

UNIVERSIDAD DE SONORA
DIVISIÓN DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

“Evaluación del Efecto Potencial de la Bioactividad Natural *In-situ* en los Recursos Suelo y Subsuelo Impactados por Hidrocarburos Fracción Pesada dentro de una Instalación Ferroviaria en la Cd. de Mexicali, B.C.”

TRABAJO PROFESIONAL

**PARA OBTENER EL DIPLOMA DE:
ESPECIALIZACIÓN EN DESARROLLO SUSTENTABLE**

**PRESENTA:
JOSÉ ALBERTO MONTIEL FERNÁNDEZ**

Hermosillo, Sonora, México

Diciembre, 2008

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



“El saber de mis hijos
hará mi grandeza”



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

RESUMEN

Desafortunadamente, el deterioro que se ha generado en los ecosistemas por derrames accidentales de hidrocarburos no es una cifra pequeña en cantidad de la que se puede sentir orgullo. Este tipo de contaminación resulta perjudicial para la flora y fauna del lugar expuesto y representa un riesgo potencial a la salud debido a que algunas sustancias petroderivadas son mutagénicas, teratogénicas y cancerígenas. Ante esta situación desfavorable el presente trabajo académico enfoca su objetivo en un sitio de uso industrial afectado por hidrocarburos en la Cd. de Mexicali, B.C. El lugar de estudio presenta niveles de contaminante fracción pesada por arriba del Límite Máximo Permisible (LMP) establecido por la Norma Oficial Mexicana NOM-133-SEMARNAT/SS-2003. Como primer acercamiento de esta investigación, se reunió toda la información necesaria para el desarrollo un modelo conceptual que involucra la caracterización de la contaminación del lugar contemplando los principales factores involucrados en el medio poroso. Así, realizando el ajuste del modelo matemático, se señaló la distribución y comportamiento del contaminante en el suelo y subsuelo considerando el efecto potencial de la biodegradación natural sobre el mismo. Los agentes oxidantes de los compuestos orgánicos juegan un papel muy importante durante los procesos de bioatenuación natural por lo que se efectuó el seguimiento de las disminuciones al complejo de las principales entidades receptoras de electrones. Por último, una vez determinado el proceder y predicción del contaminante, se determinó el tiempo necesario para alcanzar la biocorrección natural *in-situ* de la afectación, con el fin de encontrarse dentro de los niveles de limpieza establecidos en la legislación ambiental mexicana.

ABSTRACT

Unfortunately, the deterioration generated on the ecosystems due to accidental hydrocarbons spills it is not a low quantity to be proud of. This kind of contamination results significantly harmful to the flora and fauna of the place expose and represents a potential health risk because of the fact that some petroleum derivated substances are mutagenic, teratogenic and carcinogenic. Facing this unfavourable situation the present academic work focuse its objective in a site of industrial use which is affected by hydrocarbons in Mexicali City, B.C. The place contains levels of heavy fraction contaminant above the Maximum Levels Permitted (MLP) established in the Official Mexican Norm NOM-138-SEMARNAT/SS-2003. As a first approach of this investigation, it was gathered all required information to develop a conceptual model which contemplate the characterization of the site's contamination involving the main factors through the porous medium. Once the mathematical model adjust was achieved, the distribution and behavior of the contaminant was displayed through the soil and subsoil considering the potential effect of the natural biodegradation upon it. The oxidants agents of the organic compounds play an important roll during the natural bioattenuation processes, hence, it was carry out the monitoring of the reductions to the complex of the principals electrons acceptors entities. Finally, once contaminants proceed and predictions were determined, the next step was to establish the required time to achieve the natural biocorrection *in-situ* of the affectation, aiming to reach the cleaning levels maintained in mexican environmental legislation.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
RESUMEN	ii
ABSTRACT	iii
LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABLAS	vii
AGRADECIMIENTOS	viii
1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
1.1 Introducción	1
1.2 Objetivos	3
2. DEFINICIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	4
2.1 Antecedentes	4
2.2 Descripción del Problema	4
2.3 Justificación	5
2.4 Hipótesis	7
3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	8
3.1 Contaminación Generada por Hidrocarburos	8
3.1.1 Polución del Recurso Natural Suelo	8
3.1.2 Legislación Mexicana	9
3.2 Evaluación de la Bioactividad Natural <i>in-situ</i>	10
3.2.1 Fundamento Bioquímico de la Biodegradación	10
3.2.2 Principales Factores de Influencia Durante la Bioatenuación Natural	12
3.2.3 Utilidad de la Atenuación Natural	14
3.3 Modelación de la Contaminación	15
3.3.1 Simulación de la Biodegradación Natural	15
3.3.2 BIOPLUME III Natural Attenuation Decision Support System	17
3.4 Determinaciones Analíticas Precedentes en el Sitio de Investigación	17
3.4.1 Estudio Topográfico	18
3.4.2 Descripción Edafológica	19
3.4.3 Análisis Físico-Químicos y Microbiológicos del Suelo	21
3.4.4 Evaluación de Hidrocarburos Fracción Pesada	21
4. METODOLOGÍA	26
4.1 Descripción General de la Investigación	26
4.2 Consideraciones del Modelo BIOPLUME III	26
4.3 Protocolo de Modelación	27

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	29
5.1 Panorama General de Modelación	29
5.2 Distribución del Hidrocarburo en su Fracción Pesada	29
5.3 Efecto de la Bioatenuación Natural <i>In-situ</i> en el Contaminante	32
5.4 Disminución al Complejo de Agentes Receptores de Electrones	35
5.5 Biocorrección Natural del Sitio Impactado según Norma Aplicable	38
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	39
6.1 Conclusiones	39
6.2 Recomendaciones	40
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	42

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
3.1 Esquema de las reacciones de biodegradación (Maroto <i>et al.</i> , 2000).	13
3.2 Distribución de líneas de igual nivel topográfico en el área de estudio.	20
4.1 Protocolo de modelación propuesto por Anderson & Woessner (1992).	28
5.1 Distribución de concentración de hidrocarburo fracción pesada en mg/kg BS a 1 m de profundidad.	30
5.2 Distribución de concentración de hidrocarburo fracción pesada en mg/kg BS a 5 m de profundidad.	31
5.3 Atenuación natural del contaminante a 1 m de profundidad tras una simulación a 20 años.	33
5.4 Atenuación natural del contaminante a 5 m de profundidad tras una simulación a 20 años.	34
5.5 Disminución de agentes oxidantes al complejo (1 m de profundidad).	36
5.6 Disminución de agentes oxidantes al complejo (5 m de profundidad).	37

LISTA DE TABLAS

Tabla	Página
3.1 Límites máximos permisibles para fracciones de hidrocarburos en suelo.	11
3.2 Datos físicos del suelo en las muestras MES4 y MEP11.	23
3.3 Resultados del análisis microbiológico en las muestras MES4 y MEP11.	24
3.4 Resultados de hidrocarburos (mg/kg BS) (EPA 1664A) en suelos a diferentes profundidades.	25

AGRADECIMIENTOS

Departamento del Posgrado en la Especialidad de Desarrollo Sustentable

Agradezco las facilidades y el apoyo que me brindaron para cursar y adquirir los conocimientos necesarios para formar un criterio profesional más amplio y capaz, a través de todos los expertos académicos y administrativos que respaldaron esta especialidad.

Miembros del Jurado

Presidente: M.C. Jesús Alberto Platt Carrillo

Secretaria: M.C. Andrea Guadalupe Zavala Reyna

Vocal: Dr. Jorge Luis Taddei Bringas

Suplente: M.C. Arturo Israel Villalba Atondo

A todos mi profundo agradecimiento por el gran apoyo y disponibilidad para la revisión y aprobación de este trabajo académico. A los Maestros Alberto Platt, Andrea Zavala y Jorge Taddei quienes sirvieron de motivación durante el curso de la especialidad y que además culminaron la misma con valiosas aportaciones para el escrito final. Gracias por el apoyo y disposición que siempre me mostraron.

Un especial reconocimiento al M.C. Arturo Villalba, quien fue siempre un elemento fundamental para el buen desarrollo de esta investigación, siempre en un ambiente de amistad y soporte para alcanzar los objetivos de investigación acordados. Bien merecido agradecimiento.

En general, un agradecimiento a todas las personas que tuvieron algún tipo de aporte en este estudio, es especial a mi familia quienes aparte de la motivación durante el desarrollo de este proyecto, fueron esenciales para la culminación del mismo.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

La evaluación del impacto ambiental, aplicado a actividades tanto públicas como privadas, es una herramienta técnica que de alguna manera ha sido requerida formalmente durante la planeación y progreso de una obra. Determinar este tipo de progreso al que se refiere, los objetivos y estrategias a seguir y, en general, la visión conceptual de este desarrollo, son motivo de discusión aún. El enfoque moderno de tal desarrollo no tiene solamente como fin elevar los niveles de bienestar de las sociedades humanas de hoy, sino que además contempla la posibilidad de heredar a las generaciones futuras un planeta con aceptables índices de salud ambiental y económica. Sobre este principio, surge el concepto de desarrollo sustentable cuya definición establece que es un desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras para satisfacer las propias. El concepto de desarrollo sustentable en su sentido más general, ha sido aceptado y apoyado ampliamente. Sin embargo, ha resultado más difícil el traducir este concepto en objetivos, programas y políticas prácticas mismas que enfrentan circunstancias muy variables y complejas de atender.

Ahora bien, manteniendo presente la idea de sustentabilidad ambiental y conservando la perspectiva de este proyecto, tenemos que desgraciadamente desde varias décadas pasadas, se ha generado una cantidad considerable de derrames de petróleo y sus derivados en distintos ecosistemas lo que ha provocado una severa contaminación de suelo y de cuerpos de agua. Estos compuestos son tóxicos para los seres vivos ya que algunas sustancias son capaces de alterar genéticamente el tejido celular. La

contaminación por petroderivados se caracteriza por su persistencia en el ecosistema y, en algunos casos extremos, la prolongación del efecto contaminante continúa a pesar de los procesos de degradación natural y/o antrópica a que puedan ser sometidos. La contaminación por hidrocarburos tiene un pronunciado efecto sobre las propiedades físicas, químicas y microbiológicas de un suelo, pudiendo impedir o retardar el crecimiento de la vegetación sobre el área contaminada (Flores, 2001).

Ante esta situación desfavorable el presente trabajo académico enfoca su objetivo en un sitio de uso industrial afectado por hidrocarburos. Su ubicación se centra en la Ciudad de Mexicali, Baja California, entre la Calzada Adolfo López Mateos por el Poniente, al Sur por la Avenida El Rocío y al Norte del Boulevard Lázaro Cárdenas. En el estudio se busca recabar la mayor cantidad de información referente a la caracterización de la contaminación del lugar y una vez conseguido esto, se realiza el ajuste de un modelo matemático que señala la distribución y comportamiento del contaminante en el suelo y subsuelo mediante la determinación de los principales factores involucrados en los procesos del medio poroso.

El lugar de estudio presenta niveles de contaminante fracción pesada por arriba del Límite Máximo Permisible (LMP) establecido por la Norma Oficial Mexicana NOM-138-SEMARNAT/SS-2003, Límites Máximos Permisibles de Hidrocarburos en Suelos, y las Especificaciones para su Caracterización y Remediación. Por lo tanto, al delimitar las intenciones de esta investigación, se requiere de conocer el efecto potencial de la biodegradación natural en el sitio afectado por la fracción pesada del hidrocarburo hasta que sus efectos y/o consecuencias no resulten perjudiciales. De esta manera se aportaría un firme soporte más a una alternativa menos compleja que otras de uso común como vía de remediación.

Está claro que la biocorrección natural *in-situ* aunque en un futuro puede ser muy eficaz para procesos de descontaminación no hay que olvidar que no deja de ser una técnica paliativa frente a catástrofes ecológicas. Por consiguiente, como primer paso, es

importante establecer una política preventiva con el objeto de minimizar los riesgos de contaminación. Aún cuando la situación se mostrase un tanto complicada, no hay que perder el optimismo en el desarrollo de este plan preventivo y pensar en como estas técnicas biológicas en general en un futuro tendrán un uso mucho más amplio apostando por una tecnología sostenible y ecológica.

1.2 Objetivos

Objetivo General

Evaluación del efecto potencial de la bioactividad natural *in-situ* en los recursos suelo y subsuelo afectados por hidrocarburos fracción pesada mediante la adaptación de un modelo matemático.

Objetivos Específicos

- a) Definir un modelo conceptual y la condición temporal óptima de simulación considerando las propiedades del medio poroso y las reacciones de biodegradación que ocurren en él.
- b) Determinar el comportamiento y distribución del contaminante hidrocarburo fracción pesada en suelo y subsuelo del área de estudio.
- c) Establecer la condición de la pluma contaminante a través del tiempo en relación a los procesos de atenuación natural.
- d) Identificar las disminuciones al complejo de los principales agentes oxidantes del compuesto orgánico objeto de estudio.
- e) Establecer el período necesario para alcanzar la biocorrección natural *in-situ* del lugar considerando los niveles de limpieza establecidos en la NOM-f38-SEMARNAT/SS-2003.

CAPÍTULO 2

DEFINICIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

2.1 Antecedentes

El predio en el que se centra esta investigación fue propiedad de Ferrocarriles Nacionales de México (FNM) y fue operado desde su establecimiento hasta 1997, año en que se dio en concesión a la empresa Ferrocarriles Mexicanos (Ferromex). El taller que se localiza en dicho predio operó como taller de mantenimiento de carros y locomotoras, así como zona de abasto de diesel y aceite lubricante. A la fecha de la realización del presente estudio, el taller se encuentra en operación por parte de la empresa concesionaria Ferromex, quien ofrece, entre otros, los servicios de mantenimiento de autos y locomotoras, y abastecimiento de diesel.

El almacenamiento de combustibles, como es el caso particular, conlleva un riesgo ambiental de posibles derrames o fugas de los mismos, que provocan la contaminación de los sitios en donde se encuentran. La principal razón de contaminación de suelos en el lugar se cree es por el almacenamiento inadecuado de residuos y combustibles como creosota y aceites gastados.

2.2 Descripción del Problema

Todos aquellos eventos en los que se involucran sustancias que implican algún riesgo para el ambiente o la población y que puedan generar la contaminación de suelos y cuerpos de agua, son conocidos como emergencias ambientales. De acuerdo con estadísticas de la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA), cada año se presentan en México un promedio de 550 emergencias ambientales asociadas con materiales y residuos peligrosos. El sitio de estudio es considerado una emergencia

ambiental debido principalmente al manejo de diesel y aceites lubricantes, manteniéndose en un 7% de distribución a nivel nacional de las sustancias peligrosas consideradas como emergencias ambientales (PROFEPA, 2002).

Los hidrocarburos del petróleo pueden ejercer un efecto tóxico directo en la vegetación, disminuyendo su crecimiento debido al agotamiento del oxígeno causado por un incremento de la actividad microbiana. A su vez puede haber interferencia con la relación agua-suelo-plantas además de afectar las propiedades físicas y químicas del suelo. Se ha comprobado que algunos compuestos petroderivados son capaces de producir células cancerígenas e incluso generar alteraciones genéticas a una especie desde la etapa embrionaria (teratogénesis) (Evgin, 1989).

Además, es muy importante conocer las características físico-químicas de un suelo que se ha impactado con hidrocarburos y que son básicas si se requiere diseñar alguna tecnología de restauración. Así, por ejemplo, la porosidad, pH, humedad, temperatura, contenido de nutrientes y ecología de las poblaciones microbianas son indispensables para los procesos de biorremediación (Morgan & Watkinson, 1989).

En materia de protección al ambiente, es importante mantener niveles de concentración de contaminante, en este caso de hidrocarburos, debajo de los valores permitidos como máximos por la legislación correspondiente. De lo contrario, podría producir efectos adversos en organismos humanos y no humanos implicando un riesgo potencial a la salud de la población aledaña (al sitio) así como la afectación del medio natural.

2.3 Justificación

La contaminación de suelos y aguas subterráneas debido a fugas o derrames accidentales de productos del petróleo ha sido reconocida recientemente como un problema de serias implicaciones ambientales. Los hidrocarburos se infiltran desde la superficie en una fase líquida bruta que desciende a través de los poros del suelo y que en su mayoría se ve

retenida en zonas vadosas debido a fuerzas capilares como una saturación residual. Los métodos de remediación de zonas contaminadas incluyen ambas técnicas, *ex-situ* e *in-situ*, que envuelven a su vez tratamientos térmicos, físicos y biológicos del suelo. Sin embargo, el alto costo y deficiente rendimiento de muchos de los sistemas de remediación han conducido a varios investigadores a considerar la atenuación natural como una tecnología alternativa para la remediación de suelos (Kawala, 2000).

La remediación intrínseca, o atenuación natural, es un método aceptable que se debe utilizar cuando las condiciones lo permitan, por las ventajas de bajo riesgo y costo que lo caracterizan. En un estudio de más de 1500 sitios con fugas de hidrocarburos, desarrollado en California por el Laboratorio *Lawrence Livermore*, se concluyó que la biorremediación pasiva (o intrínseca) donde la flora bacteriana natural del suelo degrada los hidrocarburos, debe de ser considerada como la opción de remediación preferida (Newel *et al.*, 1996).

Así entonces, se tiene que dentro de la instalación del Taller existe una alta incidencia de hidrocarburo fracción pesada por lo que se pretende establecer la limitante del tiempo necesario, para que bajo los efectos de la atenuación natural del suelo, se logre reducir el contaminante dentro del margen legal establecido en la NOM-138-SEMARNAT/SS-2003. De esta manera, se apoyaría en la toma de decisiones para el planteamiento de una solución adecuada, viable y conveniente en términos económicos. Estratigráficamente se espera conocer el comportamiento del contaminante hidrocarburo en el suelo e identificar las disminuciones de los agentes receptores de electrones de mayor relevancia en el metabolismo microbiano. Se pretende que el ajuste del modelo a las condiciones específicas del sitio apoyará de manera importante a otras investigaciones que impulsen la restauración de éste y otros lugares contaminados por hidrocarburos con condiciones semejantes al del caso en estudio.

2.4 Hipótesis

El efecto potencial de la bioactividad natural *in-situ* sobre el hidrocarburo fracción pesada, evaluado mediante la adaptación del modelo matemático BIOPLUME III, establecerá el tiempo necesario para alcanzar la restauración del lugar.

CAPÍTULO 3

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

3.1 Contaminación Generada por Hidrocarburos

Se entiende por contaminación la adición de algún agente externo dentro de un ecosistema que produce un desequilibrio en las condiciones originales del mismo, causando efectos adversos en el hombre, en los animales, vegetales o materiales expuestos. Para poder reflexionar sobre la normativa para la atribución de la responsabilidad por daños, es conveniente comprender la dimensión de afectación consecuencia de la inyección de algún contaminante, en este caso, de hidrocarburos en suelo.

3.1.1 Polución del Recurso Natural Suelo

Como se ha mencionado anteriormente, se ha realizado bastante investigación con el fin de conocer las principales alteraciones de los hidrocarburos del petróleo en el suelo. Plice (1948) determinó los efectos de los hidrocarburos en algunas propiedades mecánicas del mismo, como la cohesión. Simultáneamente a los efectos en las propiedades físicas y químicas del suelo, suceden cambios en las condiciones de fertilidad, donde se observaron incrementos en nitrógeno y contenido de materia orgánica. De manera similar, Dobson y Wilson (1964) encontraron mayor actividad microbiológica en suelos impregnados con hidrocarburos que en suelos libres del mismo. Conjuntamente, existe una disminución de la flora impactada de contaminante debido a una mayor demanda de oxígeno durante el metabolismo de las colonias microbianas.

Una derivación muy seria de áreas afectadas por hidrocarburos redundaría en la exposición prolongada de fauna propia de un ecosistema y de población humana aledaña a la contaminación. Se sabe que algunos compuestos de este tipo son mutagénicos y/o teratogénicos provocando una alteración particular en los genes del ente expuesto y consecuentemente una modificación permanente en la especie. También es reconocido que algunas sustancias son carcinogénicas, sobretodo las derivadas del grupo de los BTEX's (Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xilenos). Entonces, se puede decir que la vigencia de generar un riesgo a la salud de la población de un ecosistema contaminado por esta naturaleza es latente y debieran encaminarse esfuerzos por evitarla (Martínez, 2000).

3.1.2 Legislación Mexicana

Los derrames de hidrocarburos, por las sustancias que involucran, pueden poner en peligro los lugares donde se producen, la integridad de los ecosistemas, así como la preservación de los recursos naturales. Cuando un derrame de hidrocarburos permanece sin ser atendido puede causar daños constantes y crecientes al suelo y a otros recursos naturales. Ante la situación descrita, el 20 de agosto de 2002 se publicó en el **Diario Oficial de la Federación**, la Norma Oficial Mexicana de Emergencia: Límites Máximos Permisibles de Contaminación en Suelos por Hidrocarburos, Caracterización del Sitio y Procedimientos para la Remediación, la cual fue prorrogada por seis meses más, el 20 de febrero de 2003. Que cumplido el procedimiento establecido en la Ley Federal sobre Metrología y Normalización para la elaboración de normas oficiales mexicanas, el Comité Consultivo Nacional de Normalización de Medio Ambiente y Recursos Naturales en sesión de fecha 30 de noviembre de 2004 aprobó para publicación definitiva la Norma Oficial Mexicana NOM-138-SEMARNAT/SS-2003, Límites Máximos Permisibles de Hidrocarburos en Suelos y las Especificaciones para su Caracterización y Remediación. Esta norma mexicana, tal y como su nombre lo indica, tiene por objeto establecer los niveles máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y disponer la caracterización y consecuentemente remediación del sitio. Además, los

lineamientos y convenios propuestos son de observancia obligatoria en todo el territorio nacional para quienes resulten responsables de la contaminación con hidrocarburos en suelos (NOM-138-SEMARNAT/SS-2003).

Se le llama Límite Máximo Permisible (LMP) al nivel de concentración o cantidad de uno o más contaminantes, por debajo del cual no se prevé riesgo para la salud, el bienestar humano y los ecosistemas, que es fijado por la Autoridad Competente y es legalmente exigible. Según la NOM-138-SEMARNAT/SS-2003, el LMP establecido para el hidrocarburo fracción pesada en suelo (objeto de estudio) es de 6,000 mg/kg para una zona industrial (Tabla 3.1).

3.2 Evaluación de la Bioactividad Natural *in-situ*

Comúnmente se le hace referencia como atenuación natural y consiste en aprovechar los procesos naturales para contener la contaminación causada por derrames de productos químicos y reducir la concentración y la cantidad de contaminantes en los lugares afectados. La atenuación natural, conocida también como medidas correctivas intrínsecas, bioatenuación o biocorrección intrínseca, es un método en el que se dejan los contaminantes donde están mientras se produce su biodegradación. Con frecuencia se utiliza la atenuación natural como parte de la limpieza de un sitio donde también se recurre al control o la extracción de la fuente de contaminación.

3.2.1 Fundamento Bioquímico de la Biodegradación

El fundamento bioquímico de la biodegradación se basa en que en la cadena respiratoria, o transportadora de electrones de las células, se van a producir una serie de reacciones de óxido-reducción cuyo fin es la obtención de energía. La cadena la inicia un sustrato

Tabla 3.1 Límites máximos permisibles para fracciones de hidrocarburos en suelo.

FRACCIÓN DE HIDROCARBUROS	Uso de suelo predominante ^a (mg/kg base seca)		
	Agrícola ^b	Residencial	Industrial ^c
Ligera	200	200	500
Media	1,200	1,200	5,000
Pesada	3,000	3,000	6,000

^a Para usos de suelo mixto, deberá aplicarse la especificación al menor valor de los usos de suelo involucrados.

^b Agrícola incluye suelo forestal, recreativo, y de conservación.

^c Industrial incluye comercial.

orgánico (compuestos hidrocarburos) que es externo a la célula y que actúa como portador de electrones, de modo que la actividad metabólica de la célula acaba degradando y consumiendo dicha sustancia (Newell *et al.*, 1996).

Los aceptores más comúnmente utilizados por los microorganismos son el oxígeno, los nitratos, el hierro (III), los sulfatos y el dióxido de carbono. Cuando el oxígeno es utilizado como aceptor de electrones la respiración microbiana se produce en condiciones aerobias, y los procesos de biodegradación serán de tipo aerobio; sin embargo, si utiliza los sulfatos o el dióxido de carbono se produce en condiciones reductoras o anaerobias, y los procesos de biodegradación serán de tipo anaerobio (Figura 3.1).

3.2.2 Principales Factores de Influencia Durante la Bioatenuación Natural

La concentración y composición de la comunidad microbiana y la tasa de transformación de contaminantes está influenciada por diversos factores (Maroto *et al.*, 2000):

- Necesidad de nutrientes. El metabolismo microbiano está orientado a la reproducción de los organismos y éstos requieren que los constituyentes químicos se encuentren disponibles para su asimilación y sintetización. Los nutrientes principalmente requeridos son el fósforo y el nitrógeno. Por lo general suele haber en el suelo una concentración de nutrientes suficiente, sin embargo, si estos no se encontrasen en el rango normal se puede adicionar mayor cantidad al medio. El rango normal de C:N:P depende del sistema de tratamiento a emplear, siendo de modo habitual 100:10:1.

Degradación aerobia:



Degradación anaerobia:



Figura 3.1 Esquema de las reacciones de biodegradación (Maroto *et al.*, 2000).

- pH del suelo. Afecta significativamente en la actividad microbiana. El crecimiento de la mayor parte de los microorganismos es máximo dentro de un intervalo de pH situado entre 6 y 9. Así mismo el pH también afecta directamente en la solubilidad del fósforo y en el transporte de metales pesados en el suelo. La acidificación o la reducción del pH en el suelo se puede realizar adicionando azufre o compuestos del azufre.
- Temperatura. Generalmente las especies bacterianas crecen a intervalos de temperatura bastante reducidos, entre 15 y 45 °C (condiciones mesófilas), decreciendo la biodegradación por desnaturalización de las enzimas a temperaturas superiores a 40°C e inhibiéndose a inferiores a 0°C.
- Humedad. Los microorganismos requieren unas condiciones mínimas de humedad para su crecimiento. El agua forma parte del protoplasma bacteriano y sirve como medio de transporte a través del cual los compuestos orgánicos y nutrientes son movilizadados hasta el interior de las células. Un exceso de humedad inhibirá el crecimiento bacteriano al reducir la concentración de oxígeno en el suelo.
- Estructura química del hidrocarburo. La inherente biodegradabilidad de un hidrocarburo depende, en gran medida, de su estructura molecular. Siendo los parámetros que más van a afectar la halogenación, la existencia de ramificaciones, la baja solubilidad en el agua y la diferente carga atómica.

3.2.3 Utilidad de la Atenuación Natural

En ciertas situaciones, la atenuación natural es una opción eficaz y económica para realizar una limpieza y la forma más apropiada de corregir algunos problemas de contaminación. A veces se dice erróneamente que la atenuación natural es el método de la "inacción". Sin embargo, la atenuación natural es realmente un método activo centrado en la confirmación y la vigilancia de procesos de corrección natural, en vez de depender totalmente de técnicas "dirigidas". Los hidrocarburos móviles y tóxicos, por ejemplo, son buenos candidatos para la atenuación natural. No sólo son difíciles de

atrapar debido a su movilidad, sino que también se encuentran entre los contaminantes que más fácilmente se destruyen con la biodegradación. La atenuación natural es un método no invasivo; a diferencia de muchas técnicas complejas de limpieza mecánica, la superficie del suelo puede seguir usándose mientras se produce la atenuación natural en el subsuelo. La atenuación natural puede ser menos costosa que otras opciones dirigidas para el tratamiento de una afectación de hidrocarburos y no requiere una fuente de energía ni equipo especial (U.S. EPA, 1996).

3.3 Modelación de la Contaminación

La finalidad de la modelación de un contaminante es conocer su comportamiento a través de un medio natural así como su máximo alcance de afectación en el mismo y el tiempo en que permanecerá como agente tóxico (según la norma que aplique) ya sea con o sin la aplicación de una técnica de remediación (si se lo permite). Cuando se habla de la simulación de compuestos hidrocarburos sometidos a los efectos de la remediación intrínseca, los resultados que dará la atenuación natural y el tiempo en que tardará en valer su efecto óptimo, requiere de un análisis pormenorizado del lugar contaminado. Los responsables de la limpieza de un sitio deben saber si la atenuación natural o cualquier otra medida correctiva propuesta reducirán la concentración de contaminantes en el área afectada a niveles legalmente aceptables en un plazo razonable.

3.3.1 Simulación de la Biodegradación Natural

Durante los últimos años, el alto costo y bajo rendimiento de muchos sistemas de remediación de recursos naturales impactados por hidrocarburos han dirigido a muchos investigadores a considerar la atenuación natural como una alternativa tecnológica para su restauración. Así, se han realizado una serie de estudios simulados para evaluar si la bioactividad natural *in-situ* es capaz de controlar y abatir las plumas contaminantes sin recurrir a la remediación tradicional. Un avance significativo en este ramo de investigación lo consiguió Kim (2004), al desarrollar algunos modelos matemáticos

basados en las aproximaciones al equilibrio de las isothermas de adsorción de Langmuir y Freundlich para simular el transporte y retardación de los contaminantes orgánicos como los hidrocarburos aromáticos polinucleares (HAP's) en un sistema multifásico de agua subterránea. Así mismo, Lee K. *et al.* (2004) desarrollaron un modelo matemático para simular el transporte de contaminantes disueltos originados de una fuente multicomponente bien definida en Fase Líquida No Acuosa (FLNA) conteniendo compuestos de HAP's.

Existe también un modelo de soporte regulatorio conocido como BIOPLUME desarrollado por Borden y Bedient (1986) y que ha tenido una gran gama de aplicaciones prácticas. El modelo simula la biodegradación aerobia como una reacción microbiana "instantánea" limitada únicamente por la cantidad disponible del receptor de electrones, en este caso oxígeno. En otras palabras, la reacción microbiana se asume que ocurre a una tasa mucho más acelerada que el tiempo necesario para que un acuífero recupere la cantidad de oxígeno en la pluma. A pesar de que el tiempo, para que la biomasa degrade aeróbicamente los hidrocarburos disueltos, se encuentra en el orden de días, el tiempo total para eliminar la pluma es en el orden de años o décadas.

Recientemente, algunos investigadores han sugerido que la degradación de los hidrocarburos ocurre tanto aeróbica como anaeróbicamente en ambientes tales de un acuífero, teniendo la última una implicación determinante en la biodegradación de sitios contaminados con la naturaleza antes mencionada. Por lo tanto, Newell *et al.* (1996) desarrollaron una extensión más completa de la matriz matemática generada por Borden y Bedient (1986) que logra la simulación de zonas con condiciones anóxicas (poco oxígeno), en donde las bacterias anaerobias empiezan a utilizar otros receptores de electrones para metabolizar los hidrocarburos. Los resultados de esta investigación han sido únicos en términos prácticos y convenientes ya que se le ha dado una aplicación en medios simuladores para diversos sistemas operativos (BIOPLUME III).

Los estudios referentes al tema continúan, y se consiguen mejores modelos con la adaptación de particularidades de unos con las de otros, realizando ajustes en los parámetros más importantes y generando resultados confiables con la información empírica recabada en campo.

3.3.2 BIOPLUME III *Natural Attenuation Decision Support System*

El sistema BIOPLUME III es un modelo bidimensional, de diferencia finita que simula la atenuación natural de contaminantes orgánicos en el subsuelo debido a los procesos de advección, dispersión, absorción y biodegradación. El modelo simula la biodegradación de contaminantes orgánicos valiéndose de un número de receptores de electrones aeróbicos y anaeróbicos: oxígeno, nitrato, hierro (III), sulfato, y dióxido de carbono. Consecuentemente, el modelo apoya todo sitio que requiera de una evaluación referente al planeamiento de acciones de remediación asociados a los contaminantes hidrocarburos, basándose en los movimientos de estos solutos para indicar gráficamente una pluma de dispersión. La suficiente cantidad de datos será esencial al momento de emplear el modelo BIOPLUME III para simular el flujo existente y/o condiciones del contaminante en el sitio, y cuando se presente la instancia de predicción (Konikow y Bredehoeft, 1978 & 1989).

En esta investigación, la determinación del comportamiento del contaminante hidrocarburo en su fracción pesada y el seguimiento de los procesos de biodegradación se logrará mediante la adaptación del modelo matemático BIOPLUME III. Cabe señalar que se implementará un modelo conceptual generado mediante la integración de la información antecedente del sitio de interés.

3.4 Determinaciones Analíticas Precedentes en el Sitio de Investigación

El taller de Ferromex, correspondiente a los ex-talleres de Ferrocarriles Nacionales de México en Liquidación (FNML) sujeto a investigación, cuenta con una superficie total

de 62,670 m². En su mayoría la instalación se encuentra al aire libre, contando solamente con las construcciones de los cuartos de bombeo para abastecimiento y recibo de diesel, el arenero, el área de estancia para permanencia de personal en turno y el taller mecánico propiamente dicho. Las actividades del lugar están limitadas a la carga y descarga de combustibles, y reparaciones menores de los equipos de tránsito.

La información presentada en este apartado es consecuencia de un estudio de postgrado realizado en el período anual del 2006-2007 que dejó entrever la presencia de contaminante hidrocarburo en las inmediaciones del Taller, principalmente en su fracción pesada. Durante esta investigación se realizó la perforación de cuatro pozos de observación aunados a ocho ya existentes. Así mismo, se practicó la perforación de seis pozos de sondeo en los que se recolectaron muestras a cuatro diferentes profundidades (1, 3, 5 y 7 m) de acuerdo a la determinación analítica a realizar. En sí, se llevaron a cabo una serie de trabajos pertinentes para lograr una caracterización plena y confiable del lugar (Montiel, 2007).

3.4.1 Estudio Topográfico

El área de investigación presenta en su zona central una condición muy uniforme en cuanto a elevación topográfica, en donde predomina la elevación de 4.8 msnm (metros sobre el nivel del mar). En esta franja se ubican las Vías centrales del ferrocarril y las principales instalaciones como el taller, tanque de combustible, cuarto de bombas y arenero. Esta parte del predio al parecer forma un terraplén que fue acondicionado con material de préstamo para dar pendiente apropiada a las Vías y para el desplante uniforme de dichas instalaciones. Dentro de esta área resalta la curva de 5.0 msnm en una pequeña porción de terreno que rodea al Pozo No. 1 y vendría a ser el punto más elevado del terreno en todo el predio, aunque sólo cubre una superficie de 5.95 m².

Hacia ambos lados de esta franja central se presentan elevaciones más bajas: al Noroeste (NE), las elevaciones descienden hasta 3.20 msnm, que son las más bajas que se

presentan en el sitio del proyecto y corresponden al área en donde se localizan el Pozo No. 4, el tanque de aceite recuperado y el tanque de decantación.

Hacia el Sur predomina la elevación de 4.40 msnm (zona del Sondeo No. 4 y los Pozos No. 8 y 10), y las vías de la parte más al Sur de la estación de ferrocarril. En la parte Suroeste del predio (al Sur del taller de locomotoras), se ubica un bajo con la elevación de 4.20 msnm. Si se estimara una pendiente representativa de la zona central ésta sería de 40 cm en 124 m (entre el Pozo No. 1 y el Pozo No. 6), equivalentes a 0.32%, que corresponde a la pendiente de las vías y de todo el terraplén central. La representación esquemática de lo citado previamente se muestra en la Figura 3.2 a través del trazado de isolíneas topográficas predominantes en el lugar de análisis.

3.4.2 Descripción Edafológica

De conformidad con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, en el área de estudio se observa una gran variabilidad vertical reconociéndose seis (6) estratos diferentes hasta la profundidad de 13.5 m. A su vez estos estratos se caracterizan por variar verticalmente con la presencia de substratos delgados de material, textura y química diferente al contexto del estrato principal.

En general, el suelo del lugar de análisis tiene gran heterogeneidad vertical como es común en este tipo de suelos de origen elástico. Particularmente los primeros centímetros (hasta 20 cm) de suelo está texturalmente clasificado como arena fina con presencia de gravilla y arena limosa, seco desde el punto de vista humedad, color café claro y sin presencia ni olor a hidrocarburos. A la profundidad de 1 m el suelo es de textura arena limosa; su color es oscuro, lo cual, aunado a su olor, evidencia el inicio de la presencia de hidrocarburos. Hacia la profundidad de 3 m la textura es en general de arena con lentes de arcilla con material orgánico (lentes de 5 a 8 cm). A los 5 m de profundidad se observa arena fina en la parte superior y arena arcillosa en la parte inferior. A esta profundidad la coloración se torna más oscura con olor a hidrocarburo

R15-T-1687

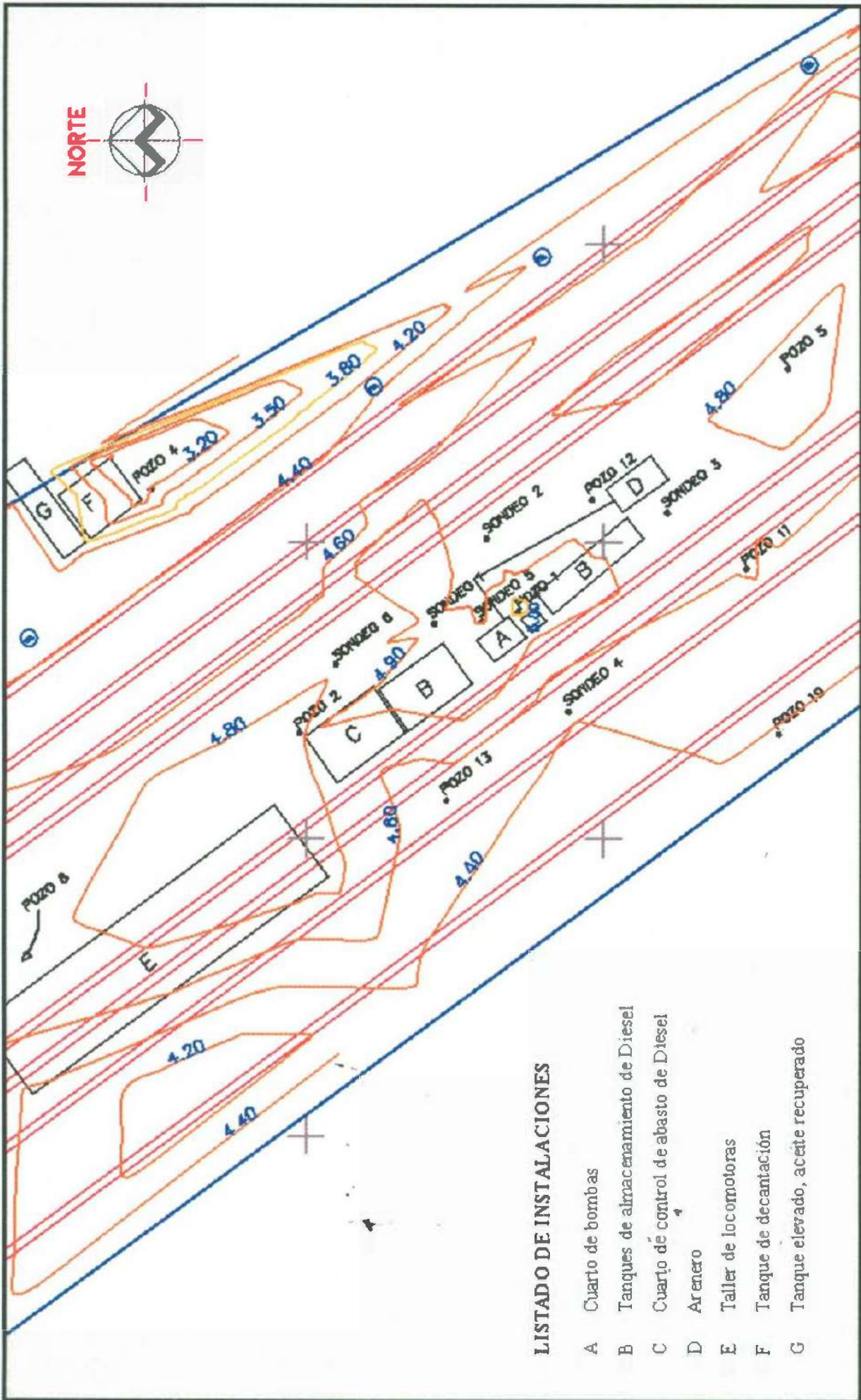


Figura 3.2 Distribución de líneas de igual nivel topográfico en el área de estudio.

más fuerte y en una condición evidente de inicio de humedad. Entre los 5 y 7 m el suelo se vuelve más arcilloso, prevaleciendo el color oscuro, humedad y el olor a hidrocarburo. De los 9 a 10 m se localizó el nivel estático en general de todos los pozos de observación. A partir de esta profundidad la textura se observa arcillosa, con presencia ocasional de material arenoso en una condición de saturación de humedad. Esta condición continúa de igual manera, por lo menos hasta los 13.5 m de profundidad, que fue la máxima alcanzada por los pozos construidos para el estudio ya mencionado (2007).

3.4.3 Análisis Físico-Químicos y Microbiológicos del Suelo

Los resultados del análisis físico-químico y microbiológico del suelo mostraron ciertas características deseables para efectos de la remediación del lugar por medios bacteriológicos y de condiciones del ecosistema.

En la Tabla 3.2 se observa un porcentaje de humedad adecuado (18.1 a 18.8%) a pesar de tener un clima muy seco en el lugar. Además, la porosidad para la muestra MES4 resultó ser de 35% mientras que para la muestra MEPI 1 fue de 26.47% lo que conlleva a la definición de un coeficiente de almacenamiento promedio de 30.73%. En lo referente al análisis microbiológico se observan resultados muy satisfactorios en términos de la remediación del lugar (Tabla 3.3). Se registran valores altos de "conteo total de bacterias" sobretodo en la muestra MES4 (770,000.00 UFC/g). Los nutrientes que presenta el suelo son principalmente el nitrógeno con valores de 440 y 511 ppm (MES4 y MEPI 1, respectivamente) y fósforo, con concentraciones de 734 y 1,023 ppm (igualmente MES4 y MEPI 1, de manera respectiva).

3.4.4 Evaluación de Hidrocarburos Fracción Pesada

La evaluación de hidrocarburos fracción pesada (EPA 1664A) cuenta con los resultados de 6 muestras totales, mismas que presentaron concentraciones mayores al Límite

Máximo Permisible de 6,000.00 mg/kg establecido en la NOM-138-SEMARNAT/SS-2003, para suelos de uso industrial, destacando el valor para el Sondeo No. 5 a 5.00 m de profundidad con 73,490.00 mg/kg, que fue la máxima concentración detectada (Tabla 3.4).

Tabla 3.2 Datos físicos del suelo en las muestras MES4 y MEP11.

MUESTRA	MES4	MEP11
Humedad natural(%)	18.8	18.1
Porosidad (%)	35	26.47
Densidad (SS)	2.77	2.75
PVSS (kg/m³)	1,217.00	1,207.00
PBSC	1,339.00	1,327.00
PBSM	1,750.00	1,770.00
Humedad OPT. (%)	18.5	17.0
Límite líquido (%)	32.00	31.00
Límite plástico(%)	14.00	15.00
Índice de plasticidad(%)	18.00	16.00
Concentración lineal	7.5	6.4

Tabla 3.3 Resultados del análisis microbiológico en las muestras MES4 y MEP11.

Muestra	Conteo total de bacterias mesófilas aerobias UFC/g	Coliformes totales (NMP/g)	Coniformes fecales (NMP/g)	Nitrógeno total (ppm)	Fósforo (ppm)	pH
MES4	770,000.00	<3 (no detectable)	<3 (no detectable)	440	734	8.69
MEP11	12,000.00	<3 (no detectable)	<3 (no detectable)	511	1,023	8.95
Método	NOM-092-SSAI-1994.	NOM-112-SSAI-1994.	NOM-145-SSAI-1995.	KJELDAHL	NMX-AA-029-SCFI-2001	NMX-AA-008-SCFI-2000

Tabla 3.4 Resultados de hidrocarburos (mg/kg BS) (EPA 1664A) en suelos a diferentes profundidades.

Identificación de la muestra	Profundidad (m)	TPH's EPA 1664A (mg/kg)
MES4-01	1.00	10,602.00
MES4-03	5.00	6,561.00
MES5-01	1.00	25,039.00
MES5-03	5.00	73,490.00*
MEP13-01	1.00	42,715.00
MEP13-03	5.00	35,604.00
Acurado = Mayor al LMP de 6,000.00 mg/kg		
* Máxima concentración detectada.		

CAPÍTULO 4

METODOLOGÍA

4.1 Descripción General de la Investigación

Una vez recabada y organizada la información de la caracterización general del sitio en estudio, se desarrolló un modelo conceptual que involucrase los parámetros principales involucrados en los procesos del medio poroso. De esta manera, se efectuó la adaptación del modelo matemático BIOPLUME III con las condiciones específicas acontecidas en el sitio de interés. Una vez dentro de la plataforma del simulador, se definió el comportamiento estratigráfico del hidrocarburo fracción pesada y los efectos de atenuación natural a los que está sujeto a través del tiempo. Así mismo, se realizó un análisis semejante, modelando las plumas de los agente oxidantes de mayor influencia durante la biodegradación del contaminante. Por último, cerca del final de la etapa de simulación, se estableció el periodo requerido para que únicamente mediante las condiciones de biocorrección natural *in-situ* se alcance la restauración del lugar considerando los LMP's establecidos en la NOM-138-SEMARNAT/SS-2003.

4.2 Consideraciones del Modelo BIOPLUME III

El modelo BIOPLUME III consigue simular el transporte de seis componentes, el elemento cardinal (contaminante) y el conjunto de receptores de electrones que dan lugar a la biodegradación natural. El comportamiento dinámico se efectúa de manera bidimensional, cubriendo la atenuación natural de contaminantes orgánicos en sistemas aerobios y anaerobios, oxígeno, nitrato, hierro (III), sulfato, y dióxido de carbono. La biodegradación del hidrocarburo usando los receptores de electrones aerobios y anaerobios es simulada utilizando el principio de superposición.

4.3 Protocolo de Modelación

Con el objetivo de obtener una simulación propiamente adecuada se decidió apegarse a un protocolo de modelación en el que se desenvuelve una metodología para casos de sitios con contaminación por hidrocarburos (en todas sus presentaciones) en Software de plataforma BIOPLUME III (Figura 4.1). Anderson and Woessner (1992) son los autores que proponen esta metodología de modelación, la cual ha tenido exitosamente su aplicación en planes de saneamiento de sitios donde no hay responsables identificados por la contaminación generada en el medio natural.

Al momento de establecer el propósito de modelación con BIOPLUME III, de alguna manera se centró el estudio, lo que ayudó a determinar las expectativas del análisis. Los objetivos típicos incluyen:

- 1) Determinar la efectividad de la atenuación natural para la remediación del sitio;
- 2) En caso de ser necesario plantear algún sistema de remediación alternativo.

La formulación de un modelo conceptual del sitio fue esencial para lograr el éxito de la simulación con BIOPLUME III ya que permitió establecer la dimensión y diseño del área de análisis.

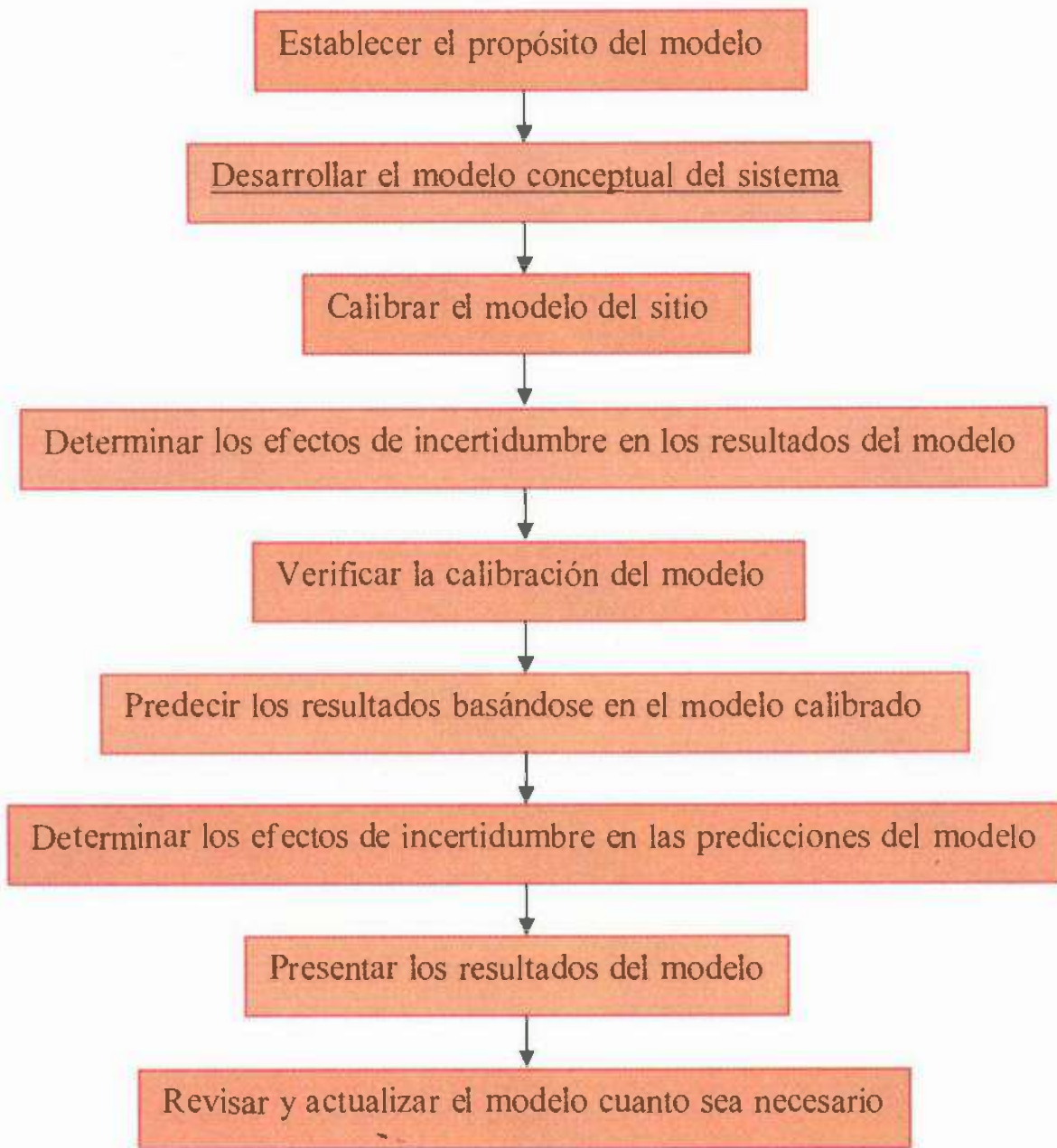


Figura 4.1 Protocolo de modelación propuesto por Anderson & Woessner (1992).

CAPÍTULO 5

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Panorama General de Modelación

La modelación de la contaminación está encaminada a que la integración de las series de datos y de la información física, química y microbiológica en un modelo conceptual coherente sea además verificable de forma numérica. Dada la calidad de la información, se ha utilizado el código BIOPLUME-III (Rafai *et al.*, 1998) que permite simular el movimiento en suelo y subsuelo, en el transporte de solutos con reacciones muy sencillas de degradación. Se ha tomado un dominio de diferentes profundidades de acuerdo a los muestreos realizados.

5.2 Distribución del Hidrocarburo en su Fracción Pesada

Los hidrocarburos fracción pesada parten de mediciones que rebasan los LMP's establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-138-SEMARNAT/SS-2003. Estos valores en concentración se encuentran a 1 y 5 m de profundidad del suelo de acuerdo al análisis de seis (6) muestras estudiadas. A través de la simulación se encontró una distribución de contaminante con mayor incidencia en la zona donde se localiza el Pozo No. 13 (42,715.00 mg/kg), y un poco menos en el área del Sondeo No. 5 (25,039.00 mg/kg), todo esto en la profundidad de 1 m (Figura 5.1).

A los 5 m de profundidad se encuentran concentraciones más elevadas que a 1 m, destacando el punto MES5 con 73,490.00 mg/kg. En el Pozo No. 13 igualmente se tiene una concentración alta de hidrocarburo fracción pesada (35,604.00 mg/kg), similar a la que se tenía a 1 m de distancia en el mismo punto, sin embargo no es tan alarmante el valor de concentración a como sucede en la zona del Sondeo No. 5 (Figura 5.2).

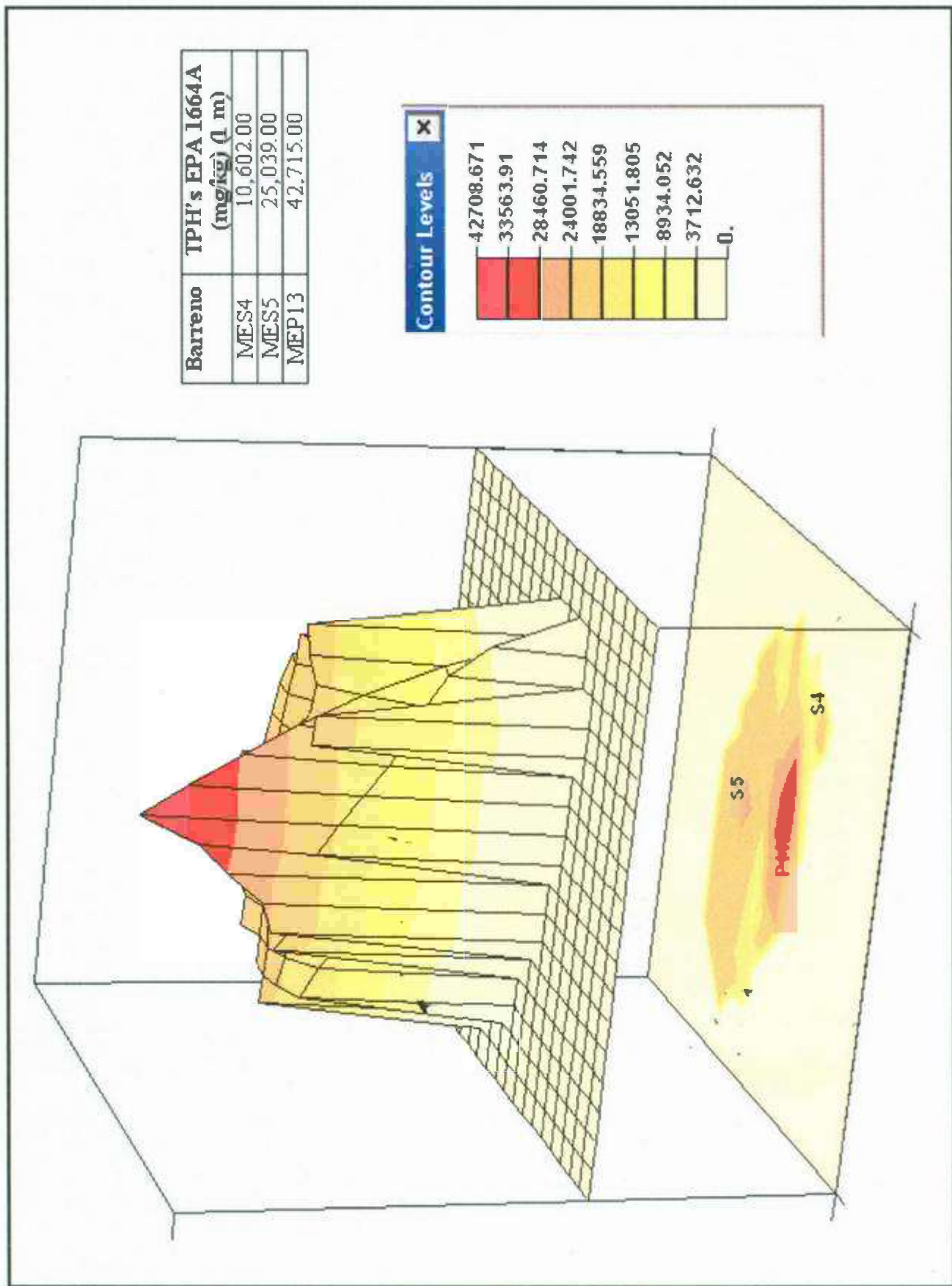


Figura 5.1 Distribución de concentración de hidrocarburo fracción pesada en mg/kg BS a 1 m de profundidad.

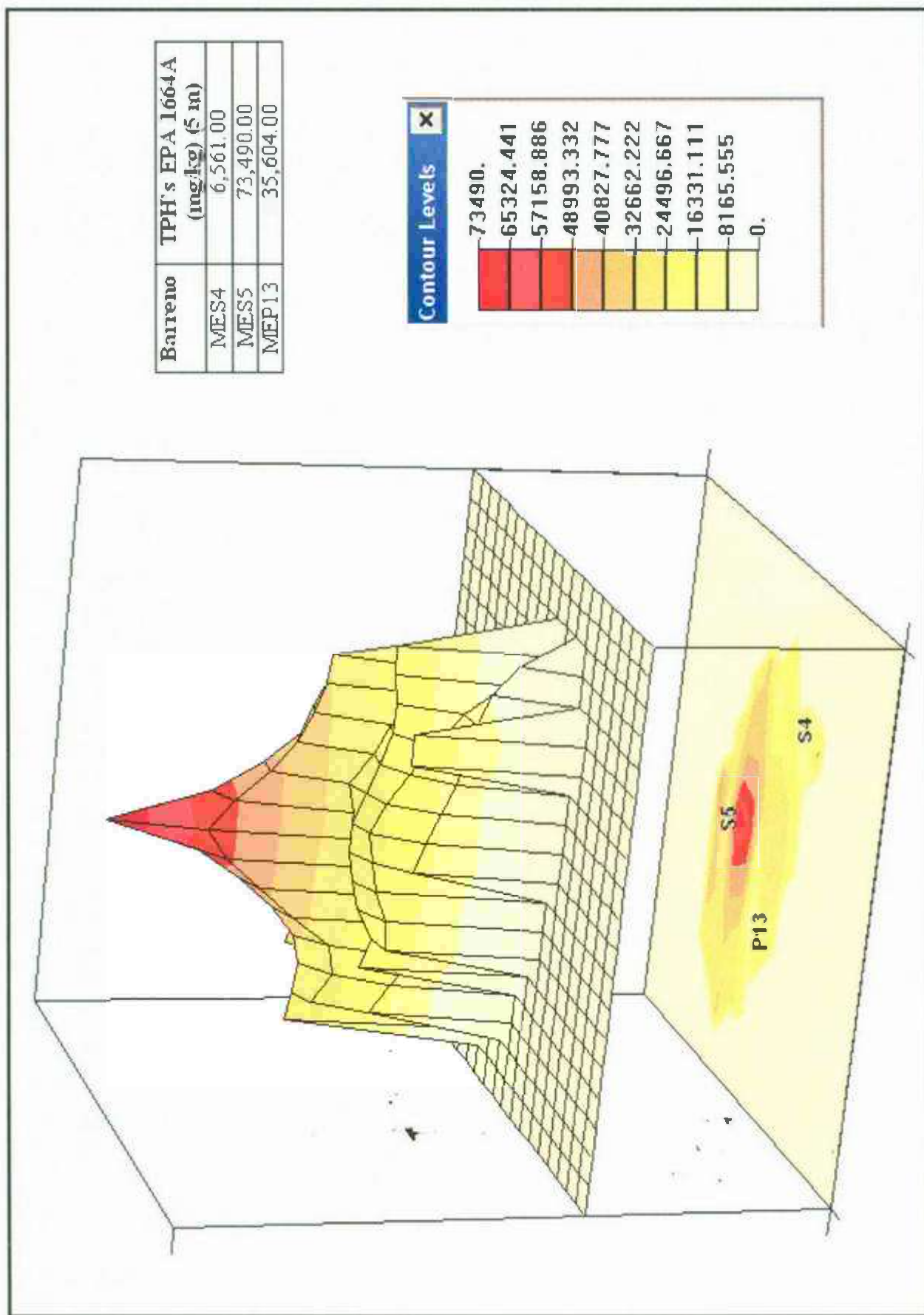


Figura 5.2 Distribución de concentración de hidrocarburo fracción pesada en mg/kg BS a 5 m de profundidad.

En la modelación se distingue que la zona de muestreo MES5 es, al parecer, el punto de inyección donde se concentran los valores e incrementan las tasas de infiltración hacia el subsuelo del hidrocarburo, en especial a partir de los 5 m de profundidad.

5.3 Efecto de la Bioatenuación Natural *In-situ* en el Contaminante

En el estrato de 1 m no se tienen concentraciones tan elevadas de hidrocarburo fracción pesada como a los 5 m, por lo tanto será a esta última profundidad en la que se determine el tiempo requerido para reducir al contaminante hasta el LMP que le corresponda. Sin embargo es interesante y conveniente conocer la situación de contaminación en este lecho poroso debido a que se encuentra fuera de Norma.

Al realizar la simulación de la atenuación natural del contaminante a 1 m de profundidad, se obtiene una reducción bastante adecuada de su concentración y por lo tanto de su efecto potencial como agente nocivo (Figura 5.3). A pesar de que la modelación se efectuó a 20 años, es alrededor de los 12 en que el contaminante se reduce a un nivel menor que el LMP de 6,000 mg/kg que establece la Norma en suelos, sin embargo como anteriormente se comentó, la pauta de la modelación viene dada por el hidrocarburo de mayor profundidad que es el mas presente en el lugar.

Con el fin de establecer el sitio impactado por hidrocarburos en su fracción pesada dentro de un marco legalmente aceptable se procedió a realizar la simulación a los 5 m de profundidad evaluando la atenuación natural del petroderivado. Los resultados que mostró la modelación revelan que el contaminante apenas logra reducirse por debajo de los 6,000 mg/kg, objetivo a alcanzar, después de los 20 años en que se encuentra sujeto a los procesos de biodegradación (Figura 5.4). La razón de esta prolongación es debido a la contaminación tan grande que existe y aún cuando se tienen buenas condiciones del medio poroso (pH, humedad, porosidad, nutrientes, cadenas microbiológicas) para ejecutar la destrucción del contaminante no es posible hacerlo en un tiempo menor a no ser que se intervenga con técnicas complementarias.

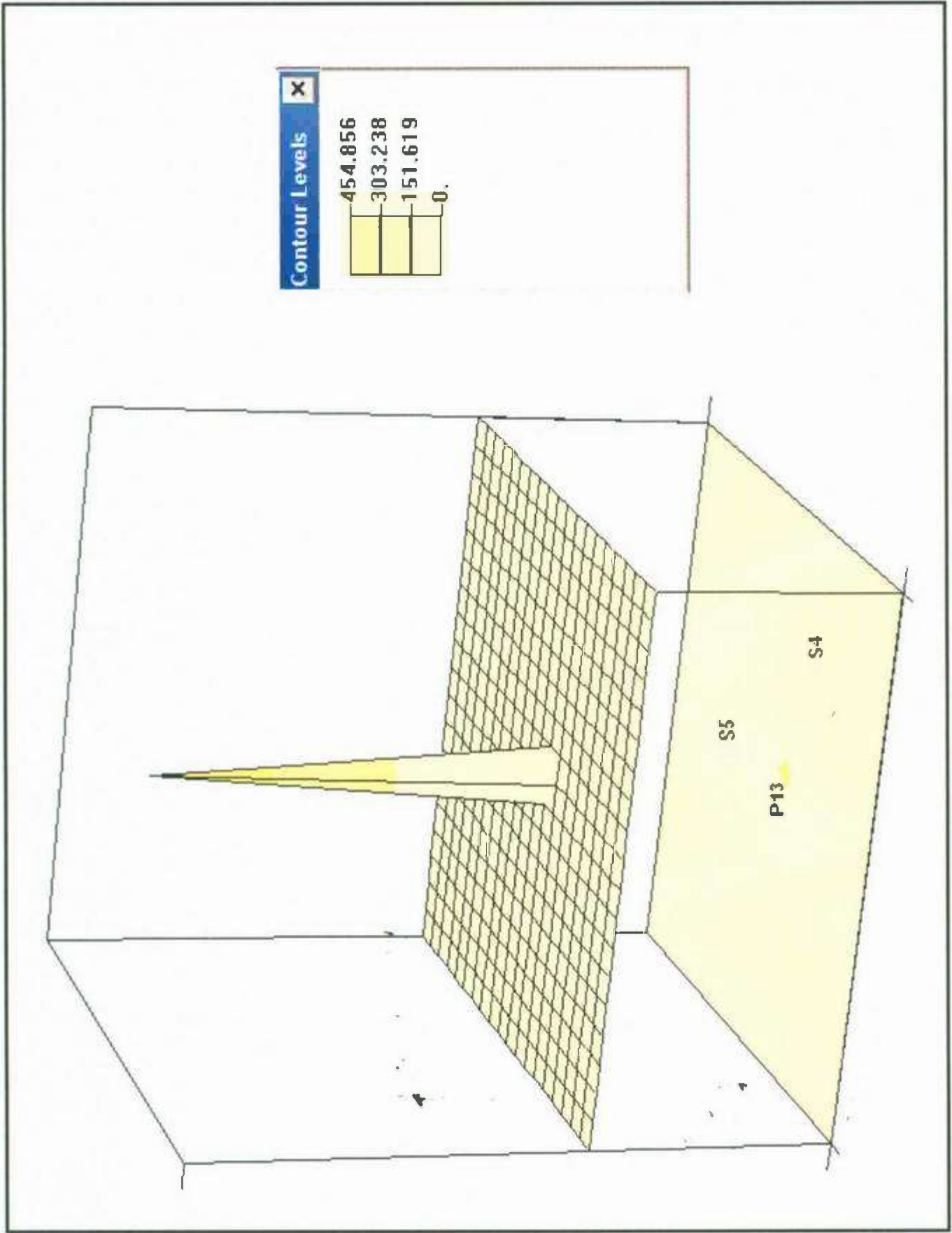


Figura 5.3 Atenuación natural del contaminante a 1 m de profundidad tras una simulación a 20 años.

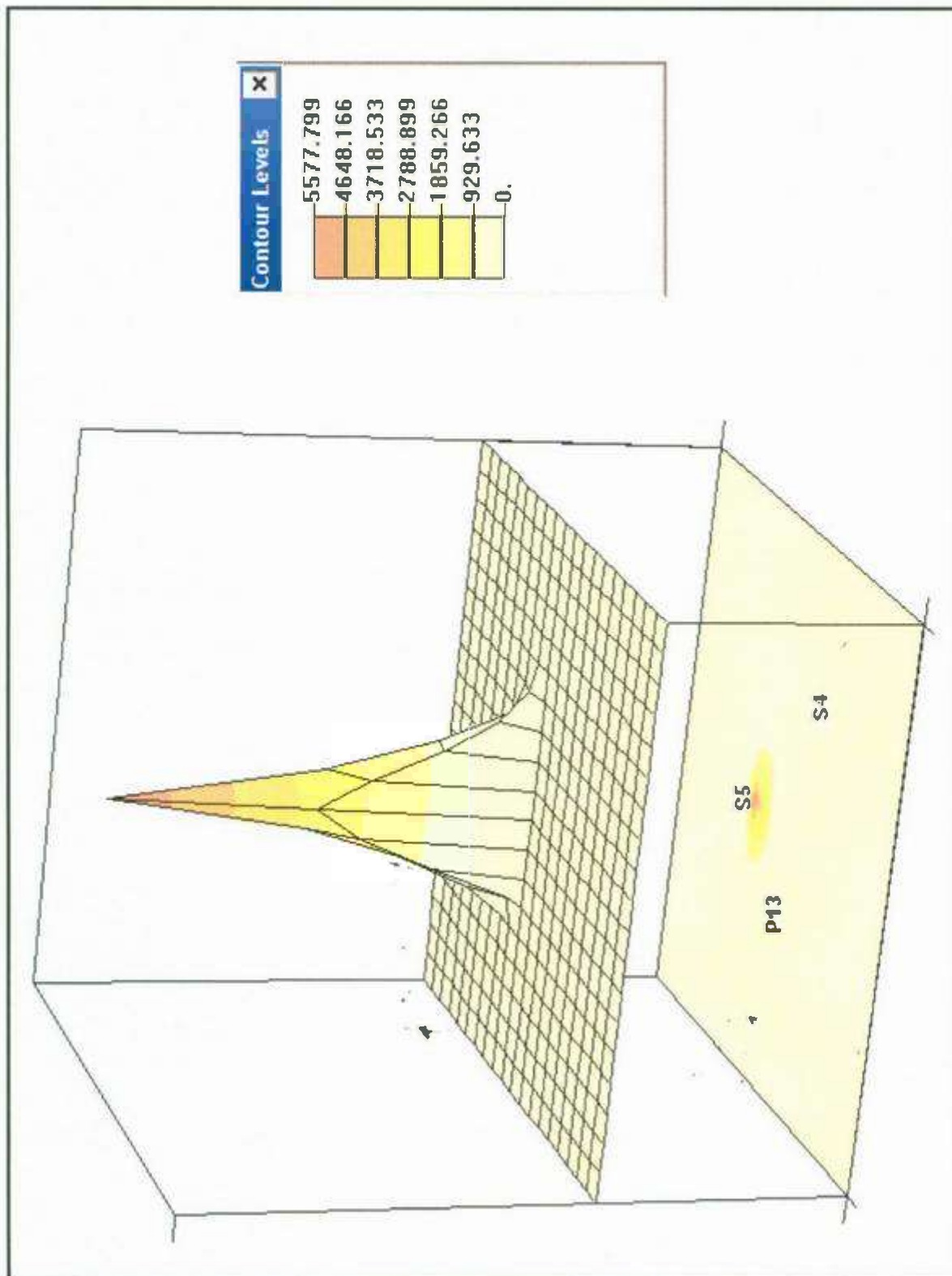


Figura 5.4 Atenuación natural del contaminante a 5 m de profundidad tras una simulación a 20 años.

5.4 Disminución al Complejo de Agentes Receptores de Electrones

De igual manera, en una modelación a 20 años, los agentes aceptores de electrones estudiados fueron el oxígeno y el nitrato puesto que para estas condiciones del estrato son los de mayor influencia en la biodegradación del contaminante. En el caso del oxígeno se consideró una reacción instantánea mientras que para el nitrato se evaluó como una reacción de decaimiento de primer orden ocurriéndose en primera instancia el agotamiento del oxígeno. De ahí que el escenario de la atenuación natural sucede en un sistema facultativo en el que el metabolismo microbiológico inicialmente es aerobio pero conforme empieza a disminuir la concentración de oxígeno (medio anóxico) pasa a ser un sistema anaerobio. La saturación hídrica del suelo reduce el oxígeno pues todos los poros del suelo están llenos de agua y ésta difícilmente se renueva, agotándose en poco tiempo el oxígeno disuelto en ella debido a la actividad metabólica de microorganismos del suelo (Huang *et al.*, 2006).

A 1 m de profundidad se observa una gran reducción de oxígeno comparada con la acción oxidante del nitrato. En algunas zonas en donde se presentan focos importantes de contaminación, la concentración del oxígeno se muestra claramente disminuida, sobretodo en la región del punto MEP13 donde se localiza la mayor afectación de hidrocarburo a lo largo de este estrato (Figura 5.5).

La contaminación de hidrocarburo fracción pesada más preocupante observada en los interiores del lugar se encuentra a los 5 m de profundidad, específicamente en el punto MES5 con 73,490 mg/kg. Debido a esto, será el lecho que requiera de mayor disposición bacteriana que logre la biocorrección natural en el tiempo necesario. Se observa que la concentración de oxígeno disminuye aún más que a 1 m de profundidad debido a la demanda metabólica por parte de los organismos autóctonos. Lo mismo sucede para el nitrato, y es lógico de pensar debido a las altas concentraciones de hidrocarburo detectadas en el sitio de análisis (Figura 5.6).

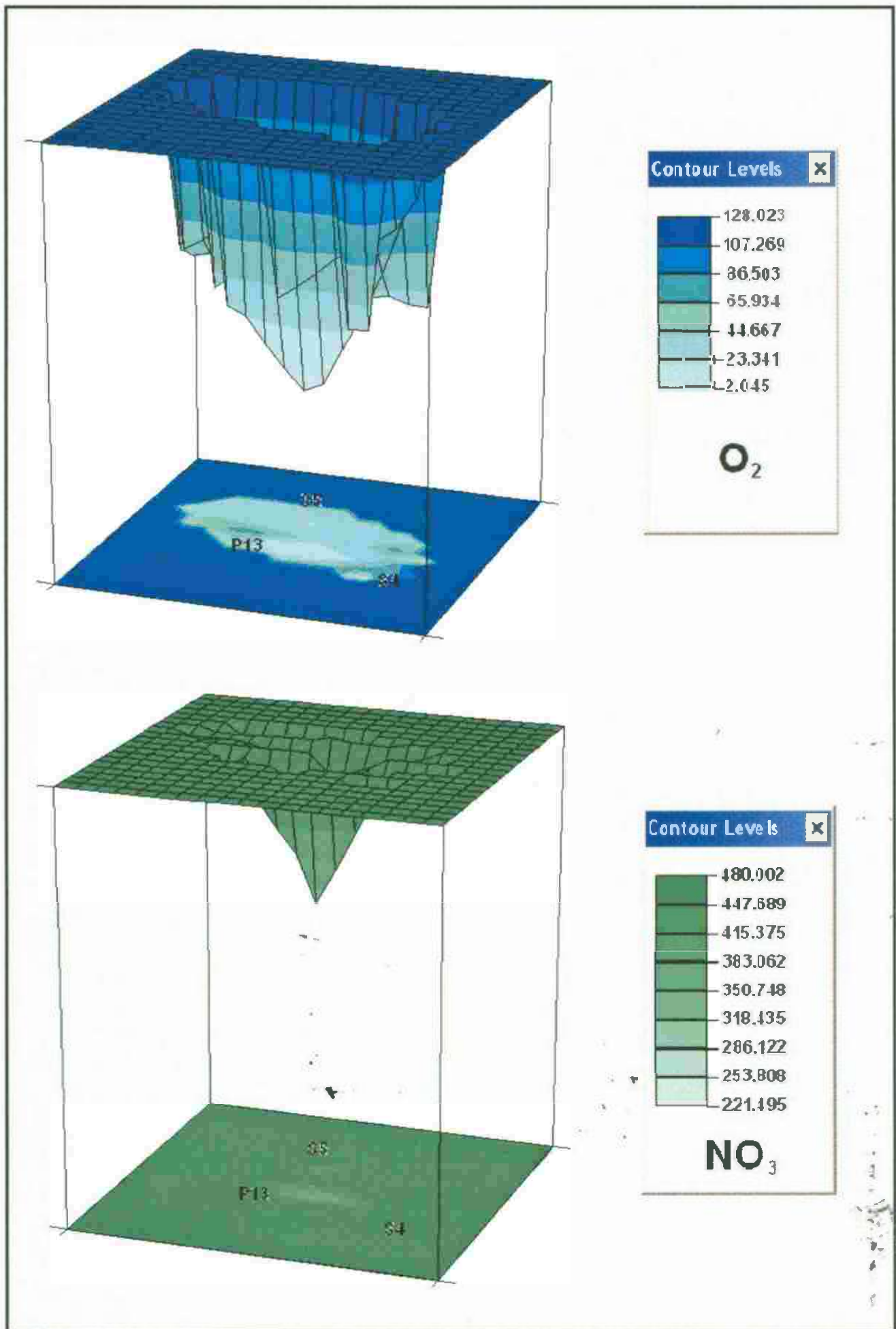


Figura 5.5 Disminución de agentes oxidantes al complejo (1 m de profundidad).

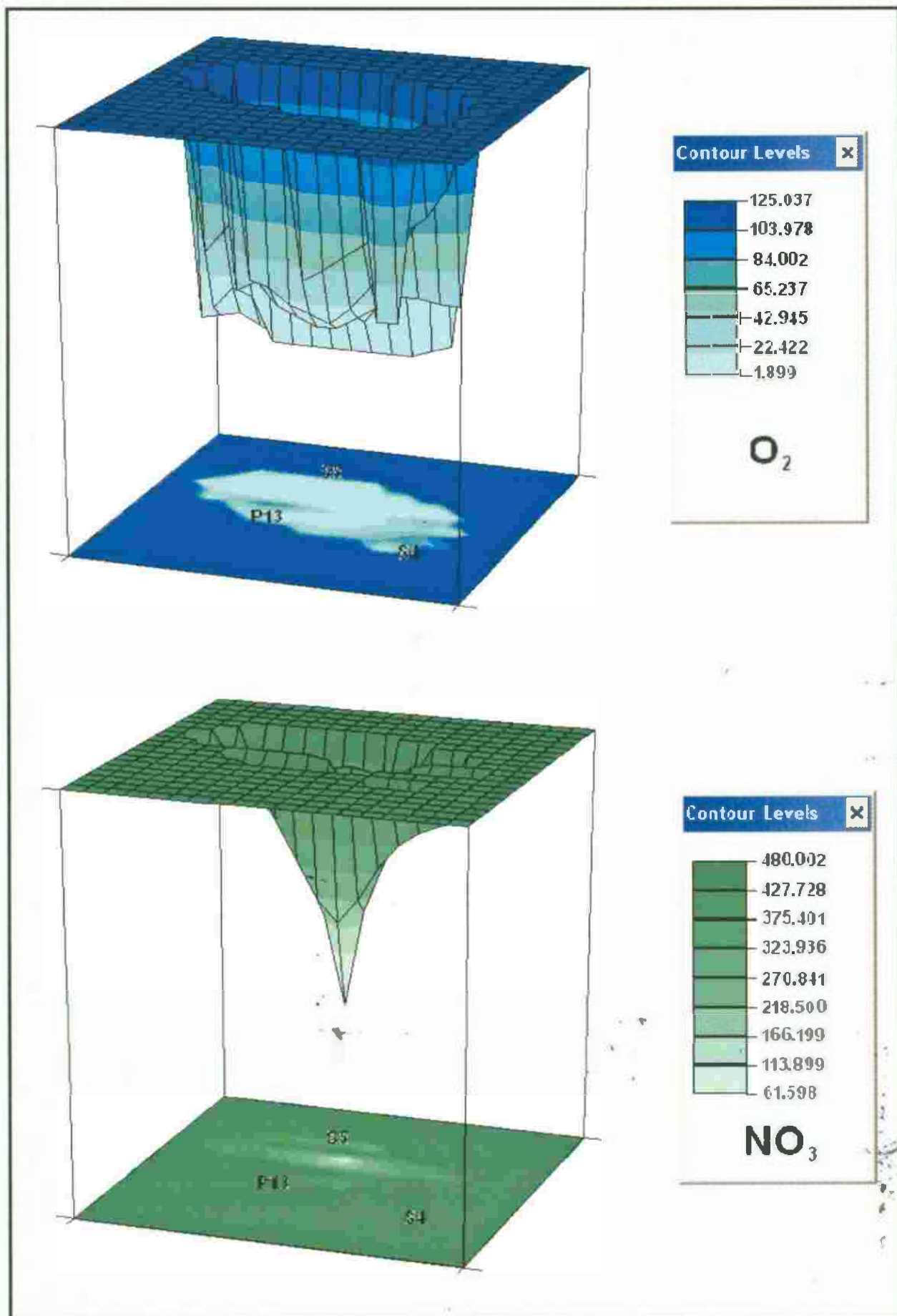


Figura 5.6 Disminución de agentes oxidantes al complejo (5 m de profundidad).

5.5 Biocorrección Natural del Sitio Impactado según Norma Aplicable

El tiempo necesario para alcanzar los niveles de limpieza establecidos en la NOM-138-SEMARNAT/SS-2003 para suelo impactado por hidrocarburos, según la simulación realizada, se encuentra en el orden de los 20 años y posterior. El contaminante hidrocarburo fracción pesada, en su afectación más alarmante (5 m de profundidad, punto MES5), disminuye su concentración a 5577.799 mg/kg, apenas por debajo de los 6,000 mg/kg reconocido como LMP particular.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

En el lugar de estudio se cuenta con una contaminación de hidrocarburo fracción pesada que sobrepasa la Norma Oficial Mexicana NOM-138-SEMARNAT/SS-2003 específica para suelos afectados por hidrocarburos. El contaminante presenta su mayor impacto sobre el subsuelo a los 5 m de profundidad manteniendo una concentración máxima de hidrocarburo de 73,490.00 mg/kg.

Del análisis de los resultados de la modelación y curvas de isoconcentración se puede concluir que el suelo en el sitio presenta muy buena capacidad de atenuación natural del contaminante objeto de estudio. La biocorrección natural *in-situ* ocurre primeramente a 1 m y subsecuentemente a los 5 m de profundidad, considerando mantenerse dentro del Limite Máximo Permisible de 6,000 mg/kg establecido en Norma.

La prolongación de la biocorrección natural del sitio va depender ciertamente del lecho o sustrato mayormente impactado por el hidrocarburo fracción pesada puesto que requerirá de esfuerzos microbiológicos más profundos y concisos para alcanzar la calidad deseada del suelo y evitar un riesgo potencial a la salud.

Únicamente se estudió el efecto del oxígeno y nitrato como agentes aceptores de electrones puesto que para las condiciones del estrato (elevaciones no muy profundas) son los de mayor influencia en la biodegradación del contaminante, tal y como lo demuestra la modelación. El caso del oxígeno es el que presenta una mayor reducción en concentración, claramente diferenciable de la disminución del nitrato, lo que indica que

la metabolización de los microorganismos encargados de la eliminación del contaminante se desenvuelve en un sistema mayormente aerobio.

El tiempo necesario para alcanzar los niveles de limpieza establecidos en la NOM-138-SEMARNAT/SS-2003 (debajo de 6,000 mg/kg) para suelos impactados por hidrocarburos fracción pesada, según el modelo conceptual desarrollado, es a partir de los 20 años en que la misma atenuación natural logre dicha reducción de contaminante.

6.2 Recomendaciones

A raíz de que la simulación es simplemente el resultado de la información concebida en un modelo conceptual, es importante hacer énfasis en que se está considerando la predicción atenuante del hidrocarburo en el plazo correspondiente sin hacer apremio a una situación manifestante de contaminación posterior a la documentada por esta investigación. Por lo tanto, debido a los indicios de contaminación generada por la entidad concesionaria del lugar, sería recomendable detener este tipo de prácticas contaminantes y/o hacer los ajuste correctivos en el plan operacional para la descarga y manejo de diesel y aceites diversos utilizados en el Taller para por lo menos minimizar las situaciones de riesgo de daño al ecosistema.

Según la modelación, se requerirá del proceso atenuativo durante 20 años para que el contaminante hidrocarburo en su fracción pesada pueda establecerse dentro de los niveles de limpieza normados. Si se buscara conseguir este objetivo en un periodo más corto, se recomienda realizar la implementación de cadenas microbiológicas que aceleren la biodegradación del contaminante. Aun mas, una técnica que resultaría muy conveniente según la situación de lugar y el análisis de la simulación, es la inyección de agentes oxidantes, sobretodo de oxígeno que es el principal causante de la mineralización del compuesto orgánico, por lo menos en los estratos estudiados.

Considerando la localización de la afectación del hidrocarburo dentro de las instalaciones y más aún, las condiciones de operación de las mismas y las propiedades físico-químicas y microbiológicas del medio poroso, la atenuación natural del contaminante, a través de los estudios de predicción, resulta ser una técnica de empleo bastante eficaz y recomendable siempre y cuando los periodos de restauración no sean próximos a lo inmediato.

De igual forma, se sugiere realizar una ampliación de la estrategia de muestreo con el fin de captar el hidrocarburo que pudiera estar afectando otras zonas circundantes. Así, se podría desarrollar una simulación más completa de la distribución del contaminante dentro de sitio y los efectos de la bioatenuación natural sobre el mismo a través del tiempo.

Una recomendación importante es la de continuar realizando estudios pertinentes dentro del Taller, como serían las series de tiempo, de tendencias o incluso cadenas de Markov (probabilidad de ocurrencia de un evento) con el fin prever y prevenir algún caso de contaminación grave en el suelo, subsuelo e incluso en el manto freático del acuífero somero.

Con base a los resultados de la modelación, se sugiere que la autoridad competente (SEMARNAT/PROFEPA), analice con particular cuidado la decisión de liberar el sitio, ya que se evidencia una alta contaminación de hidrocarburo por lo menos en la fracción pesada, objeto de estudio del presente.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anderson, M.P. and W.W. Woessner (1992) Applied Groundwater Modeling, Academic Press, San Diego, CA.
- Borden, R. C. & P. B. Bedient (1986) Transport of Dissolved Hydrocarbons Influenced by Oxygen-Limited Biodegradation: 1. Theoretical Development, Water Resources Research, 13:1973-1982
- Dobson, L., Wilson, H.A. (1964) Respiration Studies on Soil Treated with Some Hydrocarbons. Sociedad Americana de Ciencias del Suelo. Proc. 21: 536-539
- Evgin, E., Amor, F.B., Altaee. A. (1989) Effect of an Oil Spill on Soil Properties. Octava Conferencia Internacional sobre Mecanismos Offshore e Ingeniería en el Ártico. Holanda. pp. 715-720
- Flores, N. (2001) Utilización de Lodos Residuales en la Restauración de Suelos Contaminados con Hidrocarburos. VI Congreso Nacional de Ciencias Ambientales, Pachuca; México
- Huang Y.F., G.H. Huang, G.Q. Wang, Q.G. Lin & A. Chakma (2006) An Integrated Numerical and Physical Modeling System for an Enhanced *in-situ* Bioremediation Process. Institute of River and Coastal Engineering, Tsinghua University, Beijing, China
- Kawala Z. (2000) Modern Remediation Techniques for Contaminated Soils. Inst. Inz. Chem. i Urzadzen Cieplnych, Politech. Wroclawska, Wroclaw, Pol. Technologia Chemiczna na Przelomie Wiekow. Publisher: Wydawnictwo Stalego Komitetu Kongresow Technologii Chemicznej, Gliwice, Pol. pp. 697-706
- Kim, S.B. (2004) Equilibrium Approaches to Organic Contaminant Transport Modeling in a Multi-phase Groundwater System. School of Biological Resources and Materials Engineering, Seoul National University, Seoul, S. Korea. Environmental Technology (2004). 25 (8), 873-880
- Konikow, L.F. and J.D. Bredehoeft (1978 & 1989) "Computer Model of Two-Dimensional Solute Transport and Dispersion in Ground Water," Techniques of

Water Resources Investigation of the United States Geological Survey, Book 7, Reston, VA.

- Lee, K.Y.; Kostarelos, K.; Fenell, D.E. (2004) Modeling the Transport of Dissolved Contaminants Originating from a Nonaqueous Phase Liquid Source Containing Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Compounds in Groundwater. Department of Civil and Environmental Engineering, Rutgers, The State University of New Jersey, Piscataway, NJ, USA. *Journal of Environmental Engineering and Science*, 3 (6), 541-548
- Martínez M.V.E., López S.F. (2000) Efecto de Hidrocarburos en las Propiedades Físicas y Químicas de Suelo Arcilloso. Instituto Mexicano del Petróleo, Laboratorio de Remediación de Suelos. Distrito Federal, México. *Ciencia Nativa. Proc.* 12: 51-54
- Montiel, J.A. (2007) Evaluación de la Contaminación y Simulación de su Dinámica Espacial en el Acuífero Somero de un Suelo Impactado por Hidrocarburos en la Cd. de Mexicali, B.C. Postgrado en Ciencias de la Ingeniería, Universidad de Sonora
- Maroto, A. & Quesada E. (2000) Aplicación de Sistemas de Biorremediación de Suelos y Aguas Contaminadas por Hidrocarburos. División de Protección Ambiental de Suelos, GEOCISA, España
- Morgan, P., Watkinson, R. J. (1989) Hydrocarbon Degradation in Soils and Methods for Soils Biotreatment. *CRC Critical Rev. in Biotechnol.* 8: 308-310
- Newell, C.J., R.K. McLeod, and J.R. Gonzales (1996) BIOSCREEN Natural Attenuation Decision Support System User's Manual, Version 1.3, EPA/600/R-96/087. Robert S. Kerr Environmental Research Center, Ada, OK
- NOM-138-SEMARNAT/SS-2003. Límites Máximos Permisibles de Hidrocarburos en Suelos y las Especificaciones para su Caracterización y Remediación. Estados Unidos Mexicanos
- Plice, M.J. (1948) Some Effects of Crude Petroleum on Soil Fertility. *Sociedad Americana de Ciencias del Suelo. Proc.* 14: 413-416
- PROFEPA (Procuraduría Federal de Protección al ambiente) (2002) Emergencias ambientales. Delegación Tabasco, Villahermosa Tabasco. p. 13

Rifai, H. S., P. B. Bedient, J. T. Wilson, K. M. Miller, and J. M. Armstrong (1998)
“Biodegradation Modeling at Aviation Fuel Spill Site,” *Journal of Environmental
Engineering*, 114(5):1007-1029

U.S. EPA 542-F-96-026 (1996) *Guía del ciudadano: Atenuación natural*, EUA