar al suelo para aumentar la eficiencia de las técnicas propuestas?
- ¿Cuánto tiempo se requerirá para llegar a límites por debajo de las concentraciones máximas permisibles?
- ¿Qué complicaciones pueden presentarse al momento de proyectar el trabajo de laboratorio a escala de campo?
- ¿Cuál es el costo total de cada técnica propuesta?
- Según los análisis técnicos y costo-efectivos, ¿qué técnica resulta ser más apropiada?

Así, las pruebas de tratabilidad pronostican lo que puede ocurrir al aplicar una técnica u otra, ofrecen tiempos estimados de remediación, cantidad de material necesario, que a su vez se refleja en los costos totales del proyecto. Por estas razones, esta tesis enfatiza las ventajas de los estudios de tratabilidad previos a la ejecución de las técnicas de remediación, que dicha serie de estudios prácticamente no son tomados en cuenta en proyectos fuera del ámbito académico. Si bien, implican un costo adicional que por lo general no se contempla en las propuestas económicas, la disminución de la incertidumbre en cuanto a la funcionalidad del sistema justifica la inversión y puede evitar el fracaso.

#### **1.4. Estructura de la tesis**

La tesis se compone de 6 capítulos principales con sus correspondientes subcapítulos.

a) Capítulo uno "Introducción": incluye los antecedentes y el planteamiento del problema que dio pie al inicio de este proyecto. Se presentan los objetivos, alcances y la justificación de la tesis. Adicionalmente se aborda la localización del sitio contaminado, manejando coordenadas arbitrarias, debido al acuerdo de confidencialidad que se tiene con las empresas que proporcionaron la información sobre la caracterización ambiental del sitio.

b) Capítulo dos "Metodología": este capítulo describe la metodología que se llevó a cabo en cada etapa de la tesis. Detalla el desarrollo del trabajo de gabinete, los objetivos y actividades realizadas durante el trabajo de campo, menciona y en algunos casos explica las técnicas de laboratorio para caracterizar el suelo, los métodos de remediación aplicados y los métodos de interpretación de los parámetros hidráulicos.

c) Capítulo tres "Entorno natural": se divide en tres subtemas: geología, edafología e hidrología superficial y subterránea (hidrogeología). El primero describe brevemente la historia geológica de la región y posteriormente trata sobre la geología a detalle, complementada con la información obtenida durante el trabajo de campo y muestra una descripción petrográfica de las unidades litológicas presentes, generando un mapa geológico y la columna estratigráfica del sitio. La edafología aborda temas como el uso de suelo y los tipos y propiedades de la cubierta edáfica existente. Por último, se explican los procesos hidrológicos que acontecen en el área y se describe brevemente la hidrología subterránea, presentando un breve análisis de los parámetros hidráulicos y un balance hidrogeológico que el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) realizó en 2007.

d) Capítulo cuatro "Resultados": en este apartado se muestran los datos duros obtenidos a lo largo de todo el desarrollo de la tesis, libre de cualquier interpretación. Se muestran en forma de

tablas e incluyen los siguientes aspectos: geología local, geofísica, hidrogeología local, caracterización ambiental y resultados de la experimentación de laboratorio, que se divide en: (1) caracterización de las propiedades físicas y químicas del suelo contaminado, y (2) pruebas de tratabilidad (lavado de suelos y biodegradación asistida con surfactantes).

e) Capítulo cinco “Discusión de resultados”: se analizan, comparan e integran todos los resultados obtenidos. Se generaron secciones geológicas locales, secciones geoelectricas a detalle y se llevó a cabo una correlación geológica–geofísica que permite explicar el comportamiento geológico y define las firmas resistivas de cada material. Se muestran redes de flujo, mapas de isoprofundidad del nivel estático, cálculo e interpretación de los parámetros hidráulicos y se define el comportamiento de la contaminación en el subsuelo, con ayuda de secciones esquemáticas de isoconcentraciones de hidrocarburos totales de petróleo (TPH) en el subsuelo, secciones con fase libre y fase disuelta. También se detalla en el cálculo del volumen de suelo y LNAPL existente.

El segundo apartado de este capítulo se refiere a la propuesta de remediación seleccionada para el tratamiento de la zona saturada, profundizando en los aspectos técnicos, logísticos y económicos del proyecto. Respecto al tratamiento del acuífero y de la fase libre, se abordan dos metodologías de forma muy general, presentando referencias sobre trabajos actuales y líneas de investigación para el tratamiento de estos aspectos de la contaminación, debido a que el alcance de esta tesis está limitado a la remediación de la zona no saturada.

f) Capítulo seis “Conclusiones y recomendaciones”: ofrece un panorama general sobre todo el trabajo desarrollado y se presentan las conclusiones generales de la tesis, proponiendo nuevas líneas de investigación y recomendaciones que podrían mejorar el trabajo desarrollado.

g) Capítulo siete “Referencias citadas”: se enlistan todas las referencias bibliográficas empleadas para sustentar la información presentada.

h) “Anexos”: incluye formatos de los puntos de verificación geológicos e hidrogeológicos obtenidos durante el trabajo de campo, los formatos petrográficos, definición detallada de los biosurfactantes empleados en los procesos de remediación y algunas metodologías empleadas en la etapa de experimentación de laboratorio.

### **1.5. Localización de la zona de estudio**

La zona de estudio se encuentra en el estado de Jalisco, al NW de la ciudad de Guadalajara (Figura 1.1). Se ubica en el sector occidental de la provincia fisiográfica de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM).



Figura 1.1. Localización de la zona de estudio (modificada de Google Earth, 2009).

El sitio contaminado se encuentra dentro del municipio El Arenal, entre los municipios de Amatitán, Tequila y Tala. La vía de acceso principal es la “Carretera Federal No. 15 Tepic – Guadalajara”. La figura 1.2 muestra el sitio de interés definiendo las siguientes características del terreno:

- El uso de suelo es, en general, agrícola.
- El área es dividida en dos partes por unas vías férreas. A la parte superior se le denominará sector noreste (NE) y a la parte inferior sector suroeste (SW).
- Un poliducto de PEMEX se ubica al SE del sitio y se extiende en dirección NE. Coincide exactamente con la traza de un cableado de alta tensión propiedad de la Comisión Federal de Electricidad (CFE).
- El punto de derrame de diesel se encuentra en el sector SW, justamente sobre la traza del poliducto.
- La topografía es más elevada en el sector SW y disminuye abruptamente en el sector NE al cruzar las vías del tren.
- Al noroeste del sitio, se ubica un pozo de extracción de agua potable municipal que distribuye el líquido al poblado “Santa Cruz del Astillero”.



Figura 1.2. Sitio contaminado y alrededores.



---

## **CAPÍTULO 2 METODOLOGÍA**

- 2.1. Recopilación y análisis de información**
  - 2.1.1. Geología**
  - 2.1.2. Geofísica**
  - 2.1.3. Hidrología superficial y subterránea**
- 2.2. Trabajo de campo**
  - 2.2.1. Geología**
  - 2.2.2. Hidrología**
- 2.3. Experimentación en laboratorio**
- 2.4. Caracterización ambiental del sitio contaminado**
- 2.5. Discusión**

## **Introducción**

En este capítulo se expone la metodología que se siguió durante el desarrollo de la tesis. Incluye todo el trabajo previo realizado en gabinete, consulta y análisis de bibliografía existente, las estrategias seguidas para el trabajo de campo, técnicas de experimentación empleadas, incluyendo descripción de los procesos, fechas, equipo utilizado e instalaciones en las que se desarrolló la fase de experimentación, métodos para el análisis hidrogeológico, descripción de las técnicas de remediación, etc.

### **2.1. Recopilación y análisis de información**

En general las fuentes consultadas y analizadas se clasifican en cuatro categorías:

- a) Artículos científicos, que permitieron sustentar el marco teórico de referencia así como gran parte de la información presentada en la tesis, abarcando el entorno natural, experimentación en laboratorio, caracterización del sitio y diseño de la propuesta de remediación.
- b) Informes técnicos sobre proyectos previamente realizados en la zona de estudio y alrededores.
- c) Mapas temáticos y fotografías aéreas que junto con el trabajo de campo formaron la base de la cartografía geológica desarrollada.
- d) Documentos proporcionados por instituciones gubernamentales: Servicio Meteorológico Nacional (SMN), Servicio Geológico Mexicano (SGM), Comisión Nacional del Agua (CNA), Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, Comisión Estatal del Agua del Estado de Jalisco (CEA Jalisco), Instituto Nacional de Ecología (INE), principalmente.

#### **2.1.1. Geología**

La recopilación geológica fue dividida en tres apartados:

- 1) Tectónica y geología regional: describe el entorno geológico y tectónico regional, explicando a detalle la historia geológica, eventos tectónicos, estratigrafía y fisiografía de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM).

Se consultó bibliografía especializada en la descripción y análisis de la provincia fisiográfica de interés, en su mayoría, artículos científicos publicados, evitando en lo posible, aquellos que tuvieran fecha muy atrasada, para obtener así, la información más reciente, actualizada y vigente.

- 2) Geología semiregional: al igual que en el aspecto regional, se consultaron artículos científicos especializados en la estratigrafía de la zona. Adicionalmente, se desarrolló una jornada de campo para entender mejor el comportamiento geológico del área de estudio y poder definir la columna estratigráfica local.

La metodología a seguir fue la siguiente:

- a. Interpretación de fotografías aéreas tomadas por INEGI - SINFA. Vuelo del 21 de noviembre de 1993, escala 1:75,000, F13 – 12, línea 124 y vuelo del 21 de octubre de 2004, escala 1:40,000, línea 247. Imágenes georeferenciadas en coordenadas UTM –

- ITRF92. Se delimitaron unidades litológicas y se diseñó un plan de trabajo de campo para realizar las verificaciones pertinentes.
- b. Descripción de cada unidad en campo con apoyo de estudios previos realizados por el Servicio Geológico Mexicano (SGM), el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) y artículos científicos existentes.
  - c. Análisis petrográfico del muestreo realizado en campo, para profundizar en la descripción litológica de las unidades estratigráficas de la región.

Toda la información obtenida sirvió de base para la construcción de un mapa geológico y la columna estratigráfica correspondiente.

3) Geología local: se basó en cortes litológicos obtenidos durante la perforación de pozos ubicados en las cercanías del sitio contaminado. Se realizó el análisis, la integración e interpretación de la información, definiendo las unidades hidroestratigráficas y delimitando su potencia y continuidad lateral.

Los pozos de monitoreo (PM) instalados en el sitio contaminado tienen un rango de profundidades de 8–13.5 m y los sondeos exploratorios alcanzan 8 m de profundidad, por lo tanto, la geología local está restringida a dichas profundidades. Con toda la información obtenida durante la etapa de perforación se configuraron 5 secciones geológicas que muestran el comportamiento del subsuelo.

### **2.1.2. Geofísica**

El estudio geofísico de la zona se realizó con base en la reinterpretación de la prospección geoelectrica hecha por Consultoría Betsco (2004). El método empleado fue el de Resistividad Eléctrica con la técnica de Sondeos Eléctricos Verticales (SEV), que consiste en inyectar corriente eléctrica al subsuelo con diferente intensidad, registrando los valores de diferencia de potencial arrojados por el medio físico. Posteriormente, la información es procesada para obtener valores de profundidades en los que se presentan los cambios en el comportamiento resistivo. Las gráficas de resistividad aparente y el procesamiento de la información eléctrica se muestran en el capítulo de resultados.

El arreglo usado fue el Schlumberger con una abertura entre electrodos (AB) de 200 m en 11 puntos diferentes, logrando profundidades máximas de 58 m. Se distribuyeron en todo el terreno y se colocaron, cuando fue posible, lo más cercano a un pozo, con la finalidad de poder establecer una correlación geológica–geofísica mucho más acertada.

De la reinterpretación geofísica se generaron 4 secciones geoelectricas que se presentan en el Capítulo 5 correspondiente a la discusión de la información, junto con la descripción de cada unidad geoelectrica interpretada y su correlación litológica e hidrogeológica.

### **2.1.3. Hidrología superficial y subterránea**

El estudio hidrológico se dividió en dos partes: (1) hidrología superficial y (2) hidrología subterránea. Como fuente principal para el desarrollo de ambas secciones se usó el estudio realizado por el IMTA y la CNA (2007) en el acuífero administrativo El Arenal. Como documento auxiliar se empleo el “Estudio de Actualización Geohidrológica Integral de las Cuencas de Atemajac – Toluquilla, Estado de Jalisco, México”, realizado por GEOEX S.A. de C.V. en 2004. Este último estudia las cuencas que se encuentran adyacentes a la zona de estudio y a pesar de no corresponder exactamente con la ubicación sirvió como comparativo para los resultados obtenidos.

Adicionalmente, para la hidrología superficial se consultaron las siguientes fuentes de información:

- Bases de datos de temperaturas medias anuales/mensuales y precipitaciones del Servicio Meteorológico Nacional (SMN; <http://smn.cna.gob.mx>).
- La Comisión Estatal del Agua de Jalisco (CEA Jalisco) y el Sistema de Información del Agua del Estado de Jalisco (SIAEJ) ([www.ceajalisco.gob.mx](http://www.ceajalisco.gob.mx)).
- Anuario Estadístico del Estado de Jalisco (INEGI, 2005), (<http://www.inegi.gob.mx/est/contenidos/espanol/sistemas/ae06/estatal/jal>).

Para la ubicación de los pozos de la región se acudió al Registro Público de Derechos del Agua (REPDA-CNA, 2009) obteniendo así una distribución espacial de los pozos disponibles en el área, con lo que fue posible diseñar una estrategia para el trabajo de campo que se llevó a cabo en enero de 2009. Durante la jornada de campo se determinó que la base de datos del REPDA presenta demasiadas inconsistencias en la ubicación de los pozos y se concluyó que solamente los pozos presentados por IMTA y aquellos censados en la campaña de campo de 2009 (PVA) serían tomados en cuenta para este trabajo.

Con el trabajo de campo se obtuvo la información necesaria para poder establecer direcciones de flujo, piezometrías y el comportamiento hidráulico del medio. Con la integración de toda la información se generó un modelo conceptual que describe el comportamiento hidrogeológico de la zona, mismo que se muestra en el capítulo de discusión de resultados.

## **2.2. TRABAJO DE CAMPO**

### **2.2.1. GEOLOGÍA**

El trabajo de campo se desarrolló del 1 al 20 de enero de 2009. Una vez interpretadas las fotografías aéreas de la región, se designaron puntos de verificación para corroborar el análisis fotogeológico desarrollado, comprobando así la ubicación de los contactos entre unidades geológicas.

Como base, se consultaron las siguientes cartas geológicas escala 1:50,000, realizadas por la entonces llamada Comisión de Estudios del Territorio Nacional (CETENAL) ahora Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI):

- TEQUILA F13D54,
- TESISTAN F13D55,
- TALA F13D64,
- GUADALAJARA OESTE F13D65.

Se visitaron 9 localidades, realizando un registro que contiene la siguiente información: color al fresco, color de la roca intemperizada, textura, génesis de la roca, estructura, mineralogía y clasificación litológica de campo. Se obtuvieron muestras en 8 de los 9 puntos de verificación, con lo que se desarrollaron láminas delgadas y el estudio petrográfico correspondiente.

Los registros de cada muestra fueron complementados con un reporte petrográfico que contiene la descripción microscópica (textura, estructura, mineralogía, alteraciones minerales, clasificación) y fotografías tomadas en microscopio petrográfico. Dichos reportes se encuentran en el Anexo 1.

### **2.2.2. HIDROLOGÍA**

La jornada de campo hidrogeológico (censo de pozos) se llevó a cabo del 1 al 20 de enero de 2009. Adicional al aspecto geológico, se planificó un estudio hidrogeológico que consistió principalmente en un censo de puntos de agua, abarcando los poblados de El Arenal, Amatitán, Santa cruz del Astillero, Huaxtla y Las Tortugas. El material empleado para el trabajo de campo se enlista a continuación:

- a) Cartas topográficas escala 1:50,000 (INEGI),
  - TEQUILA F13D54,
  - TESISTAN F13D55,
  - TALA F13D64,
  - GUADALAJARA OESTE F13D65.
- b) Dos sondas electrónicas marca HGE, México con una profundidad de 100 y 80 m,
- c) Sonda multifase marca Solinst,
- d) Base de datos del REPDA,
- e) GPS marca GARMIN modelo HGPS de Alta sensibilidad (H),
- f) Equipo para muestreo de suelo (frascos, etiquetas, guantes esterilizados, hielo, bolsas, etc.),
- g) Formatos para el correcto registro de las características de cada pozo,
- h) Herramienta básica general.

En total se censaron 14 puntos de agua y tomando la siguiente información de cada uno de ellos:

Coordenadas geográficas (UTM, WGS84), naturaleza del punto (noria, manantial, pozo entubado, etc.), uso de la captación, tipo de motor y bomba en caso de tener, diámetro de la columna de succión, diámetro de la tubería de descarga, profundidad total, profundidad del nivel estático y algunas observaciones adicionales. Los formatos testigo del trabajo de campo se encuentran en el Anexo 1.

Se diseñaron dos mapas piezométricos, uno para el año 2007 y otro para el 2009. Así mismo, un mapa de isoprofundidad del nivel estático (Capítulos 3 y 5, Entorno Natural y Discusión respectivamente).

En el sitio contaminado se llevaron a cabo 9 pruebas slug en pozos de monitoreo existentes. La interpretación fue realizada por el método Hvorslev (1951) que es útil para la estimación de la conductividad hidráulica (k). Adicionalmente se aplicó el criterio de análisis de Butler (1996) que sugiere concentrarse en los datos de carga normalizada que estén dentro del rango de 0.15 a 0.25 para obtener una mejor aproximación en el cálculo de la k. Esta metodología permite obtener una variación espacial de las propiedades hidráulicas del acuífero, es decir, se puede obtener un valor de k y de transmisividad (T) para cada pozo, pudiendo así generar, por ejemplo, mapas de isoconductividades.

Para la integración e interpretación de toda la información (trabajo de campo, IMTA (2007), REPDA, INEGI, SGM) se usaron como herramientas los programas Autocad 2010, Surfer 8.0, Global Mapper 8 y Adobe Illustrator CS3.

Adicionalmente, se recolectaron en el sitio contaminado, 20 kg de suelo, el cual fue inmediatamente puesto en refrigeración para ser transportado tanto a laboratorios particulares como a laboratorios pertenecientes a la UNAM y al Instituto Politécnico Nacional (IPN), en los cuales se llevaron a cabo una serie de pruebas enfocadas a obtener la eficiencia de los métodos de remediación de suelo contaminado propuestos en este proyecto, que se detallarán más adelante.

### **2.3. EXPERIMENTACIÓN EN LABORATORIO**

El trabajo de laboratorio se dividió en dos partes. La primera corresponde al análisis petrográfico de las muestras obtenidas en campo. Dicho proceso consistió en la elaboración de 8 láminas delgadas en el laboratorio de laminación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Una vez terminadas, se realizó un estudio en el laboratorio de petrología de la FI con ayuda de un microscopio petrográfico marca Carl Zeiss, modelo Axioiip con software KS-3000 analizador de imágenes y cámara digital Canon, obteniendo todas las propiedades ópticas de los componentes minerales y litológicos de cada muestra, con el objetivo de detallar la clasificación hecha en campo.

La segunda parte se enfocó al estudio del suelo contaminado recolectado en campo. Los laboratorios que facilitaron sus instalaciones para el desarrollo de esta fase de la experimentación fueron:

- Laboratorio de Tecnología Ambiental, IPN – Unidad profesional Interdisciplinaria de Biotecnología (UPIBI),
- Laboratorio de Química del Medio e Industrial, S. A. de C.V. (LAQMISA) (laboratorio acreditado).
- Laboratorio de Física de suelos del Instituto de Geología, UNAM.

Los análisis llevados a cabo en el suelo, se enlistan a continuación:

Humedad,	Materia orgánica,
Granulometría,	Carbono orgánico,
Capacidad de campo (curva de retención de humedad),	Nitrógeno,
Densidad real y aparente,	Fósforo soluble,
Cuenta microbiana,	Fosfatos totales,
Porosidad,	Capacidad de intercambio catiónico
Concentración inicial de TPH fracción Diesel,	Coeficiente de adsorción,

Las referencias consultadas para llevar a cabo cada análisis se detalla en el Anexo 2.

Una vez caracterizado el suelo, se desarrollaron pruebas de tratabilidad que permitieron conocer la eficiencia de los dos métodos de remediación empleados (lavado de suelos con surfactantes y biodegradación asistida) en un lapso de tiempo definido. Se hizo una comparación costo – efectiva entre ambos métodos y se analizó la mejor opción para implementar en el sitio contaminado.

#### **2.4. Caracterización ambiental del sitio contaminado**

Para definir el comportamiento del contaminante y determinar el impacto ambiental que tiene en el entorno se llevó a cabo el análisis de la siguiente información:

- Trabajos ambientales realizados previamente con resultados obtenidos en laboratorios especializados y acreditados (Laboratorios ABC, Química, Investigación y Análisis S.A. de C.V.) correspondientes a una etapa de muestreo de suelo y agua en los pozos de monitoreo y sondeos exploratorios instalados en el sitio contaminado. Los parámetros analizados en suelo fueron: TPH fracción media, Benzo (a)pireno, Benzo(k)fluoranteno y Naftaleno. En agua se analizaron los siguientes parámetros: Benceno, tolueno, Xilenos Totales y Naftaleno. Adicionalmente se realizaron mediciones en los pozos existentes para determinar la presencia y espesor del LNAPL. Se determinó la geometría y extensión de las plumas contaminantes en suelo, agua y fase libre. Se emplearon los programas Golden Software Surfer 8 y Autocad 2010 para la generación y diseño de las plumas contaminantes y el cálculo del volumen contaminado, como complemento a la interpretación usual realizada. Se utilizó como límite para la delimitación de la pluma los valores máximos permitidos que se establecen en Norma Oficial Mexicana NOM-138-SEMARNAT/SS-2003 “Límites máximos permisibles de hidrocarburos en los suelos y las especificaciones para su caracterización y remediación”.

#### **2.5. DISCUSIÓN**

Los resultados obtenidos presentados en el capítulo 4, se analizan en el capítulo de discusión, de esta manera se permite que cualquier interesado en analizar los datos experimentales con otra metodología, no tenga que tomar en cuenta los análisis y conclusiones propuestas en esta tesis.

El capítulo de discusiones muestra, en el primero de sus dos apartados principales, el análisis, la interpretación y la integración de los cortes litológicos, el estudio geoelectrico, las pruebas slug y los análisis de laboratorio. La segunda parte se enfoca en el diseño de los sistemas de remediación a instaurar, incluyendo aspectos técnicos, logísticos y económicos.



## **CAPÍTULO 3**

### **DESCRIPCIÓN DEL ENTORNO**

#### **3.1. Geología**

##### **3.1.1. Tectónica y geología regional**

##### **3.1.2. Geología semiregional**

##### **3.1.3. Geología local y del subsuelo**

#### **3.2. Edafología**

#### **3.3. Hidrología**

##### **3.3.1. Hidrología superficial**

##### **3.3.2. Hidrología subterránea regional**

##### **3.3.3. Hidrología subterránea local**

### **3.1. Geología**

#### **3.1.1. Tectónica y geología regional**

##### INTRODUCCIÓN

La zona de estudio se ubica dentro de la porción occidental de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) entre la costa de California y la unión triple de los rifts de Zocoalco, Chapala y Colima (Allan, 1986; Gómez-Tuena *et al.*, 2005), (Figura 3.1). Esta región está relacionada a la subducción de las placas de Cocos y Rivera desde el Mioceno medio. Es un campo volcánico constituido por depósitos emitidos durante el Pleistoceno con actividad volcánica que incluye flujos de lava, domos y conos. La actividad efusiva varía de composición riolítica a dacítica, hasta traquiandesítica y andesítica basáltica (Maldonado, 2007).

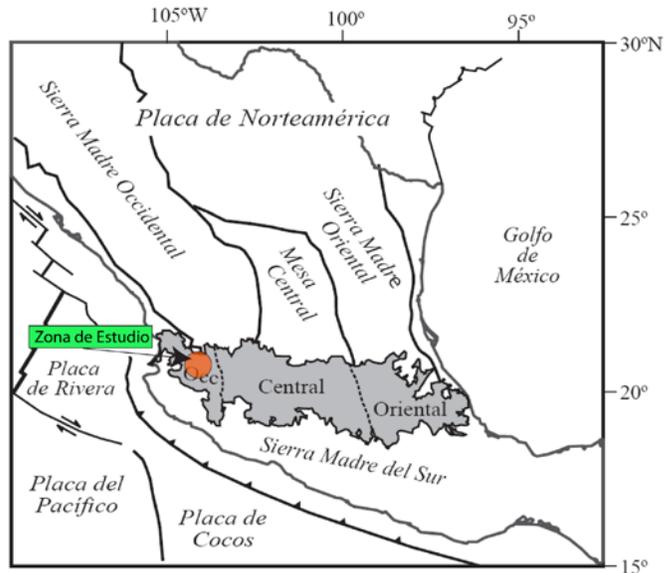


Figura 3.1. Ubicación del sector occidental (Occ) de la FVTM. Tomado de Gómez-Tuena *et al.*, 2005.

##### FISIOGRAFÍA Y GEOMORFOLOGÍA

La zona de estudio pertenece a la provincia fisiográfica del Eje o Meseta Neovolcánica, dentro de la sub-provincia de Chapala, según Raisz (1964), mientras que INEGI la cataloga como parte de la provincia del Eje Neovolcánico y que será llamada Faja Volcánica Transmexicana, por ser el nombre más aceptado en el ámbito científico.

De conformidad con Lobeck (1939), los rasgos geomorfológicos de la zona de estudio están constituidos por geoformas de segundo y tercer orden, de tipo construccional, volcánico principalmente, con influencia de una caldera (La Primavera), aparatos monogenéticos de salida central y varias estructuras tectónicas importantes, entre ellas el Punto Triple de Jalisco, conformado por la convergencia de tres fosas tectónicas: Tepic-Zacoalco, Colima y Chapala.

Las rocas volcánicas fueron extravasadas por estratovolcanes compuestos, derrames de fisura y conos volcánicos monogenéticos, siendo estos las estructuras volcánicas más jóvenes en la zona de estudio.

En los estratovolcanes El Arenal, Amatitán y Tomasillo, se encuentran flujos de lavas andesíticas a basálticas y emisiones de piroclastos y tobas de caída aérea con tonalidades rojizas (tezontle) a negras (tefras).

Las emisiones de la Caldera La Primavera, constituyen un rasgo particular en la zona circundante a la ciudad de Guadalajara, forman un paquete de piroclastos de naturaleza ácida, el mayor de la República Mexicana, y contienen el mayor acuífero regional en el estado de Jalisco (Ameca). Al sur de la caldera se encuentra el denominado Punto Triple de Jalisco, formado por la convergencia de tres grandes fosas tectónicas: Tepic-Zacoalco, Colima y Chapala.

Debido a las diferentes edades de actividad de estas estructuras, las más modernas cerraron valles entre estructuras volcánicas dando lugar a cuencas cerradas en proceso de relleno con materiales producto de la erosión de los terrenos basálticos, de tipo fluvial en sus partes bajas y aluvial de inundación en sus partes superficiales, estas últimas, formaron las planicies que se utilizan para cultivos y están constituidas por materiales arcillosos y arcillosimos. En los basaltos, tobas blancas y piroclastos, se han formado suelos residuales de poco espesor.

Hacia el sur, la meseta de Guadalajara se interrumpe para dar paso a la Alta Meseta, también de rocas volcánicas, con fallamiento en bloques, que conforman estructuras de hundimiento de tipo graben compuesto, en la zona de la Sierra El Travesaño y fosas tectónicas de Chapala y Citlala, que se prolongan o ceden su lugar a otras, como el graben El Salto.

### GEOLOGÍA DEL BASAMENTO DEL SECTOR OCCIDENTAL DE LA FVTM

La naturaleza geológica, edad y composición del basamento de la FVTM son características poco entendidas debido a que el basamento se encuentra cubierto por un potente paquete de rocas volcanosedimentarias de edades post-Mesozoicas. Esta limitante ha generado discusiones, por lo que la extensión geográfica de los terrenos cristalinos que afloran en el sur de México, y sus correlaciones con afloramientos aislados y con los xenolitos caracterizados en secuencias volcánicas recientes al norte de la FVTM, han estado sujetas a múltiples discusiones (Keppie y Ortega-Gutiérrez, 1998; Ruiz *et al.*, 1999).

Atendiendo a las reconstrucciones tectónicas y correlaciones estratigráficas propuestas por Sedlock *et al.* (1993) y Ortega-Gutiérrez *et al.* (1994), y al reconocimiento del microcontinente Grenvilliano Oaxaquia (Ruiz *et al.*, 1988; Keppie y Ortega-Gutiérrez *et al.*, 1995), la porción occidental de la FVTM podría estar emplazada en el terreno Guerrero (Figura 3.2).

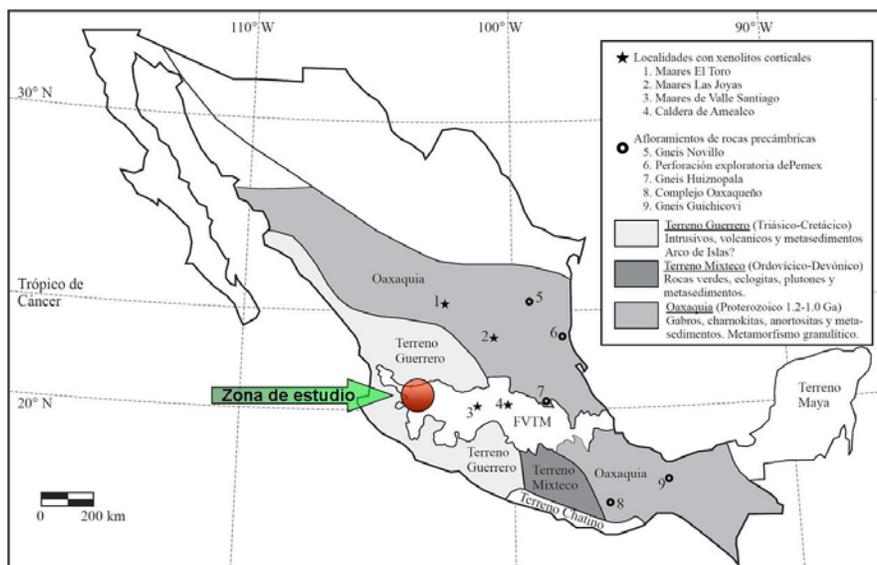


Figura 3.2. Mapa simplificado de los terrenos tectonoestratigráficos mexicanos que podrían formar el basamento de la FVTM. (Campa y Coney, 1983; Ruiz *et al.*, 1988; Sedlock *et al.*, 1993; Ortega-Gutiérrez *et al.*, 1994; Ortega-Gutiérrez *et al.*, 1995).

### Terreno Guerrero

El terreno Guerrero cubre una extensión ~700,000 km<sup>2</sup> y es, por tanto, el terreno más extenso de América del Norte. Fue definido originalmente por Campa y Coney (1983), y modificado por Sedlock *et al.* (1993). Está compuesto por rocas volcánicas y volcanoclásticas de afinidad oceánica a continental, con una importante componente de rocas sedimentarias marinas. Utilizando información esencialmente química, Centeno-García *et al.* (1993), sugieren que la base estructural del terreno Guerrero refleja un ambiente marino profundo, relativamente cercano al continente, sobre el cual se emplazó un arco de islas intraoceánico que fue acrecionado a la placa Norteamericana durante el Cretácico superior.

A pesar de que tradicionalmente se ha considerado que la mayor parte del terreno Guerrero está constituido por rocas de afinidad oceánica y de arco magmático, otros estudios stratigráficos, geocronológicos y estructurales han cuestionado la aloctonía del terreno Guerrero, y lo consideran como un conjunto de rocas volcánicas y sedimentarias depositadas sobre la corteza atenuada de la placa de Norteamérica, que fue posteriormente deformada por la orogenia Laramide (Cabral-Cano *et al.*, 2000). Así mismo, algunos datos geoquímicos recientes, obtenidos de xenolitos incorporados en rocas volcánicas del Oligoceno, han sugerido la existencia de rocas silíceas debajo del terreno Guerrero. Las edades modelo de Nd encontradas en las rocas intrusivas de la margen pacífica mexicana (Schaaf *et al.*, 1995), así como la de un xenolito granulítico encontrado en los depósitos piroclásticos de la caldera de Amealco, Querétaro (Aguirre-Díaz *et al.*, 2002), también sugieren la presencia de un basamento más antiguo. Estas evidencias indican que el terreno Guerrero probablemente se encuentra emplazado sobre rocas cristalinas de afinidad continental de edad precámbrica.

## TECTÓNICA ACTUAL

En gran parte de la FVTM ha existido una estrecha relación espacio-temporal entre el fallamiento y el vulcanismo. En la porción occidental de la FVTM, Demant (1981) fue el primero en señalar la existencia de tres depresiones tectónicas organizadas en una junta triple al sur de Guadalajara, nombrando a esta estructura “Graben Tepic-Chapala” (posteriormente definido como Tepic-Zacoalco).

El descubrimiento de rocas alcalinas asociadas al fallamiento extensional llevó a Luhr *et al.* (1985) a formular el modelo de rifting activo en el bloque Jalisco por efecto del “salto” al oriente de un segmento de la dorsal del Pacífico Oriental.

Ferrari y Rosas-Elguera (2000) concluyen que el rift Tepic-Zacoalco está constituido por una serie de grabens y semigrabens desarrollados en distintos episodios a partir del Mioceno tardío. Las estructuras más meridionales del rift Tepic-Zacoalco (graben de Puerto Vallarta, semigraben de Amatlán de Cañas, falla San Marcos y zona de fallas Zacoalco) muestran evidencias geológicas (Suárez *et al.*, 1994; Pacheco *et al.*, 1999) de actividad tectónica durante el Cuaternario.

Posteriormente, Rosas-Elguera *et al.* (1996) y Garduño-Monroy *et al.* (1998) documentaron la existencia de la denominada falla Tamazula, que consta de un conjunto de estructuras transcurrentes y normales de orientación NE-SW pasando por el complejo volcánico de Colima y que llegaría hasta la costa del área de Manzanillo. Estos autores proponen que dicha falla representa el límite oriental del bloque Jalisco, al sur del Volcán de Colima. Se ha propuesto que los rifts Tepic-Zacoalco y Colima (Figura 3.3), representan los límites continentales del bloque que fueron parcialmente reactivados durante el Plioceno-Cuaternario con movimientos esencialmente extensionales, como consecuencia de los esfuerzos aplicados al límite de las placas de Rivera y de Norteamérica.

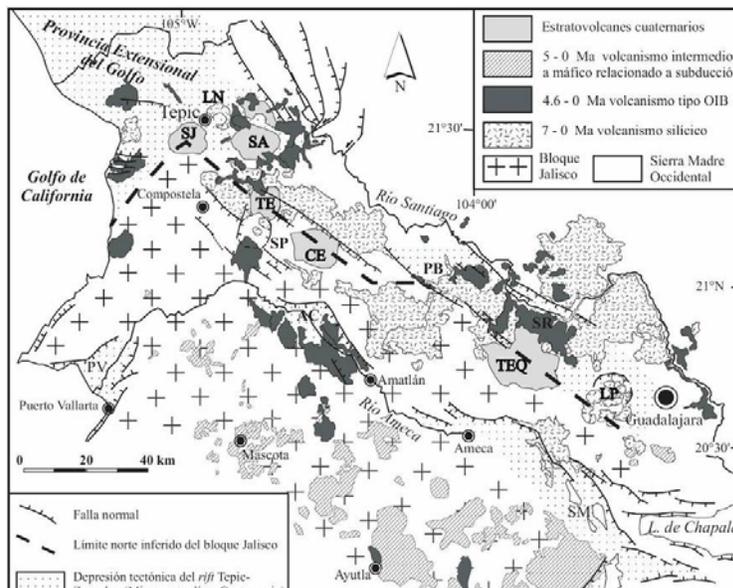


Figura 3.3. Mapa del sector occidental de la Faja Volcánica Transmexicana que muestra las principales fallas extensionales y la distribución del volcanismo posterior a los 7 Ma. Las estructuras volcánicas principales son: volcán San Juan (SJ), volcán Las Navajas (LN), volcán Sangangüey (SA), volcán Tepeltitc (TE), volcán Ceboruco (CE), volcán Tequila (TEQ), caldera La Primavera (LP). Las principales estructuras tectónicas son: graben de Puerto Vallarta (PV), graben San Pedro-Ceboruco (SP), semigraben de Amatlán de Cañas (AC), graben Plan de Barrancas-Santa Rosa (PB-SR), semigraben de San Marcos (SM). Tomado de Gómez-Tuena *et. al.* ( 2005).

El brazo oriental de la junta triple de Guadalajara lo conforma el rift de Chapala, que fue definido inicialmente como un graben de dirección E-W (Demant, 1978) formado en respuesta a una extensión ~N-S durante el Plioceno-Cuaternario (Garduño-Monroy *et al.*, 1993). Estudios posteriores demostraron que se trata en realidad de una estructura compuesta por dos semigrábens con vergencia opuesta: sur en la parte oeste y norte en la parte este (Urrutia-Fucugauchi y Rosas-Elguera, 1994; Rosas-Elguera y Urrutia-Fucugauchi, 1998). Las fallas maestras de estos semigrábens cortan a rocas de 3.4 Ma en el área de Chapala (Rosas-Elguera y Urrutia-Fucugauchi, 1998) y 3.3 Ma en Pajacuarán-Ixtlán de los Hervores (Rosas-Elguera *et al.*, 1989), aunque la morfología de los escarpes de fallas alude que la tectónica no fue activa durante el Cuaternario. Un fallamiento de edad cuaternaria se sugiere, en cambio, en el graben de Citlala, una estructura paralela ubicada inmediatamente al sur de la Laguna de Chapala (Garduño-Monroy *et al.*, 1993; Rosas-Elguera y Urrutia-Fucugauchi, 1998). Más al sur, el semigraben de Cotija es una estructura extensional de dirección WNW-ESE con vergencia al SSW que corta a las rocas del Mioceno tardío (Rosas-Elguera *et. al.*, 2003).

En resumen, las evidencias geológicas reportadas hasta el momento señalan que la FVTM se encuentra en buena medida bajo un régimen tectónico distensivo, aunque las fallas cuaternarias de la porción central de la FVTM tienen una pequeña y variable componente lateral izquierda. El régimen débilmente transtensivo se explica considerando que la convergencia entre las placas de Cocos y de Norteamérica es ligeramente oblicua, y que existe una partición de la deformación en el límite de placa que hace necesario acomodar la componente de movimiento paralela a la trinchera (izquierda) en la placa superior (Ego y Ansan, 2002). La FVTM es el lugar más apropiado para acomodar esta componente lateral izquierda debido a que representa la principal zona de debilidad cortical al norte de la trinchera (Ego y Ansan, 2002).

La configuración actual de la zona de subducción mexicana es el resultado de la fragmentación sucesiva que sufrió la placa Farallón al momento en que las crestas mesoamericanas llegaron en proximidad con la zona de subducción de la placa Norteamericana. Este proceso de fragmentación produjo importantes reorganizaciones en la configuración de crestas meso-

oceánicas y también originó cambios en la dirección y en la velocidad de convergencia a lo largo de la margen continental del Pacífico (Engelbreton *et al.*, 1985).

### **3.1.2. Geología semiregional**

#### INTRODUCCIÓN

La zona de estudio se ubica en el estado de Jalisco, al NW de la Ciudad de Guadalajara. Abarca los poblados de Tequila, Amatitán, Sta. Cruz del Astillero, Huaxtla, Talá y Tesistán. La geomorfología está dominada por estratovolcanes y conos cineríticos, en cuyos flancos se aprecian rocas de composición intermedia (andesitas de flanco) cubiertas parcialmente por suelo residual y depósitos aluviales. Los principales rasgos geográficos presentes en el área son el Volcán Tequila, el Cerro Amatitán, Cerro Tomasillo y el Río Grande de Santiago, en donde se encuentra la central hidroeléctrica Manuel M. Diéguez (presa Santa Rosa) (Figura 3.4).

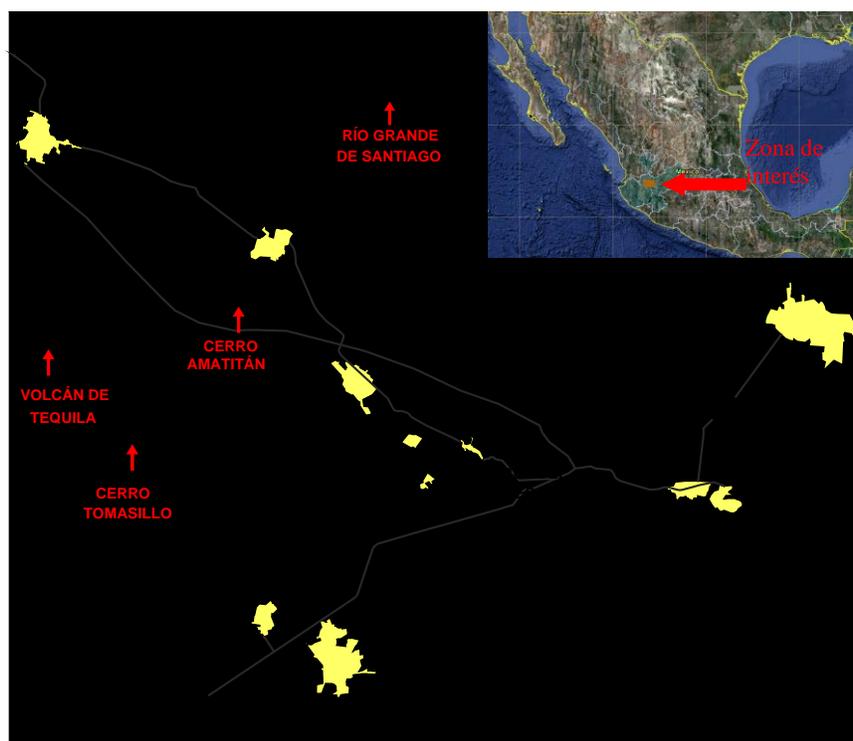


Figura 3.4. Localización de la zona de interés. Líneas negras continuas representan las vías principales de comunicación entre poblados. Polígonos en amarillo muestran los poblados principales de la región.

Los afloramientos más importantes en cuanto a su extensión son tobas y derrames riolíticos de composición félsica y rocas basálticas de composición máfica que se formaron durante dos periodos de vulcanismo. El primero del Mioceno al Plioceno que corresponde a la actividad de la Sierra Madre Occidental, y el segundo durante el Pleistoceno que pertenece al vulcanismo de la Faja Volcánica Transmexicana.

El Volcán Tequila es un estratovolcán de composición calcoalcalina, cuya última erupción se generó hace 200,000 años. Está compuesto por intercalaciones de unidades que todavía no están formalmente definidas (no están fechadas y no tienen una sección tipo), pero estructuralmente se establece la siguiente secuencia de base a cima: andesitas periféricas, andesitas de flanco, andesitas Tomasillo, andesitas antiguas y andesitas Tequila. La cima del volcán está conformada por una espina dacítica que ocupa el centro del cráter parcialmente colapsado. El cráter tiene una orientación NE-SW, y la conjugación parcialmente colineal del cráter con otros aparatos volcánicos cercanos hace pensar en la existencia de un sistema de

fracturas enterradas, por donde emanaron los productos primarios que dieron lugar a los edificios volcánicos presentes en la zona. Dicho sistema de fracturas, se correlaciona con el sistema transtensional de esfuerzos que dio lugar al rift de Chapala.

A profundidad se ha inferido la presencia de un potente horizonte de rocas sedimentarias calcáreas de la Formación Morelos y lutitas y areniscas de la Formación Mezcala del Cretácico medio y superior, respectivamente (IMTA-CNA, 2007), y que INEGI reporta (Fm. Mezcala) en su carta geológica 1:50,000 Tequila F13D54 en las cercanías de la hidroeléctrica Santa Rosa, subyaciendo a las rocas volcánicas.

Las unidades descritas, de cima a base, son las siguientes:

Nombre de la unidad	Símbolo	Época Geológica	Edad (Ma)
Residual	Qre	-	Reciente
Aluvial	Qal	-	Reciente
Domos Riolíticos La Primavera	Qprp	Pleistoceno	0.035-0.65
Toba Talá	Qptt	Pleistoceno	0.12
Andesitas del Volcán Tequila	Qpvt	Pleistoceno	0.65
Andesitas Cerrito Colorado	Qpcc	Pleistoceno	~0.65
Basaltos Cerro Tomasillo	Qpct	Pleistoceno	~0.75
Basaltos Mesa Santa Rosa	Qpsr	Pleistoceno	0.9-2.5
Riolita Cerro Amatitán	Qpca	Pleistoceno	~2.5
Riolita Los Bailadores	Npcb	Plioceno	2.5-3.7
Piroclastos San Lorenzo	Npsl	Plioceno	3.07
Riolita La Tortuga (Grupo Guadalajara)	Nmrt	Mioceno	7.1-7.5
Basaltos San Cristóbal (Grupo Río Santiago)	Nmsc	Mioceno	8.0-11.0
Lutitas y Areniscas Fm. Mezcala	Kmx	Cretácico Superior	Cretácico

Tabla 3.1. Unidades estratigráficas involucradas en la geología regional, ordenadas cronológicamente de cima a base. Fechas tomadas del International Commission on Stratigraphy (2009).

La distribución espacial de las unidades mencionadas en el área de estudio se muestra en el mapa geológico de la zona (Figura 3.5).

## CRETÁCICO

### *Formación Mezcala (Kmx)*

Constituida por una alternancia de areniscas, limolitas y lutitas de color pardo a verde, con estratificación delgada. Sobreyace la Formación Morelos y subyace a los derrames volcánicos del Oligoceno. Por la posición estratigráfica que ocupa y por sus características litológicas se ha correlacionado con rocas del Cretácico superior que afloran al sur del estado de Jalisco.

Dentro de la zona de estudio se aprecia un pequeño afloramiento en las cercanías de la presa hidroeléctrica Santa Rosa (Manuel M. Domínguez), subyaciendo rocas basálticas de la unidad Basaltos San Cristóbal. Dicho afloramiento muestra una intercalación de lutitas y areniscas de grano medio color marrón claro (cremoso) con motes blancos, teniendo las lutitas espesores de 4 a 25 cm y las areniscas de 70 a 80 cm. Las rocas están altamente intemperizadas y en general presentan dos familias de fracturas

**Figura 3.5.** Mapa Geológico del área de estudio.

casi verticales ( $S25^{\circ}W, 87^{\circ}$  y  $N85^{\circ}E, 89^{\circ}$ ) (Figura 3.6). Contienen una cantidad importante de carbonato de calcio y en ocasiones es posible encontrar fragmentos de caliza pertenecientes a la Formación Morelos que petrográficamente muestra un mosaico mineral microcristalino con material arcilloso, compuesta en un 90 % por aloquímicos (microfósiles) identificados como algas verdes, y 10 % de material arcilloso (Figura 3.7). Por el alto grado de cementación y granulometría, no se consideran rocas con algún potencial acuífero. Las grandes exposiciones de esta secuencia se localizan en la Sierra Tapalpa y Sierra La Laja fuera del área de estudio (IMTA-CNA, 2007).



Figura 3.6. Afloramiento de la Formación Mezcala. Localidad ubicada en la margen derecha del río Grande de Santiago, en las cercanías de la Presa Santa Rosa (Manuel M. Dieguez, CFE) (PVG6).

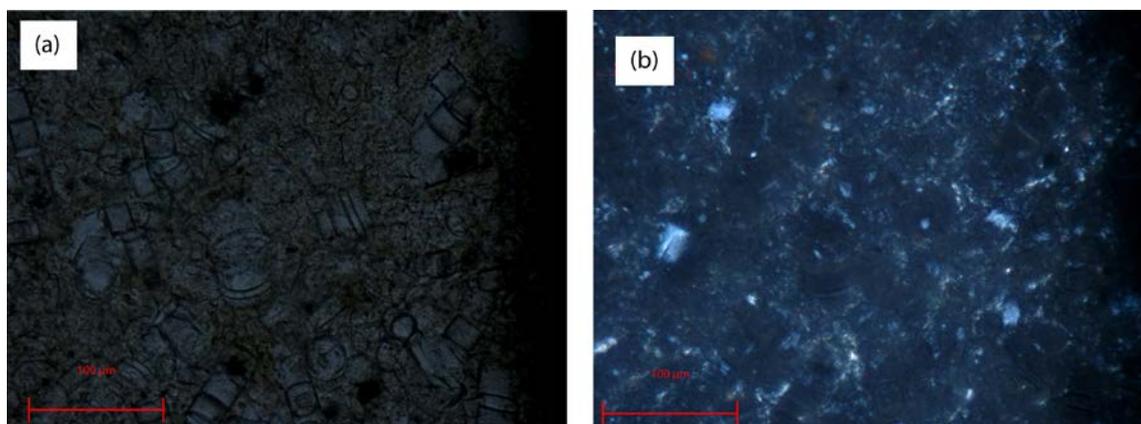


Figura 3.7. Fotomicrografías que muestran los microfósiles (algas verdes?) y el material arcilloso presentes en las rocas de la Formación Mezcala. A) Fotografía con luz paralela. B) Fotografía con luz paralela polarizada.

## CENOZOICO (NEÓGENO) MIOCENO

### *Basaltos San Cristóbal (Nmsc) (8 a 11 Ma)*

Corresponde a derrames y brechas de composición andesítica, andesítica-basáltica y basáltica. Esta sucesión constituye el principal cuerpo del Grupo Río Santiago documentado por Rossotti *et al.* (2002) y se expone en el cañón del río que lleva el mismo nombre. La base no se encuentra expuesta y el máximo espesor observable es de 800 m. Las unidades obtenidas para esta unidad van de 8.5 a 11 Ma (Watkins *et al.*, 1971; Moore *et al.*, 1994).

Espacialmente se ubica al NW de la zona de estudio subyaciendo las Riolitas Cerro La Tortuga que se ubican en la porción oriental, y a su vez está en contacto con las Andesitas del Volcán Tequila (Figura 3.5). La parte norte de la sucesión ha sido originada por dos pequeños estratovolcanes localizados cerca de García de La cadena y estos constituyen la actividad inicial

de este vulcanismo máfico. Hacia el oeste de estos volcanes hay varias mesas de flujos basálticos porfíricos y masivos que tienen espesores máximos de 400 m.

Esta unidad es una secuencia de estratos de 2 a 20 m de espesor (en general de 5 a 10 m), con echados de 5° a 8° al SSE (Figura 3.8). En la cima de cada flujo se observan delgadas líneas rojas producto de la alteración termal causada por el flujo que venía a cubrir al anterior. La base muestra brechas autoclásticas debidas al propio avance del flujo.

Petrográficamente, presenta textura microlítica con escasas vesículas de pequeñas dimensiones. Hay micro y macrocristales de piroxeno y vidrio. Los fenocristales de plagioclasa son de composición intermedia a cálcica (labradorita-bitownita). En toda la muestra se observan manchas verdosas que indican una alteración que provoca la precipitación de clorita (Figura 3.9).

Esta unidad contiene agua subterránea únicamente en fracturas. En la parte baja de la sucesión el basalto se muestra masivo y con muy raras vesículas, en ocasiones rellenas por una mineralización secundaria.



Figura 3.8. a) Afloramiento de los Basaltos San Cristóbal mostrando flujos andesítico-basálticos de poco espesor, el color ocre es debido a la intemperización de la roca. b) Color al fresco de las rocas basálticas (PVG7).

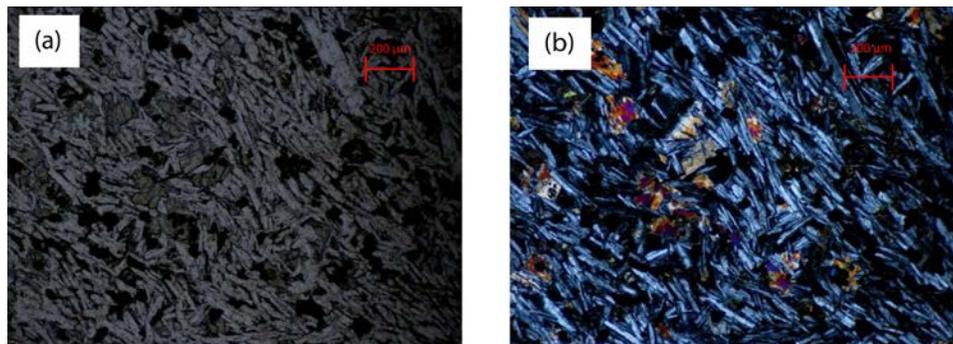


Figura 3.9. Fotomicrografías de los Basaltos San Cristóbal. a) Luz paralela, b) Luz paralela polarizada. Se observa la matriz microlítica de plagioclasas. Minerales con alta birrefringencia corresponden a piroxenos diseminados en toda la matriz.

### Riolita La Tortuga (Nmrt) (7.1 a 7.5 Ma)

La Riolita la Tortuga es un complejo de 210 km<sup>2</sup> aproximadamente (Rossotti *et al.*, 2002), localizado a pocos metros del poblado de Tesistán y ocupa toda la porción NE de la zona de estudio (Figura 3.5). Sobreyace a los Basaltos San Cristóbal y subyace a los Piroclastos San Lorenzo. El Cerro La Tortuga está formado por flujos de lava viscosos de composición riolítica y flujos piroclásticos, producto de la fusión de varios domos grandes, algunos de ellos colapsaron hacia la periferia produciendo depósitos de flujos de ceniza y bloques.

Varios diques riolíticos se encuentran aflorando en el área de colapso. Convergen hacia un área entre el Cerro La Col y el Cerro La Tortuga, sugiriendo la existencia de un conducto central alimentador y una única cámara magmática a profundidad. En la base del Cerro La Tortuga predominan los flujos piroclásticos que probablemente representan una fase temprana de poca energía y erupciones ricas en gas. En la parte baja, estos flujos son de color marrón, masivos y vítreos, escasa presencia de cuarzo, feldespatos alterados con más de 5 mm de largo y vesículas alargadas que muestran la dirección de flujo. La parte superior se comporta de manera similar exceptuando la presencia de vesículas (Rossotti *et al.*, 2002). Los flujos riolíticos frecuentemente muestran bandas de alteración desarrollando minerales arcillosos, están fuertemente soldados y tienen pocos metros de espesor.

## PLIOCENO MEDIO

### *Piroclastos San Lorenzo (Npsl) (3.07 Ma)*

Dentro de esta unidad se agrupan tobas pumíticas, vítreas y líticas, de composición intermedia, color gris amarillento a marrón grisáceo oscuro, rocas representativas de eventos explosivos en el Plioceno. Varios flujos de piroclastos y depósitos de caída quedan al interior de la Cuenca Arroyo San Lorenzo y abarca en su totalidad al poblado de Tesistán. La secuencia tiene espesores máximos de 200 m y se ha estimado un volumen de 4.1 km<sup>3</sup> (Rossotti *et al.*, 2002). El único contacto claro se encuentra en la base de la unidad y es con la Riolita Cerro La Tortuga subyaciendo a esta unidad, creando así una barrera para los flujos que entran. Esta unidad se encuentra cubierta en gran parte por la Riolita Cerro Los Bailadores y los Basaltos Mesa Santa Rosa (Figura 3.5). Las dataciones hechas con K/Ar por Gilbert *et al.* (1985) le asignan una edad de 3.07 Ma para una oligoclasa obtenida de una de las capas pumíticas.

En la base de la sucesión se pueden encontrar ignimbritas de color gris claro con abundantes pómez de color marrón. También se presentan líticos de basaltos e ignimbritas. Depósitos clásticos retrabajados y mal seleccionados con fragmentos de más de 2 cm permiten observar la naturaleza del depósito. Estos depósitos presentan oxidación por secciones o bandas, gradación inversa y en ocasiones estratificación cruzada (Figuras 3.10 y 3.11).

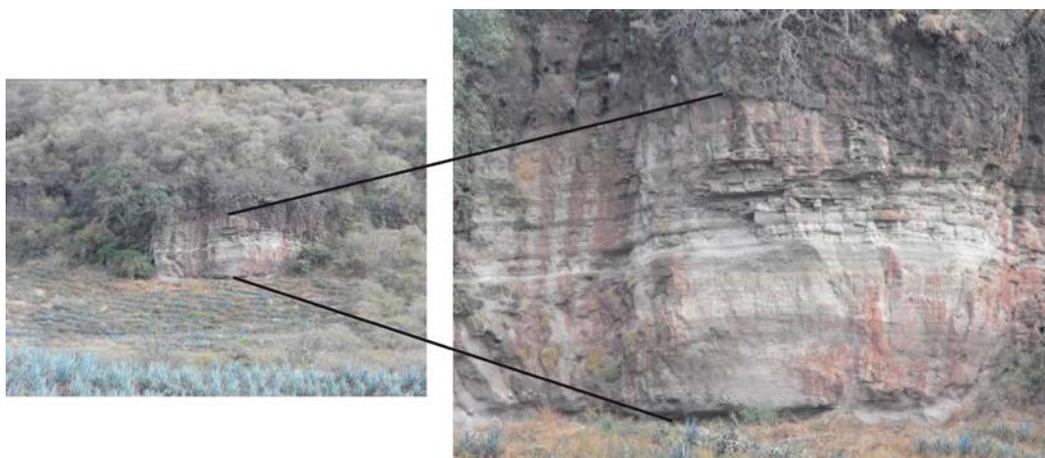


Figura 3.10. Depósitos piroclásticos de la unidad San Lorenzo (PVG3).



Figura 3.11. Bandeamiento, producto de la oxidación presente en los depósitos piroclásticos.

Petrográficamente muestra una textura piroclástica y matriz microlítica. Se aprecian fenocristales subhedrales de plagioclasa de composición intermedia (andesina - labradorita), cristales de subhedrales a anhedrales de feldespatos (sanidina) diseminados en una matriz compuesta por vidrio y microcristales de cuarzo. Hay presencia de líticos (riolitas principalmente) y cristales de plagioclasa corroídos (Figura 3.12). El vidrio presente tiene abundantes inclusiones de óxidos e hidróxidos que son los responsables de la oxidación por bandeamiento que se observa en los afloramientos.

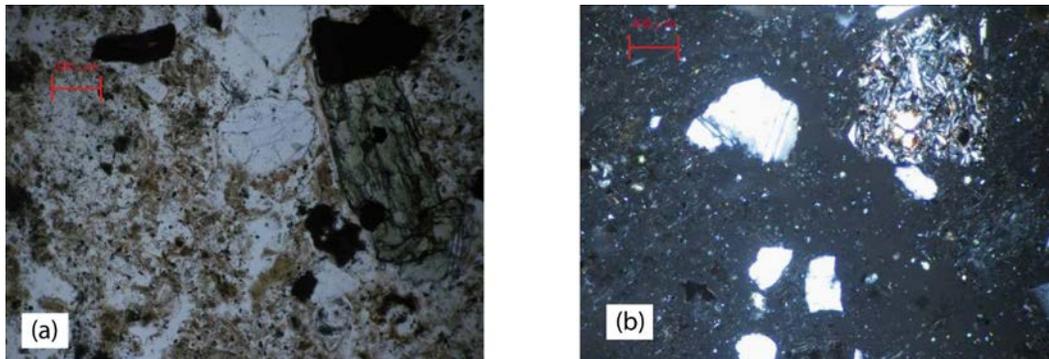


Figura 3.12. (a) Fotomicrografía que muestran un cristal subhedral de piroxeno y (b) lítico que corresponde a una roca de composición riolítica (b).

#### *Riolita Cerro Los Bailadores (Npcb) (2.5 a 3.7 Ma)*

El Cerro Los Bailadores es un gran complejo de domos riolíticos que sobreyace a los Piroclastos San Lorenzo al norte de la Sierra La Primavera, está en contacto (subyaciendo) con la Toba Talá y los Basaltos Mesa Santa Rosa. Los domos cubren cerca de 154 Km<sup>2</sup> con espesores máximos de 500 m y volumen estimado de 30 Km<sup>3</sup>. Las lavas están fuertemente soldadas y presentan buen desarrollo de fracturas columnares. Los flujos piroclásticos silíceos y los depósitos de caída de pómez se pueden observar en la base con espesores máximos de 100 m (Rossotti *et al.*, 2002). La edad calculada para esta unidad va de 3.07 a 2.5 Ma.

Los domos tienen fenocristales de cuarzo, feldespato y biotita de 3 mm de diámetro. Se pueden observar bandas rojas de oxidación, la lava es de composición porfirítica con matriz microcristalina. La mayoría de los fenocristales están formados por plagioclasas euhedrales, zonadas y macladas. También es posible encontrar olivinos y piroxenos ligeramente alterados (Rossotti *et al.*, 2002).

## PLEISTOCENO

### *Riolita Cerro Amatitán (Qpca) (~2.5 Ma)*

En la literatura se encuentran escasas descripciones de esta unidad (Carta Geológico–Minera, Jalisco F13-12, SGM). Aflora en la parte NW del área de estudio y está representada por un aparato volcánico en forma semicircular. Entra en contacto discordante al oeste con las Andesitas del Volcán Tequila y al este con los Basaltos Mesa Santa Rosa, siendo más joven que ambas unidades.

Es una roca de composición riolítica con un alto grado de fracturamiento e intemperismo. Por el trabajo de campo realizado en 2009, la roca ha sido clasificada como una toba de composición riolítica (Figura 3.13)

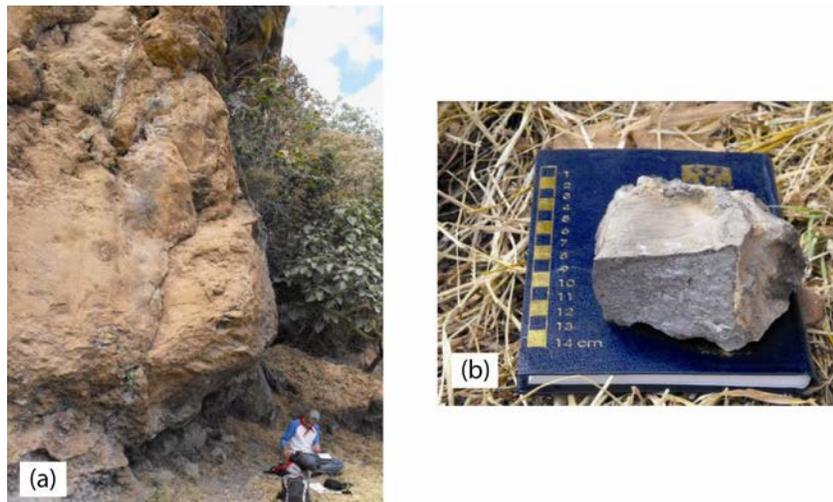


Figura 3.13. (a) muestra un afloramiento en donde se observan las tobas riolíticas del Cerro Amatitán. (b) muestra de mano de la unidad geológica (PVG1).

Petrográficamente la roca tiene una textura esferulítica con una matriz microcristalina, está constituida por fenocristales de cuarzo, plagioclasa de composición intermedia (oligoclasa-andesina) y cristales anhedrales y subhedrales de feldespato potásico (sanidina), soportados por una matriz cuarzo-feldespática con vidrio intersticial (Figura 3.14).

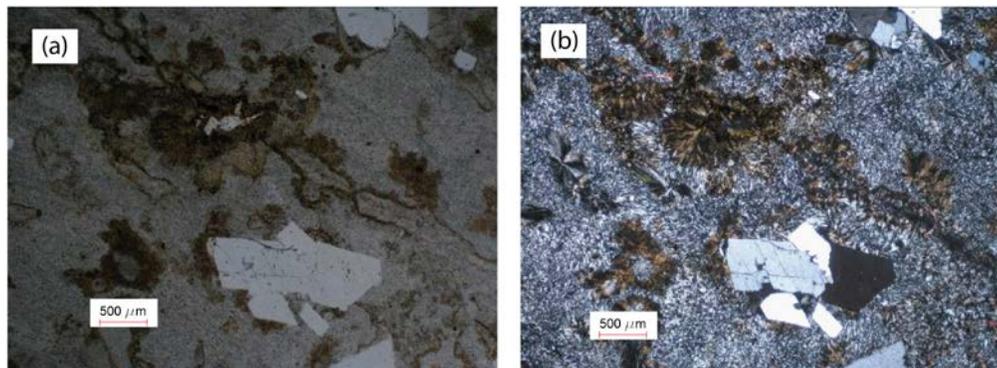


Figura 3.14. Fotomicrografías en luz paralela (a) y luz paralela polarizada (b). Al centro se aprecia un cristal de Feldespato potásico y plagioclasas. En la parte superior se observa una esferulita bordeada por hematita y goethita limonita.

### *Basaltos Mesa Santa Rosa (Qpsr) (0.9 a 2.5 Ma)*

Esta es una sucesión de flujos de lava máficos expuestos al centro-noroeste de la zona de estudio. Limita al norte con los Basaltos San Cristóbal, al oeste con la Riolita Cerro Amatitán y al sur-sureste con la Toba Tala y la Riolita Cerro Bailadores, sobreyaciendo a todas ellas. Tienen espesores de hasta 150 m. Varios autores (Mahood, 1981) han datado rocas pertenecientes a este grupo de basaltos por el método K/Ar y las edades que se reportan oscilan entre 0.9 y 2.5 Ma.

Es una roca color gris oscuro masiva con alto contenido de vesículas. Petrográficamente se observa una textura vesicular (huecos vacíos) y una matriz constituida por un intercrecimiento microlítico de plagioclasas con una tendencia de flujo que provoca que las vesículas se estrangulen y se interconecten. Los fenocristales presentes son de plagioclasa, algunas zoneadas y otras macladas, de composición intermedia a básica (labradorita-bitownita). Adicionalmente se pueden encontrar cristales subhedrales y anhedrales de piroxeno (augita). El olivino presente exhibe un estado de alteración debido al proceso de oxidación (iddingsita) al igual que las micas.

#### *Basaltos Cerro Tomasillo (Qpct) (~0.75 Ma)*

El Cerro Tomasillo es un estratovolcán de pequeñas dimensiones, representa una de las emanaciones más viejas de los flancos del volcán Tequila, tiene una elevación de 2160 m, pertenece a un trend que une varios centros volcánicos en dirección NW, incluyendo al volcán Tequila. Espacialmente se encuentra rodeado por las Andesitas de éste volcán. Las lavas de este volcán son andesitas porfídicas con cristales de plagioclasa, ortopiroxeno y augita en un agregado vítreo de color negro. La composición general de la zona es de escorias andesíticas y lapilli.

#### *Andesitas del Volcán Tequila (Qpvt) (0.65Ma)*

El sector de Tequila es particularmente interesante por la diversidad de productos volcánicos que fueron emitidos. El Volcán Tequila se edificó sobre los relieves volcánicos más antiguos, es un imponente cono volcánico de 1300 m de altura abierto al lado nororiental. Al igual que el Sangangüey se caracteriza por la presencia de un pitón de 150 m de altura desde el cráter, con facies brechoides desde la periferia.

Sus flancos se componen de lavas andesíticas ricas en sílice, en forma de flujos de poco espesor. Tres pequeños flancos adventicios se reconocen en los costados oriental y suroriental, con derrames de lava asociados. La forma abierta del volcán no parece ser el resultado de una fase explosiva violenta si no de un colapso seguido por erosión. En la cima aparecen cenizas finamente estratificadas que constituyen los restos de un cono piroclástico. El volumen de lava emitido por este volcán se calcula en 25 Km<sup>3</sup>.

En el flanco meridional del Volcán Tequila existe un conjunto de aparatos alineados NW-SE, con lavas de composición andesítica y más porfídicas. Los derrames son de gran potencia con canales y estrías de flujo bien desarrolladas. El más importante y antiguo de estos cráteres adventicios es el Cerro Tomasillo. El Cerro las Garzas es un cono piroclástico que se abrió para dar paso a dos derrames andesíticos importantes. Al norte, se ubica un domo afectado considerablemente por la erosión, de donde partieron derrames de lava que alcanzaron el poblado del Arenal. Estas andesitas están en contacto con los Basaltos San Cristóbal al NW del área de estudio y con las riolitas del Cerro Amatitán y los Basaltos Mesa Santa Rosa al centro, sobreyaciéndolas.

En general las lavas de esta unidad presentan una coloración pardo clara, con una textura porfídica amigdalar y escasas vesículas (Figura 3.15). Petrográficamente se observa una textura traquítica, que indica la dirección de flujo, vesículas con indicios de relleno incipiente y fenocristales subhedrales de plagioclasa de composición intermedia (andesina-labradorita),

crisales subhedrales y anhedrales de piroxeno (augita) diseminados en una matriz microlítica de composición sódico-cálcica, con semiparalelismo. Debido a la existencia de microfracturas, algunas de las vesículas están interconectadas (Figura 3.16).



Figura 3.15. Muestra de mano de las Andesitas del Volcán Tequila (PVG2).

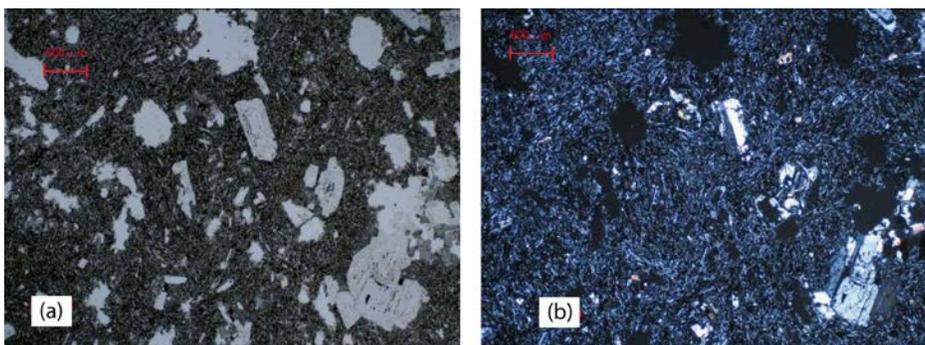


Figura 3.16. Fotomicrografías que muestran la textura traquíutica de la roca.

#### *Toba Tala (Qptt) (0.12 Ma)*

La Toba Tala representa una gran cantidad de materiales piroclásticos que cubren una amplia superficie (~1200 km<sup>2</sup>) alrededor de la caldera La Primavera y por tanto cubren la mayor parte de las depresiones topográfico-estructurales y valles del área de estudio (Mahood, 1981) (Figura 3.5).

Estos depósitos están integrados por tobas de caída libre, lapilli y flujos de ceniza con abundantes fragmentos de pumicita, con menor vidrio volcánico, fragmentos y bloques de basalto, andesita y riolita. Dichos fragmentos y bloques fueron arrojados por las actividades explosivas de la caldera La Primavera.

En los afloramientos de esta unidad es posible observar materiales de color blanco, gris y pardo claro (cremoso) dispuestos en capas de poca potencia (1-30 cm) bien estratificadas, con locales evidencias de estratificación cruzada. En algunas localidades se observan abundantes esferulitas de 5-10 cm de diámetro.

Por el análisis petrográfico realizado (Figura 3.18) la unidad es subdividida en toba cristalolítica y toba vítrealítica.

Subunidad de toba cristalolítica: Roca con textura esferulítica dominante y matriz microcristalina de composición cuarzo-feldespática. Las esferulitas están formadas por vidrio alterado y óxidos e hidróxidos de hierro. Se observan fenocristales subhedrales de cuarzo y plagioclasa diseminados en la matriz. Por la gran variedad de texturas observadas es posible determinar que los primeros elementos en aparecer fueron los cristales de cuarzo y plagioclasa, después comenzó un proceso de vitrificación que provocó la aparición y crecimiento de esferulitas entre los cristales. Hay microfracturamiento importante que podría indicar un buen potencial para almacenar y transmitir agua.

Subunidad de toba vítrealítica: el elemento más abundante es el vidrio. Presenta gran cantidad de líticos que exhiben matriz microlítica. Hay signos de alteración por oxidación, precipitando hematita en los bordes de algunos cristales.

Desde un punto de vista hidrogeológico, la Toba Tala tiene características granulométricas y escasa compactación que se traducen en una elevada porosidad y permeabilidad que permite una rápida infiltración del agua de lluvia, constituyendo así acuíferos libres de alta potencialidad (GEOEX-SIAPA, 2004), sin embargo para el presente trabajo estas características hidráulicas son discutidas en el Capítulo 6.

Por su posición estratigráfica esta unidad representa un especial interés ya que es la unidad geológica contaminada.

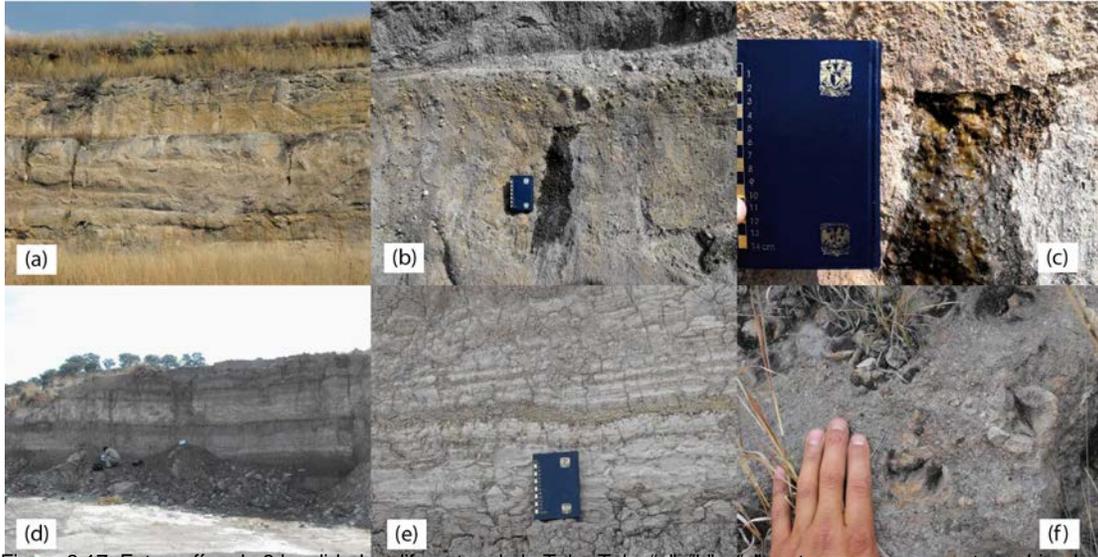


Figura 3.17. Fotografías de 3 localidades diferentes de la Toba Tala. “a”, “b” y “c” pertenecen a una cantera ubicada a ~100 m del sitio contaminado. “b” y “c” muestran canales de drenado de agua subterránea. “d” y “e” exponen la laminación. “f” exhibe la textura esferulítica característica de la Toba Tala.

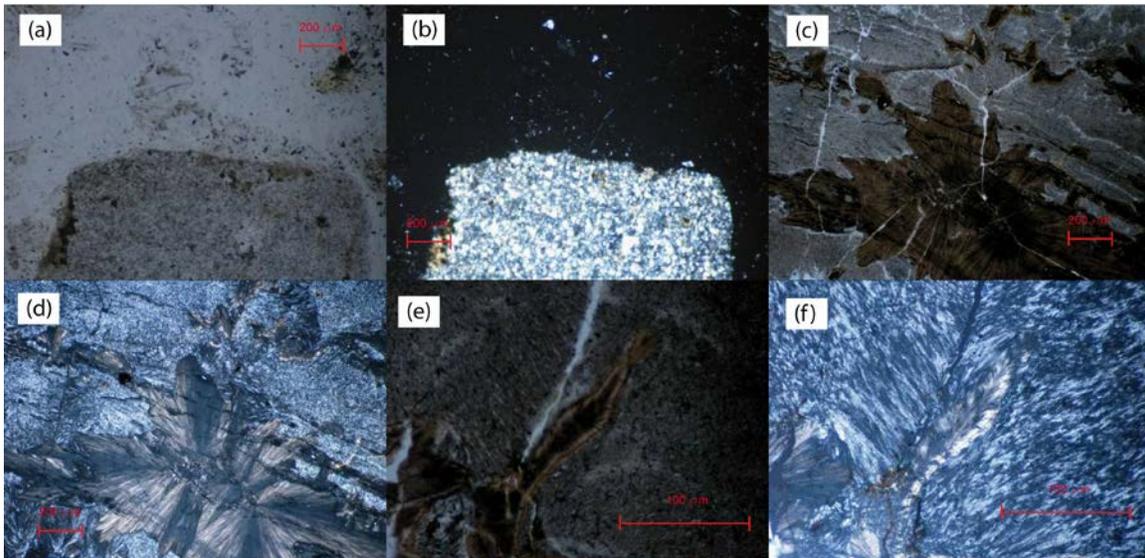


Figura 3.18. Fotomicrografías de la Toba Tala. “a” y “b” muestran un litico de composición riolítica. En “c” y “d” se observa una esferulita y la matriz microlítica con un alto grado de fracturamiento. En “e” y “f” se aprecia el inicio del intercrecimiento de una esferulita y el fracturamiento presente en la roca.

***Domos Riolíticas La Primavera (Qprp) (0.035 a 0.65 Ma)***

Forman el Complejo Volcánico La Primavera (CVLP) y son producto de la actividad efusiva de la caldera La Primavera. Con base en los estudios realizados por Mahood (1981) se puede establecer la evolución del emplazamiento de domos riolíticos, flujos de lava félsica y expulsión de materiales piroclásticos:

Los primeros domos del CVLP fueron emplazados hace ~145,000 años, seguida por la emisión de alrededor de 20 km<sup>3</sup> de magma y materiales piroclásticos que dieron origen a la Toba tala, evento que ocurrió de los 0.12 a los 0.095 Ma aproximadamente.

Con la rápida expulsión de materiales piroclásticos, se formó un vacío en la parte superior de la cámara magmática que ocasionó que las rocas sobreyacentes se colapsaran por gravedad y se formara una caldera semicircular de ~11 km, ubicada al SE del área de estudio y que está delimitada por una serie de fallas y fracturas semicirculares (Figura 3.5).

Poco después del emplazamiento de los domos centrales, hace ~90,000 años, domos porfíricos y flujos de lava félsica fueron emplazados a lo largo de dos arcos concéntricos. Un último periodo de inactividad volcánico se evidencia por la depositación de importantes volúmenes de sedimentos en la cuenca colapsada.

Los domos descritos tienen notable fracturamiento actuando como área de recarga de los acuíferos.

#### *Aluvial (Qal)*

Depósitos formados por arenas pumíticas, abanicos aluviales, depósitos de pie de monte y llanuras de inundación. Estos depósitos representan la sedimentación continental más importante en el área de estudio. Son depósitos de grava y arena gruesa acumulados en forma de abanicos aluviales sobre los causes de mayor drenaje.

#### *Residual (Qre)*

Los depósitos y suelos residuales representan la degradación y alteración *in situ* por meteorización de las rocas subyacentes. Ordinariamente presentan espesores reducidos y se ubican principalmente en una pequeña región al centro del área de estudio y al NW justo sobre la margen derecha del Río Grande de Santiago.

### **3.1.3. Geología local y del subsuelo**

El desarrollo de la geología local se refiere específicamente a la composición del subsuelo en el sitio contaminado. Como se mencionó en la metodología para el desempeño del trabajo de campo, el análisis consistió en la interpretación e integración de la estratigrafía obtenida durante la perforación de 11 pozos de monitoreo y 6 sondeos exploratorios y así como el trabajo geoelectrónico (SEV) aplicado en el sitio. Por lo tanto, la geología local se discutirá en el Capítulo 6 correspondiente a las discusiones.

### **3.2. Edafología**

De acuerdo a la cartografía temática digital puesta a disposición por INEGI, es posible obtener un mapa edafológico regional que muestra diferentes unidades edáficas (Figura 3.19). Los suelos denominados Phaeozems Háplicos son los predominantes, seguidos por los Regosoles Éutricos, Vertisoles Pélicos, Regosoles Cállicos, Phaeozems Lúlicos y por último los Luvisoles Crómicos.

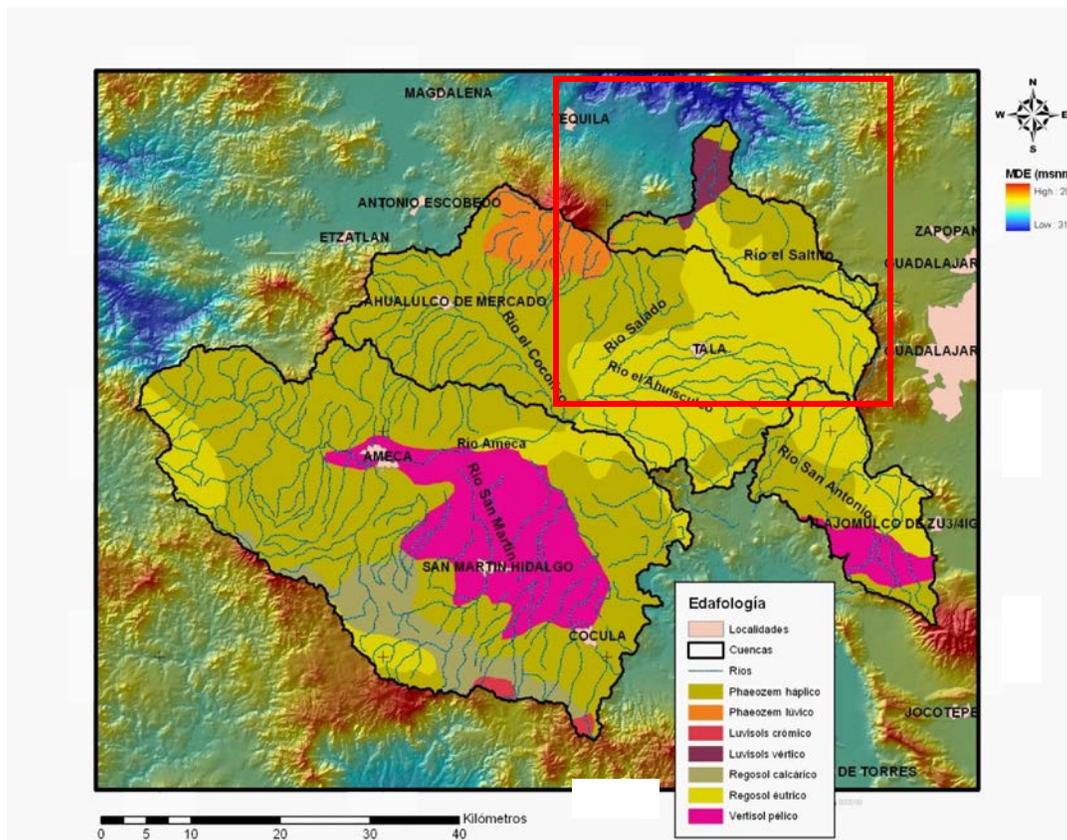


Figura 3.19. Mapa edafológico de la región. Recuadro rojo enmarca la zona de estudio (modificado de INEGI).

Según la World Soil Resource (WSR), en conjunto con la Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), los suelos mencionados anteriormente se describen de la siguiente manera:

### PHAEOZEMS

Suelos de pastizales relativamente húmedos y regiones forestales en clima moderadamente continental. Son muy parecidos a los Chernozems y Kastañozems pero presentan más lixiviados. Tienen un horizonte superficial oscuro, rico en humus que, en comparación con los Chernozems y Kastañozems, son menos ricos en bases. Los Phaeozems pueden o no tener carbonatos secundarios pero tienen alta saturación con bases en el metro superior del suelo.

Se desarrollan a partir de materiales parentales no consolidados, predominantemente básicos, eólicos (loess), tills y glaciares. Se forman en ambientes de cálidos a fresco, tierras llanas a onduladas (ej. tierras altas tropicales), suficientemente húmedas que permitan una constante percolación a través del suelo, pero también con períodos en los cuales el suelo se seca, la vegetación natural es pastizal como la estepa de pastos altos y/o bosque.

El término Háplico hace referencia a que el suelo tiene una expresión típica basada en la descripción de la WSR (típica en el sentido de que no hay una caracterización adicional o significativa), mientras que Lúvico se refiere a un suelo con un horizonte argílico.

### LUVISOL

Son suelos que tienen mayor contenido de arcilla en el subsuelo que en el suelo superficial como resultado de procesos pedogenéticos (especialmente migración de arcilla) que generan un horizonte subsuperficial argílico. Tienen arcillas de alta actividad en todo el horizonte argílico y alta saturación con bases a ciertas profundidades. El material parental que forma este tipo de

suelos puede ser, depósitos no consolidados como tills y depósitos eólicos, aluviales y coluviales. Se desarrollan en tierras llanas o suavemente inclinadas, en regiones templadas, frescas y cálidas con estación seca y húmeda bien definidas.

Los luvisoles crómicos son aquellos que cumplen con la descripción mencionada, pero adicionalmente exhiben a 150 cm de la superficie del suelo una capa subsuperficial de 30 cm o más de espesor, que tiene un hue Munsell más rojo que 7.5 YR y un croma de más de 4.

Por otro lado, los luvisoles vérticos son aquellos que presentan un horizonte subsuperficial arcilloso (horizonte vértico) que, como resultado de la expansión y contracción de las arcillas, se forman superficies pulidas (slickensides) y agregados estructurales en forma de cuña.

## REGOSLES

Forman un grupo remanente taxonómico que contiene todos los suelos que no pudieron ser clasificados como una unidad independiente. En la práctica, los regosoles son suelos minerales muy débilmente desarrollados en materiales no consolidados que no tienen un horizonte mólico o úmbrico. Están extendidos en tierras erosionadas, particularmente en áreas áridas y semiáridas y en terrenos montañosos. Si el suelo presenta carbonato de calcio y reacciona intensamente con HCl 1 M en la mayor parte del material fino, se llama regosol calcáreo. En un regosol éutrico la roca masiva o material parental comienza a los 25 cm de profundidad.

## VERTISOL

Son suelos muy arcillosos (alta proporción de arcillas expansivas) que forman grietas anchas y profundas cuando se secan, presentándose en ese estado la mayor parte del año. El material parental de estos suelos son sedimentos que contienen una gran proporción de arcillas expandibles, o arcillas expandibles producidas por neoformación a partir de meteorización de rocas ígneas básicas. Se desarrollan en depresiones y áreas llanas y onduladas, principalmente en climas tropicales, subtropicales, semiáridos a subhúmedos y húmedos, con una alternancia clara de estación seca y húmeda. La vegetación más común es sabana, pastizal natural y/o bosque.

El adjetivo pélico indica que en los primeros 30 cm de suelo tienen un Munsell húmedo de 3.5 o menos, y un Croma húmedo de 1.5 o menos (solo es aplicable en Vertisoles).

### **3.3. Hidrología**

#### **3.3.1. Hidrología superficial**

Según INEGI y el Sistema de Información del Agua del Estado de Jalisco (SIAEJ) el sitio de interés se ubica en la “Cuenca del Río Santiago – Guadalajara”, la cual pertenece a la subregión hidrológica Jalisco “Lerma – Chapala – Santiago”. A su vez, esta subregión forma parte de la región hidrológica – administrativa No. VIII “Lerma – Santiago – Pacífico” (Figura 3.23).

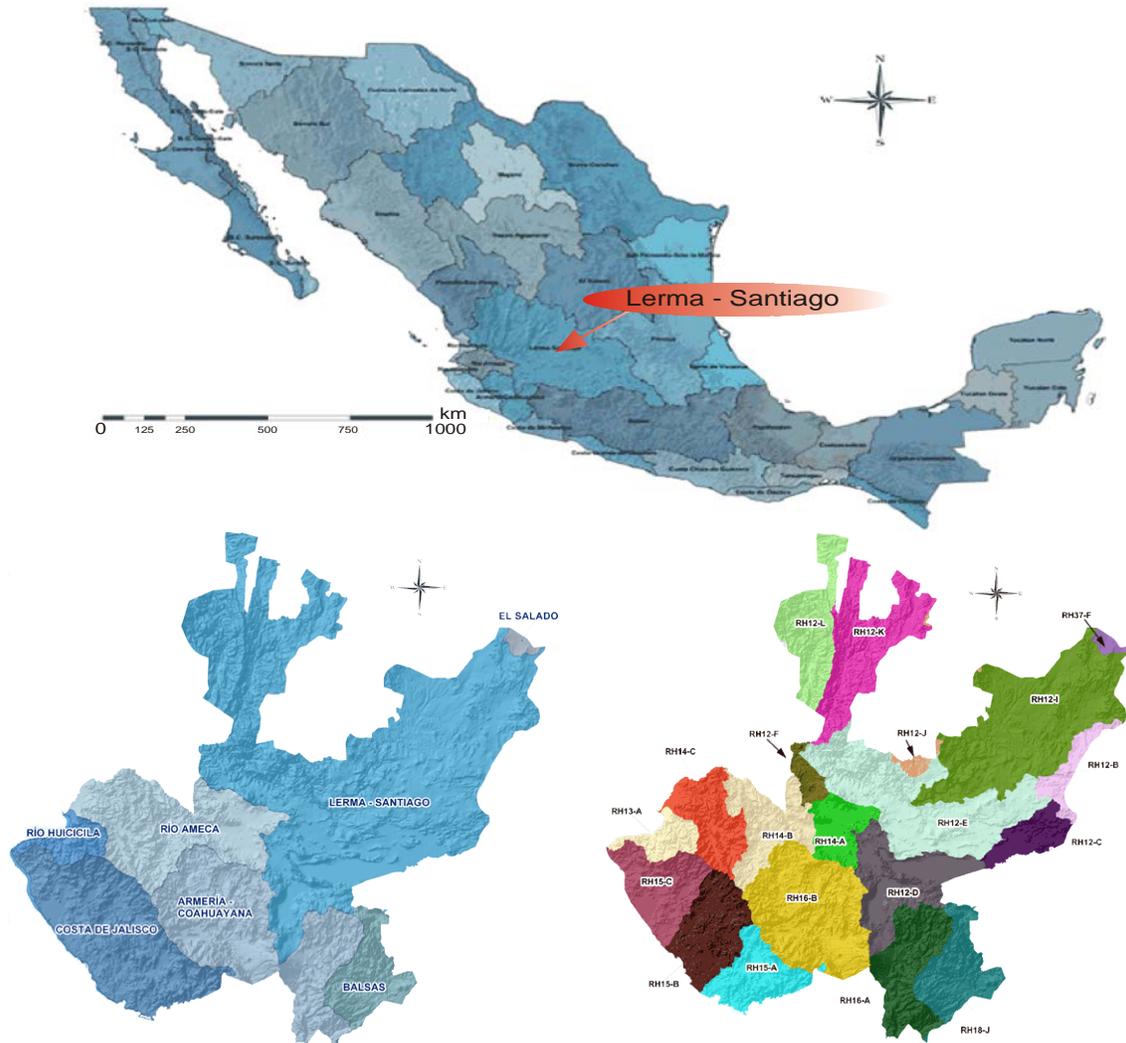


Figura 3.20. Arriba: Mapa que muestra las 37 regiones hidrológicas del país, resaltando la región No. VIII “Lerma – Santiago – Pacífico” (CEA Jalisco, 2009). Abajo a la izquierda: Región hidrológica Lerma Santiago. Abajo a la derecha: Cuenca hidrológica RH12 E-Cuenca del Río Santiago Guadalajara (CNA, CEA Jalisco; <http://www.ceajalisco.gob.mx/cuencajal.html#rh-mex>, 2009).

A escala más local, el sitio pertenece al acuífero administrativo El Arenal, con una superficie de ~600 km<sup>2</sup>. Sus escurrimientos principales son los ríos Grande de Santiago, Salado y Arenal, los arroyos Las Tortugas, El Saucillo, El Ganado, Agua Dulce y Laguna Colorada (IMTA, 2007). Cuenta con las presas Elizondo, Playa de Santa Cruz, San Cayetano, Hurtado y la central hidroeléctrica Manuel M. Dieguez (Santa Rosa).

La microcuenca el Arenal (no registrada por CNA) abarca casi toda la zona de estudio, se encuentra dentro de la región hidrológica Lerma-Santiago y drena un área de 320 km<sup>2</sup>. El

afluente más importante de esta microcuenca es el arroyo intermitente El Arenal, el cual desemboca en la presa Santa Rosa que tiene una capacidad total de 371,720,000 m<sup>3</sup> (Lojero-Ochoa,2010), sin embargo, en 2009 registró un almacenamiento máximo de 394,070,000 m<sup>3</sup> y un mínimo de157,260,000 m<sup>3</sup> (Comisión estatal del Agua en Jalisco). La figura 3.21 muestra algunos de los escurrimientos de la región.

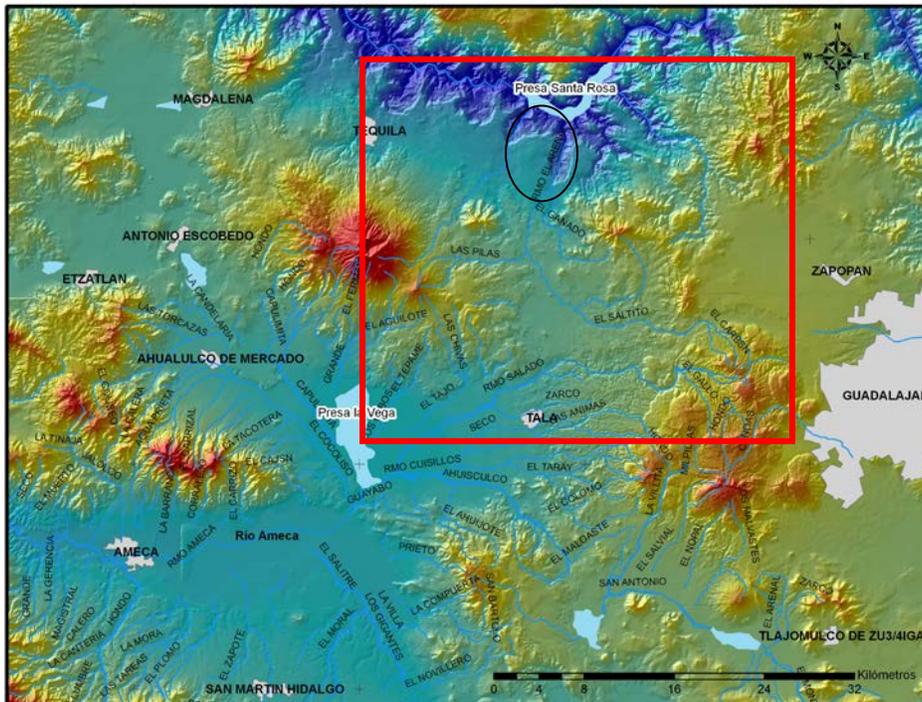


Figura 3.21 Principales escurrimientos de la zona de estudio. (Modificado de CNA-CFA J). Recuadro en rojo delimita la zona de interés; círculo en negro resalta la ubicación del arroyo El Arenal.

## CLIMA

La diversidad de los relieves que presenta el estado de Jalisco tiene como consecuencia una gran variedad de climas; no obstante, esta diversidad climática aparenta tener cierta homogeneidad regional y una marcada estratificación climática, en función de la distribución de las precipitaciones.

El área se encuentra a sotavento de las masas de aire ciclónicas del Pacífico durante el verano, y de las masas de aire anticiclónicas del Atlántico durante casi todo el año (vientos alisios). Las primeras son responsables de la mayor parte de las precipitaciones, cuyo total anual varía entre 600 y 1100 mm (Barrera, 2002).

En la región, el clima se clasifica como semiseco en invierno y semicálido en primavera (IMTA, 2007). La temperatura media anual es de 20.9 °C, registrando la cifra más elevada en los años 2006 y 2007 y la más baja en 1993. Junio es el mes más caluroso con un promedio de 23.9 °C y enero el más frío con 17.1 °C, según datos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 1980-2008). Las figuras 3.22 y 3.23 muestran la distribución de la temperatura media mensual y anual respectivamente, de los años 1980 al 2008.

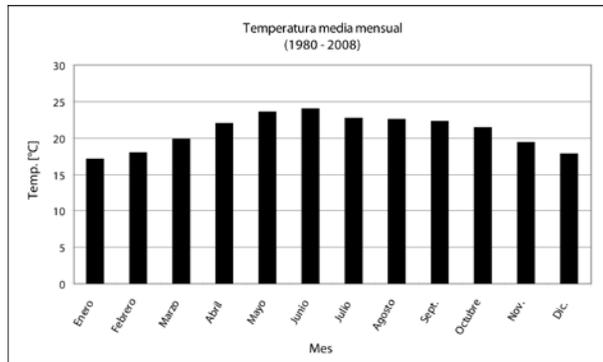


Figura 3.22. Temperatura media mensual, (fuente: SMN).

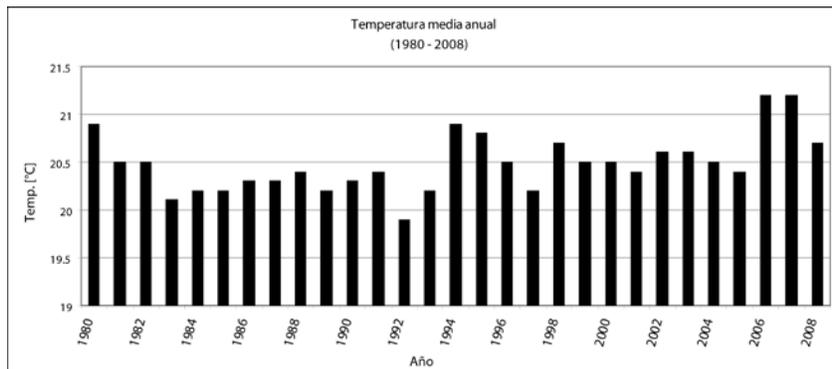


Figura 3.23. Temperatura media anual, (fuente: SMN).

PRECIPITACIÓN

La figura 3.28 muestra la distribución espacial de la precipitación a nivel nacional. La zona de estudio presenta un rango de precipitación de 750 a 1000 mm al año.

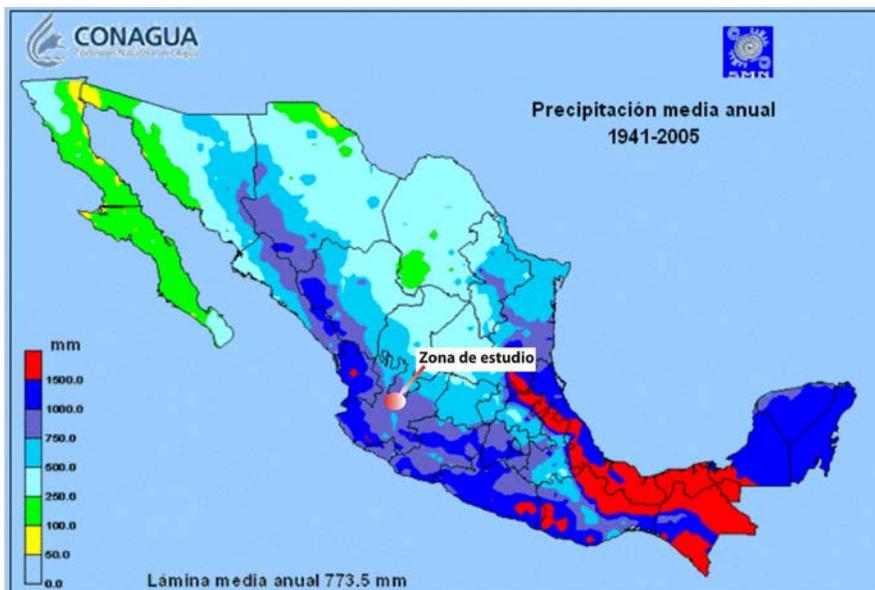


Figura 3.24. Mapa de precipitación media anual para toda la República Mexicana (1941–2005). A la zona de estudio se asocia un rango de 750 a 1000 mm. (fuente: CNA y SMN, 2005).  
 Conforme a los registros históricos de estaciones climatológicas del SMN, caen anualmente alrededor de 890 mm de lluvia, iniciando la temporada de monzones en mayo, con una lámina

promedio de 24 mm y terminando en octubre con láminas de precipitación de 60 mm en promedio. Las precipitaciones medias mensuales más importantes se presentan a partir de junio y terminan en septiembre, siendo julio el mes con mayor precipitación, alcanzando 205 mm. Los seis meses restantes se mantienen con precipitaciones bajas, de alrededor de 10 mm de lluvia, con marzo como el mes más seco (promedio de 4 mm al mes) (Figura 3.25).

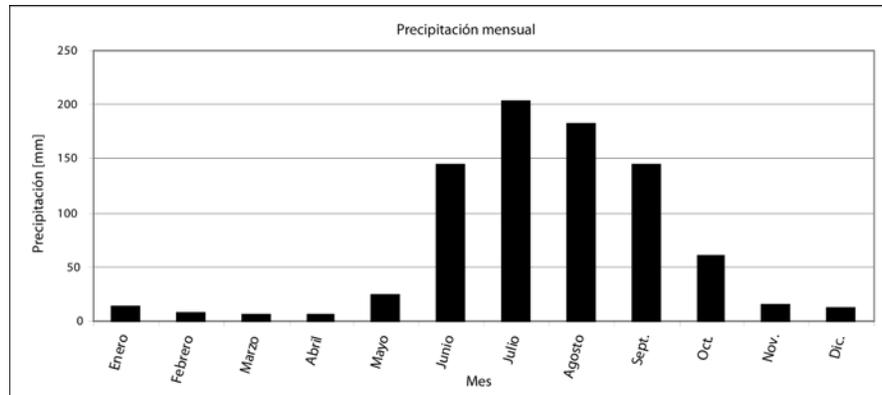


Figura 3.25. Gráfica que muestra el promedio de precipitación mensual en el área (CNA y SMN, 2005).

La figura 3.26 muestra un climatograma que establece la relación entre la temperatura y la precipitación. Puede observarse claramente que el aumento de temperatura propicia las condiciones atmosféricas óptimas para comenzar con un periodo de altas precipitaciones. En junio se alcanzan las máximas temperaturas y en julio se han registrado precipitaciones de hasta 220 mm.

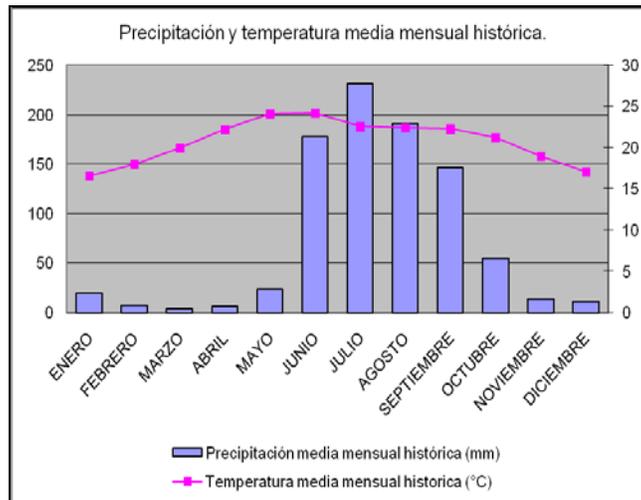


Figura 3.26. Climatograma promedio de las estaciones climatológicas del SMN ubicadas en la región.

### **3.3.2. Hidrología subterránea regional**

El área de estudio se encuentra ubicada dentro del acuífero El Arenal, según la división administrativa hecha por la Comisión Nacional del Agua (CNA). Al NW del estado de Jalisco se extiende este acuífero con una superficie de 600 km<sup>2</sup> (Figura 3.27).

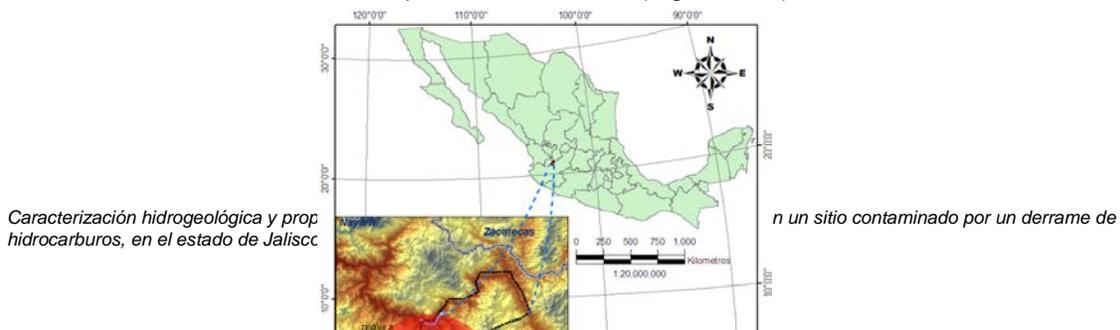


Figura 3.27. Mapa de localización del acuífero El Arenal. Modificado de IMTA, CNA, SEMARNAT (2007). Línea negra discontinua marca los límites del acuífero. Achurado en rojo es el área de interés.

Los pozos que sirvieron de base para el análisis hidrogeológico de la zona de estudio son aquellos documentados por el IMTA (2007), algunos de ellos con pruebas de aforo y de bombeo, y los pozos censados durante el trabajo de campo realizado para el desarrollo de esta tesis. Los pozos registrados en el REPDA no fueron tomados en cuenta debido a una serie de inconsistencias que se encontraron entre las coordenadas presentadas en el registro y la ubicación real de dichos pozos. Las coordenadas de los aprovechamientos se muestran en las tablas 3.2 y 3.3. Los mapas de las figuras 3.28 y 3.29 muestran su ubicación espacial.

# Pozo	Clave	Coordenadas UTM (WGS84)		
		x	y	z
1	La Tejonera	634608.441	2298860.189	x
2	El Zapote	636461.118	2297246.993	x
3	Parcela 30 Z1	647776.796	2293068.34	x
4	El Mirador	633049.362	2304415.396	x
5	Planta de basura Picachos	659104.691	2314048.571	1491
6	Balneario Milpillas	659353.103	2314958.119	1481
7	Sin Nombre	651756.255	2293195.865	1628
8	Granos de Calidad	646464.417	2293948.132	1551
9	Univ. De Guadalajara	641340.849	2301880.081	1589
10	Univ. De Guadalajara	641772.154	2302160.485	1561
11	Univ. De Guadalajara	641803.001	2301933.21	1573
12	Fracc. Hda. La Herradura	644168.161	2301922.781	1580
13	Sandra del R. Lares P.	643953.591	2292601.057	1484
14	Sandra del R. Lares P.	643901.549	2292597.534	1489
15	Sandra del R. Lares P.	643927.24	2292637.728	1492
16	Balneario Las Tortugas	643492.713	2292369.557	1483
17	Balneario Las Tortugas	643298.272	2292103.455	1483
18	Poblado Huaxtla	639618.272	2293163.862	1430

# Pozo	Clave	Coordenadas UTM (WGS84)		
		x	y	z
19	Poblado Huaxtla	639128.356	2292941.466	1424
20	Ejido Huaxtla	638228.896	2292568.103	1419
21	Ejido Huaxtla	638232.627	2292466.667	1413
22	Poblado Sta. Cruz del Ast.	642236.86	2293428.859	1450
23	Fracc. Sta. Cruz del A. Pedro C.	641252.436	2294219.955	1441
24	Pob Sta. Cruz del A. Unid. D.	641416.424	2293298.902	1443
25	F. Campo de Golf Sta. Sofía	639299.728	2301521.565	1426
26	Fracc. Los Encinos	627577.132	2297943.929	1532
27	Ejido Santiaguito	631933.147	2297824.127	1466
28	Poblado Santiaguito	631627.292	2302129.382	1424
29	Ejido Santiaguito	631958.37	2301941.374	1412
30	Fca. Tequila La Escondida	634788.163	2298806.297	1381
31	Poblado El Arenal	638723.758	2293940.477	1402
32	Ejido Arenal Gpo. El Órgano	639425.382	2294093.909	1418
33	Sin Nombre	640558.11	2290788.783	1472
34	Potrero el Muerto	637624.488	2292544.666	1407
35	Camp. Los Pinitos	641773.689	2292444.059	1510
36	Camp. Los Pinitos	641615.507	2292676.403	1513

Tabla 3.2. Coordenadas de los pozos censados por el IMTA (2007).

Figura 3.28. Ubicación de los pozos censados en 2007 por IMTA.

Figura 3.29. Ubicación de los aprovechamientos censados en 2009 (PVA).

#Pozo	Clave	Coordenadas UTM WGS84		
		X	Y	Z
1	PVA1	633638.288	2304426.765	1234
2	PVA2	641252.436	2294219.955	1439
3	PVA3	642236.86	2293428.859	1433
4	PVA4	642168.137	2292896.824	1452
5	PVA5	642291.919	2293403.745	1432
6	PVA6	632768.126	2304447.46	1157
7	PVA7	637492.359	2296803.844	1434
8	PVA8	640498.723	2297359.119	1445

9	PVA9	640503.099	2297457.673	1434
10	PVA10	641416.424	2293298.902	1415
11	PVA11	641726.115	2297371.719	1455
12	PVA12	639299.728	2301521.565	1398
13	PVA13	639618.272	2293163.862	1391
14	PVA14	639128.356	2292941.466	1392

Tabla 3.3. Coordenadas de los aprovechamientos censados en el trabajo de campo (2009).

## TIPO DE ACUIFERO

El área de estudio se encuentra dominada, casi en su totalidad, por rocas ígneas (volcánicas e intrusivas) a excepción de ocasionales depósitos granulares, especialmente gravas y arenas. Según trabajos realizados con anterioridad por la CNA y el IMTA, estos depósitos esporádicos parecen ser los actores principales de los sistemas acuíferos de mayor importancia. Las rocas volcánicas funcionan principalmente como acuitardos, sin embargo, dependiendo del grado e interconectividad de las fracturas, pueden llegar a formar sistemas acuíferos volcánicos con un potencial hidrológico incierto y de naturaleza aleatoria. Al tener los depósitos granulares interdigitados con las rocas volcánicas se puede considerar una sola unidad hidrogeológica a profundidad, funcionando como un acuífero multicapas (IMTA, 2007).

Desde el punto de vista regional los acuíferos son considerados de tipo libre o semiconfinado. Estos acuíferos se circunscriben a los depósitos granulares y/o a las rocas piroclásticas menos profundas. Pruebas de aforo realizadas en pozos ubicados dentro del área de estudio muestran una clara tendencia de un alto grado de abatimiento del nivel de bombeo para pequeños incrementos en la extracción, lo que permite concluir que los acuíferos presentes son poco permeables y de baja transmisividad (IMTA, 2007). Los parámetros hidráulicos locales se discuten con detalle en el Capítulo 5.

La principal fuente de alimentación de los acuíferos es la lluvia y las importantes zonas de recarga se encuentran en las partes montañosas, en donde las rocas volcánicas presentan un alto grado de alteración y fracturamiento (e.j. Domos Riolíticos La Primavera).

## HIDROESTRATIGRAFÍA Y UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS

Las unidades estratigráficas presentes en el área se han agrupado, según IMTA (2007), con base a su comportamiento y potencial hidráulico, en tres unidades hidrogeológicas.

*Unidad hidrogeológica I.* Corresponde con rocas jóvenes (Cuaternario) como aluviones, tobas pumíticas, sedimentos lacustres, riolitas porosas y fracturadas, rocas piroclásticas y basalto andesítico. Son de grandes espesores y distribución espacial apreciable. En las partes elevadas actúan como áreas de recarga formando a más profundidad los acuíferos granulares explotados mediante pozos de caudal y rendimiento moderados.

*Unidad hidrogeológica II.* Rocas del Paleógeno y Neógeno. Con una estructura mucho más compacta que aquellas de la unidad hidrogeológica I, en algunas regiones presentan un grado de fracturamiento importante (porosidad secundaria). Según la posición estratigráfica y

topográfica, podrían estar funcionando como acuitardos o casualmente como acuíferos de capacidad incierta.

Dentro de esta unidad se encuentran flujos riolíticos con fracturamiento moderado, tobas pumíticas vítreas y líticas, derrames y brechas andesítico basálticas, tobas y brechas riolíticas y andesitas. Son las rocas más abundantes, con una porosidad primaria reducida, pero pueden llegar a suministrar importantes cantidades de agua a través de sus sistemas de fracturas. Los aprovechamientos profundos explotan los acuíferos que eventualmente han desarrollado buen potencial en estas rocas.

*Unidad hidrogeológica III.* Se refiere a rocas del Cretácico de las Formaciones Morelos y Mezcala. La formación Morelos corresponde a una potente capa de rocas calizas y dolomíticas interestratificadas, (De Cserna, 1995). El nombre de Formación Mezcala hace referencia a una sucesión de capas de arenisca, limolita y lutitas calcáreas (Fries, 1960). Conforman el basamento de la secuencia mostrada, y debido al grado de compactación y cementación son consideradas como un límite impermeable o bien, la base del sistema acuífero regional.

### PARAMETROS HIDRAÚLICOS

Las propiedades hidráulicas de la región fueron determinadas a partir de pruebas de bombeo a caudal constante y escalonado, en régimen transitorio, para acuíferos confinados o libres de espesor saturado mucho mayor que los descensos provocados por el bombeo (IMTA, 2007). Todas las pruebas fueron realizadas en pozos profundos (Figura 3.30), caracterizando de esta manera, los acuíferos de escala más regional. De las pruebas realizadas por IMTA se obtuvo la tabla 3.4.

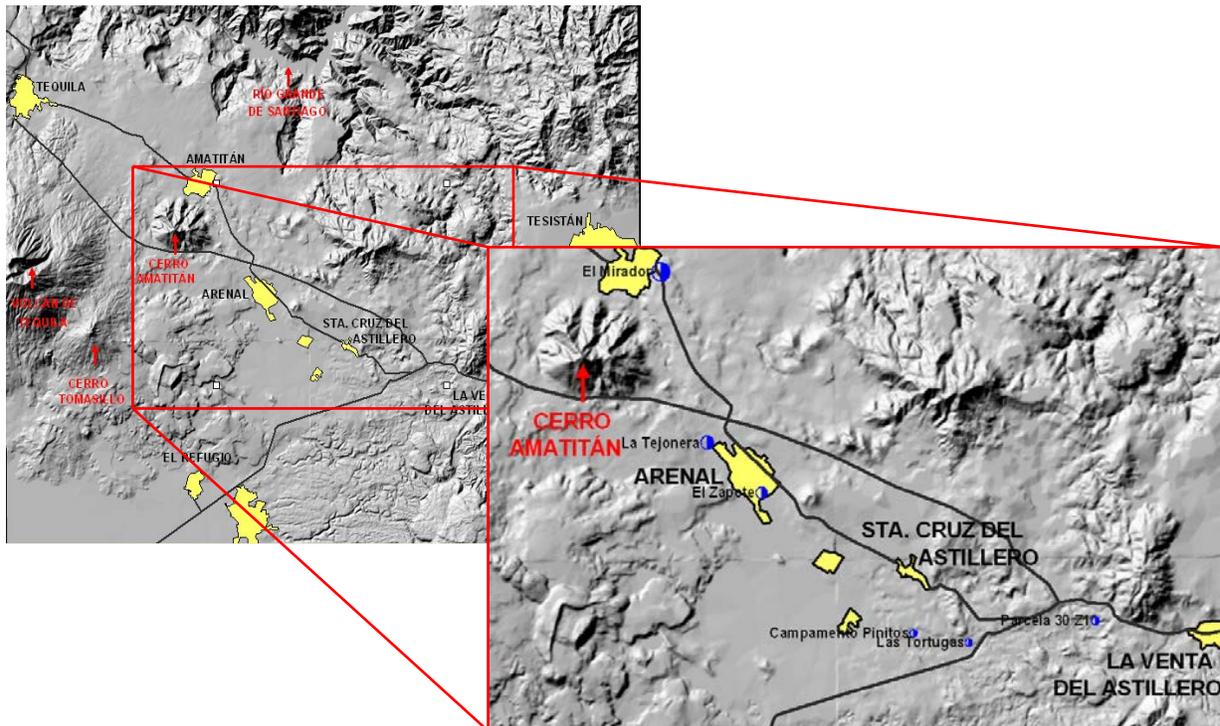


Figura 3.30. Ubicación de aprovechamientos con pruebas de bombeo (IMTA, 2007).

Localidad	Coordenadas		Uso	Resultados de las pruebas de bombeo escalonado					
	x	y		NE [m]	Profundidad total [m]	Caudal [lps]	ND [m]	q [lps/m]	T [m <sup>2</sup> /día]
La Tejonera	634608.44	2298860.2	Agrícola	90	105	6.6	96	0.43	36.72
El Zapote	636461.12	2297247	Doméstico	81	300	---	---	----	----
El Silo	x	x	Doméstico	25	160	7.8	150	0.11	12.35
Parcela 30 Z1	647776.8	2293068.3	Agrícola	22	100	2.5	94	0.03	2.99
Campamento Pinitos	641615.51	2292676.4	Doméstico	9	70	5.5	30	0.43	86.4
El Mirador	633049.36	2304415.4	Doméstico	102.5	130	5	126.5	0.15	22.032
Las Tortugas	643492.71	2292369.6	Público/urbano	2	120	20	35	0.43	47.26

Tabla 3.4. Resultados de las pruebas de bombeo escalonado, (IMTA, 2007).

Las pruebas de bombeo fueron analizadas con el criterio de interpretación de Jacob (1946, 1950), el cual es aplicable para acuíferos confinados que por lo general tienen bajo coeficiente de almacenamiento.

La transmisividad varía de 2.99 a 47.26 m<sup>2</sup>/día, los caudales instantáneos de 2.5 a 20 lps, y el caudal específico va de 0.03 a 0.43 lps/m. El caudal es función directa de la permeabilidad principalmente y no de la profundidad.

Los pozos Las Tortugas y Campamento Pinitos son los que presentan el nivel estático más somero, explotan los acuíferos granulares superiores e intermedios. Los demás aprovechamientos con prueba de bombeo captan acuíferos volcánicos más profundos de estructura masiva, compacta y baja permeabilidad (IMTA, 2007).

El valor promedio de la conductividad hidráulica para 30 m de espesor es de 0.8 m/día para los acuíferos volcánicos y de 1.4 m/día para los acuíferos granulares. Estos corresponden a acuíferos volcánicos con moderado grado de fracturamiento y acuíferos granulares con sedimentos de naturaleza arcillosa (Freeze and Cherry, 1980). Más adelante estos parámetros son discutidos con la interpretación de pruebas slug llevadas a cabo en el sitio contaminado.

### PIEZOMETRÍA Y PROFUNDIDAD DEL NIVEL ESTÁTICO

Para la obtención de la piezometría a nivel regional se empleó la información obtenida durante el censo de aprovechamientos hidráulicos subterráneos hecho por IMTA (2007). La red piezométrica fue reconfigurada en este trabajo y se obtuvo la figura 3.31.

Se puede determinar que la dirección de flujo a escala regional tiene una orientación preferencial NNW. Las zonas principales de recarga se encuentran en los domos riolíticos La Primavera y el Volcán Tequila, no hay síntomas de concentración de bombeo ni sobreexplotación de los acuíferos por lo tanto se define un esquema de flujo prácticamente natural.

La configuración de la profundidad del nivel estático se llevó a cabo siguiendo la misma metodología que se aplicó para determinar la piezometría de 2007. El flujo tiene una dirección preferencial NE-SW, con valores de carga hidráulica de 1400 a 1260 msnm. El nivel estático varía entre 10 y 20 m de profundidad en las cercanías del poblado Tesistán. En Santa Cruz del Astillero tiene una profundidad de 50 a 70 m y en Amatitán aproximadamente de 100 a 140 m (Figura 3.32). El punto de referencia de las mediciones piezométricas en todos los pozos fue la base superior del brocal.

**Figura 3.31.** Piezometría para el año 2007, configurada a partir de los datos obtenidos en el censo realizado por IMTA 2007.

**Figura 3.32.** Profundidad del nivel estático para el año 2007.

**CALIDAD QUÍMICA**

La calidad del agua y las anomalías hidrogeoquímicas están influenciadas y definidas por procesos endógenos y/o exógenos, clasificaciones que dependen básicamente del entorno geológico y de la posible infiltración inducida por algún sistema contaminante.

El agua subterránea en su paso por el subsuelo y de acuerdo a las características geológicas del medio, altera sus propiedades físicas y químicas, cambios que finalmente definen el tipo de acuífero, desde el punto de vista hidrogeoquímico. Las familias de agua se determinan a partir de los iones dominantes, los cuales y mediante modelación espacial, permiten visualizar geográficamente su relación con el marco geológico y el entorno o actividad antropogénica.

En México las anomalías hidrogeoquímicas presentes en el agua se establecen a partir de la determinación de los parámetros que están fuera de los límites permisibles que marca la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, "SALUD AMBIENTAL, AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO-LIMITES PERMISIBLES DE CALIDAD Y TRATAMIENTOS A QUE DEBE SOMETERSE EL AGUA PARA SU POTABILIZACION"

IMTA (2007) realizó un análisis físico-químico a tres muestras de agua, obtenidas de tres pozos ubicados al SSE de la zona de estudio (no fue posible determinar las coordenadas geográficas por falta de información). Sin embargo, el análisis puede dar una idea general de las condiciones químicas del agua de la región. Los resultados se muestran en la tabla 3.5 y la figura 3.33.

Punto de Muestreo	Facies hidrogeoquímica
Campamento Pinitos	Sódica-sulfatada-clorurada
El Reventón	Sódica-sulfatada
Los Silos	Cálcica-magnésica ligeramente bicarbonatada

Tabla 3.5. Clasificación de las diferentes muestras de agua, IMTA (2007).

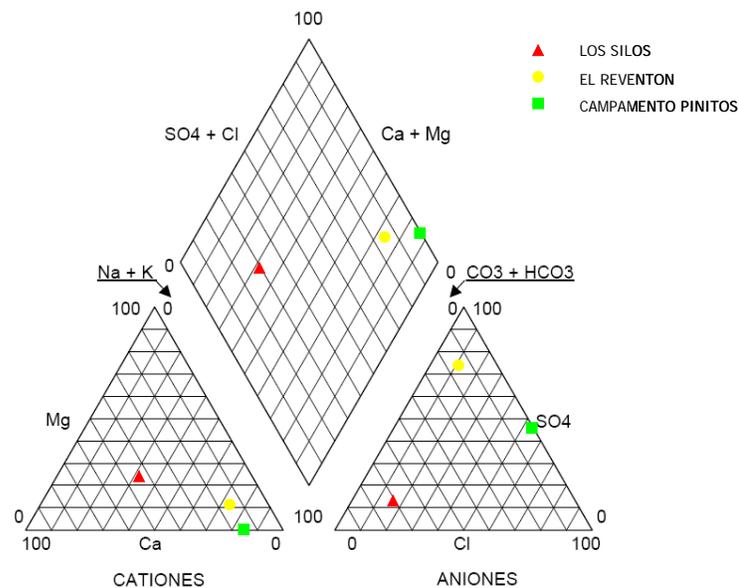


Figura 3.33. Diagrama de Piper con los resultados de los análisis químicos obtenidos en laboratorio. Tomado de IMTA (2007).

Del diagrama de Piper (Figura 3.33) se concluye que las muestras de agua de los pozos Campamento Pinitos y El Reventón tienen propiedades químicas muy similares. El contenido de sodio, el cual es uno de los iones principales, proviene de fuentes naturales como la descomposición de las plagioclasas de las rocas volcánicas que intemperizan a minerales arcillosos conteniendo cantidades significantes de sodio intercambiable. El contenido de sodio varía entre 4.8 y 27 mg/L, cifra muy por debajo del límite máximo permisible para aguas de consumo humano (200 mg/L).

El calcio y el magnesio solo fueron apreciables en el pozo Los Silos, con una concentración de 38 y 13 mg/L respectivamente, siendo la máxima permisible de 200 mg/L para el calcio y de 125 mg/L para el magnesio. La procedencia del calcio podría deberse a la descomposición meteórica de los minerales silicatados (feldespatos, anfíboles y piroxenos) presentes en las rocas volcánicas. El calcio no es agresivo para la salud y dota de cierta dureza a las aguas que lo contienen. El magnesio por su parte, posiblemente proviene de minerales como olivino, biotita, hornblenda y augita presentes también en algunas rocas volcánicas. Al igual que el calcio, el magnesio ayuda a aumentar la dureza del agua.

La mayor concentración de sulfatos se presenta en el pozo El Reventón, con 5.1 mg/L. El límite máximo permisible es de 100 a 250 mg/L, por lo tanto los sulfatos contenidos en las aguas de la zona resultan despreciables. Las pequeñas cantidades presentes son de carácter natural.

La presencia de cloruro se debe al aporte principalmente de las micas, hornblenda y vidrios volcánicos. Sin embargo la concentración presente en los tres pozos es despreciable.

## BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El objetivo de un balance es determinar la variación en el volumen de agua almacenada en una unidad o en un acuífero por unidad de tiempo. La ecuación (3.1) define el estudio de un balance de aguas subterráneas:

$$\sum \text{Entradas} - \sum \text{Salidas} = \pm \Delta V; \Delta V = \Delta h(A_b)(S) \text{-----}(3.1)$$

En donde:

$\Delta V$ = cambio en el volumen de agua almacenada,  
 $\Delta h$ = diferencia del nivel estático para el intervalo de tiempo del análisis,  
 $A_b$ = área del balance,  
 $S$ = coeficiente de almacenamiento.

Los parámetros medidos para calcular la recarga total del acuífero fueron:

ES: entradas subterráneas,  
 $R_v$ : recarga vertical por lluvia,  
 $R_p$ : recarga por pérdidas en los sistemas de agua potable,  
 $R_r$ : recarga por retornos por riego.

Los factores tomados en cuenta para evaluar las descargas son los siguientes:

ETR: evapotranspiración,  
 B: bombeo,  
 $S_s$ : salidas subterráneas.

El desarrollo detallado de todo el balance se encuentra en el informe generado por el IMTA (2007). A continuación se muestran solo los resultados obtenidos:

La recarga anual total por año es  $R_t = 22.5 \text{ Mm}^3$ . El rendimiento permanente ( $R_p$ ) para el acuífero en estudio es la recarga total anual menos la descarga natural, la cual resulta de la suma de la evapotranspiración y el 50 % de las salidas subterráneas. Por lo que:

$$R_p = 22.5(\text{Mm}^3) - [1.7(\text{Mm}^3) + 1.5(\text{Mm}^3)] = 19.3\text{Mm}^3/\text{año} \text{-----}(3.2)$$

El volumen de agua subterránea concesionado por la Subdirección General de Administración del Agua de la CNA y de acuerdo con la depuración de títulos de concesión inscritos en el REPDA, al año 2007, es de 11.95 Mm<sup>3</sup>/año.

En conclusión la disponibilidad de aguas subterráneas (DAS) queda determinada por la ecuación 3.3:

$$DAS = R - DN - VCAS = 22.5 - (3.2 + 11.95) = 7.35\text{Mm}^3/\text{año} \text{-----}(3.3)$$

En donde:

R<sub>t</sub>= recarga total,

DN= descarga natural,

VCAS= volumen concesionado de aguas subterráneas.

### **3.3.3. Hidrología subterránea local**

Al igual que la geología local, la hidrogeología local forma parte de los resultados y de las discusiones realizadas para la tesis. El comportamiento hidrogeológico local se presenta a detalle en los Capítulos 4 y 5, de Resultados y Discusiones, respectivamente.



---

## **CAPÍTULO 4 RESULTADOS**

- 4.1. Resultados de campo**
  - 4.1.1. Geología local**
  - 4.1.2. Geofísica**
  - 4.1.3. Hidrogeología local**
  - 4.1.4. Caracterización ambiental**
  
- 4.2. Resultados de la experimentación en laboratorio**
  - 4.2.1. Caracterización del suelo**
  - 4.2.2. Pruebas de tratabilidad**
    - 4.2.2.1. Lavado de suelo**
    - 4.2.2.2. Biodegradación Asistida**
    - 4.2.2.3. Lavado vs biodegradación**
    - 4.2.2.4. Valoraciones finales de las pruebas de tratabilidad**

### 4.1. Resultados de campo

Del trabajo de campo se obtuvo la información necesaria para poder definir un modelo conceptual integral que define el comportamiento hidrogeológico del sitio contaminado. Todos los resultados presentados en este capítulo son a escala local y se refieren básicamente al estudio de la geología a detalle, la respuesta del medio físico a la geoelectrica aplicada y al comportamiento hidrogeológico determinado a partir de la información obtenida en la campaña de campo (censo de pozos) y las pruebas slug realizadas en los pozos ubicados en el sitio contaminado. Adicionalmente se presentan resultados del muestreo ambiental, con la finalidad de determinar de manera acertada el grado de contaminación y su comportamiento en el medio.

#### 4.1.1. Geología local

La geología local muestra la estratigrafía a detalle que resultó de la etapa de perforación de los pozos construidos en el sitio contaminado. Alcanzan una profundidad máxima de 13.5 metros y la ubicación espacial de cada pozo se muestra en la figura 4.1.



Figura 4.1. Ubicación de los pozos instalados en el sitio contaminado, PM: pozos de monitoreo; SE: sondeos exploratorios.

Las figuras 4.2 y 4.3 muestran los cortes litológicos obtenidos en cada perforación, su correlación e interpretación se presentan en el Capítulo 6 de discusiones.





Figura 4.2. Cortes litológicos obtenidos de las perforaciones de los pozos de monitoreo (PM) instalados.

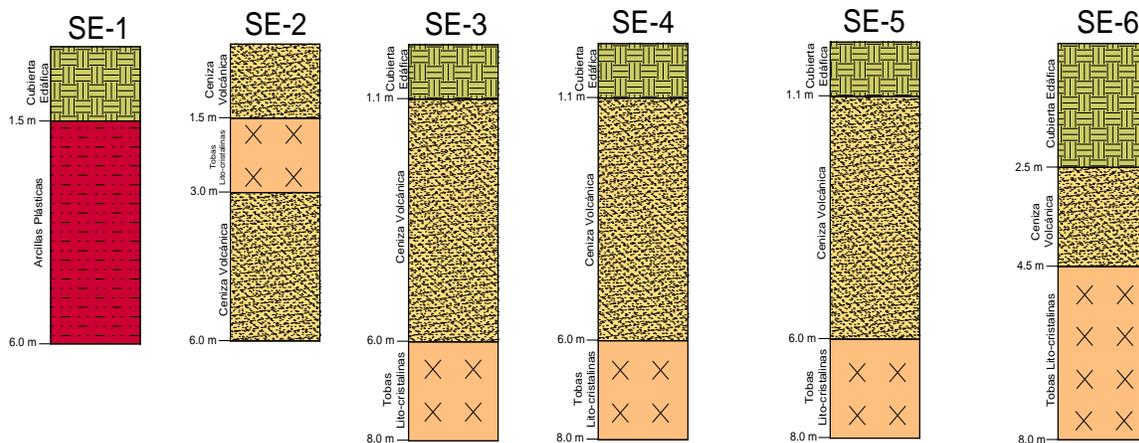


Figura 4.3. Cortes litológicos obtenidos de las perforaciones de los sondeos exploratorios (SE).

El análisis de la estratigrafía permitió la elaboración de secciones geológicas locales que, en conjunto con los datos geofísicos e hidrogeológicos obtenidos y analizados, posibilitaron la generación de un modelo hidrogeológico conceptual que explica el comportamiento del medio físico en cuestión.

#### 4.1.2. Geofísica

El objetivo principal del estudio geoelectrico es evaluar las características de las unidades hidroestratigráficas identificadas, así como establecer una relación entre las anomalías eléctricas obtenidas y el material potencialmente contaminado por hidrocarburos, incluso, determinar tentativamente la ubicación y extensión de la pluma contaminante en suelo y la extensión de la fase libre presente, la figura 4.4 muestra la ubicación de los sondeos eléctricos verticales.

El arreglo usado fue el Schlumberger con una abertura entre electrodos AB de 200 m en 11 puntos

Electrocapa	Resistividad real [ $\Omega$ -m]	Espesor [m]	Profundidad [m]	Electrocapa	Resistividad real [ $\Omega$ -m]	Espesor [m]	Profundidad [m]
-------------	----------------------------------	-------------	-----------------	-------------	----------------------------------	-------------	-----------------

diferentes, logrando profundidades máximas de 58 m (Figura 4.4).

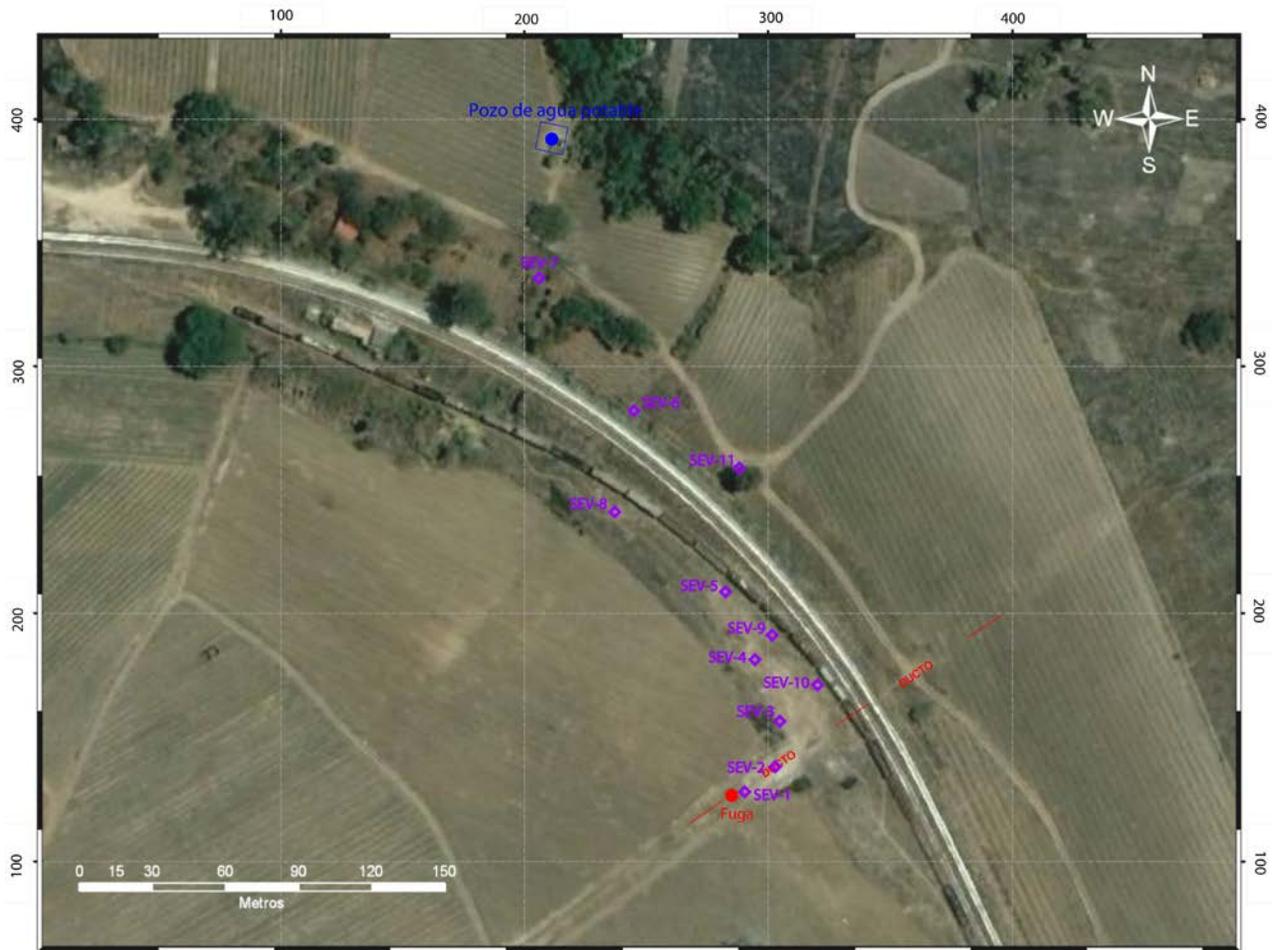


Figura 4.4. Ubicación de los Sondeos Eléctricos Verticales realizados en el sitio.

Para la obtención de los valores de resistividades reales se lleva acabo el siguiente proceso:

- Se generan curvas de resistividad aparente y hojas de cálculo que contienen la información eléctrica obtenida durante el trabajo de campo.
- Posteriormente los datos son procesados con el programa de interpolación Resixplus, el cual transforma los valores de resistividad aparente a resistividad real, relacionándolos con la profundidad correspondiente.

No obstante en este trabajo no se realizó el procesamiento de datos de resistividad aparente, solo se reinterpretaron los valores de resistividad real disponibles. De esta manera, se determinó el número de electrocapas, cada una con su propia firma resistiva, espesor y profundidad (tabla 4.1).

Sondeo Eléctrico Vertical 1 (SEV-1)				Sondeo Eléctrico Vertical 7 (SEV-7)			
L1	536	1	1	L1	666	1	1
L2	506	1	2	L2	105	2	3
L3	708	4	6	L3	178	7	10
L4	186	22	28	L4	27	?	33
L5	12	?	58	<b>Sondeo Eléctrico Vertical 8 (SEV-8)</b>			
<b>Sondeo Eléctrico Vertical 2 (SEV-2)</b>				L1	142	1.5	1.5
L1	212	2	2	L2	877	1.5	3
L2	693	3	5	L3	182	17	20
L3	122	25	30	L4	7	?	48
L4	16	?	57	<b>Sondeo Eléctrico Vertical 9 (SEV-9)</b>			
<b>Sondeo Eléctrico Vertical 3 (SEV-3)</b>				L1	160	2	2
L1	346	1	1	L2	792	3	5
L2	1388	4	5	L3	148	19	24
L3	112	20	25	L4	12	?	50
L4	11	?	50	<b>Sondeo Eléctrico Vertical 10 (SEV-10)</b>			
<b>Sondeo Eléctrico Vertical 4 (SEV-4)</b>				L1	1099	5	5
L1	466	0.5	0.5	L2	200	19	24
L2	678	4.5	5	L3	2	?	48
L3	142	26	31	<b>Sondeo Eléctrico Vertical 11 (SEV-11)</b>			
L4	10	?	57	L1	199	0.5	0.5
<b>Sondeo Eléctrico Vertical 5 (SEV-5)</b>				L2	666	2.5	3
L1	502	0.5	0.5	L3	101	20	23
L2	523	0.5	1	L4	10	?	50
<b>Sondeo Eléctrico Vertical 6 (SEV-6)</b>							
L1	244	0.5	0.5				
L2	142	2.5	3				
L3	605	3	6				
L4	59	?	20				

Tabla 4.1. Electrocapas con resistividades, espesores y profundidades definidas en cada SEV.

### 4.1.3. Hidrogeología local

Los resultados hidrogeológicos obtenidos se dividen en dos partes:

1.- Gráficas obtenidas de las pruebas de inyección o slug tests, realizadas en los pozos de monitoreo presentes. Muestran la relación profundidad del nivel dinámico contra tiempo. Esta información analizada por el método Hvorslev (1951) permitió definir los parámetros hidráulicos (e.g. conductividad hidráulica) necesarios para caracterizar hidráulicamente al acuífero somero contaminado (Figura 4.5).

2.- Una tabla que contiene la profundidad del nivel estático registrada en cada pozo, con lo que se configuró una red piezométrica para el acuífero somero contaminado (tabla 4.2).

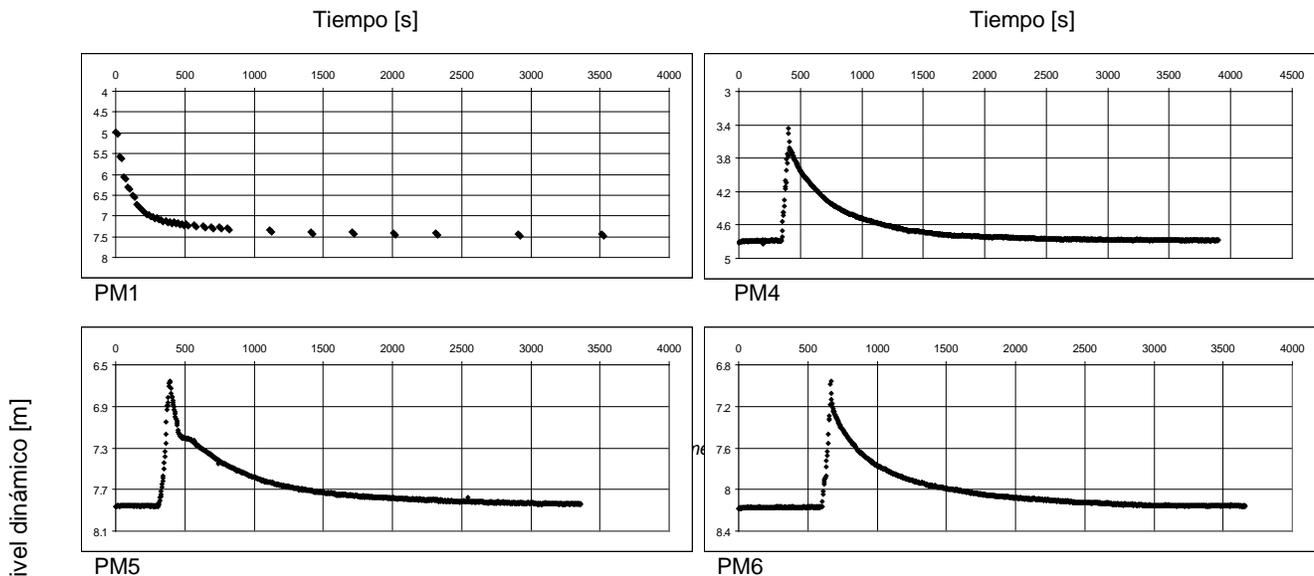


Figura 4.5. Gráficas de las pruebas slug realizadas en los pozos de monitoreo existentes.

Pozo	x	y	Z [msnm]	PNE [m]	h [msnm]
PM-1	642411.31	2292975.65	1444.64	7.44	640966.67
PM-2	642408.47	2292954.86	1445.83	8.67	640962.64
PM-3	642391.81	2292990.09	1444.20	7.37	640947.61
PM-4	642337.81	2293105.25	1439.84	4.8	640897.97
PM-5	642338.86	2293043.14	1443.02	7.86	640895.83
PM-6	642422.78	2292944.93	1445.76	8.18	640977.02
PM-7	642435.57	2293000.51	1441.15	4.45	640994.41
PM-8	642361.29	2293076.46	1439.5	3.73	640921.79
PM-9	642320.49	2293154.97	1437.56	4.16	640882.92
PM-10	642380.83	2293013.90	1444.18	7.73	640936.65
PM-11	642309.36	2293063.78	1443.28	8.57	640866.08

Tabla 4.2. Resultados de las mediciones del nivel estático en cada pozo de monitoreo, adicionalmente se muestra la carga hidráulica y las coordenadas de cada punto.

#### **4.1.4. Caracterización ambiental**

Con el objeto de realizar una caracterización ambiental del sitio contaminado y posteriormente establecer el diseño de remediación adecuado, se llevó a cabo una etapa de muestreo que se dividió en dos partes:

1. Muestreo y análisis de suelo contaminado. En cada perforación se llevó a cabo un muestreo de suelo a diferentes profundidades. En este apartado solo se muestran los resultados de los análisis realizados en laboratorios específicos y acreditados (Laboratorios ABC, Química, Investigación y Análisis S.A. de C.V.) orientados a la determinación de la concentración de contaminantes (específicamente TPH–diesel, Benzo(a)pireno, Benzo(k)fluoranteno y naftaleno) y su distribución espacial (ver tabla 4.3). La caracterización del suelo se describe a detalle en el apartado 4.2 del presente capítulo.

Nota: Los resultados mostrados para los análisis de TPH fracción media en la tabla 4.3 solo se utilizaron para determinar la geometría de la pluma contaminante en suelo, la concentración de TPH – diesel que se usó como base para la fase de experimentación de las técnicas de remediación propuestas en esta tesis se presenta en el apartado 4.2 de este capítulo.

- Muestreo y análisis de agua subterránea. Con el objeto de determinar la presencia de producto libre (LNAPL) y su distribución en el subsuelo, así como la presencia de fase disuelta, se llevó a cabo un muestreo de agua subterránea en los pozos de monitoreo instalados. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 4.4.

Muestras	Prof. [m]	TPH Fracción media [mg/kg]	Benzo(a)pireno [mg/kg]	Benzo(k)fluoranteno [mg/kg]	Naftaleno [mg/kg]	Muestras	Prof. [m]	TPH Fracción media [mg/kg]	
PM-1	2m	14943	< 0.05	< 0.09	< 0.08	PM-8	2m	ND	
	4.5m	14374	< 0.05	< 0.09	< 0.08		4m	ND	
	9m	16069	< 0.05	< 0.09	< 0.08		9m	ND	
					13.5m		ND		
PM-2	2m	22321	< 0.05	< 0.09	< 0.08	PM-9	2m	ND	
	4.5m	728	< 0.05	< 0.09	< 0.08		5m	ND	
	9.5m	9257	<0.46	< 0.09	< 0.08		9m	ND	
PM-3	2m	9910	< 0.05	< 0.09	26	PM-10	13.5	ND	
	4.5m	2885	< 0.05	< 0.09	7		2m	30857.37	
	8m	<335	< 0.05	< 0.09	< 0.08		3m	12101.86	
PM-4	1.5m	<33	< 0.05	< 0.09	< 0.08	PM-11	4m	15065.98	
	3m	<33	< 0.05	< 0.09	< 0.08		6m	ND	
PM-5	2m	16108	< 0.05	< 0.09	< 0.08		PM-11	2m	ND
	Dup2	17140	< 0.05	< 0.09	< 0.08			4m	ND
	4.5m	899	< 0.05	< 0.09	< 0.08	9m		ND	
PM-6	3m	<33	< 0.05	< 0.09	< 0.08	PM-11	13.5	ND	
	Dup3	<33	< 0.05	< 0.09	< 0.08		-	-	
PM-7	2m	ND	-	-	-		-	-	
	4m	ND	-	-	-		-	-	
	6m	ND	-	-	-	-	-		
	8m	ND	-	-	-	-	-		

Tabla 4.3. Resultados de los análisis de TPH -diesel y PAH's, de las muestras de suelo colectadas a diferentes profundidades en los pozos instalados en la zona. Los límites máximos permisibles establecidos por la NOM-138-SEMARNAT-2003 son: TPH – diesel: 1200 [mg/kg] en suelos de uso agrícola; Benzo(a)pireno: 2 [mg/kg]; Benzo(k)fluoranteno: 8 [mg/kg]; Naftaleno: No establecido.

Pozo	Profundidad de la interfaz aire-hidrocarburo [m]	Profundidad de la interfaz hidrocarburo-agua [m]	Espesor medido [m]
<b>MONITOREO DEL PRODUCTO LIBRE (LNAPL), 1/DICIEMBRE/05</b>			
PM-2	8.15	10.51	2.36
PM-3	6.98	9.47	2.49
<b>MONITOREO DEL PRODUCTO LIBRE (LNAPL), 28/SEPTIEMBRE/06</b>			
PM-1	7.53	7.56	0.03
PM-2	8.45	9.42	0.97
PM-3	7.13	9.4	2.27
<b>MONITOREO DEL PRODUCTO LIBRE (LNAPL), 24/OCTUBRE/06</b>			
PM-1	7.44	7.45	0.01
PM-2	8.21	10.9	2.69
PM-3	6.98	9.25	2.27
<b>MONITOREO DEL PRODUCTO LIBRE (LNAPL), 15/NOVIEMBRE/06</b>			
PM-1	7.47	7.5	0.03

PM-2	8.33	10.34	2.01
PM-3	7.01	9.34	2.33
<b>MONITOREO DEL PRODUCTO LIBRE (LNAPL), 02/DICIEMBRE/06</b>			
PM-1	7.43	7.49	0.06
PM-2	8.24	10.27	2.03
PM-3	6.99	9.13	2.14

Pozo	NAFTALENO (HPA-8)		BENCENO		TOLUENO		XILENOS TOTALES	
	[mg/L]	PRG's [mg/L]	[mg/L]	PRG's mg/L	[mg/L]	PRG's [mg/L]	[mg/L]	PRG's mg/L
PM-1	63	6.2	1978.84	0.35	0	0	3394.49	210
PM-2	315	6.2	9296.26	0.35	6226.68	720	13136.69	210
PM-3	256.9	6.2	574.54	0.35	0	0	2748.96	210
PM-6	0	6.2	237.52	0.35	0	0	28.84	210

Tabla 4.4. (superior) Profundidades y espesores de las interfaces aire-hidrocarburo, hidrocarburo-agua, medidas en los pozos de monitoreo. (inferior) resultados de los análisis de naftaleno, benceno, tolueno y xilenos aplicados a las muestras de agua colectadas. PRG's: Preliminary Remediation Goals, Environmental Protection Agency (EPA).

## **4.2. Resultados de la experimentación en laboratorio**

### **4.2.1. Caracterización del suelo**

#### INTRODUCCIÓN

La adecuada selección de una técnica de remediación en un sitio contaminado depende en gran medida de las características particulares del sitio de interés. Resulta inadmisibles proponer la aplicación de una metodología sin antes tratar de entender el entorno natural en donde se desea trabajar. Es por esta razón que un estudio detallado de las propiedades físicas y químicas del suelo toma vital importancia. En la presente tesis se aplicó un gran número de análisis, obteniendo las siguientes propiedades:

Humedad	Unidades formadoras de colonias (UFC)
Carbono orgánico	Concentración inicial de TPH - diesel
Materia orgánica	Coefficiente de adsorción ( $k_d$ )
Fósforo soluble	Densidad real
Fosfatos totales	Densidad aparente
Capacidad de intercambio catiónico	Granulometría
Nitrógeno	

En este apartado solo se presenta una breve síntesis sobre la importancia de cada propiedad determinada, con sus respectivos resultados e interpretaciones, así como la referencia de la metodología empleada. El procedimiento detallado de algunos de los análisis se puede encontrar en el Anexo 2.

#### *Humedad*

Es importante conocer el contenido de agua en el suelo debido a que ésta participa en múltiples formas, puede actuar como solvente, como portador de nutrientes, es capaz de intemperizar rocas y minerales, ioniza los macro y micronutrientes que las plantas toman del suelo y favorece a la biodegradación de la materia orgánica.

El contenido de agua puede ser benéfico, pero en algunos casos también perjudicial. Si se encuentra en exceso favorece la lixiviación de sales y de algunos otros compuestos; por lo tanto, el agua es un regulador importante de las actividades físicas, químicas y biológicas en el suelo (Topp, 1993).

Para la determinación de la humedad se empleó el método gravimétrico establecido en el “Manual de técnicas de análisis de suelos aplicadas a la remediación de sitios contaminados (Fernández *et al.*, 2006)”, el cual es una modificación hecha a la NOM-021-SEMARNAT-2000 (método AS-05).

La humedad del suelo se calcula por la diferencia de peso entre una misma muestra, húmeda y después de haberse secado en la estufa el tiempo suficiente para alcanzar un peso constante. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 4.5.

Fecha	W <sub>sh</sub> [g]	W <sub>ch</sub> [g]	W <sub>ti</sub> [g]	W <sub>f</sub> [g]
12/mayo/2009	0.9892	1.27	2.26	2.09

Tabla 4.5. Resultados de la prueba de humedad aplicada al suelo contaminado (0E). W<sub>sh</sub>= Peso del suelo húmedo [g]; W<sub>ch</sub>= Peso de la charola [g]; W<sub>ti</sub>= Peso total inicial, suelo húmedo + charola [g], W<sub>f</sub>= Peso final [g].

Para el cálculo de la humedad se empleó la siguiente fórmula:  $\%Humedad = \frac{W_i - W_f}{W_i} \cdot 100$  -----(4.1)

Por lo tanto:  $\%Humedad = \frac{2.2627 - 2.09}{2.2627} \cdot 100 = 7.6325 \%$

**% Humedad= 7.63**

*Retención de humedad (Capacidad de Campo)*

La retención de humedad de un suelo expresa la relación entre el contenido de agua y su capacidad para retenerla, los resultados se expresan por medio de curvas de retención y dependen de factores como la porosidad, por lo que este parámetro resulta de suma importancia para poder determinar la permeabilidad del suelo.

Las curvas de retención de humedad se utilizan principalmente para: determinar el índice de humedad disponible en el suelo, esto es, la porción de agua que puede ser absorbida por las plantas; estimar determinados valores de humedad característicos de la relación suelo-agua-plantas como la capacidad de campo o el punto de marchitamiento permanente; clasificar suelos; identificar cambios en la estructura del suelo y determinar la relación entre la tensión de la humedad del suelo y otras propiedades físicas como la porosidad (Stakman, 1980).

El método empleado fue establecido por Klute (1986) y es conocido como el método de extracción con autoclave. Consiste básicamente en saturar un cantidad pequeña de muestra mediante capilaridad y someterla a 0.1, 0.33, 1, 2, 4, 8, 12 y 15 bares con ayuda de la autoclave (Figuras 4.5 y 4.6), con la finalidad de drenar el agua de la muestra a dichas presiones. Una vez sometida la muestra a estas presiones de drenado durante dos días, se pesa y se coloca en un horno a 110 °C por dos días más, para ser pesada nuevamente, de tal forma que la diferencia de pesos entre la muestra parcialmente drenada y la muestra seca es la cantidad de agua retenida en el suelo para las diferentes presiones.



Caracterización hidrogeológica y propuesta técnica – económica de remediación ambiental en un sitio contaminado por un derrame de hidrocarburos, en el estado de Jalisco, México

Figura 4.5. Autoclave para el drenado de suelos

Figura 4.6. Muestras saturadas mediante

Los resultados obtenidos de la experimentación se muestran en la tabla 4.6 y se expresan gráficamente en la figura 4.7.

Muestra: E5-A	No. de Charola	Pto.de Humedad							
	<b>Presión [Bar]</b>	<b>0.1</b>	<b>0.33</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>8</b>	<b>12</b>	<b>15</b>
	1	24.81	17.71	15.38	10.72	9.62	9.22	9.38	9.18
	2	25.38	17.84	16.85	10.99	9.60	9.29	9.43	9.19
	<b>PROM.</b>	<b>25.10</b>	<b>17.77</b>	<b>16.11</b>	<b>10.85</b>	<b>9.61</b>	<b>9.25</b>	<b>9.40</b>	<b>9.18</b>

Muestra: E5-B	No. de Charola	Pto.de Humedad							
	<b>Presión [Bar]</b>	<b>0.1</b>	<b>0.33</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>8</b>	<b>12</b>	<b>15</b>
	24	26.87	19.86	19.44	14.84	12.50	11.99	12.45	12.80
	25	26.79	19.86	19.43	15.12	12.60	11.81	12.33	12.90
	<b>PROM.</b>	<b>26.83</b>	<b>19.86</b>	<b>19.43</b>	<b>14.98</b>	<b>12.55</b>	<b>11.90</b>	<b>12.39</b>	<b>12.85</b>

Tabla 4.6. Resultados de la prueba de retención de humedad del suelo realizado a dos muestras.

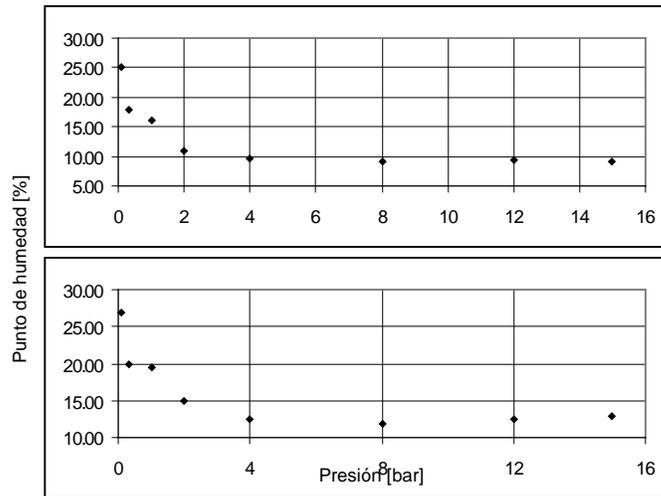


Figura 4.7. Curvas de retención de humedad.

El valor que se toma en cuenta es el mayor, por lo tanto, en promedio, la **capacidad de campo del suelo=25.96%**.

### Carbono Orgánico

El carbono orgánico es uno de los principales componentes de los seres vivos: aproximadamente 50% del peso seco de la Materia Orgánica (MO) es carbono (Fernández *et al.*, 2006). Así, los organismos (plantas y animales) son desintegrados por los microorganismos que regresan el carbono al medio en forma de CO<sub>2</sub> (Baker y Herson, 1994).

La MO del suelo es la fracción orgánica que incluye residuos vegetales y animales en diferentes estados de descomposición, adicionalmente se pueden encontrar compuestos orgánicos tóxicos provenientes de las actividades industriales del hombre, como la contaminación de suelos por hidrocarburos (materia petrogénica), que también constituye parte de la materia orgánica del suelo (Etchevers, 1988).

El método que se empleó para determinar el contenido de carbono orgánico y la cantidad de MO presente en el suelo fue el desarrollado por Walkley y Black (1934). La NOM-021-SEMARNAT-2000 presenta una explicación detallada del principio, la aplicación y el procedimiento.

La técnica establece que con este procedimiento solo es posible detectar entre un 70 y 84 % del Carbón Orgánico Total (COT), por lo que es necesario usar un factor de corrección que varía dependiendo el suelo. La norma recomienda utilizar para suelos mexicanos el factor 1.298 (1/0.77).

Los resultados obtenidos de la experimentación se presentan en la tabla 4.7.

Titulación		Disolución de sulfato ferroso	
Muestra	W[g]	Muestra	[ml]
M-1	0.5615	M-1	4.6
M-2	0.5128	M-2	4.9
M-3	0.5087	M-3	5.2
		Blanco	15.3

Titulación del sulfato ferroso con $K_2Cr_2O_7$ (ml)=	11.1
---	------

Tabla 4.7. Resultados de la titulación de las muestras con sulfato ferroso, y del sulfato ferroso con dicromato de potasio.

Los cálculos necesarios para obtener el porcentaje de MO son:

$$\% C.O. = [(B - T)/g] \cdot N_{sf} \cdot 0.39 \cdot mcf \text{ ---- (4.2)}$$

En donde:

C.O.= Carbono orgánico,

B= Volumen de sulfato ferroso gastado para valorar el blanco de reactivos [ml],

T= Volumen de sulfato ferroso gastado para valorar la muestra [ml],

$N_{sf}$ = Normalidad exacta del sulfato ferroso (valorada por separado al momento de analizar las muestras) (0.5625 N para este experimento),

g= Peso de la muestra empleada [g],

mcf = factor de corrección de humedad.

El factor 0.39 resulta de una serie de multiplicaciones descritas en la norma oficial, se considera tanto el peso en miliequivalentes del C y un factor de corrección debido a que el método solo oxida el 78 % del C.

La mayoría de los laboratorios usan el factor de Van Benmelen de 1.724 para estimar la M.O. a partir del carbono orgánico:

$$\% M.O. = \% C.O. \times 1.724 \text{ ---- (4.3)}$$

Por lo tanto:

$$\% C.O._{M-1} = [(15.3 - 4.6)/0.5615] \cdot 0.5625 \cdot 0.39 \cdot (1 - 0.07632) = 3.8\%$$

$$M.O._{M-1} = 3.8 \cdot 1.724 = 6.65 \%$$

$$\% C.O._{M-2} = [(15.3 - 4.9)/0.5615] \cdot 0.5625 \cdot 0.39 \cdot (1 - 0.07632) = 3.75\%$$

$$M.O._{M-2} = 3.75 \cdot 1.724 = 6.47 \%$$

$$\% C.O._{M-3} = [(15.3 - 5.2)/0.5615] \cdot 0.5625 \cdot 0.39 \cdot (1 - 0.07632) = 3.64\%$$

$$M.O._{M-3} = 3.64 \cdot 1.724 = 6.28 \%$$

**Carbono orgánico promedio= 3.73 %**

**Materia orgánica promedio = 6.46 %**

Los valores de referencia para clasificar la concentración de la materia orgánica en los suelos minerales y volcánicos se presentan en la siguiente tabla:

Clase	Materia orgánica (%)	
	Suelos volcánicos	Suelos no volcánicos
Muy bajo	< 4.0	< 0.5
Bajo	4.1 - 6.0	0.6 - 1.5
Medio	6.1 - 10.9	1.6 - 3.5
Alto	11.0 - 16.0	3.6 - 6.0
Muy Alto	> 16.1	> 6.0

Tabla 4.8. Clasificación de suelos respecto al contenido de materia orgánica, (NOM-021-SEMARNAT-2000).

De acuerdo con los resultados obtenidos y comparando con la tabla 4.8, el suelo volcánico analizado es de clase media respecto al contenido de MO.

#### *Fósforo soluble*

En general, el fósforo (P) del suelo es clasificado en orgánico e inorgánico, dependiendo de la naturaleza de los compuestos que forme. La forma orgánica se encuentra en el humus y la MO, y sus niveles en el suelo son muy inferiores a los que podemos encontrar de manera inorgánica, que está constituida por compuestos de hierro, aluminio, calcio, flúor, etc.

Para determinar el fósforo disponible en el suelo, se siguió la metodología expuesta en el "Manual de técnicas de análisis de suelo aplicadas a la remediación de sitios contaminadas", (Fernández *et al.*, 2006). El método empleado fue el de Bray (Bray y Kurtz, 1945) y se aplica a suelos con pH neutro y ácido, según lo marca la NOM-021-SEMARNAT-2000 y dadas las pruebas realizadas al suelo se determinó que el pH es representativo de suelos ligeramente ácidos (5.423). Este método se basa en la generación de una solución extractora a base de HCl y NH<sub>4</sub>F, la cual remueve formas de fósforo fácilmente solubles, principalmente fosfatos de calcio y una porción de fosfatos de aluminio y hierro. El NH<sub>4</sub>F disuelve los fosfatos debido a la formación de un ión complejo con estos compuestos, cuando se encuentran en solución ácida (Fernández *et al.*, 2006).

Los análisis de P sirven fundamentalmente para el control de la dosificación de productos químicos en tratamientos de agua o suelos, o como un medio para determinar si un sistema presenta contaminación por exceso de este compuesto (Muñoz *et al.*, 2000).

De la experimentación se obtuvieron valores de absorbancia, los cuales representan específicas longitudes de onda en función de la concentración de una sustancia en una disolución problema. A mayor concentración, mayor absorbancia. Los valores obtenidos para la disolución madre, mismos que sirvieron para establecer la curva de calibración del experimento se presentan en la tabla 4.9.

Concentración [mg/L]	Absorbancia [nm]
0.25	0.024
1	0.065
2	0.092
3	0.138
4	0.178
5	0.289
6	0.158

7	0.298
8	0.361
9	0.399
10	0.44

Tabla 4.9. Valores de absorbancia obtenidos para la curva tipo.

La experimentación se llevo a cabo por triplicado. Los valores de absorbancia para la disolución generada con el suelo contaminado fueron los siguientes:

Muestra	Absorbancia [nm]
M-1	0.05
M-2	0.064
M-3	0.069

Tabla 4.10. Valores de absorbancia obtenidos para las muestras de suelo contaminado.

La figura 4.8 muestra la línea de tendencia de la curva tipo y los valores de absorbancia de las muestras analizadas.

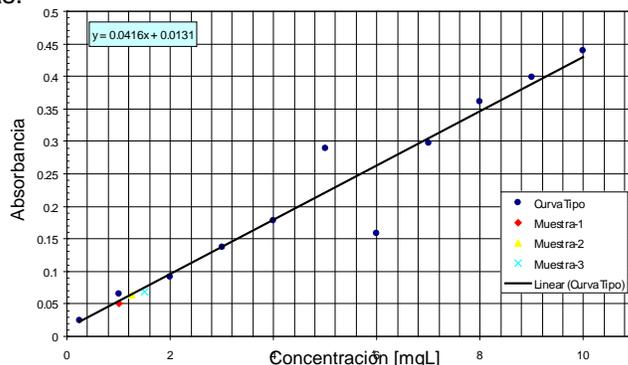


Figura 4.8. Concentración vs absorbancia de la curva tipo, con línea de tendencia y ecuación de la recta. Adicionalmente se muestran los valores de absorbancia de las tres muestras analizadas.

Los valores obtenidos en las 3 muestras están dentro del rango establecido para la curva de calibración, por lo que resulta aceptable hacer el cálculo para obtener los mg/L de P que están presentes en cada muestra. Se empleó la ecuación de la línea de tendencia que se muestra en la figura 4.8.

$$A = 0.0416(CP) + 0.0131 \text{-----(4.4)}$$

Despejando se tiene que:  $CP = (A - 0.0131) / 0.0416 \text{-----(4.5)}$

En donde:

A= absorbancia [adim],

CP= concentración de P en la solución [mg/L].

Por lo tanto:

$$CR_{M-1} = (0.05 - 0.0131) / 0.0416 = 0.88701$$

$$CR_{M-2} = (0.064 - 0.0131) / 0.0416 = 1.2235$$

$$CR_{M-3} = (0.069 - 0.0131) / 0.0416 = 1.3437$$

Una vez calculadas las concentraciones de P en cada muestra, con la siguiente ecuación se determinó el P disponible en el suelo:

$$P(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ de suelo}) = CP \times VF / A \times Vi / w \text{ ---- (4.6)}$$

En donde:

- P= fósforo disponible en la muestra [mg/kg],
- CP= mg/L de P en la solución, obtenida a partir de la curva de calibración,
- VF = volumen final de la solución colorimétrica [ml],
- A = alícuota del extracto usado para la colorimetría [ml],
- Vi = volumen de la solución empleada para hacer el extracto [ml],
- w= peso de la muestra [g].

Por lo tanto:

$$P_{M-1} = 0.887019 \times 1/1 \times 7/1.03 = 6.02$$

$$P_{M-2} = 1.2235 \times 1/1 \times 7/1.1 = 7.79$$

$$P_{M-3} = 1.3437 \times 1/1 \times 7/1.13 = 8.32$$

**Fósforo soluble promedio = 7.38 mg kg<sup>-1</sup> (método de Bray y Kurtz 1)**

Los valores de referencia (tabla 4.11) permiten clasificar al suelo como un suelo con bajo contenido de P soluble.

Clase	mg kg <sup>-1</sup> de P
Bajo	< 15
Medio	15 - 30
Alto	> 30

Tabla 4.11. Contenido de fósforo soluble (NOM-021-SEMARNAT-2000).

Adicionalmente se envió 1 kg de muestra a Laboratorio de Química del Medio e Industrial, S. A. de C.V. (LAQMISA) (laboratorio acreditado), para obtener los valores de fosfatos totales, recibiendo como resultado el registro con clave LQS-01212/09, el cual muestra la siguiente información:

Unidad	Metales	Método	Resultado
Fosfato Total	NOM-021-RECNAT-2000	598.7476	mg/kg

Se concluye que el suelo es rico en fosfatos pero tiene una fracción soluble de clase baja. Esto es importante debido a que el fósforo que se encuentra disponible para favorecer un proceso de biodegradación será solamente la fracción soluble.

**Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)**

Las moléculas siempre presentan, en mayor o menor medida, cargas eléctricas, positivas y/o negativas, actuando como pequeños imanes cuando se encuentran en el suelo, formando así estructuras simples, como la atracción entre una partícula cargada negativamente y una partícula de fertilizante cargada positivamente, o muy complejas, como cuando hay materia orgánica presente con una gran cantidad de cargas eléctricas de ambos signos (Fernández *et al.*, 2006)

La CIC es la capacidad del suelo para retener e intercambiar diferentes elementos minerales. Esta capacidad aumenta notablemente con la presencia de materia orgánica, por lo que con el análisis de CIC del suelo podemos definir la fertilidad del suelo.

La CIC depende de la textura del suelo y del contenido de materia orgánica. Entre más arcilla y materia orgánica presenta en el suelo, la capacidad de intercambio es mayor. El contenido de arcilla es importante, debido a que tienen una relación alta de área superficial a volumen. Los diferentes tipos de arcillas presentan diferentes valores de la CIC. Las esmectitas tienen una mayor capacidad de intercambio catiónico (80-100 meq 100 g<sup>-1</sup>), seguida por las illitas (15-40 meq 100 g<sup>-1</sup>) y caolinitas (3-15 meq 100 g<sup>-1</sup>) (Fernández *et al.*, 2006). La CIC aumenta al aumentar el pH.

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Muestra	W [gr]	Solución de E.D.T.A. [ml]
M-1	2.0257	12
M-2	2.0403	12.4
M-3	2.0406	12.9
Blanco		20.8

Tabla 4.12. Resultados de la titulación hecha con E.D.T.A.

Con la siguiente ecuación se determinó el valor de CIC para el suelo contaminado:

$$CIC = \frac{[(M - N) \cdot 0.05 \cdot 2.5 \cdot 100]}{P} = \frac{[(M - N) \cdot 12.5]}{P} \text{ ----- (4.7)}$$

En donde:

- CIC= Capacidad de cambio catiónico [meq/100 g],
- M= Volumen de EDTA empleado para titular el blanco [ml],
- N= Volumen de EDTA empleado para titular cada muestra [ml],
- P= Peso de la muestra [g],
- 12.5= Factor de disolución.

Por lo tanto:

$$CIC_{M-1} = \frac{[(20.8 - 12) \cdot 12.5]}{2.0257} = 54.30 \text{ meq } 100g^{-1}$$

$$CIC_{M-2} = \frac{[(20.8 - 12.4) \cdot 12.5]}{2.0403} = 51.463 \text{ meq } 100g^{-1}$$

$$CIC_{M-3} = \frac{[(20.8 - 12.9) \cdot 12.5]}{2.0406} = 48.392 \text{ meq } 100g^{-1}$$

**Capacidad de Intercambio Catiónico = 51.385 meq 100g<sup>-1</sup>**

Según los valores de referencia (tabla 4.13) el suelo es **de fertilidad ----respecto** a su CIC.

Clase	CIC (cmol (+) kg-1)
Muy alta	> 40
Alta	25 - 40
Media	15 - 25
Baja	5 - 15
Muy baja	> 5

Tabla 4.13. Clasificación de fertilidad de acuerdo a la CIC (NOM-021-SEMARNAT-2000).

**Nitrógeno**

El nitrógeno es un elemento indispensable para la vida, es una de las bases principales que conforman la estructura del ADN (adenina, timina, citosina, y guanina) y ARN (adenina, uracilo, citosina y guanina), también, es el elemento más abundante en la atmosfera terrestre (78 % de su totalidad), sin embargo, debido al ciclo biogeoquímico que lleva, su presencia en muchos suelos es escasa.

El nitrógeno puede llegar al suelo gracias a los aportes de materia orgánica y a la fijación bacteriana a partir del aire. Dentro del suelo es aprovechado por las plantas, animales y microorganismos que lo incorporan a su sistema, y cuando dichos organismos mueren, el nitrógeno reingresa al suelo completando el ciclo.

La carencia de nitrógeno puede provocar inhibición en el crecimiento de la población microbiana, por el contrario, un exceso provocaría una liberación en forma de amoníaco, en dónde el nitrógeno aprovechable se fuga en forma de gas. Es por ello que se debe mantener una relación adecuada entre el contenido de C y N. En la literatura se ha establecido que una relación de C/N de 10:1 mantendrá estos elementos en equilibrio aproximado (Fernández *et al.*, 2006).

La determinación de nitrógeno total se realizó con el método micro-Kjeldhal (NOM-021-SEMARNAT-2000), y fue realizado por el laboratorio acreditado Laboratorio de Química del Medio e Industrial, S. A. de C.V. (LAQMISA). Los resultados fueron reportados en el registro con clave LQS-01212/09, el cual muestra la siguiente información:

Metales	Método	Resultado	Unidad	
Nitrógeno total	Kjeldhal	NOM-021-RECENAT-2000	391.43	mg/kg

Transformando el resultado a porcentaje se obtiene:

$$\underline{\underline{391.43 \text{ mg kg}^{-1} = 0.039 \% \text{ de Nitrógeno presente en el suelo}}}$$

Por lo tanto el suelo analizado se clasifica como un suelo con un contenido pobre de nitrógeno (tabla 4.14).

Categoría	Valor de nitrógeno en suelo (%)
Extremadamente pobre	< 0.032
Pobre	0.032 - 0.063
Medianamente pobre	0.064 - 0.095
Medio	0.096 - 0.126
Medianamente rico	0.127 - 0.158
Rico	0.159 - 0.221
Extremadamente rico	> 0.221

Tabla 4.14. Valores de referencia para clasificar el contenido de nitrógeno en un suelo (NOM-021\_SEMARNAT-2000).

#### Cuenta microbiana

Para determinar los microorganismos heterótrofos totales, se seleccionó el método de cuenta microbiana por dilución en placa. Es una técnica indirecta de cuantificación, que permite determinar indirectamente el potencial de biodegradación en un suelo contaminado. Según Lorch *et al.* (1995) y Bossert y Kosson (1997) el conteo por dilución en placa es la técnica más adecuada para medios contaminados con hidrocarburos.

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 4.15.

Muestra	Dilución	Wsuelo [g]	# de colonias	Humedad [%]
1	10 <sup>-7</sup>	1.093	+400	5.096
2	10 <sup>-8</sup>	1.093	375	5.096
3	10 <sup>-9</sup>	1.093	233	5.096

Tabla 4.15. Resultados obtenidos del análisis microbiológico por dilución en placa. Adicionalmente se muestra una columna con los resultados de la prueba de humedad.

Para el cálculo de las unidades formadoras de colonias (UFC) por gramo de suelo se usó la ecuación presentada por *Fernández et al.* (2006).

De esta manera:

$$UFC_{gs.s^{-1}} = \frac{(NC \cdot \frac{1}{FD} \cdot \frac{1}{V})}{(P \cdot FH)} \quad (4.8)$$

En donde:

UFC/ g s. s. = unidades formadoras de colonias por gramo de suelo seco,

NC = número de colonias en una caja,

FD = factor de dilución que corresponde a la dilución de donde se tomó la muestra con la que se inoculó la caja (10<sup>-2</sup> a 10<sup>-10</sup>),

V= volumen inoculado en la caja = 0.1 [ml],

P = peso de la muestra húmeda [g],

FH = factor de corrección de humedad =  $1 - (\%humedad/100)$

Para obtener un dato confiable del número de colonias formadas, solo se deben de tomar en cuenta aquellas muestras que presenten entre 30 y 300 colonias (*Fernández et al.*, 2006). La muestra 3 es la que ofreció el mejor dato.

$$UFC_{gs.s^{-1}} = \frac{(233 \times 10^9) \cdot (1 - (5.096/100))}{1} = 2.21 \times 10^{11}$$

Valor que significa que hay una abundante presencia de microorganismos en el suelo, lo que favorece al referirse a un proceso de biodegradación. Fahnestock (1998) considera que 1 x 10<sup>3</sup> UFC/g suelo de bacterias heterótrofas son suficientes para un adecuado funcionamiento de los procesos biodegradatorios, *Fernández et al.* (2006) consideran 1 x 10<sup>5</sup> una cantidad aceptable para llevar a cabo una buena tasa de biodegradación.

#### Concentración inicial de TPH - diesel

Para la determinación de la concentración inicial de diesel en el suelo contaminado se empleo la técnica de Soxhlet (método US EPA 3540C, 1996). Es una de las técnicas analíticas más usadas para la extracción de compuestos orgánicos no volátiles y semivolátiles de sólidos, como suelos.

El desarrollo del método de extracción Soxhlet incluye encontrar un solvente o mezclas de solventes que tengan una alta afinidad por los analitos y una baja afinidad por la matriz de la muestra sólida. El solvente debe tener una alta volatilidad porque debe ser removido al final de la extracción para concentrar el analito de interés (*Weisman*, 1998).

En este caso, el solvente empleado fue hexano, el cual es un hidrocarburo alifático-alcano con seis átomos de carbono. Su fórmula química es C<sub>6</sub>H<sub>14</sub>. Existen varios isómeros de esta sustancia, siendo la más conocida e importante la del n-hexano: CH<sub>3</sub> - CH<sub>2</sub> - CH<sub>2</sub> - CH<sub>2</sub> - CH<sub>2</sub> - CH<sub>3</sub>. Se trata de un líquido incoloro y fácilmente inflamable., es casi inmisible con el agua pero se mezcla bien con los solventes orgánicos apolares como el alcohol, el éter o el benceno. Tiene un punto de ebullición de ~69 °C, considerablemente inferior al del diesel (~180 °C), siendo así, conveniente su aplicación en la metodología.

El método Soxhlet consiste en extraer los hidrocarburos contenidos en el suelo, mediante la acción de un solvente orgánico volátil apropiado (hexano), que es reflujo a través de la muestra varias veces durante un tiempo determinado. El hexano es evaporado y posteriormente condensado en un refrigerante. Se le hace pasar por la muestra y se le regresa al origen para ser nuevamente evaporado. Adicionalmente la muestra de suelo es mezclada con sulfato de sodio anhidro para eliminar el agua residual. Mediante los reflujos del hexano y las elevadas temperaturas, se busca el máximo contacto posible entre la muestra y el solvente de extracción para lograr de esta manera la liberación de los hidrocarburos presentes en el suelo.

Para determinar la concentración inicial de TPH en el suelo (tabla 4.16), se empleó la siguiente fórmula:

$$TPHs [mg kg^{-1}] = \frac{(W_{mf} - W_{mi})}{P \cdot FH} \text{----- (4.9)}$$

En donde:

$W_{mf}$  = peso final del matraz [g],

$W_{mi}$  = peso inicial del matraz [g],

P = peso del suelo [g],

FH = factor de corrección por la humedad =  $1 - (\% \text{humedad} / 100)$ .

Muestra	TPH [mg/kg]	Humedad [%]
0 <sub>1</sub> E	31632.99	5.0957
0 <sub>2</sub> E	32642.79	5.0957

Tabla 4.16. Determinación de la concentración inicial de TPH en el suelo contaminado.

$$\text{TPH iniciales promedio} = 32137.89 \text{ mg kg}^{-1}$$

#### Coefficiente de Adsorción ( $k_d$ )

La adsorción o sorción es un proceso en el que un compuesto soluble (adsorbato) se remueve de la solución por contacto con una superficie sólida (adsorbente). El adsorbente puede ser material poroso, y va a tener mayor influencia a mayor contenido de carbono orgánico, debido a que las partículas de suelo pueden presentar un área superficial muy alta.

Adamson (1982) define la adsorción como la acumulación de un compuesto químico en una superficie. Weber (1972) por su parte, la define como la distribución en dos fases y la sorción como la suma de adsorción y absorción. Sin embargo, muchos autores consideran indistintamente la adsorción y la sorción.

Los principales factores de los compuestos que afectan la adsorción son: solubilidad (a mayor solubilidad menor adsorción), estructura molecular (los compuestos de cadena ramificada como los hidrocarburos se adsorben más que los de cadenas lineales), peso molecular (las moléculas más grandes se adsorben mejor que las moléculas de menor tamaño) y la polaridad (a mayor polaridad menor adsorción).

Así mismo, también hay factores del suelo que influyen en el proceso adsorptivo como el contenido de materia orgánica (por presentar una mayor área superficial), y la textura del suelo (los materiales arcillosos favorecen la adsorción por presentar una mayor área superficial).

El valor del coeficiente de distribución ( $k_d$ ) de la mayoría de los compuestos orgánicos se incrementa con la fracción de carbono orgánico ( $f_{oc}$ ), lo que implica que otra opción para estimar  $k_d$  es por medio de la relación  $K_d = K_{oc} f_{oc}$ , en donde  $K_{oc}$  representa el coeficiente de adsorción, el cual tiene un valor constante para un mismo compuesto en un intervalo amplio de sedimentos y suelos (Santiago-Alonso, 2005).

La utilidad del valor del coeficiente de distribución es conocer la afinidad y la adsorción del diesel en el suelo para poder determinar el factor de retardo del hidrocarburo en el suelo y el agua subterránea.

El método empleado para obtener el coeficiente de distribución  $K_d$  entre la fase en solución de un contaminante  $C_w$  y la fase sólida que lo adsorbe  $C^*$  (Curtis *et al.*, 1986), fue el de "Isotermas de adsorción". Existen varios modelos de adsorción y para este trabajo se uso el más sencillo de todos ellos, el cual es una relación lineal llamada modelo de adsorción de Freundlich (Schnoor, 1996), que es igual a  $C^*=K_d C_w$  en donde  $K_d$  corresponde a la pendiente de la curva definida.

Para llevar a cabo el método se siguieron los lineamientos establecidos por Torres *et al.* (2003). El diseño experimental se muestra en la tabla 4.17.

Muestra	Concentración	$W_{suelo}$ [g]	Diesel	Diesel
	[mg kg <sup>-1</sup> ]		[mg]	[μl]
1-A	0	20.52	0	0
2-A	3000	20.43	60	75
3-A	6000	20.32	120	150
4-A	9000	20.31	180	225
5-A	12000	20.23	240	300
6-A	15000	20.31	300	375

Tabla 4.17. Diseño experimental para ejecutar el método de Isotermas de adsorción.

Los resultados obtenidos del experimento corresponden al análisis de TPH - diesel y pruebas de humedad al suelo empleado, adicionalmente se hizo la prueba de absorbancia para determinar la concentración de diesel en el sobrenadante que resultó de cada vial desarrollado.

Los valores de humedad y concentración de TPH en el suelo se muestran en las tablas 4.18 y 4.19 respectivamente.

Muestra	$W_{chi}$ [g]	$W_{sh}$ [g]	$W_{ch+sh}$ [g]	$W_f$ [g]	Humedad (%)
2-A	1.31	1.20	2.52	2.42	3.94
3-A	1.31	1.17	2.49	2.36	5.05
4-A	1.31	1.10	2.41	2.40	0.60
5-A	1.31	1.03	2.35	2.33	0.91
6-A	1.32	1.29	2.62	2.59	1.12

Tabla 4.18. Humedad de las 5 muestras desarrolladas.  $W_{chi}$ : peso inicial de la charola;  $W_{sh}$ : peso del suelo húmedo;  $W_f$ : peso final

Muestra	Concentración inicial [mg/kg]	$W_{suelo}$ [g]	$W_{mi}$ [g]	$W_{mf}$ [g]	$W_{mf}-W_{mi}$ [g]	Concentración final [mg/kg]
1	0	--	--	--		--
2-A	3000	5.019	94.750	94.762	0.012	2509.98
3-A	6000	5.056	96.271	96.298	0.027	5687.32
4-A	9000	5.061	102.518	102.554	0.036	7097.48
5-A	12000	5.384	90.564	90.615	0.051	9635.75

6-A	15000	5.079	95.522	95.582	0.060	12027.35
-----	-------	-------	--------	--------	-------	----------

Tabla 4.19. Concentración final de TPH en el suelo.  $W_{mi}$ : peso inicial del matraz;  $W_{mf}$ : peso final del matraz.

Una vez obtenidos los valores de concentración final de TPH en el suelo, se determinó la cantidad de diesel que se mantuvo en fase disuelta, asumiendo que la diferencia entre la concentración inicial y la concentración final es la cantidad de diesel que no fue adsorbida por el suelo (ver tabla 4.20).

Muestra	Concentración inicial [mg/kg]	Concentración final suelo [mg/kg]	Concentración final agua [mg/L]
1-A	0	--	--
2-A	3000	2509.98	490.011
3-A	6000	5687.32	312.67
4-A	9000	7097.48	1902.51
5-A	12000	9635.75	2364.24
6-A	15000	12027.35	2972.64

Tabla 4.20. Concentración final en suelo y agua.

Como alternativa para el cálculo de la concentración final en el agua, se llevó a cabo una prueba de absorbancia y se determinó el error experimental para comprobar la validez de los resultados obtenidos de esta manera.

Del barrido hecho con el diesel se concluyó que la longitud de onda a 400 nm representa la parte más estable de la gráfica y por lo tanto es la adecuada para desarrollar la curva tipo o de calibración (Figura 4.9).

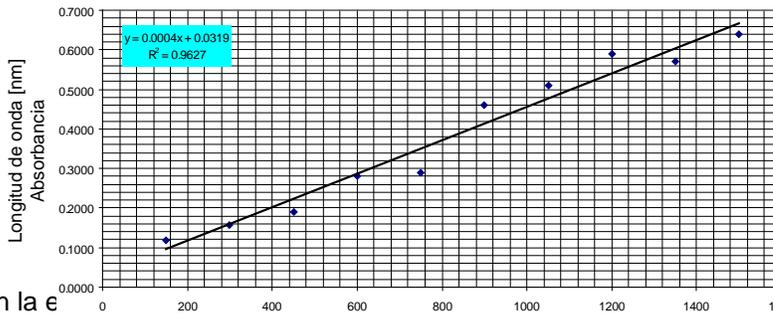


Figura 4.9. Curva tipo para el diesel.

Con la ecuación para las 5 muestras (ver tabla 4.21) fue posible determinar las concentraciones de interés.

$$Conc(mg/L) = \frac{0.0319 - absorbancia}{0.0004} \quad (4.10)$$

Muestra	Absorbancia [nm]	Concentración agua [mg/L]
2-A	0.064	80.25
3-A	0.069	92.75
4-A	0.107	187.75
5-B	0.122	225.25
6-A	0.127	237.75

Tabla 4.21. Valores de absorbancia y concentración final en el agua para las 5 muestras analizadas.

Comparando los resultados obtenidos de la lectura de la absorbancia contra la suposición de que el diesel que no se adsorbió al suelo se quedó en la fase disuelta, y tomando en cuenta que el

análisis de TPH por el método Soxhlet ofrece una mayor certeza en los resultados, se estimó el porcentaje de error (tabla 4.22).

Muestra	Concentración final agua (conc. Inicial-conc. suelo) [mg/L]	Concentración final agua (absorbancia) [mg/L]	Error [mg/L]	Error [%]
2-A	490.01	80.25	409.76	13.65
3-A	312.671	92.75	219.92	3.66
4-A	1902.51	187.75	1714.76	19.05
5-A	2364.24	225.25	2138.991	17.82
6-A	2972.64	237.75	2734.894	18.23

Tabla 4.22. Porcentaje de error en la metodología aplicada (absorbancia) para determinar concentración final en el sobrenadante.

Solo la muestra 3-A presenta un error menor al 10%. Se concluye que los datos experimentales no son los apropiados y se descartan las concentraciones obtenidas por medio de la absorbancia.

Una vez obtenidas las concentraciones finales tanto en suelo como en agua, se generó la curva  $C_w$  vs  $C^*$  (Figura 4.10), y se obtuvo la ecuación de la línea de tendencia. La pendiente de dicha curva representa el valor de  $k_d$ .

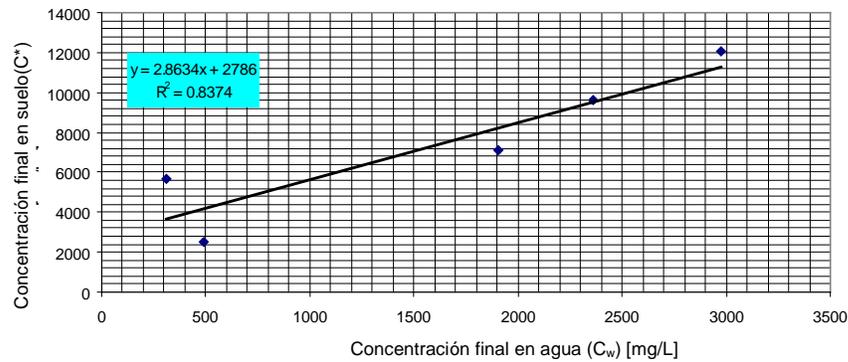


Figura 4.10. Gráfica  $C_w$  vs  $C^*$  con la que se determinó el valor de  $k_d$ .

Como conclusión, el valor de  $K_d = 2.86 \text{ L kg}^{-1}$ .

*Densidad aparente*

La densidad aparente es la proporción de la masa de suelo seco respecto al volumen aparente del suelo. EL volumen aparente incluye el volumen de sólidos y de poros. La masa es determinada después de secar y obtener un peso constante del suelo a 105 °C (Blake y Hartage, 1986). Es afectada por la porosidad e influye en la elasticidad, conductividad eléctrica, conductividad térmica, capacidad calorífica a volumen constante y en la dureza. Esta propiedad se determinó según el método del núcleo descrito por Blake y Hartage (1986).

Muestra	$W_{\text{cilindro}}$ [g]	$W_{\text{cilindro + suelo inicial}}$ [g]	$W_{\text{cilindro + suelo final}}$ [g]	$W_{\text{total}} - W_{\text{cilindro}}$ [g]
A	43.72	123.19	202.30	158.58
B	44.35	121.31	200.45	156.10
C	44.21	122.08	203.30	159.09
Prom.	44.09	122.19	202.02	157.92

Tabla 4.23. Resultados de la prueba de densidad aparente.

El volumen del cilindro tiene una capacidad de 100 cm<sup>3</sup>, el peso promedio del suelo seco fue de 157.92 g (tabla 4.23) por lo tanto:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{157.92 \text{ g}}{100 \text{ cm}^3} = 1.58 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \quad (4.11)$$

**Densidad aparente=1.58 g/cm<sup>3</sup>**

**Densidad Real**

La densidad real de un suelo depende principalmente de la composición, cantidad de minerales y de la proporción de materia orgánica e inorgánica que contiene. Puede ser calculada a partir del conocimiento de dos parámetros: la masa y el volumen de una cierta cantidad del suelo. La masa es determinada pesando directamente el suelo y el volumen indirectamente por el cálculo de la masa y la densidad del agua desplazada por la muestra de suelo.

El método empleado para determinar la densidad real fue el del picnómetro (Blake y Hartage, 1986).

Muestra	W <sub>s</sub> [g]	W <sub>p</sub> [g]	W <sub>w</sub> [g]	W <sub>final muestra</sub> [g]
1	5.052	20.322	45.514	48.548
2	5.021	20.214	45.562	48.554
Prom	5.0365	20.268	45.538	48.551

Tabla 4.24. Resultados de la prueba del picnómetro.

El cálculo se realizó con la siguiente fórmula:

$$\rho = \frac{d_w(W_s - W_a)}{(W_s - W_a) - (W_{sw} - W_w)} \quad (4.12)$$

En dónde:

d<sub>w</sub>= densidad del agua a 24°C = 0.997 [g/cm<sup>3</sup>],

W<sub>s</sub>= peso del picnómetro + peso del suelo corregido a 110°C [g],

W<sub>p</sub>= peso del picnómetro [g],

W<sub>sw</sub>= peso del picnómetro con suelo y agua [g],

W<sub>w</sub>= peso el picnómetro con agua a la temperatura observada [g].

Por lo tanto:

$$\rho = \frac{0.997(25.23202 - 20.268)}{(25.23202 - 20.268) - (48.551 - 45.415)} = 2.7081 \text{ g/cm}^3$$

**Densidad real del suelo= 2.71 g/cm<sup>3</sup>**

**Porosidad**

La porosidad es la medida de la capacidad de almacenamiento de fluidos que posee un suelo o una roca y se define como la fracción del volumen total de la muestra que corresponde a espacios que pueden almacenar fluidos. Esto es:

$$\theta = \frac{\text{volumen de espacios para almacenar fluidos}}{\text{volumen total}} \quad (4.13)$$

Según Danielson y Sutherland (1986), la porosidad de un suelo puede ser determinada si se conocen la densidad real y aparente de dicho material, por medio de la siguiente relación:

$$\theta = 1 - \left( \frac{\rho_a}{\rho_r} \right) \text{-----(4.14)}$$

En donde:

$\theta$ = porosidad total,

$\rho_a$ = densidad aparente [g/cm<sup>3</sup>],

$\rho_r$ = densidad real [g/cm<sup>3</sup>].

Por lo tanto:

$$\theta = 1 - \left( \frac{1.58}{2.7081} \right) = 0.416$$

**Porosidad total= 41.6 %**

#### *Factor de Retardo*

Al momento de que un acuífero se contamina, una serie de procesos físicos y químicos llamadas reacciones de sorción ocurren en el medio, debido a la interacción no solo del agua con el material que lo confina, el contaminante también interactúa y se puede comportar de manera muy diferente al agua. La adsorción, se fija en la fase sólida por la acción de las fuerzas electrostáticas. La quimiosorción ocurre cuando el soluto pasa a la fase sólida como consecuencia de una reacción química. En la absorción el soluto se incorpora a la estructura mineral de la fase sólida. Todo efecto de la sorción implica un retraso en el movimiento del contaminante, denominado efecto de retardo (Martínez *et al.* 2005).

Con el coeficiente de distribución  $k_d$  obtenido, es posible determinar el factor de retardo del hidrocarburo. De acuerdo a Calabrese y Kosteci (1991) los compuestos o mezclas con un valor de retardo de  $R > 100$  pueden ser clasificados como de baja movilidad,  $10 < R < 100$  tienen movilidad media y aquellos con  $R < 10$  tienen una alta movilidad.

Para el cálculo del factor de retardo se empleó el modelo lineal, que tiene la ventaja de ser muy sencillo y el inconveniente de que no supone ningún límite para la capacidad de sorción de la fase sólida. El factor de retardo es, en este caso:

$$r_r = 1 + \left( \frac{\rho_a \cdot k_d}{\theta} \right) \text{-----(4.15)}$$

En donde:

$r_r$ = factor de retardo,

$\rho_a$ = densidad aparente [kg/L],

$k_d$ = coeficiente de distribución (adsorción) [L/kg],

$\theta$ = porosidad total.

Con los resultados de porosidad total, coeficiente de adsorción y densidad real obtenidos para el suelo contaminado fue posible determinar el factor de retardo:

$$r_r = 1 + \left( \frac{1.58 \cdot 2.8634}{0.416} \right) = 11.875$$

**Factor de retardo= 11.87**

Según la clasificación de Calabrese y Kosteci (1991), el factor de retardo del contaminante corresponde a uno con un grado de movilidad medio.

#### *Granulometría*

Un estudio de granulometría tiene por objeto determinar en forma cuantitativa la distribución de las partículas de un determinado suelo de acuerdo a su tamaño. El análisis se llevó a cabo por medio de tamices o cribas con mallas estandarizadas (Juárez y Rico, 1973) y se aplicó tanto al suelo contaminado como al suelo sin contaminar (también perteneciente a la zona de estudio) y se discutieron los resultados obtenidos.

##### a) Suelo contaminado

Análisis efectuado  
con la muestra total de: 1,324.90 g

MALLA No.	ABERTURA [mm]	PESO SUELO RETENIDO [g]	PORCENTAJE RETENIDO [%]	RETENIDO ACUMULADO [%]	PORCENTAJE QUE PASA [%]
2"	50.00	0.00	0.00	0.00	100.00
1 ½"	38.10	0.00	0.00	0.00	100.00
1"	25.00	0.00	0.00	0.00	100.00
¾"	19.00	0.00	0.00	0.00	100.00
½"	12.50	0.00	0.00	0.00	100.00
3/8"	9.50	0.00	0.00	0.00	100.00
Nº. 4	4.75	176.74	13.34	13.34	86.66
Pasa Nº. 4	-----	1,148.16	86.66	-----	-----
Suma	-----	1,324.90	100.00	-----	-----

Análisis efectuado  
con muestra parcial de: 1148.16 g

MALLA No.	ABERTURA [mm]	PESO SUELO RETENIDO [g]	PORCENTAJE RETENIDO [%]	RETENIDO ACUMULADO [%]	PORCENTAJE QUE PASA [%]
6	2.000	194.48	14.68	28.02	71.98
10	2.000	270.13	20.39	48.41	51.59
20	0.850	376.00	28.38	76.79	23.21
40	0.425	285.25	21.53	98.32	1.68
60	0.250	19.54	1.47	99.79	0.21
Pasa 60	-----	-----	-----	99.79	0.00
Suma	-----	1145.39	86.45	-----	-----

Tabla 4.25. Prueba de granulometría aplicada al suelo contaminado.

b) Suelo sin contaminar. Los resultados se muestran en la tabla 4.25.

Análisis efectuado  
con la muestra total de: 1,279.40 g

MALLA No.	ABERTURA [mm]	PESO SUELO RETENIDO [g]	PORCENTAJE RETENIDO [%]	RETENIDO ACUMULADO [%]	PORCENTAJE QUE PASA [%]
2"	50.00	0.00	0.00	0.00	100.00
1 ½"	38.10	0.00	0.00	0.00	100.00
1"	25.00	0.00	0.00	0.00	100.00
¾"	19.00	0.00	0.00	0.00	100.00
½"	12.50	0.00	0.00	0.00	100.00
3/8"	9.50	0.00	0.00	0.00	100.00
Nº. 4	4.75	187.51	14.66	14.66	85.34
Pasa Nº. 4	-----	1,091.89	85.34	-----	-----
Suma	-----	1,279.40	100.00	-----	-----

Análisis efectuado con muestra parcial de: 1091.89 g

MALLA No.	ABERTURA [mm]	PESO SUELO RETENIDO [g]	PORCENTAJE RETENIDO [%]	RETENIDO ACUMULADO [%]	PORCENTAJE QUE PASA [%]
6	2.000	94.65	7.40	22.06	77.94
10	2.000	124.32	9.72	31.77	68.23
20	0.850	204.22	15.96	47.74	52.26
40	0.425	175.77	13.74	61.48	38.52
60	0.250	201.63	15.76	77.24	22.76
Pasa 60	-----	291.30	22.77	100.00	0.00
Suma	-----	1091.89	85.34	-----	-----

Tabla 4.26. Prueba de granulometría hecha al suelo seco y sin contaminar.

A pesar de que el análisis solo llegó hasta la malla No. 60 (Normatividad A.S.T.M. D2487-10, 1996), es posible apreciar que el porcentaje de gravas presentes se mantiene en ambos casos (~14%). El contenido de arenas gruesas y medias aumenta considerablemente en el suelo contaminado y el material fino disminuye debido a la formación de terrones (Figuras 4.11 y 4.12), producto de la adsorción del diesel (Martínez y López, 2001). Sin embargo, el cambio no es suficientemente significativo como para cambiar la clase textural del suelo, esto solo ocurre en sitios contaminados con concentraciones muy elevadas (100000 a 150000 mg/kg) (Martínez y López, 2001).

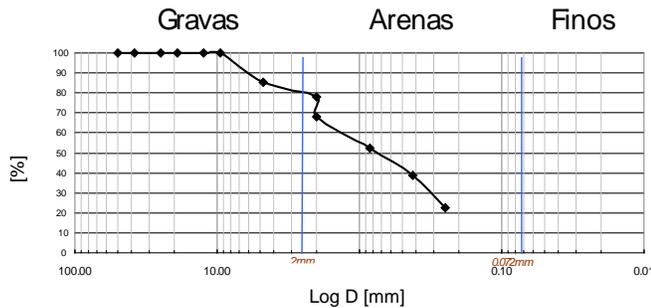


Figura 4.11. Curva granulométrica del suelo sin contaminar.

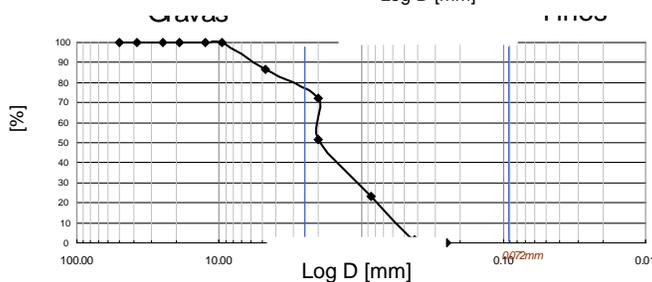


Figura 4.12. Curva granulométrica del suelo contaminado

En resumen, la tabla 4.27 muestra las propiedades físicas y químicas obtenidas para el suelo analizado.

Análisis	Método / Referencia	Resultado	Unidades
Humedad	Método Gravimétrico (AS-05, NOM-021-SEMARNAT-2000)	7.63	%
Retención de humedad (Capacidad de campo)	Klute, 1986	25.9	%
Cuenta microbiana	Dilución en placa (Lorch et al. (1995); Bossert y Kosson (1997); Fernández et al., 2006)	2.21x10 <sup>11</sup>	UFC/g.s.s.

Granulometría	Tamices (Juárez-Badillo, Rico, 1973)	--	--
Densidad real	Método del picnómetro (Blake y Hartage, 1986)	2.708	g/cm <sup>3</sup>
Densidad aparente	Método del núcleo (Blake y Hartage, 1986)	1.58	g/cm <sup>3</sup>
Porosidad	Relación de densidades (Danielson y Sutherland, 1986)	41.6	%
Coefficiente de adsorción	Torres et al. (2003)	2.86	mg kg <sup>-1</sup>
Factor de retardo (R)	Martínez et al. (2005)	11.87	--
Materia Orgánica	Walkley y Black (1934)	6.46	%
Carbono Orgánico	Walkley y Black (1934)	3.73	%
Nitrógeno	Micro-kjeldahl ( AS-09, NOM-021-SEMARNAT-2000)	391.43	mg kg <sup>-1</sup>
Fósforo soluble	Bray y Kurtz (1945)	7.38	mg kg <sup>-1</sup>
Fosfatos totales	As-11NOM-021-SEMARNAT-2000	598.74	mg kg <sup>-1</sup>
CIC	As-13 (NOM-021-SEMARNAT-2000)	51.385	meq 100g <sup>-1</sup>
Concentración inicial de TPH -diesel	Extracción con soxhlet ( EPA 3540C)	32137.89	mg kg <sup>-1</sup>
pH	Análisis en campo	5.42	--

Tabla 4.27. Cuadro resumen de las propiedades determinadas para el suelo en estudio.

#### **4.2.2. Pruebas de tratabilidad**

##### INTRODUCCION

Las pruebas de tratabilidad son experimentos realizados a nivel de laboratorio que sirven para determinar la eficiencia de un proceso en un tiempo establecido y con características específicas. Dichas pruebas deben de estar diseñadas de tal manera que permitan responder cuestiones como las que se plantean a continuación:

- Según las características físicas, químicas y biológicas, ¿Qué técnica de remediación resulta más apropiada para alcanzar el éxito en la remediación del suelo a nivel de campo?
- ¿Qué tratamiento se le puede dar al suelo para aumentar la eficiencia de las posibles técnicas a usar?
- ¿Cuánto tiempo se requiere para concluir el proceso de remediación con éxito?
- ¿Qué complicaciones conlleva cada técnica al momento de aplicarla en laboratorio y trasladarla a nivel de campo?
- ¿Cuál será el costo total del tratamiento del suelo?
- ¿Según los análisis costo-efectivos pertinentes, qué técnica resulta más apropiada?

En la presente tesis, se aplicaron dos metodologías diferentes: (1) lavado de suelo con surfactantes y (2) biodegradación asistida. En las dos se recurrió al uso de surfactantes o tensoactivos de diferente naturaleza. La diferencia entre una técnica y la otra consiste principalmente en la cantidad de surfactante aplicada al proceso además de la naturaleza de cada prueba, ya que la primera se lleva a cabo por procesos físicos y la segunda por procesos biológicos.

En la literatura se encuentran trabajos a nivel de campo en donde se ha reportado con éxito el uso de surfactantes como mejoradores de las técnicas de remediación (específicamente lavado de suelos y biodegradación/biopilas). Sin embargo, en México son pocos los proyectos realizados con los lineamientos establecidos por estas técnicas, por lo tanto, se consideró importante efectuar pruebas de tratabilidad que permitieran concluir detalladamente, el comportamiento y la eficiencia tanto del lavado de suelos con surfactante como del proceso de biodegradación asistida.

Los surfactantes son clasificados como sustancias anfífilas por poseer en sus moléculas una parte polar (hidrofílica: con afinidad al agua) y una parte no polar (lipofílica: con afinidad a los aceites y grasas), son activos sobre la tensión superficial y tienden a acumularse en la superficie o en la interfase entre las fases hidrofílicas e hidrofóbicas. El grado de afinidad al agua o a los aceites esta en función de una propiedad conocida como HLB (balance hidrofílico-lipofílico). Por otra parte, estas sustancias son consideradas como tensoactivos por tener la capacidad de disminuir la tensión superficial de los líquidos en los que son solubles, permitiendo así la disolución de los hidrocarburos que se encuentran adsorbidos al suelo.

Otra propiedad importante de los surfactantes es la concentración micelar crítica (CMC), fenómeno que se presenta debido a la estructura polar-no polar de sus moléculas. En concentraciones por debajo de la crítica los surfactantes solo actúan como tensoactivos, en concentraciones por arriba, las moléculas del surfactante comienzan a formar agregados sencillos (micelas) encapsulando al contaminante y favoreciendo su movilidad en el agua. Las micelas pueden estar integradas por un número  $n$  de moléculas, el tamaño es variable y depende de la naturaleza del surfactante, de la concentración, la temperatura y los iones presentes.

De las dos técnicas de remediación estudiadas, se usaron en total 16 surfactantes de diferente naturaleza: 6 iónicos, 5 no iónicos, 1 zwitteriónico y 3 naturales.

Los surfactantes iónicos tienen una fuerte afinidad por el agua, se disocian en solución acuosa y forman micelas iónicas, cuyas cabezas hidrofílicas (orientadas al agua) poseen una carga neta. Esta atracción electrostática hacia los dipolos del agua permite arrastrar consigo las soluciones de cadenas de hidrocarburos.

Los surfactantes no iónicos no producen iones en solución acuosa, son menos hidrofílicos y crean micelas más grandes, formadas por una parte central en donde se sitúan las cadenas de hidrocarburos no polares y una capa formada por cadenas de surfactante largas y flexibles.

Los surfactantes zwitteriónicos son una mezcla de propiedades de surfactantes iónicos y no iónicos.

Los biosurfactantes son aquellos que provienen de fuentes naturales animales o vegetales, que son obtenidos mediante un proceso de extracción y purificación, sin sufrir modificaciones químicas que alteren estructuralmente su condición natural. Para este proyecto, la materia prima vegetal que dio origen a los surfactantes naturales empleados fue: mezquite, algarrobo y guar, la estructura molecular de las dos últimas mencionadas se muestra en las figuras 4.13 y 4.14. La aplicación de gomas naturales se fundamenta en la capacidad de modificar las propiedades reológicas de los sistemas acuosos. Son buenos estabilizadores, ya que tienen suficientes grupos hidrofóbicos para actuar como puntos de anclaje o unión. Así mismo, contienen muchos grupos hidrofílicos que permiten la reducción de la tensión superficial en una interfase líquido-líquido o líquido-gas (López-Franco *et al.*, 2006).

Estas sustancias además de funcionar como tensoactivo y dispersante (al igual que los de naturaleza iónica y no iónica) tienen la enorme ventaja de no impactar ni alterar químicamente el medio en el que se administran, por lo que su aplicación resulta prometedora, a reserva de los resultados obtenidos en las pruebas de tratabilidad. Una descripción detallada del mezquite, el guar y el algarrobo se presenta en el Anexo 3.

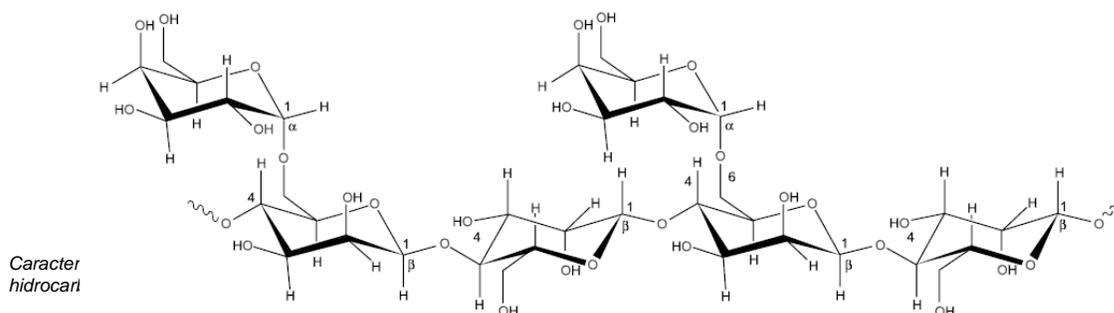
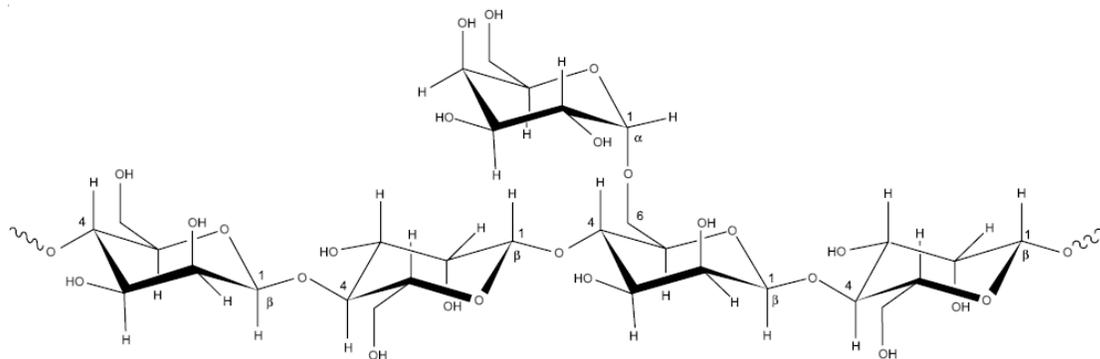


Figura 4.13. Estructura molecular de la goma de guar (Torres *et al.*, 2007).Figura 4.14. Estructura molecular de la goma de algarrobo (Torres *et al.*, 2007).

Los principales objetivos de las pruebas de tratabilidad se pueden enlistar de la siguiente manera:

- Determinar si se está produciendo o no el proceso de biodegradación (para el caso del proceso biológico).
- Concluir si las tasas de remoción de hidrocarburos se mejoran con la adición de surfactantes, ya sea en lavado de suelos o en biodegradación.
- Comparar el proceso llevado a cabo de forma natural contra la adición de surfactantes.
- Comparar las eficiencias de remoción entre las diferentes técnicas analizadas.
- Establecer los tiempos aproximados de remoción.

La tabla 4.28 muestra las propiedades de algunos de los surfactantes usados.

Nombre químico	Fórmula Química	Nombre Comercial	CMC [mg/L]	HL B	Naturaleza iónica	Peso Molecular [g/mol]	Fuente
Dodecil sulfato de sodio	$C_{12}H_{25}NaO_4S$	Salen SDS	400	40	Iónico	288	Torres et al., 2007; Lio-Zhong and Chiou, 2001
Dodecil Bencen sulfato de sodio	$C_{18}H_{29}NaO_3S$	Maranil LAB	1392	NR	Iónico		Torres et al., 2007
		Polafix LO		NR	Iónico		
		Surfactpol 14104			Iónico		
Lauril ether sulfato de sodio	$CH_3(CH_2)_{10}CH_2(OCH_2CH_2)_nOSO_3Na$	Texaponn-40	1458	NR	Iónico	440	Torres et al., 2007
NR		Surfactpol G	NR		Iónico		
Nonil fenol etoxilado	$C_9H_{19}C_6H_4(OCH_2CH_2)_nOH$	Emulgin 600	45	11	No iónico		Torres et al., 2007
Lauril ether etoxilado	$CH_3(CH_2)_{10}CH_2(OCH_2CH_2)_nOH$	BJ35	39.6	16.9	No iónico	1199.54	Torres et al., 2007
Laureato de sorbitan	$C_{24}H_{46}O_6$	Canarcel 20 MO8210		8.6	No iónico		Torres, Comunicación directa
Monoleato de sorbitan etoxilado	$C_{24}H_{44}O_6$	Tween 80	65.4	15	No iónico	1308	Torres et al. 2003
Monoleato de sorbitan etoxilado	$C_{24}H_{44}O_6$	Tween 80	65.4	15	No iónico	1309	Torres et al. 2003
Nonilfenol etoxilado 20	$C_9H_{19}C_6H_4(OCH_2CH_2)_nOH$	Surfactpol 203		11	No iónico	483	Torres, Comunicación directa
Betaina propil-cocoamida	$C_{19}H_{38}N_2O_3$	Polafix CAPB	100	NR	Switeriónico	342.52	Torres et al., 2007
-		Goma de mezquite	NR		Natural		
-		Goma algarobo	NR		Natural	Polisacáridos	
-	$C_{12}H_{24}O_{12}$	Goma de guar	NR		Natural	Polisacáridos	

Tabla 4.28. Propiedades de los surfactantes empleados. CMC: Concentración micelar crítica; HLB: Balance hidrofílico-lipofílico.

#### **4.2.2.1. Lavado de suelo con surfactantes**

El lavado de suelos se analizó con un estudio de microcosmos, cuya metodología ha sido descrita por Torres *et al.* (2003). Se describe a continuación y la figura 4.15 ejemplifica con imágenes el proceso llevado a cabo:

- Se prepararon 17 pruebas con 6 g de suelo contaminado cada una y se pusieron en frascos o viales especiales para este propósito.
- Se adicionaron 30 ml de una solución preparada con agua destilada y surfactante a concentraciones de 1, 0.5 y 0.1 %, en 16 de las muestras. A la prueba restante solo se le adicionó agua destilada y fue llamada prueba de calibración o blanco.

- c) Los frascos se metieron en una agitadora marca SEV modelo INO-650M a 150 rpm y 3 °C por 23 horas.
- d) Una vez transcurrido el tiempo, se dejaron sedimentar por 1 hora y el sobrenadante fue extraído.
- e) Del suelo restante se tomaron 5 g y fueron sometidos a un análisis de TPH por el método Soxhlet.
- f) Al gramo de suelo restante se le hizo la prueba de humedad, necesaria para hacer el cálculo de concentración de TPH.
- g) Comparando los diferentes valores obtenidos fue posible establecer la eficiencia de cada tipo de surfactante en el lavado de suelos.

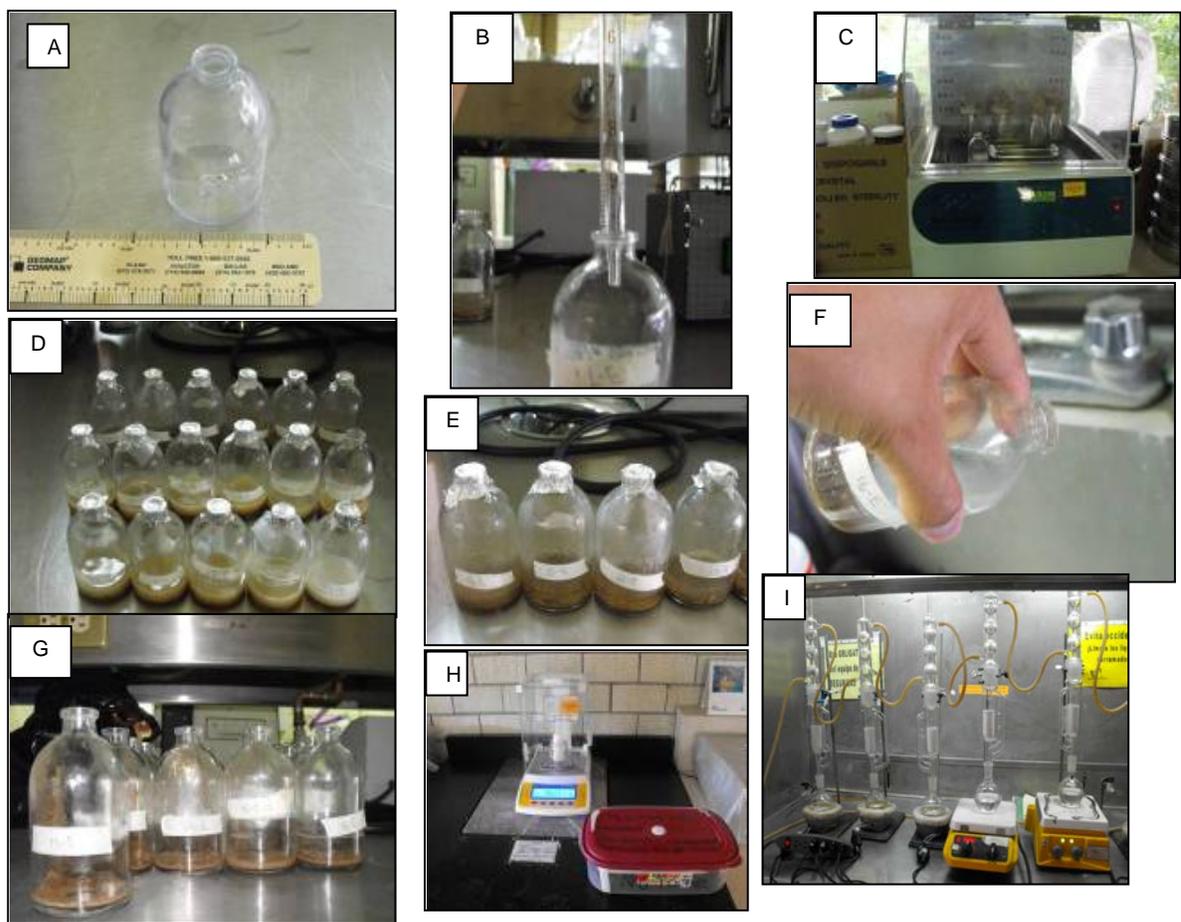


Figura 4.15. Proceso de lavado de suelo. A) dimensión de los viales empleados para almacenar el suelo; B) solución hecha con agua destilada y surfactantes; C) Agitadora que mantuvo girando a los viales a 150 rpm; D) Los 17 viales desarrollados puestos a 1 hr de reposo; E) separación de la fase líquida y el suelo; F) extracción del sobrenadante; G) Suelo después del proceso del lavado; H) Preparativos para la prueba de extracción de TPH; I) Desarrollo de la extracción de TPH del suelo lavado.

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 4.29 y figura 4.16.

Muestra	Surfactante	Naturaleza	Concentración aplicada [%]	TPH final [mg/kg]	TPH removido [mg/kg]	Humedad [%]	Eficiencia de remoción de TPH [%]
1 E	Salen SDS	Iónico	0.50%	12812.63	19325.260	0.7686	60.13
2 E	Maranil LAB	Iónico	0.50%	6906.42	25231.46	0.2208	78.51
3 E	Polafix LO	Iónico	0.50%	26280.24	5857.65	0.8294	18.22
4 E	Surfactol 14104	Iónico	0.50%	26614.91	5522.97	0.9005	17.18
5 E	Texaponn-40	Iónico	0.50%	9231.69	22906.19	0.5090	71.27
6 E	Surfactol G	Iónico	0.50%	16649.54	15488.34	1.8032	48.19
8 E	BJ35	No iónico	0.50%	18709.11	13428.78	1.4986	41.78
9 E	Canarcel 20 MO8Z10	No iónico	0.50%	27240.58	4897.30	1.0012	15.23
10 E	Tween 80	No iónico	1.00%	21822.19	10315.70	2.0065	32.09
11 E	Tween 80	No iónico	0.50%	21517.45	10620.44	0.7615	33.04
12 E	Surfactol 203	No iónico	0.50%	15204.35	16933.53	0.7686	52.69
13 E	Polafix CAPB	Zwitteriónico	0.50%	24175.26	7962.63	0.7686	24.77
14 E	Goma de mezquite	Natural	0.10%	24334.71	7803.17	0.7686	24.28
15 E	Goma algarrobo	Natural	0.50%	14956.25	17181.63	0.7686	53.46
16 E	Goma de guar	Natural	0.50%	14660.67	17477.21	0.7686	54.38
17 E	Agua destilada	-	-	19152.76	12985.12	0.7686	40.40

Tabla 4.29. Eficiencia de cada muestra analizada, después del proceso de lavado.

Es importante resaltar que las concentraciones aplicadas que se muestran en la tabla anterior están expresadas en porcentaje (1, 0.5 y 0.1 %) en donde 1% es igual a 10,000 mg/kg, 0.5% corresponde a 5,000 mg/kg y 0.1% a 1,000 mg/kg.

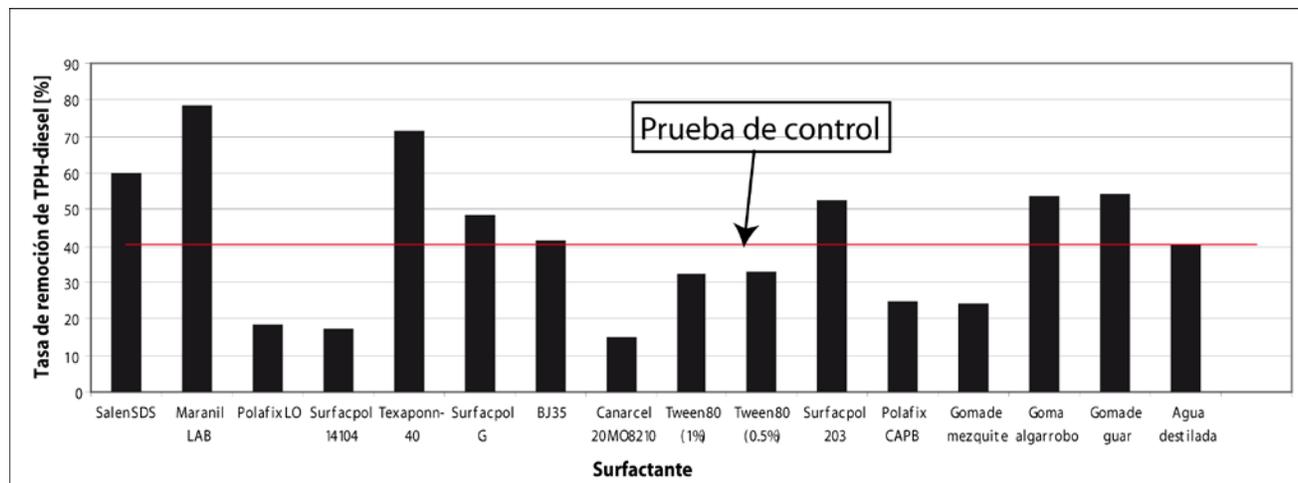


Figura 4.16. Gráfica que muestra las eficiencias de cada prueba llevada a cabo. La línea en rojo muestra la eficiencia del agua destilada (prueba de control).

A continuación se muestra una serie de figuras que resultaron del análisis de la prueba de lavado de suelos.

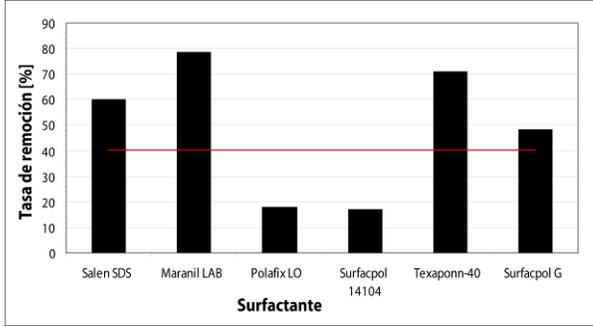


Figura 4.17. Comparación de las eficiencias mostradas por los surfactantes de naturaleza iónica. La línea roja indica la remoción que se obtuvo con la prueba de control.

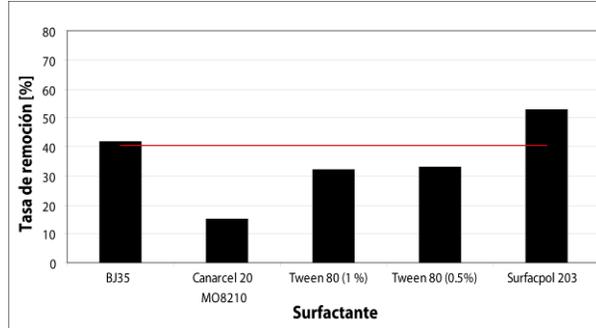


Figura 4.18. Comparación de las eficiencias mostradas por los surfactantes de naturaleza aniónica. La línea roja indica la remoción que se obtuvo en la prueba de control.

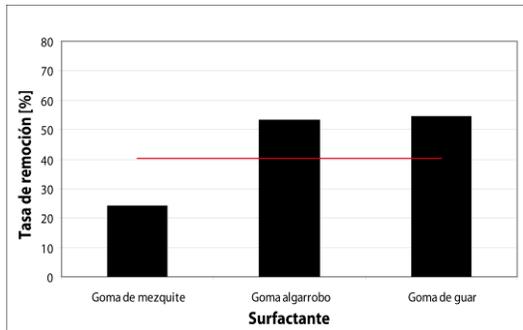


Figura 4.19. Comparación de las eficiencias mostradas por los biosurfactantes. La línea roja indica la remoción que se obtuvo en la prueba de control.

De la tabla 4.29 y las figuras 4.16, 4.17, 4.18 y 4.19 se concluye lo siguiente:

- De las 17 pruebas, 6 se llevaron a cabo con surfactantes iónicos, 6 con aniónicos, 1 con un surfactante zwitteriónico, 3 naturales y una con agua destilada.
- El agua destilada alcanzó tasas de remoción del 40%, por lo que cualquier prueba que haya obtenido una eficiencia menor será descartada por el costo – beneficio que implica. No es económicamente factible gastar en la adición de un químico que experimentalmente ha demostrado afectar al sistema.
- La prueba 7E dio una eficiencia de más del 100%, reflejando un error en el manejo durante la experimentación.
- Los mayores porcentajes de remoción se presentaron en las muestras 2E y 1E (Maranil Lab y Salen SDS, 78.5 y 60.1%, respectivamente). Los dos surfactantes son de naturaleza iónica y se usaron a concentraciones del 0.5%.
- Dos de los tres surfactantes naturales (guar y algarrobo) alcanzaron tasas de remoción del 54 % en promedio.
- A excepción de la muestra 12E (surfapcol 203) todos los surfactantes aniónicos mostraron eficiencias inferiores a las del agua destilada.
- Los surfactantes iónicos resultaron ser la mejor opción para remover TPH del suelo.



ión ambiental en un sitio contaminado por un derrame de

Figura 4.20. Tasas de remoción para el surfactante Tween-80 a dos diferentes

EL surfactante no-iónico Tween 80 se aplicó a concentraciones de 1 y 0.5%. El aumentar la concentración de surfactante no garantiza una mayor tasa de remoción de TPH (4.20), situación de suma importancia al momento de considerar costos para el diseño de un sistema de remediación.

La eficiencia de remoción determina la cantidad de TPH que son removidos en función de la cantidad de surfactante empleado para conseguirlo. Es notable que a mayor porcentaje de remoción, mayor es la cantidad de gramos de TPH removidos por cada gramo de surfactante, sin embargo la función no es lineal. Iturbe *et al.* (2004) sugieren que el ajuste que se le debe hacer a los datos corresponde a una exponencial (Figura 4.21). Esto significa, que con el lavado de suelo llevado a cabo a una mayor concentración de surfactante, se obtienen menores tasas de remoción, lo que implica un gran desperdicio de surfactante y un incremento en los costos del proceso de remediación.

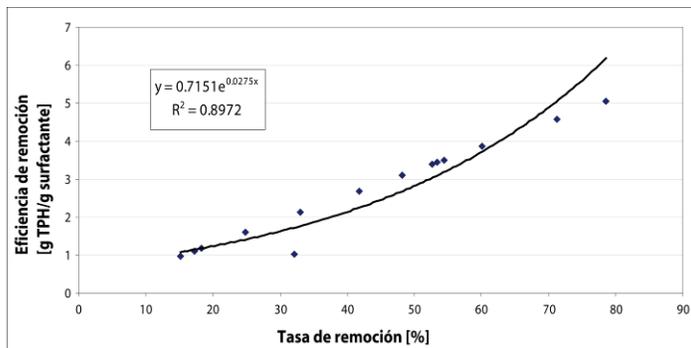


Figura 4.21. Eficiencia de remoción (g TPH's/ g surfactante) en función de la tasa de remoción de TPH's.

Es notable observar que la remoción de TPH resulta ser más efectiva con dosis de surfactantes más próximas a 1 vez la CMC de cada uno de ellos (Figura 4.22).

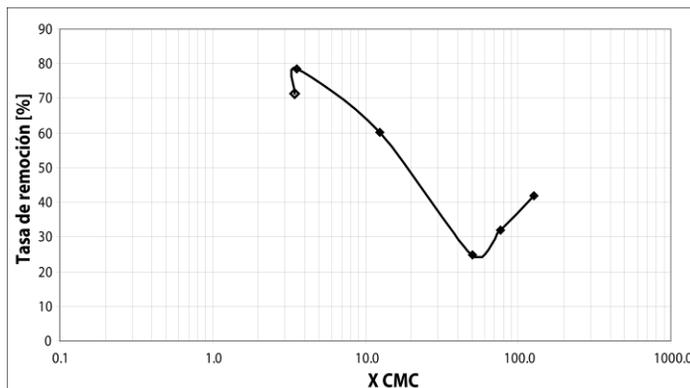


Figura 4.22. x CMC vs tasas de remoción de TPH's.

Torres et al. (2003) encontraron que al variar la CMC del surfactante Surfapcol en 0.5CMC, 50CMC, 100CMC y 300CMC las tasas de remoción son de 52.5, 51.9, 83 y 88.2% respectivamente, concluyendo que a mayor CMC mayor la eficiencia de remoción. Sin embargo las características granulométricas del suelo analizado no son las mismas por lo que no es posible extrapolar los datos obtenidos en el trabajo presentado por Torres et al (2003) ni en los resultados

mostrados en esta tesis. Es necesario realizar una experimentación detallada con el suelo en cuestión para determinar el comportamiento de los procesos de lavado.

Es importante mencionar que ninguna de las pruebas realizadas concluyó en concentraciones por debajo de la máxima permisible por la normatividad mexicana (NOM-138-SEMARNAT/SS-2003), la cual establece que el límite máximo para suelos de uso agrícola es de 1200 mg/kg, sin embargo como ya se mencionó, el proceso llevado a cabo solo consistió en una prueba de tratabilidad que permitió establecer la eficiencia de remoción en función de los diferentes tipos de surfactante y en uno de los casos de la concentración.

Una de las grandes ventajas del lavado de suelos son los tiempos de remediación, ya que en tan solo 24 horas se puede llevar a cabo todo el proceso, haciendo factible la implementación de realizar hasta tres ciclos de lavado para poder alcanzar los límites máximos permisibles, como es demostrado por Iturbe et al (2004).

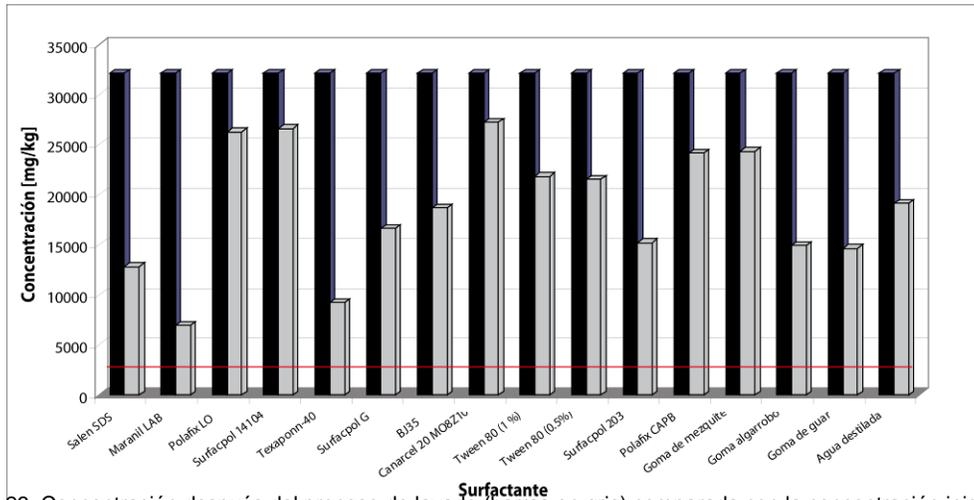
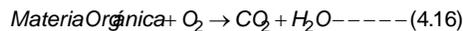


Figura 4.23. Concentración después del proceso de lavado (barras en gris) comparada con la concentración inicial (barras en negro). Línea en rojo representa el valor máximo permitido de concentraciones de TPH fracción media en un suelo de uso agrícola.

Como ya se menciona para poder alcanzar concentraciones por debajo de la estipulada por la norma, es necesario aplicar subsecuentes procesos de lavados, dinámica que ha sido reportada por Iturbe *et al.* (2004), mostrando el comportamiento respecto a las concentraciones finales obtenidas después de tres procesos de lavado aplicado al mismo suelo.

#### 4.2.2.2. Biodegradación asistida

La biodegradación aerobia aplicada a la remediación de suelos contaminados por hidrocarburos consiste en el uso de microorganismos para convertir la materia orgánica, que tiene una fracción de carbono y forma parte de los hidrocarburos, en sustancias menos tóxicas, todo en presencia de oxígeno. Esta transformación de los componentes puede, en ocasiones, llegar a la eliminación total, lo que significaría que todos los productos de hidrocarburos han sido convertidos en biomasa (CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O), esto es:



La capacidad de los microorganismos de usar como fuente de carbono y energía a los hidrocarburos depende principalmente de los factores ambientales presentes en el medio, como la temperatura, pH, humedad, oxígeno disponible, tamaño del inóculo y nutrientes.

La temperatura adecuada está en función del tipo de microorganismo que esté llevando a cabo la asimilación del contaminante. Hay organismos psicrófilos que trabajan en ambientes a muy bajas temperaturas, mesófilos que trabajan a temperaturas de 20 a 45 °C aproximadamente y los termófilos que pueden soportar incluso hasta 90 °C.

El oxígeno disponible es importante ya que se está trabajando con un proceso aerobio y se debe pensar en un sistema que permita que el oxígeno llegue a los microorganismos de manera eficiente.

La humedad es importante porque es necesario que exista una pequeña cantidad de agua para que haya presencia de microorganismos. El suelo tiene una propiedad llamada capacidad de campo y se considera que un adecuado crecimiento de microorganismos se da cuando el suelo se encuentra entre un 70 y 80% de su capacidad.

El tamaño del inóculo se refiere a que tal vez la cantidad de microorganismos presentes en el medio es muy pobre y se requiere estimular el crecimiento, entendiendo que a mayor presencia de estos, mayor será la tasa de biodegradación.  $1 \times 10^5$  unidades formadoras de colonias por cada gramo de suelo seco (UFC/g s.s.) se considera una cantidad aceptable para llevar a cabo una buena tasa de biodegradación (Fernández *et al.*, 2006)

Respecto a los nutrientes principales, se necesita tener un balance adecuado para evitar la inhibición de la actividad microbiana. Se sugiere una relación de carbono/nitrógeno/fósforo de 100/15/1 (Torres *et al.*, 2005; 2009-comunicación personal). Para este trabajo se analizaron los nutrientes presentes y se decidió, agregar solamente el nitrógeno faltante para llegar a una relación C/N de /100/15, sin embargo, y a pesar de la falta de fósforo en el suelo no se adicionó ninguna sustancia que pudiera balancear la relación de nutrientes. Para efectos de esta tesis se consideró interesante probar la eficiencia de la prueba de biodegradación con una relación C/N/P de 100/15/0.02, con la hipótesis de que si el proceso resulta ser efectivo, el impacto económico en la propuesta de remediación se vería beneficiado al minimizar el gasto de P en la etapa de preparación del suelo para el proceso biológico.

Conforme pasa el tiempo de contacto del contaminante con el suelo, el segundo adsorbe mayores cantidades de hidrocarburo y éste se puede ir almacenando en los microporos ubicándose en sitios inaccesibles incluso para los microorganismos. Por ello, en la biodegradación asistida se maneja el uso de surfactantes en pequeñas dosis (2, 20, 200 mg kg<sup>-1</sup> de suelo), recomendado por Torres *et al.* (2003), logrando así disminuir la tensión superficial del contaminante volviéndolo accesible para los microorganismos, haciendo más eficiente el proceso de biodegradación.

El procedimiento del estudio de microcosmos se describe a continuación:

- a. Se prepararon 16 frascos con 30 g de suelo cada uno (microcosmos).
- b. Para mantener la relación 100/15/0.02 de C/N/P se tomó como base el contenido de TPH fracción media (diesel) presente en el suelo y se determinó que el suelo era pobre en N y en P.
- c. Para compensar el déficit de N, se prepararon 100 ml de solución con 2.17 g de sulfato de amonio y agua destilada, agregando 4.7 ml de la solución a cada microcosmos. Quedando al final las siguientes concentraciones en el suelo:

$$C= 25710.31 \text{ mg kg}^{-1}; N=3660.03 \text{ mg kg}^{-1}; P=7.38 \text{ mg kg}^{-1}$$

- d. Se agregaron 12, 120 y 1200 µl de cada surfactante (Brij 35, SDBS Maranyl Lab, Polafix CAPB, goma de guar y goma de algarrobo), para obtener dosis de 2, 20 y 200 mg/kg quedando 3 muestras de cada surfactante a diferentes concentraciones.

- e. Para obtener las condiciones de humedad adecuadas (20 %) se adicionaron 1188 y 1080 µl de agua destilada a los microcosmos con dosis de 2 y 20 mg/kg de surfactante respectivamente y al tercero no se le agregó agua, manteniendo así la cantidad de 1200 µl de solución a cada frasco.
- f. Se corrió un blanco o prueba de control, esterilizado a 120 °C durante 15 minutos.
- g. Cada frasco fue cerrado con una tapa de rosca y se selló con parafilm para evitar cualquier transferencia con el entorno.
- h. Los 16 microcosmos fueron colocados en una incubadora por un periodo de 12 semanas, evitando el contacto con la luz.
- i. Pasados los tres meses (01/junio/09 – 01/sep/09) los microcosmos fueron extraídos de la incubadora y se hizo la prueba de extracción de TPH con Soxhlet para medir la concentración después del proceso biológico.
- j. El análisis de humedad se hizo a cada microcosmos con la misma técnica que se usó para la caracterización del suelo.
- k. Adicionalmente se llevó a cabo un conteo microbiano por dilución en placa para poder desarrollar mejores interpretaciones sobre los resultados obtenidos en el proceso de biodegradación.

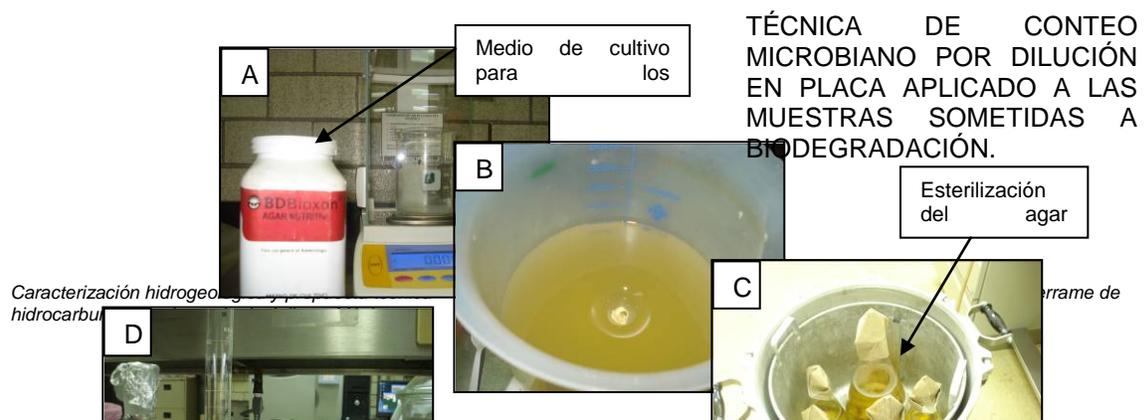
El diseño experimental se muestra en la tabla 4.30 y se ejemplifica en las figuras 4.24, 4.25 y 4.26.

# Muestra	W suelo [g]	Surfactante / dosis [mg/kg]	Surfactante [µl]	Sulfato de amonio Sol. 21.75 [mg/ml]	H <sub>2</sub> O [µl]
B01	30.01	Brij 35 / 2	12	4.7 ml	1188
B02	30.01	Brij 35 / 20	120	4.7 ml	1080
B03	30.00	Brij 35 / 200	1200	4.7 ml	0
B04	30.07	SDBS maranil LAB / 2	12	4.7 ml	1188
B05	30.01	SDBS / 20	120	4.7 ml	1080
B06	30.00	SDBS / 200	1200	4.7 ml	0
B07	30.03	Polafix CAPB / 2	12	4.7 ml	1188
B08	30.05	Polafix CAPB / 20	120	4.7 ml	1080
B09	30.07	Polafix CAPB / 200	1200	4.7 ml	0
B10	30.00	Guar / 2	12	4.7 ml	1188
B11	30.05	Guar / 20	120	4.7 ml	1080
B12	30.05	Guar / 200	1200	4.7 ml	0
B13	30.02	algarrobo / 2	12	4.7 ml	1188
B14	30.05	algarrobo / 20	120	4.7 ml	1080
B15	30.02	algarrobo / 200	1200	4.7 ml	0
B16	30.00	Blanco Esterilizado	-	4.7 ml	1200

Tabla 4.30. Diseño experimental de las pruebas de biodegradación.

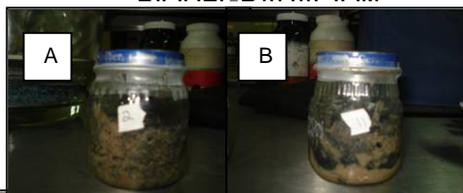


Figura 4.24. A) Frascos en donde se colocaron 30 g de suelo para ser sometidos al proceso de biodegradación; B) Adición de agua destilada para obtener las condiciones adecuadas de humedad. C) Sulfato de amonio; D) Acondicionamiento del suelo con los nutrientes necesarios; E) Incubadora que almaceno los frascos por 3 meses.



H

Figura 4.25. Fotografías del desarrollo de la cuenta microbiana aplicada a los microcosmos que resultaron del proceso de biodegradación, A-C: generación del medio de cultivo para los microorganismos (agar nutritivo); D-F: desarrollo de las diluciones que se ocuparon para llevar a cabo una adecuada siembra; G-L: vaciado en placa del medio nutritivo y siembra de microorganismos; M-P: conteo de colonias formadas en cada placa.



Caracterización hid  
hidrocarburos, en el

un derrame de

Figura 4.26. Técnica de extracción de TPH aplicado a muestras de biodegradación. A y B muestran el aspecto de dos microcosmos después de la biodegradación; C: solvente usado para realizar la extracción del contaminante (hexano); D-F: equipo soxhlet instalado y funcionando; G: sistema de refrigeración; H: matraces con el extracto producto del suelo, una mezcla de hexano y contaminante; I,J: rotoevaporador que permite la separación del hexano y el contaminante; K: matraz libre de hexano y con el contaminante extraído.

#### PRUEBA DE HUMEDAD

Muestra	Surfactante/dosis [mg/kg]	$W_{chi}$ [g]	$W_{suelo\ húmedo}$ [g]	$W_{ti}$ [g]	$W_{tf}$ [g]	Humedad [%]
B01	Brij 35 /2	1.32	1.04	2.36	2.17	8.01
B02	Brij 35 /20	1.32	1.01	2.33	2.08	10.48
B03	Brij 35 /200	1.31	1.04	2.36	2.07	12.12
B04	SDBS 2 maranil LAB/2	1.32	1.13	2.46	2.19	10.98
B05	SDBS /20	1.31	1.09	2.41	2.17	9.91

B06	SDBS /200	1.31	-	-	-	10.58
B07	Polafix CAPB /2	1.32	1.00	2.33	2.13	8.40
B08	Polafix CAPB /20	1.31	1.12	2.44	2.21	9.37
B09	Polafix CAPB /200	1.33	1.06	2.39	2.17	9.00
B10	Guar /2	1.33	1.20	2.53	2.24	11.21
B11	Guar /20	1.32	1.01	2.33	2.10	9.68
B12	Guar /200	1.31	1.08	2.40	2.16	10.18
B13	algarrobo /2	1.32	1.10	2.43	2.14	11.85
B14	algarrobo /20	1.32	1.08	2.40	2.14	10.76
B15	algarrobo /200	1.31	1.06	2.38	1.94	18.25
B16	Blanco Esterilizado	1.31	1.07	2.39	2.14	10.07

Tabla 4.31. Valores de humedad de cada muestra sometida al proceso de biodegradación.

MEDICIÓN DE TPH - diesel

Para saber la cantidad de TPH removidos por el proceso de biodegradación se realizó la extracción del contaminante por el método Soxhlet. La tabla 4.32 muestra los resultados obtenidos.

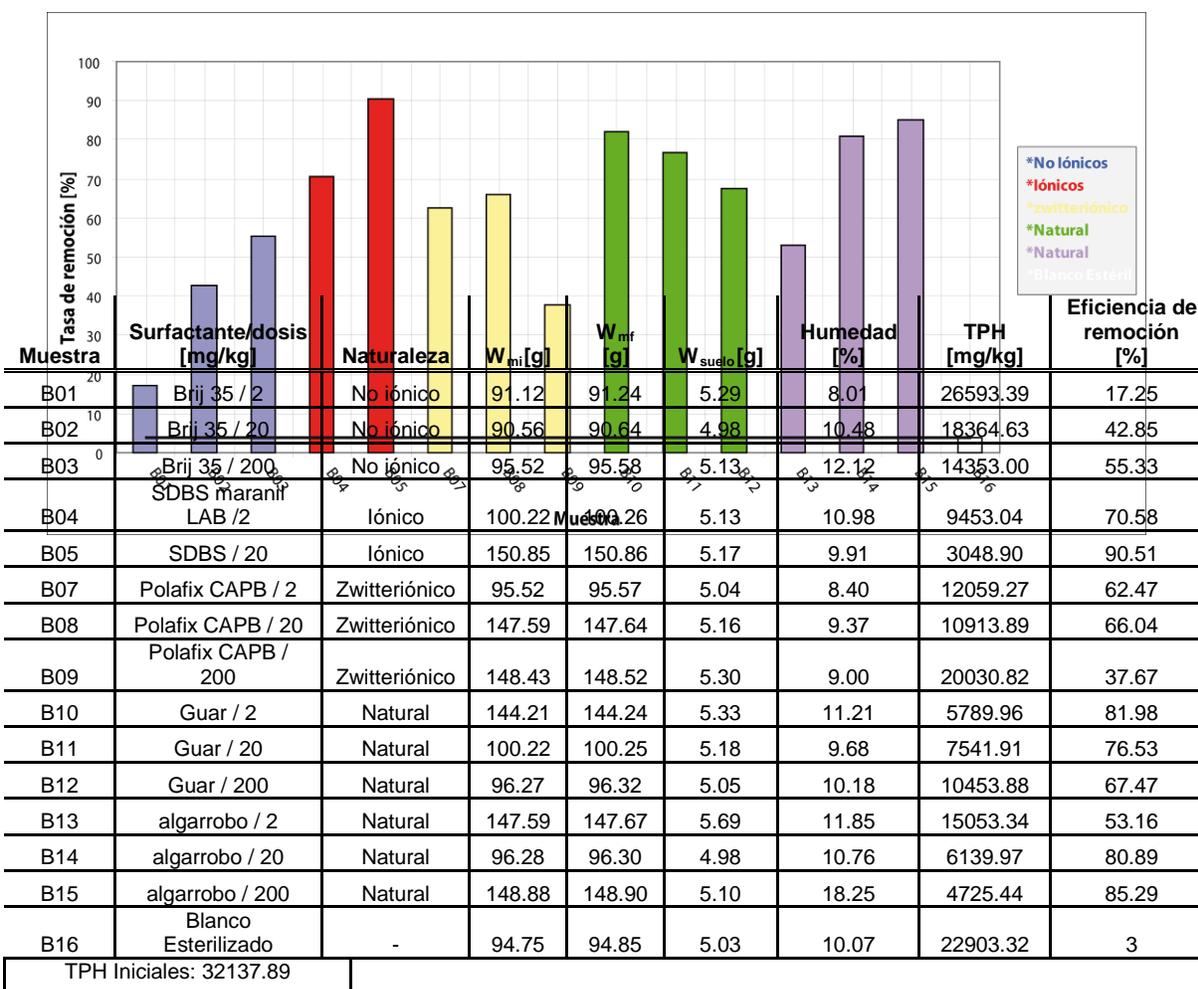


Tabla 4.32. Eficiencia del proceso de biodegradación.

Figura 4.27. Eficiencias de remoción del proceso de biodegradación. La línea negra representa el valor obtenido por el blanco estéril.

Con el proceso de biodegradación se alcanzaron remociones del 90% (SDBS, Maranil LAB), los surfactantes naturales tuvieron resultados importantes, llegando a una remoción del 80–85% (Figura 4.27). El blanco estéril mostró una eficiencia de remoción del 3%.

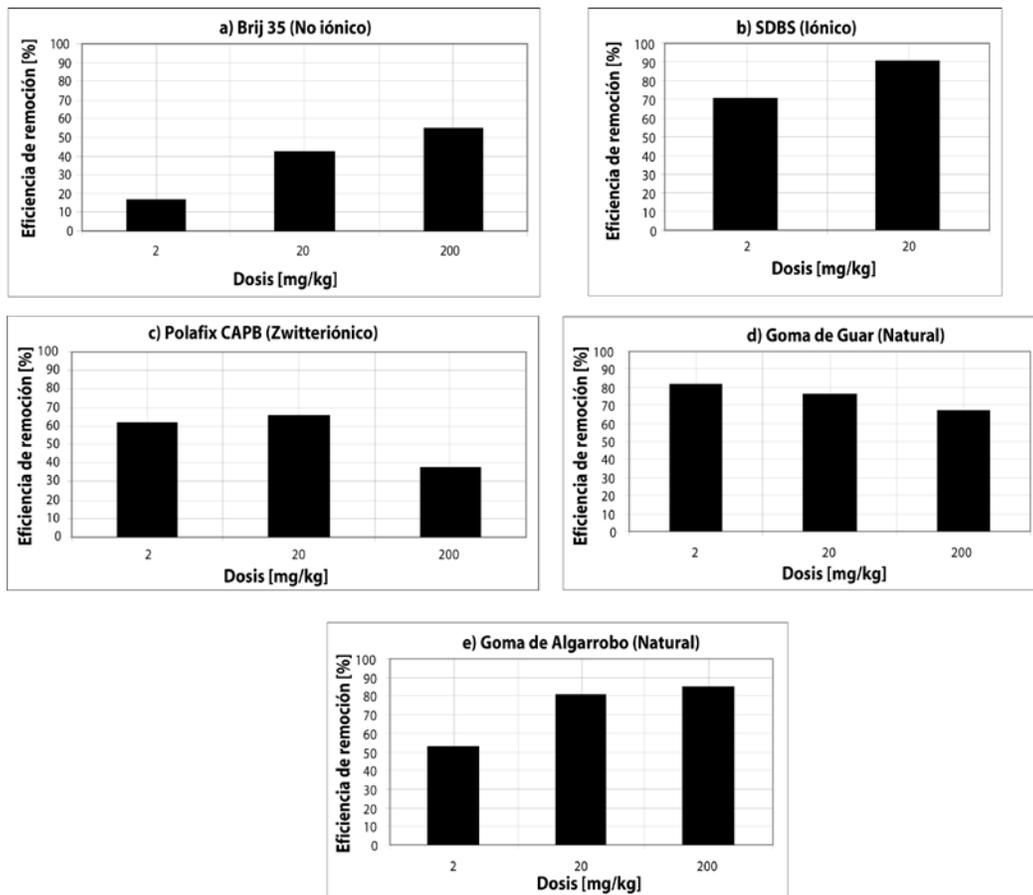


Figura 4.28. Eficiencia de remoción de cada surfactante empleado, en función de las dosis aplicadas.

Una adecuada selección en la dosis de surfactante a aplicar resulta ser muy importante al momento de analizar las eficiencias de cada prueba. Los surfactantes Brij 35 y SDBS mostraron una mayor eficiencia al aumentar la dosis (Figura 4.28 a y b), la goma de guar y Polafix CAPB, sin embargo se comportaron de manera opuesta, disminuyendo la eficiencia al aumentar la dosis. El algarrobo a pesar de aumentar la eficiencia al aumentar la dosis, los porcentajes de remoción resultaron muy similares (80–85%) incluso cuando la dosis aumentó en un orden de magnitud (20-200 mg/kg). Una adecuada selección de la dosis permitirá eficientizar los procesos de remoción y evitará un gasto inadecuado de los recursos económicos.

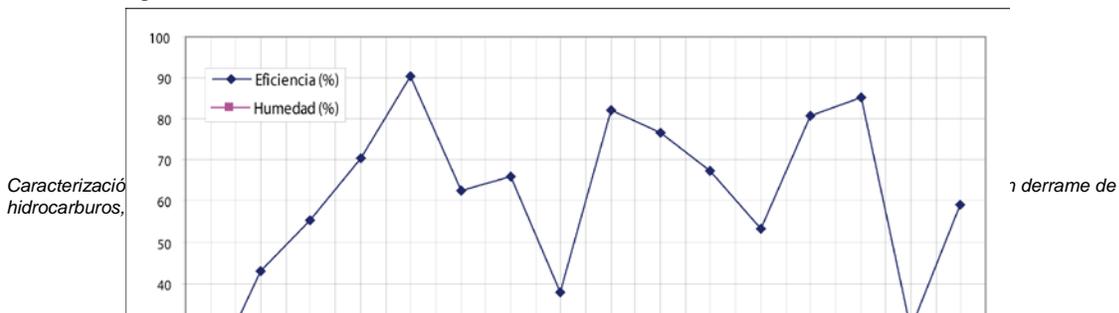


Figura 4.29. Comparación entre la humedad y la eficiencia de cada prueba.

En la mayoría de las pruebas se observó que a mayor contenido de humedad, la remoción del contaminante es mayor (Figura 2.29), a excepción de la muestra B09 que arrojó una eficiencia muy baja con una dosis de 200 mg/L y con una humedad mayor que aquella con 2 mg/L.

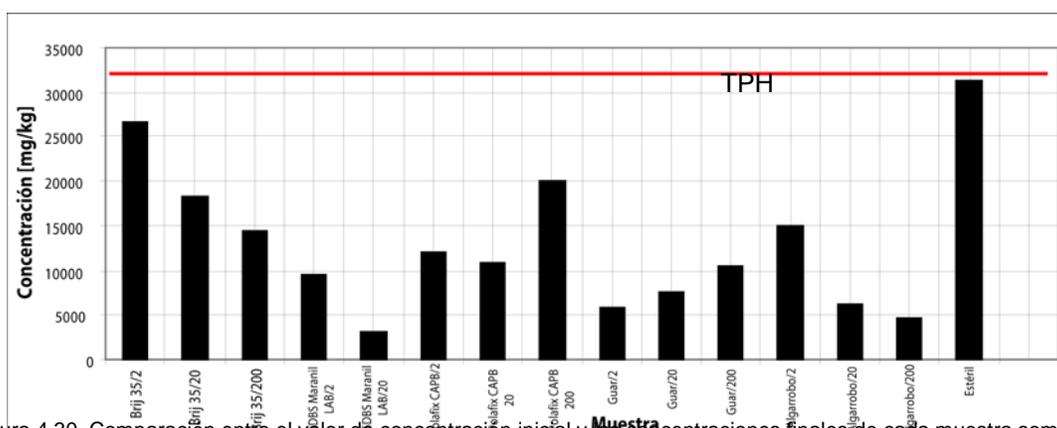


Figura 4.30. Comparación entre el valor de concentración inicial y las concentraciones finales de cada muestra sometida a biodegradación. Línea roja muestra la concentración inicial de TPH.

Con ayuda de la figura 4.30 es posible determinar la tasa de remoción por día. La línea roja indica la concentración inicial del suelo.

Si se suponen 90 días de actividad biológica y usamos las concentraciones finales se puede obtener la siguiente tabla:

#Muestra	TPH finales [mg/kg]	TPH iniciales [mg/kg]	TPH removidos [mg/kg]	TPH removidos por día [mg/kg]
B01	26593.39	32137.89	5544.49	61.60
B02	18364.63	32137.89	13773.25	153.03
B03	14353.00	32137.89	17784.88	197.60
B04	9453.04	32137.89	22684.84	252.05
B05	3048.90	32137.89	29088.99	323.21
B07	12059.27	32137.89	20078.62	223.09
B08	10913.89	32137.89	21223.99	235.82
B09	20030.82	32137.89	12107.07	134.52
B10	5789.96	32137.89	26347.93	292.75
B11	7541.91	32137.89	24595.97	273.28

B12	10453.88	32137.89	21684.01	240.93
B13	15053.34	32137.89	17084.55	189.82
B14	6139.97	32137.89	25997.92	288.86
B15	4725.44	32137.89	27412.44	304.58
B16	22903.32	32137.89	9234.56	102.60

Tabla 4.33. Tasa de remoción de TPH por día.

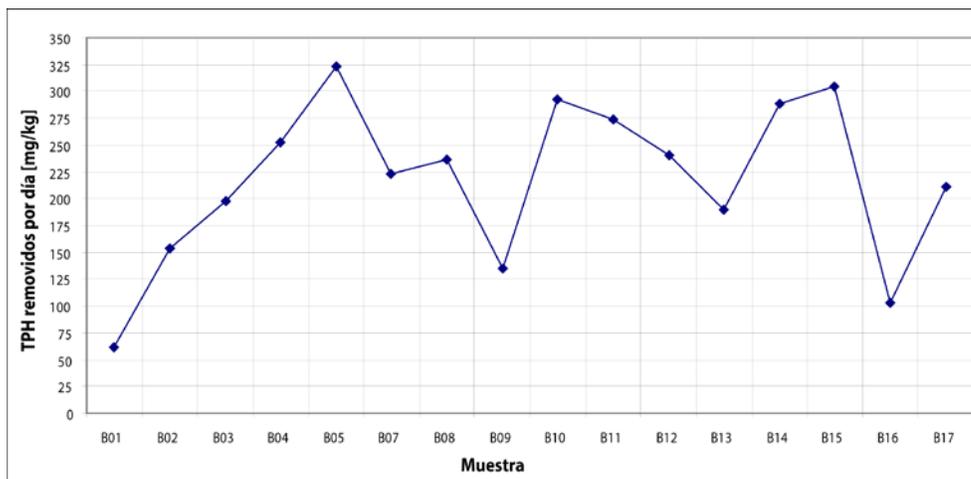


Figura 4.31. Tasa de remoción de TPH por día

La muestra B01 (Brij 35 a una dosis de 2 mg/kg) mostró una tasa de remoción de 61.60 mg/kg, siendo la más baja. Por el contrario B15 removió 304.58 mg/kg de TPH al día (Figura 4.31). Con estos valores fue posible predecir a grandes rasgos el tiempo que tardaría cada microcosmos en llegar a concentraciones por debajo de la máxima permitida por las normas mexicanas (1200 mg/kg), los resultados se muestran en la tabla 4.34 y la figura 4.32.

#Muestra	TPH iniciales [mg/kg]	TPH removidos por día [mg/kg]	Límite máximo permisible [mg/kg]	Tiempo de remediación [días]
B01	32137.89	61.60	1200	502
B02	32137.89	153.03	1200	202
B03	32137.89	197.60	1200	157
B04	32137.89	252.05	1200	123
B05	32137.89	323.21	1200	96
B07	32137.89	223.09	1200	139
B08	32137.89	235.82	1200	131
B09	32137.89	134.52	1200	230
B10	32137.89	292.75	1200	106
B11	32137.89	273.28	1200	113
B12	32137.89	240.93	1200	128

B13	32137.89	189.82	1200	163
B14	32137.89	288.86	1200	107
B15	32137.89	304.58	1200	102
B16	32137.89	102.60	1200	302

Tabla 4.34. Tiempo de remediación estimado para cada muestra.

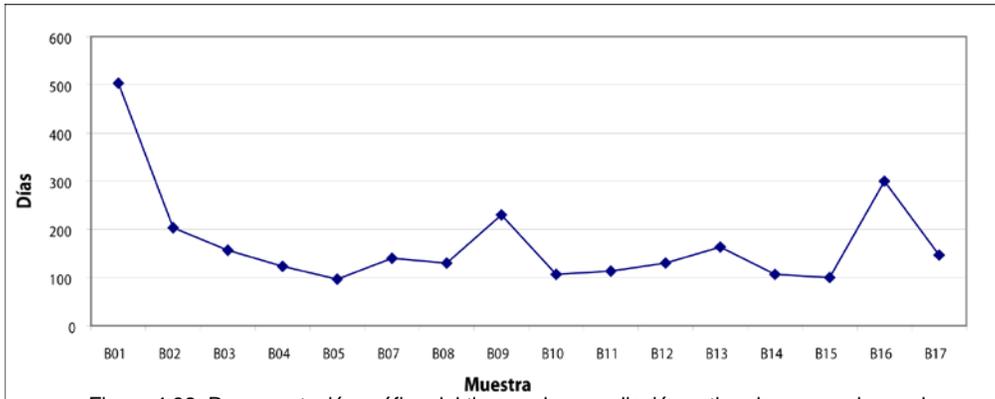


Figura 4.32. Representación gráfica del tiempo de remediación estimado para cada prueba.

**CUENTA MICROBIANA**

Para el cálculo de las unidades formadoras de colonias por gramo de suelo se llevó a cabo la misma metodología empleada en la caracterización del suelo. El número de colonias que se obtuvo en cada placa se muestra en la tabla 4.35.

Muestra	Dilución	W <sub>suelo</sub> (g)	# de colonias
B1	1x10 <sup>-7</sup>	1.046	67
B2	1x10 <sup>-8</sup>	1.055	50
B3	1x10 <sup>-9</sup>	1.023	96
B4	1x10 <sup>-7</sup>	1.046	200
B5	1x10 <sup>-7</sup>	1.080	217
B6	1x10 <sup>-7</sup>	0.961	69
B7	1x10 <sup>-7</sup>	1.052	88

B9	1x10 <sup>-9</sup>	1.017	35
B10	1x10 <sup>-7</sup>	1.033	44
B11	1x10 <sup>-8</sup>	1.016	146
B12	1x10 <sup>-7</sup>	1.003	52
B13	1x10 <sup>-8</sup>	1.074	208
B14	1x10 <sup>-8</sup>	1.057	40
B15	1x10 <sup>-9</sup>	1.077	61
B16	----	1.023	0

Tabla 4.35. Resultados obtenidos del análisis microbiológico por dilución en placa.

Con la siguiente ecuación se determinaron las UFC/g de suelo de cada muestra (tabla 4.36 y Figura 4.33):

$$UFC_{gs} s^{-1} = \frac{(NC \cdot \frac{1}{FD} \cdot \frac{1}{V})}{(P \cdot FH)} \dots \dots \dots (4.17)$$

Por lo tanto:

$$\begin{aligned}
 UFC_{gs} s_{B1} &= (67 \times 10^7) \cdot \left(1 - \left(\frac{8.018}{100}\right)\right) = 61.6 \times 10^7 & UFC_{gs} s_{B10} &= (44 \times 10^7) \cdot \left(1 - \left(\frac{11.213}{100}\right)\right) = 39.1 \times 10^7 \\
 UFC_{gs} s_{B2} &= (50 \times 10^8) \cdot \left(1 - \left(\frac{10.485}{100}\right)\right) = 447.6 \times 10^7 & UFC_{gs} s_{B11} &= (146 \times 10^8) \cdot \left(1 - \left(\frac{9.688}{100}\right)\right) = 1319 \times 10^7 \\
 UFC_{gs} s_{B3} &= (96 \times 10^9) \cdot \left(1 - \left(\frac{12.129}{100}\right)\right) = 8440 \times 10^7 & UFC_{gs} s_{B12} &= (52 \times 10^7) \cdot \left(1 - \left(\frac{10.183}{100}\right)\right) = 46.7 \times 10^7
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 UFC_{gs.s_{B4}} &= (200 \times 10^7) \cdot \left(1 - \left(\frac{10.986}{100}\right)\right) = 178 \times 10^7 & UFC_{gs.s_{B13}} &= (208 \times 10^8) \cdot \left(1 - \left(\frac{11.854}{100}\right)\right) = 1833 \times 10^7 \\
 UFC_{gs.s_{B6}} &= (217 \times 10^7) \cdot \left(1 - \left(\frac{9.915}{100}\right)\right) = 195.5 \times 10^7 & UFC_{gs.s_{14}} &= (40 \times 10^8) \cdot \left(1 - \left(\frac{10.766}{100}\right)\right) = 356.9 \times 10^7 \\
 UFC_{gs.s_{B8}} &= (69 \times 10^7) \cdot \left(1 - \left(\frac{10.582}{100}\right)\right) = 61.69 \times 10^7 & UFC_{gs.s_{B15}} &= (61 \times 10^9) \cdot \left(1 - \left(\frac{18.257}{100}\right)\right) = 4986 \times 10^7 \\
 UFC_{gs.s_{B7}} &= (88 \times 10^7) \cdot \left(1 - \left(\frac{8.405}{100}\right)\right) = 80.6 \times 10^7 & UFC_{gs.s_{B16}} &= 0 \\
 UFC_{gs.s_{B9}} &= (35 \times 10^9) \cdot \left(1 - \left(\frac{9.008}{100}\right)\right) = 3185 \times 10^7
 \end{aligned}$$

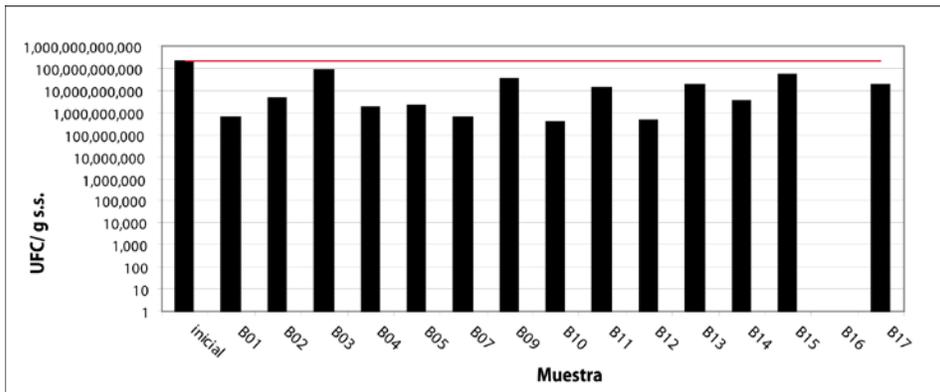


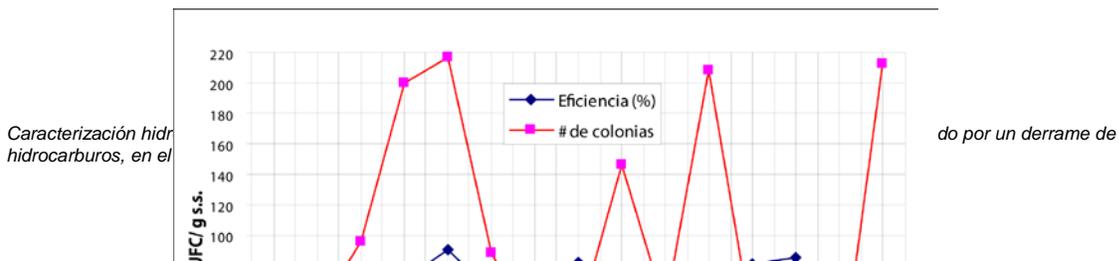
Figura 4.33. El UFGs de cada muestra. Línea en rojo muestra el valor inicial que corresponde al suelo contaminado antes del proceso de biodegradación.

#Muestra	UFC/gss
Inicial	$2.21 \times 10^{11}$
B01	$0.00616 \times 10^{11}$
B02	$0.0448 \times 10^{11}$
B03	$0.0844 \times 10^{11}$
B04	$0.0178 \times 10^{11}$
B05	$0.0196 \times 10^{11}$
B07	$0.00617 \times 10^{11}$
B09	$0.319 \times 10^{11}$
B10	$0.003.91 \times 10^{11}$
B11	$0.132 \times 10^{11}$
B12	$0.00467 \times 10^{11}$
B13	$0.183 \times 10^{11}$
B14	$0.0357 \times 10^{11}$
B15	$0.499 \times 10^{11}$
B16	0

Tabla 4.36. UFC/g suelo de cada muestra analizada. La muestra "Inicial" representa el valor de UFC/gss del suelo contaminado sin el proceso de biodegradación.

El comportamiento de los microorganismos resulta ser muy dinámico, en ocasiones es posible obtener cantidades completamente diferentes en mediciones hechas en días consecutivos, sin embargo, es posible que el número de colonias formadas en las muestras sometidas a biodegradación se haya visto afectado por el carácter tóxico del contaminante ( Torres, L., comunicación personal, dic/2009).

En la figura 4.34 se compara la eficiencia de remoción con el número de colonias formadas en cada muestra. El surfactante Brij 35 en sus muestras B2 y B3 muestra una mejor remoción al aumentar el número de colonias presentes, al igual que el SDBS Maranil LAB (muestras B4 y B5). Los surfactantes Polafix CAPB (B7 y B9) y la goma de guar (B10, B11 y B12) presentan una estrecha relación entre la cantidad de colonias desarrolladas y la cantidad de TPH removidos (un mayor número de colonias desarrolladas representan una mejor tasa de remoción).



Caracterización hid  
hidrocarburos, en el

do por un derrame de

Figura 4.34. Comparativo entre el número de colonias formadas y la eficiencia en la remoción de TPH.

### 4.2.2.3. Lavado vs biodegradación

Para poder llevar a cabo una adecuada selección de la metodología a aplicar para remediar el sitio contaminado fue necesario realizar un análisis comparativo entre el lavado de suelos y la biodegradación asistida. En este apartado solo se discute y compara la eficiencia en la remoción de TPH y los surfactantes que resultaron ser eficientes en ambas técnicas.

La tabla 4.37 compara las eficiencias obtenidas en los dos procesos.

Surfactante	Naturaleza	Eficiencia Lavado [%]	Eficiencia Biodegradación [%]
SDBS Marañil LAB	Iónico	78.51	90.51
Polafix CAPB	Zwitteriónico	24.77	62.47
Guar	Natural	54.38	81.98
Algarrobo	Natural	53.46	85.29

Tabla 4.37. Comparación de las eficiencias obtenidas para lavado de suelo y biodegradación, en los surfactantes que se aplicaron a las dos pruebas.

Tanto en lavado de suelos como en biodegradación, el surfactante iónico empleado (SDBS Marañil LAB) obtuvo las mejores eficiencias de remoción, llegando al 90 % en lo que respecta al proceso biológico, y no muy por debajo en el lavado de suelos se alcanzó una remoción del 78% del contaminante. La notable diferencia se observó en el comportamiento de los surfactantes naturales, los cuales llegaron a remover hasta el 85% en el proceso de biodegradación, siendo las remociones en el lavado de suelos muy inferiores a estos valores (~55%). En todos los casos la biodegradación alcanzó mejores tasas de remoción que el lavado de suelos (Figura 4.35). No obstante, como ya se ha mencionado anteriormente el lavado de suelos se llevo a cabo en tan solo 1 día a diferencia de las 12 semanas del proceso de biodegradación.

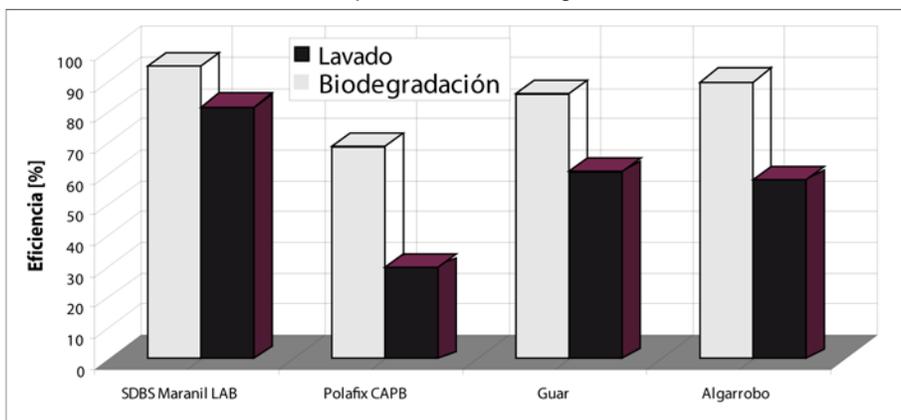


Figura 4.35. Eficiencia del lavado de suelo vs eficiencia de biodegradación.

#### **4.2.2.4. Valoraciones finales de las pruebas de tratabilidad**

- I. La concentración inicial de TPH fracción diesel fue de 32,137.89 mg/kg. Valor considerablemente mayor a los 1200 mg/kg que establece como máximo permisible la normatividad mexicana (NOM-138-SEMARNAT/SS-2003) para suelos agrícolas.
- II. En el presente trabajo se aplicaron, analizaron y compararon 2 técnicas de remediación: lavado de suelos con surfactantes y biodegradación aerobia asistida. Adicionalmente se llevó a cabo una amplia caracterización del suelo contaminado, necesario para entender mejor el entorno y poder definir, con sustento, el sistema de remediación apropiado.
- III. En las dos técnicas empleadas se usaron surfactantes. La diferencia fundamental estriba en la cantidad agregada a cada una. En el proceso biológico se aplicaron cantidades significativamente menores que en el lavado de suelos (12, 120 y 1200 µl de una solución de surfactante al 0.5%, en comparación con 30 ml aplicados en lavado de suelos). Otra diferencia importante hace referencia la naturaleza de los procesos, en lavado de suelos, se lleva a cabo un proceso físico, mientras que en biodegradación asistida el proceso fundamental es biológico.
- IV. Se generaron 17 muestras en el proceso de lavado de suelos. 16 corresponden a muestras con diferentes tipos de surfactantes y la muestra adicional fue tratada solamente con agua destilada. Esta muestra fue llamada "blanco" o prueba de calibración y sirvió para determinar que tan necesaria es la aplicación de una sustancia (surfactante en este caso) para eficientizar el proceso de lavado que lleva a cabo el agua.
- V. El lavado de suelo con surfactantes realizado solo con agua destilada alcanzó una remoción del 40%, y cualquier prueba con una eficiencia menor fue descartada por no resultar económica y logísticamente factible para aplicarse en un sistema que implique la adición de una sustancia, cuando se ha comprobado que el agua por sí sola es capaz de remover una mayor cantidad de contaminante.
- VI. La mayor eficiencia se obtuvo con el surfactante iónico Maranyl LAB alcanzando una remoción del 78.51%.
- VII. Los surfactantes naturales llegaron a remover el 55% del contaminante.
- VIII. De los surfactantes aniónicos usados, ninguno alcanzó una remoción mayor a la del agua destilada.
- IX. El surfactante zwitteriónico obtuvo uno de los porcentajes de remoción más bajos (24%).
- X. En general, los surfactantes de naturaleza iónica resultaron ser los más indicados para un lavado de suelos.
- XI. Los surfactantes con mejores tasas de remoción son los más aceptables, desde el punto de vista económico, ya que la eficiencia de remoción (g TPH removido por cada g de surfactante empleado) mostró un comportamiento directamente proporcional al aumentar conforme aumenta la tasa de remoción.
- XII. La remoción de TPH resulta ser más efectiva con dosis de surfactantes más próximas a 1 vez la CMC de cada uno de ellos, concluyendo que es muy importante determinar la dosis adecuada que permita obtener mejores resultados en la remediación. El aumentar la cantidad de surfactante al proceso y su concentración, no garantiza mejores resultados, incluso puede resultar contraproducente.
- XIII. En el lavado de suelos, ninguna prueba alcanzó el límite máximo permisible estipulado por la NOM-138-SEMARNAT/SS-2003 (1200 mg/kg para suelos de uso agrícola), sin embargo, a nivel de laboratorio solo se llevó a cabo un ciclo de lavado. En la literatura se han reportado trabajos a escala de campo que involucran varios ciclos de lavado aplicados al mismo suelo con resultados exitosos, lo que significa que los datos obtenidos en laboratorio ofrecen solamente el mínimo de eficiencia de cada prueba. A nivel de campo es necesario plantear

- un sistema que involucre varios ciclos para incrementar la eficiencia del lavado, tomando en cuenta las implicaciones técnicas y económicas que esto conlleva.
- XIV. De la caracterización del suelo, se determinó que la relación 100/15/1 de C/N/P no se cumplía por falta de N y P. Sin embargo se decidió compensar solamente el déficit de N, agregando una solución de sulfato de amonio y finalizando con una relación de 100/15/0.02 ( $C=25710.31 \text{ mg kg}^{-1}$ ;  $N=3660.02 \text{ mg kg}^{-1}$ ;  $P=7.38 \text{ mg kg}^{-1}$ ). No se compensó el déficit de fósforo y se evaluó el comportamiento del medio con estas condiciones. Si el resultado resulta ser favorable, se puede hablar de un ahorro en el gasto que se tiene que hacer solamente para la preparación del suelo.
- XV. El coeficiente de adsorción ( $k_d$ ) y el factor de retardo determinados, resultaron en valores muy elevados (2.86 L/kg y 11.87 respectivamente), indicando que el contaminante se está desplazando a una velocidad mucho más baja que el agua y la movilidad de la pluma en suelo y agua es muy baja. Factor positivo al momento de analizar la posibilidad de instaurar un sistema de remediación que se basa en procesos de biodegradación, ya que hay disponibilidad de tiempo como para pensar en un sistema que implique un menor impacto ambiental y económico aunque el proceso sea más lento.
- XVI. Para la prueba de biodegradación se estableció un periodo de 12 semanas. Una vez transcurrido este tiempo, se analizaron las muestras para obtener porcentajes de remoción en un tiempo determinado.
- XVII. Se corrió una prueba de calibración, que corresponde a una muestra esterilizada, evitando que el proceso de biodegradación tuviera algún impacto en la remoción de TPH del suelo de dicha muestra.
- XVIII. El blanco estéril alcanzó una remoción del 3%. Concluyendo que el 3 % de la remoción que presentaron las demás pruebas corresponde a otros procesos, no precisamente al factor biológico aerobio.
- XIX. Los mayores porcentajes fueron del surfactante iónico Maranil LAB, alcanzando un 90.51 % de remoción del contaminante. Este surfactante mostró las mayores tasas de remoción en los dos procesos.
- XX. Los surfactantes naturales arrojaron mejores resultados que en el lavado de suelos, alcanzando hasta el 85% de remoción del contaminante
- XXI. El aumentar la dosis de surfactante no garantiza una mayor eficiencia del proceso, por lo tanto una adecuada experimentación diseñada para obtener las dosis ideales se debe de llevar a cabo para evitar el desperdicio tanto de dinero como de materiales al momento de implementar la técnica de remediación.
- XXII. Los TPH removidos por día van de 323.21 mg/kg para la más eficiente (Muestra B05, surfactante iónico Maranil LAB, dosis de 20 mg/L) y de 61.60 mg/kg para la de menor porcentaje de remoción (Muestra B01, surfactante no iónico Brij 35, dosis de 2 mg/L).
- XXIII. El tiempo estimado para alcanzar el límite máximo permisible con un proceso de biodegradación fue de 96 días para la prueba más favorable y de 502 días la más lenta.
- XXIV. Los surfactantes naturales estimaron una duración de 105 días aproximadamente para alcanzar valores de concentración por debajo de la norma.
- XXV. A pesar de que el tiempo que lleva aplicar un lavado de suelos es mucho menor que el que llevaría aplicar un proceso de biodegradación, el impacto económico y ecológico es mucho mayor. Para el lavado de suelos se requieren grandes cantidades de surfactante y agua, obteniendo como producto agua contaminada que implicaría un proceso adicional para su adecuado tratamiento.
- XXVI. Aunque el proceso de biodegradación lleva más tiempo, los costos en cuanto a materiales es mucho menor, los lixiviados son mínimos y el impacto al medio físico es mucho menor, sumando que de las pruebas, los surfactantes naturales resultaron ser buenos candidatos para aplicarse en el sitio contaminado, lo que disminuiría casi en su totalidad el impacto en el subsuelo.
- XXVII. El empleo de surfactante es considerablemente menor en el proceso biológico que en el lavado de suelos. En lavado de suelos se usaron 5 ml de una solución (agua+surfactante) al 0.5% (500 mg/L) por cada gramo de suelo contaminado, y en biodegradación 0.04 ml de una solución (agua+surfactante) al 0.002, 0.02 y .2%. Lo que implica que no solo se aplicó una menor cantidad de solución al proceso de biodegradación, también, la cantidad de

surfactante que se empleó para preparar dichas soluciones fueron considerablemente menores, manejando dosis de hasta dos órdenes por debajo de las empleadas en el lavado de suelos.

- XXVIII. Para fines de este trabajo se considera el proceso de biodegradación asistida como mejor candidato a ser aplicado en el sitio, por medio de biopilas, que serán técnicamente descritas en el Capítulo 5 de Discusiones, apartado 5.2. Propuesta de remediación del sitio contaminado.



---

## **CAPÍTULO 5 DISCUSIÓN**

- 5.1. De campo**
  - 5.1.1. Geología local**
  - 5.1.2. Geofísica**
  - 5.1.3. Interpretación geológica – geofísica**
  - 5.1.4. Hidrogeología local**
  - 5.1.5. Caracterización Ambiental**
  - 5.1.6. Modelo conceptual de la zona de estudio**
  
- 5.2. Propuesta de remediación del sitio contaminado**
  - 5.2.1. Aspectos técnicos y logísticos de las técnicas de remediación aplicadas**
  - 5.2.2. Aspectos económicos**
  
- 5.3. Conclusiones generales de la tesis**

### 5.1. De campo

Los resultados de campo permitieron, en conjunto, la generación de secciones geológicas, geoelectricas e hidrogeológicas, apoyadas con la interpretación correspondiente sobre la caracterización ambiental y las pruebas hidráulicas, concluyendo en un modelo conceptual hidrogeológico que explica con bases, el comportamiento del medio físico en el que se está trabajando.

#### 5.1.1. Geología local

A partir de los cortes litológicos mostrados en el capítulo de resultados, se construyeron 5 secciones geológicas. Su orientación se muestra en la Figura 5.1.

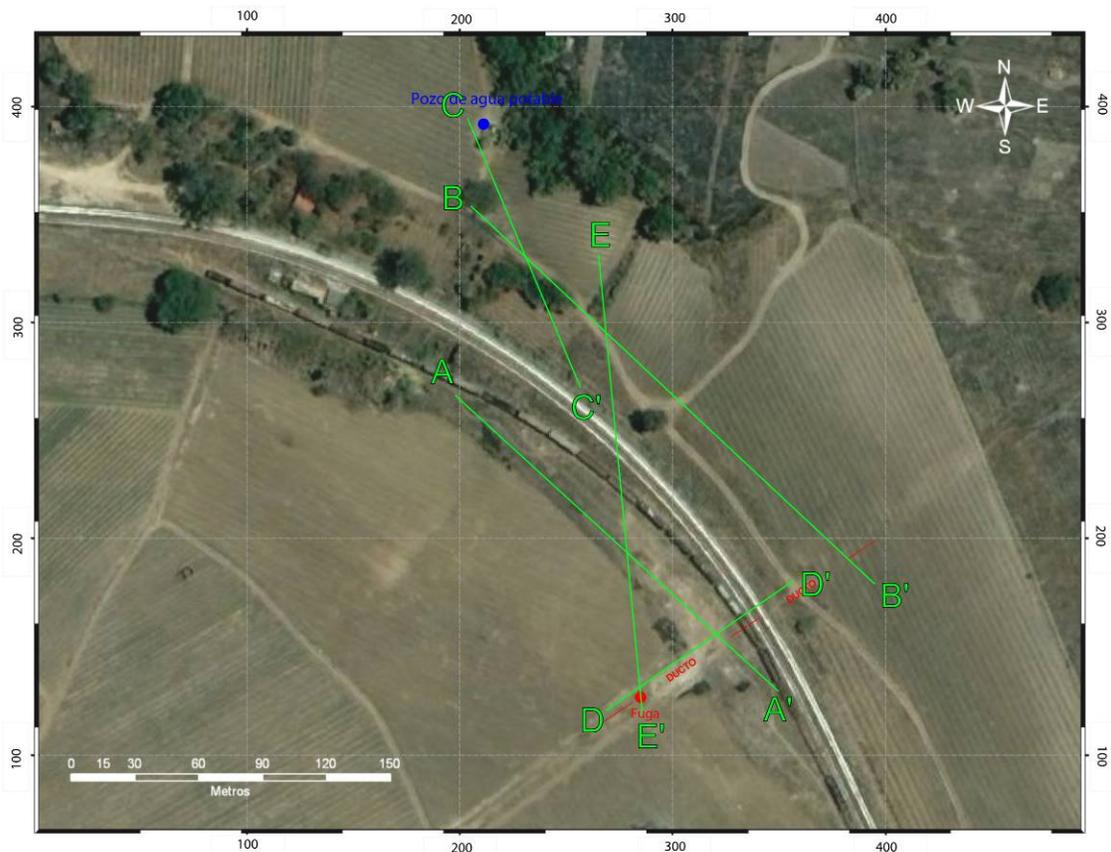
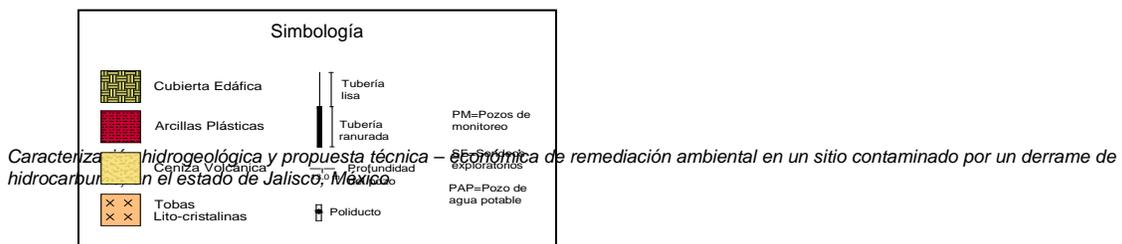


Figura 5.1. Ubicación de las secciones geológicas interpretadas.

Las secciones principales están representadas por las líneas AA', BB' y EE'. Las secciones CC' y DD' fueron construidas solo para detallar el comportamiento de las unidades litológicas. El análisis del subsuelo se observa en las figuras 5.2 y 5.3.



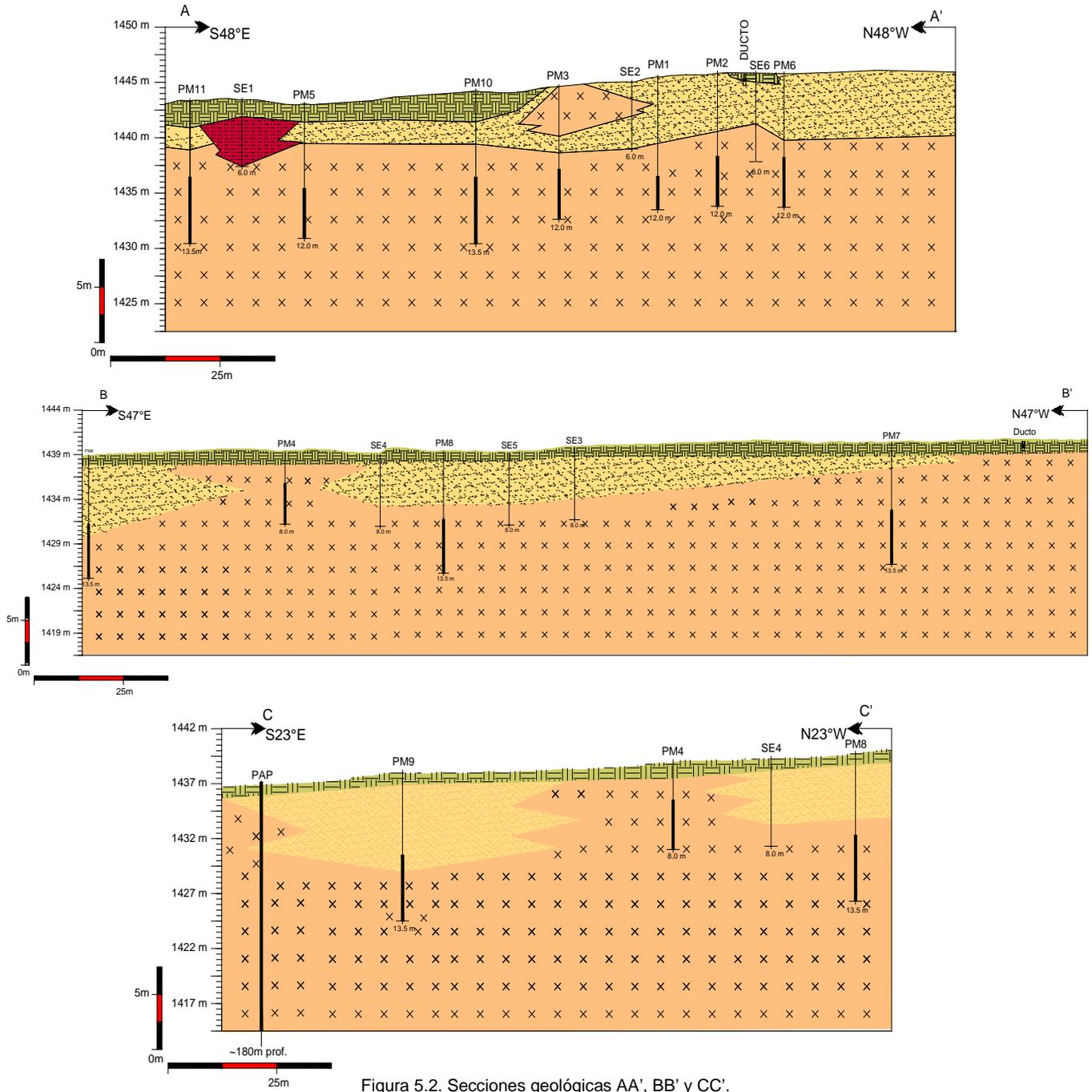
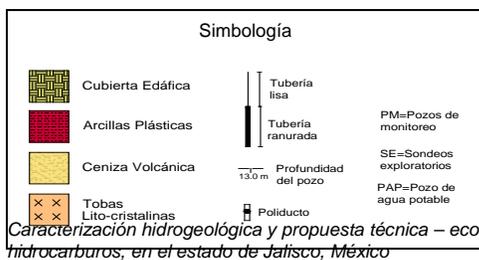


Figura 5.2. Secciones geológicas AA', BB' y CC'.



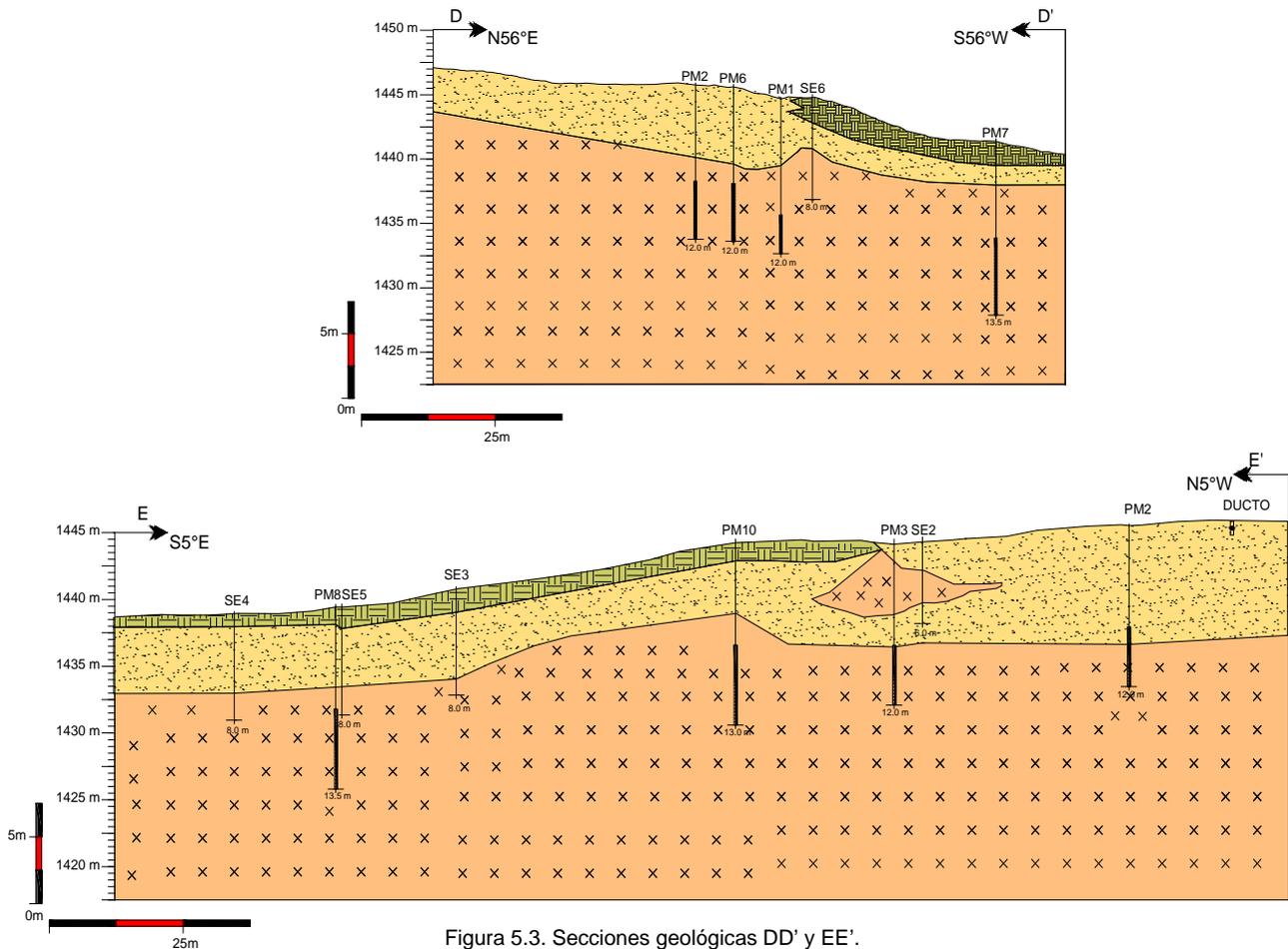


Figura 5.3. Secciones geológicas DD' y EE'.

Tomando como base las secciones geológicas mostradas se pueden diferenciar 4 litologías diferentes con las siguientes características:

**CUBIERTA EDÁFICA:** En la superficie del terreno se encuentra una cubierta edáfica color marrón oscuro, formada por suelo residual arenoso y abundante materia orgánica, fragmentos de raíces y líticos. En algunos sitios del área no es posible observar la cubierta (especialmente al SE de la zona mostrada en la Figura 5.1) debido a una mayor afectación por el derrame de hidrocarburos. En promedio, esta unidad tiene espesores que van de 1 a 2.5 metros, con un mayor desarrollo al centro y SW del sitio.

**CENIZA VOLCÁNICA:** Esta unidad está formada por una ceniza volcánica color grisácea y motes marrón claro, compuesta por abundante vidrio volcánico, cristales de cuarzo amorfo y feldespato potásico, fragmentos líticos que van de angulosos a subangulosos con diámetros promedio de 0.5 a 1.5 cm.

Se encuentra por debajo de la cubierta edáfica y aflora en algunas zonas del sitio (secciones DD' y EE'). Tiene espesores que van de 3 a 10 m (sección EE'). En las secciones AA, DD' y EE' se puede apreciar que el comportamiento de la ceniza sugiere una capa bien definida por debajo de la cubierta edáfica y sobreyaciendo a la toba que más adelante se describe, sin embargo, en las secciones BB' y CC' se observa que en ocasiones se comporta en forma de lentes de grandes

dimensiones (alcanzando hasta 75 m de extensión lateral y 10 m de espesor). La única perforación que no tocó a esta unidad fue PM4, por lo que no se tienen las herramientas suficientes para concluir que la ceniza se presenta en forma de lentes, concluyendo entonces que es una unidad con potencia significativa y continuidad lateral, aunque por la proyección presentada por algunas secciones no se aprecie lo antes mencionado.

*LENTE DE ARCILLAS:* En la sección AA' se puede apreciar un lente de arcillas plásticas color pardo oscuro, intercaladas con limo saturado y abundante materia orgánica, de 20 m de extensión lateral y 5 m de espesor aproximadamente. Este material solo fue cortado por el sondeo exploratorio SE1 definiendo así un solo lente arcilloso aislado y sin continuidad lateral.

*TOBA LITOCRISTALINA Y CRISTALOLÍTICA:* Formada por una toba poco consolidada, color pardo verdoso con fragmentos líticos de 0.5 a 2 cm en promedio, cuarzo microcristalino y fenocristales de minerales ferromagnesianos. Su espesor no puede ser estimado ya que las perforaciones alcanzaron una profundidad máxima de 13.5 m y no llegaron a la base de la unidad. Sin embargo se puede establecer un espesor mínimo de 13 m representado en las secciones BB', DD' y EE'. La toba es el material más abundante en el terreno (apreciable en todas las secciones geológicas presentadas) y regionalmente se puede correlacionar con la Toba Tala de edad cuaternaria y descrita profundamente en el marco geológico presentado en esta tesis.

En resumen, se presentan 4 litologías en la zona de estudio. En la parte superficial es posible encontrar una cubierta edáfica de no más de 2 metros de espesor, que presenta una inhibición en su crecimiento en el punto del derrame y zonas circundantes. Por debajo de esta cubierta, hay una capa de cenizas de coloración grisácea – marrón claro, con un alto contenido de materia orgánica, continuidad lateral y espesores que varían de 3 a 10 m. Es posible encontrar lentes arcillo-limosos con espesores considerables, pero no forman parte fundamental de la litología. Por debajo, se encuentra la unidad con mayor presencia en el terreno, correspondiendo a una toba litocristalina y cristalolítica cuyo espesor no pudo delimitarse debido a que las perforaciones no cortaron la base de la unidad, esta unidad se ha correlacionado con el acuífero somero por las profundidades de los niveles estáticos medidos en campo. Así mismo es la unidad contaminada por lo que su análisis representa un especial interés.

### **5.1.2. Geofísica**

Para complementar el análisis del subsuelo se reprocesaron sondeos eléctricos verticales (SEV) y con los resultados obtenidos se construyeron 4 secciones geoelectricas. Se buscó que la traza de dichas secciones correspondiera, hasta donde fuera posible, con las secciones geológicas mostradas anteriormente, para tratar de establecer una correlación entre las unidades geológicas y la respuesta eléctrica que presenta el subsuelo. Las líneas de sección se muestran en la Figura 5.4.

Las secciones se distribuyeron en todo el sitio contaminado, permitiendo observar el comportamiento desde diferentes perspectivas. La sección AA' se extiende a lo largo de la zona que ha tenido el mayor impacto por el contaminante, la sección BB' se ubicó al lado norte de las vías del tren, con la finalidad de determinar si la respuesta resistiva por parte del material tentativamente contaminado es la misma en las cercanías del pozo de agua potable, lo que implicaría la presencia de contaminación en zonas peligrosamente próximas al pozo. La sección DD' sigue la línea del poliducto y la sección EE' se presenta de forma transversal al terreno. Las figuras 5.5, 5.6, 5.7 y 5.8 muestran las secciones geoelectricas construidas y las unidades geoelectricas interpretadas.

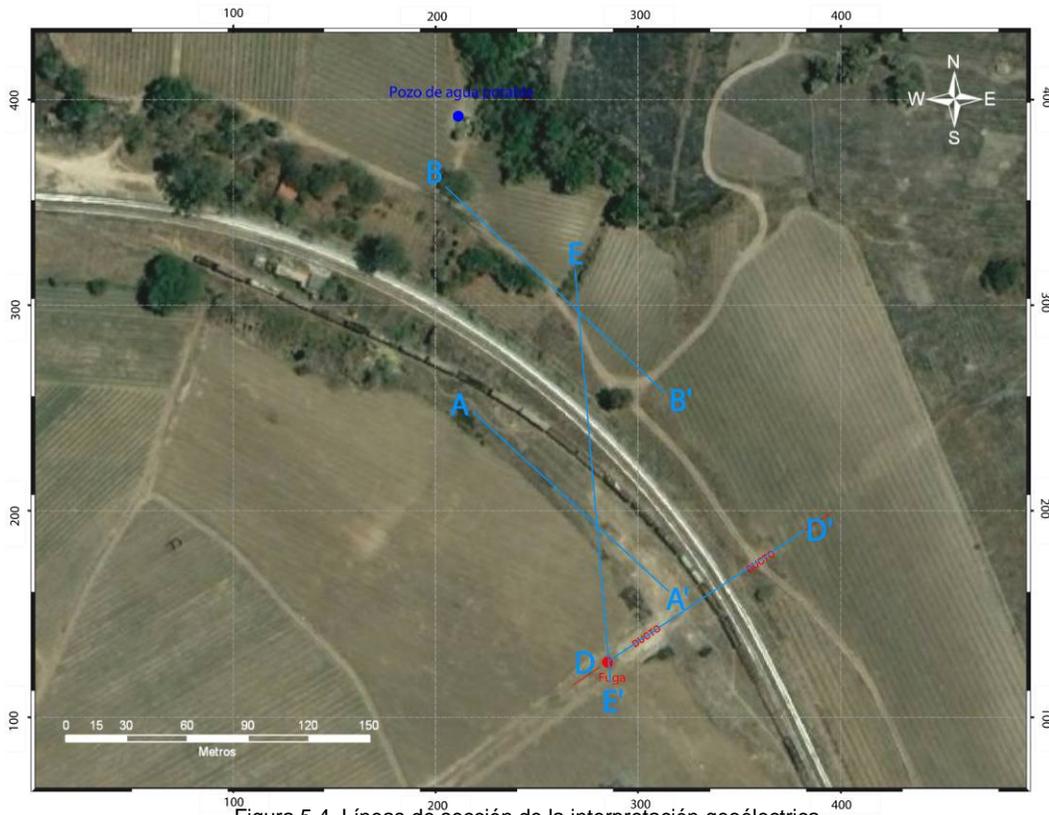


Figura 5.4. Líneas de sección de la interpretación geoelectrica.

La sección AA' tiene una orientación S48°E, se ubica al sur de las vías férreas y abarca el área tentativamente contaminada por el derrame de hidrocarburo (Figura 5.5). En la sección se interpretaron 5 unidades geoelectricas (UG). UG1, con una firma resistiva que va de 199 a 536 ohm\*m, se encuentra en la superficie y tiene un espesor promedio de 1m, su extensión lateral se ve interrumpida hacia el SE de la sección. Por debajo de ésta unidad se encuentra UG2 con valores resistivos de 105 a 666 ohm\*m, llega a la superficie al SE y tiene un espesor de ~2 – 0.5 m. Subyaciendo a esta unidad aparece UG3 presentando resistividades considerablemente altas (678 – 1388 ohm\*m), dichos altos resistivos son característicos de material impregnado con hidrocarburos. UG4 (27-247 ohm\*m) se delimita por el abrupto descenso en el comportamiento resistivo del material, conformando así, la unidad geofísica de mayores dimensiones, con extensión lateral total y un espesor de 42.5m. Por último, un descenso aún mayor (un rango de 2 a 16 ohm\*m) sugiere la presencia de otra unidad geofísica (UG5), formando la base de la sección.



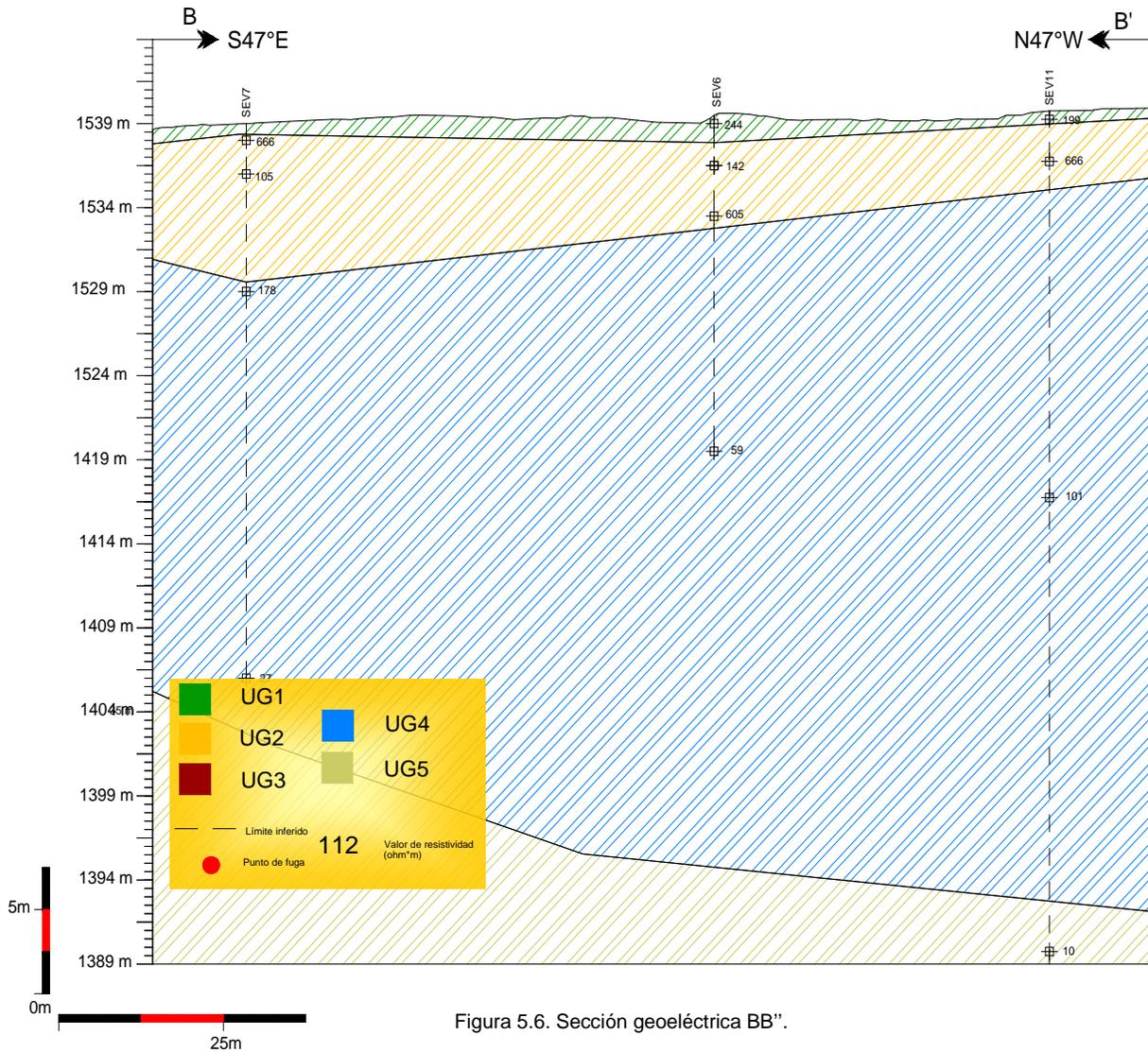


Figura 5.6. Sección geoelectrica BB''.

La sección BB' se localiza al N de las vías férreas. UG1 se extiende a lo largo de toda la sección con un espesor promedio de 1m. Subyaciendo se ubica UG2, con resistividades de 140 – 666 ohm\*m y espesores de 3 a 6m.

Con una presencia visiblemente mayor en el área y resistividades de 27 a 178 ohm\*m UG4 muestra espesores de 25 a 30m. UG4, se ubica en la parte inferior de la sección, con resistividades máximas de 10 ohm\*m. Es notable la ausencia de UG3 debido a que los datos obtenidos en los SEV's involucrados no se observaron los altos resistivos característicos de la unidad, indicando que no hay presencia de contaminante. Sin embargo, el análisis pertinente que podrá definir con mayor certeza la distribución del contaminante será discutido más adelante.

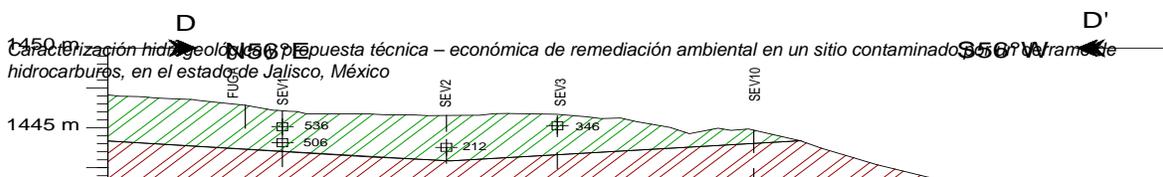


Figura 5.7. Sección geoelectrica DD'.



Figura 5.7. Sección geoelectrica DD'.

DD' fue configurada con los SEV 1, 2, 3 y 10, tiene una unidad UG1 que no se presenta al NE de la sección. A diferencia de AA' y BB', UG2 no se identificó y UG3, caracterizada por los altos resistivos, tiene un espesor mayor. Por debajo se encuentra UG4 con un espesor promedio de 30 m y en la parte inferior de la sección se volvieron a presentar valores de resistividad muy bajos (2 – 16 ohm\*m) delimitando así la unidad base.

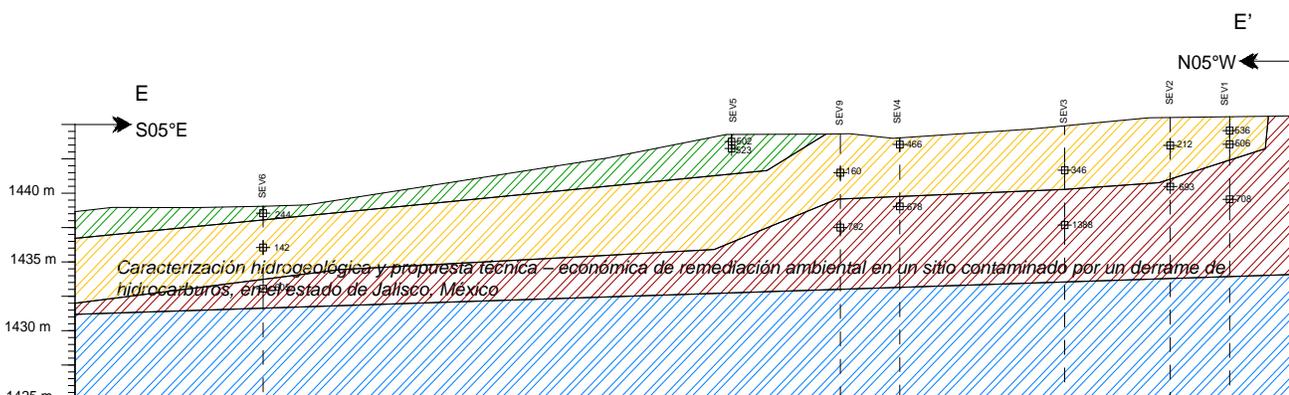




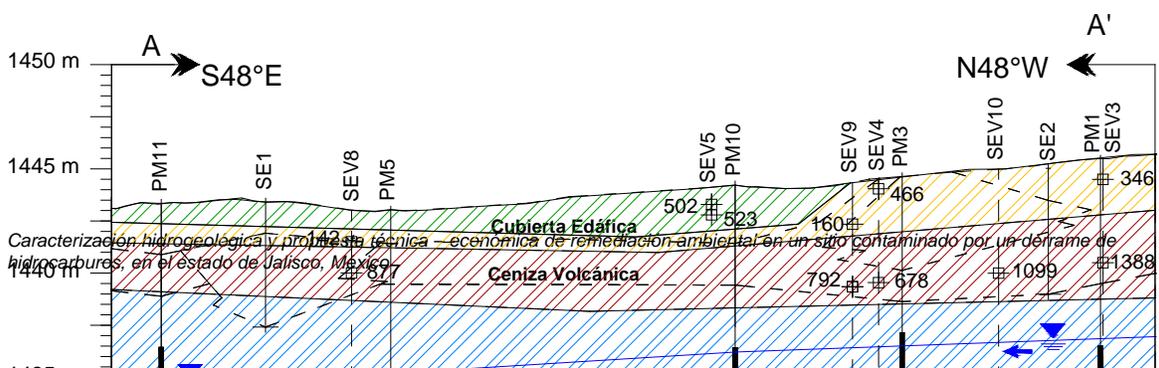
Figura 5.8. Sección geoelectrica EE'.

La sección EE' presenta un comportamiento similar a la sección AA'. Los valores característicos de UG3 son fácilmente identificables, sugiriendo de nuevo la presencia del material contaminado.

Para poder dar un significado físico a las unidades geoelectricas interpretadas se realizó una integración de las secciones geológicas y geoelectricas (figuras 5.9, 5.10 y 5.11). La tabla 5.1 presenta el rango de resistividades y el significado geológico de cada unidad geoelectrica.

### 5.1.3. Interpretación geológica – geofísica

Con las secciones geológicas y geofísicas interpretadas se estableció una correlación entre las unidades litológicas y las unidades geoelectricas, con el propósito de (1) analizar si existe una correspondencia entre los datos arrojados por el estudio geofísico y la estratigrafía obtenida por medio de perforaciones, y (2) asignar un rango resistivo a cada litología, permitiendo hacer conclusiones más profundas como la tentativa de que la unidad se encuentre saturada o no, o conocer cual es el material/es que se encuentra(n) contaminado(s). Las figuras 5.9, 5.10, 5.11 y 5.12 muestran lo antes expuesto.



**Lente  
Arcilloso**

**Toba Litocristalina**

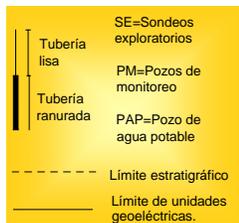


Figura 5.9. Sección geológica-geofísica AA'. Línea negra continua marca los límites entre las unidades geoelectricas. Línea negra discontinua delimita los límites estratigráficos.

En la sección AA' se observa que UG1 corresponde con la cubierta edáfica, con respuestas resistivas que oscilan alrededor de los 500 ohm\*m (Figura 5.9). UG2 tiene un comportamiento similar a la ceniza volcánica, sin embargo a una profundidad de 2m los valores resistivos aumentan considerablemente, alcanzando 1390 ohm\*m, delimitando así otra unidad geoelectrica (UG3) que se ha correlacionado con material contaminado, basándose en los altos resistivos característicos que el hidrocarburo presenta en el subsuelo (Atekwana *et al.*, 2000) por lo tanto es posible determinar que el contaminante ha afectado en gran medida a la capa de ceniza y en algunos puntos alcanza la toba. Por debajo está UG4 que se relaciona a la toba litocristalina, con resistividades de 150 a 200 ohm\*m y la profundidad del nivel freático sugiere que se encuentra saturada. Estos altos resistivos en ocasiones pueden ser producto simplemente de las características litológicas del medio físico, por lo que no se debe cometer el error de generalizar que los materiales con altos resistivos significan materiales contaminados. Se necesita estudiar el

contexto del problema de manera global para poder correlacionar, si es el caso, las altas firmas resistivas con contaminación por hidrocarburos.

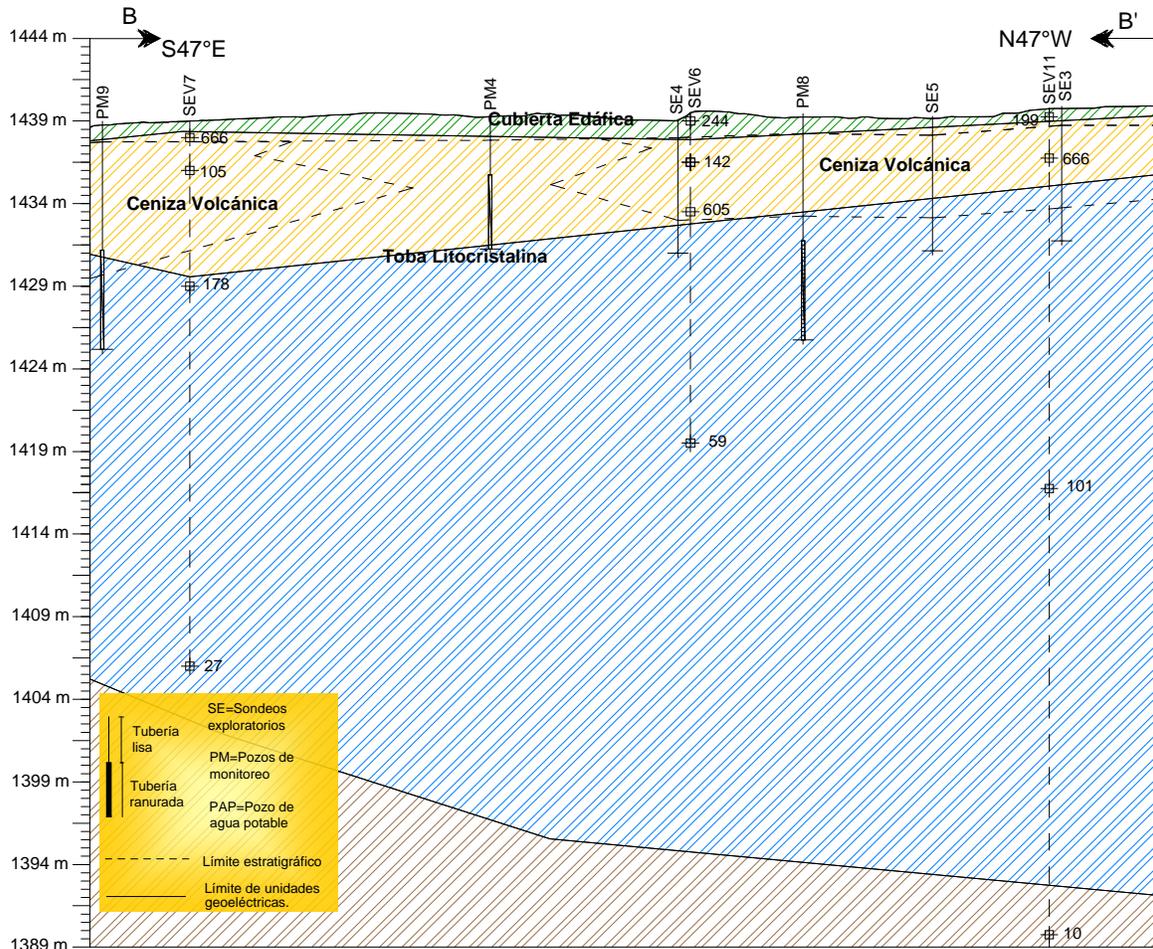
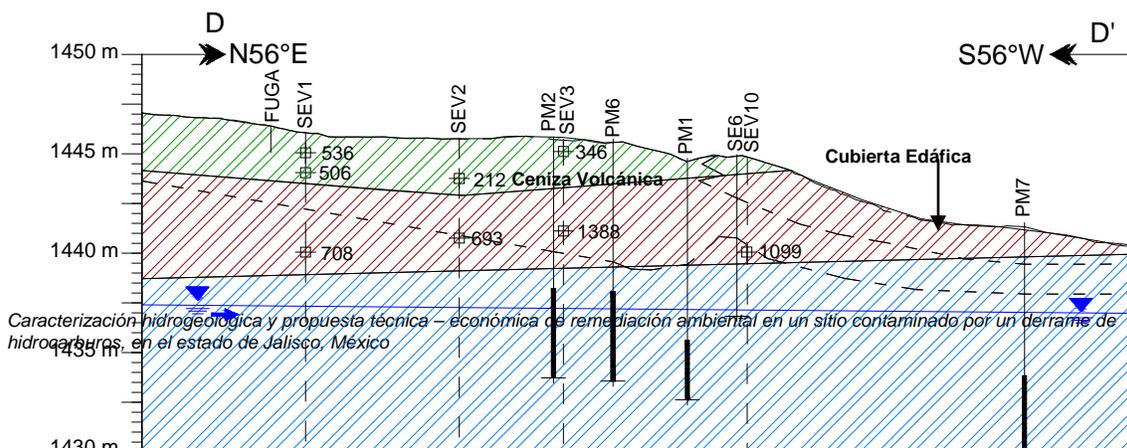


Figura 5.10. Sección geológica – geofísica BB'. Línea negra continua marca los límites entre las unidades geoelectricas. Línea negra discontinua delimita los límites estratigráficos.

En la sección BB' se observa claramente la relación entre la cubierta edáfica y UG1, confirmando el análisis de correlación propuesto para la sección AA'. En esta sección no aparecen altos resistivos permitiendo concluir que esta parte de la zona de estudio (al norte de las vías férreas) no ha sido impactada por el contaminante. UG4 se relaciona una vez más con la toba litocristalina.



Caracterización hidrogeológica y propuesta técnica – económica de remediación ambiental en un sitio contaminado por un derrame de hidrocarburos, en el estado de Jalisco, México

Toba Litocristalina

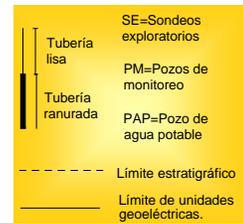
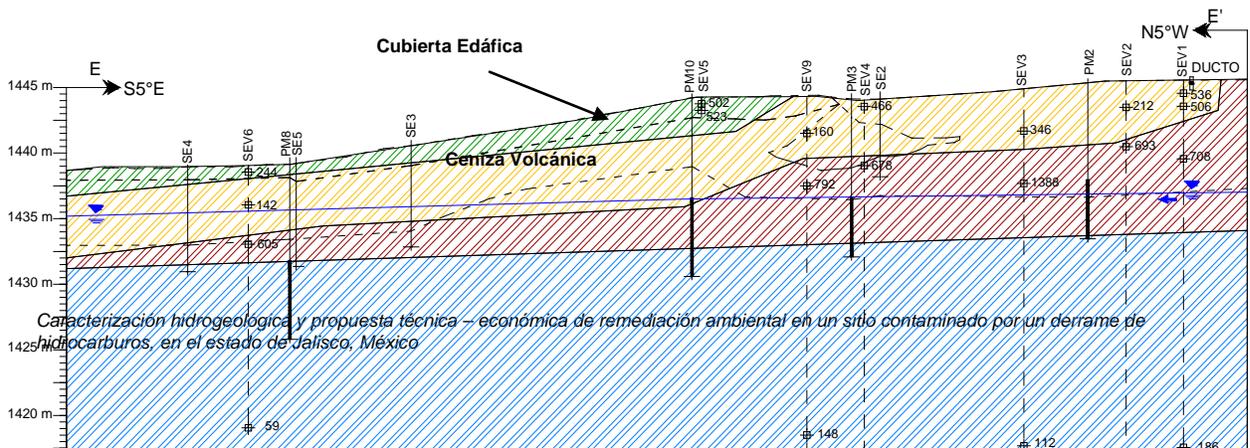


Figura 5.11. Sección geológica – geofísica DD'. Línea negra continua marca los límites entre las unidades geoelectricas. Línea negra discontinua delimita los límites estratigráficos.

La sección DD' (Figura 5.11) tiene un comportamiento similar a AA'. Se observa que UG3 (unidad con altos resistivos) ha impactado a la ceniza volcánica y en menor medida a la toba litocristalina saturada. Los valores más bajos de resistividad se presentan en la parte inferior de la sección (UG5) al igual que en todas las demás interpretaciones, delimitando un cambio de unidad y sugiriendo un comportamiento litológico, y por lo tanto hidráulico, diferente en la toba.



**Toba Lito-  
cristalina**

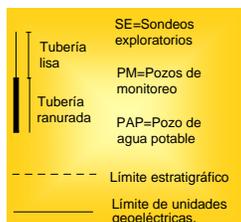


Figura 5.12. Sección geológica – geofísica EE'. Línea negra continua marca los límites entre las unidades geoelectricas. Línea negra discontinua delimita los límites estratigráficos.

De la Figura 5.12 se concluye que la cubierta edáfica se correlaciona con UG1, parte de la ceniza volcánica corresponde a UG2 y parte a UG3 siendo esta última, el material más afectado. UG4 corresponde a la toba litocristalina, y UG5 también corresponde a la toba pero con un cambio en su comportamiento resistivo, debido talvez, a un mayor contenido de material arcilloso, formando así una base impermeable. Por la ubicación del nivel freático se puede determinar que la toba se encuentra saturada.

La tabla 5.1 resume la descripción de cada sección geológica – geofísica y establece un rango de resistividades y la correlación litológica de cada unidad geoelectrica.

Unidad geoelectrica	Intervalo de resistividades (ohm*m)	Correlación Litológica
UG1	199 - 536	Cubierta Edáfica
UG2	105 - 666	Ceniza Volcánica
UG3	678-1388	Ceniza Volcánica Potencialmente Contaminada
UG4	27 - 247	Toba Saturada (Acuífero Libre)
UG5	2 - 16	Base Poco Permeable

Tabla 5.1. Correlación litológica y rango de resistividades de las unidades geoelectricas.

**5.1.4. Hidrogeología local**

Para poder entender el comportamiento de los contaminantes presentes en el subsuelo y la forma en que los sistemas de remediación responderán a las condiciones físicas del medio, se requiere llevar a cabo una caracterización hidrogeológica que defina los parámetros hidráulicos del acuífero en cuestión.

Como se puede observar en la correlación geológica-geofísica presentada anteriormente la ubicación del nivel freático y las resistividades presentes delimitan un acuífero somero de poco

espesor (30-40 m), de comportamiento libre y en un medio poroso por estar formado por la toba litocristalina. Por debajo se presenta una capa semiconfinante o acuitardo que separa estratigráficamente al acuífero profundo reportado por GEOEX (2004), para determinar si esta capa separa hidráulicamente al acuífero somero del profundo se requieren estudios a detalle para definir el comportamiento hidrogeológico del acuífero profundo.

De esta manera se determinaron 3 unidades hidrogeológicas que se describen a continuación de cima a base:

- UH1 define a la zona no saturada y esta compuesta por la cubierta edáfica y la ceniza volcánica. Tiene un espesor que va de 2.5 a 7 metros.

- UH2 se refiere al acuífero libre somero ubicado en la toba presente en el sitio. Con espesores de 30 a 40 metros.

- UH3 representa la base poco permeable o acuitardo que limita la profundidad del acuífero somero. Por el cambio de resistividades que se presentaron a esta profundidad (47 m aproximadamente) se sugiere un cambio en el contenido de partículas finas dentro de la toba que provocarían un descenso en la permeabilidad del material y por lo tanto un límite del acuífero.

La Figura 5.13 muestra la sección AA' y define las unidades hidroestratigráficas descritas anteriormente, a pesar de no presentar las demás secciones para confirmar la correlación antes propuesta se hace extensiva a todo el medio físico estudiado.

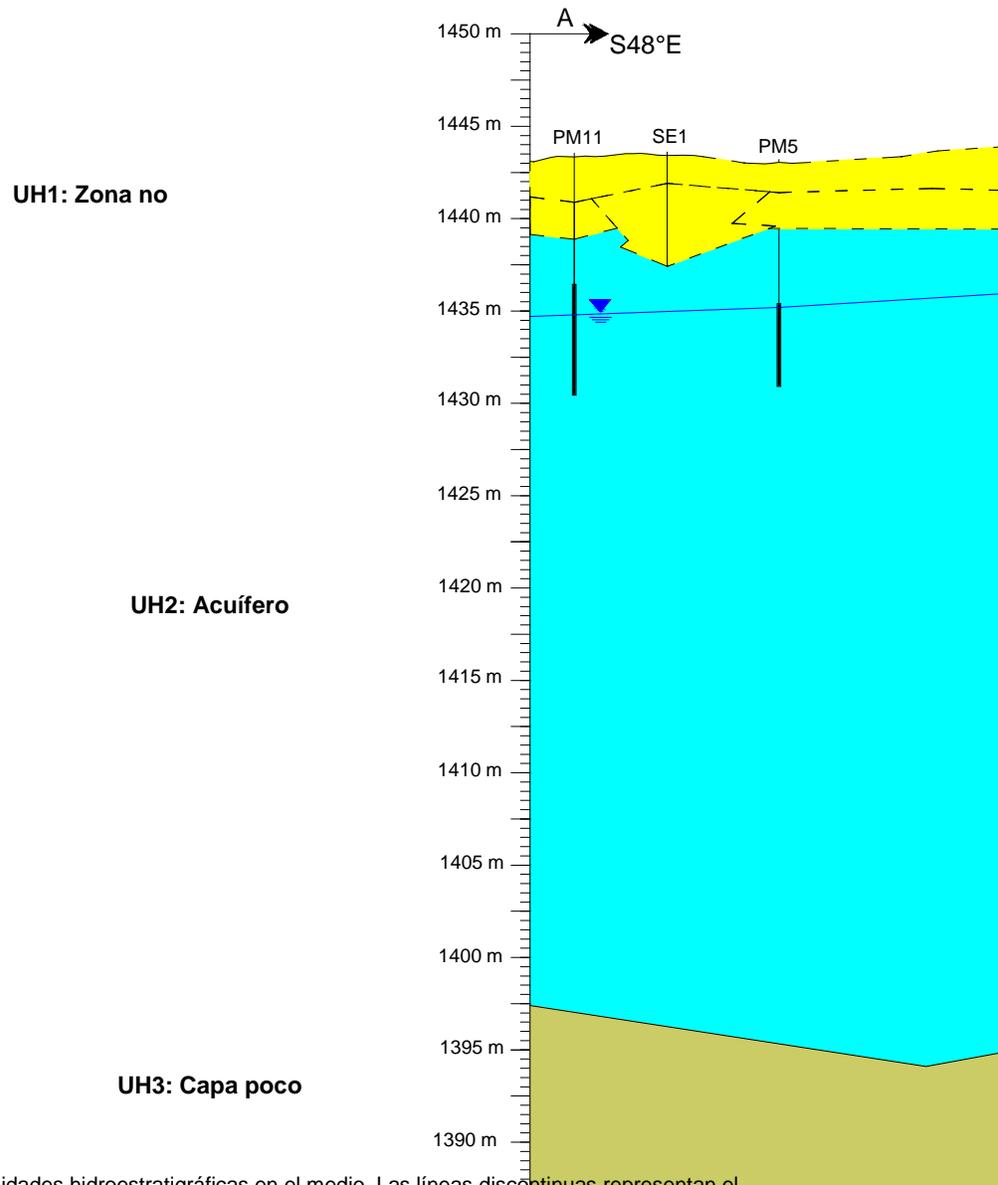


Figura 5.13. Comportamiento de las unidades hidroestratigráficas en el medio. Las líneas discontinuas representan el contacto entre las unidades geológicas presetes.

Para estimar los parámetros hidráulicos se realizaron 8 pruebas slug. Como ya se ha mencionado, el método e interpretación empleado para dichas pruebas fue el establecido por Hvorslev (1951) para pozos parcialmente penetrantes, útil para el cálculo de la conductividad hidráulica ( $k$ ), y que esta basado en el modelo matemático definido como sigue, partiendo de la ecuación general de flujo en estado estacionario (ec. 5.1)(Butler,1998):

$$\frac{\partial^2 h}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial h}{\partial r} + \frac{K_z}{K_r} \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \text{-----(5.1)}$$

$$H(0) = H_0 \text{-----(5.2)}$$

$$h(\infty, z, t) = h(r, \pm\infty, t) = 0, t > 0 \text{-----(5.3)}$$

$$h(r_w, z, t) = H(t), d \leq z \leq (d + b), t > 0 \text{-----(5.4)}$$

$$2\pi r_w K_t \int_d^{d+b} \frac{\partial h(r_w, z, t)}{\partial r} dz = \pi r_c^2 \frac{dH(t)}{dt}, t > 0 \text{-----(5.5)}$$

$$\frac{\partial h(r_w, z, t)}{\partial r} = 0, -\infty < z < d, d + b < z < \infty, t > 0 \text{---(5.6)}$$

En donde:

$K_z$ = componente vertical de la conductividad hidráulica [m/d],

$d$ = distancia a la tubería ranurada [m],

$z$ = dirección vertical [m],

$b$ =largo efectivo de la tubería ranurada [m].

Dachler (1936) desarrolló una solución analítica aproximada para el modelo matemático definido por las ecuaciones (5.2) a (5.6) y se puede escribir como:

$$\ln\left(\frac{H(t)}{H_0}\right) = -\frac{2K_r b t}{r_c^2 \ln\left[\frac{1}{(2\Psi)} + \left(1 + \left(\frac{1}{2\Psi}\right)^2\right)^{1/2}\right]} \text{-----(5.7)}$$

Como lo muestra la ecuación (5.7) la grafica de la solución en el formato de carga hidráulica normalizada contra el tiempo es una línea recta. Por lo tanto, el cálculo de la pendiente de la línea de tendencia se emplea para estimar el valor de la componente radial de la conductividad hidráulica. El método esencialmente se puede resumir en los siguientes cinco pasos (Butler, 1998):

- 1.- Una vez obtenidos los datos de la prueba slug realizada en cada pozo se grafica la respuesta de los datos de la carga hidráulica normalizados en escala logarítmica contra el tiempo desde que comenzó la prueba (Figura 5.13).
- 2.- Se ajusta una línea de tendencia a la gráfica, ya sea visualmente o por medio de una regresión automática de rutina (hoja de cálculo o software diseñado específicamente para estos fines).
- 3.- Se calcula la pendiente de dicha línea de tendencia. Un método muy común para obtener el valor es estimar el tiempo que corresponde a una carga normalizada de 0.368. Este tiempo es definido como el tiempo básico de retraso de acuerdo a la terminología de Hvorslev (1951) y se define como  $T_0$ , de esta manera la pendiente, cuando esta en función del logaritmo natural, se escribe  $-1/T_0$ .
- 4.- Se obtiene una estimación del parámetro ( $\Psi$ ) para cada pozo en particular, siendo  $\Psi$  la función de anisotropía y es igual a  $\Psi = \frac{\sqrt{K_v / K_r}}{b * r_w}$ ;  $b'$ = longitud de la rejilla del pozo;  $r_w$ =radio efectivo de la rejilla.

5.-La componente radial de la conductividad hidráulica puede ser estimada reescribiendo la ecuación (5.7) en términos de la pendiente calculada y usando una carga normalizada de 0.368:

$$K_r = \frac{r_c^2 \ln\left(\frac{1}{(2\Psi)} + \left(\frac{1}{(2\Psi)}\right)^2\right)^{1/2}}{2bT_0} \text{-----(5.8)}$$

En donde:

$K_r$ = componente radial de la conductividad hidráulica del acuífero [m/día],

$r_c$ = radio de la rejilla [m],

$r_w$ = radio efectivo de la tubería [m],

$b$ = longitud de la tubería ranurada [m],

$T_0$ = tiempo de recuperación correspondiente a  $H/H_0=0.368\sim 0.37$ ,

$$\Psi = \frac{\sqrt{K_z / K_r}}{b / r_w} \text{[adimensional]}$$

$K_z$ = componente vertical de la conductividad hidráulica de la formación [m/día].

Butler (1998) plantea varias cuestiones respecto a la variante del método de Hvorslev (1951) para los pozos parcialmente penetrantes. Una de ellas es que la ecuación (5.8) requiere conocer un estimado de la relación de anisotropía del medio, que es incorporado en el cálculo del parámetro  $\Psi$  y en la mayoría de los casos se tiene muy poca información al respecto. Por lo que para estimar el valor de la conductividad hidráulica se tomó como base un medio isótropo y se comparó con un medio de anisotropía igual a  $\frac{K_z}{K_r} = 0.1$ .

Las gráficas de PNE contra tiempo se muestran en el capítulo 4 y la Figura 5.14 presenta los mismos datos en función de la carga normalizada en escala logarítmica, las ecuaciones de las líneas de tendencia y el factor de correlación de los datos analizados. Las ecuaciones obtenidas para cada prueba, mismas que sirven para establecer el valor de  $T_0$ , que corresponde a una carga hidráulica normalizada de 0.368, son las siguientes:

$$\text{PM1: } y = 0.229e^{-0.0016x} \text{---(5.9)}$$

$$\text{PM7: } y = 0.3961e^{-0.0055x} \text{---(5.13)}$$

$$\text{PM4: } y = 0.6071e^{-0.0018x} \text{---(5.10)}$$

$$\text{PM9: } y = 0.5765e^{-0.0035x} \text{---(5.14)}$$

$$\text{PM5: } y = 0.6053e^{-0.0016x} \text{---(5.11)}$$

$$\text{PM10: } y = 0.5833e^{-0.0027x} \text{---(5.15)}$$

$$\text{PM6: } y = 0.5038e^{-0.0014x} \text{---(5.12)}$$

$$\text{PM11: } y = 0.604e^{-0.0016x} \text{---(5.16)}$$

Despejando “x” de las ecuaciones (5.9) a (5.16) se tiene lo siguiente, en donde  $T_0$  esta expresado en segundos:

$$\text{PM1: } T_0 = \frac{L\eta\left(\frac{0.368}{0.229}\right)}{-0.0016} = -2965 \text{---(5.17)}$$

$$\text{PM7: } T_0 = \frac{L\eta\left(\frac{0.368}{0.3961}\right)}{-0.0055} = 13.37 \text{---(5.21)}$$

$$\text{PM4: } T_0 = \frac{L\eta\left(\frac{0.368}{0.6071}\right)}{-0.0018} = 278.1 \text{---(5.18)}$$

$$\text{PM9: } T_0 = \frac{L\eta\left(\frac{0.368}{0.5765}\right)}{-0.0035} = 128.25 \text{---(5.22)}$$

$$\text{PM5: } T_0 = \frac{L\eta\left(\frac{0.368}{0.6053}\right)}{-0.0016} = 311.03 \text{---(5.19)}$$

$$\text{PM10: } T_0 = \frac{L\eta\left(\frac{0.368}{0.5833}\right)}{-0.0027} = 170.6 \text{---(5.23)}$$

$$\text{PM6: } T_0 = \frac{L\eta\left(\frac{0.368}{0.5038}\right)}{-0.0014} = 224.35 \text{---(5.20)}$$

$$\text{PM11: } T_0 = \frac{L\eta\left(\frac{0.368}{0.604}\right)}{-0.0016} = 309.68 \text{---(5.24)}$$

El valor de  $T_0$  para PM1 se obtuvo gráficamente y se confirmó usando el programa AQTESOLV for Windows, debido a que la ecuación de la línea de tendencia arroja un valor negativo, el cual físicamente no representa un valor de tiempo determinado. De la interpretación de la prueba slug para PM1 se tiene que el valor de  $T_0=70[s]$ .

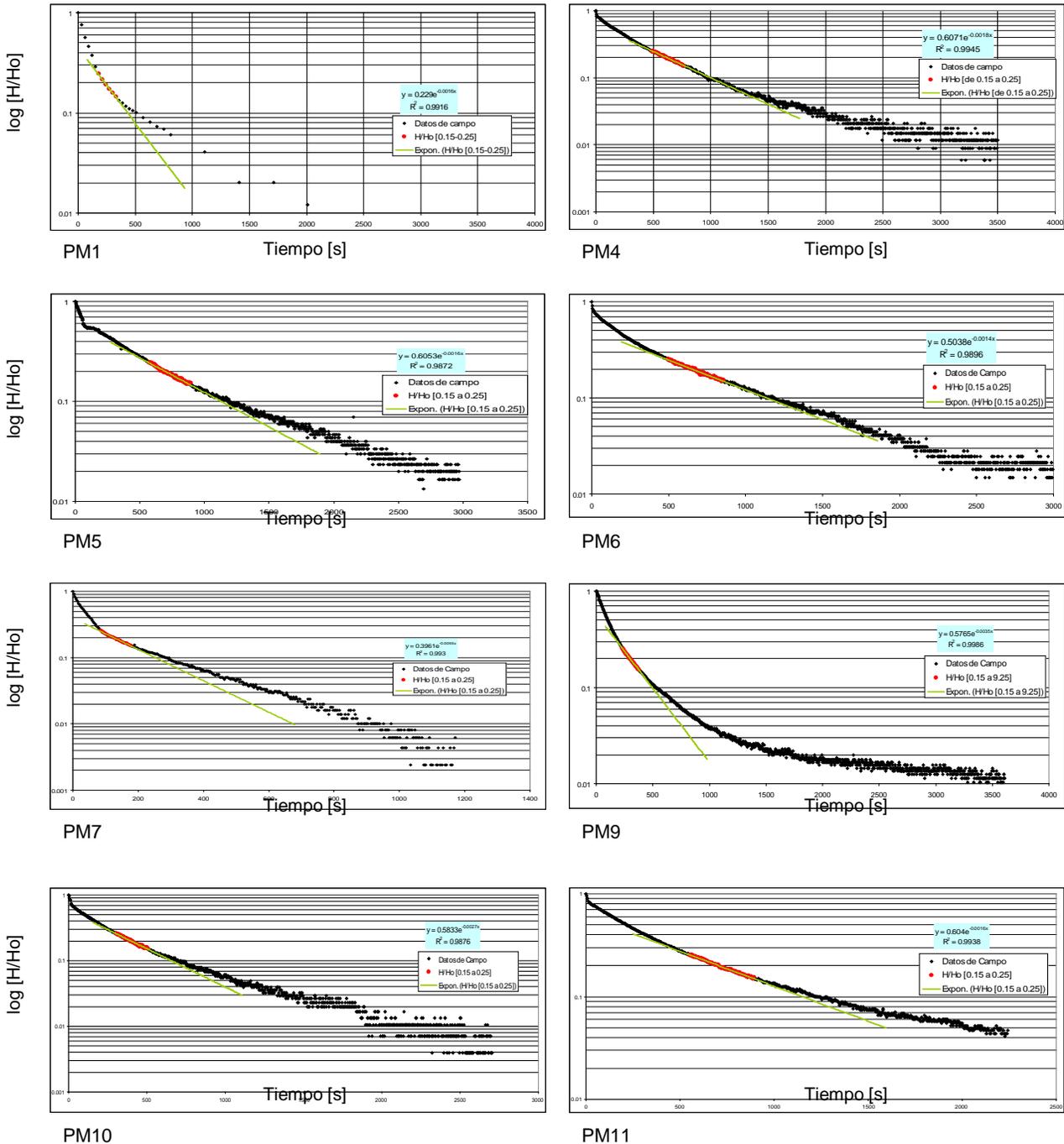


Figura 5.14. Interpretación de las pruebas slug. La línea de tendencia en verde representa la recta calculada para los valores de carga normalizada de 0.15 a 0.25 que Butler (1996) recomienda para el cálculo de la conductividad hidráulica.

El criterio de análisis en donde se selecciona el intervalo de 0.15-0.25 para  $H/H_0$  es recomendado por Butler (1996) para minimizar los posibles errores introducidos por la curva cóncava que se forma al graficar los datos obtenidos en campo, esto se puede apreciar en las gráficas de los pozos PM4, PM6, PM9, PM10 y PM11. En los pozos PM1, PM5 y PM7 se puede observar el efecto de la doble línea recta, indicando que la prueba ha sido influenciada, al inicio, por el drenado del filtro de grava y las características constructivas del pozo. Por lo tanto, el rango seleccionado (0.15-0.25 para  $H/H_0$ ) siempre permite despreciar los primeros datos evitando introducir errores al momento de trazar la línea de tendencia.

Con los datos de  $T_0$  calculados con las ecuaciones (5.17) a (5.24) y estableciendo un primer caso en donde el medio resulta ser isótropo es posible calcular  $K_r$  por medio de la ecuación (5.8).

PM1 :

$$K_r = \frac{(0.0254m)^2 \ln\left(\frac{1}{2(0.0084)} + \left(1 + \frac{1}{2(0.0084)}\right)^2\right)^{1/2}}{2(3m)(70seg)} = 7.33 \times 10^{-6} \text{ m/seg} = 0.63 \text{ m/día} \text{ --- (5.25)}$$

$$PM4: K_r = \frac{(0.0254m)^2 \ln\left(\frac{1}{2(5.6 \times 10^{-3})} + \left(1 + \frac{1}{2(5.6 \times 10^{-3})}\right)^2\right)^{1/2}}{2(4.5m)(278.1seg)} = 1.33 \times 10^{-6} \text{ m/seg} = 0.11 \text{ m/día} \text{ --- (5.26)}$$

PM5:

$$K_r = \frac{(0.0254m)^2 \ln\left(\frac{1}{2(5.6 \times 10^{-3})} + \left(1 + \frac{1}{2(5.6 \times 10^{-3})}\right)^2\right)^{1/2}}{2(4.5m)(311.03seg)} = 2.067 \times 10^{-6} \text{ m/seg} = 0.17 \text{ m/día} \text{ --- (5.27)}$$

PM6:

$$K_r = \frac{(0.0254m)^2 \ln\left(\frac{1}{2(5.6 \times 10^{-3})} + \left(1 + \frac{1}{2(5.6 \times 10^{-3})}\right)^2\right)^{1/2}}{2(4.5m)(224.35seg)} = 1.65 \times 10^{-6} \text{ m/seg} = 0.14 \text{ m/día} \text{ --- (5.28)}$$

PM7:

$$K_r = \frac{(0.025m)^2 \ln\left(\frac{1}{2(4.23 \times 10^{-3})} + \left(1 + \frac{1}{2(4.23 \times 10^{-3})}\right)^2\right)^{1/2}}{2(6m)(13.37seg)} = 2.1291 \times 10^{-5} \text{ m/seg} = 1.84 \text{ m/día} \text{ --- (5.29)}$$

PM9:

$$K_r = \frac{(0.025m)^2 \ln\left(\frac{1}{2(4.23 \times 10^{-3})} + \left(1 + \frac{1}{2(4.23 \times 10^{-3})}\right)^2\right)^{1/2}}{2(6m)(128.25seg)} = 2.2196 \times 10^{-6} \text{ m/seg} = 0.19 \text{ m/día} \text{ --- (5.30)}$$

PM10:

$$K_r = \frac{(0.025m)^2 \ln\left(\frac{1}{2(4.23 \times 10^{-3})} + \left(1 + \frac{1}{2(4.23 \times 10^{-3})}\right)^2\right)^{1/2}}{2(6m)(170.6seg)} = 1.66 \times 10^{-6} \text{ m/seg} = 0.14 \text{ m/día} \text{ --- (5.31)}$$

PM11:

$$K_r = \frac{(0.025m)^2 \ln\left(\frac{1}{2(4.23 \times 10^{-3})} + \left(1 + \frac{1}{2(4.23 \times 10^{-3})}\right)^2\right)^{1/2}}{2(6m)(309.68seg)} = 9.19 \times 10^{-7} \text{ m/seg} = 0.07 \text{ m/día} \text{ --- (5.32)}$$

Para el caso de PM1 y utilizando el programa AQTESOLV se obtuvo una conductividad de 0.6619 m/día, empleando el método de interpretación de Hvorslev (1951), confirmando que el dato obtenido gráficamente es correcto.

Se obtiene una  $k$  promedio de **0.41 m/día**, siendo, según Fetter (2001) un valor de conductividad bajo correspondiente a arenas finas y arenas limosas. . Por otro lado, también es posible generar un mapa de isoconductividades hidráulicas, formado por los valores obtenidos en el análisis aplicado a cada prueba slug llevada a cabo (Figura 5.15). De la Figura se puede concluir que los valores más bajos de conductividad hidráulica se encuentran al SW de la zona de estudio (hacia el punto del derrame), aumentando gradualmente hacia el NE.



Figura 5.15. Mapa de isoconductividades. Los valores están expresados en m/día.

### **5.1.5. Caracterización Ambiental**

Una caracterización ambiental consiste en analizar e interpretar la información resultante de la etapa de muestreo de suelo y agua, así como las mediciones de interfaz aire-hidrocarburo e hidrocarburo-agua.

#### **SUELO CONTAMINADO**

Para determinar el volumen de suelo contaminado, se analizaron en laboratorio 36 muestras de suelo proveniente de diferentes profundidades en los pozos de monitoreo instalados (los resultados se muestran en el Capítulo 4). Los parámetros analizados fueron: TPH- Diesel, Benzo(k)fluoranteno, Benzo(a)pireno y Naftaleno, siendo solo los TPH los que superaron los límites máximos permisibles establecidos en la NOM-138-SEMARNAT-2003. El suelo contaminado se dividió en tres rangos de profundidades (0 – 2m, 2 – 4.5m y 4.5 – nivel freático) y se configuraron tres plumas de contaminación (Figuras 5.16, 5.17 y 5.18).

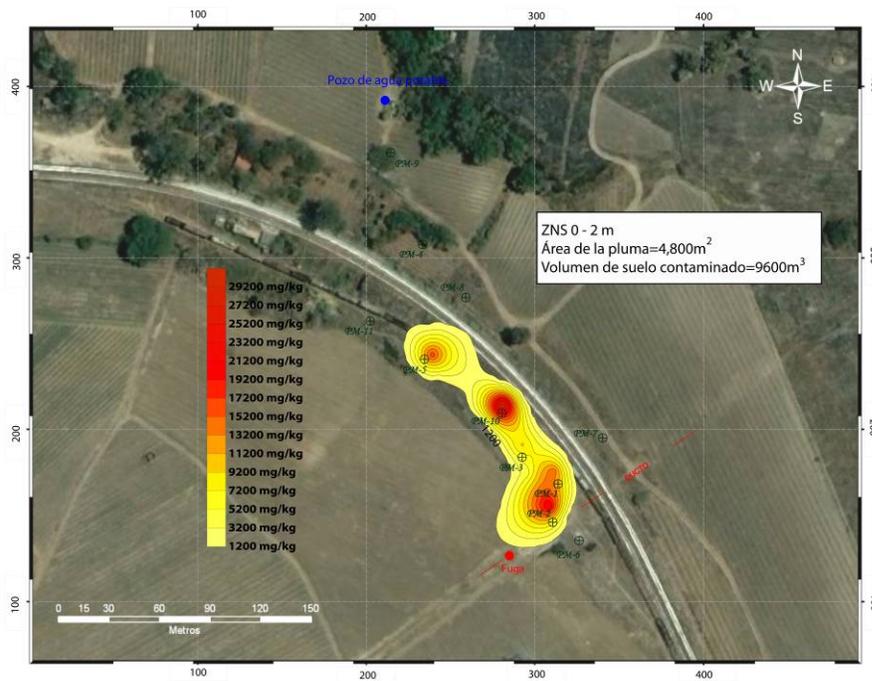


Figura 5.16. Pluma de suelo contaminado de 0 a 2m de profundidad.

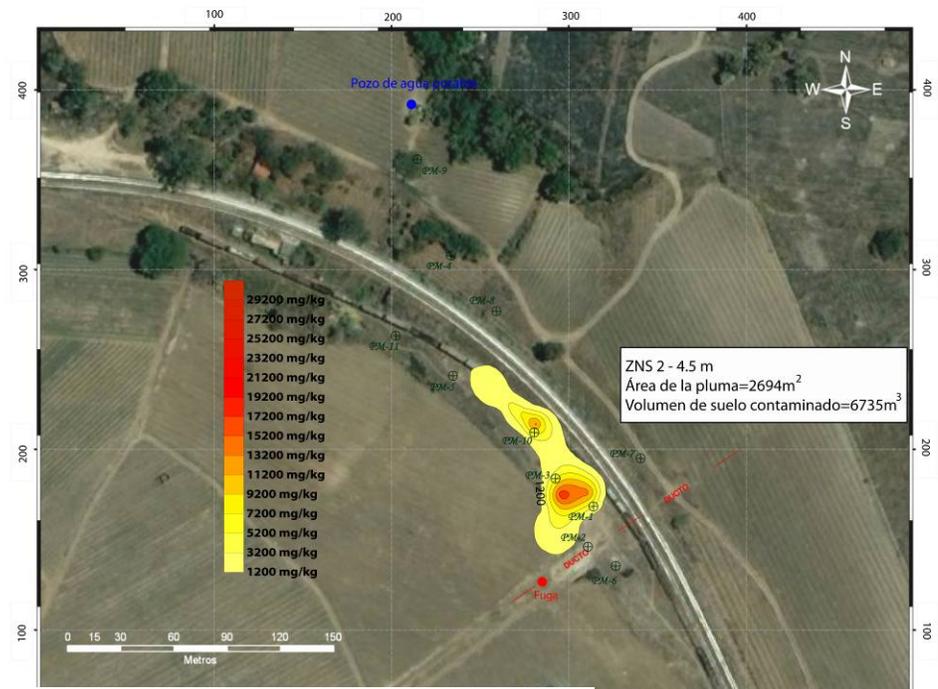
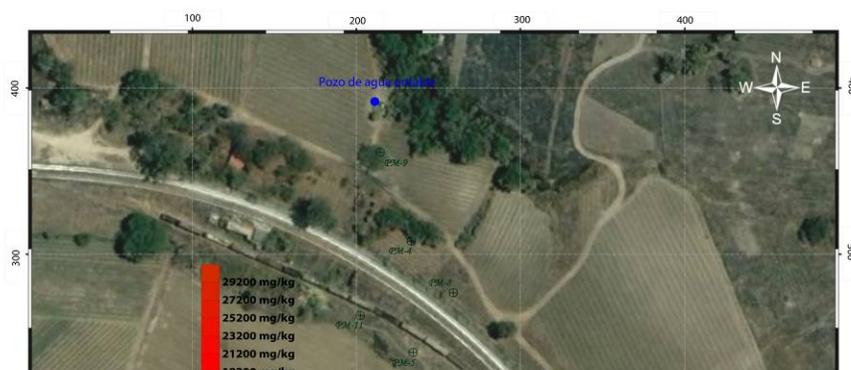


Figura 5.17. Pluma de suelo contaminado de 2 a 4.5m de profundidad.



contaminado por un derrame de

Figura 5.18. Pluma de suelo contaminado de 4.5m a PNE (8m).

Como se puede apreciar en las imágenes mostradas, la contaminación afectó una gran cantidad de suelo, sin embargo, al norte de las vías del tren no hay presencia alguna de contaminante. Por lo tanto las plumas se restringen al sector suroriental del sitio y su geometría esta controlada por la dirección de flujo de agua subterráneo y la topografía. Así mismo, el área contaminada va disminuyendo conforme la profundidad aumenta, hasta llegar al nivel del agua, en donde como se verá más adelante se presenta una fase libre de LNAPL contaminando el acuífero libre presente.

De las tres áreas calculadas se puede estimar el volumen total de suelo contaminado, esto es:

$$V_t = A_{0-2m} \cdot (h_1) + A_{2-4.5m} \cdot (h_2) + A_{4.5-PNE} \cdot (h_3) \text{ ---- (5.33)}$$

En donde:

$V_t$ = volumen total [ $m^3$ ],

$A_i$ = área a las profundidades establecidas [ $m^2$ ],

$h$ = rango de espesor establecido [ $m$ ],

PNE= profundidad del nivel estático [ $m$ ].

Por lo tanto:  $V_t = 4800m^2 \cdot (2m) + 2694m^2 \cdot (2.5m) + 450m^2 \cdot (3.5m) = 17910m^3$  de suelo contaminado.

Multiplicando por la densidad del suelo obtenida en laboratorio ( $2708.1 \text{ kg/m}^3$ ) se tiene un total de 49,000 Ton de suelo contaminado.

Con los análisis de TPH de muestras de suelo a diferentes profundidades, se pueden generar líneas de isoconcentración que indican la distribución de las concentraciones de TPH diesel en el subsuelo (Figuras 5.19 y 5.20). La sección AA' representa un corte longitudinal del LNAPL y DD' muestra un corte transversal.

PM1, PM2 y PM10 presentan las mayores concentraciones, con una tendencia a disminuir conforme la profundidad aumenta alcanzando máximos valores a los 2 m con  $31,000 \text{ mg/kg}$  y disminuyendo hasta  $1,200 \text{ mg/kg}$  justo antes de llegar al nivel estático, en donde se encuentra alojada una pluma de fase libre. Lateralmente la contaminación se extiende hasta el pozo PM5, con concentraciones de  $17,000 \text{ mg/kg}$  a 2.5 metros de profundidad, disminuyendo drásticamente ( $899 \text{ mg/kg}$ ) 2 metros más abajo. Los detalles de la configuración de la fase libre se presentan más adelante.

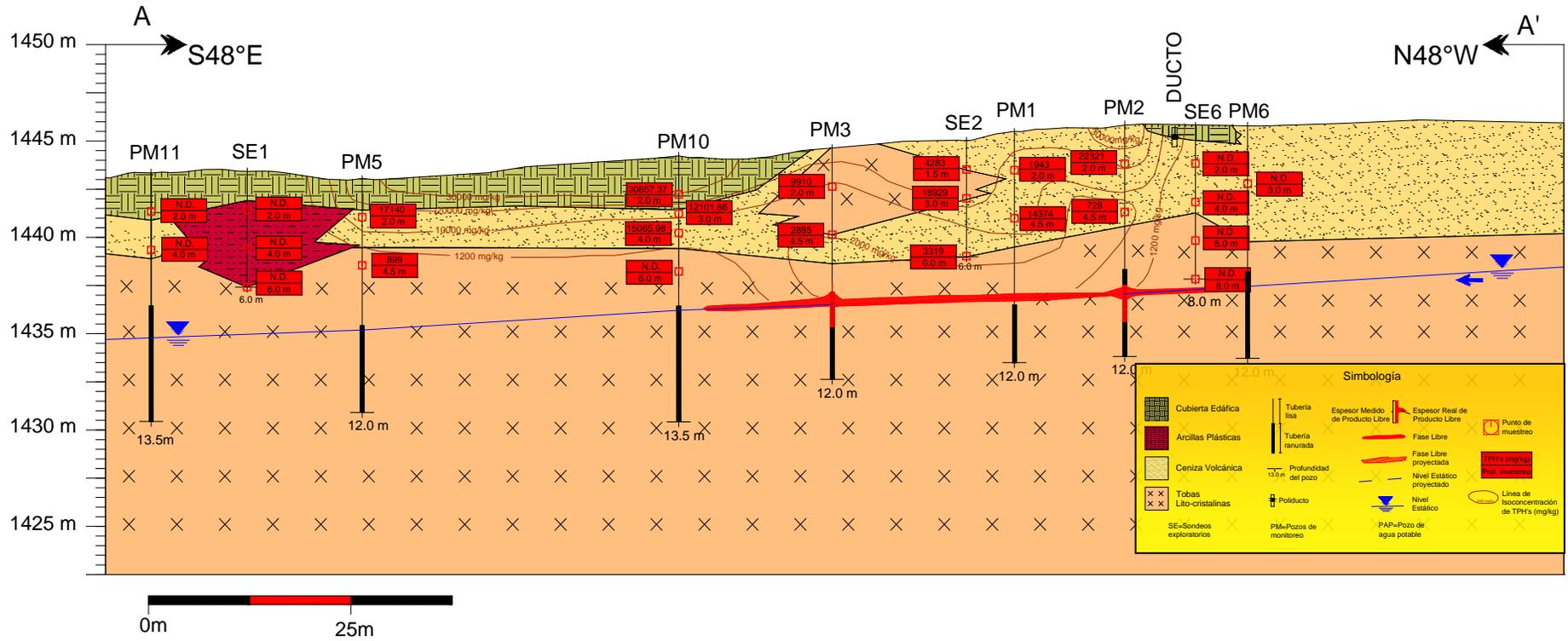
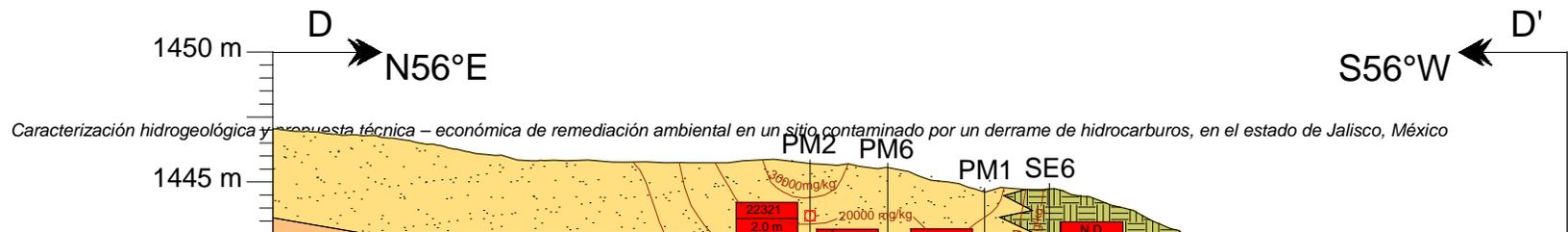


Figura 5.19. Sección de isoconcentraciones. Corte longitudinal según la geometría del LNAPL presente.



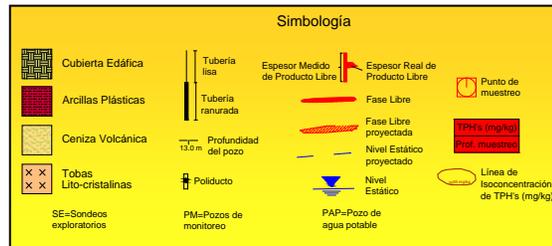


Figura 5.20. Sección de isoconcentraciones. Corte transversal al LNAPL presente.

**PLUMA DE LNAPL**

La caracterización de la pluma de LNAPL consistió en medir los espesores presentes en aquellos pozos que fueron impactados por el LNAPL, las mediciones de campo se hicieron a finales del año 2005 y 4 más a lo largo de 2006, con la finalidad de estudiar la movilidad del contaminante. Como se puede observar en los datos presentados en el capítulo 4, el pozo PM-1 no había sido impactado en diciembre del 2005 y en las mediciones del 2006 ya presentó una ligera capa de diesel. La Figura 5.21 muestra la geometría planteada de la fase libre para el año 2006.



Figura 5.21. Vista en planta del LNAPL (2006).

Como se sabe, el espesor medido en los pozos no corresponde al espesor real, por lo que es necesario hacer una corrección matemática mediante el modelo propuesto por el Instituto Americano del Petróleo (API, 2004), que se expresa con la siguiente ecuación:

$$H_R = \frac{H_0(\rho_w - \rho_0)}{\rho_0} \text{-----} (5.34)$$

En donde:

- H<sub>R</sub>= Espesor real del LNAPL [m],
- H<sub>0</sub>= Espesor aparente [m],
- ρ<sub>w</sub>= densidad del agua[gr/cm<sup>3</sup>],
- ρ<sub>0</sub>= densidad del hidrocarburo [gr/cm<sup>3</sup>].

Los valores de espesor real se presentan en la tabla 5.2. Las secciones de las figuras 5.20, 5.21 y 5.22 corresponden a las secciones geológicas AA', DD' y EE' antes mostradas y esquematizan el comportamiento del LNAPL en el subsuelo, exhibiendo su interacción con la litología presente y el nivel freático del acuífero. Para la construcción de las secciones y el cálculo del volumen de LNAPL se tomó un promedio de los espesores medidos y reales de los

años 2005 y 2006 descartando a PM1 por el poco espesor que manifestó resultando poco representativo.

Pozo	Espesor medido [m]	Espesor real[m]
<b>MONITOREO DEL PRODUCTO LIBRE (LNAPL), 1/DICIEMBRE/05</b>		
PM-2	2.36	0.4
PM-3	2.49	0.51
<b>MONITOREO DEL PRODUCTO LIBRE (LNAPL), 28/SEPTIEMBRE/06</b>		
PM-1	0.03	.006
PM-2	0.97	0.19
PM-3	2.27	0.46
<b>MONITOREO DEL PRODUCTO LIBRE (LNAPL), 24/OCTUBRE/06</b>		
PM-1	0.01	0.002
PM-2	2.69	0.55
PM-3	2.27	0.46
<b>MONITOREO DEL PRODUCTO LIBRE (LNAPL), 15/NOVIEMBRE/06</b>		
PM-1	0.03	0.006
PM-2	2.01	0.41
PM-3	2.33	0.47
<b>MONITOREO DEL PRODUCTO LIBRE (LNAPL), 02/DICIEMBRE/06</b>		
PM-1	0.06	0.012
PM-2	2.03	0.41
PM-3	2.14	0.43

Tabla 5.2. Espesores medidos y reales de la fase libre presente en el sitio contaminado.

De la tabla se obtiene un espesor real promedio ( $H_R$ ) de 0.4416 m y se puede apreciar gráficamente en las figuras 5.22, 5.23 y 5.24.

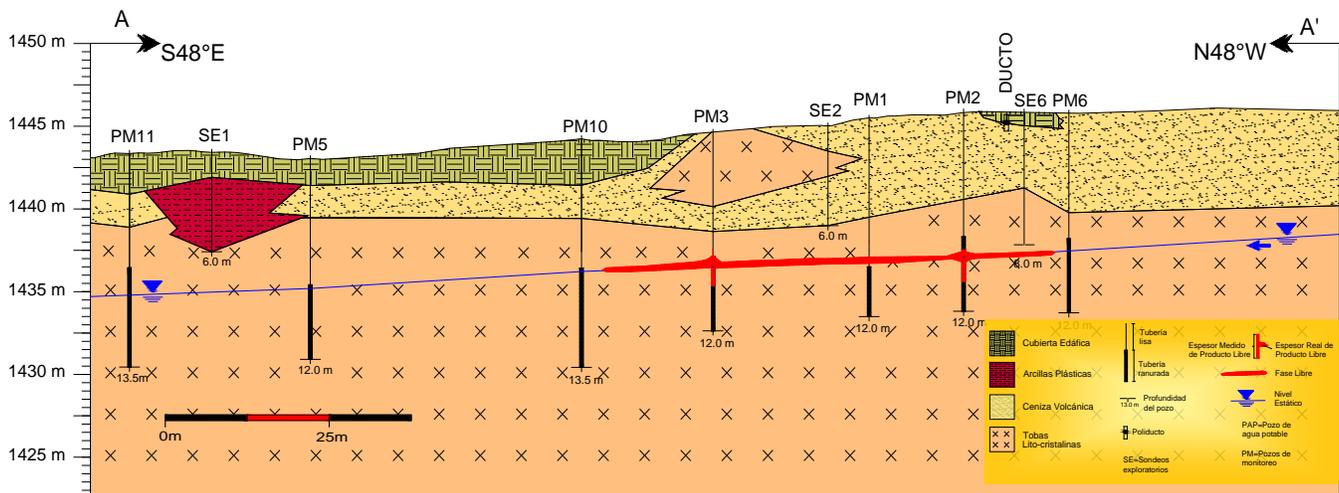


Figura 5.22. Sección AA' con la representación de la fase libre. Se aprecian los espesores medidos y el espesor real promedio calculado para la fase libre.

En la sección AA' la fase libre se observa longitudinalmente, ubicada a una profundidad de 7.5 – 8 m, y una longitud de 75 m, justo en la toba. El espesor medido solo se presenta en PM2 y

PM3, PM1 parece ser impactado por el diesel a primera vista, pero esto es debido solamente a la proyección del pozo en la sección. Por su naturaleza (menos denso que el agua), el contaminante se localiza exactamente en el nivel freático, formado una costra de diesel en la parte superior.

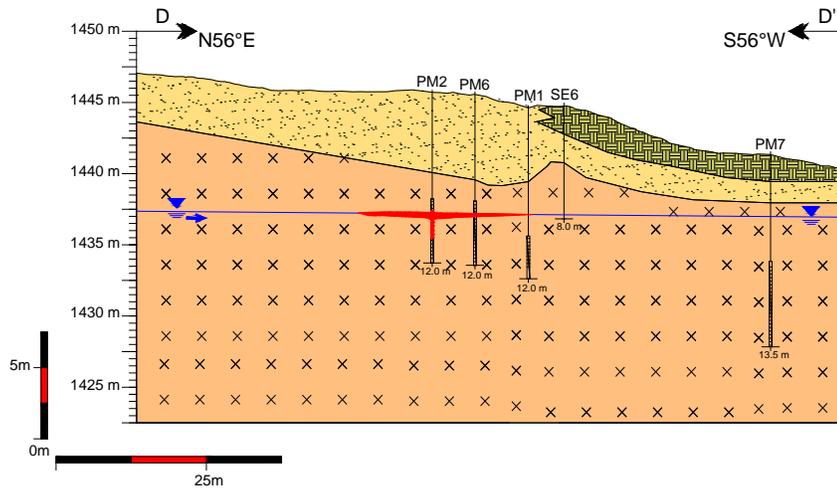


Figura 5.23. Sección DD' que muestra el espesor y la extensión transversal de la fase libre.

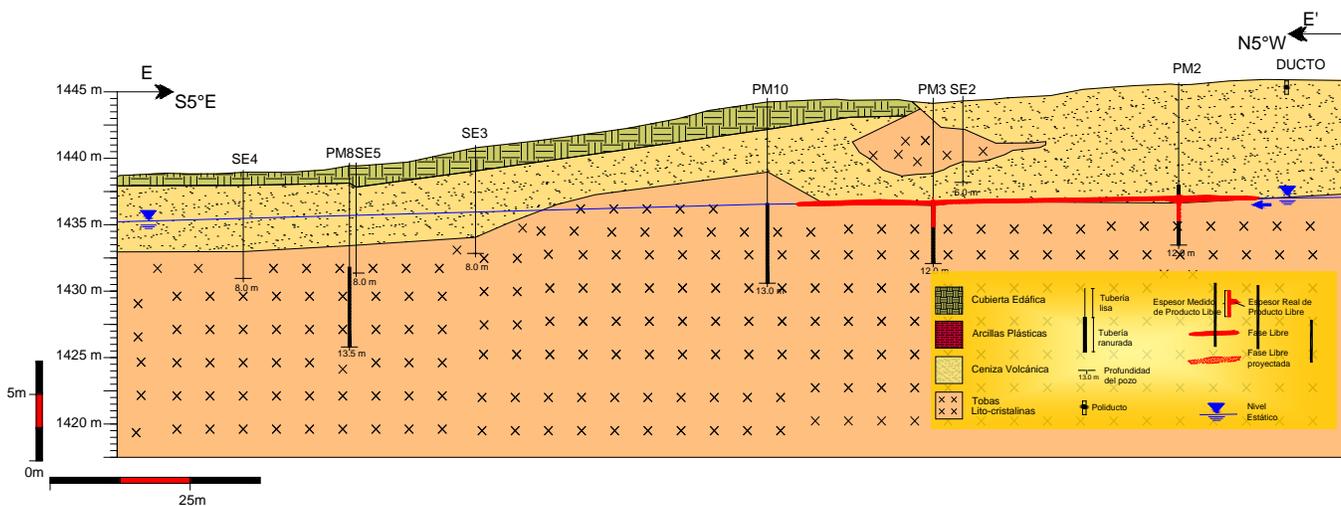


Figura 5.24. Sección EE'. Capa roja esquematiza la fase libre presente en el subsuelo.

Para obtener el volumen total de hidrocarburo almacenado en la fase libre es necesario primero obtener la saturación de hidrocarburo en la ceniza volcánica, por medio de la siguiente expresión (Modelo API, 2004):

$$S_0 = \frac{\rho_b \cdot TPH}{\rho_n \cdot n \cdot 10^6} \text{----- (5.35)}$$

En donde:

- S<sub>0</sub>=saturación de hidrocarburo,
- ρ<sub>b</sub>= densidad aparente del suelo [1.58 gr/cm<sup>3</sup>],
- ρ<sub>n</sub>= densidad del hidrocarburo [0.83 gr/cm<sup>3</sup>].
- n= porosidad [41.6%],

TPH=concentración de TPH [12650 mg/kg] (promedio de las concentraciones medidas en laboratorio de muestras ubicadas dentro de la fase libre, 9,300 y 16,000 mg/kg)

La concentración de TPH usada corresponde al promedio de los valores obtenidos en laboratorio para las muestras de los pozos PM-1, PM-2 y PM-3 a una profundidad cercana a los 8m, la cual es la profundidad aproximada en donde se ubicó la interfaz aire-hidrocarburo.

Por lo tanto:

$$S_0 = \frac{1.58 \text{ gr/cm}^3 \cdot 12650 \text{ mg/kg}}{0.83 \text{ gr/cm}^3 \cdot 0.416 \times 10^6} = 5.79\% \text{-----} (5.36)$$

Obteniendo una saturación de hidrocarburo de 5.79%. Para confirmar este valor se empleó el software desarrollado por el Instituto Americano del Petróleo (API) “API Interactive Guide, versión 2.0.4” (Figura 5.25).

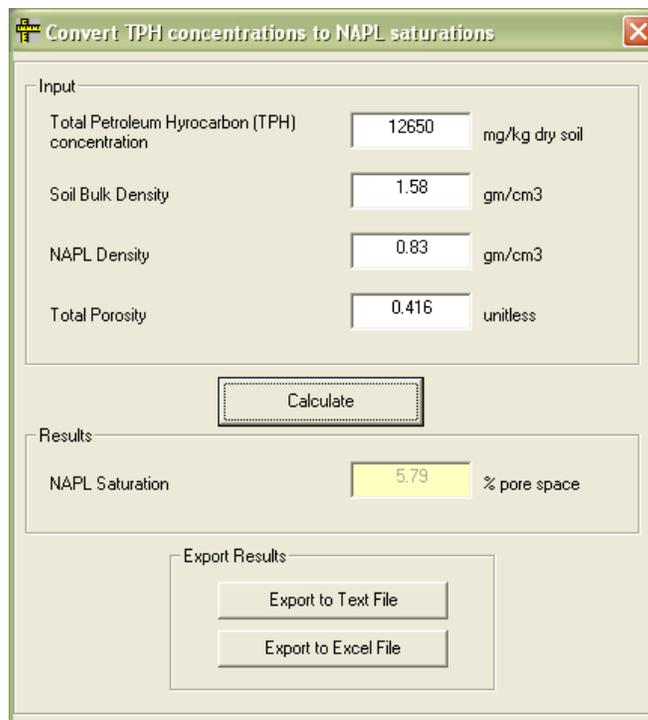


Figura 5.25. Cálculo de la saturación de hidrocarburo con ayuda del software API Interactive Guide.

El volumen total de LNAPL total se calculó con la siguiente ecuación:

$$V_{LNAPL} = S_{LNAPL} H_R S_0 \text{-----} (5.37)$$

En donde:

$V_{LNAPL}$ =volumen total de LNAPL [ $m^3$ ],

$S_{LNAPL}$ = área del LNAPL [ $m^2$ ],

$H_R$ =espesor real [m],

$S_0$ = factor de saturación de hidrocarburo [adim].

Por lo tanto:

$$V_{LNAPL} = 21895 \text{ m}^2 \cdot (0.4416 \text{ m}) \cdot (0.0579) = 55.98 \text{ m}^3 = 559825 \text{ L}$$

La cifra obtenida se encuentra muy por debajo de los 500,000 L que reportó PEMEX. Esto debido en primer lugar a que la mayor parte del contaminante ha sido retenido por el suelo y otra más ha impactado al acuífero. Sin embargo, el volumen de LNAPL obtenido esta en función del factor de saturación de hidrocarburo utilizado, mismo, que por la forma como se calculó solo es una representación puntual de la saturación, para obtener una mejor aproximación es necesario desarrollar un perfil de saturación que describa el comportamiento del LNAPL con relación a la ubicación del nivel freático y a la variabilidad del contenido de agua conforme la profundidad cambie.

**MECANISMOS DE TRANSPORTE DE LA FASE DISUELTA**

Como es de esperarse por la presencia de LNAPL, en el acuífero impactado se genera una fase disuelta que está controlada por los mecanismos de transporte del medio poroso, así como por los parámetros hidráulicos del acuífero. Las plumas de fase disuelta caracterizadas son de benceno, tolueno, xilenos totales y naftaleno. Las figuras 5.26, 27, 28 y 29 muestran la forma y longitud de cada pluma y su interacción con el flujo subterráneo.

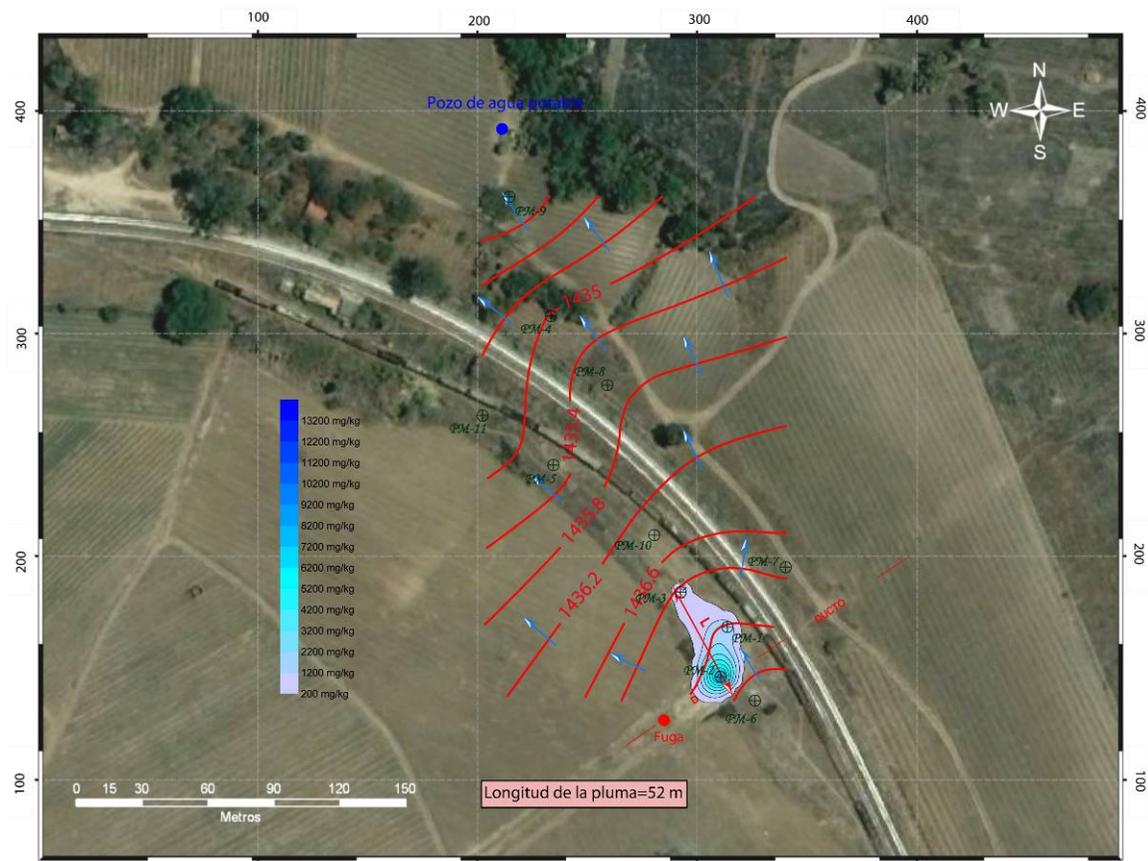


Figura 5.27. Pluma en fase disuelta de tolueno. Adicionalmente se muestra la dirección de flujo del agua subterránea y las líneas equipotenciales.

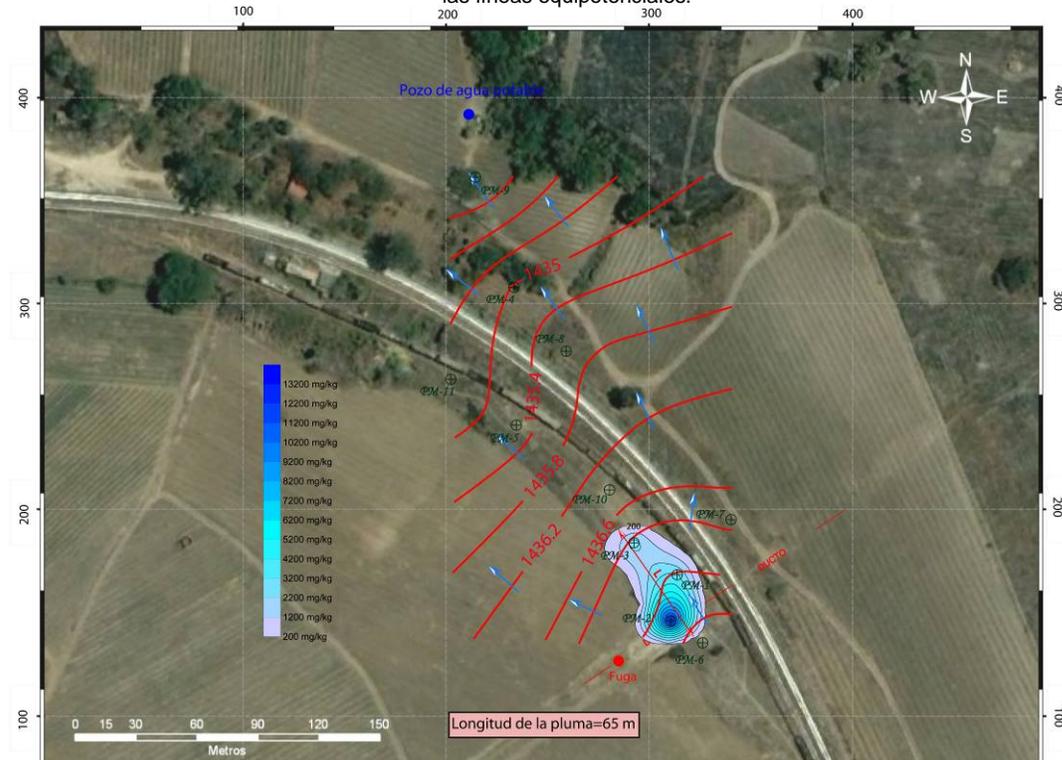
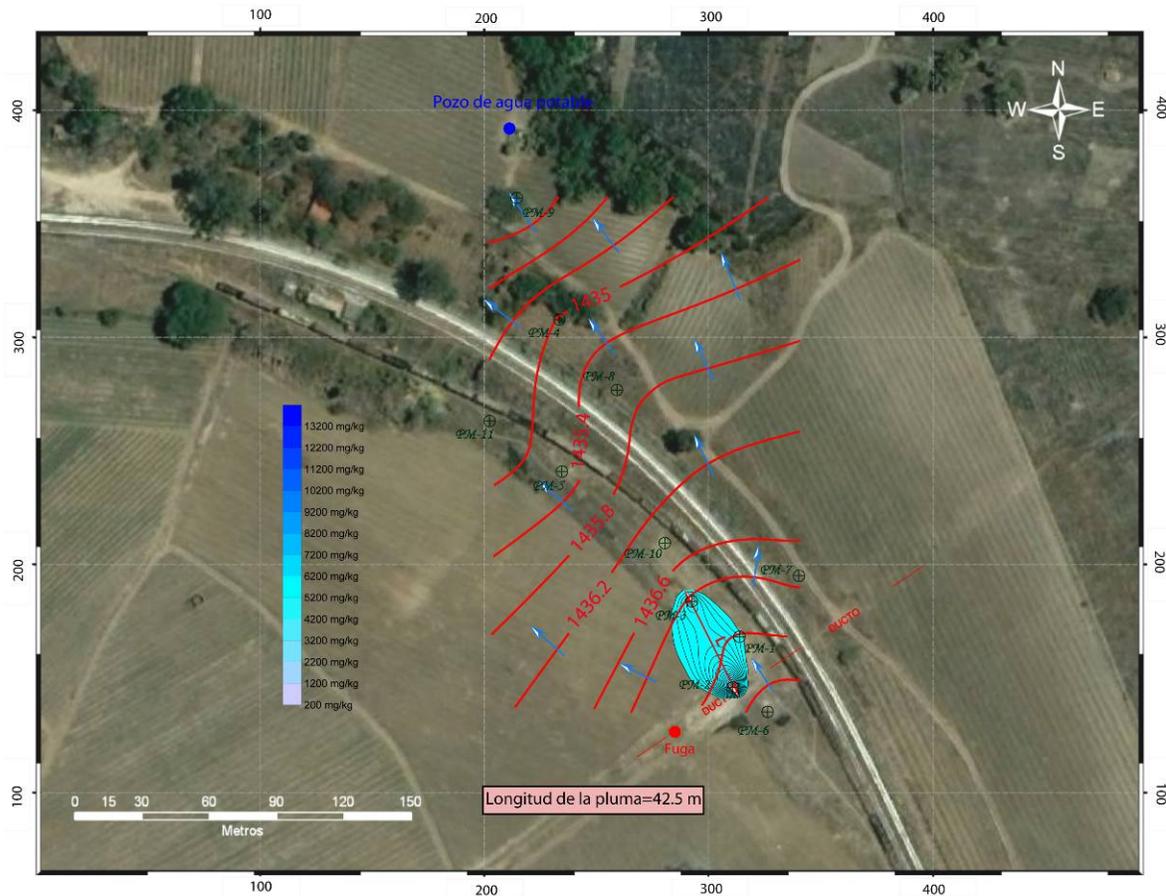


Figura 5.28. Pluma en fase disuelta de xileno totales. Adicionalmente se muestra la dirección de flujo del agua subterránea y las líneas equipotenciales.



las líneas equipotenciales.

La pluma con mayor presencia es la de xilenos totales, con una longitud de 65 m, la fase disuelta de tolueno presenta muy poco desarrollo con una longitud máxima de 25 m a partir del pozo PM2. La geometría de todas las plumas están controladas por el flujo subterráneo (dirección NNW), alargándose de forma más o menos paralela a las vías del tren. Es de importancia notar que las plumas se restringen al sector suroccidental de las vías férreas y ninguna ha impactado el suelo que se ubica al NE del sitio contaminado.

Por otro lado, por medio de la experimentación se ha determinado un factor de retardo del contaminante en el suelo de 11.87, la conductividad hidráulica es en promedio de 0.41 m/día, quedando de manifiesto que el contaminante además de viajar a baja velocidad, viaja a una velocidad menor que el agua. Debido a esta diferencia de velocidades, la velocidad real es una mezcla de todas las diferenciales de velocidad, conocida como dispersión mecánica, teniendo como consecuencia una dilución del contaminante mientras el flujo avanza. Este proceso, junto con la difusión molecular, que es un fenómeno en el cual el contaminante se mueve de un área de mayor a menor concentración y que no necesariamente es compatible con la dirección lineal del flujo subterráneo, se conocen como dispersión hidrodinámica (Fetter, 2001). Esto es:

$$DispersiónHidrodinámica = Difusión Molecular + DispersiónMecánica \quad \text{-----(5.38)}$$

La dispersión se puede dividir en longitudinal y transversal, teniendo que:

$$D_L = \alpha_L V_x + D^* \quad \text{-----(5.39)}$$

$$D_T = \alpha_T V_x + D^* \quad \text{-----(5.40)}$$

En donde:

$D_L$  = Dispersión longitudinal [ $m^2/día$ ],

$D_T$ = Dispersión trasversal [ $m^2/día$ ],  
 $V_X$ = Velocidad advectiva [ $m/día$ ]=  $k(dh/dl)/n_e$  ,  
 $dh/dl$ = gradiente hidráulico= 0.015,  
 $n_e$ = Porosidad eficaz= 10% (arenas finas-arenas medias),  
 $D^*$ = Difusión molecular [ $m^2/día$ ], generalmente  $D^* \rightarrow 0$   
 $\alpha_L$ = Dispersividad longitudinal [ $m$ ],  
 $\alpha_T$ = Dispersividad transversal [ $m$ ].

Xu y Eckstein (1995) realizaron mediante un estudio estadístico de la relación aparente entre la dispersividad y el flujo longitudinal, y encontraron que la siguiente ecuación es la que mejor describe la relación:

$$\alpha_L = 0.83(\text{Log}l)^{2.414} \text{ -----(5.41)}$$

Adicionalmente la relación  $\alpha_L/\alpha_T$  es la que controla la forma de la pluma, y en general se puede estimar que  $D_T \approx (1/10)D_L$ , así como  $\alpha_T \approx (1/10)\alpha_L$ .

Calculando la dispersividad longitudinal y transversal para cada pluma generada:

Pluma de benceno:  $\alpha_L = 0.83(\text{Log}52)^{2.414} = 3.056m$ ;  $\alpha_T \approx (1/10)3.056 = 0.3056m$

Pluma de tolueno:  $\alpha_L = 0.83(\text{Log}25)^{2.414} = 1.86m$ ;  $\alpha_T \approx (1/10)1.86 = 0.186m$

Pluma de xilenos:  $\alpha_L = 0.83(\text{Log}65)^{2.414} = 3.49m$ ;  $\alpha_T \approx (1/10)3.49m = 0.349m$

Pluma de naftaleno:  $\alpha_L = 0.83(\text{Log}42.5)^{2.414} = 2.69m$ ;  $\alpha_T \approx (1/10)2.69 = 0.269m$

Para poder calcular la dispersión se necesita conocer la velocidad advectiva, que esta en función del gradiente hidráulico, la conductividad hidráulica y la porosidad eficaz, por lo tanto:

$$V_X = 0.41(m/día) \cdot 0.015/0.10 = 0.061 m/día = 6cm/día$$

De esta manera se tiene que los valores de dispersión longitudinal y transversal son:

Pluma de benceno:  $D_L = 3.056m \cdot (0.061 m/día) = 0.186m^2/día$ ;  $D_T = 0.305 \cdot (0.061 m/día) = 0.0186m^2/día$

Pluma de tolueno:  $D_L = 1.86m \cdot (0.061 m/día) = 0.113m^2/día$ ;  $D_T = 0.186 \cdot (0.061 m/día) = 0.0113m^2/día$

Pluma de xilenos:  $D_L = 3.49m \cdot (0.061 m/día) = 0.213m^2/día$ ;  $D_T = 0.349 \cdot (0.061 m/día) = 0.0213m^2/día$

Pluma de naftaleno:  $D_L = 2.69m \cdot (0.061 m/día) = 0.164m^2/día$ ;  $D_T = 0.269 \cdot (0.061 m/día) = 0.0164m^2/día$

El tiempo que tardaría el contaminante en impactar el pozo de agua potable puede ser calculado por medio de la siguiente expresión:

$$V_C = d/t; \quad t = d/V_C \text{ -----(5.42)}$$

En donde:

$V_C$ = velocidad con que viaja el contaminante [ $m/día$ ] ó [ $m/año$ ],

$d$ = distancia al pozo de agua potable [ $m$ ],

$t$ = tiempo [ $año$ ].

Ya que el contaminante viaja a una velocidad menor que la del agua debido a los procesos advectivos, es necesario determinar la velocidad del frente del contaminante, que está en función de la velocidad advectiva y el coeficiente de distribución ( $k_d$ ) calculado para el suelo en estudio, esto es:

$$V_c = V_X / FR \text{ -----(5.43)}$$

En donde:

$V_c$ = velocidad del soluto o contaminante [m/día] ó [m/año],  
 $V_x$ = velocidad advectiva [m/día],  
 FR= factor de retardo= 11.87.

Por lo tanto:  $V_c = 0.061/11.87 = 5.1 \times 10^{-3} \text{ m/ día}$  ó bien  $V_c = 1.8 \text{ m/ año}$ .

Ahora, calculando el tiempo que tardará el contaminante en impactar al pozo de agua potable, si se tiene una distancia de 270 m entre la parte externa de la pluma con mayor extensión y el pozo, se tiene que:

$$t = 270(m)/1.8(m/ \text{ año}) = 150 \text{ años}$$

En resumen, el contaminante viaja a una velocidad de 1.8 metros anualmente, calculando que tardará aproximadamente 150 años en llegar al pozo de agua potable. Estas cifras pueden ser aplicadas para todas las plumas analizadas debido a que la velocidad del contaminante esta en función de la velocidad advectiva y el factor de retardo. La velocidad advectiva depende de las propiedades intrínsecas del medio como el gradiente hidráulico, la conductividad hidráulica y la porosidad eficaz, el factor de retardo involucra procesos de adsorción calculados para el suelo y la mezcla de todos los compuestos que forman parte del diesel (TPH fracción media).

150 años para que el contaminante impacte al pozo es un tiempo favorable que permite tomar en cuenta la aplicación de técnicas de remediación como las biopilas, que por ser un proceso biológico, implica cierto tiempo antes de poder observar resultados importantes.

### **5.1.6. Modelo conceptual de la zona de estudio**

Una parte fundamental de las discusiones de esta tesis es la presentación de un modelo conceptual que integre todos los resultados obtenidos, explicando con las suficientes bases el comportamiento hidrogeológico del medio físico que se está analizando.

De esta manera la Figura 5.30 muestra el modelo conceptual hidrogeológico tomando en cuenta las siguientes consideraciones:

- PAP es un pozo de agua potable que se ubica al NW del punto de fuga, aguas abajo cruzando las vías férreas. Durante el censo llevado a cabo en 2010 se registró una profundidad del nivel estático de 67.9 m (ver Anexo 1) y no se encontró registro estratigráfico de la perforación que permitiera aclarar el comportamiento geológico a dichas profundidades. Por esta razón se tomó un corte litológico del pozo La Venta del Astillero presentado en la sección CC' del proyecto "Estudio de actualización geohidrológica integral de las cuencas Atemajac y Toluquilla" realizado por GEOEX (2004), describiendo la estratigrafía regional a más de 400 m de profundidad. El pozo está ubicado en el poblado que lleva el mismo nombre y a pesar de pertenecer a una cuenca vecina (Atemajac) y no a la de interés (Río Santiago-Guadalajara) el pozo no se encuentra a más de 1 km de distancia de la zona de estudio y resulta válida la descripción geológica regional que muestra. De esta manera, se proyectó dicha descripción y se propuso que PAP cuenta con una geología similar a la del pozo La Venta del Astillero, puntualizando el nivel freático y considerando la diferencia topográfica entre un pozo y otro.

- Con lo mencionado anteriormente e integrando esta información a la obtenida en la descripción de la geología local y el estudio geoeléctrico aplicado, se definió la geología a profundidad y se describe a continuación de cima a base:

**CUBIERTA EDÁFICA:** Es la unidad superficial, formada por suelo residual arenoso color marrón oscuro y abundante materia orgánica, fragmentos de raíces y líticos. En promedio, esta unidad tiene espesores que van de 1 a 2.5 metros.

**CENIZA VOLCÁNICA:** Ceniza volcánica color grisácea y motes marrón claro, compuesta por abundante vidrio volcánico, cristales de cuarzo amorfo y feldespato potásico, fragmentos líticos que van de angulosos a subangulosos con diámetros promedio de 0.5 a 1.5 cm. Se encuentra subyaciendo y aflora en algunas zonas del sitio (al SE del área de estudio). Alcanza un máximo espesor de 10 m.

**TOBA LITOCRISTALINA:** Por debajo de la ceniza se encuentra una toba poco consolidada, color pardo verdoso con fragmentos líticos de 0.5 a 2 cm en promedio, cuarzo microcristalino y fenocristales de minerales ferromagnesianos. Para este trabajo se ha determinado un espesor máximo de 40 m, sugerido por los bajos resistivos obtenidos en el estudio geoelectrico y apoyado por el reporte presentado por GEOEX (2004) en donde se reporta que la toba litocristalina presente en el terreno, asociada regionalmente con la Toba Tala de edad cuaternaria, manifiesta un cambio en el material y conforme la profundidad aumenta el contenido de partículas finas (limos y arcillos) incrementa hasta formarse una toba de textura limoarcillosa.

**TOBA LIMOARCILLOSA:** La geometría del límite superior está definida por los bajos resistivos observados en las partes inferiores de cada SEV realizado. Desde un punto de vista hidrogeológico, al aumentar el contenido de material limoarcilloso, disminuye la capacidad del medio para almacenar y transmitir agua, formando una barrera casi impermeable o acuitardo que restringe la profundidad del acuífero libre somero de baja permeabilidad alojado en la unidad superior de la Toba Tala. Esta unidad tiene un espesor máximo de 50 m.

**RIOLITAS Y PIROCLASTOS DEL GRUPO GUADALAJARA:** A una profundidad aproximada de 80 m se distingue un contacto entre la toba limoarcillosa y una serie de depósitos volcánicos compuestos de una secuencia de rocas volcánicas félsicas e intercalaciones ignimbríticas identificadas por Rossotti et al. (2002). La Riolita Cerro la Tortuga se aprecia en afloramientos ubicados al NW del área de estudio y ya ha sido descrita anteriormente en este trabajo. Estos depósitos tienen una potencia de ~26 m.

**GRUPO RÍO SANTIAGO (BASALTO SAN CRISTÓBAL):** Subyaciendo las riolitas y flujos piroclásticos del Grupo Guadalajara se encuentra una secuencia de basaltos fracturados, andesitas y andesitas basálticas. En la sección EE' se aprecia un espesor mínimo de 74 m, pero en trabajos previos (GEOEX, 2004) se ha determinado una potencia máxima de hasta 800m. Por la aposición estratigráfica que se observa, la parte superior de esta secuencia se correlaciona con la Formación Basalto San Cristóbal del Mioceno medio, descrita en el Capítulo 3 "Entorno Natural".

- Una vez determinada la estratigrafía regional, se puede definir el comportamiento hidráulico de las unidades, formando un acuífero de carácter libre y somero, alojado en la toba litocristalina y limitado por el aumento de material arcilloso en los depósitos tobáceos así como un acuífero confinado profundo (80m) con flujo subterráneo controlado por un medio fracturado (basaltos y andesitas) y desconectado hidráulicamente del acuífero somero. Las propiedades hidráulicas de este acuífero no fueron estudiadas en esta tesis y los únicos datos de permeabilidad y transmisividad disponibles son presentados por IMTA(2007) y GEOEX (2004).

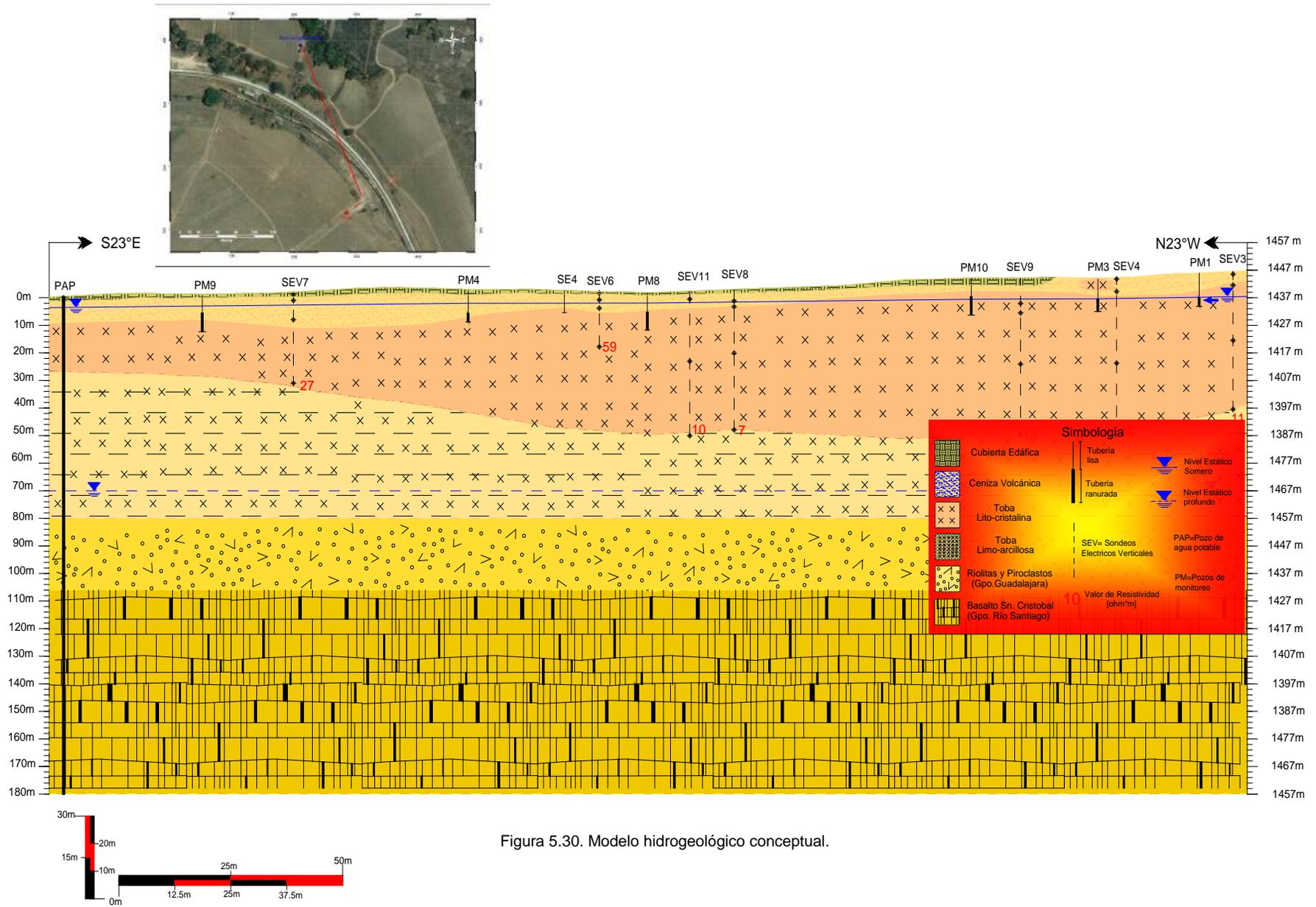


Figura 5.30. Modelo hidrogeológico conceptual.

## **5.2. Propuesta de remediación del sitio contaminado**

Como ya se ha visto a lo largo del desarrollo de la tesis, el contaminante (diesel) presenta una fase libre ubicada en la parte superior del nivel freático, afectando tanto al subsuelo como al acuífero, por ello, para poder realizar una remediación integral, es necesaria la aplicación de tres técnicas de remediación. Sin embargo, como ya se ha mencionado en múltiples ocasiones, el alcance de esta tesis está limitado al tratamiento de la ZNS, es por esta razón que las técnicas para la extracción del LNAPL y el tratamiento del acuífero libre somero solo se mencionarán someramente. Así mismo, se hace referencia a trabajos realizados y a las tecnologías que se pueden implementar, en caso de que se quiera documentar más sobre estos temas.

a) La primera técnica a aplicar se enfoca en el tratamiento de la fase libre, mediante la recuperación del producto con trincheras, pozos de extracción dual (agua y LNAPL) o también llamados pozos WER (Water Enhanced Recovery) y pozos con skimmer (Hernández-Espriú, 2010, Tesis Doctoral y Hernández-Espriú et al, 2010, en prensa).

b) La segunda se trata de la remediación de la zona vadosa. Con el desarrollo de dos pruebas de tratabilidad fue posible comparar las eficiencias de remoción del contaminante por medio de dos técnicas diferentes: (i) Un proceso físico llamado “Lavado de suelos”, el cual involucra los procesos de micelización y disminución de la tensión superficial permitiendo la solubilización del contaminante y favoreciendo su movilidad en el agua. (ii) Un proceso biológico llamado “Biodegradación asistida con surfactantes mediante la construcción de biopilas”, la cual se basa en la capacidad de los microorganismos residentes en el suelo para poder biodegradar los compuestos orgánicos producto de la contaminación por hidrocarburos, ayudados por la adición de dosis muy bajas (2, 20 y 200 mg/L) de diferentes tipos de surfactantes.

En el proceso del lavado las máximas remociones fueron, como ya se dijo, alcanzadas por el surfactante iónico Maranyl LAB, con 78.51% de remoción y los surfactantes naturales alcanzaron eficiencias del 55%. Sin embargo en el proceso de biodegradación las máximas tasas de remoción se lograron con la asistencia de los biosurfactantes goma de guar y goma de algarrobo, alcanzando un promedio del 85%.

Debido a la complejidad, las eficiencias de remoción y los análisis costo-efectivos de cada método (se presentan a detalle en el siguiente apartado), se seleccionó como mejor candidato al proceso de biodegradación asistida por medio de la construcción de biopilas.

Las referencias usadas como apoyo para el diseño del sistema de biopilas fueron: Fanhestock et al., (1998), Iturbe et al., (2004) e Iturbe et al., (2008).

c) Remediación del acuífero: por medio de pozos de recuperación mejorada de agua (Water enhanced recovery) y dado que ha sido comprobado el proceso de biodegradación, se podría proponer una técnica de remediación pasiva como la atenuación natural, diseñando detalladamente el programa de monitoreo y realizando previamente un análisis de riesgo a la salud (Hernández-Espriú, 2010, Tesis Doctoral).

### **5.2.1. Aspectos técnicos y logísticos de las técnicas de remediación aplicadas**

#### RECUPERACIÓN DE FASE LIBRE Y EXTRACCIÓN Y TRATAMIENTO DE AGUA CONTAMINADA

El primer paso para iniciar la remediación del sitio contaminado consiste, sin duda, en la extracción del LNAPL presente, ya que éste representa el foco de contaminación del acuífero somero y en menor grado de la zona vadosa. Actualmente existen múltiples tecnologías de recuperación de producto libre cuyo funcionamiento y eficiencia en la recuperación depende esencialmente de las características geológicas e hidrogeológicas del sitio.

Las trincheras por ejemplo, son excavaciones que llegan a la profundidad en donde se encuentra la fase libre, buscando un aumento en el gradiente hidráulico que permita una mayor fluidez del contaminante generando una laguna de acumulación de donde puede ser extraído y almacenado por medio de bombas. Charbeneau (2003) define la tasa de recuperación de LNAPL si se construye una trinchera del ancho de la pluma y perpendicular al flujo de agua subterránea. Adicionalmente Hernández-Espriú (2010) plantea dos escenarios posibles para la construcción de la trinchera:

- a) Construir una trinchera gradiente abajo, justo en los límites establecidos para la pluma de LNAPL,
- b) Construir una trinchera cruzando la pluma de LNAPL.

Adicionalmente se muestra un análisis de sensibilidad que pronostica el volumen recuperable y establece que en ambos modelos la recuperación de producto está condicionada por el caudal de agua subterránea que se descarga en la trinchera.

Por otro lado la construcción de pozos con tecnologías que hagan más eficiente la recuperación de producto libre ha sido analizada ampliamente por autores como Charbeneau (1995, 2000, 2007) Miller (1996) y se han descrito a detalle estas metodologías en reportes técnicos realizados para la Fuerza Naval Norteamericana (Batelle 1997, 2003).

Tomando en cuenta que con la instauración de pozos bifásicos (extracción de producto libre y agua contaminada) se puede iniciar el tratamiento de la contaminación presente en el acuífero, además de que este tipo de extracción implica un mejoramiento en el caudal que se puede extraer (factor de suma importancia ya que el acuífero de estudio manifiesta baja conductividad hidráulica y poca transmividad) (Hernández-Espriú, 2010) por lo que esta técnica resulta prometedora. La Figura 5.31 esquematiza el funcionamiento de la técnica de pozos de recuperación mejorada (WER- Water Enhanced Recovery).

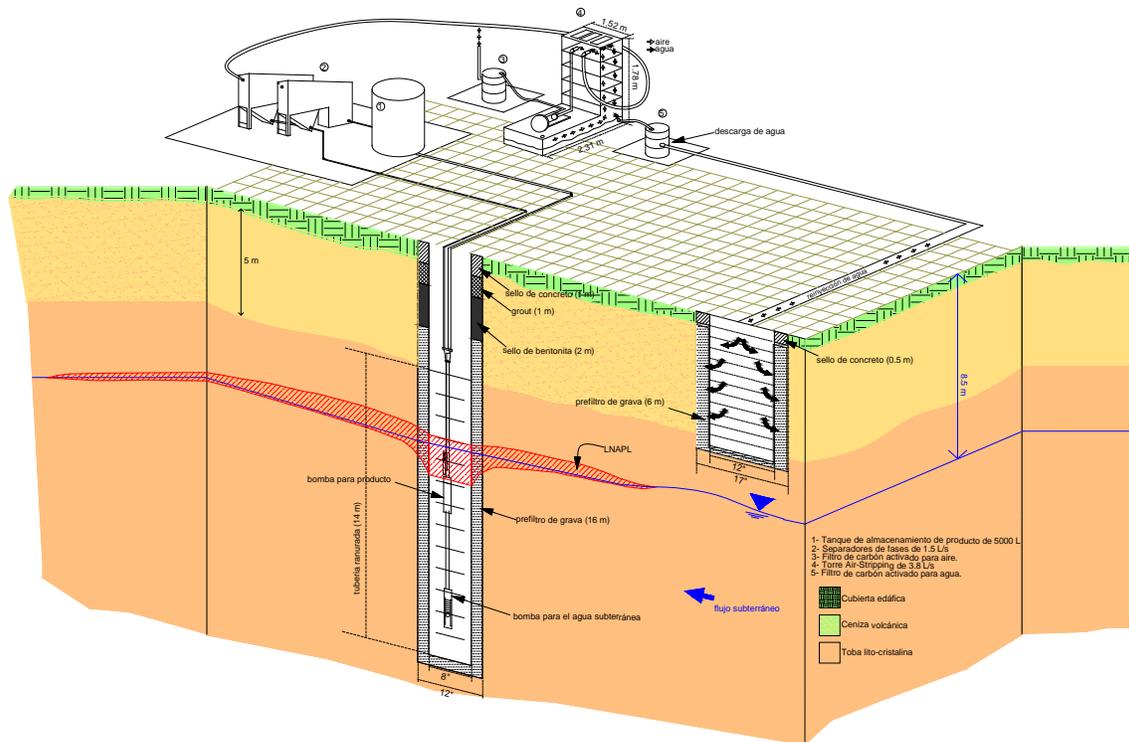


Figura 5.31. Diagrama constructivo de un pozo WER

## TRATAMIENTO DEL SUELO CONTAMINADO CON BIODEGRADACIÓN ASISTIDA CON SURFACTANTES (BIOPILAS)

La metodología a seguir para la construcción de las biopilas se resume en los siguientes puntos:

1. Selección y preparación del sitio,
2. Especificación de las dimensiones y el número de biopilas a construir,
3. Construcción de la base para las biopilas,
4. Excavación y preparación del suelo contaminado,
5. Instauración del sistema de aireación,
6. Adición de nutrientes,
7. Adición de humedad,
8. Adición de surfactante,
9. Plan de muestreo para el monitoreo de las biopilas.

### 1. Selección y preparación del sitio.

Para seleccionar adecuadamente el sitio de las biopilas, se debe considerar lo siguiente: el sitio debe ser de fácil acceso, debe tener acceso a los servicios públicos (energía eléctrica, agua, vías de comunicación), se debe ubicar en terreno más o menos llano y firme, debe ser seguro, lo más cercano posible a la fuente de suelo contaminado y no se puede ubicar dentro de una zona residencial, se deben acondicionar caminos para facilitar el traslado del suelo contaminado con camiones de carga, así como para optimizar la movilidad y desplazamiento de la maquinaria.

El sitio seleccionado cubre con la mayoría de los aspectos: se encuentra en una zona más a o menos llana, esta ubicada a no más de 140 m del sitio contaminado, las líneas de tensión eléctrica atraviesan la zona, a ~200 m se encuentra un pozo de extracción de agua potable el cual abastecerá el agua necesaria, los caminos existentes requieren acondicionamiento mínimo para que la maquinaria pueda transitar con mayor facilidad. La Figura 5.32 muestra el lugar seleccionado, señalando los puntos que favorecieron a la selección del sitio.

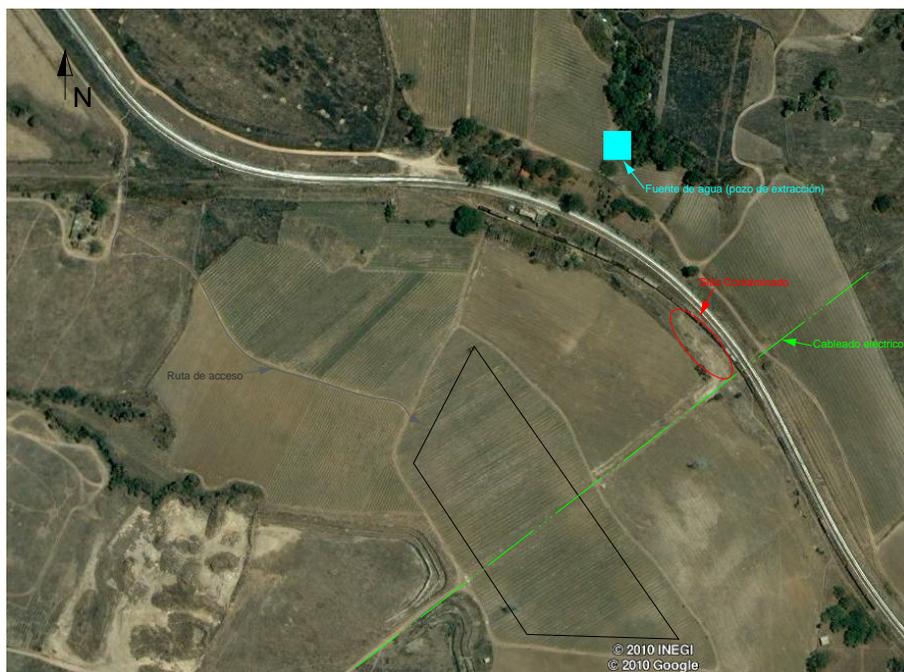


Figura 5.32. Ubicación del sitio para las biopilas.

### 2. Especificación de las dimensiones y el número de biopilas a construir.

Las dimensiones y el número de biopilas que se van a construir esta en función del volumen total de suelo contaminado y del área disponible para trabajar.

En total se van a tratar 17941 m<sup>3</sup> de suelo (48585.7 Ton), y se ha planteado la opción de indemnizar un área aproximada de 4.2 hectáreas para llevar a cabo el trabajo, incluyendo el área de construcción de las biopilas y la zona de preparación de suelos.

La metodología para calcular las dimensiones consiste en asumir el largo y la altura de la biopila, pueden variar según la cantidad de suelo a remediar y el área disponible para trabajar, sin embargo Fahnestock (1998) e Iturbe (2008) han reportado pilas de hasta 60 m de largo y 2.5m de altura.

Las biopilas se construirán teniendo como base geométrica un prismoide (Figura 5.33)

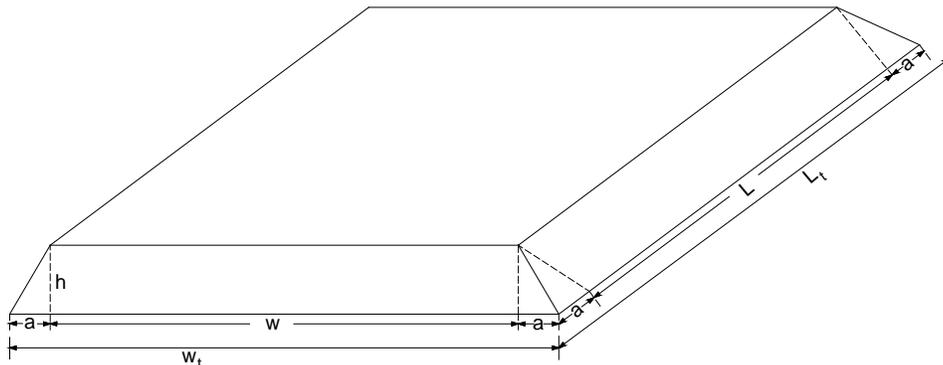


Figura 5.33. Diagrama esquemático de una biopila.  $W_t$ : ancho total ( $W+2a$ );  $W$ : ancho de la pila;  $L_t$ : largo total ( $L+2a$ );  $L$ : largo de la biopila;  $h$ : altura;  $a$ : largo adicional tomando en cuenta la pendiente de las paredes.

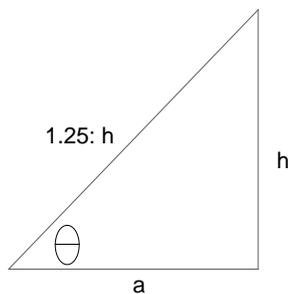
En donde:

$L$ = largo de la biopila [ $L$ ],

$W$ = ancho de la biopila[m],

$a$ = largo adicional tomando en cuenta la pendiente de las paredes de la biopila [m]. Es importante resaltar que el largo total ( $L_t$ ) y el ancho total ( $W_t$ ) corresponden a  $L+2a$  y  $W+2a$ , respectivamente.

Para calcular “a” se asume que los lados de las biopilas presentan una cierta pendiente, la cual se recomienda que sea de 1.25:1 (Fahnestock, 1998). Esto es:



$$\sin(\theta) = \frac{h}{1.25h} = 0.8 \text{ --- (5.44)}$$

$$\theta = 53.13^\circ$$

$$\tan(\theta) = \frac{h}{a} = \frac{2.5}{a} \text{ --- (5.45)}$$

$$a = \frac{2.5}{\tan(53.13)} = 1.875$$

Se planteó una longitud total ( $L_t$ ) de 50 m, altura de 2.5 m y un ángulo de pendiente de las paredes de 53.13°. Por lo tanto,  $L$  se obtiene restando el valor de “2a” a los 50 m que se consideraron de largo total:

$$L = L_t - 2a = 50m - 2(1.875m) = 46.25 \text{ --- (5.46)}$$

Se propone la construcción de 7 pilas, cada una tratará 2563 m<sup>3</sup> de suelo contaminado. De la fórmula para calcular el volumen de un prismoide se tiene que:

$$V = \frac{1}{6}h(A_{bi} + 4M + A_{bs}) \text{---(5.47)}$$

En donde:

V= volumen de la pila [m<sup>3</sup>],

h=altura total de la pila [m],

A<sub>bi</sub>= área de la base inferior [m<sup>2</sup>],

A<sub>bs</sub>= área de la base superior [m<sup>2</sup>],

M= área de la mitad de la sección de la biopila [m<sup>2</sup>].

Calculando el área de la base inferior y de la base superior se tiene que:

$$A_{bi} = (L + 2a)(W + 2a)$$

$$A_{bs} = (L \cdot w)$$

$$M = a^2$$

$$V = h(LW + aW + aL + 1.33a^2)$$

$$W = \left[ \frac{V}{h} - (aL + 1.33a^2) \right] (L + a)$$

Por lo tanto el ancho (W) de la biopila es de 19.4 m y un ancho total (W<sub>t</sub>) de 23.2 m.

La Figura 5.34 muestra las dimensiones propuestas. Se construirán 7 pilas y cada una será capaz de tratar 2563 m<sup>3</sup> de suelo, la ubicación de cada una en el terreno se puede ver en la Figura 5.35.

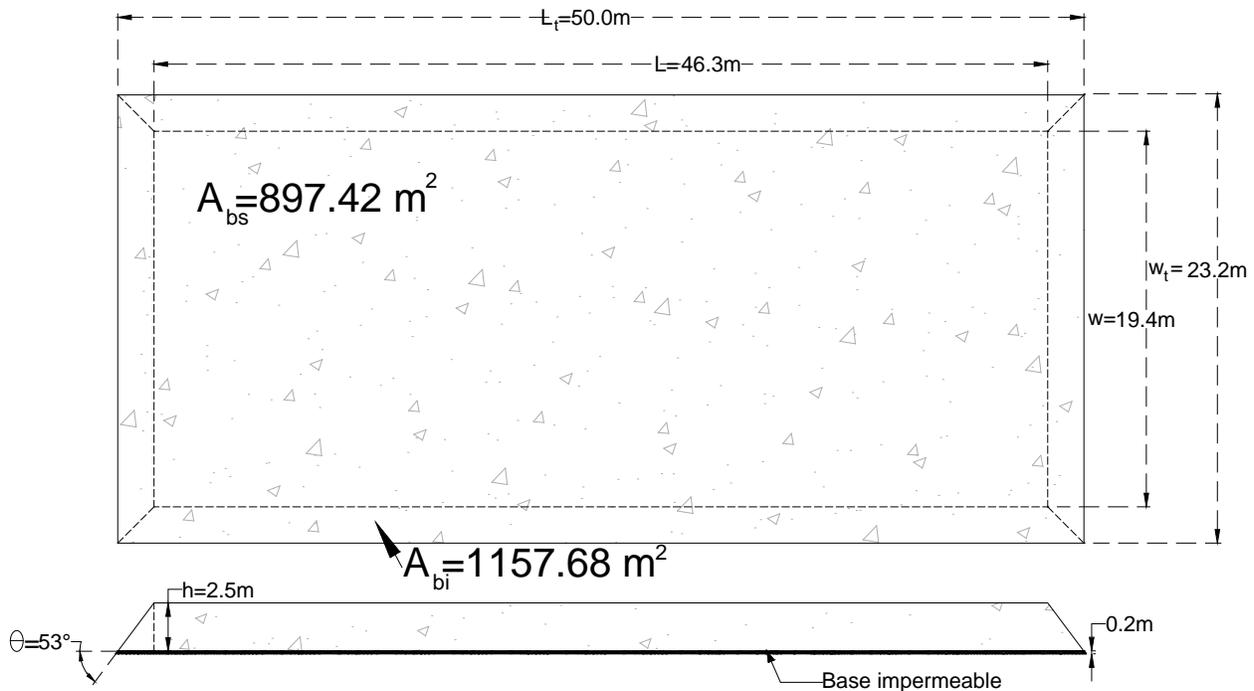


Figura 5.34. Dimensiones de la biopila. A<sub>bs</sub>= área de la base superior; A<sub>bi</sub>= área de la base inferior; L<sub>t</sub>= largo total de la biopila; L= largo de la base superior; W<sub>t</sub>= ancho total de la biopila; W= ancho de la base superior; h= altura; θ= pendiente.

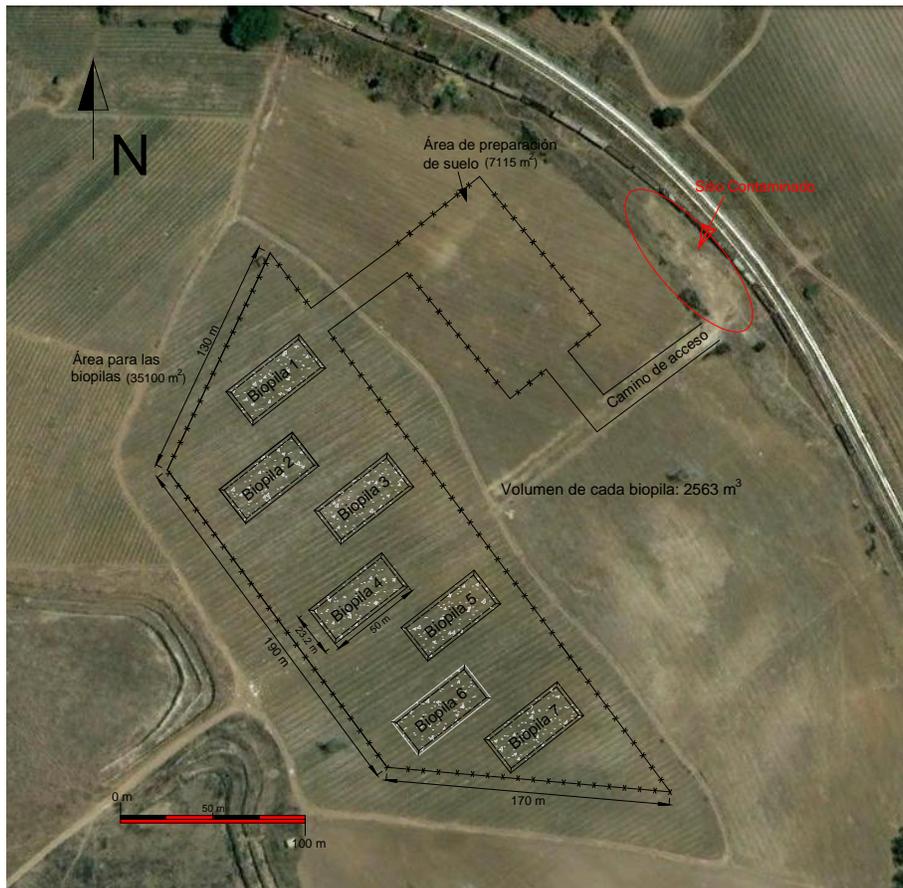


Figura 5.35. Diagrama de la ubicación de las 7 biopilas propuestas y del área de preparación del suelo.

Adicional a la zona de construcción de las 7 biopilas, se requiere de un área para la preparación del suelo de 7115 m<sup>2</sup>, que sumándola al área de biopilas se obtienen las 4.2 hectáreas indemnizadas.

### 3. Construcción de la base para las biopilas

La base de cada biopila consiste en una geomembrana impermeable, una capa de 15 a 20 cm de suelo arcilloso y limpio. Una vez trazado el polígono de la biopila en el terreno y colocada una berma que rodee el área con material metálico (vigas) o madera, se coloca la geomembrana, la cual es normalmente un material plástico grueso de polietileno de alta densidad (HDPE, por sus siglas en inglés) y debe ser lo suficientemente larga como para cubrir en su totalidad el área que ocupará la pila. Arriba de la geomembrana se coloca una capa de suelo arcilloso limpio de aproximadamente 15 cm, la cual sirve para protegerla durante el apilamiento del suelo, esta base de suelo limpio debe ser compactada para evitar interrupciones en las corrientes de aire y filtraciones de agua.

### 4. Excavación y preparación del suelo contaminado

Ya construidos los caminos, el área de preparación de suelo y los espacios destinados para cada biopila, se procede a la extracción del suelo contaminado. Una vez extraído es transportado a la zona de preparación de suelo para ser mezclada y tamizada con maquinaria desarrollada para tal propósito. Construida la base de cada biopila y ya preparado el suelo, será transportado por

cargadores frontales al área destinada para cada pila y se irán poniendo capas de 30 cm de suelo hasta alcanzar los 2.50 m de altura.

### 5. Instauración del sistema de aireación

Según trabajos previos, se ha demostrado que es posible inyectar o succionar aire a través de la biopila por medio de una bomba. Sin embargo, el sistema de aireación propuesto se basará en la inyección de aire, ya que no se instalará un sistema de lixiviados ni se estará trabajando con un medio físico que genere una exhaustiva cantidad de gases. Los principales componentes de este sistema son: bombas de aireación, colectores de aire conectados a las bombas, válvulas y tubería de pvc ciega y ranurada. Las figuras 5.36 y 5.37 muestran el diseño final del sistema.

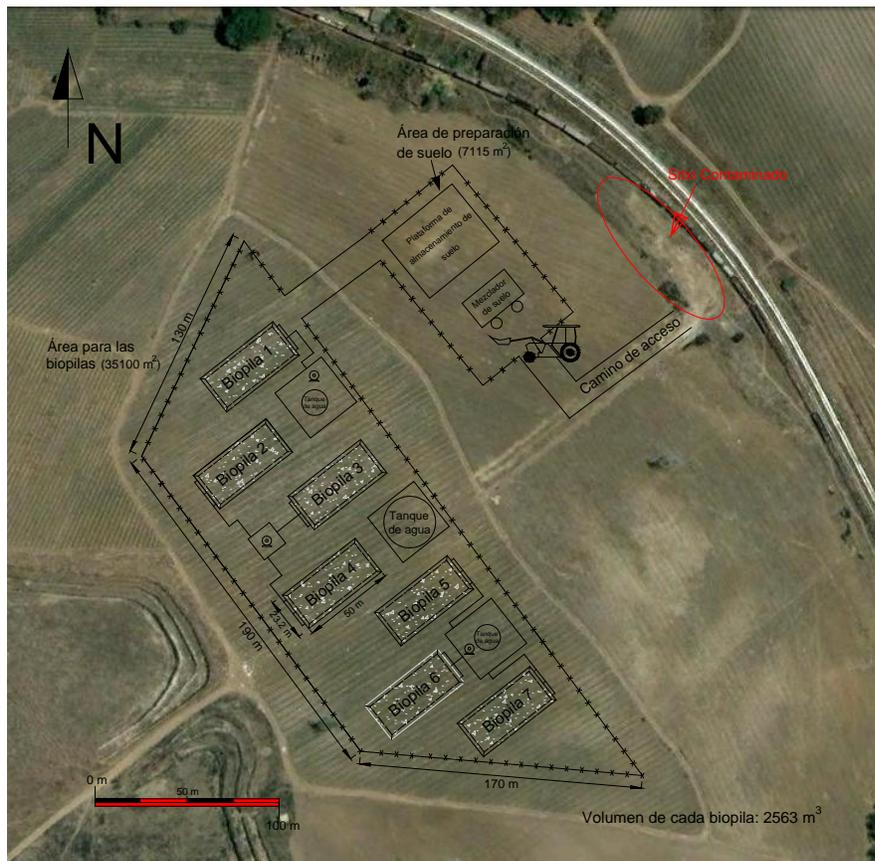


Figura 5.36. Sistema de aireación de las 7 biopilas, visto en planta. Adicionalmente se muestra la ubicación de tanques de agua para el sistema de adición de humedad, el cual se explica más adelante.

El sistema de aireación consiste básicamente en una bomba de 10 hp que se encarga de suministrar aire a la biopila por medio de una conexión de tuberías dispuestas en dos niveles a diferente elevación (30 cm y 120 cm) con tres líneas de flujo cada uno. Cada línea esta formada por 6m de tubería ciega al inicio de la biopila y 40 m de tubería ranurada que permite la filtración del aire al suelo apilado (Figura 5.37) y tienen una separación de 5.8 m entre sí, teniendo como base principal para su ubicación la línea central de la biopila. La tubería ranurada descansa sobre un canal de grava que evita que el material fino obstruya las ranuras de la tubería.

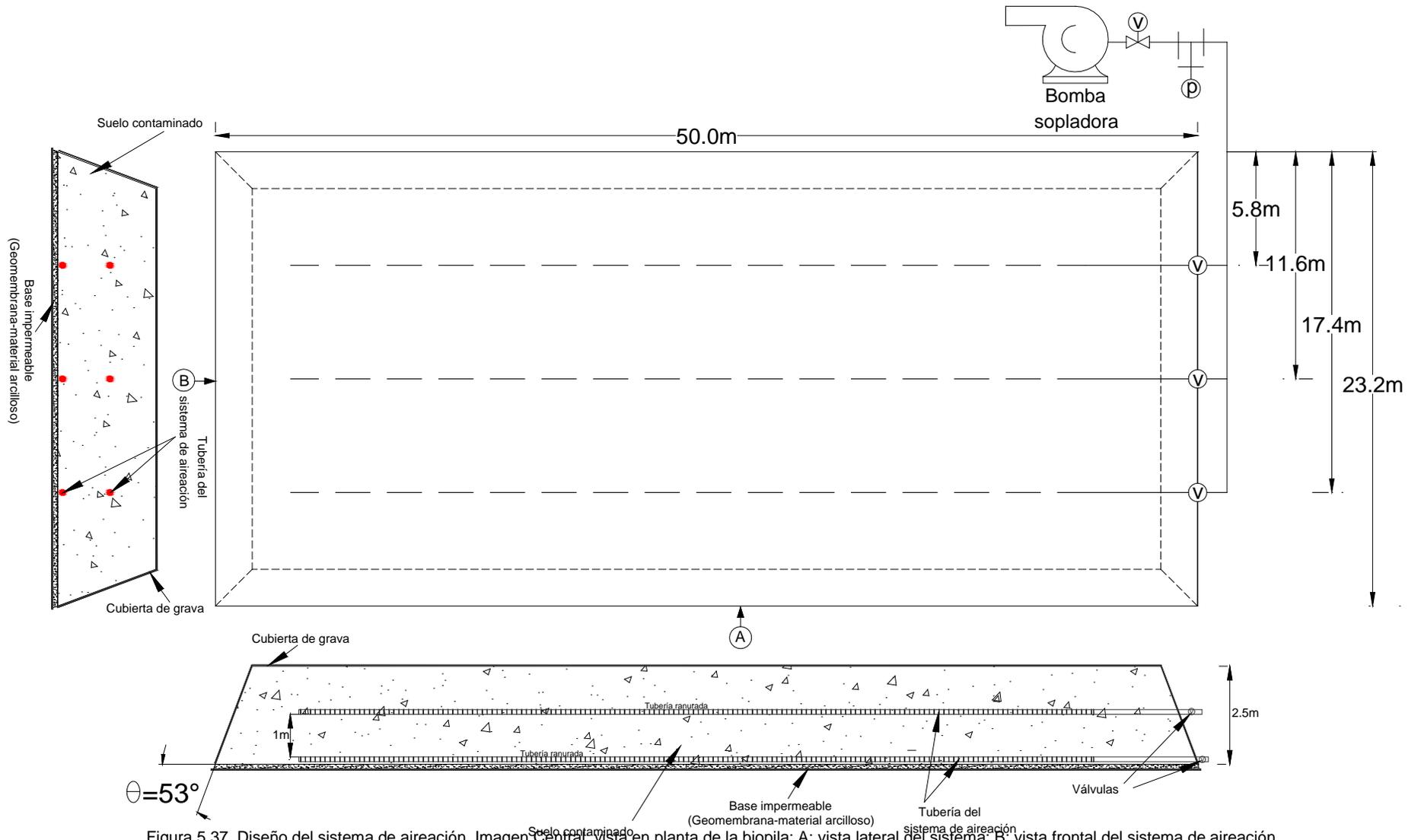


Figura 5.37. Diseño del sistema de aireación. Imagen Central: vista en planta de la biopila; A: vista lateral del sistema; B: vista frontal del sistema de aireación.

## 6. Adición de nutrientes

Como ya se ha demostrado con las pruebas de tratabilidad desarrolladas, la relación de nutrientes de 100/15/0.028 de C/N/P es adecuada para llevar a cabo una buena tasa de biodegradación. Por lo que de los análisis realizados al suelo se concluye que no es necesaria la adición de fósforo y el único nutriente que se agregará será nitrógeno, usando como fuente sulfato de amonio. La forma de agregarlo será por medio de aspersores, los cuales rociarán la biopila con una solución de sulfato de amonio en tres periodos diferentes, al llegar a una altura de 60 cm, 150 cm y al alcanzar los 250 cm de altura final de la biopila.

La cantidad de surfactante a adicionar se obtuvo con ayuda de una hoja de cálculo que se presenta desarrollada a detalle en el Anexo 4, a continuación se muestra un breve resumen de la metodología que se siguió:

Volumen total de suelo a tratar: 17941 m<sup>3</sup>,  
 Masa total de suelo a tratar: 48585.7 Ton,  
 Concentración inicial de TPH's: 32000 mg/kg,  
 Carbono orgánico total: 25600 mg/kg,

De la relación propuesta 100/15/0.028 de C/N/P se sabe que se tienen 25600 mg/kg de carbono, por lo tanto se requieren 3840 mg/kg de nitrógeno y 7.35 mg/kg de fósforo. Por los resultados de la caracterización del suelo se sabe que hay presente 391.43 mg/kg de N y 7.38 mg/kg de P, por lo tanto el fósforo disponible es suficiente, pero hay un déficit de nitrógeno de 3448.5 mg/kg.

Tomando en cuenta la masa total de suelo a tratar se calcula que la cantidad de N requerido es de 68.4 Ton. El porcentaje de N en el sulfato de amonio es de ~21 %, por lo que se necesitarán 790 Ton de (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Para cada biopila se ocuparán ~113 Ton y serán adicionadas en tres capas diferentes, como ya se mencionó.

## 7. Adición de humedad

La humedad es un factor crucial para el éxito de la biopila, algunos autores (e.g. Fahnestock, 1998) recomiendan mantener de 70 a 95 % de la capacidad de campo. El suelo en cuestión presenta una capacidad de campo de 26%, y una humedad inicial de 7.63%, por lo que se requiere la adición de una gran cantidad de agua para alcanzar el 95 % establecido. Sin embargo, de las pruebas de tratabilidad se obtuvieron humedades finales de 11% en promedio, garantizando que el sistema funciona con una humedad del 42.3% de la capacidad de campo, ofreciendo un factor de seguridad muy grande que garantiza que el sistema no generará lixiviados y se descarta la instauración de un sistema de recolección. La fuente de agua será el pozo de abastecimiento ubicado al NNW del sitio contaminado y será agregado a la pila por medio de aspersores que la rociarán desde la parte superior.

Este sistema de irrigación con aspersores, colocado una vez terminada la biopila tiene las siguientes ventajas:

- Es un método conveniente y efectivo para adicionar agua a la biopila incluso una vez cubierta con la capa de grava que evitará la erosión del material,
- Los bajos caudales con los que se irriga el suelo minimizan el escurrimiento del agua fuera de la biopila y a su vez evitan la formación de lagunas,
- El sistema puede operar sin supervisión.

Las desventajas que presenta este sistema son:

- El costo inicial para la instalación del sistema es un monto que no se tendría si se decidiera adicionar el agua al momento de preparar el suelo,
- Se requiere de cierto tiempo para la instalación,
- Los aspersores se pueden romper y rociar excesivamente a la biopila formando lagunas y generando lixiviados.

Sin embargo se pueden tomar las siguientes medidas para minimizar los posibles problemas provocados por las desventajas del sistema:

El tiempo de instalación puede traslaparse con el tiempo que se requiera para la construcción de las biopilas, instalando el sistema cada que se termine una pila y mientras esta en construcción la otra. Para evitar una excesiva adición de agua debido a la ruptura de algún aspersor o tubería se propone un plan de monitoreo de las instalaciones que permita verificar las condiciones de cada sistema que se encuentre trabajando.

Para el cálculo de la humedad se llevaron a cabo dos metodologías diferentes. (a) Basada en el “Manual de diseño, operación y mantenimiento” de Fahnestock y (b) Es una metodología propuesta para este trabajo. A continuación se muestra una breve descripción de las dos metodologías, y en el Anexo 2 se muestra a detalle la referencia bibliográfica.

a) Del escenario planteado se sabe que el suelo contiene una humedad de 7.63% y que es el 29.3% de la capacidad de campo, por lo tanto la humedad objetivo es de 11 % y es necesario adicionar un 3.3% de humedad para lograr el 42 % de la capacidad de campo.

Antes de adicionar agua se asume que 1 kg de suelo contiene 0.076 kg de agua y se quiere que 1kg de suelo contenga 0.11 kg de agua. Por lo tanto se debe adicionar agua suficiente para alcanzar la cantidad de H<sub>2</sub>O objetivo.

En 1 kg de suelo al 11% de humedad hay 0.89 kg de suelo seco. A 7.6% de humedad, la masa total de suelo que contiene 0.89 kg de suelo seco sería 0.815 kg. Para lograr 1 kg de suelo a 11 % de humedad se deben agregar 0.0763 kg de agua a cada 0.963 Kg de suelo con 7.6% de humedad. Por lo tanto se necesita 0.079 kg de agua a cada kilogramo de suelo.

Tomando en cuenta la masa total de suelo (48586 Ton) se concluye que el agua necesaria para alcanzar la humedad planteada es de 3848 m<sup>3</sup> de agua, esto es 550 m<sup>3</sup> por cada biopila.

b) La metodología propuesta para este trabajo, parte de la misma suposición de que al inicio, 1 kg de suelo con una humedad de 7.63% tiene 0.924 kg de suelo seco y 0.076 kg de agua. Si la humedad objetivo es de 11 %, cada kg de suelo debe de contener 0.11 kg de agua, por lo tanto, a cada kg de suelo original le hace falta 0.033 kg de agua, cantidad que multiplicada por las 48586 Ton de suelo resulta de 1590 m<sup>3</sup> de agua.

Se concluye que las dos cifras finales obtenidas difieren, sin embargo, es posible establecer un rango que va de 1600 a 3800 m<sup>3</sup> de agua necesaria para el sistema.

La Figura 5.38 muestra un diagrama esquemático del sistema de humectación de la biopila.



Figura 5.38. Sistema de adición de agua. Las líneas en azul indican las líneas de conducción de agua que ayudarán a la irrigación de las biopilas.

### 8. Adición de surfactante

La selección del surfactante adecuada para asistir al sistema de biodegradación resulta muy importante para evitar que se introduzca al medio una sustancia que en lugar de ser benéfica resulte contraproducente y disminuya la eficiencia de la actividad degradatoria de los microorganismos.

De las pruebas de tratabilidad, se concluyó que el biosurfactante Goma de Guar a una dosis de 2 mg/kg es el mejor candidato, sus propiedades físicas y químicas se describen a detalle en el Anexo 3.

Con la siguiente ecuación es posible determinar la cantidad de surfactante:

$$S(\text{kg}) = \left( \frac{\text{Dosis suelo}[\text{Ton}]}{1000000} \right) \text{---} (5.48)$$

En donde:

S= cantidad de surfactante [kg].

$$\text{Por lo tanto: } S(\text{kg}) = \left( \frac{2\text{mg/kg} \cdot (485857[\text{ton}])}{1000000} \right) = 97.17 \text{ kg}$$

La cantidad total de surfactante necesaria es de 97.17 kg.

9. Plan de muestreo para el monitoreo de las biopilas.

Ya terminadas las biopilas, es necesario realizar un plan de muestreo mensual para verificar que el sistema esta obteniendo los resultados estimados. Se ha programado un plan de muestreo que consiste en la toma de 15 muestras de suelo mensuales por cada biopila. La Figura 5.39 ilustra la ubicación óptima de cada punto de muestreo.

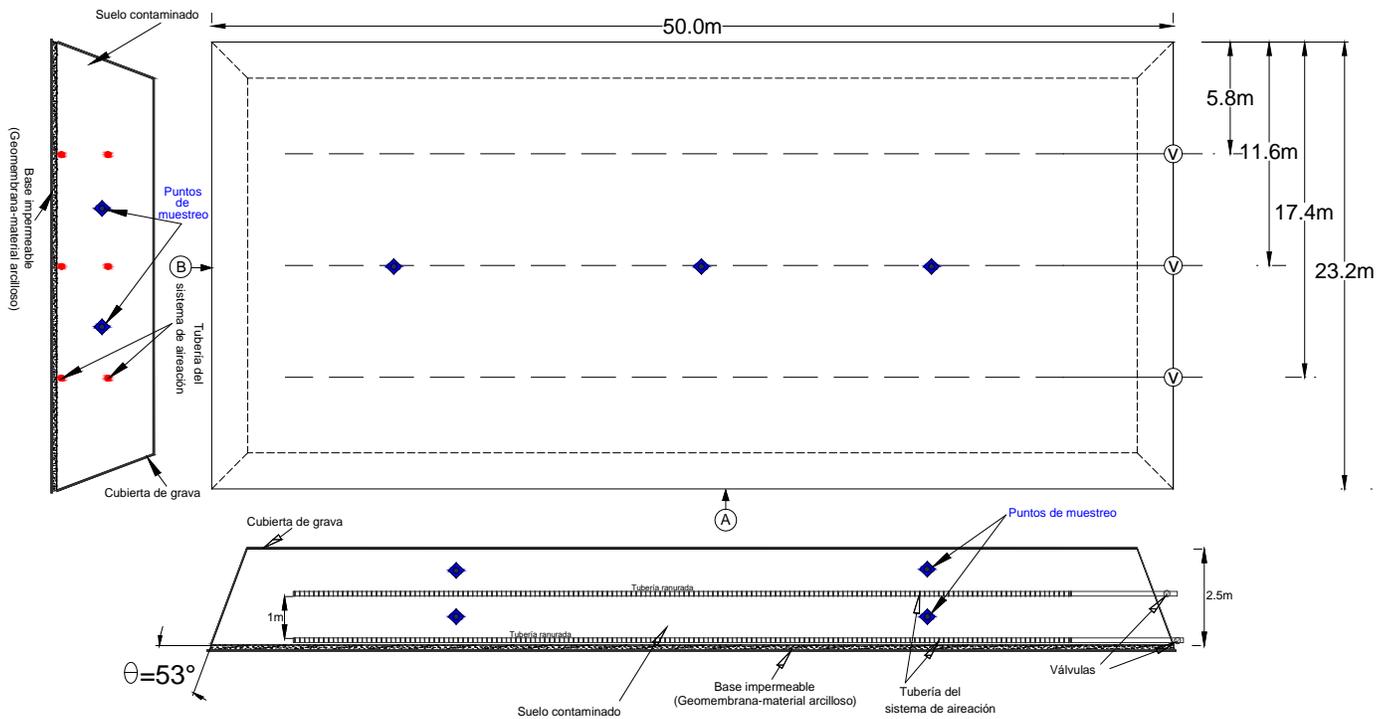


Figura 5.39. Puntos de muestreo de cada biopila.

**5.2.2. Aspectos económicos**

**BIODEGRADACIÓN ASISTIDA CON SURFACTANTES (BIOPILAS)**

El costo total del sistema de biopilas se divide en dos partes principales, la inversión inicial y el costo por operación y mantenimiento mensual, calculado para 4 meses de funcionamiento. La tabla describe a detalle cada rubro considerado para la instauración del sistema.

CONCEPTO	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD	PU (MN)	SUBTOTAL
<b>INVERSIÓN INICIAL</b>					
<b>Acondicionamiento del terreno en la zona de las biopilas (limpieza, trazo y aplanado del terreno) -10 días-</b>					
Cargador frontal BOBCAT (2 eq.)	Aplanado del terreno	20	Día	\$4,000.00	\$80,000.00
Acondicionamiento de detalle	Ayudante (2)	20	Día	\$600.00	\$12,000.00
Topografía del terreno	Ing. Topógrafo	10	Día	\$700.00	\$7,000.00
Informe topográfico	Informe topografía del terreno	1	Informe	\$15,500.00	\$15,500.00
Material diverso	Material diverso	1	Lote	\$10,000.00	\$10,000.00

Supervisión proyecto	Hidrogeólogo	5	Día	\$1,080.00	\$5,400.00	
				<i>Suma</i>	\$129,900.00	
<b>Excavación, mezclado y tamizado del suelo contaminado -10 días-</b>						
Retroexcavadora (2 eq.)	Excavación de suelo contaminado	16	Día	\$6,000.00	\$96,000.00	
Camiones de carga	Traslado del suelo cont. al sitio de PS	1	Lote	\$80,000.00	\$80,000.00	
Mezcladora	Mezcla de suelo contaminado	10	Día	\$4,000.00	\$40,000.00	
Tamizado en campo	Tamizado de suelo contaminado	1	Tamiz	\$15,500.00	\$15,500.00	
Geotecnista de excavación	Geotecnista de excavación	10	Día	\$1,080.00	\$10,800.00	
Informe geotécnico	Informe geotécnico	1	Informe	\$17,500.00	\$17,500.00	
Supervisión proyecto	Hidrogeólogo	10	Día	\$1,080.00	\$10,800.00	
				<i>Suma</i>	\$270,600.00	
<b>Equipamiento, materiales y consumibles</b>						
Geomembrana	Geomembrana calibre 1000	8120	m <sup>2</sup>	\$170.00	\$1,380,400.00	
Material para la base	Suelo arcilloso fino y limpio	812	m <sup>3</sup>	\$900.00	\$730,800.00	
Surfactante para biod. Asistida	Biosurfactante Goma de guar	120	kg	\$40.00	\$4,800.00	
Sulfato de amonio	Nutriente (fuente de nitrógeno)	790	Ton	\$2,460.00	\$1,943,400.00	
Agua	Agua para humedad en las biopilas	3500	m <sup>3</sup>	\$10.00	\$35,000.00	
Compresor/Bomba de vacío	Compresor para aireación, 10 hp	3	Compresor	\$54,000.00	\$162,000.00	
Bomba de agua	Bomba transferencia de agua, 5 hp	3	Bomba	\$12,150.00	\$36,450.00	
Tanque de agua	Tanque de agua (10,000 L)	3	Tanque	\$7,500.00	\$22,500.00	
Aireación tub. PVC ran., 2 pulg	40 m x 3 líneas x 2 niveles = 240 m/BP	1680	Metro	\$105.00	\$176,400.00	
Aireación tub. PVC ciego., 2 pulg	6 m x 3 líneas x 2 niveles = 36 m/BP	252	Metro	\$55.00	\$13,860.00	
Riego tub. PVC, ciego, 2 pulg	350 m/BP	2450	Metro	\$55.00	\$134,750.00	
Juego de asperores y válvulas	Juego de asperores y válvulas	1	Lote	\$33,750.00	\$33,750.00	
Grava para protección de BP	Grava para protección de BP	14	m <sup>3</sup>	\$800.00	\$11,200.00	
				<i>Suma</i>	\$4,685,310.00	
<b>Construcción de las biopilas -20 días-</b>						
Cargador frontal BOBCAT	Construcción biopila	20	Día	\$4,000.00	\$80,000.00	
Camiones de carga	Camiones de carga	1	Lote	\$41,000.00	\$41,000.00	
Mano de obra	3 trabajadores/BP	420	Día	\$250.00	\$105,000.00	
Equipo de seguridad	Equipo de seguridad	21	Equipo	\$1,200.00	\$25,200.00	
Herramientas de mano	Herramientas de mano	7	Herr/BP	\$12,500.00	\$87,500.00	
Supervisión proyecto	Hidrogeólogo	20	Día	\$1,080.00	\$21,600.00	
				<i>Suma</i>	\$360,300.00	
<b>Ingeniería, administración, permisos y contingencias (20%)</b>						
Ingeniería., admón., contingen.	Estudios, admon y contingencias	1	Lote	\$1,089,222	\$1,089,222	
				<i>Suma</i>	\$1,089,222	
					<b><i>Inversión Inicial Total</i></b>	<b>\$6,535,332</b>
<b>OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO MENSUAL</b>						
Energía eléctrica (35 kwatt)	648 horas/mes (90% del mes)	22680	kwatt-hr	\$1.22	\$27,556	
Mano de obra	5 Trabajadores, 25 días/mes	125	Día	\$250.00	\$31,250.00	
Supervisión	Hidrogeólogo de Proyecto	21	Día	\$1,080.00	\$22,680.00	
Consumibles	Consumibles diversos	1	Lote	\$40,000.00	\$40,000.00	
Muestreo de verificación	15 muestreos*BP/mes	105	Análisis	\$2,000.00	\$210,000.00	
Reporte	1 reporte mensual	1	Reporte	\$21,000.00	\$21,000.00	
Adicionales (7%)	Gastos adicionales	1	Lote	15,200.00	\$15,200.00	
Administración (3%)	Admon. y aspectos legales del proyecto	1	Lote	5,300.00	\$5,300.00	
					<i>Operación y Mantenimiento Mensual</i>	\$372,986
					<b><i>Operación y Mantenimiento por 4 meses</i></b>	<b>\$1,491,945</b>
					<b><i>INVERSIÓN INICIAL Y 4 MESES DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO</i></b>	<b>\$8,027,277</b>
					<b><i>VOLUMEN DE SUELO CONTAMINADO (m<sup>3</sup>)</i></b>	<b>17996</b>
					<b><i>COSTO POR m<sup>3</sup> TRATADO</i></b>	<b>\$446</b>

Tabla 5.3. Análisis económico del sistema de biopilas propuesto.

Como se muestra en la tabla 5.3, para poder estimar el costo que implica la implementación de 7 biopilas para dar tratamiento a un volumen total de suelo contaminado de 17,941 m<sup>3</sup> o bien 48,585.7 Ton (tomando una densidad de 2.7 gr/cm<sup>3</sup> para el suelo), es necesario tomar en cuenta dos partes importantes: (1) la inversión inicial, que incluye el acondicionamiento del terreno en donde serán construidas las biopilas, la excavación y preparación del suelo a tratar, la adquisición de equipo, material y consumibles como surfactantes, nutrientes para el suelo y el agua que se ocupará en el sistema de riego; (2) costos de operación, mantenimiento y monitoreo estimado para 4 meses de actividad.

Es importante mencionar que para el tratamiento del sitio se requiere indemnizar, como ya se mencionó anteriormente, 4.2 hectáreas de terreno en donde se realizaran las actividades de remediación, sin embargo el costo adicional que implica este proceso no se ha tomado en cuenta en la cotización aquí presentada.

Se calcula un costo en la inversión inicial de \$6,535,332 pesos, siendo este rubro el mayor gasto económico dentro del proceso. De esta inversión inicial, el 71% del monto total se deriva de la adquisición de materiales y consumibles. El costo de la geomembrana representa un factor importante así como la compra de 790 Ton de sulfato de amonio necesario para acondicionar el suelo. El costo para adquirir 120 kg de surfactante requeridos resulta ser un gasto insignificante (\$4,800 pesos), debido a las bajas dosis (2 mg/kg) necesarias para optimizar el sistema. Si en lugar de haber usado el biosurfactante goma de guar (definido como mejor candidato por las pruebas de tratabilidad realizadas) en el mejoramiento del proceso biodegradatorio se hubiera empleado algún surfactante sintético como, por ejemplo, Maranil LAB con una dosis de 20 mg/kg (por tener la máxima eficiencia a nivel de laboratorio) se hubieran requerido casi 1,000 kg de material, con un costo total de \$24,960 pesos, considerando un precio por kg de \$24.96 (Conjunto LAR de México, S.A. de C.V., 2010).

Por otra parte, la operación y mantenimiento del sistema se ha calculado para cuatro meses, tiempo determinado también, por las pruebas de tratabilidad aplicando el biosurfactante goma de guar. Se puede observar que el costo de esta fase es mínimo, siendo la etapa de monitoreo (15 muestras por biopilas/mes) el de mayor impacto.

Como conclusión del análisis económico se puede observar que el costo total de la construcción y operación de las 7 biopilas propuestas es de \$8,027,277 pesos, o bien \$446 pesos por cada m<sup>3</sup> de suelo tratado.

Fanhestock (1998), Iturbe *et al.* (2004) y la U.S. EPA (United States, Environmental Protection Agency) (<http://www.epa.gov/OUST/cat/biopiles.htm>, 2010) han reportado costos del proceso de biodegradación mediante el sistema de biopilas, para poder compararlo con los obtenidos en este trabajo se aplicó un factor de 13 pesos que corresponde al valor vigente del dólar en pesos mexicanos.

De esta manera, Fahnestock (1998) establece un costo que varía de \$864.5 a \$1,755 pesos por cada m<sup>3</sup> de suelo tratado. Iturbe *et al.* (2004) documenta un costo aproximado de \$1,820 pesos por m<sup>3</sup> de suelo y la U.S. EPA (2010), ofrece un intervalo de \$390 a \$1,170 pesos por tonelada.

Por último, se observa que en general los costos mostrados en esta tesis se encuentran por debajo de lo establecido por diferentes autores. Esto se debe posiblemente a tres factores muy importantes:

- En primer lugar, las pruebas de tratabilidad concluyeron que no se requiere alcanzar las concentraciones convencionales de C/N/P (100/15/1) y que con una relación de 100/15/0.028, que implica que no se necesitará fósforo y solamente se adicionará nitrógeno al suelo, es suficiente para tener las condiciones adecuadas en el proceso biológico.

- Las pruebas de humedad realizadas al suelo a lo largo de toda la experimentación definieron con detalle la capacidad de campo del suelo, adicionalmente se realizó un cálculo que determinó la cantidad de agua necesaria para que el suelo se humecte adecuadamente, evitando así, la implementación de un sistema de recolección de lixiviados que implicaría un aumento en el costo de inversión inicial, y el costo de manejo de los residuos obtenidos.

- El biosurfactantes a emplear no se puede definir como un agente contaminante que requiera, después del proceso biodegradatorio, tratamiento adicional. Por otra parte la dosis determinada en las pruebas de tratabilidad fue muy baja, disminuyendo la cantidad necesaria de biosurfactantes para preparar toda la solución que se requerirá adicionar al suelo.

### **5.3. Conclusiones generales de la tesis**

- Por la correlación geológica-geofísica se determinó que las unidades geológicas contaminadas son la ceniza volcánica (zona no saturada) y la toba litocristalina (acuífero somero).

- Los dos acuíferos presentes, uno somero en medio granular y otro profundo en medio fracturado, se encuentran desconectados hidráulicamente debido a la presencia de una potente capa de toba arcillosa, que forma la base del acuífero superior.

- La contaminación presente en el sitio, ha impactado a la zona no saturada y también ha formado una pluma de LNAPL contaminando el acuífero somero.

- Para la remediación integral del sitio es necesario primero extraer la fase libre presente y posteriormente dar tratamiento al suelo contaminado.

- Esta tesis se basó en el tratamiento de la zona no saturada, sin embargo, se reportan autores que han establecido analíticamente las eficiencias en la recuperación de LNAPL por medio de diferentes técnicas de extracción.

- Para la remediación de la zona no saturada, se concluye que el sistema de biopilas es el mejor candidato a aplicar, utilizando un biosurfactantes que asiste al proceso biodegradatorio que acelera la descomposición de los hidrocarburos presentes. El biosurfactate que mejores resultados obtuvo tiene la ventaja de no impactar al medio, debido a su condición natural, y se comprobó que con dosis bajas (2 y 20 mg/kg) es suficiente para obtener tasas de remoción convenientes, disminuyendo los costos de inversión del sistema.

- El diseño experimental que se llevó a cabo para determinar las eficiencias de remoción de los procesos puede ser complementado con el desarrollo de microcosmos y viales con nuevos surfactantes, tomando especial interés en diferentes tipos de biosurfactantes, estableciendo una futura línea de investigación que permita determinar la viabilidad y eficiencia en la aplicación de materiales de origen natural a la industria de la remediación ambiental.

## **Referencias bibliográficas**

Abdullabhai Abdulkader, Guar gum. <http://www.guargum.co.in>, 2010.

Adamson, W. A., 1982, Physical and Chemistry of surface: New York, Wiley.

Aguirre-Díaz, G., Dubois, M., Laureyns, J., Schaaf, P., 2002, Nature and P-T conditions of the crust beneath the central Mexican Volcanic Belt based on a Precambrian crustal xenolith: International Geology Review, 44, p. 222-242.

Allan, J., 1986, Geology of the Colima and Zacoalco grabens, SW Mexico: late Cenozoic rifting in the Mexican Volcanic Belt: Geological Society of America Bulletin, v. 97, p. 473-485.

API, 2004, API Interactive LNAPL Guide. Aquifer, Park city, Utah.

Aspinall G.O., Whitehead, C.C., 1970 (a), Mesquite Gum I, The 4-0 methylglucoronogalactan core. Can J. Chem. Vol. 48, p. 3840-3849.

Aspinall G.O., Whitehead, C.C., 1970 (b), Mesquite Gum II, The arabinan peripheral chains. Can J. Chem. Vol. 48, p. 3850-3855.

Atekwana, E. A., Sauck, W. A., Werkema, D. D., 2000, Investigations of geoelectrical signatures at a hydrocarbon contaminated soils: Journal of Applied Geophysics, p. 167-180.

Baker, K. H., Herson D. S., 1994, Bioremediation New York: McGraw Hill Inc, xvi, 375 p.

Batelle, 1997, Engineering Evaluation and Cost Analysis for Bioslurper Initiative. Air Force Center for Environmental Excellence Technology Transfer Center Division. Contract No. F41624-94-C-8012.

Batelle, 2003, Application Guide for Bioslurping Principles and Practices of Bioslurping Addendum: Use of Pre-pump Separation for Improved Bioslurper System Operation.

Blake, G.R., Hartage, K.H., 1986, Bulk Density. In: Klute, A. (ed), Methods of soil analysis Part I. Physical and Mineralogical Methods, Second Edition, Agronomy 9, ASA and SSSA: Madison, Wisconsin, p. 363-375.

Blake, G.R., Hartage, K.H., 1986, Particle Density. In: Klute, A. (ed), Methods of soil analysis Part I. Physical and Mineralogical Methods, Second Edition, Agronomy 9, ASA and SSSA: Madison, Wisconsin, p. 377-382.

Bossert, I. D., Kosson D. S., 1997, Measurement of hydrocarbon degradation in soils. In: Manual of environmental microbiology. C. J. Hurst, G. R. Knudsen, M. J. McInerney, L. D. Stetzenbach, M. V. Walter (Eds). American Society for Microbiology Press, p. 738-752.

Bray, R. H., Kurtz, L. T., 1945, Determination of total, organic and available form of phosphorus in soil, Soil Science, 59, p. 360-361.

Butler, J.J., 1996, Slug tests in site characterization: some practical considerations. Environmental Geosciences, No. 3(3), p. 154-163.

Butler, J.J., 1998, The Design, Performance and Analysis of Slug tests. CRC Press LLC, Florida, EUA.

Cabral-Cano, E., Lang, H. R., Harrison C. G. A., 2000, Stratigraphic Assessment of the Arcelia-Teloloapan area, Southern Mexico: Implications for Southern Mexico's Post-Neocomian Tectonic Evolution: *Journal of South American Earth Sciences*, v. 13, no. 4-5, p. 443-457.

Calabrese, E. J., and P. T. Kosteki, 1991, Hydrocarbon contaminated soils: U.S.A., Lewis Publishers, v. 1. p. 149–164, 167–178.

Campa, M. F., Coney, P. J., 1983, Tectono-stratigraphic terranes and mineral resource distributions in Mexico: *Canadian Journal of Earth Sciences*, v. 20, p. 1040-1051.

CEA, Jalisco; <http://www.ceajalisco.gob.mx/cuencajal.html#rh-mex>, 2009-12-20

Centeno-García, E., Ruíz, J., Coney, P. J., Patchett, P. J., Ortega-Gutiérrez, F., 1993, Guerrero terrane of Mexico: its role in the Southern Cordillera from new geochemical data: *Geology*, 21, 419-422.

Charbeneau, R.J., 2007, LNAPL Distribution and Recovery Model, Vol. 1: Distribution and Recovery of Petroleum Hydrocarbon Liquids in Porous Media. API Publication 4760.

Charbeneau, R.J., 2003, Models for design of free-product recovery systems for petroleum hydrocarbon liquids. API Publication 4729. API Publications, Washington, D.C.

Charbeneau, R.J., R.T. Johns, L.W.Lake, and M.J. McAdams, 2000, Free-product recovery of petroleum hydrocarbon liquids. *Ground Water Monitoring and Remediation* 23, no.1, p. 147-158.

Charbeneau, R.J., and C.Y. Chiang, 1995, Estimation of free hydrocarbon recovery from dual-pump systems. *Ground Water* 33, no. 4, p. 627-634.

Curtis, G. P., Reinhard, M., Roberts, P. V., 1986, Sorption of Hydrophobic Organic Compounds by Sediments, Environmental Engineering and Science Group, Department of Civil Engineering, Stanford University, Stanford, CA.

Dakia, P. A., Blecker, C., Robert, Ch., Wathelet, B., Paquot, M., 2008, Composition and physicochemical properties of locust bean gum extracted from whole seeds by acid or water dehulling pre-treatment, *Food Hydrocolloids*, Vol. 22, p. 807-818.

Danielson, R. E., Sutherland, P. L., 1986, Porosity. In: Klute, A. (ed), *Methods of soil analysis Part I. Physical and Mineralogical Methods*, Second Edition, Agronomy 9, ASA and SSSA: Madison, Wisconsin, p. 443-461.

De Cserna, Z., 1965, Reconocimiento geológico en la Sierra Madre del Sur de México, entre Chilpancingo y Acapulco, Estado de Guerrero: UNAM, Instituto de Geología, Boletín no. 62, 72 p.

Demant, A., 1978, Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación: *Revista Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México*, v. 2, p. 172-187.

Demant, A., 1981, Interpretación geodinámica del volcanismo del Eje Neovolcánico Transmexicano: *Revista Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México*, v. 5, p. 217-222.

Ego, F., Ansan, V., 2002, Why is the central Trans-Mexican Volcanic Belt (102°-99°W) in transtensive deformation?: *Tectonophysics*, 359, p. 189-208.

Engelbreton, A., Cox, A., Gordon, R., 1985, Relative motions between oceanic and continental plates in the Pacific Basin: Boulder, CO, Geological Society of America, Special Paper, 206, 64 p.

Etchevers, J. D., 1988, Análisis químico de suelos y plantas. Centro de Edafología: Colegio de Posgraduados, Chapingo, Estado de México, 803 p.

Fahnestock, F.M., 1998, Biopile design: Operation and maintenance handbook for treating hydrocarbon-contaminated soils. Battelle press, EUA.

Ferrari, L., Rosas-Elguera, J., 2000, Late Miocene to Quaternary extension at the northern boundary of the Jalisco block, western Mexico: the Tepic-Zacoalco rift revised, *en* Aguirre-Díaz, G., Delgado-Granados, H., Stock, J. (eds.), Cenozoic tectonics and volcanism of Mexico: Boulder, CO, Geological Society of America, Special Paper, 334, p. 42-64.

Fernández, L. C., Rojas, N. G., Roldán, T. G., Ramírez, M. E., Zegarra, H. G., Uribe, R., Reyes, R. J., Flores, D., Arce, J. M., 2006, Manual de técnicas de análisis de suelos aplicadas a la remediación de sitios contaminados: México D.F., Instituto Mexicano del Petróleo, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, 177 p.

Fetter, C.W., 2001, Contaminant Hydrogeology. Prentice-Hall, Inc., New Jersey.

Freeze, A. R., Cherry, J.A., 1980, Groundwater, Prentice Hall, Inc, New Jersey.

Fries, C, Jr., 1960, Geología del Estado de Morelos y de partes adyacentes de México y Guerrero, región central meridional de México; UNAM, Instituto de Geología, boletín 60, no. 236 p.

Garduño-Monroy, V., Spinnler, J., Ceragioli, E., 1993, Geological and structural study of the Chapala Rift, state of Jalisco, Mexico: Geofísica Internacional, 32, p. 487-499.

Garduño-Monroy, V., Saucedo-Girón, R., Jiménez, Z., Gavilanes-Ruiz, J., Cortés, A., Uribe-Cifuentes, R., 1998, La falla Tamazula-límite suroriental del bloque Jalisco y sus relaciones con el complejo volcánico de Colima, México: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 15, p. 132-144.

GEOEX-SIAPA, 2004, Estudio de Actualización Geohidrológica Integral de las Cuencas Atemajac – Toluquilla, Estado de Jalisco, México.

Gilbert, C.M., Mahood, G., Carmichael, I.S.E., 1985, Volcanic stratigraphy of the Guadalajara area, Mexico: Geofísica Internacional, 24, p. 169-191.

Gómez-Tuena, A., Orozco-Esquivel, M.T., Ferrari, L., 2005, Petrogénesis ígnea de la Faja Volcánica Transmexicana: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, v. Conmemorativo del Centenario, Temas Selectos de la Geología Mexicana, Tomo LVII, no. 3, p. 227-283.

Goycoolea, F. M., Morris, E. R., Richardson R. K., 1995, Solution rheology of mesquite gum in comparison with gum Arabic: Carbohydr Polym., Vol. 27, p. 37-45.

Hernández-Espriú, 2010, Estrategia integral de remediación en un sitio contaminado por hidrocarburos: Simulación de los procesos de descontaminación de suelos y acuíferos con modelación matemática y análisis en laboratorio, Tesis Doctoral.

Hvorslev, M.J. (1951). Time lag and soil permeability in ground-water observations. U.S. Army Corps of Engineers. Waterways Experimentation Station. Bulletin 36.

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), Comisión Nacional del Agua (CNA) y Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), 2007: Elaboración de los documentos de respaldo de la disponibilidad media anual de agua en los acuíferos (1413) Altos

de Jalisco, (1436) Arenal, (1428). SUBCOORDINACIÓN DE HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA, COORDINACIÓN DE HIDROLOGÍA.

Iturbe, R., Flores, C., Chavez, C., Bautista, G., Torres, L. G., 2004, Remediation of Contaminated Soil Using Soil Washing and Biopile Methodologies at a Field Level: *Journal of Soils & Sediments*, p. 1-8.

Jacob, C.E., 1950, Flow on ground water. En: *Engineering Hydraulics*, ed. Rouse, H, p. 321-386. Wiley, New York, NY, EUA.

Juárez-Badillo, E., Rico, A., 1973, *Mecánica de Suelos*, Tomo 1: Fundamentos de la mecánica de suelos. Ed. Limusa.

Keppie, J.D., Ortega-Gutierrez, F., 1995, Provenance of Mexican terranes : isotopic constraints : *International Geology Review*. V. 37, p. 813-824.

Keppie, J., Ortega-Gutiérrez, J., 1998, Middle American Precambrian basement: a missing piece of the reconstructed 1 Ga orogen, *en* Ramos, V., Keppie, J. D. (eds.), *Laurentia-Gondwana connections before Pangea*: Boulder, CO, Geological Society of America Special Paper, v. 336, p. 199-210.

Klute, A. 1986. Water retention: Laboratory methods. *In Methods of Soil Analysis, Part 1: Physical and Mineralogical Methods, Second Edition*, Klute (editor). p. 635-662. American Society of Agronomy, Madison, WI.

Li-zhong, Z. and Chiou, C. T., 2001, Water enhancements of pyrene by single and mixed surfactant solutions. *Journal of Environmental Science*. Vol. 13(4), p. 491-496.

Lobeck, A.K., 1939, *Geomorphology*: New York, McGraw-Hill Book Company, 731 p.

López-Franco, Y.L., Goycoolea F. M., Valdez, M. A., Calderón de la Barca, A. M., 2006, Goma de mezquite: una alternativa de uso industrial, *Inteciencia*, Vol. 31, No. 3, p. 183-189.

Lorch, H. J., Benckieser G., Ottow J. C., 1995, Basic methods for counting microorganisms in soil and water. In: *Methods in applied soil microbiology and biochemistry*. K. Alef and P. Nannipieri (Eds). Academia Press, pp.146-161.

Luhr, J. F., Nelson S. A., Allan, J. F. and Carmichael, I. S. E., 1985, Active rifting in southwestern Mexico: manifestations of an incipient eastward spreading-ridge jump. *Geology* 13, 54-57.

Mahood, G., 1981, A summary of the geology and petrology of the Sierra La Primavera, Jalisco, Mexico: *Journal of Geophysical Research*, 86, p. 10137-10152.

Maldonado Sánchez, G., 2007, Caracterización Geoquímica del Campo Volcánico Acatlán, Jal.: *Revista GeoCiencia del Servicio Geológico Mexicano*, año 1, no. 2, p. 26-43.

Moore, G., Marone, C., Carmichael, I., Renne, P., 1994, Basaltic volcanism and extension near the intersection of the Sierra Madre volcanic province and the Mexican Volcanic Belt: *Geological Society of America Bulletin*, 106, p. 383-394.

Martínez, E. V., López, S. F., 2001, Efectos de hidrocarburos en las propiedades físicas y químicas de suelo arcilloso: *Terra*, vol. 19, p. 9-17.

Martínez, E. P., Martínez, P., Castaño, S., 2005, *Fundamentos de hidrogeología: España*, Madrid, Ediciones Mundi-prensa, 284 p.

Miller, R.R., 1996, Bioslurping. Ground-Water Remediation Technologies Analysis Center, Technology Overview Report TO-96-05.

Muñoz, I. D., Mendoza, C. A., López, G. F., Soler, A. A., Hernández, M. M., 2000, Manual de análisis de suelo. Edafología. Escuela Nacional de Estudios Profesionales Iztacala, UNAM, México.

Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000, Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. Diario Oficial, 31 de diciembre de 2002.

Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, "Salud ambiental, agua para uso y consumo humano – Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización"

Norma Oficial Mexicana NOM-138-SEMARNAT/SS-2003, Límites máximos permisibles de hidrocarburos en los suelos y las especificaciones para su caracterización y remediación, Diario Oficial 29 de marzo de 2005.

Ortega-Gutiérrez, F., Sedlock, R. L., Speed, R. C., 1994, Phanerozoic tectonic evolution of Mexico, *en* Speed, R. C. (ed.), Phanerozoic evolution of North American continent-ocean transitions: Boulder, CO, Geological Society of America, DNAG Continent-Ocean Transect Series, p. 265-306.

Ortega-Gutiérrez, F., Ruiz, J., Centeno-García, E., 1995, Oaxaquia, a Proterozoic microcontinent accreted to North America during the late Paleozoic: *Geology*, 23(12), p. 1127-1130.

Pacheco, J., Mortera-Gutiérrez, C., Delgado-Granados, H., Singh, S., Valenzuela, R., Shapiro, N., Santoyo, M., Hurtado, A., Barrón, R., Gutiérrez-Moguel, E., 1999, Tectonic significance of an earthquake sequence in the Zacoalco half-graben, Jalisco, Mexico: *Journal of South American Earth Sciences*, 12, p. 557-565.

Raisz, E., 1964, Landforms of Mexico: Cambridge, Mass., U.S. Navy Geographical Branch.

Rosas-Elguera, J., Urrutia-Fucugauchi, J., Maciel, R., 1989, Geología del extremo oriental del Graben de Chapala; breve discusión sobre su edad: zonas geotérmicas Ixtlán de Los Hervores-Los Negritos, México: *Geotermia-Revista Mexicana de Geoenergía*, 5, p. 3-18.

Rosas-Elguera, J., Ferrari, L., Garduño-Monroy, V., Urrutia-Fucugauchi, J., 1996, Continental boundaries of the Jalisco Block in the Pliocene-Quaternary kinematics of western Mexico: *Geology*, v. 24, p. 921-924.

Rosas-Elguera, J., Alva-Valdivia, L., Goguitchaichvili, A., Urrutia-Fucugauchi, J., Ortega-Rivera, M. A., Archibald, D., 2003, Counterclockwise rotation of the Michoacan block: implications for the tectonics of western Mexico: *International Geology Review*, 45, p. 814-826.

Rosas-Elguera, J., Urrutia-Fucugauchi, J., 1998, Tectonic control of the volcano sedimentary sequence of the Chapala graben, western Mexico, *International Geology Review*, v. 40, p. 350-362.

Rossotti, A., Ferrari, L., López-Martínez, M. y Rosas-Elguera, J., 2002, Geology of the Boundary between the Sierra Madre Occidental and the Trans-Mexican Volcanic Belt in the Guadalajara region, western Mexico: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 19, no. 1, p. 1-15.

Ruiz, J., Patchett, P. J., Ortega-Gutierrez, F., 1988, Proterozoic and Phanerozoic Basement terranes of Mexico from Nd isotopic Studies: Geological Society of America Bulletin, v. 100, p. 274-281.

Ruiz, J., Tosdal, R., Restrepo, P., Murillo-Muñetón, G., 1999, Pb Isotope evidence for Colombia-Southern Mexico connections in the proterozoic, *en* Ramos, V., Keppie, J. D. (eds.), Laurentia-Gondwana connections before Pangea: Boulder, CO, Geological Society of America, Special Paper, 336, 183-197.

Santiago -Alonso, Cardona-Gallo, 2005, Obtención del coeficiente de carbono orgánico para diesel a través de isoterma de adsorción, Escuela de Geociencias y Medio Ambiente, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

Schaaf, P., Morán-Zenteno, D., Hernández-Bernal, M., Solís-Pichardo, G., Tolson, G., Köhler, H., 1995, Paleogene continental margin truncation in southwestern Mexico: geochronological evidence: Tectonics, 14(5), p. 1339-1350.

Schnoor, J., 1996, Environmental modeling: Fate and Transport of Pollutants in Water, Air, and Soil.

Sedlock, R., Ortega-Gutierrez, F., Speed, R., 1993, Tectonostratigraphic terranes and the tectonic evolution of Mexico: Boulder, CO, Geological Society of America, Special Paper, 278, 153 p.

Stakman, W.P., 1980, Measuring soil moisture: Drainage Principles and Applications. ILRI, 3, Wageningen, The Netherlands, p. 221-251.

Suárez, G., García-Acosta, V., Gaulon, R., 1994, Active crustal deformation in the Jalisco block, Mexico: evidence for a great historical earthquake in the 16<sup>th</sup> century: Tectonophysics, 234, p. 117-127.

Topp, G. C., 1993, Soil water content. In: soil sampling and methods of analysis: Canadian Society of Soil Science. Lewis Publishers, p. 541-557.

Torres, L. G., Orantes, J. L., Iturbe, R., 2003, Critical micellar concentrations for three surfactants and their diesel-removal efficiencies in petroleum-contaminated soils, p. 28-36.

Torres, L.G., Rojas, N., Bautista, G., Iturbe, R., 2005, Effect of temperature, and surfactant's HLB and dose over the TPH-diesel biodegradation process in aged soils: Process Biochemistry vol. 40, p. 3296–3302.

Torres, L.G., Iturbe, R., Snowden, M.J., Chowdhry, B., Leharne, S., 2007, Can pickering emulsion formation aid the removal of creosote DNAPL from porous media?, Chemosphere Vol. 71, p.123-132.

Torres, L.G., Zavala, P., Beltrán, M., Vaca, M., Iturbe, R., 2007(a), Combination of natural gums and synthetic surfactants for washing of a soil highly contaminated with crude, Environmental Geosciences, Vol. 14, No. 1, p. 49-58.

Torres, L.G., 2009, Comunicación personal. Profesor de la Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología (UPIBI), del Instituto Politécnico Nacional (IPN). E-mail: [ltorresb@ipn.mx](mailto:ltorresb@ipn.mx).

Urrutia-Fucugauchi, J., Rosas-Elguera, J., 1994, Paleomagnetic study of the eastern sector of Chapala Lake and implications for the tectonics of west-central Mexico: Tectonophysics, 239, p. 61-71.

US EPA (Environmental Protection Agency), 1996, Method 3540C, Soxhlet extraction.

U.S. Environmental Protection Agency, EPA, 2010, Biopiles.  
<http://www.epa.gov/OUST/cat/biopiles.htm>. Última visita: agosto de 2010.

Walkley, A. and I. A. Black., 1934. An examination of the Degtjareff method for determining organic carbon in soils: Effect of variations in digestion conditions and of inorganic soil constituents. *Soil Science*. 63:251-263.

Watkins, N.D., Gunn, B.M., Baksi, A.K., York, D. and Ade-Hall, J., 1971, Palaeomagnetism, Geochemistry, and Potassium-Argon Ages of the Rio Grande Santiago Volcanics, Central Mexico: *Geological Society of America, Bulletin* 82, p. 955-968.

Weber, J. W. Jr., 1972, *Physicochemical Processes for Water Quality Control*, John Wiley & Sons.

Weisman, W., 1998, Analysis of petroleum hydrocarbons in environment media. Vol. 1. Total petroleum hydrocarbon criteria working group series: Association of American Railroads BP Oil Company. United States Air Force, Armstrong Laboratory, Occupational Medicine Division.

Xu, M., Eckstien, Y., 1995, Use of weighted least-squares method in evaluation of the relationship between dispersivity and field scale. *Ground Water*, 33, no. 6, p. 905-908.