



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

**CARACTERIZACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS
CON HIDROCARBUROS EN UNA EMPRESA MINERA Y
DESARROLLO DE UN MÉTODO BIOLÓGICO PARA SU
REMEDIACIÓN**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN INGENIERÍA

(AMBIENTAL)

PRESENTA

ING. JOSÉ ENRIQUE SANTOS JALLATH

Tutor: M. en C. Margarita E. Gutiérrez Ruiz

A **Alejandrina**

con mucho amor, por todo lo que hemos compartido juntos y por lo que seguiremos compartiendo, ahora con nuestros hijos,fuiste lo mejor que me pudo haber pasado en la maestría.

A **María y Andrés**, porque ellos son el motivo para seguir adelante y porque llenan nuestras vidas de alegría;aunque a veces se porten mal.

A la memoria de mi madre, la **Señora Elenita**, porque nunca me has dejado.

A mi paso **Andrés**, porque tus enseñanzas me han hecho un hombre responsable y honesto. Y a **Zenaida**, por el cariño que nos has brindado.

A mis manis **Andrea** y **Laura**, con todo el amor que les tengo y por todo lo que me han dado. Y por supuesto a **Efraín** y a **Elena** con inmenso cariño.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco sinceramente al Consorcio Minero Benito Juárez Peña Colorada por el interés y apoyo brindado para la realización de este proyecto. En especial a los ingenieros Miguel Ángel Ramos Molina, Humberto Rodríguez Borjas, Rafael Guerra Barajas y Antonio Aguilar Casillas, por su amistad. Y a todo el personal de la empresa que en éste, o en otros proyectos, han demostrado su compromiso con la conservación del ambiente.

A Margarita E. Gutiérrez Ruiz por los varios años compartidos, por las enseñanzas y discusiones que me ayudaron a crecer profesionalmente, y por supuesto, por su amistad.

A Luis Torres Bustillos por el tiempo dedicado a la revisión de este trabajo y por sus valiosas observaciones que me ayudaron a mejorarlo sustancialmente.

A Rosario Iturbe Argüelles por su participación en el trabajo de campo que fue fundamental para la culminación del proyecto. Y también por las palabras de aliento que en varias ocasiones me ha dado.

A Laura Ortiz Hernández y a Enrique Sánchez Salinas, primero que nada por su amistad, y después por su participación en este trabajo y por todo lo que aprendí de ellos.

A mis queridos compañeros y amigos del Laboratorio de Análisis Físicos y Químicos del Ambiente y de CIMA, que durante muchos años me alentaron para la culminación de este trabajo, y finalmente aquí está.

ÍNDICE

<u>Resumen</u>	1
1. <u>Introducción</u>	2
1.1. Objetivo	5
1.2. Alcances	6
2. <u>Marco conceptual</u>	7
2.1. Conceptos generales	7
2.1.1. Hidrocarburos del petróleo	7
2.1.2. Contaminación de suelos con hidrocarburos	17
2.1.3. Marco legal	20
2.1.4. Métodos biológicos de remediación	26
2.1.5. Descripción del método de biolabranza	34
2.2. Antecedentes del sitio de estudio	39
2.2.1. Operaciones de la empresa minera	39
2.2.2. Usos y manejo de los hidrocarburos	40
2.2.3. Ubicación de los sitios afectados	44
2.2.4. Características de la afectación	45
3. <u>Metodología aplicada</u>	51
3.1. Caracterización de los sitios	51
3.1.1. Consideraciones generales	54
3.1.2. Muestreo	56
3.1.3. Criterios de evaluación	61
3.1.4. Estimación del volumen de suelo afectado	61
3.2. Selección del método de remediación	62
3.2.1. Criterios de selección	62
3.2.2. Planteamiento del estudio de tratabilidad	63
3.2.3. Evaluación preliminar	64
3.3. Pruebas a nivel laboratorio	65
3.3.1. Preparación de las muestras para laboratorio	65
3.3.2. Aislamiento de bacterias	65
3.3.3. Pruebas de biodegradación	67
3.3.4. Pruebas de bioestimulación	67
3.4. Pruebas en campo	68
3.4.1. Preparación de las muestras para campo	69
3.4.2. Caracterización de los lodos de la planta de tratamiento	69

3.4.3.	Pruebas con lodos de la planta de tratamiento	69
3.4.4.	Pruebas con medio mineral	72
4.	Resultados	73
4.1.	Caracterización de los sitios	73
4.1.1.	Concentración de hidrocarburos en el suelo	73
4.1.2.	Volumen de suelo afectado	83
4.2.	Evaluación preliminar	83
4.3.	Pruebas a nivel laboratorio	86
4.3.1.	Caracterización de las muestras para laboratorio	86
4.3.2.	Aislamiento de bacterias	86
4.3.3.	Pruebas de biodegradación con bacterias	87
4.3.4.	Pruebas de bioestimulación	90
4.4.	Pruebas en campo	91
4.4.1.	Caracterización de las muestras para campo	91
4.4.2.	Caracterización de lodos	92
4.4.3.	Pruebas con lodos de la planta de tratamiento	95
4.4.4.	Pruebas con medio mineral	106
5.	Diseño y construcción de la celda de tratamiento	110
5.1.	Consideraciones generales	110
5.2.	Ubicación del sitio para el tratamiento	111
5.3.	Diseño conceptual del sistema de tratamiento	113
5.4.	Celda de tratamiento	116
5.4.1.	Superficie requerida	119
5.4.2.	Bordo perimetral	121
5.4.3.	Basamento	123
5.4.4.	Sistema de drenaje y captación de lixiviados	128
5.4.5.	Sistema de irrigación de lodos	129
5.4.6.	Bordo de contención	130
5.5.	Parámetros de operación	130
5.5.1.	Relación suelo / lodos	130
5.5.2.	Cantidad de nutrimentos	131
5.5.3.	Humedad	132
5.5.4.	Aireación	134
5.5.5.	pH	134
5.5.6.	Temperatura	135
5.6.	Operación del proceso	135
5.6.1.	Remoción del suelo contaminado	136

5.6.2.	Colocación del suelo dentro de la celda y caracterización	136
5.6.3.	Adición de lodos	136
5.6.4.	Aireación	137
5.6.5.	Registro de datos	137
5.7.	Muestreo para el seguimiento del proceso	138
5.7.1.	Caracterización inicial	138
5.7.2.	Muestreo de control	139
5.7.3.	Análisis	141
5.8.	Construcción de la celda	141
5.8.1.	Aspectos generales	141
5.8.2.	Detalles de la construcción	142
5.8.3.	Inversión y costos	146
6.	<u>Conclusiones y recomendaciones</u>	149
6.1.	Conclusiones	149
6.2.	Recomendaciones	151
	<u>Bibliografía</u>	153
	Apéndice 1: Características del medio físico y biológico	
	Apéndice 2: Estimación del volumen de suelo contaminado	
	Apéndice 3: Cálculo de la altura del bordo perimetral de la celda de tratamiento	
	Apéndice 4: Cálculo de la cantidad de nitrógeno y fósforo en los lodos agregados	

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1.	Hidrocarburos por analizar en función del producto contaminante (señalados en la NOM-138-SEMARNAT/SS-2003)	24
Cuadro 2.	Límites máximos permisibles para fracciones de hidrocarburos en suelos (NOM-138-SEMARNAT/SS-2003)	25
Cuadro 3.	Límites máximos permisibles para hidrocarburos específicos en suelos (NOM-138-SEMARNAT/SS-2003)	25
Cuadro 4.	Consumo de aceites, grasas y combustibles. Mina	43
Cuadro 5.	Consumo de aceites, grasas y combustibles. Planta de paletizado	43
Cuadro 6.	Composición del medio mineral para pruebas de bioestimulación	66
Cuadro 7.	Arreglo de los cajones en las pruebas con lodos	70
Cuadro 8.	Cantidad de lodos agregada durante las pruebas	71
Cuadro 9.	Concentración de HTP (mg/kg) en el taller La Encantada	73
Cuadro 10.	Concentración de HTP (mg/kg) en el Polvorín	76
Cuadro 11.	Concentración de HTP (mg/kg) en la fosa de recepción de combustóleo	78
Cuadro 12.	Concentración de HTP (mg/kg) en el tanque de diesel en la zona de embarque	81
Cuadro 13.	Volumen estimado de suelos afectado	83
Cuadro 14.	Resultados de pH y C.E. en muestras iniciales de suelo	83
Cuadro 15.	Características texturales de muestras iniciales de suelo	84
Cuadro 16.	Concentración de HTP en muestras iniciales de suelo	84
Cuadro 17.	Cuenta viable de microorganismos heterotróficos en muestras iniciales de suelo	85
Cuadro 18.	Concentración de HTP en suelo para las pruebas de laboratorio	86
Cuadro 19.	Bacterias identificadas en suelos contaminados y lodos de la planta de tratamiento	87
Cuadro 20.	Degradación de hidrocarburos con bacterias nativas (pruebas de bioestimulación)	90
Cuadro 21.	Cuenta viable de microorganismos en las pruebas de bioestimulación	91
Cuadro 22.	Concentración de HTP en muestras de suelo para las pruebas en campo con lodos	92
Cuadro 23.	Concentración de HTP en muestras de suelo para las pruebas en campo con medio mineral	92
Cuadro 24.	Caracterización física y química de lodos de la planta de tratamiento	93
Cuadro 25.	Cuenta viable de microorganismos heterotróficos en lodos de la planta de tratamiento	93
Cuadro 26.	Coliformes totales en lodos de la planta de tratamiento	93
Cuadro 27.	Coliformes fecales en lodos de la planta de tratamiento	94
Cuadro 28.	Estreptococos fecales en lodos de la planta de tratamiento	94
Cuadro 29.	Parásitos en lodos de la planta de tratamiento	94
Cuadro 30.	Degradación de hidrocarburos en las pruebas de campo con lodos	96
Cuadro 31.	Cajones con mejor degradación en las pruebas con lodos	102
Cuadro 32.	Cuenta viable de microorganismos heterotróficos en las pruebas con lodos	103
Cuadro 33.	Presencia de huevos de helmintos en los cajones de las pruebas con lodos	104

Cuadro 34.	Presencia de estreptococos fecales en los cajones de las pruebas con lodos	105
Cuadro 35.	Presencia de Salmonella spp en los cajones de las pruebas con lodos	106
Cuadro 36.	Degradación de hidrocarburos en las pruebas de campo con medio mineral	107
Cuadro 37.	Cuenta viable en las pruebas de campo con medio mineral	108
Cuadro 38.	Precipitación pluvial medida en la estación meteorológica de Minatitlán	122
Cuadro 39.	Cantidad de lodos agregada semanalmente en las pruebas de campo	131
Cuadro 40.	Cantidad de nutrimentos por agregar en la prueba de escalamiento	132
Cuadro 41.	Costos de inversión para la construcción de la celda	147
Cuadro 42.	Costos de operación estimados para un lote de 300 toneladas	147
Cuadro 43.	Inversión estimada para la instalación del método analítico por gravimetría	148

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Diagrama de flujo del proceso de la mina	41
Figura 2.	Diagrama de flujo del proceso de la planta de peletizado	42
Figura 3.	Área de mantenimiento del taller La Encantada acceso almacén	45
Figura 4.	Área de mantenimiento del taller La Encantada patio general y rampa de lava	46
Figura 5.	Caseta de descarga del diesel en el taller La Encantada	46
Figura 6.	Estación para cargar diesel en el taller La Encantada	47
Figura 7.	Almacén de aceites gastados en el taller La Encantada	47
Figura 8.	Zona para cargar el nitrato de amonio en el Polvorín	48
Figura 9.	Fosa de recepción de combustóleo, tanque de almacenamiento y casa de bombas	49
Figura 10.	Tanque de diesel en la zona de embarque	49
Figura 11.	Diagrama de flujo de la metodología aplicada en las Etapas 1 y 2	52
Figura 12.	Diagrama de flujo de la metodología aplicada en las Etapas 3 y 4	53
Figura 13.	Diagrama de flujo de la metodología aplicada en la Etapa 5	54
Figura 14.	Ubicación de los puntos de muestreo en el taller La Encantada	57
Figura 15.	Ubicación de los puntos de muestreo en el Polvorín	58
Figura 16.	Ubicación de los puntos de muestreo en la fosa de recepción de combustóleo	59
Figura 17.	Ubicación de los puntos de muestreo en el tanque de diesel de la zona de embarque	60
Figura 18.	Sitio acondicionado para realizar las pruebas de campo	68
Figura 19.	Acomodo de los cajones dentro del lugar de experimentación	68
Figura 20.	Concentración de HTP en el taller La Encantada	75
Figura 21.	Concentración de HTP en el Polvorín	77
Figura 22.	Concentración de HTP en la fosa de recepción de combustóleo	80
Figura 23.	Concentración de HTP en el tanque de diesel en la zona de embarque	82
Figura 24.	Cromatografía de gases de una muestra de diesel	88
Figura 25.	Cromatografía de gases de una muestra de diesel con la bacteria <i>Serratia plymuthica</i> (después de 7 días)	88
Figura 26.	Cromatografía de gases de una muestra de combustóleo	89
Figura 27.	Cromatografía de gases de una muestra de combustóleo con la bacteria <i>Serratia plymuthica</i> (después de 7 días)	89
Figura 28.	Degradación de hidrocarburos con bacterias nativas en las pruebas de bioestimulación	90
Figura 29.	Degradación de hidrocarburos en el suelo del polvorín C1 (prueba con lodos)	98
Figura 30.	Degradación de hidrocarburos en el suelo del polvorín C2 (prueba con lodos)	98
Figura 31.	Degradación de hidrocarburos en el suelo de La Encantada C1 (prueba con lodos)	99
Figura 32.	Degradación de hidrocarburos en el suelo de La Encantada C2 (prueba con lodos)	99
Figura 33.	Degradación de hidrocarburos en el suelo de la fosa de combustóleo C1 (prueba con lodos)	100

Figura 34.	Degradación de hidrocarburos en el suelo de la fosa de combustóleo C2 (prueba con lodos)	100
Figura 35.	Degradación de hidrocarburos en el suelo del tanque de diesel en la zona de embarque C1 (prueba con lodos)	101
Figura 36.	Degradación de hidrocarburos en el suelo del tanque de diesel en la zona de embarque C2 (prueba con lodos)	101
Figura 37.	Degradación de hidrocarburos en suelo de La Encantada con medio mineral	107
Figura 38.	Sitio para la construcción de la celda de tratamiento	112
Figura 39.	Diagrama de flujo del sistema de tratamiento	115
Figura 40.	Celda para el tratamiento del suelo contaminado	118
Figura 41.	Dimensiones de la celda de tratamiento (vista en planta)	124
Figura 42.	Sección longitudinal de la celda de tratamiento.(sección A-A')	125
Figura 43.	Sección transversal de la celda de tratamiento (sección B-B')	127
Figura 44.	Arreglo del sistema de captación de lixiviados	128
Figura 45.	Arreglo del sistema de irrigación de lodos	129
Figura 46.	Plan de muestreo para el seguimiento de la prueba de escalamiento	140
Figura 47.	Capa de arcilla y bordo perimetral de la celda de tratamiento	142
Figura 48.	Celda terminada con la base de concreto y el bordo perimetral con revestimiento de cemento	143
Figura 49.	Vista panorámica con los tanques de almacenamiento de lodos y la cerca de alambre	143
Figura 50.	Prueba realizada para verificar el escurrimiento del lixiviado hacia la canaleta	144
Figura 51.	Salida del lixiviado por la canaleta hacia el tanque de almacenamiento	144
Figura 52.	Tanques de almacenamiento de agua y lodos	145
Figura 53.	Sistema de irrigación colocado encima del bordo perimetral. Pruebas realizadas con agua	145
Figura 54.	Tanque de captación de lixiviados colocada a 12 m debajo de la celda	146

RESUMEN

El Consorcio Minero Benito Juárez Peña Colorada (CMBJPC) se ubica en el Estado de Colima, México, y su actividad principal es la explotación de un yacimiento mineral de hierro. Está conformado por dos unidades productivas, la mina en el municipio de Minatitlán y la planta de peletizado en el municipio de Manzanillo. El equipo mecánico que se utiliza en esta actividad, requiere del manejo de grandes volúmenes de combustibles como diesel y combustóleo, así como de aceites lubricantes para su mantenimiento. En cuatro áreas de operación se identificó la afectación del suelo a partir del manejo y almacenamiento de diesel, combustóleo y aceites residuales.

Inicialmente se hizo una caracterización del suelo mediante la determinación del contenido de hidrocarburos totales del petróleo (HTP). El muestreo fue dirigido "a juicio" y se hizo hasta una profundidad de 1.50 m en la mina y hasta 3.0 m en la planta de peletizado. El contenido de HTP es variable en los cuatro sitios, y está en el orden de los 100 mg/kg hasta un máximo de 42,000 mg/kg. Con los resultados del muestreo se estimó que el volumen de suelo potencialmente afectado es de 5,509 m³.

Se plantearon una serie de pruebas de tratabilidad con el propósito de evaluar la aplicación de un método biológico de remediación. A nivel laboratorio, se identificaron las bacterias nativas de los suelos contaminados y se encontraron algunas con capacidad de degradar compuestos orgánicos, como la *Flavobacterium*, *Pseudomona*, *Serratia* y *Vibrio*. Se hicieron pruebas de biodegradación colocando algunas de estas bacterias, previamente aisladas, en un medio mineral en contacto con el contaminante (diesel y combustóleo); en pocos días las bacterias transformaron los compuestos originales del combustible, con lo cual demostraron su capacidad degradadora. Se realizaron pruebas de bioestimulación en matraces, donde se colocó suelo contaminado y se agregó medio mineral para estimular el crecimiento de las bacterias; después de dos meses se alcanzaron porcentajes de remoción de 40% a más de 90%; en suelos de la mina la concentración de HTP se redujo de 14,181 a 8,359 mg/kg y en suelos de la planta de peletizados de 6,016 a 217 mg/kg. Se llevaron a cabo pruebas en campo con lodos de la planta de tratamiento de aguas residuales domésticas como fuente de nutrientes para estimular la actividad bacteriana. Después de seis meses se alcanzaron eficiencias de remoción del 70 % al 99 %; en suelos de la mina se redujo la concentración de HTP de 18,521 a 2,497 mg/kg y en suelos de la planta de peletizado de 17,489 a 1,202 mg/kg. En campo también se hicieron pruebas usando medio mineral en vez de lodos, en tres meses se alcanzó una remoción del orden de 50 % en suelos de la mina, bajando el contenido de HTP de 13,709 a 6,745 mg/kg.

Finalmente se hizo el diseño de una celda de tratamiento con capacidad de 300 toneladas. Se evaluaron las condiciones del sitio y la infraestructura disponible en el CMBJPC para aplicar el método de biolabranza. El diseño incluyó el cálculo de la superficie de la celda, la altura del bordo perimetral, el sistema para la captación y recirculación de lixiviados, y el sistema de irrigación para la adición de lodos y agua. Se establecieron los parámetros de operación con base en los resultados de las pruebas en campo con lodos residuales. Por último, se presentan los aspectos generales de la construcción de la celda, la inversión y los costos de operación.

1. INTRODUCCIÓN

La contaminación de suelos es uno de los varios problemas ambientales generados por la actividad industrial y, en general, es ocasionada por materiales y sustancias que dependiendo de su composición, cantidad y reactividad, alteran las características de los suelos afectando sus funciones básicas como fertilidad, medio de purificación y retención del agua, sostenimiento de la vegetación y control del clima.

El derrame de hidrocarburos como petróleo crudo, combustóleo, gasóleo, gasolina, diesel, turbosina y aceites lubricantes, entre otros, ha sido históricamente una de las principales causas de contaminación. Estas sustancias no solamente pueden afectar el suelo sino también el agua, pues una vez que se han derramado, algunos de ellos se acumulan en los poros y en la fracción orgánica, pero otros como el diesel y la gasolina, pueden transportarse e incorporarse a los acuíferos o cuerpos superficiales de agua. En México, de acuerdo con los datos registrados por la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (Profepa) (Profepa, 1999), de las emergencias y/o contingencias registradas de 1993 a 1997 (188 emergencias), el 76 % se relaciona con derrames de petróleo crudo o con productos derivados de éste (combustóleo, diesel, gasolina y aceites residuales).

En la industria minera el consumo de productos derivados del petróleo es elevado, principalmente el de combustibles y aceites lubricantes. Gran parte del equipo que se utiliza para la extracción del mineral, como los equipos de carga, los compresores, los camiones de acarreo y, en general, los vehículos de servicio y apoyo, requieren de combustibles y lubricantes para su funcionamiento; asimismo en las labores de mantenimiento de estos equipos se utilizan diversos tipos de aceites y grasas. Es por ello que en las instalaciones mineras, la afectación de los suelos por el uso de estos materiales se puede presentar en las áreas de almacenamiento, en talleres de mantenimiento y en áreas de operación, principalmente.

El Consorcio Minero Benito Juárez Peña Colorada (CMBJPC) se localiza en el estado de Colima, México y su actividad es la explotación de un yacimiento mineral de hierro. La empresa está conformada por dos unidades productivas; la mina, localizada en el municipio de Minatitlán, donde se lleva a cabo la explotación y la concentración del mineral de hierro, y la planta de peletizado, que se ubica en el municipio de Manzanillo y donde, a partir del concentrado de mineral, se producen pellets¹ que constituyen el producto final y que son utilizados como materia prima para la fabricación del acero (PIQAYQA, 1992).

El CMBJPC inició un programa integral para atender la afectación de los suelos ocasionada en algunas áreas de trabajo por el manejo y almacenamiento de hidrocarburos, específicamente diesel, combustóleo y aceites residuales. Este programa incluyó desde la caracterización de los

¹ El término pellet se usa para identificar el mineral aglomerado en forma esférica, tomando la apariencia de una "canica".

suelos hasta la evaluación y aplicación de un método de remediación, con el propósito de cumplir con los objetivos de su política ambiental y con el marco normativo en materia de suelos contaminados con hidrocarburos.

Los métodos tradicionales que hasta hace algunos años habían sido utilizados para la limpieza de suelos contaminados se relacionan principalmente con el lavado del suelo o la remoción de éste, seguido de la transferencia del material contaminado a un sistema de incineración o a un sitio de disposición final controlado (Bandyopadhyay S., *et. al.*, 1994). Estas tecnologías básicamente pasan el contaminante de un medio a otro y por lo general su costo (económico y ambiental) es elevado, además de que en ocasiones son poco efectivas por la complejidad de la matriz contaminada.

La biorremediación ha surgido recientemente como una alternativa tecnológica para la limpieza de suelos y acuíferos contaminados, donde se aprovecha el potencial de los microorganismos para mineralizar o transformar contaminantes orgánicos en compuestos químicamente más sencillos (Saval S., 1998). Aunque estas tecnologías son recientes, el uso de microorganismos para el tratamiento y transformación de desechos se remonta a por lo menos 100 años (Baker K. y Herson D., 1994); por ejemplo, el tratamiento de aguas residuales se basa en el aprovechamiento de la capacidad de degradación de microorganismos bajo condiciones controladas.

Los microorganismos, debido a su capacidad de utilizar diversos mecanismos de protección, pueden sobrevivir por periodos prolongados de tiempo en los suelos contaminados. Cuando las condiciones ambientales son favorables y existen los nutrientes necesarios para su desarrollo, los microorganismos son capaces de crecer, realizar diversas actividades bioquímicas y metabolizar compuestos orgánicos para producir energía en diferentes formas (Bandyopadhyay S., *et. al.*, 1994 y Cookson J. 1995). En la literatura se reportan diversos microorganismos que han demostrado capacidad para degradar diferentes tipos de contaminantes, como los géneros *Pseudomona*, *Flavobacterium*, *Acinetobacter* y *Serratia*, entre otros (Cookson J., 1995 y Baker K. y Herson D., 1994, Fletcher R., 1994).

La característica más importante de la biorremediación es que los contaminantes no se destruyen, sino que a través de la actividad microbiana se transforman en compuestos químicamente diferentes; algunos pueden ser completamente degradados. Cuando la transformación llega hasta la generación de bióxido de carbono, se habla entonces de una mineralización completa (Saval S., 1998).

La biorremediación se ha aplicado exitosamente en la degradación de los contaminantes peligrosos más comunes en suelos. La Agencia Ambiental de los Estados Unidos de América (US-EPA) reporta que de las actividades de biorremediación que se han aplicado en su programa denominado *Superfound*, 33 % corresponden a productos del petróleo, 28 % a creosota, 22 % a disolventes, 9 % a plaguicidas y 8 % a otros (Cookson J., 1995).

Los métodos de biorremediación, como los demás existentes, tienen ventajas y desventajas; sin embargo, haciendo un balance entre ambas se puede destacar que lo mejor de estos métodos es el bajo costo y su facilidad para ser aplicados en el sitio mismo de la contaminación. Sin

embargo, existen diferencias significativas en estos aspectos entre los métodos *in situ*, que se aplican en el sitio sin remover el suelo contaminado, y los métodos fuera del sitio (*ex situ*), en los que si se requiere remover el material para colocarlo en otro lugar. La diferencia radica principalmente en la dificultad que se tiene en los primeros para controlar los parámetros de operación y el costo que representa en los segundos la remoción del material para su tratamiento.

En general, en la aplicación de los métodos fuera del sitio (*ex situ*) hay un costo elevado por la remoción del material contaminado y por la infraestructura necesaria para llevar a cabo el tratamiento; sin embargo, los costos de operación son bajos y es más fácil controlar y monitorear el proceso. Entre éstos, el método llamado de biolabranza (*land farming*) representa una excelente alternativa debido a que los costos de inversión y operación son bajos, en comparación con otros métodos. Su operación es relativamente sencilla y consiste en colocar el suelo contaminado en una celda y removerlo para estimular la actividad microbiológica y promover la degradación de los contaminantes. Sin embargo, para su aplicación se necesita disponer de extensas áreas de terreno para la construcción de la celda de tratamiento y requiere del uso de maquinaria pesada para remover el suelo a tratar (Troy A. 1994 y Bandyopadhyay S. 1994). El método de biolabranza se ha aplicado ampliamente obteniéndose buenos resultados en la remoción de diversos contaminantes y con un bajo costo de operación (Cookson J. 1995 y Piotrowski M. 1991). Este método se seleccionó para el caso del CMBJPC, ya que las condiciones ambientales del sitio y la infraestructura disponible, resultaron favorables. Además el aspecto económico fue determinante ya que la inversión inicial sería menor comparada con otros métodos.

El éxito en la aplicación de un método biológico para la remediación de suelos, depende en gran medida de asegurar condiciones adecuadas para que los microorganismos realicen la degradación de los contaminantes. El pH del suelo, la humedad, la temperatura, la concentración de oxígeno y la disponibilidad de nutrientes inorgánicos, son factores que limitan el proceso de biodegradación (Baker K., 1994). Estos parámetros son diferentes para cada tipo de suelo y también por las características del contaminante, sin embargo, pueden ser modificados para favorecer la aplicación de un método de tratamiento biológico.

Los nutrientes inorgánicos básicos para la biodegradación de contaminantes son nitrógeno y fósforo; sin embargo, estos elementos por lo general se encuentran en cantidades limitadas en suelos contaminados. Para estimular el crecimiento de los microorganismos y con ello aumentar la biodegradación, es una práctica común agregar fertilizantes o sales inorgánicas de nitrógeno y fósforo (Baker K., 1994).

En este caso particular, para contribuir al proceso de degradación se planteó como alternativa utilizar lodos de una planta de tratamiento de aguas residuales domésticas que se localiza en la colonia El Poblado (propiedad de la empresa). Los lodos generados en el tratamiento de aguas residuales son ricos en materia orgánica, macro y micro nutrimentos (Ortiz L., *et al.* 1995), por lo que es posible considerarlos como una fuente alternativa de nutrimentos para mejorar la actividad de los microorganismos. Los lodos que genera esta planta, son neutralizados y almacenados, por lo que se consideró utilizarlos en la remediación de los suelos como fuente alterna de nutrimentos y de esta manera darles un uso ambientalmente seguro.

La aplicación del método de remediación se evaluó mediante pruebas de tratabilidad a nivel laboratorio y después en campo. Estas pruebas son fundamentales ya que permiten generar información sobre la degradación de los contaminantes y sobre las posibilidades de aplicar a mayor escala la metodología seleccionada (Skladany G. y Baker K. 1994 y Cookson J. 1995). Una vez que se han determinado en laboratorio los parámetros que controlan la degradación de los contaminantes y las pruebas en campo confirman la aplicabilidad del método de remediación, es necesario hacer una prueba de escalamiento con un volumen de suelo mayor. La prueba de escalamiento permite ajustar los parámetros que influyen de manera significativa en la degradación de los hidrocarburos bajo las condiciones ambientales propias del sitio (Cookson J. 1995), además de que permite evaluar el desempeño del sistema de tratamiento y estimar la inversión requerida y los costos de operación a gran escala.

1.1 OBJETIVO

De lo anterior, el objetivo general del presente trabajo es hacer una caracterización de los suelos afectados, con base en el contenido de hidrocarburos totales del petróleo y, a partir de los resultados, evaluar con pruebas de tratabilidad un método biológico para su remediación y posteriormente hacer el diseño de un sistema de tratamiento aplicando el método evaluado.

A partir del objetivo general se plantearon los siguientes objetivos específicos:

1. Determinar en cada sitio, mediante un muestreo de suelos, el contenido de hidrocarburos totales del petróleo y su distribución.
2. Hacer una estimación del volumen de suelo contaminado.
3. Evaluar los métodos biológicos existentes para la remediación del suelo contaminado y seleccionar el más adecuado a las condiciones particulares del sitio.
4. Llevar a cabo pruebas de tratabilidad a nivel laboratorio para evaluar la factibilidad del método seleccionado.
5. Evaluar el uso de los lodos que se generan en la planta de tratamiento de aguas residuales de El Poblado como fuente de nutrimentos para estimular el crecimiento de microorganismos.
6. Llevar a cabo pruebas en campo para evaluar la eficiencia de degradación de los hidrocarburos utilizando los lodos de la planta de tratamiento.
7. Con base en los resultados de las pruebas en campo, hacer el diseño de una celda de tratamiento para realizar una prueba de escalamiento.
8. Establecer los parámetros de operación y control para la prueba de escalamiento.

1.2 ALCANCES

La primera etapa del trabajo realizado consistió en una caracterización de los suelos en los sitios afectados, mediante la determinación de la concentración de hidrocarburos totales del petróleo (HTP). Se realizó un muestreo a diferentes profundidades, en los sitios de la mina (taller La Encantada y Polvorín) el muestreo fue hasta 1.5 m, mientras que en los sitios de la planta de peletizado se muestreó hasta 3 m de profundidad. Con las concentraciones de HTP determinadas se delimitaron las zonas afectadas y se hizo una estimación del volumen de suelo que requiere remediación.

Posteriormente, en la segunda etapa se hizo una revisión de las alternativas disponibles para la remediación del suelo contaminado y con base en las características de los métodos y de las condiciones ambientales existentes, se seleccionó el método de biolabranza. Después se planteó, para la tercera y cuarta etapas, la realización de pruebas de tratabilidad, primero a nivel laboratorio y después en campo, con el propósito de evaluar la factibilidad del método.

En el laboratorio se hizo una identificación de bacterias nativas del suelo contaminado y se aislaron por colonias. Con algunas de estas colonias, se hicieron pruebas de biodegradación para probar la capacidad de degradación de las bacterias en una muestra del contaminante proporcionado por la empresa. Después se hicieron pruebas de bioestimulación en matraces con muestras de suelo contaminado y en condiciones de humedad controladas.

Las pruebas en campo se realizaron en una de las instalaciones de la empresa para regular las condiciones ambientales. Estas pruebas se hicieron en cajones metálicos y se utilizaron los lodos de la planta de tratamiento con el fin de evaluar la conveniencia de aprovecharlos como fuente de nutrimentos. De manera paralela se hicieron algunas pruebas en los mismos cajones pero utilizando un medio mineral de nutrimentos en lugar de los lodos.

La etapa final del trabajo fue el diseño de un sistema de tratamiento para realizar pruebas de escalamiento con un volumen de 300 toneladas de suelo. El diseño incluye la configuración de la celda de tratamiento y el cálculo de sus dimensiones, el sistema de irrigación para la adición de lodos, y un sistema de captación y recirculación de lixiviados. Además se establecieron los parámetros de operación para el tratamiento de las 300 toneladas con base en los resultados obtenidos en las pruebas de campo. Finalmente se hace una descripción y se muestran algunos detalles de la construcción de la celda.

Actualmente, el sistema de tratamiento que se describe en este trabajo ya se ha implementado en las instalaciones del CMBJPC y está en marcha el programa de remediación de suelos, que fue un compromiso adquirido por la empresa ante las Procuraduría Federal de Protección al Ambiente. Además, este proyecto se vincula con otros programas que tiene la empresa como el de reforestación de terreros² y el de fabricación de composta con residuos orgánicos.

² Los terreros son depósitos donde se coloca el material estéril que se remueve durante la explotación del mineral. La reforestación de éstos es parte de los trabajos que se realizan para reincorporarlos a las condiciones naturales del entorno.

2. MARCO CONCEPTUAL

2.1 CONCEPTOS GENERALES

2.1.1 Hidrocarburos del petróleo

Características generales del petróleo y sus productos

El petróleo y los productos derivados de él, son mezclas complejas que contienen primordialmente hidrocarburos (compuestos que contienen moléculas formadas por átomos de carbono e hidrógeno), compuestos de azufre, nitrógeno, y oxígeno y en menor proporción elementos metálicos.

La complejidad de los productos del petróleo se incrementa de acuerdo con el número de carbonos que contienen; mientras mayor es este número, que es el caso de los productos más pesados, mayor es el número de posibles combinaciones de los átomos. Por ejemplo, las gasolinas tienen un menor número de componentes que el diesel y esto se relaciona con el número de carbonos que contiene (es mayor número de carbonos en el diesel). Otro ejemplo de lo anterior, es que hay 75 combinaciones de moléculas que contienen 10 carbonos, en cambio, para moléculas que contienen 20 carbonos, el número de combinaciones posibles es de 366,319. Esto hace prácticamente imposible identificar todos los componentes del petróleo o de algunos de sus productos, por lo que éstos se caracterizan en términos del intervalo en el que se encuentra su punto de ebullición y el número aproximado de átomos de carbono (TPHCWG, Vol. 1, 1998).

Otra característica importante de los hidrocarburos del petróleo, es que generalmente tienen un gran número de isómeros. Los isómeros son compuestos que tienen la misma fórmula elemental pero diferente configuración estructural. En general, cuando aumenta el número de carbonos, el número de posibles isómeros aumenta rápidamente (TPHCWG, Vol. 2., 1998).

Los productos del petróleo con alto punto de ebullición tienen en promedio un gran número de carbonos; por lo tanto, éstos tienen también un gran número de isómeros y una mayor complejidad química que aquellos productos con bajo punto de ebullición.

Clasificación de los hidrocarburos

Los hidrocarburos del petróleo pueden ser clasificados de diferentes formas dependiendo de las características que se consideren para la clasificación. Por ejemplo, pueden ser clasificados de acuerdo con el tipo de enlace entre los átomos de carbono (TPHCWG, Vol. 1, 1998):

Saturados: son estructuras formadas por enlaces simples C – C.

Los hidrocarburos saturados son la primera clase (o clase primaria) de compuestos que se encuentran en la mayoría de los productos del petróleo. Éstos comprenden cadenas simples C – C (con todas las cadenas restantes saturadas con átomos de hidrógeno). Las moléculas pueden estar arregladas con variadas configuraciones.

No Saturados: estructuras en las que se presentan uno o más enlaces dobles o triples $C = C$ ó $C \equiv C$.

Estos compuestos tienen al menos dos átomos de carbono en una molécula, unidos por dos o más enlaces ($C=C$ para los alquenos, o $C\equiv C$ para los alquinos). Este tipo de compuestos no se encuentran en el petróleo crudo y son producidos en el proceso de fraccionamiento en la producción de moléculas más pequeñas a partir de otras pesadas. Cuando las moléculas se fraccionan, pueden formar enlaces dobles en donde no hay suficientes átomos de hidrógeno disponibles para saturar la molécula. Las gasolinas, por ejemplo, contienen una cantidad importante de enlaces dobles de carbono.

También se pueden clasificar los hidrocarburos de acuerdo con la forma de su estructura atómica (Cram Donald J., Hammond George S., 1964):

Hidrocarburos de cadena abierta: Estructuras lineales o en ocasiones con ramificaciones. Estas pueden ser saturadas, como es el caso de los alcanos; o bien, no saturadas como los alquenos (contienen enlaces dobles $C = C$) y los alquinos (contienen enlaces triples $C \equiv C$).

Hidrocarburos de cadena cerrada o cíclicos: Son estructuras en forma de anillos. Este tipo de estructuras se pueden dividir en dos grandes clases: a) compuestos alicíclicos (compuestos saturados), que son considerados como los compuestos cíclicos análogos de los alifáticos; y b) compuestos aromáticos, que son un grupo especial de moléculas no saturadas cíclicas.

Sin embargo, pese a la clasificación que se puede hacer de los hidrocarburos de acuerdo con el tipo de enlace o con la forma de su estructura atómica, en forma general los hidrocarburos se dividen en dos grandes familias: **alifáticos y aromáticos**. Los alifáticos están a su vez divididos en tres grandes grupos: **alcanos, alquenos y cicloalcanos** (también llamados alicíclicos). Los alquinos, que es otro tipo de estructura de los alifáticos, no son comúnmente encontrados en los hidrocarburos del petróleo (TPHCWG, Vol. 2., 1998).

Alcanos

Los alcanos, también llamados parafinas, son hidrocarburos alifáticos que contienen el número máximo de átomos de hidrógeno requeridos para el carbón (4). Estos compuestos contienen sólo enlaces simples de carbón-carbón, por lo que forman parte de los hidrocarburos saturados.

La fórmula general de los alcanos es C_nH_{2n+2} , y la estructura más simple es el metano (CH_4). Los primeros cuatro hidrocarburos de cadena continua tienen nombres no sistemáticos: Metano (CH_4), Etano ($CH_3 - CH_3$), Propano ($CH_3 - CH_2 - CH_3$) y Butano ($CH_3 - CH_2 - CH_2 - CH_3$).

El etano (C_2H_6) consiste en dos átomos de carbono, cada uno de los cuales participa en enlaces direccionales con tres átomos de hidrógeno y el otro átomo de carbón. La serie de los alcanos continúa con el propano (C_3H_8), butano (C_4H_{10}), pentano (C_5H_{12}) y así sucesivamente.

Los alcanos se distinguen particularmente por su falta de reactividad. El nombre de hidrocarburo saturado (o "parafina", que literalmente significa "poca afinidad"), se debe a que su reactividad química frente a la mayoría de los reactivos comunes puede ser considerada como saturada o satisfecha. Así, ninguno de los enlaces C - H o C - C en un hidrocarburo saturado típico, como el etano, son atacados a temperatura ordinaria por un ácido fuerte tal como el sulfúrico o por agentes oxidantes enérgicos tales como el permanganato de potasio (Roberts John, et al, 1974).

Alquenos

Son hidrocarburos alifáticos de cadena abierta, también llamados olefinas, que contienen uno o más enlaces dobles carbón-carbón. Se les llama también no saturados dado que no tienen el número máximo de átomos de hidrógeno.

Un alqueno es la forma *insaturada* del correspondiente *saturado* alcano. El buteno se describe por su correspondiente fórmula C_4H_8 mientras que el butano, la correspondiente estructura del alcano, se describe como C_4H_{10} .

La fórmula general de los alquenos es C_nH_{2n} . Los alquenos más comunes son: Etileno, Propileno, Buteno, Isobuteno e Isopropeno.

Se atribuye la insaturación de los alquenos a la facilidad del rompimiento de un enlace doble C = C, por la mitad, en una reacción de adición.

Las adiciones se efectúan con los alquenos mucho más fácil que con los alcanos debido: 1) a que las unidades C = C de un doble enlace son individualmente más débiles (más tensionadas) que un enlace normal sencillo C - C y 2) a que los electrones del doble enlace son más accesibles al reactivo atacante (Roberts John, et al, 1974).

Cicloalcanos (Alicíclicos):

Compuesto cíclicos con la fórmula general C_nH_{2n} . Estos compuestos son hidrocarburos saturados que contienen uno o más anillos, los cuales pueden también contener una cadena saturada lateral. Son también llamados **alicíclicos**. En la industria se les conoce como naftenos o cicloparafinas.

Están divididos en subclases: cicloalcanos, cicloalquenos y cicloalquinos (son análogos a los compuestos de cadena abierta: Ciclopropano, Ciclobutano, Ciclopentano, y Ciclohexeno).

La tensión angular de enlace en los cicloalcanos afecta su calor de combustión y por ende su reactividad. Los cicloalcanos de anillo pequeño, como el ciclopentano, ciclobutano y ciclopropano, son más reactivos debido a su tensión angular de enlace. Se puede esperar que otras propiedades químicas también sean afectadas por la tensión en el anillo y realmente el ciclopropano y el ciclobutano son considerablemente más reactivos que los hidrocarburos saturados de cadena abierta.

El resultado de estas reacciones es siempre la apertura del anillo por rompimiento de un enlace C - C para dar un compuesto de cadena abierta que tenga ángulos de enlace normales.

Los enlaces C - C de los cicloalcanos más grandes, relativamente libres de tensión, son inertes, de modo que estas sustancias se parecen a los n-alcanos en su comportamiento químico. Las reacciones de sustitución de los cicloalcanos son, generalmente, menos complejas que las de los correspondientes alcanos, porque hay menos posibles productos isómeros de sustitución (Roberts John, et al, 1974).

Aromáticos

Los compuestos aromáticos son una clase especial de hidrocarburos no saturados. Los hidrocarburos aromáticos tienen uno o más anillos de benceno como componentes estructurales. La fórmula del benceno es C_6H_6 . Hay tres enlaces simples carbono - carbono que se alternan con tres enlaces dobles carbono - carbono. Cada carbono en el anillo se liga a un hidrógeno. La molécula del benceno puede tener uno o más hidrógenos sustituidos por cadenas laterales resultando los alquil bencenos, o bien pueden ser dos o más anillos aromáticos juntos dando lugar a hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP). El petróleo crudo y todos los productos que se derivan de él (a excepción de los solventes producidos a partir del petróleo) contienen compuestos aromáticos.

Benceno: El benceno (C_6H_6) es el hidrocarburo simple químicamente más significativo; es volátil, incoloro, altamente flamable y con un olor característico.

Alquilbenceno: Estos compuestos tienen un anillo aromático base con cadenas adjuntas a los lados. Ejemplos: tolueno, o-Xileno, m-Xileno, p-Xileno.

HAP: Estos compuestos tienen dos o más anillos aromáticos unidos. Ejemplos: naftaleno, 2-metilnaftaleno, fenantreno.

Las estructuras aromáticas más comunes son: Benceno, Naftaleno, Antraceno, Fenantreno, y Pireno.

Productos derivados del petróleo

La composición del petróleo crudo varía de acuerdo con la localización del yacimiento, pero, invariablemente, los principales componentes son los alcanos. El gas natural se encuentra junto con el petróleo y está constituido principalmente por metano, mientras que el petróleo crudo es una mezcla sorprendente de hidrocarburos hasta el tamaño de C_{50} .

Además de su utilidad como fuente de energía, el petróleo y el gas natural son sumamente útiles como materias primas para la síntesis de otros compuestos orgánicos. Estos son a menudo llamados productos petroquímicos.

El gas natural varía considerablemente en su composición, según sea su origen, pero el metano es siempre el principal componente, mezclado con pequeñas cantidades de etano, propano, butano y 2-metilpropano (isobutano). Estos son los únicos alcanos con puntos de ebullición menores a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Es posible separar el gas natural en sus componentes para venderlos como productos químicos puros, aunque la mezcla ya es perfectamente adecuada para ser utilizada como combustible (Roberts John, et al, 1974).

La refinación del petróleo comprende la separación en fracciones por destilación. Los principales productos que se obtienen del proceso de refinación del petróleo se describen a continuación.

Gasolina

La gasolina es una mezcla líquida compleja de hidrocarburos, formada principalmente por compuestos desde C_4 a C_{12} . En consecuencia la ebullición de la gasolina abarca un intervalo muy amplio, desde aproximadamente $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Roberts John, et al, 1974).

La composición de las gasolinas está bien caracterizada. Como el número de isómeros dentro de este intervalo de carbonos es reducido, es posible un análisis detallado de la composición. Existen más de 200 componentes individuales en el intervalo de ebullición de C_4 a C_{12} . Estos hidrocarburos incluyen 40 a 70 % de alcanos de cadena lineal, ramificada y cicloalcanos; alquenos (olefinas) en concentraciones variables pero usualmente menos del 10 %; y 20 a 50 % de aromáticos (TPHCWG, Vol. 1, 1998).

Diesel

El diesel es producido en primera instancia a partir de fracciones destiladas del petróleo crudo, con algo de mezcla con gasóleo. Los componentes mayores del diesel son similares a aquellos presentes en el petróleo crudo, pero incluye una elevada proporción de aromáticos (arriba del 30 a 40 %). Aunque el proceso de destilación del petróleo crudo también produce pequeñas cantidades de alquenos, así como de aromáticos, los alquenos producidos no se encuentran dentro del intervalo de carbonos para el diesel, por lo que terminan en la fracción de la gasolina. El intervalo típico de carbonos para el diesel grado No. 1 es de C_8 a C_{17} , con una mayor proporción en el intervalo entre C_{10} y C_{14} (similar al combustible Jet A y al Queroseno). El intervalo típico de carbonos para el diesel grado No. 2 es de C_8 a C_{26} , con una mayor proporción en el intervalo C_{10} a C_{20} . En todos los casos, la mayoría de los combustibles están entre un 60 y 90 % formados por alcanos normales, ramificados y cicloalcanos (TPHCWG, Vol. 1, 1998). El punto de ebullición de los compuestos que forman el diesel están entre 250 °C y 400 °C (C_{13} a C_{25}) (Roberts John, et al, 1974).

Combustóleo

El combustóleo es la fracción de la destilación del petróleo crudo que es más pesada que el diesel (destilación intermedia) y es comúnmente llamada fracción de combustibles aceitosos residuales. Estos productos pueden ser utilizados directamente como combustibles, o bien pueden ser usados en unidades de refinación para producir fracciones de combustible más ligeras y de mayor valor. Las fuentes para la obtención del combustóleo pueden ser directamente los procesos de destilación o procesos complejos de selección y mezclado de diferentes fracciones del petróleo para encontrar determinadas especificaciones.

Este producto inicia en el intervalo de carbonos que va de C_{20} a C_{25} y puede llegar hasta por arriba de C_{40} . La composición de estos aceites es muy variable pero en general todos contienen hidrocarburos saturados y aromáticos (incluyendo HAP), así como compuestos de azufre, nitrógeno y oxígeno (TPHCWG, Vol. 1, 1998).

Existen siete diferentes grados de combustóleo, que son utilizados principalmente en diferentes tipos de equipos de quemado (hornos) bajo diferentes condiciones de operación. Estos son grado 1 y 2, grado 4 (ligero) y 4, grado 5 (ligero) y 5 (pesado) y grado 6.

Aceites lubricantes

Los aceites lubricantes tienen puntos de ebullición muy altos (mayores a 340 °C). El intervalo típico de carbonos está entre C_{20} y C_{45+} . Las parafinas normales (alcanos de cadena lineal) son generalmente removidas por extracción con solventes. Estos materiales están enriquecidos con cicloparafinas, aromáticos y compuestos de azufre, nitrógeno y oxígeno, y están mejor caracterizados en base a sus propiedades físicas tales como índice refractario, densidad, y peso

molecular. Estos pueden contener de 70 a 90 % de alcanos y de 10 a 30 % de aromáticos. Las grasas son lubricantes a los cuales se les agrega un agente espesador (TPHCWG, Vol. 1, 1998).

Los aceites lubricantes abarcan una amplia variedad de productos comerciales que son utilizados en una gran variedad de aplicaciones. El número de carbonos del aceite lubricante determina el tipo de aplicación. Los procesos de refinación, así como el tipo de crudo que se usa como materia prima, determinan el tipo y calidad de los aceites lubricantes base.

Residuo

Después de la remoción de todos los compuestos volátiles del petróleo, queda un material alquitranoso, negro, que es una mezcla de minerales y compuestos orgánicos complejos de alto peso molecular, se conoce como asfalto.

Características toxicológicas de los hidrocarburos

Para hablar de las características toxicológicas de los hidrocarburos, estos compuestos se pueden agrupar en cinco categorías (Manahan S., 1990):

- 1) alcanos
- 2) hidrocarburos no aromáticos no saturados
- 3) hidrocarburos aromáticos (entendiendo que tienen sólo uno o dos anillos aromáticos ligados en su estructura)
- 4) hidrocarburos aromáticos policíclicos (con múltiples anillos)
- 5) mezclas de hidrocarburos que contienen dos o más de los anteriores

Alcanos

La exposición de trabajadores a los alcanos, especialmente a los compuestos de baja masa molecular, es más común que sea por inhalación. Es difícil establecer niveles seguros de contaminantes en el aire basándose en efectos toxicológicos sistémicos. De esta manera, el valor límite permisible (TLV) frecuentemente refleja efectos no sistemáticos de olor, narcosis, irritación de ojos e irritación de la piel.

Metano y Etano

El metano y el etano son compuestos que producen asfixia, lo que significa que el aire que contiene altos niveles de estos gases, no contiene la suficiente cantidad de oxígeno que se requiere en la respiración.

A los gases que producen asfixia no se les conoce que tengan mayores efectos sistémicos, aunque es posible que existan efectos ligeros que son difíciles de detectar.

Propano y Butano

El propano tiene como fórmula C_3H_8 y el butano C_4H_{10} . Existen dos isómeros del butano, n-butano e isobutano (2-methyl propano). El propano y los isómeros del butano son gases a temperatura ambiente y a presión atmosférica; como el metano y etano, también son gases que producen asfixia. En altas concentraciones el propano afecta el sistema nervioso central. No se conocen efectos toxicológicos sistémicos de los dos isómeros del butano, pero se considera que podrían tener un comportamiento similar al propano.

Pentano hasta Octano

Además de su uso en combustibles, tales como gasolina, estos compuestos son empleados como solventes en la formulación de diversos productos comerciales, incluyendo barnices, pegamentos y tintas. También son usados para la extracción de grasas.

Hace tiempo se consideraron toxicológicamente inofensivos, pero ahora a los hidrocarburos alifáticos C_5 a C_8 se les reconoce que tienen algunos efectos tóxicos significativos. La exposición a hidrocarburos C_5 a C_8 es principalmente por la vía pulmonar y altas concentraciones en el aire han matado a animales en experimentos de laboratorio. La inhalación de estos hidrocarburos por el ser humano produce mareo y pérdida de coordinación como resultado de una depresión en el sistema nervioso.

De los alcanos de C_5 a C_8 , uno de los más comúnmente usados, no como combustible, es el n-hexano. Se ha reportado polineuropatía (desorden múltiple del sistema nervioso) en varios casos de exposición a n-hexano, tal como es el caso de trabajadores japoneses dedicados a la producción casera de sandalias en las que se usaba pegamento con solvente de n-hexano. Los trabajadores sufrieron de debilidad en los músculos y se dañaron las funciones de sensibilidad en manos y pies. Biopsias que se practicaron de nervios de los músculos de las piernas de trabajadores expuestos, mostraron pérdida de mielina (una sustancia grasosa que constituye una funda que cubre ciertas fibras nerviosas) y degeneración de axons (parte de una célula nerviosa a través de la cual los impulsos nerviosos son transmitidos hacia el exterior de la célula). Los síntomas de la polineuropatía fueron reversibles, con una recuperación que tomó varios años después de que se eliminó la exposición.

La exposición de la piel a hidrocarburos líquidos C_5 a C_8 causa dermatitis. Esta es el problema toxicológico ocupacional más común asociado con el uso de hidrocarburos líquidos en centros de trabajo y es una consecuencia de la disolución de porciones de grasa de la piel. Adicionalmente se presenta inflamación de la piel y resequedad.

Alcanos por arriba del Octano

Los alcanos que están por arriba del octano (C_8) están contenidos en el keroseno, en el jet fuel, en el diesel, en el aceite mineral y en el combustóleo.

Los alcanos mayores no son considerados de alta toxicidad, aunque se tienen algunas reservas sobre los efectos que pueden producir. La inhalación es la ruta de exposición más común de estos compuestos y pueden ocasionar vértigo, dolor de cabeza y estupor. En casos de exposición extrema, se puede producir un estado de coma y hasta la muerte (Manahan S., 1990).

Ciclohexano

El ciclohexano es el más significativo de los cicloalcanos desde el punto de vista toxicológico. Bajo condiciones ambientales es un líquido claro, volátil y altamente inflamable.

Como el n-hexano, el ciclohexano es moderadamente tóxico. Actúa como un anestésico débil, similar, aunque un poco más potente, al n-hexano. Este compuesto no ha mostrado efectos sistémicos en el ser humano.

Benceno y sus derivados

El benceno tiene efectos toxicológicos agudos y crónicos. Es usualmente absorbido como un vapor a través del tracto respiratorio, aunque también es posible que se produzca la absorción del líquido por la piel o que entre por el tracto gastrointestinal. El benceno es un irritante de la piel y la exposición progresiva elevada puede causar eritema (piel enrojecida), sensación de quemadura, acumulación de fluidos (edema) y ampollas. La inhalación de aire con una concentración de benceno de 64 g/m^3 puede ser fatal en pocos minutos; alrededor de una décima parte de este nivel el benceno causa envenenamiento en una hora, incluyendo un efecto narcótico sobre el sistema nervioso central que se manifiesta progresivamente por excitación, depresión, fallas en el sistema respiratorio y finalmente la muerte (Manahan S., 1990).

La exposición crónica al benceno ocasiona diversos síntomas no específicos que incluyen fatiga, dolor de cabeza, y pérdida de apetito. Más específicamente, aparecen anomalías en la sangre de gente que sufre de envenenamiento crónico por benceno. La más común de éstas es una disminución en el número de células blancas (glóbulos blancos). Aunque también se ha observado un incremento anormal en los linfocitos de la sangre (corpúsculos incoloros introducidos en la sangre por las glándulas linfáticas), anemia, y disminución en el número plaquetas requeridas para la coagulación.

Debido a que la exposición prolongada al benceno puede ocasionar leucemia o cáncer, los niveles permisibles de benceno en los sitios de trabajo se han reducido enormemente y se ha sustituido su uso, en la medida de lo posible, por el tolueno o el xileno.

Tolueno

El tolueno está clasificado como un hidrocarburo de moderada toxicidad cuando la exposición a éste es por inhalación o ingestión, y cuando la exposición es por contacto dérmico su toxicidad es baja. La exposición a concentraciones hasta 200 ppm generalmente no produce síntomas significativos, pero cuando la concentración alcanza 500 ppm puede ocasionar dolor de cabeza, náusea, fatiga y afecta la coordinación sin que se detecten efectos fisiológicos. A niveles superiores de concentración, el tolueno actúa como narcótico y puede conducir hasta el estado de coma (Manahan S. , 1990).

Naftaleno

La exposición al naftaleno puede ocasionar severas crisis hemolíticas en algunos individuos que tienen un defecto metabólico (ligado genéticamente) asociado a una actividad insuficiente de la enzima glucosa-6-fosfato dehidrogenasa en los glóbulos rojos. Los efectos ocasionados incluyen anemia y una marcada reducción en el número de glóbulos rojos, hemoglobina y hematocritos. El contacto del naftaleno con la piel, puede producir irritación o dermatitis severa en individuos sensibles. Además de los efectos hemolíticos señalados, la inhalación e ingestión del naftaleno puede ocasionar dolor de cabeza, confusión y vómito.

Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos

Los HAP son formados durante la combustión incompleta de carbón, aceites minerales, combustibles fósiles, madera, basura, u otras sustancias orgánicas como el tabaco o la carne quemada. Existen más de 100 compuestos diferentes de HAP y los efectos a la salud ocasionados no son conocidos para la gran mayoría de ellos (ATSDR, 1995).

No obstante el gran número de HAP que existe, 17 de ellos han sido los más estudiados debido a que tienen una mayor toxicidad, el ser humano está potencialmente expuesto a ellos, se han identificado con mayor frecuencia en los sitios contaminados y existe una mayor cantidad de información sobre ellos. Estos compuestos son los siguientes:

- | | | |
|----------------------|---------------------------|----------------------------|
| 1) Acenafteno | 7) Benzo[b]fluoranteno | 13) Fluoranteno |
| 2) Acenaftileno | 8) Benzo[j]fluoranteno | 14) Fluoreno |
| 3) Antraceno | 9) Benzo[g,h,i]perileno | 15) Ideno[1,2,3-c,d]pireno |
| 4) Benzo[a]antraceno | 10) Benzo[k]fluoranteno | 16) Fenantreno |
| 5) Benzo[a]pireno | 11) Cryseno | 17) Pireno |
| 6) Benzo[e]pireno | 12) Dibenzo[a,h]antraceno | |

Sin embargo, la mayoría de la información disponible sobre los efectos que estos compuestos ocasionan al ser humano, debe ser inferida a partir de estudios que reportan los efectos ocasionados por la exposición a mezclas compuestas que contienen HAP. Diversos estudios epidemiológicos han mostrado un aumento en la mortalidad debido a cáncer en pulmón en personas expuestas a emisión de coque en hornos, emisiones de alquitrán y humo de cigarro. Cada una de estas mezclas contiene Benzo[a]pireno, Cryseno, Benzo[a]antraceno, Benzo[b]fluoranteno, y Dibenzo[a,h]antraceno, así como otros HAP potencialmente carcinógenos (ATSDR, 1995). Resulta imposible evaluar la contribución individual de cada uno de los HAP sobre el efecto carcinogénico provocado por estas mezclas en el hombre, dada la complejidad de las mezclas y la presencia de otros factores carcinógenos.

El benzo(a)pireno es el más estudiado de los hidrocarburos aromáticos policíclicos. Estos compuestos son formados por la combustión incompleta de otros hidrocarburos en los que el hidrógeno es consumido por la formación preferencial de H₂O.

2.1.2 Contaminación de suelos con hidrocarburos

El suelo y sus funciones

Los suelos son sistemas dinámicos y complejos desde la perspectiva del tiempo y del espacio, lo cual se refleja en la variación vertical de las diversas capas que lo forman, a las que se conocen como horizontes, y que están dotadas de propiedades y características distintas que confieren un perfil particular a los diversos suelos. A su vez, la variación horizontal del suelo resulta de diferentes factores, entre los que se encuentran el clima, la topografía, los materiales a partir de los cuales se forma y la diversidad de los seres vivos que lo pueblan (Cortinas C., 2002).

Las definiciones que se encuentran en la literatura respecto a lo que es un suelo, son muy variadas y se emplean dependiendo del contexto de referencia. Por ejemplo, una definición de suelo lo refiere como el material no consolidado sobre la superficie de la tierra, mismo que ha sido formado mediante una dinámica natural a partir de la corteza terrestre con la influencia de los diversos factores ambientales. El proceso para tener un suelo en su estado comúnmente conocido puede tomar cientos y hasta miles de años. Por ello, el suelo es un medio complejo y dinámico en constante evolución (Profepa, 2000).

Para algunos autores el suelo es un sistema ecológico por su organización y funcionamiento, al cual pueden aplicarse las propiedades habituales que definen a los sistemas; entre otras, las relacionadas con los organismos vivos (Cortinas C., 2002):

El suelo es un soporte para los seres vivos, un reservorio de materias orgánicas y minerales, un regulador de los flujos en los ecosistemas, un lugar de transformación de la materia orgánica y un sistema depurador de las sustancias tóxicas.

Otra definición que incorpora términos más sencillos hace referencia a que el suelo es la capa más externa, marcada por los seres vivos, de la corteza terrestre. Es la sede de un intercambio intenso de materia y energía entre el aire, el agua y las rocas. Sin embargo, a esta definición le hace falta el concepto de *sistema dinámico*. Los cambios dinámicos que sufre constantemente el suelo derivan de los numerosos y complejos procesos químicos, físicos y biológicos que tienen lugar en él, los suelos influyen en el tipo de organismos que se encuentran en ellos, los que a su vez lo modifican y crean entornos favorables para que los pueblen nuevos tipos de organismos. La situación cambiante del suelo se ajusta a las condiciones del clima, la topografía y la vegetación de cada lugar.

Lo que es entendido de manera general, es que el suelo constituye un recurso natural de gran importancia ya que desempeña diversas funciones entre las que destacan las siguientes (Profepa, 2000):

- El suelo es el filtro que limpia el agua de lluvia que recarga los acuíferos y que los protege contra la contaminación. El agua de lluvia arrastra un sinnúmero de compuestos durante su recorrido, éstos son retenidos en el suelo y subsuelo, de aquí que se hable de su capacidad amortiguadora. Algunos compuestos son transformados por la microbiota nativa, antes de llegar a los acuíferos. Para resaltar esta importante función del suelo conviene recordar que los acuíferos constituyen la principal fuente de suministro de agua de las poblaciones.
- El suelo es la base para la vida del hombre y los animales, permite la implantación de las raíces de las plantas y les proporciona agua y elementos nutritivos. La producción de alimentos depende, entre otros factores, de la disponibilidad y fertilidad de terrenos agrícolas.
- El suelo desempeña también una importante función como hábitat biológico y reserva genética. En su seno se pueden desarrollar gran cantidad de vegetales y animales que forman parte de la cadena alimentaria y constituyen la riqueza de la biodiversidad.
- El suelo es la base física de las edificaciones, sean viviendas, industrias, lugares de recreación, sistemas de transporte o sitios para disposición de residuos. También, es fuente de materias primas como arcillas, arena, grava y minerales.
- Finalmente, el suelo alberga una importante herencia cultural, representada por tesoros arqueológicos y paleontológicos, que son una fuente única de información que debe ser mantenida como un testimonio de la historia de la tierra y de la humanidad.

El problema del deterioro de los suelos en México, para algunos autores, tiene dos dimensiones, la que deriva de la pérdida de éstos como consecuencia de la eliminación de la cobertura vegetal y la que resulta de la contaminación de la que son objeto por la disposición inadecuada de todo tipo de residuos; cada una debe considerarse por separado en cuanto tienen consecuencias distintas que demandan formas particulares para llevar a cabo la restauración o remediación de los suelos (Cortinas C., 2002).

Contaminación de suelos con hidrocarburos

La contaminación de suelos es uno de los problemas ambientales más serios en la actualidad y ésta puede ocurrir de diferentes maneras, pero en la mayoría de los casos se relaciona con operaciones industriales tales como emisiones fugitivas, derrames accidentales y fugas de materiales, descargas de efluentes, y disposición de residuos.

Los derrames accidentales y las fugas de materiales y residuos peligrosos es quizá la causa de la mayoría de las afectaciones que se producen en sitios localizados. Un porcentaje significativo de derrames de materiales peligrosos se relaciona con productos del petróleo, solventes volátiles o hidrocarburos aromáticos polinucleares (HAP). Los sitios contaminados con plaguicidas, bifenilos policlorados (PCB) y otros compuestos, representan un porcentaje mucho menor (Cookson John T., 1995). El uso generalizado de combustibles en diversas actividades industriales y su almacenamiento en tanques, algunos de ellos enterrados, han hecho de los hidrocarburos del petróleo el contaminante más importante del suelo y acuíferos.

Aunque actualmente existen diversas medidas y acciones para prevenir la afectación de suelos por el manejo y almacenamiento de combustibles y otros productos del petróleo, existe un gran pasivo ambiental ocasionado por el mal manejo que se hizo de estos materiales durante muchos años. En algunos casos, estos pasivos no sólo han ocasionado la contaminación del suelo, sino que también han sido la fuente de contaminación de acuíferos y posiblemente del riesgo a la salud de algunas poblaciones.

De acuerdo con los datos de la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (Profepa) registrados en el periodo de 1995 a 2000, las sustancias más frecuentemente involucradas en eventos de contaminación por fugas o derrames de materiales o residuos peligrosos fueron hidrocarburos (petróleo crudo, combustóleo, diesel, gasolina, gas natural, y gas L.P.), amoníaco, ácido sulfúrico, asfalto, ácido clorhídrico, cloro, mezclas de solventes y aceites gastados, principalmente. En este mismo periodo, de 108 sitios contaminados por residuos o materiales peligrosos identificados por la Profepa, 19 corresponden a grasas y aceites residuales y 11 corresponden a derrames de hidrocarburos (Profepa, 2000).

La liberación o descarga de algún producto del petróleo en grandes cantidades, puede afectar los suelos y posiblemente los cuerpos subterráneos de agua. La magnitud de la afectación que pueden ocasionar depende de diversos factores entre los que se encuentran el volumen derramado del producto, las características físicas y químicas del producto, la naturaleza del suelo, y la profundidad a la que se encuentra el acuífero.

La movilidad de sustancias líquidas en la zona no saturada del subsuelo depende de varios factores, entre los que destacan: a) la viscosidad cinemática de las sustancias, que afecta la velocidad de percolación, b) la cantidad del producto liberado, la cual va a afectar la profundidad de penetración en el suelo, c) la permeabilidad del suelo, la cual afecta tanto la velocidad de percolación como la geometría del derrame, y d) el nivel de saturación del suelo

con el producto libre derramado, el cual está en función, tanto del tipo de suelo, como de la viscosidad del producto.

La velocidad de movimiento de cualquier fluido a través del suelo está directamente relacionada con la conductividad hidráulica, que depende de las propiedades del fluido mismo y del suelo.

La exposición a los productos del petróleo involucra las diferentes rutas de exposición posibles, que incluyen contacto dérmico con el suelo, ingesta del suelo, inhalación de partículas del suelo, e ingesta de agua contaminada procedente del subsuelo.

La disolución de los constituyentes químicos en el agua subterránea es un proceso complejo que involucra las tres fases del suelo (por ejemplo, la matriz sólida, agua y gas). A partir de la información presentada en la literatura científica, la velocidad de disolución de los constituyentes individuales de un compuesto varía; en los productos más ligeros, los hidrocarburos más solubles tienden a disolverse más rápido que en los productos más pesados, donde se encuentra la fracción menos soluble.

Una vez que los constituyentes individuales llegan al agua subterránea, estos migrarán de acuerdo con la dirección del flujo y los patrones de drenaje del subsuelo. La velocidad de migración de los constituyentes individuales varía de acuerdo con el grado de adsorción dentro de la matriz del suelo (Stone W., 1991).

2.1.3 Marco legal

Legislación en materia de suelos contaminados

La Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA), en su Título IV Capítulo III se refiere a la "Prevención y Control de la Contaminación del Suelo". Este capítulo expresa de manera general los criterios relacionados con la prevención y control de la contaminación del suelo; básicamente considera los residuos como la fuente principal de contaminación y hace referencia a su generación, manejo y disposición (Semarnat, 1998).

En el Artículo 134 se mencionan los criterios que se deben considerar para la prevención y control de la contaminación; en particular habla de prevenir y reducir la generación de residuos, así como incorporar técnicas de reciclaje y regular su manejo y disposición final.

Pese a la problemática que existe en el país sobre contaminación de suelos provocada por las actividades que se relacionan con el manejo de productos del petróleo, la ley no contempla de manera explícita la contaminación del suelo por otras fuentes, en particular por hidrocarburos. En el inciso IV del Artículo 134, se menciona que el uso de plaguicidas, fertilizantes y sustancias tóxicas debe ser compatible con el equilibrio de los ecosistemas. Y el Artículo 143 menciona "otras sustancias y materiales contaminantes; como por ejemplo, plaguicidas, fertilizantes y

demás materiales peligrosos que quedan sujetos a las Normas Oficiales Mexicanas que expidan, en el ámbito de su competencia, las instancias correspondientes”.

Por otro lado, la LGEEPA no incorpora los conceptos relacionados con la recuperación o restauración de suelos contaminados; sólo el Capítulo II del Título II (Biodiversidad), se refiere a la Zona de Restauración pero bajo el concepto de recuperación ecológica.

Aunque en el Artículo 3 se incluye dentro de las definiciones el concepto de *restauración* como el “conjunto de actividades tendientes a la recuperación y restablecimiento de las condiciones que propician la evolución y continuidad de los procesos naturales”; sólo en el inciso V del Artículo 134 se habla de que en los suelos contaminados deberán llevarse a cabo acciones para recuperar o restablecer sus condiciones de tal manera que puedan ser utilizados de acuerdo a los establecido en los programas de desarrollo urbano y ordenamiento ecológico aplicables.

Como parte de la LGEEPA, actualmente no se cuenta con un Reglamento referente a la contaminación de suelos, por lo que hasta hace pocos años, la participación de las autoridades se había enfocado a aplicar lo expresamente dispuesto en la Ley y en otros ordenamientos que por similitud se han extendido a los suelos contaminados (Profepa, 2000). Un ejemplo de lo anterior fue el uso de la NOM-052-ECOL-1993 (actualmente NOM-052-SEMARNAT-1993) que establece las características de los residuos peligrosos, como marco de comparación para determinar la contaminación de suelos y con base en ello establecer la necesidad de remediarlos. Esta práctica, durante un tiempo se hizo común pero originó diversas opiniones de rechazo ya que los suelos contaminados no pueden ser evaluados de la misma manera que un residuo peligroso, además de que causó confusión entre autoridades y el sector productivo del país.

De lo anterior, diversas instituciones gubernamentales, educativas y del sector privado, se dieron a la tarea de establecer criterios para la evaluación y limpieza de suelos contaminados con hidrocarburos. En 1998, y a iniciativa de la Profepa, se conformó el “Grupo de Trabajo sobre Restauración de Suelos Contaminados” (GDT), de carácter interinstitucional y multidisciplinario, cuyo objetivo fue el establecimiento de criterios interinos para la restauración de suelos contaminados (Profepa, 2000).

Desde sus inicios el trabajo del GDT estuvo enfocado a definir criterios que estuvieran acordes a las condiciones reales del país y en ese mismo año se dieron los primeros resultados que a la postre se fueron mejorando (Cancino M.A., et al, 1998).

A partir de la formación del GDT, se hicieron más intensos los esfuerzos realizados por las dependencias de gobierno, principalmente la Profepa y el Instituto Nacional de Ecología, para reglamentar en materia de suelos contaminados; de tal forma que desde 1998 y hasta la fecha se ha trabajado en el establecimiento de las bases políticas y en la formulación de elementos normativos.

En el año 2001 se publicaron por parte de la Semarnat las *Bases de Política para la Prevención de la Contaminación del Suelo y su Remediación*, que incluso incluyen una propuesta de Reglamento en Materia de Sitios Contaminados con Materiales y Residuos Peligrosos (Semarnat, 2001). En el año 2002 se emitió una norma emergente NOM-EM-138-ECOL-2002 que establecía los límites

máximos permisibles de contaminación en suelos afectados por hidrocarburos, la caracterización de sitios y procedimientos para la restauración. Esta norma fue revisada y mejorada con base en las experiencias adquiridas con su aplicación.

El 30 de marzo de 2005 se publicó en el Diario Oficial de la Federación la Norma Oficial Mexicana NOM-138-SEMARNAT/SS-2003, que establece los límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y las especificaciones para su caracterización y remediación; y que actualmente regula en el país la contaminación de suelos con hidrocarburos.

Criterios de limpieza para suelos contaminados con hidrocarburos

En la restauración de suelos contaminados uno de los aspectos más difíciles por reglamentar es el que concierne al establecimiento de criterios de limpieza. En particular, desarrollar criterios de limpieza para suelos con mezclas complejas de hidrocarburos del petróleo, tales como diesel, gasolina, o aceites residuales, representan una problemática difícil de resolver debido a que esto está ligado estrechamente con los efectos que los diversos compuestos del petróleo y de sus productos pueden ocasionar a la salud del hombre.

Aún cuando existen datos toxicológicos de algunos de los compuestos específicos que forman parte de los productos derivados del petróleo y que se han demostrado sus efectos adversos a la salud, hay un desconocimiento de las características toxicológicas del resto de los compuestos que también están presentes en dichos productos.

En Estados Unidos, por ejemplo, el establecimiento de criterios de limpieza para suelos y aguas subterráneas se basa en diversas investigaciones científicas realizadas para evaluar los efectos potenciales a la salud de los hidrocarburos del petróleo. De acuerdo con estas investigaciones se pudieron establecer dos categorías referentes a los efectos en la salud: a) el uso de datos de toxicidad de la totalidad de mezclas o del producto base (por ejemplo, combustible diesel, gasolina, etc.) y b) el uso de compuestos indicadores sustitutos para evaluar el riesgo y la toxicidad de la mezcla (por ejemplo, el benceno, bezo(a)pireno, etc.) (TPHCWG, Vol. 4, 1997).

Sin embargo, de la revisión de estas investigaciones, se desprende que la forma ideal para evaluar la peligrosidad sería utilizando datos sobre la mezcla a la cual estará expuesto el receptor potencial. Por lo general estos datos no están disponibles. Los datos con los que se cuenta son: 1) datos sobre la totalidad de algunas mezclas o productos base (ejemplo, gasolina, combustible para aviones y aceite mineral), 2) datos de algunos componentes individuales (indicadores, por ejemplo, benceno, benceno [a] pireno) y 3) datos sobre fracciones específicas de mezclas (por ejemplo, los datos de toxicidad disponibles para fracciones específicas, cubren la fracción aromáticos >C5 - C8 y la fracción alifática de los Hidrocarburos Totales del Petróleo (HTP)) (TPHCWG, Vol. 4, 1997).

A pesar de la falta de información para algunas mezclas o compuestos, muchos estados de la Unión Americana han desarrollado "criterios" o "estándares" que establecen las concentraciones de limpieza por alcanzar para combustibles fósiles. Sin embargo, no hay un consenso respecto a las concentraciones que representan o no un riesgo a la salud humana. Generalmente, los

criterios establecidos por algunos estados no están basados en una evaluación del riesgo y tienden a reflejar los niveles de limpieza asignados a las localidades más sensibles. Ocasionalmente, los estándares numéricos están basados en modificaciones hechas a partir de los estándares existentes para la calidad del agua que posiblemente no tengan relevancia con la contaminación del suelo (Miller Glenn C., et al, 1992).

Para los sitios que requieren acciones de remediación, no existe un nivel específico para el suelo que pueda ser universalmente aplicado para todos los sitios como una concentración de limpieza. Mejor dicho, existen diversos aspectos específicos de cada sitio tales como el tipo de contaminante (por ejemplo, gasolina, diesel, etc.), la concentración del contaminante, el tamaño del derrame, la profundidad del acuífero, y la distancia que existe entre asentamientos humanos o receptores ambientales y el área que ocupa el derrame. Estos factores deben ser evaluados de manera colectiva para estimar el nivel de riesgo presente en un sitio cualquiera (Miller Glenn C., et al, 1992).

Otro factor que puede afectar el establecimiento de criterios de limpieza para suelos contaminados con hidrocarburos, es el cambio en su composición química debido a su exposición a los elementos del ambiente. El proceso mediante el cual cualquier mezcla compleja de hidrocarburos experimenta cambios en el ambiente se llama "envejecimiento". Con el tiempo, estos productos derramados en un suelo no cuentan con muchos de los compuestos químicos originalmente presentes en la mezcla. El envejecimiento es un proceso complejo que involucra diversos procesos ambientales tales como la volatilización (evaporación), biodegradación, biotransformación y disolución. Estos procesos causan la remoción de muchos de los compuestos tóxicos más móviles que originalmente están presentes en los productos (por ejemplo, compuestos que son volátiles tienen una alta solubilidad en agua, bajos pesos moleculares y poca afinidad para unirse al suelo), mientras que dejan atrás los compuestos de mayor peso molecular los cuales son resistentes a la biodegradación y a la volatilización y tienen una fuerte afinidad para unirse con el suelo.

Lo anterior ha sido cada vez más aceptado por los estados y ahora se recomienda llevar a cabo una evaluación del riesgo para poder desarrollar o establecer niveles específicos de limpieza para cada sitio.

En la legislación de E. U. cada estado establece sus propios criterios de limpieza. En la mayoría se establecen los diversos contaminantes y el límite máximo permisible para cada uno de ellos, así como el método analítico aceptado para su determinación. Aunque el límite permisible de hidrocarburos en el suelo es diferente en cada estado, este valor varía desde 10 mg/kg hasta 10,000 mg/kg medidos como Hidrocarburos Totales del Petróleo (HTP), como en California. En un gran número de estados se considera que con 100 mg/kg de HTP un suelo debe ser remediado. No obstante, algunos estados no consideran un límite fijo, sino que éste se establece en función del riesgo que representa el contaminante para el entorno. En estos casos se propone un análisis de riesgo a la salud para determinar la magnitud del problema y entonces definir el límite de limpieza (Saval S., 1995).

En Canadá los criterios de evaluación son preestablecidos y se definen en función de diferentes parámetros, entre los cuales predomina el tipo de uso de suelo; agrícola, recreativo o residencial,

y comercial o industrial. El Ministerio del Ambiente de Quebec ha establecido distintos criterios dependiendo del uso del suelo. Para el tipo de suelo comercial o industrial establece un límite de 1,000 mg/kg de HTP (Van Ruymbeke C., 1996).

En México, la NOM-138-SEMARNAT/SS-2003 entró en vigor el 30 de marzo de 2005 y en ella se establecen los límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y las especificaciones para su caracterización y remediación. En esta norma básicamente se establecen de manera detallada las especificaciones para la caracterización de los suelos, entre las que destacan la descripción del sitio, la estrategia y el plan de muestreo, así como el manejo y conservación de las muestras. Por otro lado, también se establecen los criterios básicos para la remediación de los suelos, al igual que la evaluación del riesgo al ambiente y a la salud como una alternativa para establecer acciones específicas de remediación.

En esta norma los productos asociados a derrames de hidrocarburos se clasifican de acuerdo con sus características en hidrocarburos de fracción ligera, hidrocarburos de fracción media e hidrocarburos de fracción pesada Cuadro 1.

Cuadro 1
Hidrocarburos por analizar en función del producto contaminante
(Señalados en la NOM-138-SEMARNAT/SS-2003)

Producto Contaminante	Hidrocarburos					
	Fracción Pesada	HAP's	Fracción Media	HAP's	Fracción Ligera	BETEX
Mezclas	X	X	X	X	X	X
Petróleo crudo	X	X	X	X	X	X
Combustóleo	X	X				
Parafinas	X	X				
Petrolatos	X	X				
Aceites	X	X				
Gasóleo			X	X		
Diesel			X	X		
Turbosina			X	X		
Keroseno			X	X		
Creosota			X	X		
Gasavión					X	X
Gasolvente					X	X
Gasolinas					X	X
Gasnafta					X	X

Los límites permisibles establecidos para cada una de las fracciones, así como para los hidrocarburos específicos, se muestra en los Cuadros 2 y 3.

Cuadro 2
Límites máximos permisibles para fracciones de hidrocarburos en suelos
(NOM-138-SEMARNAT/SS-2003)

Fracción de Hidrocarburos	Uso de Suelo Predominante ¹ (mg/kg base seca)		
	Agrícola ²	Residencial ³	Industrial
Ligera	200	200	500
Media	1,200	1,200	5,000
Pesada	3,000	3,000	6,000

1 Para uso de suelo mixto, deberá aplicarse la especificación al menor valor de los usos de suelo involucrados

2 Agrícola, incluye suelo forestal, recreativo y de conservación

3 Industrial, incluye comercial (sic)

Cuadro 3
Límites máximos permisibles para hidrocarburos específicos en suelos
(NOM-138-SEMARNAT/SS-2003)

Hidrocarburos Específicos	Uso de Suelo Predominante ¹ (mg/kg base seca)		
	Agrícola ²	Residencial ³	Industrial
Benceno	6	6	15
Tolueno	40	40	100
Etilbenceno	10	10	25
Xilenos (suma de isómeros)	40	40	100
Benzo[a]pireno ⁴	2	2	10
Dibenzo[a,h]antraceno ⁴	2	2	10
Benzo[a]antraceno ⁴	2	2	10
Benzo[b]fluoranteno ⁴	2	2	10
Benzo[k]fluoranteno ⁴	8	8	80
Ideno[1,2,3-cd]pireno ⁴	2	2	10

1 Para uso de suelo mixto, deberá aplicarse la especificación al menor valor de los usos de suelo involucrados

2 Agrícola incluye suelo forestal, recreativo y de conservación

3 Industrial incluye comercial (sic)

4 La determinación de hidrocarburos aromáticos polinucleares deberá realizarse únicamente en los casos que se pretende demostrar que se está cumpliendo con los límites máximos permisibles

2.1.4 Métodos biológicos de remediación

Conceptos básicos de biorremediación

Las alternativas de manejo y tratamiento que han sido más utilizadas para resolver el problema de contaminación de suelos son la disposición final en confinamientos controlados, la incineración, o el lavado del suelo y el posterior tratamiento de la solución de lavado (Bandyopadhyay S., et al, 1994). En estos casos, los contaminantes simplemente se transforman o se transfieren a otro medio, tal es el caso de la incineración, en la que los contaminantes contenidos en la matriz del suelo se transforman y se transfieren al aire; o el caso de los confinamientos controlados donde lo único que se logra es mantener guardados los contaminantes y trasladar el problema para las generaciones futuras. Además, estas alternativas presentan otros aspectos importantes por resaltar, como es su alto costo, su limitada flexibilidad para tratar el suelo en el sitio (ya que por lo general el suelo contaminado se tiene que trasportar a otros lugares representando esto un riesgo) y la dificultad para tratar mezclas complejas de distintos contaminantes (Bandyopadhyay S., et al, 1994).

La necesidad de remediar sitios con mezclas complejas de compuestos peligrosos ha originado el desarrollo de nuevas tecnologías que permiten la destrucción de dichos compuestos en vez de transferirlos de una fase a otra o disponerlos en un sitio, como sucede con algunas de las tecnologías convencionales.

Quizá una de las alternativas que resultan más favorecedoras para hacer frente al problema de la contaminación de suelos son los métodos biológicos de tratamiento, también llamados de biorremediación. Estos métodos se basan en la capacidad que desarrollan los microorganismos para degradar ciertos contaminantes después de que han estado en contacto con éstos por periodos prolongados de tiempo. Los procesos de biorremediación son complejos dado que en éstos intervienen enzimas producidas por los propios microorganismos que favorecen reacciones bioquímicas para destruir los compuestos peligrosos específicos. Las principales reacciones que se favorecen en estos procesos son las de oxidación-reducción que resultan necesarias para la generación de la energía que requieren los microorganismos (Cookson John T., 1995).

Los métodos biológicos de tratamiento, que han sido utilizados con mayor frecuencia en las últimas décadas, ofrecen diversas ventajas sobre los métodos convencionales de manejo y tratamiento antes señalados; una de ellas, es que los contaminantes realmente se pueden transformar en compuestos inocuos al ambiente y no solamente se transfieren de lugar, como sucede en los otros métodos de tratamiento o de disposición.

La aplicabilidad de los métodos de biorremediación, depende de varios factores, como son: la profundidad de la contaminación, el tipo de suelo y sus características, el tipo y la concentración de los contaminantes, la presencia de microorganismos en el suelo, la presencia de nutrientes para el desarrollo de microorganismos, la presencia de aceptores finales de electrones para la respiración microbiana y las condiciones climatológicas de humedad y temperatura que imperan en el lugar (Saval Susana, 1996).

Dado que la posibilidad de aplicar estos métodos en el tratamiento de suelos contaminados está en función de que se cuente con una población de microorganismos capaz de llevar a cabo la degradación de los contaminantes, se han utilizado dos formas para promover la presencia de microorganismos en el suelo (Bandyopadhyay S., et al, 1994, Saval Susana, 1998):

- *Bioaumento*, que consiste en la adición de bacterias adaptadas bajo condiciones particulares para degradar ciertos compuestos; éstas pueden haber sido aisladas del mismo sitio afectado, o bien, pueden ser de marca (específica) comercial.
- *Bioestimulación*, que consiste en la adición de nutrientes al suelo, especialmente aquellos que son limitantes para la actividad bacteriana, con el fin de promover el crecimiento de la población de bacterias. También se incluye la adición de compuestos inorgánicos muy oxidados que puedan proporcionar oxígeno por la vía anóxica (peróxidos, óxidos o nitratos).

De acuerdo con los problemas señalados para otras técnicas de tratamiento o manejo de suelo contaminado, la biorremediación posee una serie de ventajas que la favorecen ante las demás técnicas disponibles. Algunas de estas ventajas son las siguientes (Cookson John T., 1995, Baker Katherine. y Herson Diane., 1994 y Saval Susana, 1996):

- La biorremediación puede llevarse a cabo *in-situ*
- Ofrece la eliminación permanente del residuo o compuesto
- Los sistemas biológicos son menos costosos
- Tiene una aceptación positiva entre el público
- Se elimina la responsabilidad de un riesgo a largo plazo
- Se minimiza la alteración del sitio
- Se elimina la responsabilidad y el costo de transporte
- Puede ser acoplada con otras técnicas de tratamiento

Sin embargo, también se pueden mencionar algunas desventajas de estos métodos, entre los que se pueden mencionar las siguientes:

- ❖ Tiempo prolongado para el tratamiento
- ❖ Algunos compuestos químicos no pueden ser biodegradados (recalcitrantes)
- ❖ Se requiere de un extenso monitoreo
- ❖ Requerimientos específicos para los lugares donde se realiza el tratamiento
- ❖ Toxicidad de los contaminantes
- ❖ Se requiere de un amplio conocimiento científico
- ❖ Producción potencial de subproductos desconocidos

Los requerimientos básicos para que se pueda llevar a cabo la biorremediación, incluyen, en orden de importancia: a) la presencia de microorganismos capaces de producir enzimas que

degraden los compuestos peligrosos, las enzimas degradan los compuestos a través de la explotación de las necesidades de energía de los organismos, b) la fuente de energía y un aceptor de electrones, dado que los microorganismos ganan su energía a través de las reacciones de óxido-reducción, y c) condiciones adecuadas de humedad, pH, temperatura, y presencia de nutrimentos para el crecimiento celular (Cookson John T., 1995).

Para lograr el proceso de biorremediación es importante identificar las condiciones ambientales que limitan el proceso para posteriormente controlar estas condiciones y optimizar la biorremediación. Desafortunadamente, el conocimiento sobre la transformación de compuestos químicos peligrosos y los adecuados mecanismos de control, no están completamente comprendidos.

La aplicación de reacciones catalizadoras de oxido-reducción podría parecer simple desde el punto de vista de la reactividad, si no fuera por la naturaleza específica de los microorganismos y de su bioquímica. Son necesarios controles ambientales muy meticulosos para la producción de catalizadores y de reacciones específicas deseadas. Esto resulta muy complejo, por lo que en el diseño de los procesos de biorremediación y su operación, es frecuente suponer ciertas condiciones sin el completo entendimiento de las reacciones químicas y de los principios biológicos involucrados. Esto conduce a un grado significativo de incertidumbre en el diseño y en la respuesta del sistema. Teóricamente el conocimiento de todos los aspectos químicos nunca es completo (Cookson John T., 1995); por ello, los procesos de biorremediación generalmente requieren de una serie de pruebas a nivel laboratorio y nivel piloto para asegurar su eficacia.

Métodos de Biorremediación

La biorremediación ofrece diversas tecnologías para el tratamiento de suelos contaminados, las cuales se clasifican en dos grandes grupos, *ex situ* e *in situ*. Las tecnologías *ex situ* son aquellas que involucran la remoción física del material contaminado hacia otra área donde se realiza el tratamiento (posiblemente dentro del mismo sitio afectado). Por otro lado, las tecnologías *in situ* son aquellas en las que el tratamiento del material contaminado se lleva a cabo en el mismo lugar, sin la necesidad de removerlo. La bioestimulación o el bioaumento de los microorganismos nativos pueden ser utilizados tanto en tratamientos *ex situ* como en los *in situ*.

Tratamiento biológico In Situ

La principal ventaja de los métodos de tratamiento *in situ*, es que el suelo sea tratado sin que tenga que ser excavado y transportado a otro sitio, lo cual implica un significativo ahorro en costos. Sin embargo, estos métodos requieren de periodos muy largos, además de que la certidumbre sobre la uniformidad del tratamiento es menor debido a la variabilidad en la características de los suelos o acuíferos y a que la eficacia del proceso es más difícil de verificar (FRTR_f, 2004).

Bioventeo

El bioventeo es una técnica novedosa que estimula la biodegradación natural *in situ* de algunos compuestos degradables aeróbicamente mediante el suministro de oxígeno para los microorganismos existentes en el sitio. El bioventeo se aplica siempre en la zona no saturada y utiliza pequeños flujos de aire para proporcionar únicamente el oxígeno necesario para sustentar la actividad bacteriana. La forma más común de suministrar el oxígeno es mediante la inyección de aire dentro del suelo contaminado. Además de la degradación de los compuestos residuales adsorbidos en la matriz del suelo, los compuestos volátiles son biodegradados como vapores que se mueven lentamente a través suelo biológicamente activo (EPA-OUST_d, 2003 y FRTR_g, 2004).

Este método puede ser considerado como de mediano a largo plazo. La velocidad de degradación puede variar desde algunos meses hasta varios años.

Su aplicación ha sido exitosa en la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos del petróleo, solventes no clorados, algunos plaguicidas, preservadores de la madera (como creosota o pentaclorofenol) y otros compuestos orgánicos.

Mientras que la biorremediación no puede degradar contaminantes inorgánicos, sí puede utilizarse para cambiar el estado de oxidación de los elementos para causar adsorción, acumulación y concentración de los compuesto inorgánicos en micro y macroorganismos. Aunque estas técnicas todavía están en etapa experimental, muestran prometedores resultados en la estabilización y remoción de compuestos inorgánicos del suelo.

Dos criterios básicos deben satisfacerse para aplicar exitosamente el bioventeo; primero, el aire debe ser capaz de cruzar a través del suelo en cantidades suficientes para mantener las condiciones aeróbicas; y segundo, los microorganismos debe estar presentes en grandes cantidades, suficientes para obtener índices razonables de biodegradación.

El tamaño de partícula y el contenido de agua en el suelo influyen significativamente en la permeabilidad requerida para el paso del aire. Probablemente la mayor limitante para la permeabilidad del gas es la excesiva humedad.

Bioaspersión

La bioaspersión es un método de remediación *in situ* que utiliza los microorganismos nativos para degradar los compuestos orgánicos en la zona saturada. En la bioaspersión el aire (oxígeno) y los nutrientes (si son necesarios) son inyectados en la zona saturada para aumentar la actividad biológica de los microorganismos nativos. Este método puede ser utilizado para reducir la concentración de los compuestos del petróleo que están disueltos en el agua subterránea, adsorbidos en el suelo por debajo del nivel estático y dentro de la franja capilar. Aunque los compuestos adsorbidos en el suelo en la zona no saturada pueden incluso ser tratados por bioaspersión, el bioventeo es generalmente más efectivo para estas condiciones.

La bioaspersión es más comúnmente utilizada en sitios contaminados con productos del petróleo de fracción media (por ejemplo, diesel o combustibles de avión); los productos de fracción ligera (como la gasolina) tienden a volatilizarse rápidamente y son más fácilmente removidos mediante métodos como la inyección de aire. Los productos pesados (como los aceites lubricantes) generalmente toman mayor tiempo para ser biodegradados que los productos ligeros, pero la bioaspersión puede ser utilizada aún para estos productos (EPA-OUST_c, 2003).

El proceso de bioaspersión es similar al método de inyección de aire, sin embargo, mientras que con este último se remueven los compuestos mediante volatilización, en la bioaspersión se promueve la biodegradación de los compuestos más que la volatilización (generalmente porque se usan menores niveles de flujo a los utilizados en la aspersión de aire). En la práctica, cierto grado de volatilización y biodegradación ocurren cuando se aplica la bioaspersión o la aspersión de aire.

Para la aplicación directa de la bioaspersión sobre los productos del petróleo, las bacterias que requieren de oxígeno como aceptor de electrones son más importantes en el proceso de biodegradación. El grado de biodegradación que se pueda alcanzar está en función del suministro de oxígeno en el área contaminada, dado que el metabolismo aeróbico es mucho más rápido que el metabolismo anaeróbico.

Bioaumentación

El bioaumentación *in situ* es un proceso en el cual los microorganismos nativos o inoculados (por ejemplo, hongos, bacterias y otros microbios) degradan contaminantes orgánicos contenidos en el suelo y/o en el agua subterránea y los convierte en productos finales inocuos. La actividad natural que realizan los microorganismos es estimulada haciendo circular las soluciones base (que contiene nutrientes, oxígeno y los demás elementos) a través del suelo contaminado para aumentar la degradación biológica *in situ* de los contaminantes orgánicos o para inmovilizar de los contaminantes inorgánicos (FRTR_h, 2004).

Para aumentar la biodegradación, así como la desorción de los contaminantes a partir de la superficie de los materiales, se utilizan nutrientes, oxígeno, y otros elementos o compuestos.

El bioaumentación en suelos típicamente involucra la precolación o inyección de agua no contaminada que se mezcla con nutrientes y se satura con oxígeno disuelto. Algunas veces también se agregan microorganismos aclimatados u otra fuente de oxígeno, como el peróxido de hidrógeno. Generalmente se utiliza un sistema de irrigación por aspersión cuando se trata de suelos poco profundos y en caso de que la contaminación se encuentre a profundidad se utilizan pozos de inyección.

Este método puede considerarse como de largo plazo, ya que puede requerir de varios años para limpiar una pluma de contaminación.

La principal ventaja de los procesos *in situ* es que permiten tratar el suelo sin la necesidad de removerlo del sitio, lo cual redundaría en una menor alteración de las actividades que se desarrollan en él. Con el bioaumentación se pueden alcanzar los niveles de limpieza establecidos en tiempos aceptables, lo cual reduce considerablemente los costos en comparación con otros métodos de tratamiento biológico en los cuales se tiene que remover y transportar el suelo. Además, con esta técnica tanto el suelo como el acuífero contaminados, pueden ser tratados simultáneamente lo cual representa una ventaja adicional en cuanto a los costos.

Fitorremediación

La fitorremediación es un proceso que utiliza plantas para remover, transferir, estabilizar y destruir contaminantes en suelos y sedimentos. Los mecanismos de la fitorremediación son el aumento de la biodegradación (rizosfera), la fitoextracción (también llamada fitoacumulación), la fitodegradación y la fitoestabilización (FRTR_i, 2004).

La biodegradación de la rizosfera se lleva a cabo en el suelo inmediato circundante a las raíces de la planta. Ciertas sustancias naturales son liberadas por las raíces de la planta suministrando nutrientes a los microorganismos, los cuales aumentan su actividad biológica.

La fitoacumulación es la recolección de los contaminantes por medio de las raíces de la planta y la traslocación/acumulación (fitoextracción) de los contaminantes en los retoños y en las hojas.

La fitodegradación es la metabolización de los contaminantes dentro del tejido de las plantas. Las plantas producen enzimas, tales como desalogenasas y oxigenasas, que ayudan como catalizadores de la degradación.

La fitoestabilización es un fenómeno mediante el cual la planta produce compuestos químicos que inmovilizan los contaminantes en la interfase entre las raíces y el suelo.

Las técnicas de fitorremediación pueden ser aplicables para la remediación de metales, plaguicidas, solventes, explosivos, petróleo crudo, HAP y lixiviados de rellenos sanitarios.

Tratamiento biológico Ex Situ

La principal ventaja de los métodos de tratamiento *ex situ*, es que generalmente requieren periodos de tiempo más cortos que los tratamientos *in situ* y además en éstos se puede tener una mayor certeza acerca de la uniformidad del tratamiento dado que es posible homogeneizar, cribar y mezclar continuamente el suelo. Sin embargo, el tratamiento *ex situ* requiere de la remoción del suelo lo cual conduce a incrementar los costos, utilizar equipo, manejar el material y exponer a los trabajadores (FRTR_a, 2004).

Bioreactores

El tratamiento en bioreactores es un proceso controlado en el que el suelo removido se mezcla con agua para formar una pulpa que se trata dentro del reactor. Esta técnica requiere de una preparación previa del suelo que consiste en separar los fragmentos de roca de mayor tamaño. Posteriormente el suelo se mezcla con el agua a una relación suelo/agua predeterminada, dependiendo de la concentración de los contaminantes, de la velocidad de degradación estimada y de la naturaleza física del suelo. En algunos procesos el suelo se lava para concentrar los contaminantes en la fase líquida y en las partículas más finas, que finalmente es lo que se trata en el reactor; de esta manera se descarta un volumen considerable de arenas (FRTR_e, 2004).

Dentro del reactor los sólidos se mantienen en suspensión y se mezclan con nutrientes y oxígeno. Si es necesario, se utilizan ácidos o materiales alcalinos para controlar el pH. También es posible incorporar microorganismos (bioaumento) si la población existente no es significativa. Cuando se completa la biodegradación se remueve el agua de la pulpa por decantación o filtración.

El tratamiento en bioreactores ha sido preferido respecto a los métodos de tratamiento *in situ* cuando se presentan suelos heterogéneos, suelos de baja permeabilidad, o cuando se requiere de un tratamiento rápido.

Los bioreactores pueden ser utilizados para tratar una gran variedad de contaminantes, como los compuestos halogenados y no halogenados, los orgánicos volátiles, plaguicidas y BPC. Este método de tratamiento puede ser considerado de corto a mediano plazo.

Biopilas

La bioremediación por biopilas es una tecnología de gran escala en la cual el suelo se coloca sobre una celda de tratamiento que incluye un sistema de recolección de lixiviados y un sistema de aireación. La humedad, la temperatura, los nutrientes, oxígeno y pH son los parámetros que deben ser controlados para favorecer la biodegradación (EPA-OUST_b, 2003 y FRTR_d, 2004).

El área de tratamiento se recubre con un material impermeable que puede ser arcilla compactada o geomembrana plástica, para reducir el riesgo de que los contaminantes lixiviados se puedan infiltrar al subsuelo. El lixiviado que se capta se puede tratar en un bioreactor antes de ser recirculado a la celda.

El suelo contaminado se apila sobre la base impermeable y cubre el sistema de aireación de tal forma que cuando se inyecta el aire, éste pasa a través del suelo apilado. El suelo apilado puede llegar a tener hasta 6 m de altura (aunque generalmente se recomienda que sean 2 a 3 m como máximo). La pila de suelo puede también ser recubierta con un material plástico para controlar la evaporación y la volatilización de algunos compuestos.

Las biopilas son una tecnología de corto plazo. La duración de las operaciones y el mantenimiento puede tardar de unas cuantas semanas hasta varios meses. Esta tecnología se ha aplicado para el tratamiento de compuestos orgánicos volátiles (COV) no halogenados, e hidrocarburos del petróleo. También pueden tratarse COV halogenados y plaguicidas pero la efectividad del proceso varía y puede ser que solo sea aplicable a algunos compuestos dentro de estos grupos de contaminantes.

Composteo

El composteo es un proceso biológico de descomposición controlada por el cual compuestos orgánicos (por ejemplo, HAP), con la incorporación de desechos orgánicos o materia orgánica, se convierten en productos estabilizados e inoctrinos, mediante la acción de microorganismos (bajo condiciones aeróbicas y anaeróbicas) (FRTR_b, 2004 y FRTR_c, 2004).

Se deben mantener condiciones termofílicas típicas, entre 54 y 65 °C, para un adecuado composteo del suelo contaminado con compuestos orgánicos peligrosos. El incremento de la temperatura ocasiona que haya un aumento de calor producido por los microorganismos durante la degradación.

El suelo contaminado se remueve y se mezcla con materia orgánica como aserrín de madera o residuos de animales y plantas, para mejorar la porosidad de la mezcla que se va a descomponer. La eficiencia máxima de degradación se alcanza manteniendo una adecuada oxigenación (por ejemplo, revolviendo diariamente la mezcla), regando con agua la mezcla cuanto sea necesario y controlando el contenido de agua y la temperatura.

Existen tres diseños de proceso utilizados para el composteo: a) pila estática de composteo aireada (la composta se forma en las pilas y el aire se hace circular mediante compresores o bombas de vacío), b) composteo en recipiente con agitación mecánica (la composta se forma en un recipiente cerrado o reactor, y se mezcla mecánicamente para airearla), y c) composteo en hileras (la composta se coloca en largas pilas conocidas como hileras y periódicamente se mezclan con equipo móvil). Esta última es considerada como la alternativa de mejor relación costo-efectividad, aunque es la que puede tener mayor generación de emisiones fugitivas.

El tratamiento por composteo puede ser aplicado a suelos y a lagunas de sedimentos contaminados con compuestos orgánicos biodegradables. Proyectos a nivel piloto y a gran escala han demostrado que el composteo aeróbico es capaz de reducir a niveles aceptables la concentración de explosivos en suelos (TNT, RDX, y HMX), picrato de amonio (o yellow-D) y la toxicidad asociada a estos compuestos. El composteo aeróbico es incluso aplicable al tratamiento de suelos contaminados con HAP.

Biolabranza

La biolabranza es también una tecnología de gran escala que consiste en colocar en una celda de tratamiento el suelo contaminado, removiéndolo periódicamente para promover la acción de los

microorganismos y degradar los compuestos tóxicos. La celda cuenta en la base con un recubrimiento de material impermeable (arcilla o geomembrana), para evitar que los lixiviados que se forman en el proceso de tratamiento puedan infiltrarse al subsuelo. El suelo contaminado se apila sobre la celda formando una capa delgada (de 30 a 50 cm) y periódicamente se remueve o se voltea para permitir la aireación (EPA-OUST_e, 2003 y NYSDEC, 1996).

Las condiciones del suelo frecuentemente son controladas para optimizar la velocidad de degradación. Las condiciones que generalmente se controlan son: a) el contenido de agua (mediante la irrigación o aspersión), b) aireación (revolviendo el suelo con lo cual también se logra homogeneización), c) pH, y d) nutrientes (como nitrógeno, fósforo y potasio, principalmente).

Cuando se ha alcanzado el nivel de degradación deseado, generalmente la capa de suelo tratado se retira para colocar otra capa e iniciar nuevamente el proceso; sin embargo, es posible remover solo una parte del material tratado y colocar la nueva capa de suelo contaminado sobre el material remanente y posteriormente mezclarlo. Esto permite inocular la nueva capa de suelo a tratar con los microorganismos en plena actividad, con lo cual se pueden reducir los tiempos de tratamiento.

El tratamiento por biolabranza ha sido aplicado con mayor éxito en el tratamiento de suelos contaminados con hidrocarburos, sobre todo cuando los contaminantes son hidrocarburos pesados. Sin embargo, frecuentemente los suelos se contaminan con mezclas de productos y residuos, por lo que pueden estar presentes algunos compuestos volátiles que se liberan a la atmósfera antes de que puedan ser degradados por los microorganismos.

Algunos contaminantes del suelo que pueden ser tratados exitosamente mediante biolabranza son el diesel, combustibles pesados, lodos aceitosos, pentaclorofenol, creosota, residuos del carbón y algunos plaguicidas.

Dada la complejidad que se puede encontrar en los suelos contaminados, la aplicación de un método biológico de tratamiento debe ser con un enfoque interdisciplinario en el que estén abarcadas disciplinas como química, microbiología, ingeniería, geología y ecología, entre otras (Baker K. y Herson D., 1994).

2.1.5 Descripción del método de biolabranza

El método de biolabranza es quizá uno de los más sencillos desde el punto de vista operativo y también seguramente de los que requieren de una menor inversión y con un costo de operación más bajo. Estas características fueron determinantes para seleccionarlo como método aplicable para el presente estudio.

La efectividad de este método depende de varios factores que pueden agruparse en tres categorías: a) características del suelo, b) características de los compuestos (hidrocarburos) y, c)

condiciones climáticas (EPA 510-B-94-003 y EPA 510-B-95-007, EPA-OUST_e 2003, Fletcher R. 1994, NYSDEC 1996, UFGS. 1998, U.S. Army Corps of Engineers 1996).

Características del suelo

- pH
- Humedad
- Temperatura
- Contenido de micro y macronutrientes
- Textura
- Densidad de la población microbiana

Características de los compuestos

- Concentración y toxicidad
- Volatilidad
- Estructura química

Condiciones climáticas

- Temperatura ambiente
- Precipitación pluvial
- Evapotranspiración
- Humedad
- Vientos

Características del suelo

pH del suelo: Para soportar el crecimiento de las bacterias, el pH del suelo debe estar entre 6 y 8, siendo óptimo un pH de 7. Cuando el pH no se encuentra en el intervalo deseable, éste se puede regular agregando cal para subirlo y azufre elemental para bajarlo (NYSDEC. 1996, EPA 510-B-94-003 y EPA 510-B-95-007, Baker K. 1994, U.S. Army Corps of Engineers 1996, Fletcher R. 1994, Cookson J., 1995).

Humedad: Los microorganismos requieren humedad para un adecuado crecimiento. Una cantidad excesiva de agua, puede restringir el movimiento de aire a través de los poros reduciendo la disponibilidad de oxígeno. El intervalo ideal de agua es de 40 a 85 % de la capacidad de campo del suelo; o bien, de 12 a 30 % en peso (NYSDEC. 1996, EPA 510-B-94-003 y EPA 510-B-95-007, Baker K. 1994, U.S. Army Corps of Engineers 1996, Cookson J. 1995).

Temperatura: Se ha observado que la actividad de los microorganismos en el suelo disminuye significativamente a temperaturas inferiores a los 10 °C y en casos esenciales debajo de los 5 °C.

La actividad de la mayoría de las bacterias importantes para la degradación de los hidrocarburos del petróleo, también disminuye a temperaturas mayores a 45 °C (NYSDEC. 1996, EPA 510-B-94-003 y EPA 510-B-95-007, U.S. Army Corps of Engineers 1996, Cookson J. 1995).

Dado que la temperatura del suelo varía de acuerdo con la temperatura del ambiente, habrá ciertos periodos en el año cuando las bacterias crecen y por ello la degradación de los constituyentes disminuye.

El periodo del año en el que la temperatura está en el intervalo óptimo para la actividad microbiana es comúnmente llamado “estación de labranza”.

Concentración de nutrimentos: Los microorganismos requieren de nutrimentos inorgánicos tales como el nitrógeno y fósforo para soportar el crecimiento celular y sustentar el proceso de biodegradación. Los nutrimentos pueden estar disponibles en concentraciones suficientes en los suelos, pero frecuentemente, es necesario agregar nutrimentos al suelo durante el tratamiento para mantener la población de bacterias. Una excesiva concentración de nutrimentos (por ejemplo, fosfatos y sulfatos) pueden reprimir el metabolismo microbiano.

La relación típica de carbono:nitrógeno:fósforo necesaria para la biodegradación está en el intervalo entre 100:10:1 a 100:1:0.5, dependiendo de los compuestos específicos y de los microorganismos relacionados en el proceso de biodegradación (EPA 510-B-94-003 y EPA 510-B-95-007).

Textura del suelo: La textura afecta la permeabilidad, contenido de humedad, y la densidad del suelo. Para asegurar que la oxigenación, la distribución de los nutrimentos y el contenido de humedad del suelo, pueda mantenerse en los niveles adecuados para la biodegradación, se debe considerar la textura del suelo. Los suelos que tienden a juntarse o agruparse (como las arcillas), son difíciles de airear y esto tiene como consecuencia una pobre distribución de oxígeno. Estos suelos también retienen la humedad por un periodo mayor de tiempo después de un evento de precipitación (EPA 510-B-94-003 y EPA 510-B-95-007).

Densidad de la población microbiana: Los suelos normalmente contienen una gran variedad de microorganismos que incluyen bacterias, algas, hongos, protozoarios y actinomicetos. En suelos que presentan buenas condiciones de drenaje, estos organismos son aerobios. Las bacterias son las más numerosas y bioquímicamente son el grupo activo, particularmente a bajos niveles de oxígeno.

Aplicaciones recientes de tratamiento de suelo *ex-situ*, incluyen el mezclado del suelo con microorganismos cultivados o abono animal (generalmente de pollo o de vaca). La incorporación de abono sirve para aumentar la población de microorganismos y provee de nutrimentos adicionales.

El proceso metabólico utilizado por las bacterias para producir energía requiere de un aceptor terminal de electrones (TEA) para oxidar mediante enzimas el carbono a dióxido de carbono. Los microorganismos se clasifican por la fuente de carbono y de TEA que usan para llevar a cabo sus procesos metabólicos. Las bacterias que utilizan compuestos orgánicos como fuente de

carbón se llaman heterotróficos; aquellos que utilizan compuestos inorgánicos de carbono (por ejemplo, dióxido de carbono) son autotróficos. Las bacterias que usan oxígeno como su TEA son aeróbicas, aquellas que usan otro compuesto diferente al oxígeno (nitratos o sulfatos) son anaeróbicas; y las que utilizan ambos oxígeno y otros compuestos como TEA son facultativas.

La densidad de población microbiana en suelos típicos es de 10^4 a 10^7 CFU/g de suelo. Para que el método de biolabranza sea efectivo la cuenta viable mínima de microorganismos debe ser de 10^3 CFU/g (Troy A. M., 1994).

Características de los contaminantes

Concentración y toxicidad: La presencia de altas concentraciones de compuestos orgánicos del petróleo o de metales pesados en los suelos puede resultar tóxico para los microorganismos o inhibir el crecimiento y reproducción de las bacterias responsables de la biodegradación en el tratamiento.

En general la concentración en suelos de HTP entre 10,000 a 50,000 ppm, o metales pesados que excedan una concentración de 2,500 ppm, puede ser considerada como inhibidora o tóxica para la mayoría de los microorganismos (EPA 510-B-94-003 y EPA 510-B-95-007).

Además de las concentraciones máximas se deben considerar los niveles de limpieza propuestos para un tratamiento por el método de biolabranza. Por debajo de un cierto valor de concentración de fondo (umbral), las bacterias no podrán obtener el suficiente carbono (de la degradación de los contaminantes) para mantener una adecuada actividad biológica.

Aunque el valor de fondo varía dependiendo de las características de las bacterias específicas y de los compuestos específicos, generalmente concentraciones inferiores a 0.1 ppm no son alcanzables mediante tratamientos biológicos solos. La experiencia ha mostrado que reducir concentraciones de HTP más allá del 95 % puede ser muy difícil de alcanzar, debido a la presencia de compuestos recalcitrantes o especies no degradables que se incluyen en los análisis de HTP.

Volatilidad: La volatilidad de los contaminantes propuestos para el tratamiento por biolabranza es importante dado que los compuestos volátiles tienden a evaporarse de la celda de tratamiento, principalmente durante la aireación, antes de que sean biodegradados por las bacterias (EPA 510-B-94-003 y EPA 510-B-95-007).

Los productos del petróleo que generalmente se encuentran en sitios contaminados, varían desde aquellos que contienen una fracción significativa de compuestos volátiles, tal como es el caso de la gasolina, hasta aquellos que tienen en mayor proporción compuestos no volátiles, como los combustibles y los aceites lubricantes. Los productos del petróleo generalmente contienen más de un ciento de compuestos diferentes que poseen un amplio intervalo de volatilidad. En general la gasolina, el queroseno y el diesel, contienen compuesto de alta volatilidad que se evaporan en el tratamiento.

Estructura química: La estructura química de los contaminantes es importante en la determinación de la velocidad a la que se llevará a cabo la biodegradación. Los compuestos alifáticos y monoaromáticos de más bajo peso molecular (menos de nueve átomos de carbono) son más fácilmente biodegradables que aquellos de mayor peso molecular alifáticos o compuestos orgánicos poliaromáticos (EPA 510-B-94-003 y EPA 510-B-95-007).

La evaluación de la estructura química de los compuestos en el tratamiento, permite determinar cuáles son los compuestos que serán más difíciles para biodegradar. Los tiempos determinados en las pruebas de biotratabilidad y en pruebas piloto de campo, la operación de biolabranza y el plan de monitoreo, deben basarse en los tiempos requeridos para los compuestos más difíciles de degradar.

Condiciones climáticas

Generalmente las celdas de tratamiento no son cubiertas, por lo que están expuestas a los factores climáticos como la lluvia, viento y nieve, así como a la temperatura ambiente.

Temperatura ambiente: La temperatura del ambiente es importante porque influye directamente en la temperatura del suelo, que a su vez impacta la actividad de las bacterias y por consiguiente la biodegradación. El intervalo óptimo de temperatura para este método es de 10 a 45 °C.

Precipitación pluvial: El agua de lluvia que cae dentro o que corre hacia dentro de una celda de tratamiento incrementa el contenido de agua en el suelo y ocasiona erosión. Como se describió anteriormente, se requiere que la humedad se mantenga en un intervalo óptimo para que el proceso resulte efectivo.

En sitios donde la precipitación anual es mayor a 30 in (762 mm) es necesario considerar en el diseño de la celda de tratamiento algún tipo de protección (por ejemplo, un techo, una lona, una estructura cubierta, etc.). Además se debe controlar el escurrimiento de agua hacia el interior de la celda de tratamiento utilizando bermas y bordos perimetrales.

La celda de tratamiento debe contar con un sistema de drenaje en el fondo, para captar el agua que escurre dentro de la misma y evitar posible contaminación del suelo o cuerpos de agua.

Evapotranspiración: Este fenómeno involucra dos procesos donde se pierde humedad, la evaporación directa del suelo y la transpiración de las plantas. Generalmente los datos de evapotranspiración pueden sobre estimar la pérdida de agua debido a que en el proceso de biolabranza no intervienen las plantas. Además, la aireación periódica del suelo incrementa significativamente la evaporación directa. Por experiencia, resulta más conveniente utilizar los datos de evapotranspiración ya que éstos predicen de una manera más precisa la pérdida de humedad, en comparación con el uso exclusivo de los datos de evaporación.

Humedad: La cantidad óptima de agua puede ser variable, dependiendo de la afinidad del suelo por el agua. Si los microorganismos no pueden retener el agua y la pierden liberándola dentro del suelo, el proceso de degradación puede hacerse lento o incluso, interrumpirse. Por el

contrario, un exceso de agua puede llenar el espacio de poro y evitar la entrada de aire al suelo. El exceso de agua incluso puede llegar a lixiviar los nutrientes y sacarlos de la zona de tratamiento.

El agua generalmente se agrega mediante bombeo a partir de un tanque de almacenamiento y la dispersión para rociar completamente el área de tratamiento se hace utilizando aspersores. En la mayoría de los casos es posible agregar los nutrientes dentro del tanque antes de rociar el agua a la celda.

Viento: La erosión puede ocurrir durante la época de vientos y particularmente durante la remoción del suelo para la aireación. La erosión se puede minimizar agregando agua periódicamente para mantener la humedad.

2.2 ANTECEDENTES DEL SITIO DE ESTUDIO

2.2.1 Operaciones de la empresa minera

El Consorcio Minero Benito Juárez Peña Colorada, se localiza en el estado de Colima, México, en la porción suroriental de la costa del Pacífico. Está formado por dos unidades productivas; la mina, localizada en el municipio de Minatitlán, donde se lleva a cabo la explotación y la concentración del mineral de hierro, y la planta de peletizado, que se ubica en el municipio de Manzanillo y donde, a partir del concentrado de mineral, se producen pellets¹ que constituyen el producto final y que son utilizados como materia prima para la fabricación del acero (PIQAYQA 1992).

El CMBJPC explota un yacimiento de hierro que cuenta con el 30% de las reservas totales en el país. El hierro en su estado natural se encuentra como dos especies mineralógicas; la hematita (Fe_2O_3) y la magnetita (Fe_3O_4). El mineral que básicamente se aprovecha en el proceso de Peña Colorada es la magnetita.

El proceso que se lleva a cabo en la mina consiste básicamente en la explotación del mineral de hierro mediante un método a cielo abierto. El mineral extraído se acarrea hasta la planta concentradora, donde se realiza un proceso de separación magnética para separar el mineral de hierro del material estéril. El producto final del proceso es una pulpa formada por el mineral de hierro concentrado y agua. Esta pulpa se envía por gravedad a través de una tubería, llamada ferroaducto, hasta la planta de peletizado (PIQAYQA 1992). En la Figura 1 se muestra un diagrama de flujo del proceso que se realiza en la mina.

¹ El término pellet se usa para identificar el mineral aglomerado en forma esférica, tomando la apariencia de una "canica".

En la planta de peletizado, a la pulpa que llega de la mina se le remueve el agua y el mineral de hierro se aglomera en discos rotatorios formando los pellets (al cual se le da el nombre de pellet verde). Los pellets verdes pasan al horno de cocción donde se lleva a cabo un proceso de oxidación y endurecimiento. Finalmente, se hace una clasificación por tamaño y se separa el producto final que el pellet con un tamaño entre 6 y 10 mm de diámetro. El producto final se almacena en los patios de la planta y se embarca a la Siderúrgica Lázaro Cárdenas en Michoacán (PIQAYQA 1992). En la Figura 2 se muestra un diagrama de flujo del proceso que se realiza en la planta de peletizado.

2.2.2 Usos y manejo de los hidrocarburos

En las diversas actividades que se realizan en el CMBJPC es necesario el uso de grandes volúmenes de aceites lubricantes, grasas y combustibles.

En la mina se emplea el diesel como combustible y una gran cantidad de aceite para el mantenimiento del equipo móvil, el cual consta de camiones para el transporte de mineral, cargadores, palas, perforadoras, equipos auxiliares y vehículos de servicio. En la planta concentradora se usa grasa y aceite para mantener en buen funcionamiento las partes móviles de los equipos, como es el caso de los motores, bandas transportadoras, engranajes, etc..

En la planta de peletizado el combustible de mayor consumo es el combustóleo, que se emplea para calentar los hornos donde se oxida el pellet. También se utiliza diesel, aunque en menor cantidad, para los camiones que transportan el pellet y la locomotora que se ocupa para cargar las góndolas del ferrocarril. Los aceites y las grasas, al igual que en la mina, se utilizan para el mantenimiento del equipo.

Considerando que el consumo de estos materiales ha variado durante el tiempo de operación de la empresa, en el Cuadro 4 se presenta el tipo y el consumo promedio anual de aceites y combustibles en la mina. El tipo de aceites, grasas y combustibles, así como su consumo promedio anual en la planta de peletizado se presenta en el Cuadro 5.

El uso de combustibles y aceites ha ocasionado la afectación del suelo en áreas muy localizadas de algunas instalaciones tanto en la mina como en la planta de peletizado. Particularmente la afectación se observa en talleres de mantenimiento y sitios de almacenamiento.

En la problemática ocasionada por el manejo de hidrocarburos intervienen varios factores que han sido considerados para hacer una evaluación integral de la situación actual. Estos factores se relacionan principalmente con malas prácticas de operación, instalaciones de almacenamiento deficientes, falta de procedimientos para el manejo de los materiales, supervisión insuficiente de actividades, capacitación del personal y falta de conciencia ambiental. La solución de fondo a la problemática de la contaminación de los suelos, incluye también la atención de estos factores.

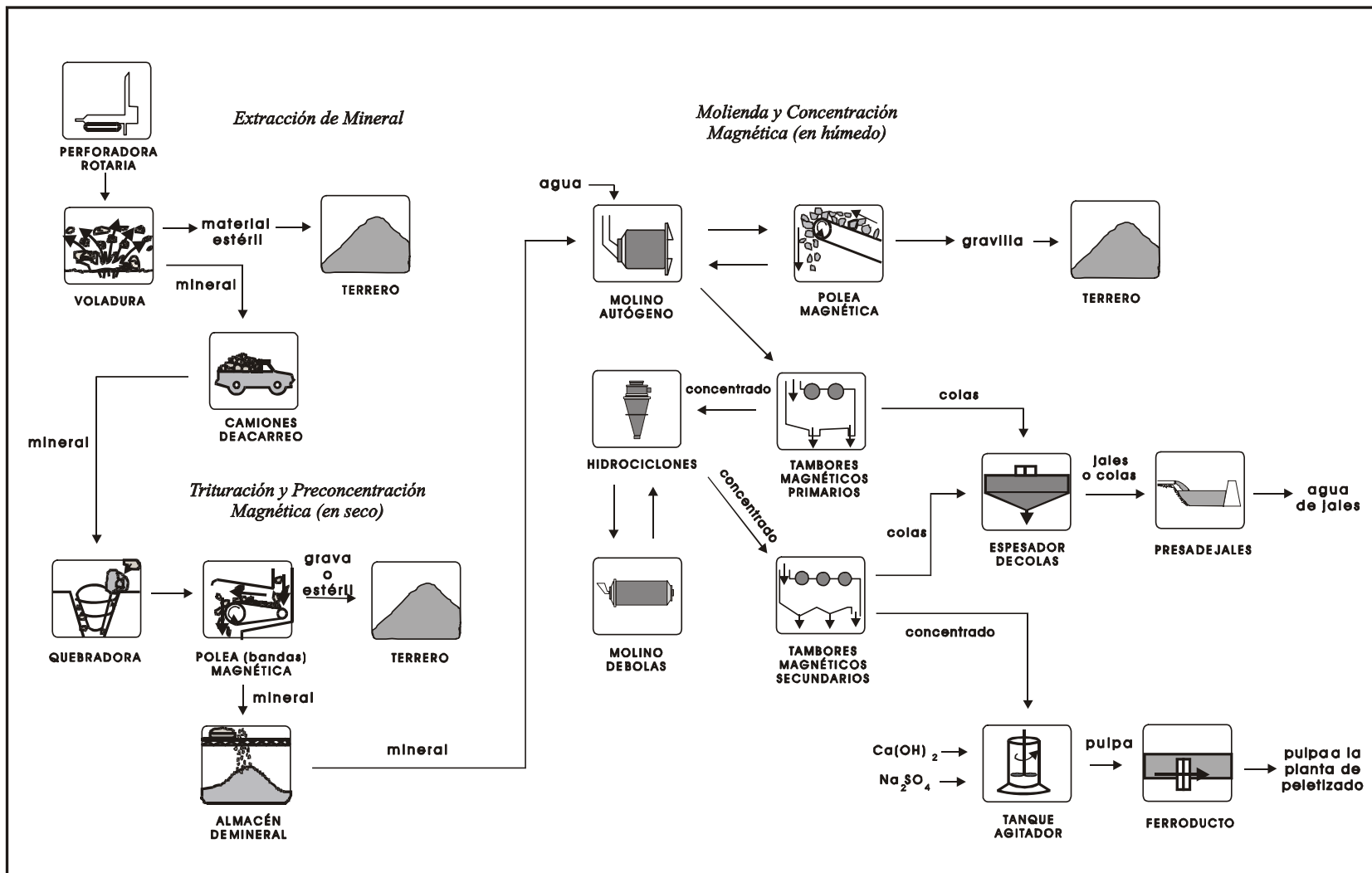


Figura 1
Diagrama de flujo del proceso de la mina

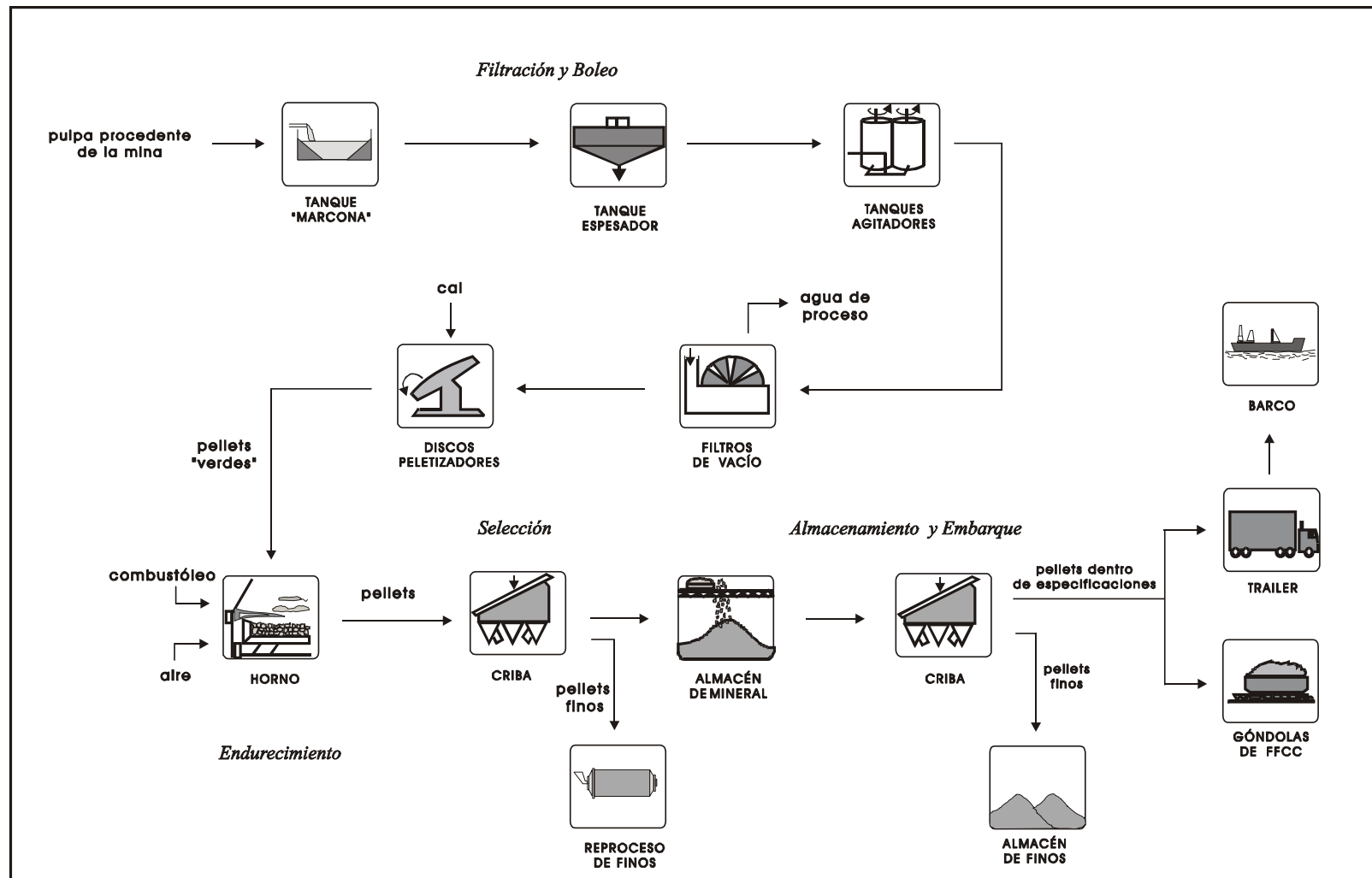


Figura 2
Diagrama de flujo del proceso de la planta de peletizado

Cuadro 4
Consumo de aceites, grasas y combustibles. Mina

Tipo de material	Marca	Clave	Consumo Anual
Aceite Disal HD 4/10	Elf	11701518	264 053 L
Aceite Disal HD 4/40	Elf	11701520	115 149 L
Aceite Disal HD 4/30	Elf	11701014	60 021 L
Aceite HD 90	Mobil	11701509	17 408 L
Aceite Vanelf 32	Elf	11701018	1 400 L
Aceite 15W40	Elf	11701017	10 000 L
Aceite Reductelf 1000	Elf	11701022	2 200 L
Aceite Disal HD 4/50	Elf	11701013	8 600 L
Aceite Mobilube HD 140	Mobil	11701510	4 400 L
Aceite transmisión automática ATF 220		11701512	6 424 L
Hidromarina HV 32	Elf	11701522	1 000 L
Aceite Lubricante Anglamol 6055		11701525	2 400 L
Grasa Elfo Litrexa	Elf	11731509	30 860 Kg
Grasa Crater 2x		11731501	28 522 Kg
Diesel	PEMEX		11 754 m ³

Cuadro 5
Consumo de aceites, grasas y combustibles. Planta de pelletizado

Tipo de hidrocarburo	Marca	Clave	Consumo Anual
Aceite DTE Oil 26	Mobil	21701013	2080 L
Aceite dieléctrico Mobilect 35	Mobil	21701004	4 992 L
Aceite Estivalub	Multiform	21701005	1 600 L
Aceite Speed & Power No. 90	Multiform	21701006	6 200 L
Aceite Mobil Gear 630	Mobil	21701009	4 784 L
Aceite Mobil Gear 632	Mobil	21701010	1 456 L
Aceite Mobil Gear 634	Mobil	21701011	832 L
Aceite DTE Oil Extra Heavy	Mobil	21701015	7 280 L
Aceite DTE Oil Heavy Medium	Mobil	21701016	9 360 L
Aceite Mobil 1340 (HD 4/40)	Mobil	21701022	4 000 L
Aceite Mobil Delvac 1310 (HD 4/10)	Mobil	21701518	7 400 L
Grasa Crater 2X		21731501	9 984 Kg
Combustóleo	Pemex	21312001	33 773 m ³
Diesel	Pemex	21320001	444 m ³

2.2.3 Ubicación de los sitios afectados

La ubicación de las instalaciones es un aspecto muy importante ya que el riesgo que representan para el ambiente, en gran medida está en función de las características del entorno.

La mina está ubicada en una zona montañosa y sus instalaciones están distribuidas entre los 900 a 1,300 msnm. Los centros de población más cercanos a la mina son El Poblado, que es la colonia de los trabajadores y que se localiza al sur de la mina a 2.8 km en línea recta y a una elevación de 650 msnm, y Minatitlán que está ubicada al oriente de la mina a 4.5 km en línea recta y a una elevación de 740 msnm. En los sitios afectados no existe propiamente una capa de suelo natural, ya que ésta fue removida desde la construcción de las instalaciones; lo que se tiene como piso es un material de relleno proveniente de la misma explotación de la roca que cubre al yacimiento mineral. En cuanto a la presencia de cuerpos superficiales y subterráneos de agua, el río Minatitlán se encuentra a una distancia de 2,650 m de la mina en línea recta y a una elevación de 650 msnm; en las inmediaciones del río el acuífero es somero y se encuentra entre 3 y 5 m de profundidad.

La planta de peletizado se ubica a 3 km del puerto de Manzanillo. La zona donde se encuentra es de uso industrial y de servicios, donde prácticamente no hay población expuesta; además la planta colinda con una estación satélite de PEMEX. En la planta la capa de suelo original ha sido cubierta por el mineral que se utiliza en el proceso y también por pellets. El basamento donde se encuentra la planta es un material de aluvión (de permeabilidad intermedia). Los acuíferos en la zona costera son cercanos a la superficie y su profundidad varía de 3 hasta 8 m. En la planta, durante la época de lluvias, el nivel estático llega hasta 11 m de profundidad².

La descripción anterior sirve para ubicar en el contexto ambiental los sitios afectados y con ello hacer un análisis preliminar del riesgo que representan para el ambiente. En el Apéndice 1 se presenta una descripción más detallada de las características del medio físico y biológico en las dos áreas de operación (Minatitlán y Manzanillo).

Los sitios afectados en la mina y en la planta de peletizado se identifican de la siguiente manera:

Área de la mina

- Taller de mantenimiento La Encantada
- Almacén de explosivos Polvorín

Planta de peletizado

- Fosa de recepción de combustóleo
- Tanque de diesel en la zona de embarque

² De acuerdo con mediciones hechas en los pozos de agua que tiene la empresa dentro de sus instalaciones.

2.2.4 Características de la afectación

Taller La Encantada

En el taller La Encantada, se realiza el mantenimiento del equipo móvil que opera en la mina; camiones, cargadores, pipas y equipos auxiliares. En el taller se observan diversos lugares que muestran contaminación del suelo con aceites lubricantes y diesel. Estos lugares son los siguientes:

- Accesos a las áreas de mantenimiento (almacén y patio general)
- Caseta de descarga del diesel
- Estación de carga de diesel
- Rampa de lavado
- Almacén de aceites gastados

Accesos a las áreas de mantenimiento. En el taller se tienen dos áreas de trabajo para realizar el mantenimiento. Una de ellas es la del almacén; este acceso tiene una longitud aproximada de 71 m y la parte que se observa más afectada se extiende hasta 10 m de ancho a partir de la entrada y disminuye gradualmente hasta los 20 m (Figura 3). La otra área de trabajo está en el patio general y presenta características similares; el acceso tiene una longitud aproximada de 36 m el aceite en el suelo se extiende hasta 15 m de ancho a partir de la entrada, disminuyendo gradualmente (Figura 4).

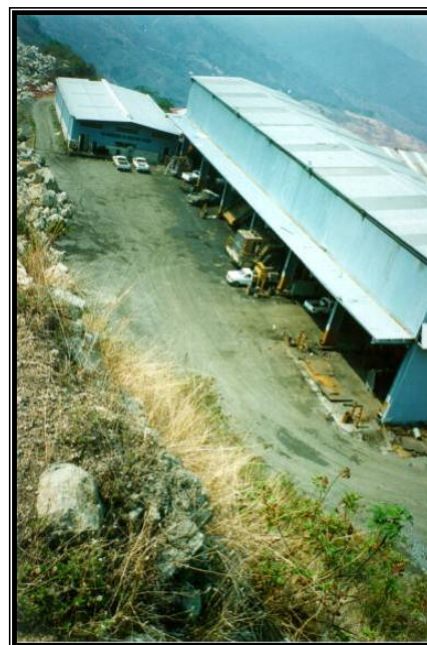


Figura 3. Área de mantenimiento del taller La Encantada acceso almacén



Figura 4. Área de mantenimiento del taller La Encantada patio general y rampa de lavado

Caseta de descarga del diesel. La caseta está ubicada fuera del área del taller, en la parte alta sobre el camino de acceso. El proveedor descarga el diesel en este sitio, el cual escurre por gravedad hacia los tanques de almacenamiento. Alrededor de la caseta se aprecia en el suelo una franja de diesel producto de derrames, seguramente ocasionados durante la maniobra de descarga (Figura 5). Esta franja no excede los 2 m de ancho, aunque se observa que parte del combustible ha escurrido hacia la ladera.

Figura 5. Caseta de descarga del diesel en el taller La Encantada



Estación de carga de diesel. En el costado oriente del área donde se ubican los tanques de almacenamiento de combustibles, se carga el diesel en los camiones, pipas, cargadores y otros equipos. Esta operación se hace a través de una tubería que sale de los tanques y que está

suspendida para suministrar el combustible por la parte superior de los equipos. Se observa en el suelo una mancha de diesel que se extiende aproximadamente hasta 20 m, pendiente abajo, del punto de carga. Como el terreno tiene una ligera pendiente, el combustible escurre hacia el área de mantenimiento (Figura 6).

Rampa de lavado. La rampa de lavado se encuentra en el patio del taller y aquí se hace la limpieza de la parte inferior de los equipos (suspensión y chasis). Alrededor de la rampa se observa la presencia de aceite en una franja de 10 m de ancho (Figura 4). En la rampa se acumula un lodo formado por agua, aceite y grasa, que se desprende de los equipos cuando son lavados.



Figura 6. Estación para cargar diesel en el taller La Encantada

Almacén de aceites gastados. El aceite gastado que se genera en el taller se almacena en dos tanques localizados en el lado oriente (Figura 7). El almacén está cubierto y cuenta con un dique de contención. Sin embargo, alrededor del almacén se observan manchas de aceite en el suelo, que se originan por el derrame de aceite al momento de vaciar los tambores de 200 L en los tanques. Hacia el lado oriente del almacén, la ladera se encuentra a 20 m aproximadamente, y en este sitio se observan escurrimientos de aceite procedentes tanto del patio del taller como del almacén de aceite.



Figura 7. Almacén de aceites gastados en el taller La Encantada

Polvorín

En el polvorín se almacena el nitrato de amonio que se usa junto con diesel para formular el explosivo que es utilizado en la explotación del mineral. El mezclado de estos materiales se realiza en un camión; primero se carga el diesel y posteriormente el nitrato de amonio. Una vez formado el explosivo el camión lo lleva a los bancos de explotación donde es cargado en los barrenos³.

En el sitio donde se estaciona el camión para cargar el nitrato de amonio existe una mancha de diesel, justo en el costado oriente del almacén. El área que se observa afectada es aproximadamente de 60 m², aunque también se aprecia que el combustible escurre hacia una ladera a 25 m del punto donde se origina el problema (Figura 8).



Figura 8. Zona para cargar el nitrato de amonio en el Polvorín

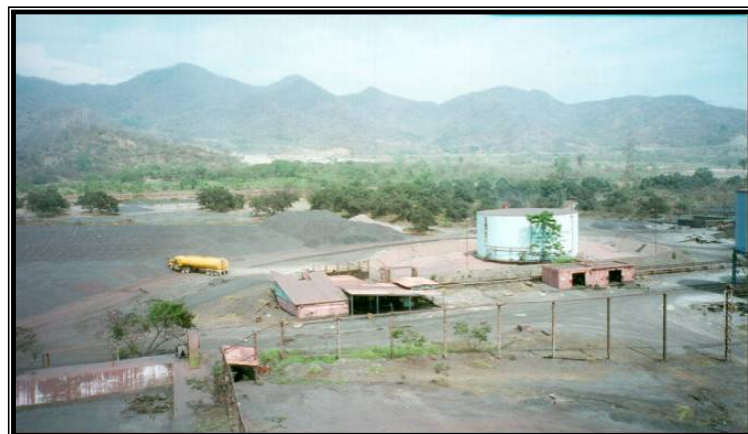
En el lugar donde se estaciona el camión cuando no está en servicio, también se aprecia una mancha de aproximadamente 40 m². Esto se debe al goteo de combustible que queda en el camión cuando no está en operación.

Fosa de combustóleo

El combustóleo que se emplea en el proceso de pelletizado se almacena en un tanque con capacidad de 3,300 m³. El combustible llega en pipas y se descarga en una fosa descubierta. Después se bombea hasta el tanque de almacenamiento y de aquí se distribuye al área de proceso (Figura 9).

³ El barreno es una perforación que se hace en el mineral para cargarse con explosivo y realizar la explotación.

Figura 9. Fosa de recepción de combustóleo, tanque de almacenamiento y casa de bombas



El punto donde se descarga el combustóleo es un registro que no cuenta con dique de contención y alrededor de éste se observa la presencia de combustóleo. De igual forma en la fosa de recepción existe combustóleo en el suelo, producto posiblemente de derrames ocasionados por sobrellenar la fosa. En la parte inferior de la pared se aprecia el combustible producto del escurrimiento por sobrellenado.

El tanque de almacenamiento cuenta con un dique de contención y alrededor de éste no se aprecia la presencia de hidrocarburos. Sin embargo, en la casa de bombas, localizada en el lado oeste del dique, se observa el suelo afectado por combustóleo.

Figura 10 Tanque de diesel en la zona de embarque



Tanque de diesel (Zona de Embarque)

En la zona de embarque se ubica un tanque de diesel con capacidad de 14,000 L. En este sitio se suministra el combustible a la locomotora que se utiliza para mover las góndolas de ferrocarril, aunque también cargan diesel algunos vehículos que dan servicio a la planta.

El tanque es elevado y la operación de carga se hace por la parte superior de los equipos (Figura 10). En este punto se observa en el suelo una mancha de diesel de aproximadamente 5 m de diámetro, la cual se originó por derrames ocurridos durante la maniobra de carga.

3. METODOLOGÍA APLICADA

La metodología empleada para realizar el trabajo experimental se dividió en cinco etapas, de tal forma que en cada etapa se generó la información y los datos suficientes para el desarrollo de la etapa posterior.

Las etapas en las que se dividió el estudio son las siguientes:

1ª Etapa Caracterización de los sitios contaminados

2ª Etapa Selección del método de remediación (criterios y estudio de tratabilidad)

3ª Etapa Pruebas a nivel laboratorio (preparación de muestras, aislamiento de bacterias, biodegradación, bioestimulación)

4ª Etapa Pruebas en campo (preparación de muestras, caracterización de lodos, pruebas con lodos, pruebas con medio mineral)

Finalmente, la quinta etapa consistió en el diseño de una celda de tratamiento para realizar la prueba de escalamiento, la cual permite evaluar los aspectos de diseño, operación, y costo, de un sistema de tratamiento a mayor escala. De esta última etapa, en el presente trabajo se hizo el diseño de la celda y se establecieron los parámetros y condiciones de operación; éstos se presentan en el Capítulo 5, al igual que algunos aspectos generales de la construcción de la celda. Las Figuras 11, 12 y 13 muestran diagramas de flujo con la metodología aplicada para este estudio.

3.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS SITIOS

La caracterización consiste, de manera general, en determinar el nivel de concentración de hidrocarburos en el suelo, la profundidad hasta la que se encuentra el contaminante, la extensión superficial que abarca la afectación y otros parámetros generales del suelo como pH, textura, conductividad eléctrica y contenido de metales.

La adecuada caracterización de un sitio contaminado está en función del diseño del muestreo, del procedimiento para tomar las muestras y de la calidad de los resultados analíticos.

El muestreo se realizó en cada uno de los sitios afectados utilizando el equipo de perforación de la empresa. Fue posible tomar muestras a diferentes profundidades y con ello hacer una estimación preliminar del volumen de suelo afectado.

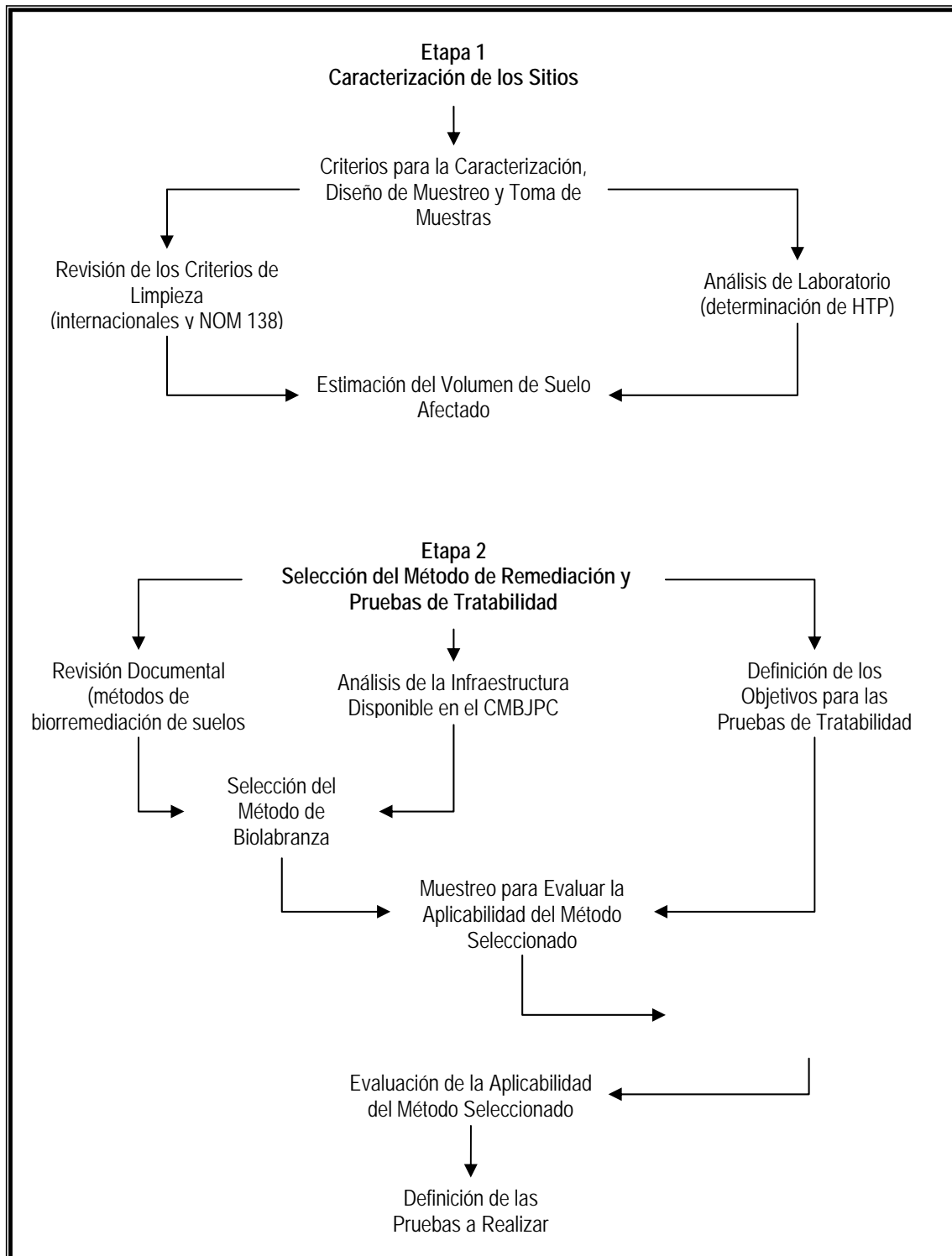


Figura 11. Diagrama de flujo de la metodología aplicada en las Etapas 1 y 2

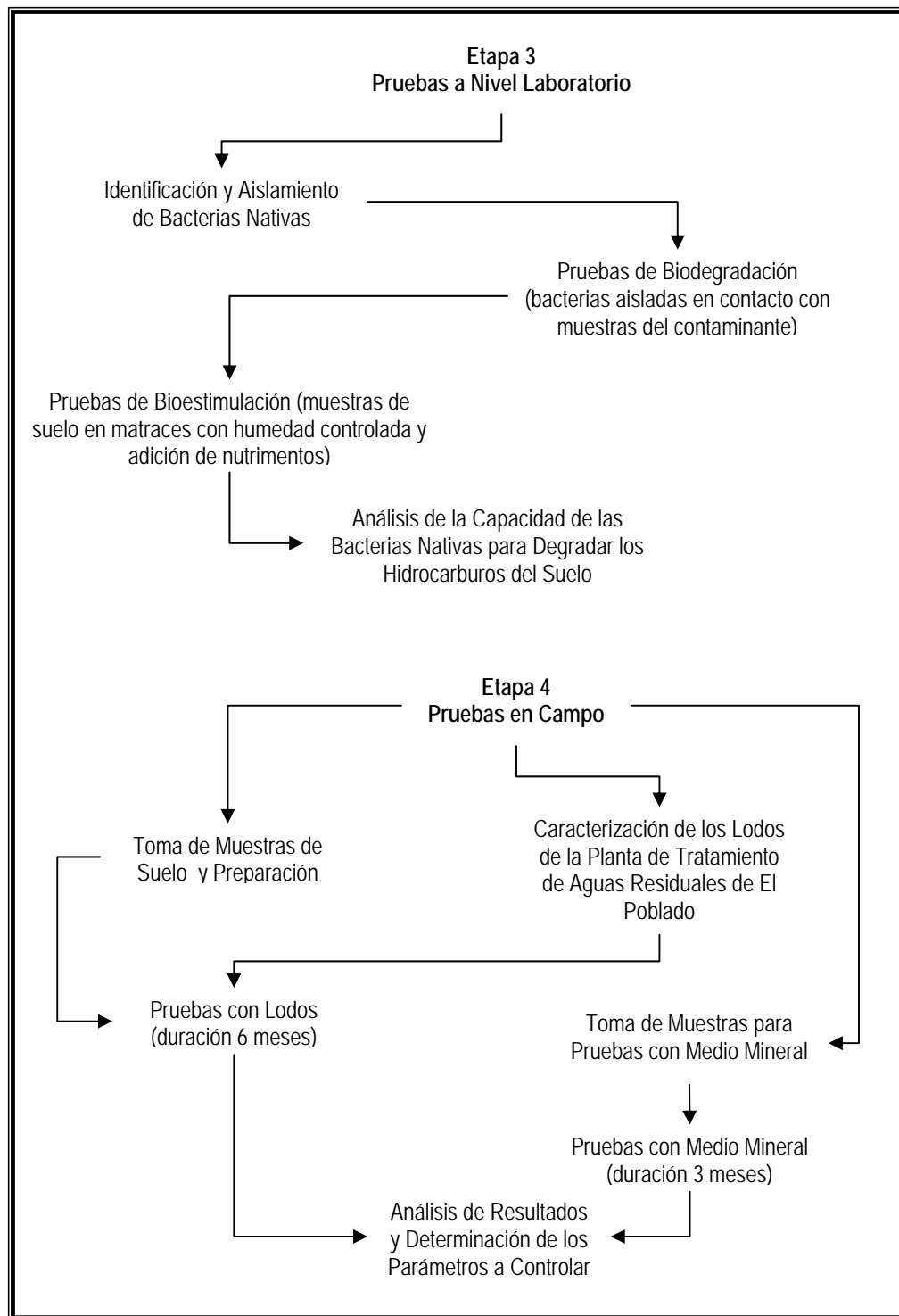


Figura 12. Diagrama de flujo de la metodología aplicada en las Etapas 3 y 4

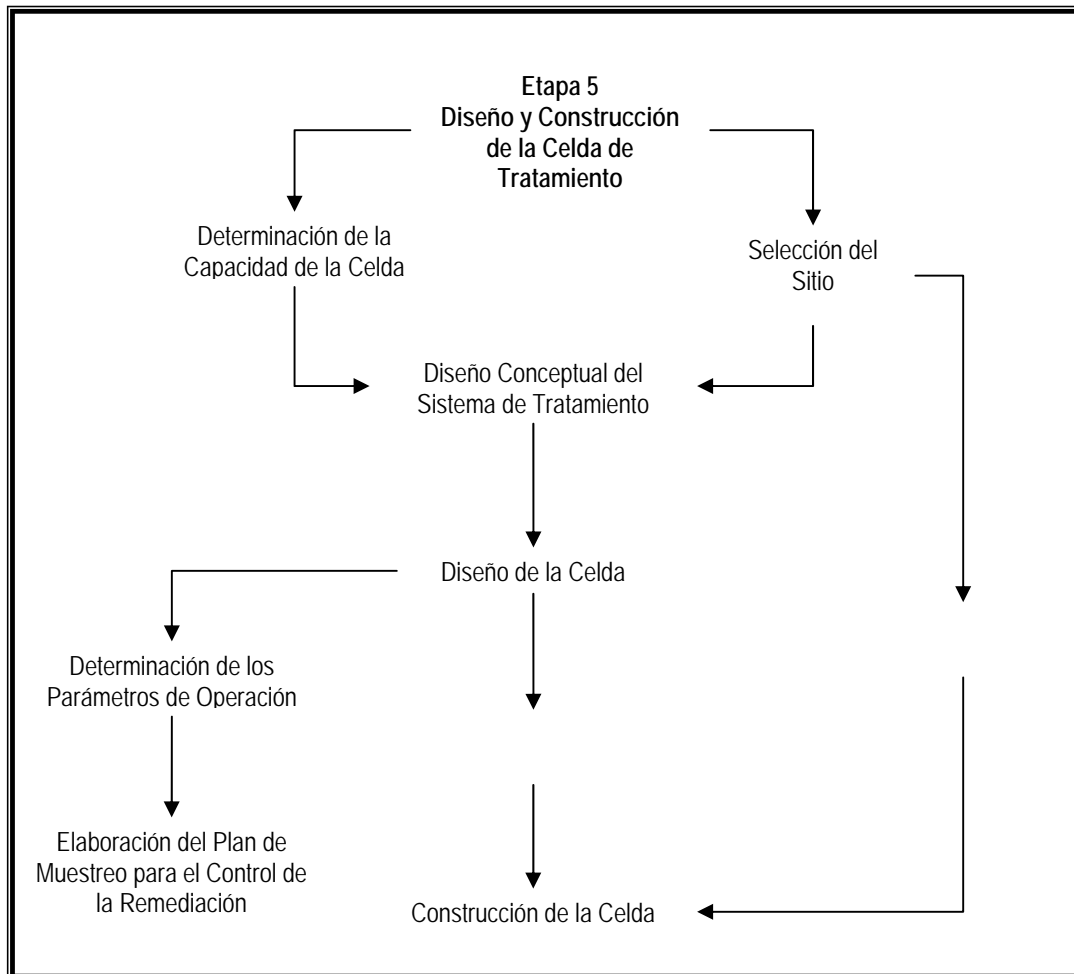


Figura 13. Diagrama de flujo de la metodología aplicada en la Etapa 5

3.1.1 Consideraciones generales

Para hacer el diseño de muestreo, primero se hizo una delimitación de las áreas afectadas con base en una inspección visual. Por otro lado se analizó la información recabada (planos, informes, estudios, registros, etc.) y se tuvieron entrevistas con el personal responsable de las áreas de mantenimiento y del manejo de combustibles y aceites lubricantes. La ubicación de los puntos de muestreo y la determinación de la profundidad de las muestras, se hizo considerando los siguientes aspectos:

1. Objetivo del muestreo
2. Características del suelo
3. Geohidrología

4. Tipo de hidrocarburos y parámetros a determinar
5. Características de las instalaciones

1. Objetivo del muestreo.

El objetivo de la caracterización fue determinar, en un primer nivel de información, la concentración de hidrocarburos presente en los suelos, la profundidad a la que han llegado y delimitar de manera general las áreas afectadas para hacer una estimación del volumen de suelo por remediar. Con esta información se podría hacer la evaluación de los métodos alternativos de remediación.

2. Características del suelo.

En el área de la mina el tipo de suelo que predomina es el litosol, pero en los lugares de trabajo no se observa su presencia ya que fue retirado durante la construcción de las instalaciones y la apertura de caminos. En los sitios a evaluar, se observa la presencia de roca alterada muy cerca de la superficie (0.80 a 1.20 m). Esta roca es de origen volcánico y de composición andesítica; en su mayoría ha sufrido procesos de metamorfismo y es de baja permeabilidad. La topografía del terreno presenta pendientes pronunciadas lo que podría favorecer el escurrimiento de los contaminantes si éstos llegan a las orillas del terreno.

En la planta de peletizado las condiciones del terreno son distintas. La planta se localiza en un valle en el que predomina el material aluvial. Esta capa de aluvión es de permeabilidad media a alta y tiene como basamento una estructura de roca intrusiva de composición granítica. Es ligera la pendiente del terreno, lo cual reduce el escurrimiento de los contaminantes.

3. Geohidrología.

En cuanto a las condiciones geohidrológicas, el área que comprende la mina está dentro de la cuenca del río Minatitlán. La zona de explotación del mineral y las instalaciones de la planta concentradora se encuentran a una elevación promedio de 1,100 msnm, mientras que el cauce del río Minatitlán está a una elevación de 650 msnm. A partir de la elevación a la que se encuentra el cauce del río, el nivel estático del acuífero se encuentra entre 3 m y 5 m de profundidad (GEOEX, 1996), por lo que difícilmente el problema de contaminación en las instalaciones de la mina puede representar un riesgo para los cuerpos subterráneos de agua.

En la planta de peletizado, debido a la cercanía con el mar, el acuífero está a poca profundidad. En la época de estiaje el nivel estático se puede encontrar entre 15 y 20 m, pero durante la época de lluvias es posible encontrarlo a 11 m.

4. Tipo de hidrocarburos y parámetros a determinar.

Las propiedades del combustóleo, del diesel, de los aceites nuevos, de los aceites gastados y de las grasas, son diferentes. Las características físicas como la densidad y solubilidad son importantes para estimar el comportamiento que puede tener el hidrocarburo una vez que entra en contacto con el suelo.

En la planta de peletizado el diesel puede migrar con mayor facilidad debido a su densidad y a las características del terreno; en cambio el combustóleo es más denso y tarda más tiempo en infiltrarse. En el caso de los sitios ubicados en la mina la migración de los hidrocarburos se limita por las características de permeabilidad de la roca.

Los parámetros a determinar para la caracterización de suelo también influyen en el tipo de muestreo, en este caso se estableció determinar la concentración de hidrocarburos totales del petróleo (HTP) mediante las técnicas de espectroscopía de infrarrojo o cromatografía de gases.

5. Características de las instalaciones.

En el tanque de diesel en la zona de embarque y el área del Polvorín, la distribución superficial del contaminante es uniforme. Esta característica permite considerar una distribución también uniforme de los puntos a muestrear. En la fosa de combustóleo y en el taller La Encantada los hidrocarburos se observan formando manchas separadas; en este caso una distribución uniforme de los puntos por muestrear podría conducir a una evaluación poco confiable.

3.1.2 Muestreo

Muestreo en la mina

En la mina las muestras se tomaron a tres profundidades, la primera en la parte superficial del terreno de 0 a 0.5 m, la segunda de 0.5 a 1.0 m y la tercera de 1.0 a 1.5 m. En algunos puntos no fue posible tomar las muestras a las tres profundidades dado que se encontró la roca firme. Las muestras se tomaron con un equipo de perforación de recirculación inversa y en los puntos donde no pudo entrar el equipo, las muestras se tomaron en forma manual haciendo zanjas de 0.4 m de profundidad.

En el taller La Encantada se colocaron 11 puntos de muestreo y su ubicación se muestra en la Figura 14. En el Polvorín fueron 5 puntos de muestreo y la ubicación se presenta en la Figura 15.

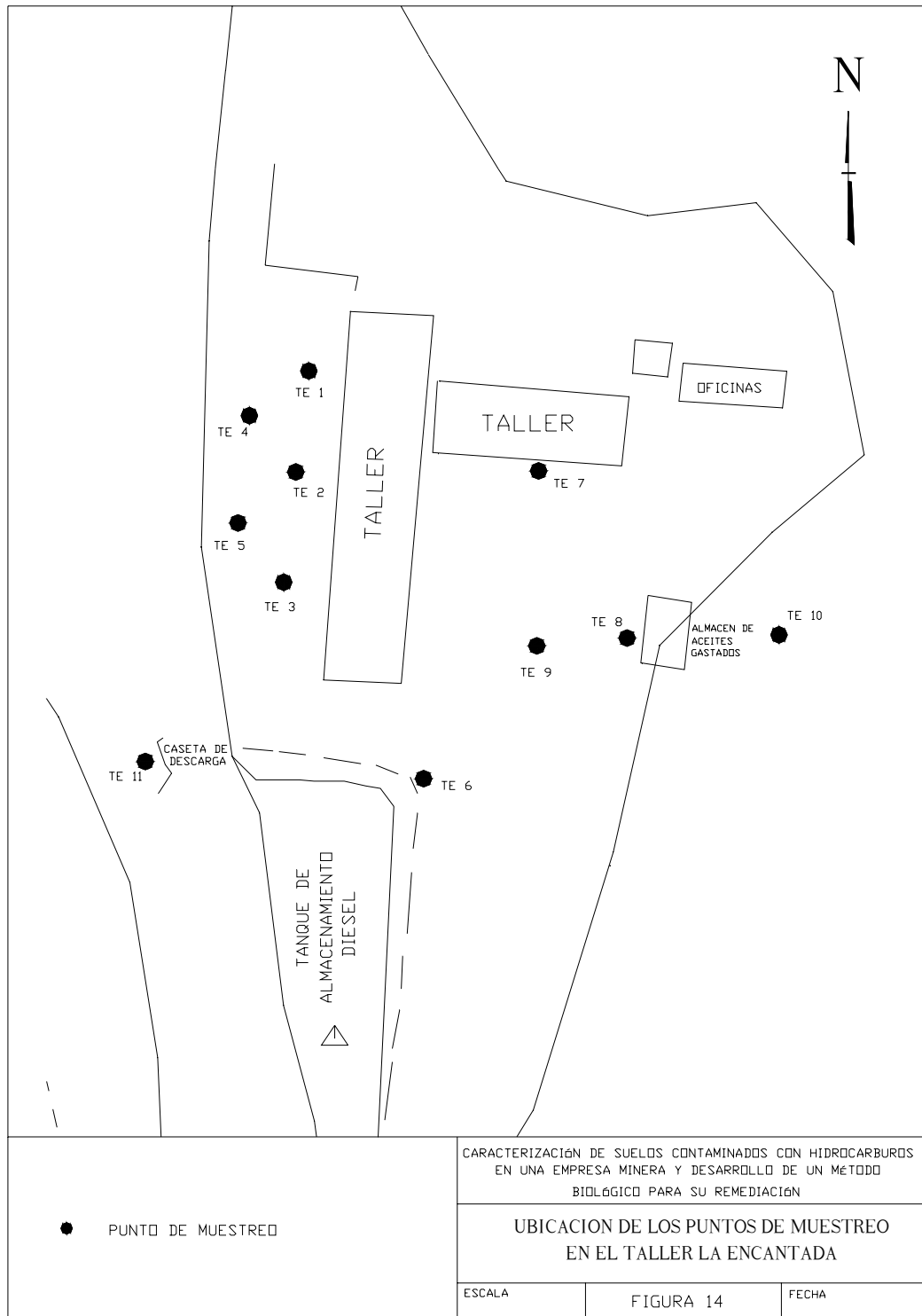


Figura 14. Ubicación de los puntos de muestreo en el taller La Encantada

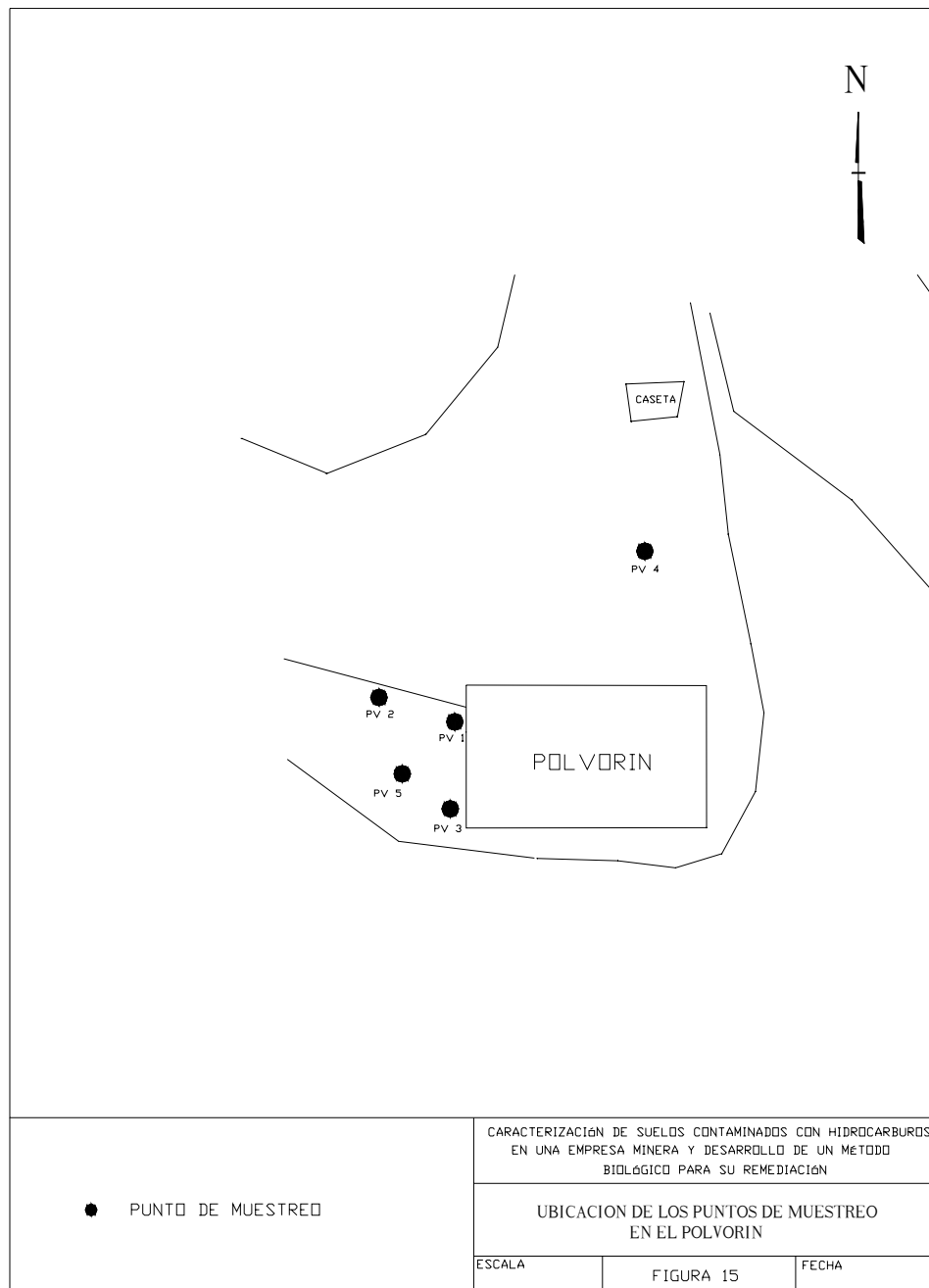


Figura 15. Ubicación de los puntos de muestreo en el Polvorín

Muestreo en la planta de peletizado

En la planta de peletizado el muestreo se realizó a mayor profundidad dada la permeabilidad del terreno y las características del contaminante. Las muestras se tomaron a tres profundidades, la primera se tomó en la capa superficial de suelo de 0 a 0.4 m, la segunda de 1.3 a 1.7 m y la tercera de 2.8 a 3.0 m.

En la fosa de recepción de combustóleo, y alrededor del tanque de almacenamiento, se colocaron 15 puntos de muestreo (Figura 16), mientras que en el tanque de diesel de la zona de embarque solo se ubicaron tres puntos (Figura 17).

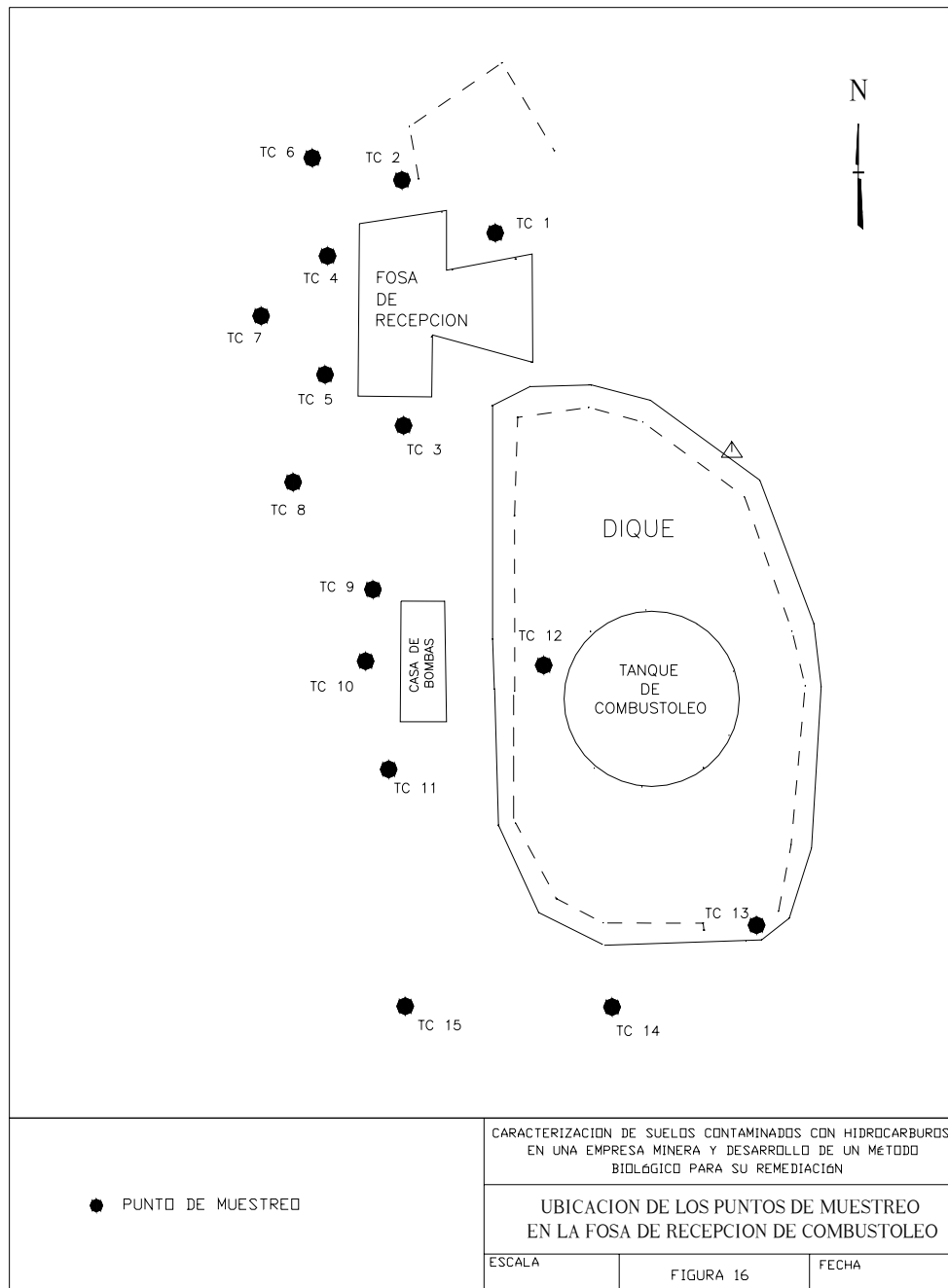


Figura 16. Ubicación de los puntos muestreo en la fosa de recepción de combustóleo

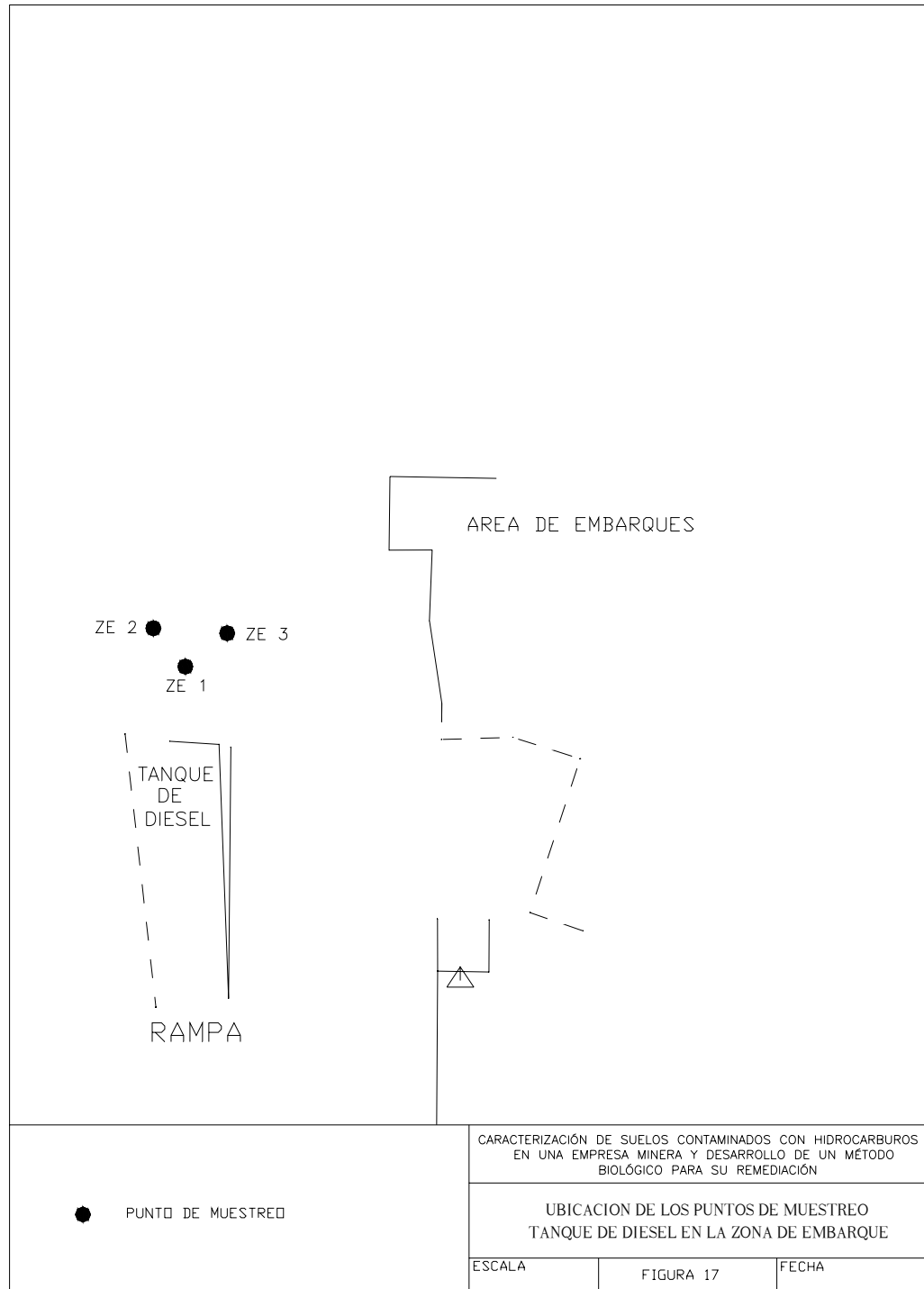


Figura 17. Ubicación de los puntos muestreo en el tanque diesel de la zona de embarque

3.1.3 Criterios de evaluación

Se tomaron como referencia los límites máximos permisibles de Hidrocarburos indicados en la NOM-138-SEMARNAT/SS-2003 para un suelo de uso industrial. Se consideró aplicable el valor señalado para fracción media en el caso del Polvorín y el tanque de diesel en la zona de embarque, mientras que para el taller La Encantada y la fosa de combustóleo se consideró el valor indicado para la fracción pesada.

Se definieron tres diferentes niveles de contaminación en los suelos de acuerdo con la concentración de hidrocarburos encontrada. Este criterio se utilizó para establecer prioridades en la remediación de los sitios.

1) Nivel de contaminación BAJO

Se aplicó a los puntos donde la concentración de hidrocarburos fue menor al límite permisible de la norma; por debajo de **5,000 mg/kg** en el caso del Polvorín y la zona de embarque y menor a **6,000 mg/kg** en el caso del taller La Encantada y la fosa de combustóleo. En estos casos no es necesaria la remediación del suelo.

2) Nivel de contaminación MEDIO

Se aplicó a los puntos en los que la concentración de hidrocarburos estuvo por arriba del límite permisible en la norma y hasta **10,000 mg/kg**. En estos casos es necesaria la remediación del suelo.

3) Nivel de contaminación ALTO

Se aplicó a los puntos en los que la concentración de hidrocarburos fue igual o estuvo **por arriba de 10,000 mg/kg**. Para estos casos es necesaria la remediación del suelo y se considera como prioritario.

3.1.4 Estimación del volumen de suelo afectado

Con base en los resultados obtenidos del muestreo y en las observaciones realizadas en las instalaciones, se delimitaron las áreas afectadas por hidrocarburos. Posteriormente se hizo una estimación del volumen de suelo que requiere ser remediado.

Para el cálculo de este volumen, primero se configuraron los límites de la afectación en cada sitio con base en las concentraciones de HTP (ver Apéndice 2), esto se hizo a las tres profundidades de muestreo; posteriormente se ponderó un espesor con base en la profundidad a la que se tomaron las muestras y finalmente el volumen se obtuvo multiplicando la superficie de afectación por el espesor asignado.

3.2 SELECCIÓN DEL MÉTODO DE REMEDIACIÓN

A partir de la caracterización de un sitio contaminado, es posible evaluar los métodos de remediación aplicables y seleccionar el que mejor convenga a las condiciones particulares de estos sitios. Para ello se parte de una investigación documental sobre los métodos existentes y sus características particulares (aplicación, operación, costo, efectividad, etc.). Con esta información se hace una evaluación de los métodos factibles y se analiza su viabilidad para el caso de estudio. Finalmente se selecciona el método de remediación más adecuado y se elabora un programa de pruebas, a nivel laboratorio y en campo, para evaluar la aplicabilidad del método, el costo de remediación y hacer el diseño de un proceso a gran escala.

En el caso de Peña Colorada, después de haber hecho la caracterización del suelo contaminado, se analizaron las alternativas de remediación poniendo principal interés en los métodos biológicos, tanto *in situ* como *ex situ*. La selección del método por aplicar se hizo considerando los resultados obtenidos de la caracterización, pero además tomando en cuenta las posibilidades tanto técnicas como económicas de la empresa para llevar a cabo un programa de remediación. En este sentido fue importante la disponibilidad de equipo para mover grandes volúmenes de material, la disponibilidad de espacio que requieren en particular los métodos *ex situ*, la inversión disponible para el programa de remediación y el requisito de una operación sencilla.

3.2.1 Criterios de selección

En la selección del método de remediación aplicable al caso particular de Peña Colorada, se hicieron las siguientes consideraciones básicas:

- 1) La aplicación de un método biológico de tratamiento dado que son los métodos que ambientalmente ofrecen una solución aceptable, sin transferir el problema de contaminación al agua o al aire.
- 2) La aplicación de un método de fácil operación y bajo costo.
- 3) La posibilidad de establecer un programa de remediación a largo plazo, ya que implicaría una menor inversión inicial.
- 4) La capacidad de la empresa para manejar altos volúmenes de material, ya que se cuenta con el equipo necesario.
- 5) La disponibilidad de espacio, ya que en las instalaciones se cuenta con áreas libres para el tratamiento del suelo.

Hechas estas consideraciones, en primera instancia se optó por un método *ex situ*, ya que estos ofrecen una operación más sencilla y son adaptables a las condiciones tanto técnicas como económicas de cada caso.

Dentro de los métodos *ex situ*, el de biolabranza quizá es el más sencillo en su operación y también el de más bajo costo. La capacidad de tratamiento está en función, entre otros factores, del espacio disponible y la posibilidad de mover grandes volúmenes de suelo, y este caso también la movilidad de grandes volúmenes es factible.

El método de biolabranza es una opción atractiva cuando los suelos contaminados tienen que ser removidos del sitio y se tiene suficiente espacio para construir la celda de tratamiento (Troy M. A. 1994 y Bandyopadhyay S., *et al*, 1994). El método de biolabranza se ha aplicado ampliamente obteniéndose buenos resultados en la remoción de diversos contaminantes y con un bajo costo de operación (Cookson J. 1995 y Piotrowski M. 1991).

Un aspecto importante que influyó en la selección de este método fue la posibilidad de utilizar como fuente de nutrientes para promover la actividad bacteriana, los lodos generados en la planta de tratamiento de aguas residuales de la colonia de trabajadores El Poblado. Los lodos generados en el tratamiento de aguas residuales son ricos en materia orgánica, macro y micro nutrientes (Ortiz L., *et al*. 1995), por lo que es posible considerarlos como una fuente alternativa de nutrientes para mejorar la actividad de los microorganismos en los procesos de biorremediación en vez del uso de fertilizantes o sales inorgánicas de nitrógeno y fósforo (Baker K. 1994). Esta medida también tiene como propósito darle utilidad a los lodos ya que generalmente se estabilizan y se disponen en un sitio dentro de las instalaciones de la empresa.

3.2.2 Planteamiento del estudio de tratabilidad

Hacer una evaluación de la tratabilidad de un suelo es deseable cuando la toxicidad es un factor que pudiera limitar la actividad biológica. Los estudios de tratabilidad, generalmente se inician a nivel laboratorio y deben ser planeados de tal forma que, de ser exitosos, los parámetros que se definan puedan ser aplicados para diseñar y desarrollar pruebas a mayor escala. Si los estudios de tratabilidad demuestran la efectividad del método en el laboratorio, es necesario hacer pruebas de campo o pruebas piloto bajo las condiciones ambientales del lugar donde se vaya a realizar la remediación (Skladany G. y Baker K. 1994).

Un estudio de tratabilidad debe proporcionar datos sobre la biodegradabilidad de los contaminantes, la capacidad de los microorganismos nativos para degradar los contaminantes, condiciones óptimas para el crecimiento de los microorganismos, velocidad de degradación y cantidad requerida de nutrientes y minerales (Cookson J. 1995).

Hay dos tipos de estudio de tratabilidad generalmente utilizados para demostrar la efectividad del método de la biolabranza: a) pruebas en frasco y b) pruebas en taza (o charola). En ambos casos es indispensable comenzar con una adecuada caracterización física y química del suelo a tratar. Algunos de los parámetros que se deben determinar en la caracterización son los siguientes:

Tipo y concentración de los contaminantes, metales presentes y pH.

Textura, tamaño de partícula y contenido de arcilla.

Humedad, porosidad, permeabilidad y densidad.

Nitrógeno, fósforo, otros aniones y cationes.

Carbón orgánico total, volatilidad, estructura química.

Los objetivos específicos de esta caracterización son:

1. Determinar el tipo y concentración de los contaminantes.
2. Determinar la concentración inicial de los contaminantes presentes para poder evaluar el patrón de degradación.
3. Determinar si los nutrientes (como nitrógeno y fósforo) están en suficientes cantidades para sostener la actividad bacteriana.
4. Evaluar los parámetros que pueden inhibir el crecimiento de las bacterias (por ejemplo, altas concentraciones de metales tóxicos, valores extremos de pH, falta de humedad u oxigenación).
5. Determinar la capacidad de biodegradación de las bacterias.

Las pruebas en frasco son simples y de bajo costo, se utilizan para evaluar la biodegradación en agua o suelos utilizando una pulpa de suelo/agua en un microcosmos. Sin embargo, este tipo de prueba es menos deseable cuando se trata de evaluar la efectividad del método de biolabranza y en general se utiliza primero para evaluar tecnologías de biorremediación en fase líquida.

Las pruebas en taza utilizan suelo, sin dilución en una pulpa acuosa, colocada en una taza o charola de acero o vidrio como un microcosmos, lo cual es más parecido a un tratamiento a gran escala con el método de biolabranza.

En el caso de Peña Colorada, en primera instancia se realizaron una serie de pruebas a nivel laboratorio cuyo objetivo fue determinar la existencia de bacterias nativas en el suelo y posteriormente evaluar su capacidad para degradar los hidrocarburos.

Una vez que se determinó en el laboratorio la efectividad del método se planearon una serie de pruebas en las instalaciones de Peña Colorada para valorar la efectividad del método bajo las condiciones ambientales del lugar.

3.2.3 Evaluación preliminar

Se hizo un muestreo inicial para determinar los parámetros físicos y químicos del suelo, así como para hacer una caracterización microbiológica, con el objeto de evaluar la viabilidad de un

proceso de degradación bacteriana (biorremediación). Las muestras se tomaron en el taller La Encantada (TE), el Polvorín (P), la fosa de recepción de combustóleo (TC) y el tanque de diesel de la zona de embarque (ZE).

Los análisis fisicoquímicos practicados a las muestras fueron pH (método 9045-C US-EPA, 1995), conductividad eléctrica (método SSSA Book Series No. 5 Part III, 1996), textura (método del Hidrómetro o método Bouyoucos) y concentración de HTP. La caracterización microbiológica se hizo mediante una cuenta viable de microorganismos heterotróficos utilizando la técnica de conteo en placa (Clark F., 1965). Los análisis para determinar la concentración de hidrocarburos totales del petróleo en los suelos, se realizaron por espectroscopia de infrarrojo (FTIR), utilizando el sistema de extracción *soxhlet* con hexano y teniendo como base el método EPA 418.1 (LAFQA, 1998). La determinación de los parámetros físicos y químicos se realizó en el Laboratorio de Análisis Físicos y Químicos del Ambiente (LAFQA), del Instituto de Geografía de la UNAM.

3.3 PRUEBAS A NIVEL LABORATORIO

El trabajo experimental a nivel laboratorio se realizó haciendo pruebas con las bacterias nativas de los suelos contaminados y utilizando muestras de los combustibles y lubricantes que se usan en la empresa (y que son la fuente de contaminación), así como muestras de suelo contaminado. Estas pruebas se realizaron en el Laboratorio Ambiental del Centro de Investigación en Biotecnología de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos.

3.3.1 Preparación de las muestras para laboratorio

Para realizar el trabajo de laboratorio se tomaron muestras de 2 kg de suelo en los diferentes sitios. Las muestras se cribaron para separar las gravas y los fragmentos de roca con tamaño mayor a 1.5 pulgadas, ya que los hidrocarburos se encuentran contenidos en la fracción fina de arenas y limos.

Las muestras preparadas se analizaron para determinar la concentración de hidrocarburos totales del petróleo mediante la técnica espectroscopia de infrarrojo (FTIR), utilizando el sistema de extracción *soxhlet* con hexano y basándose en el método EPA 418.1.

3.3.2 Aislamiento de bacterias

La primera prueba en el laboratorio fue el aislamiento e identificación de las bacterias presentes tanto en el suelo contaminado como en los lodos de la planta de tratamiento. Se preparó un medio mineral con los nutrimentos necesarios para estimular el crecimiento de

microorganismos, excepto una fuente de carbono, ya que ésta la constituyen los hidrocarburos contenidos en el suelo. En el Cuadro 6 se muestra la composición del medio mineral que se preparó en el laboratorio.

Para inocular el medio mineral, se utilizaron por separado los lodos y los suelos contaminados. Las bacterias que crecieron en el medio mineral lograron utilizar al hidrocarburo como fuente de carbono. Se obtuvo una mezcla de bacterias, la cual se consideró como un consorcio bacteriano que no requería una fuente de carbono adicional al hidrocarburo.

Cuadro 6
Composición del medio mineral para pruebas de bioestimulación

Compuesto	Cantidad (g/L)
KH ₂ PO ₄	3.00
K ₂ HPO ₄	7.00
FeCl ₃	0.01
MgSO ₄ -7H ₂ O	0.20
CaCl ₂	0.01
Extracto de levadura	5.00
H ₃ BO ₃	2.80
MnSO ₄	2.28
CuSO ₄ -7H ₂ O	0.20
CoCl ₂	0.62
ZnSO ₄ -7H ₂ O	0.25
NaCl ₂	0.20
(NH ₄) ₂ SO ₄	1.00
(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄ -4H ₂ O	0.005
Peptona de carne	10.00
pH	7 ± 0.3

A partir del consorcio bacteriano se purificaron las diferentes colonias en cajas Petri con agar TS (soya de tripticaseína). Las colonias se eligieron en función de su morfología y/o color, se incubaron durante 48 horas a 25 °C y el procedimiento se repitió 5 veces para asegurar la obtención de cepas puras. Todas las cepas se guardaron en refrigerador sobre agar TS.

Una vez que se obtuvieron los cultivos puros, se caracterizaron e identificaron las bacterias. Para ello se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones (Krieg N. y Holt J., 1984):

1. Asegurar el aislamiento de colonias puras mediante siembras repetidas de las colonias obtenidas.
2. Clasificar a las bacterias iniciando por la categoría mayor hasta llegar a especie (cuando esto fue posible).

3. Utilizar las pruebas bioquímicas necesarias para obtener la mayor información posible de la colonia aislada.

Se utilizó el sistema BBL Cristal para la identificación de bacterias fermentadoras y no fermentadoras, el cual consta de 30 pruebas bioquímicas diferentes. Además se aplicaron pruebas bioquímicas adicionales tales como el rojo de metilo, Voges-Proskauer, indol, tinción de Gram, oxidasa, fermentación de carbohidratos, motilidad y citrato de Simons.

Además se hizo la caracterización morfológica tomando en cuenta el tamaño, forma, elevación, color, transparencia y borde. Todos estos elementos se reunieron para poder clasificar a las bacterias de acuerdo al *Bergey's Manual of Systematic Bacteriology* (Krieg N. y Holt J., 1984).

3.3.3 Pruebas de biodegradación

Después de la identificación de las bacterias nativas del suelo y de los lodos de la planta de tratamiento, se evaluó su capacidad para degradar los hidrocarburos. Esta prueba se hizo sólo en algunas de las colonias aisladas y se utilizaron las muestras de diesel, combustóleo y aceite residual, proporcionadas por la empresa.

En matraces Erlenmayer se colocaron 20 mL de medio mineral, bacterias de las colonias aisladas y la muestra de hidrocarburo a una concentración final de 1 %. Los matraces se mantuvieron en agitación continua en un agitador orbital a 120 rpm.

Cada semana se tomaron muestras de 1 mL y se hizo un análisis cualitativo por cromatografía de gases para observar la presencia de los compuestos originales de los hidrocarburos.

3.3.4 Pruebas de bioestimulación

Una vez que se evaluó la capacidad de las bacterias aisladas para degradar los combustibles y el aceite residual, se planeó un experimento en matraces para probar la degradación directamente en el suelo contaminado, estimulando el crecimiento de las bacterias nativas mediante la adición del medio mineral.

Este experimento se llevó a cabo, colocando en matraces Erlenmayer una muestra de los suelos preparados para el trabajo experimental. A los matraces se agregó periódicamente medio mineral y se mantuvo una humedad constante en la muestra de suelo. El experimento duró dos meses y de manera periódica se tomaron muestras para analizar la concentración de hidrocarburos totales del petróleo. También se hizo una cuenta viable de microorganismos heterotróficos al inicio y al final de la prueba.

3.4 PRUEBAS EN CAMPO

Las pruebas en campo se realizaron con el propósito de evaluar la capacidad degradadora de las bacterias, bajo las condiciones climáticas reales de la zona. Estas pruebas fueron de dos tipos, las primeras utilizando los lodos de la planta de tratamiento y las segundas utilizando como sustrato el medio mineral preparado en el laboratorio.

Se utilizaron cajones de lámina galvanizada (cal. 24) de 50 cm de largo, 30 cm de ancho y 14 cm de altura. En cada una de las charolas se colocaron 5 kg de suelo y se les agregó periódicamente una cantidad preestablecida de lodos; o bien, de medio mineral.

Se acondicionó un lugar en el Taller La Encantada con los servicios necesarios para montar el experimento: mesas para colocar los cajones, agua, luz, drenaje y ventilación adecuada para mantener las condiciones climáticas del exterior. Además el acceso a este lugar fue controlado sólo para el personal relacionado con el proyecto (Figuras 18 y 19).



Figura 18. Sitio acondicionado para realizar las pruebas de campo

Figura 19. Acomodo de los cajones dentro del lugar de experimentación



3.4.1 Preparación de las muestras para campo

Para las pruebas en campo con los lodos de la planta de tratamiento, se tomaron muestras de 30 kg. Con el propósito de poder evaluar el proceso de degradación en función de la concentración de hidrocarburos en el suelo, en cada sitio se tomaron dos muestra, una en el lugar que visiblemente mostraba mayor contenido de hidrocarburos y otra muestra en un lugar con menor contenido del contaminante. Las muestras se identificaron con la clave utilizada para cada sitio, seguido con la clave C1 para señalar la muestra de concentración alta y C2 para la muestra de concentración baja.

Las muestras se cribaron para separar las gravas y los fragmentos de roca con tamaño mayor a 1.5 pulgadas. Se analizaron para determinar la concentración de hidrocarburos totales del petróleo mediante la técnica espectroscopia de infrarrojo (FTIR), utilizando el sistema de extracción *soxleht* con hexano y basándose en el método EPA 418.1.

3.4.2 Caracterización de los lodos de la planta de tratamiento

Se tomaron muestras de los lodos de la planta de tratamiento de aguas residuales de El Poblado para hacer una caracterización inicial. Las muestras se tomaron en la salida del reactor en la pila de lodos frescos y en la pila de lodos secos.

Las muestras se analizaron para determinar pH, conductividad eléctrica, humedad, materia orgánica y concentración de micro y macronutrientes. También se realizaron análisis microbiológicos para determinar cuenta viable de microorganismos heterotróficos, coliformes totales, coliformes fecales, estreptococos fecales y presencia de parásitos (huevos de helmintos). Estos análisis también se hicieron en una muestra de agua residual sedimentada y decantada.

3.4.3 Pruebas con lodos de la planta de tratamiento

Las pruebas consistieron en mezclar el suelo contaminado con lodos de la planta de tratamiento y colocarlo en los cajones metálicos. Se experimentó por separado con el suelo de cada sitio y las variables consideradas para el montaje de los cajones, fueron las siguientes:

- Tipo de suelo
- Concentración de HTP
- Relación suelo:lodo
 - a) 4 kg suelo : 4 kg lodo (1 kg suelo / 1 kg de lodo),
 - b) 5 kg suelo : 3 kg lodo (1 kg de suelo / 0.6 kg de lodo) y
 - c) 10 kg suelo : 3 kg lodo (1 kg de suelo / 0.3 kg de lodo)

Las condiciones establecidas para el experimento fueron las siguientes:

- Aireación de los cajones en forma manual, removiendo el material dos veces al día
- Control de la humedad mediante la adición de agua
- Temperatura ambiente (bajo las condiciones climáticas del lugar)
- Adición de lodos cada tres semanas

Cuadro 7
Arreglo de los cajones en las pruebas con lodos

Núm. de Cajón	Sitio	Clave de la Muestra	Suelo kg	Lodo kg
1	Polvorín	PC1_A	4	4
2	Polvorín	PC1_B	5	3
3	Polvorín	PC2_A	4	4
4	Polvorín	PC2_B	5	3
5	Taller La Encantada	TEC1_A	4	4
6	Taller La Encantada	TEC1_B	5	3
7	Taller La Encantada	TEC2_A	4	4
8	Taller La Encantada	TEC2_B	5	3
9	Fosa de combustóleo	TCC1_A	4	4
10	Fosa de combustóleo	TCC1_B	5	3
11	Fosa de combustóleo	TCC2_A	4	4
12	Fosa de combustóleo	TCC2_B	5	3
13	Tanque de diesel en la Z E	ZEC1_A	4	4
14	Tanque de diesel en la Z E	ZEC1_B	5	3
15	Tanque de diesel en la Z E	ZEC2_A	4	4
16	Tanque de diesel en la Z E	ZEC2_B	5	3
17	Repetición del cajón 2	PC1_B	5	3
18	Repetición del cajón 4	PC2_B	5	3
19	Repetición del cajón 6	TEC1_B	5	3
20	Repetición del cajón 8	TEC2_B	5	3
21	Repetición del cajón 10	TCC1_B	5	3
22	Repetición del cajón 12	TCC2_B	5	3
23	Repetición del cajón 14	ZEC1_B	5	3
24	Repetición del cajón 16	ZEC2_B	5	3
25	Tanque de diesel en la ZE	ZEC1	5	3
26	Fosa de combustóleo	TCC2	10	3
27	Fosa de combustóleo	TCC1	10	3
28	Polvorín	PC2	10	3
29	Taller La Encantada	TEC2	10	3
30	Taller La Encantada	TEC1	10	3
31	Polvorín	PC1	10	3

Para generar los lodos utilizados en las pruebas se ajustaron las condiciones de operación de la planta de tratamiento hasta lograr una relación promedio de 250 mL de sólidos en 1,000 mL de lodo. Posteriormente, se sacaron lodos del reactor y se concentraron los sólidos por decantación hasta obtener 840 mL de sólidos en 1,000 mL de lodo. Con esta relación se mezclaron con el suelo en los cajones.

Se instalaron en total 31 cajones; en los 16 primeros se colocaron cuatro muestras de cada sitio, en los 8 siguientes se colocaron repeticiones de algunos de los cajones anteriores y en los 7 cajones restantes se prepararon relaciones variables de suelo:lodo. En el Cuadro 7 se indica la relación suelo:lodo de cada cajón y su clave.

Una vez que se instalaron los cajones, se volvieron a agregar lodos a los 24, 45 y 67 días. La cantidad de lodos agregada en cada ocasión se indica en el Cuadro 8.

Cuadro 8
Cantidad de lodos agregada durante las pruebas

Cajones con Relación Suelo/Lodo (En Peso)	Cantidad de Lodo Agregada a Cada Cajón
4 : 4	2 L
5 : 3	1.5 L
10 : 3	3 L

Las pruebas duraron 177 días (seis meses), a partir del día 104 se dejaron de agregar lodos y hasta el día 177 solamente se agregó agua a los cajones para conocer el comportamiento de las bacterias en ausencia de los nutrimentos proporcionados por los lodos.

El seguimiento de las pruebas se hizo tomando muestras periódicas de cada uno de los cajones para analizar la concentración de hidrocarburos (HTP) y realizar una cuenta viable de microorganismos heterotróficos.

Las muestras para los análisis de los HTP se guardaron en frascos de vidrio con un recubrimiento de aluminio en la tapa, mientras que las muestras para la cuenta viable de microorganismos se colocaron en cajas Petri esterilizadas previamente. En ambos casos las muestras se conservaron a una temperatura de 4 °C hasta su entrega en el laboratorio.

La cuenta viable de microorganismos heterotróficos sólo se practicó en los cajones 1 a 16. Además de la cuenta viable, se practicaron análisis de organismos patógenos (huevos de helmintos, estreptococos fecales y *Salmonella* spp) en las cuatro primeras muestras tomadas de los cajones 1 a 16.

3.4.4 Pruebas con medio mineral

Con el objeto de evaluar el comportamiento de las bacterias nativas del suelo sin el uso de lodos, se prepararon dos cajones con suelo del taller La Encantada y se identificaron con las claves TE/32 y TE/33. En cada cajón se colocaron 2 kg de suelo y 900 mL del medio mineral preparado para los experimentos en laboratorio (Cuadro 6).

Estas pruebas se llevaron a cabo durante 94 días bajo las condiciones climáticas del sitio. En este tiempo se hicieron adiciones periódicas de medio mineral (en promedio cada tercer día) para mantener la humedad constante (aproximadamente a 45 %) y conservar la cantidad necesaria de nutrimentos para el crecimiento de las bacterias.

4. RESULTADOS

4.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS SITIOS

4.1.1 Concentración de hidrocarburos en el suelo

A continuación se presentan los resultados del muestreo de caracterización que se realizó en los cuatro sitios. Los resultados reportan la concentración de Hidrocarburos Totales del Petróleo (HTP) en mg/kg. Las muestras marcadas con N.D. corresponden a concentraciones que están por debajo del límite de detección que es de 30 mg/kg. Los puntos de muestreo en los que no se reporta un valor en la columna de profanidad, es porque no fue posible tomar la muestra.

Taller La Encantada

En el Cuadro 9 se presentan los resultados del muestreo en el taller La Encantada.

Cuadro 9
Concentración de HTP (mg/kg) en el taller La Encantada

Muestra	Profundidad en m		
	0 a 0.30	0.30 a 0.80	0.80 a 1.20
TE 1	12,104	831	486
TE 2	8,397	7,388	
TE 3	3,246	3,125	989
TE 4	2,184	721	
TE 5	3,279	2,052	1,320
TE 6	16,495	12,423	678
TE 7	12,859	5,209	2,877
TE 8	19,074	1,510	1,262
TE 9	25,497	3,794	3,646
TE 10	5,965		
TE 11	42,309		

Las concentraciones encontradas en la superficie varían desde 2,184 hasta 42,809 mg/kg. En la Figura 20 se presenta la distribución de las concentraciones de hidrocarburos en las muestras tomadas a tres profundidades.

En el área del almacén la afectación está en el acceso al taller, formando una franja aproximadamente de 12 m a partir de la entrada. La concentración máxima en estos puntos es

de 12,104 en el costado izquierdo de la entrada y en el lado derecho baja a 3,246 mg/kg. En los puntos más alejados del acceso del taller (TE 4 y TE 5) las concentraciones son menores (2,184 y 3,279 respectivamente) y esto se debe a que tienen menor influencia de las actividades de mantenimiento que se realizan en el taller.

En esta misma área, a una profundidad de 0.30 a 0.80 m la presencia de hidrocarburos en los puntos que se ubican en el extremo izquierdo del acceso bajan considerablemente, ya que el TE 1 tiene una concentración de 831 mg/kg y el TE 4 de 721 mg/kg. Sin embargo, en los puntos TE 2 y TE 3 prácticamente la concentración se mantiene en el mismo orden que las muestras tomadas en superficie (7,388 mg/kg y 3,125 mg/kg respectivamente) y en el TE 5 la concentración disminuye hasta 2,052 mg/kg.

A la profundidad de 0.80 a 1.20 m en esta área, prácticamente la concentración de hidrocarburos en los puntos que se pudieron muestrear está por debajo del nivel de referencia; pero llama la atención el punto TE 5 en donde los hidrocarburos no disminuyeron en la misma proporción que en los otros puntos y esto puede deberse a que topográficamente es el punto más bajo en el área y hacia él se dirigen los escurrimientos de agua pluvial.

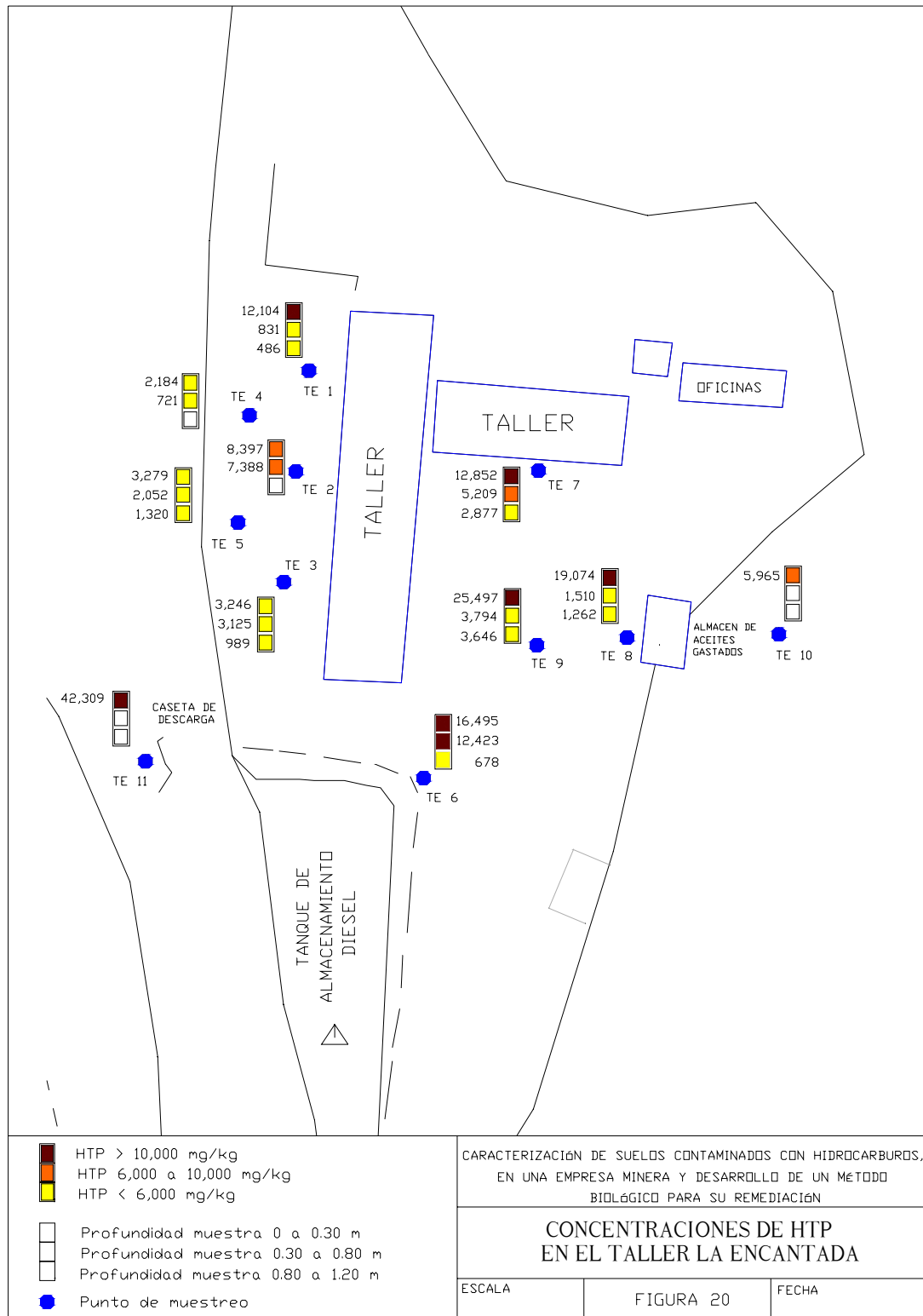
En el acceso del área de mantenimiento en el patio general sólo se ubicó un punto de muestreo debido a que se observó la misma afectación en todo el acceso, aproximadamente en una franja de 10 m a partir de la entrada al taller. A profundidad la concentración baja gradualmente, de 0.30 a 0.80 m se tienen 5,209 mg/kg y de 0.80 a 1.20 m la concentración es de 2,877 mg/kg.

En el patio central junto a la fosa de lavado (punto TE 9) y junto al almacén de aceites gastados (punto TE 8), la concentración es elevada (25,497 mg/kg y 19,074 mg/kg respectivamente) pero disminuye notablemente a 3,794 mg/kg en el punto TE 9 y a 1,510 mg/kg en el punto TE 8 a una profundidad de 0.30 a 0.80 m. De 0.80 a 1.20 m el contenido de hidrocarburos prácticamente se mantiene en el mismo orden que en la profundidad anterior.

En el punto TE 10 que se ubica atrás del almacén de aceites sólo se tomó una muestra superficial cuya concentración es de 5,965 mg/kg.

En el sitio donde los camiones cargan el diesel (punto TE 6) también es elevada la concentración en superficie (16,495 mg/kg) y esto se explica debido a que hay escurrimientos accidentales de diesel durante la operación de cargado. De 0.30 a 0.80 cm los hidrocarburos disminuyen a 12,423 mg/kg y de 0.80 a 1.20 la concentración es muy inferior al nivel de referencia.

El punto TE 11 se ubicó en la entrada de la caseta donde se descarga el diesel que abastece el proveedor. En este sitio es evidente una mancha de combustible en el suelo cuyo diámetro es aproximadamente de 2 m y la concentración encontrada es de 42,309 mg/kg. No se tomaron muestras a mayor profundidad ya que el lecho de roca se encuentra muy cercano a la superficie.



Polvorín

En el Cuadro 10 se presentan los resultados del muestreo en el Polvorín.

Cuadro 10
Concentración de HTP (mg/kg) en el Polvorín

Muestra	Profundidad en m	
	0-0.30	0.30 a 0.80
P 1	24,704	
P2	739	4,638
P 3	1,273	1,688
P 4	4,976	
P 5	7,423	654

El Polvorín presenta dos áreas afectadas; el sitio donde se carga el nitrato de amonio y el lugar donde se estaciona el camión cuando no está en operación. En la Figura 21 se presentan las concentraciones de hidrocarburos obtenidas del muestreo a dos profundidades.

En el sitio de carga, el punto P 1 tiene la concentración más alta en superficie con 24,704 mg/kg y esto se debe a que cuando se estaciona el camión para cargar el nitrato de amonio, ya tiene cargado el diesel y seguramente éste escurre por algunos puntos de fuga. Por cuestiones de seguridad no se tomaron muestras a mayor profundidad, pero seguramente el diesel ha migrado aunque en este sitio también el macizo rocoso está cercano a la superficie.

En los puntos P 2 y P 3 el contenido de hidrocarburos está por debajo del nivel de referencia (739 y 1,273 mg/kg, respectivamente), pero en el punto P 5 la concentración es de 7,423 mg/kg y esto se debe a que hacia este punto escurre el agua pluvial del sitio.

A una profundidad de 0.30 a 0.80 m el comportamiento de las concentraciones es variable, en el punto P 2 hay un aumento a 4,638 mg/kg y en el punto P 3 la concentración se mantiene en el mismo orden que en superficie. Es posible que en el P 2 se haya colocado material limpio sobre el suelo ya afectado y por eso se presente una mayor concentración a profundidad, sin embargo, esto deberá considerarse al momento de remover el material para la remediación. En el P 5 de 0.30 a 0.80 m los hidrocarburos están por debajo del nivel de referencia.

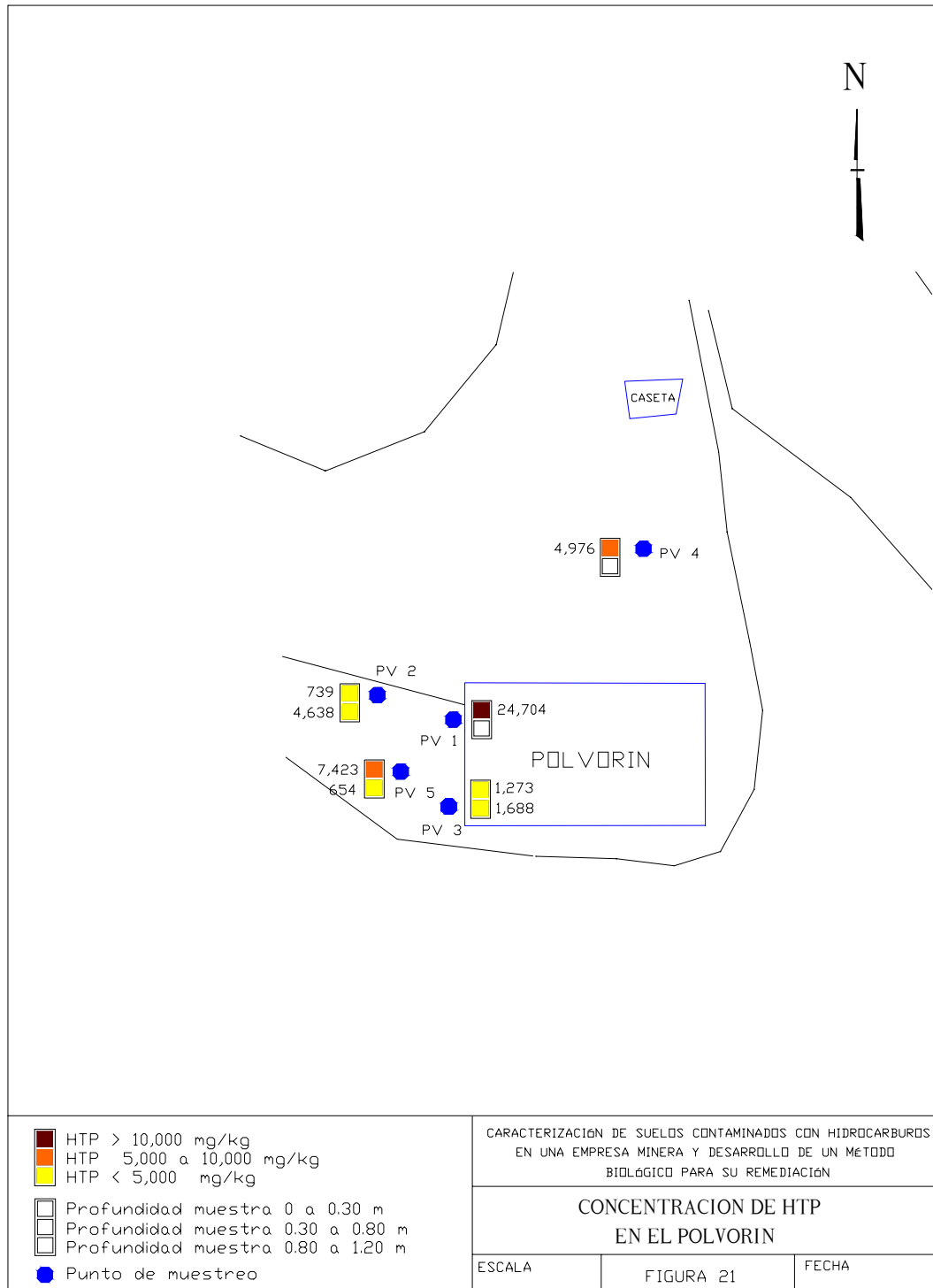


Figura 21. Concentración de HTP en el Polvorín

En el lugar donde se estaciona el camión cuando no está en operación (P 4), la concentración en superficie es de 4,976 mg/kg. No se tomó muestra más abajo ya que la roca se encuentra también cerca de la superficie.

Fosa de recepción de combustóleo

En el Cuadro 11 se presentan los resultados del muestreo en la fosa de recepción de combustóleo.

Cuadro 11
Concentración de HTP (mg/kg) en la fosa de recepción de combustóleo

Muestra	Profundidad en m		
	0 a 0.40	1.30 a 1.70	2.80 a 3.20
TC 1	3,344	5,701	4,061
TC 2	ND	1,516	ND
TC 3	4,723	913	1,540
TC 4	4,608	1,105	1,095
TC 5	12,080	ND	5,795
TC 6	2,153	2,391	1,310
TC 7	9,365	690	5,860
TC 8	4,364	4,092	14,661
TC 9	13,131	3,530	7,675
TC 10	10,551	1,579	2,663
TC 11	ND	2,808	ND
TC 12	316		
TC 13	ND		
TC 14	ND	927	1,326
TC 15	1,942	1,123	640

La afectación en este sitio se observa principalmente en el punto de descarga del combustóleo, alrededor de la fosa, y en el acceso de la casa de bombas. En la Figura 22 se presentan las concentraciones de hidrocarburos en las tres profundidades muestreadas.

En el sitio donde se descarga el combustóleo que llega en pipas, se ubicó el punto TC 1 y la concentración en superficie es de 3,344 mg/kg. Entre 1.3 y 1.7 m la concentración aumenta a 5,701 mg/kg y de 2.8 a 3.2 m el contenido de hidrocarburos muestra una ligera disminución a 4,061 mg/kg. En este sitio no se cuenta con una instalación adecuada para controlar posibles derrames durante la operación de descarga.

Alrededor de la fosa en los puntos TC 2 a TC 5, la concentración más elevada es de 12,080 mg/kg en el punto TC 5, mientras que en el TC 2 no se detectó la presencia de hidrocarburos. El TC 3 y el TC4 están en el mismo orden de concentración (4,723 y 4,608 mg/kg, respectivamente). En puntos más alejados el contenido de hidrocarburos en superficie es variable, en el TC 6 el valor es de 2,153 mg/kg; en el TC 7 el contenido aumenta a 9,365 mg/kg y en el TC 8 la concentración es de 4,364 mg/kg. Alrededor de la fosa se observan evidencias de derrames de combustóleo lo cual justifica las altas concentraciones en algunos puntos.

En esta misma área a una profundidad entre 1.3 y 1.7 m en la mayoría de los puntos baja la presencia de los contaminantes. En el TC 2 el nivel se mantiene por debajo del nivel de referencia (1,516 mg/kg) aunque es importante evaluar por qué aumentó respecto a la muestra tomada en superficie. En los puntos TC 3, TC 4 y TC 5, las concentraciones disminuyeron por debajo del nivel de referencia. El TC 6 se mantiene en el mismo orden de concentración que en la muestra anterior de ese mismo punto (2,391 mg/kg), el TC 7 disminuye a 690 mg/kg y el TC 8 prácticamente se mantiene con la concentración que se encontró en superficie (4,092 mg/kg).

A la profundidad de 2.8 a 3.2 m se observa un aumento importante en tres puntos respecto a la muestra anterior en cada punto, estos son el TC 5 (5,795 mg/kg), TC 7 (5,860 mg/kg) y TC 8 (14,661 mg/kg). Esto indica que hay una afectación importante a 3 m en el área que abarcan estos tres puntos y su origen pudieron ser derrames anteriores que fueron cubiertos con material limpio.

En el área que rodea a la casa de bombas, los puntos que se localizaron frente al acceso (TC 9 y TC 10) presentaron concentraciones elevadas de 7,675 y 2,663 mg/kg. El punto TC 11 está por debajo del nivel de referencia. A 1.5 m de profundidad bajan estas concentraciones a 3,530 mg/kg en el TC 9 y a 1,579 mg/kg en el TC 10, pero hay un aumento en el TC 11 a 2,808 mg/kg. A 3.0 m también se presentan aumentos en las concentraciones, el TC 9 tiene 7,675 el TC 10 2,663 mg/kg, mientras que el TC 11 vuelve a disminuir considerablemente. En este sitio también puede pensarse que se ha colocado material de relleno sobre el suelo ya afectado.

Los puntos muestreados dentro del dique de contención (TC 12 y TC 13) están por debajo del valor de referencia. Hacia el costado sur del dique de contención del tanque de combustóleo, los puntos TC 14 y TC 15 no mostraron contenidos superiores a los de referencia en los tres niveles de muestreo.

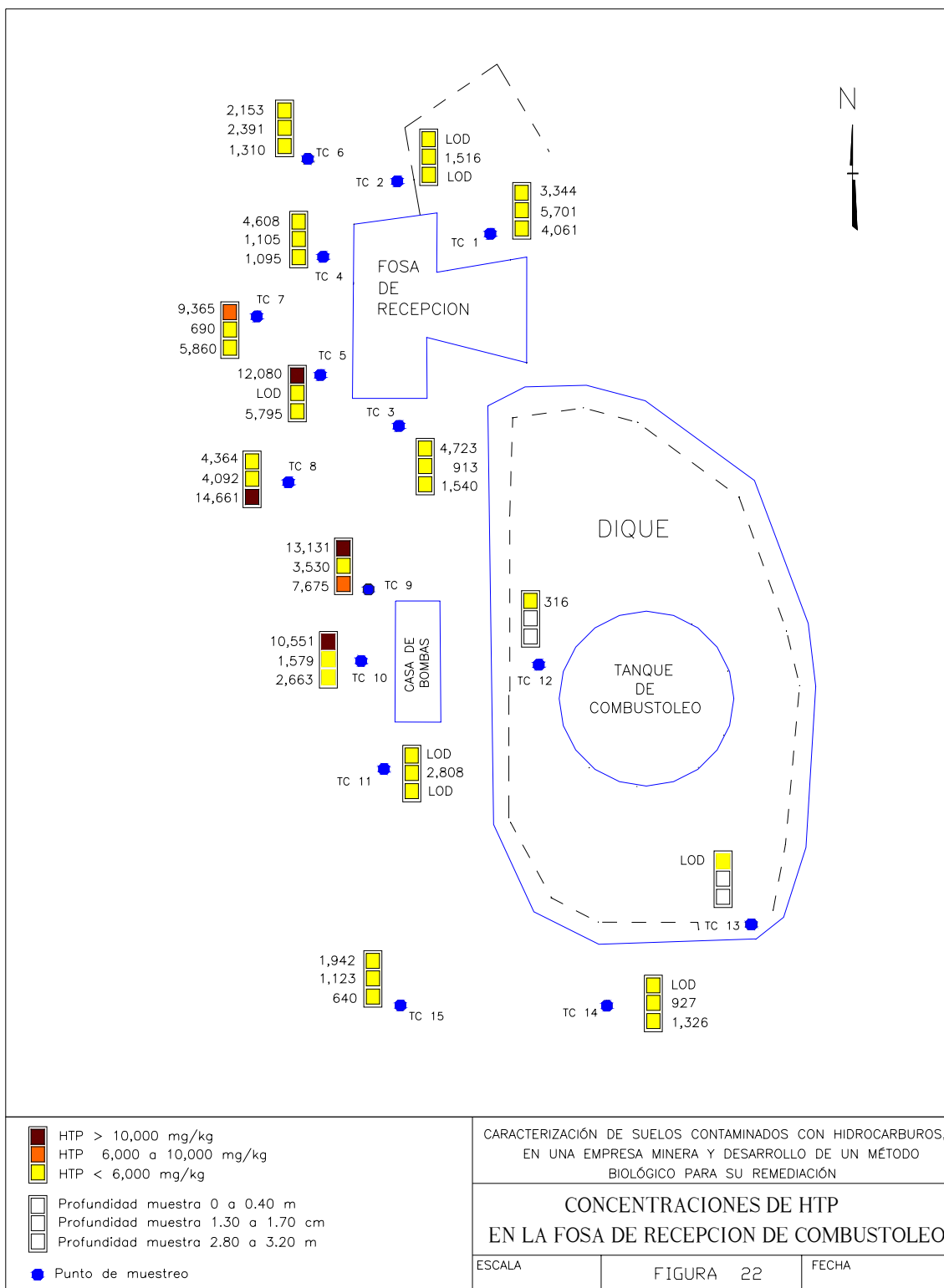


Figura 22. Concentración de HTP en la fosa de recepción de combustóleo

Tanque de diesel en la zona de embarque

En el Cuadro 12 se presentan los resultados del muestreo en el tanque de diesel en la zona de embarque.

Cuadro 12
Concentración de HTP (mg/kg) en el tanque de diesel en la zona de embarque

Muestra	Profundidad en m		
	0 a 0.40	1.30 a 1.70	2.80 a 3.20
ZE 1	26,263	25,866	10,040
ZE 2	23,293	3,059	4,690
ZE 3	9,705	439	1,310

La afectación en el tanque de diesel en la zona de embarque es puntual ya que se origina por el escurrimiento de diesel durante la operación de cargado que se realiza con la máquina de ferrocarril o con los camiones. En la Figura 23 se presentan las concentraciones de hidrocarburos en las tres profundidades muestreadas.

En este sitio se ubicaron tres puntos, la mayor afectación se observó en el punto ZE 1 que está precisamente debajo de la válvula del tanque. En superficie la concentración de diesel es de 26,263 mg/kg, a 1.5 m la concentración prácticamente se mantiene con 25,866 mg/kg y a 3.0 m hay una disminución importante hasta 10,040 mg/kg.

Las muestras ZE 2 y ZE 3 están separadas aproximadamente a 5 m de la válvula del tanque; estos puntos también presentan en superficie concentraciones elevadas (23,293 y 9,705 mg/kg, respectivamente). A 1.5 m hay una disminución considerable en las concentraciones a 3,059 mg/kg en el ZE 2 y a 439 en el ZE 3. A 3.0 m de profundidad las concentraciones se mantienen similares; 4,690 mg/kg en el ZE 2 y 1,310 mg/kg en el ZE 3.

Estos valores indican claramente la migración del diesel hacia capas inferiores del suelo y a una profundidad de 3.0 m aún se presentan concentraciones considerables.

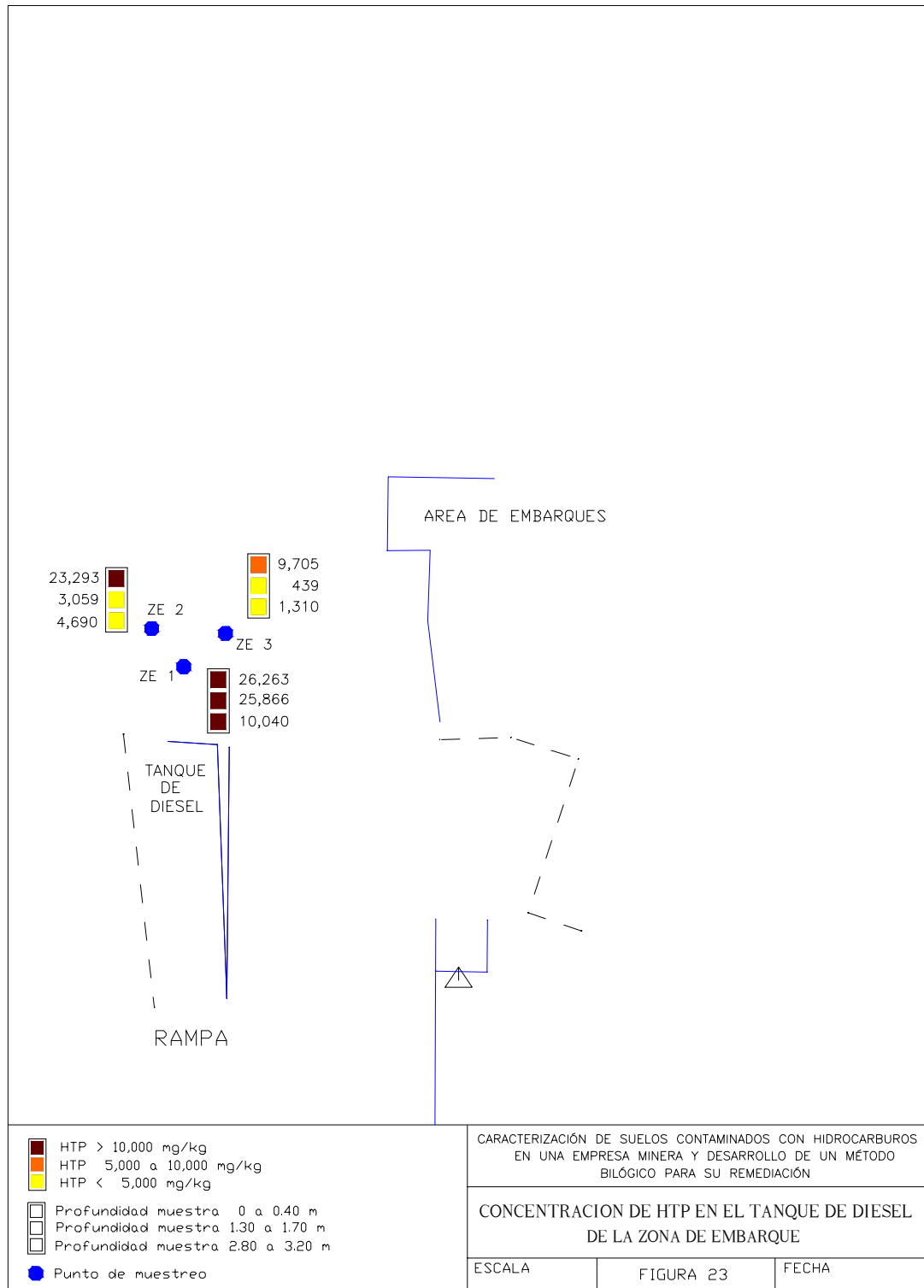


Figura 23. Concentración de HTP en tanque diesel de la zona de embarque

4.1.2 Volumen de suelo afectado

En las figuras del Apéndice 2 se muestran las áreas delimitadas en cada nivel de muestreo y el volumen estimado de suelo a tratar se presenta en el Cuadro 13.

Cuadro 13
Volumen estimado de suelos afectado

Sitio	Volumen estimado de suelo a tratar (m ³)
Taller La Encantada	1,706
Polvorín	362
Fosa de recepción de combustóleo	2,527
Tanque de diesel zona de embarque	464
TOTAL ESTIMADO	5,059

4.2 EVALUACIÓN PRELIMINAR

Como primera actividad de la segunda etapa se tomaron muestras iniciales en los sitios para realizar pruebas que permitieran evaluar la viabilidad del proceso de degradación bacteriana (biorremediación) y definir las características generales de los suelos contaminados. Como se mencionó en el inciso 3.2.3, las muestras se tomaron en los cuatro sitios: taller La Encantada, Polvorín, fosa de combustóleo y tanque de diesel.

En el Cuadro 14 se presentan los resultados de pH y conductividad eléctrica. Se observa que el suelo presenta un pH en general neutro (6.5 a 7.8) lo cual es un parámetro favorable en los procesos de biodegradación. Los valores de conductividad eléctrica son elevados por el alto contenido de minerales metálicos en los suelos de la empresa, lo cual podría ser una limitante para la función de los microorganismos.

Cuadro 14
Resultados de pH y C.E. en muestras iniciales de suelo

Clave	Sitio	pH	C.E. (µS/cm)
01	La Encantada (almacén)	7.4	1,058
02	La Encantada (mantenimiento)	7.7	969
03	Suelo limpio La Encantada	6.5	1,011
04	Polvorín	7.1	14,840
05	Fosa de recepción combustóleo	7.8	710
06	Casa de bombas combustóleo	7.4	462
07	Tanque de diesel zona de embarque	6.9	1,078

En el Cuadro 15 se presentan las características texturales. Las muestras contienen una mayor proporción de arenas y limos, que de arcillas. Aunque en el cuadro no se reporta el contenido de gravas, en los sitios donde se tomaron las muestras se observa la presencia de gravas y fragmentos de roca mayores a 1.5 pulgadas. Este es un aspecto importante ya que los hidrocarburos están contenidos preferentemente en la fracción de arcillas y limos.

Cuadro 15
Características texturales de muestras iniciales de suelo

Clave	Sitio	Arenas %	Limos %	Arcillas %	Clase Textural
01	La Encantada (almacén)	71	24	5	Franco arenoso
02	La Encantada (mantenimiento)	65	29	6	Franco limoso
03	Suelo limpio La Encantada	48	49	3	Franco limoso
04	Polvorín	76	18	6	Franco arenoso
05	Fosa de recepción combustóleo	48	50	2	Franco limoso
06	Casa de bombas combustóleo	67	23	10	Franco arenoso
07	Tanque de diesel zona de embarque	46	50	4	Franco limoso

La concentración de hidrocarburos totales del petróleo en las muestras iniciales se muestra en el Cuadro 16. Se observa que éstas varían desde el orden de 3,000 mg/kg y hasta 25,000 mg/kg, las cuales quedan en el intervalo recomendado en la literatura para la aplicación del método de biolabranza aunque es posible que en presencia de concentraciones superiores a 10,000 mg/kg pueda inhibirse la actividad de los microorganismos (EPA 510-B-94-003 y EPA 510-B-95-007).

Cuadro 16
Concentración de HTP en muestras iniciales de suelo

Clave	Sitio	Concentración mg/kg
01	La Encantada (almacén)	21,564
02	La Encantada (mantenimiento)	15,144
03	Suelo limpio La Encantada	59
04	Polvorín	5,972
05	Fosa de recepción combustóleo	4,742
06	Casa de bombas combustóleo	3,126
07	Tanque de diesel zona embarque	25,762

Los resultados de la caracterización microbiológica indican que en los suelos de la mina y de la planta de peletizado, existe una población considerable de microorganismos, lo que permite suponer que existen condiciones en los suelos que favorecen su crecimiento. En el Cuadro 17 se muestran los resultados de la cuenta viable de microorganismos heterotróficos en las muestras de suelo.

Cuadro 17
Cuenta viable de microorganismos heterotróficos en muestras iniciales de suelo

Clave	Sitio	Resultados (UFC/g)
01	Suelo La Encantada	2.7X10 ⁶
02	Suelo La Encantada	1.0X10 ⁵
03	Suelo limpio área de peletizado	5.0X10 ⁴
04	Suelo Polvorín	1.0X10 ⁷
05	Suelo fosa de recepción de combustóleo	5.9X10 ⁶
06	Suelo casa de bombas combustóleo	2.6X10 ⁷
07	Suelo Tanque de diesel zona de embarque	7.6X10 ⁷

Los resultados anteriores permitieron considerar que realmente es viable la aplicación del método de biorremediación, ya que el pH general de los suelos es prácticamente neutro (entre 6.5 y 7.8) y esto permite el adecuado desarrollo de las bacterias.

La matriz del suelo está formada básicamente de arenas y limos, con un alto contenido de gravas y rocas de gran tamaño, de acuerdo con las observaciones que se hicieron en campo al tomar las muestras. La remoción de las gravas y de las rocas puede reducir en forma considerable el volumen de suelo a tratar ya que los hidrocarburos se concentran en la fracción fina formada por las arenas y limos. El contenido de arcillas es bajo y esto es un factor favorable porque seguramente el porcentaje de hidrocarburos adsorbidos en esta fracción también es reducido.

La concentración de hidrocarburos está dentro del intervalo que en algunas referencias documentales se indica como adecuada para la aplicación del método de biolabranza. La presencia de microorganismos nativos en el suelo permite suponer que existen condiciones adecuadas que han permitido su crecimiento y por otro lado estos microorganismos están adaptados a la presencia del hidrocarburo y posiblemente han desarrollado la capacidad de degradarlo. Esto permite considerar que es factible la aplicación del método de tratamiento biológico.

Los suelos contaminados de la mina y de la planta de peletizado presentan una población de microorganismos entre 1×10^5 UFC/g y 7.6×10^7 UFC/g, que comparada con la que se reporta en la literatura de 10^6 a 10^8 UFC/g (Baker K. y Herson D., 1994), es suficiente para llevar a cabo la degradación de hidrocarburos mediante un método biológico.

Las condiciones de temperatura y humedad relativa en el área de la mina, son adecuadas para aplicar un método biológico de tratamiento. La temperatura anual promedio es de 23.5 °C y la precipitación mensual promedio en los meses más lluviosos (junio a octubre) es de 355 mm. Las condiciones de temperatura ambiente que se recomiendan en la literatura para los procesos de biorremediación van de 20 a 38 °C (U.S. Army Corps of Engineers, 1996).

4.3 PRUEBAS A NIVEL LABORATORIO

4.3.1 Caracterización de las muestras para laboratorio

Con base en los resultados de las muestras iniciales, reportados en el Cuadro 16, se ubicaron puntos en la mina y en la planta de peletizado para tomar las muestras de suelo que se utilizaron en el trabajo experimental de laboratorio y de campo.

Para realizar las pruebas en el laboratorio, se tomaron muestras de 2 kg en los cuatro sitios señalados. Las concentraciones de HTP en estas muestras se presentan en el Cuadro 18.

Cuadro 18
Concentración de HTP en suelo para las pruebas de laboratorio

Clave	Sitio	Concentración mg/kg
P / Lab	Polvorín	5,215
TE / Lab	Taller La Encantada	14,181
TC / Lab	Fosa de combustóleo	6,016
ZE / Lab	Tanque de diesel en la Z E	8,058

4.3.2 Aislamiento de bacterias

Se obtuvieron 17 colonias de bacterias diferentes que se identificaron y cuantificaron. Estas bacterias se presentan en el Cuadro 19.

Algunas de las bacterias identificadas en los suelos y en los lodos, como es el caso de la *Flavobacterium*, *Pseudomonas*, *Vibrio* y *Serratia*, están reportadas en la literatura como géneros con capacidad de degradar diversos compuestos químicos, entre los que se encuentran algunos hidrocarburos (Cookson J. 1995; Baker K. y Herson D. 1994; Fletcher R. 1994). Por esta razón, se hicieron pruebas en el laboratorio con el objeto de comprobar la capacidad de las bacterias identificadas en los suelos para degradar los hidrocarburos.

Algunas de estas bacterias también realizan una acción de cometabolismo (*Pseudomonas*, *Flavobacterium* y *Vibrio*). Este fenómeno de cometabolismo es importante en la transformación de algunos compuestos como hidrocarburos aromáticos y alifáticos, los cuales son sujetos a biodegradación por medio de este fenómeno (Cookson J., 1995).

La presencia de estas bacterias en los suelos contaminados y en los lodos, fue uno de los indicadores para considerar que era posible aplicar un proceso de biorremediación.

Cuadro 19
Bacterias identificadas en suelos contaminados y lodos de la planta de tratamiento

Lugar de Aislamiento	Género y Especie
Lodo residual (planta de tratamiento)	<i>Serratia plymuthica</i> <i>Serratia rubidaea</i> <i>Pseudomonas</i> spp. <i>Chryseobacterium</i> spp. (o <i>Pseudomonas</i> spp.) <i>Cedacea</i> spp. <i>Vibrio</i> spp. <i>Salmonella</i> spp. <i>Enterobacter cloacae</i>
Suelo La Encantada (01)	<i>Pantoea</i> spp. (o <i>Enterobacter</i> spp.) <i>Sphingomonas paucimobilis</i> (o <i>Pseudomonas paucimobilis</i>)
Suelo Polvorín (04)	<i>Vibrio vulnificus</i> <i>Vibrio</i> spp.
Suelo fosa de recepción de combustóleo (05)	<i>Yersinia pseudotuberculosis</i>
Suelo casa de bombas combustóleo (06)	<i>Cedacea neteri</i> <i>Kluyvera cryocrescens</i> <i>Kluyvera ascorbata</i>
Suelo La Encantada (02)	<i>Flavobacterium odoratum</i>

4.3.3 Pruebas de biodegradación con bacterias

Los matraces en los que se colocaron las bacterias aisladas con las muestras de combustibles se mantuvieron en observación durante dos y hasta tres semanas. En general se observó que la coloración oscura que proporciona la presencia de los combustibles en el medio mineral, se iba perdiendo conforme pasaba el tiempo, en algunos casos hasta recuperar parcialmente la transparencia del medio mineral.

Cada semana se tomaron muestras de 1 mL y se hizo un análisis cualitativo por cromatografía de gases para observar la presencia de los compuestos originales de los hidrocarburos. Los resultados mostraron con claridad la degradación o transformación de los compuestos originales observados en las muestras de combustible. En algunas de las muestras a los 7 días ya no se observaban los compuestos originales del hidrocarburo colocado en los matraces. Como ejemplo, en la Figura 24, se presenta el cromatograma de una muestra del diesel que se utiliza en la empresa, en el cual se observan los picos de los compuestos que forman el diesel; la Figura 25 es el cromatograma de la muestra de diesel después de haber estado en contacto durante 7 días con la bacteria *Serratia plymuthica* y se observa que ya no aparecen los picos de los compuestos originales.

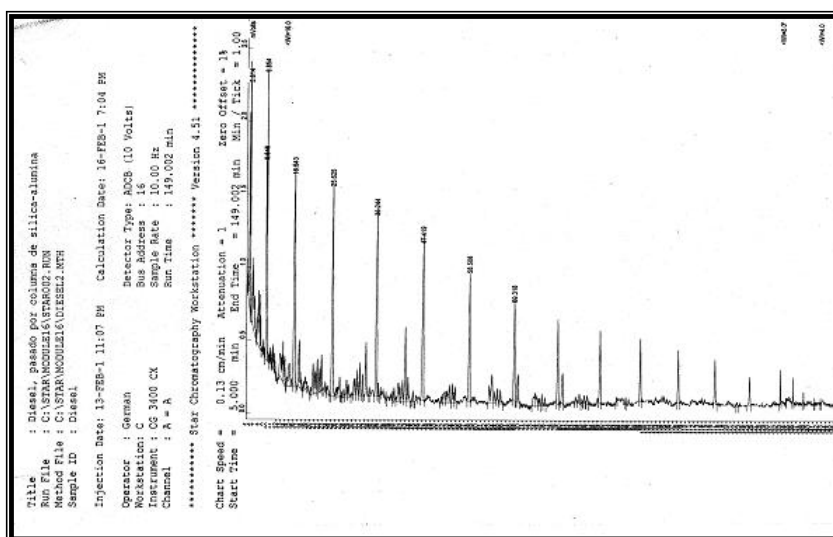


Figura 24. Cromatografía de gases de una muestra de diesel

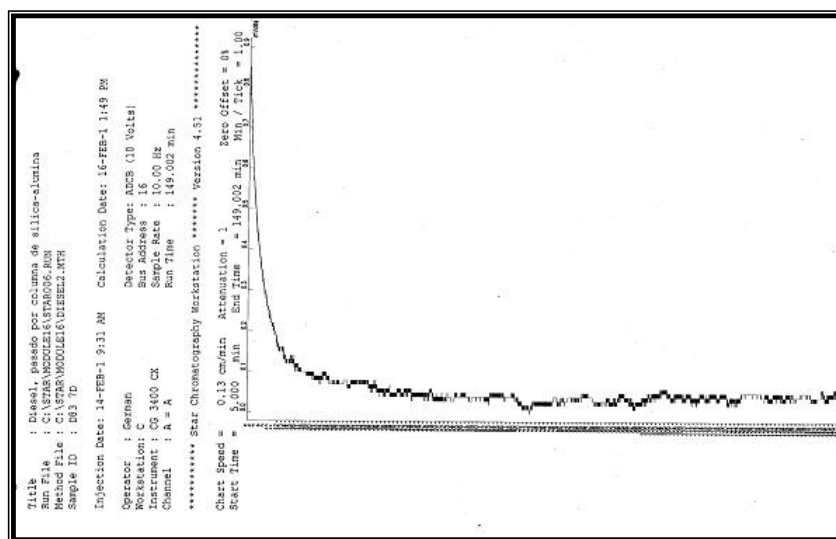


Figura 25. Cromatografía de gases de una muestra de diesel con la bacteria *Serratia plymuthica* (después de 7 días)

La Figura 26 es el cromatograma de una muestra de combustóleo y la Figura 27 es el cromatograma de la muestra después de 7 días de estar en contacto también con la bacteria *Serratia plymuthica*. Se observa un comportamiento similar al descrito para la muestra de diesel, los picos de los compuestos originales del combustóleo ya no se observan después de 7 días.

Estos resultados confirman que las bacterias identificadas tienen la capacidad de degradar los componentes originales del diesel y combustóleo, en un tiempo relativamente corto; sin

embargo, es de esperarse que bajo las condiciones naturales que prevalecen en los suelos, cambie el comportamiento de las bacterias, así como la velocidad de degradación.

Además, los resultados también confirman que las bacterias toman de los hidrocarburos el carbono necesario para llevar a cabo sus funciones metabólicas (Baker K. y Herson D., 1994).

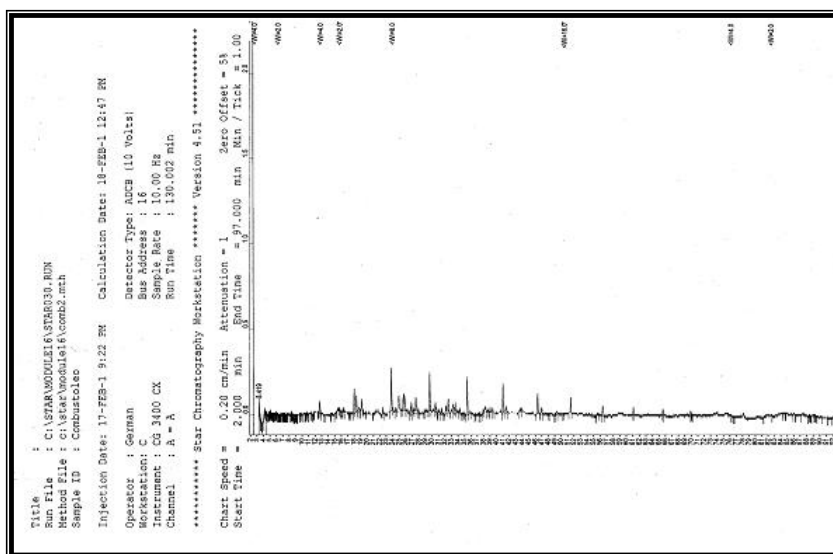


Figura 26. Cromatografía de gases de una muestra de combustóleo

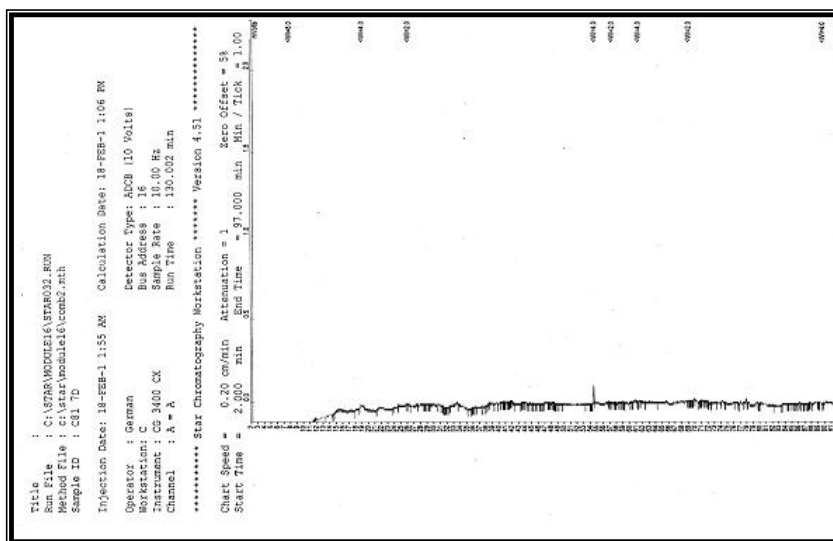


Figura 27. Cromatografía de gases de una muestra de combustóleo con la bacteria *Serratia plymuthica* (después de 7 días)

4.3.4 Pruebas de bioestimulación

Esta prueba se hizo en matraces con muestras de suelo contaminado y humedad controlada. Los resultados del análisis de las muestras que se tomaron en los matraces durante los dos meses que duró la prueba de bioestimulación, se presentan en el Cuadro 20 y en la Figura 28.

Cuadro 20
Degradación de hidrocarburos con bacterias nativas (pruebas de bioestimulación)

Muestra	Sitio	Concentración de HTP (mg/kg)				Degradación %
		Inicial	A 16 Días	A 32 Días	A 55 Días	
P / Lab	Polvorín	5,215	5,338	132	ND	≈100
TE / Lab	Taller la Encantada	14,181	12,105	8,348	8,359	41
TC / Lab	Fosa de combustóleo	6,016	4,889	217	212	96
ZE / Lab	Tanque de diesel en la Z E	8,058	7,808	4,505	4,457	45

ND. No se detectó señal en el equipo (límite de detección 30 mg/kg)

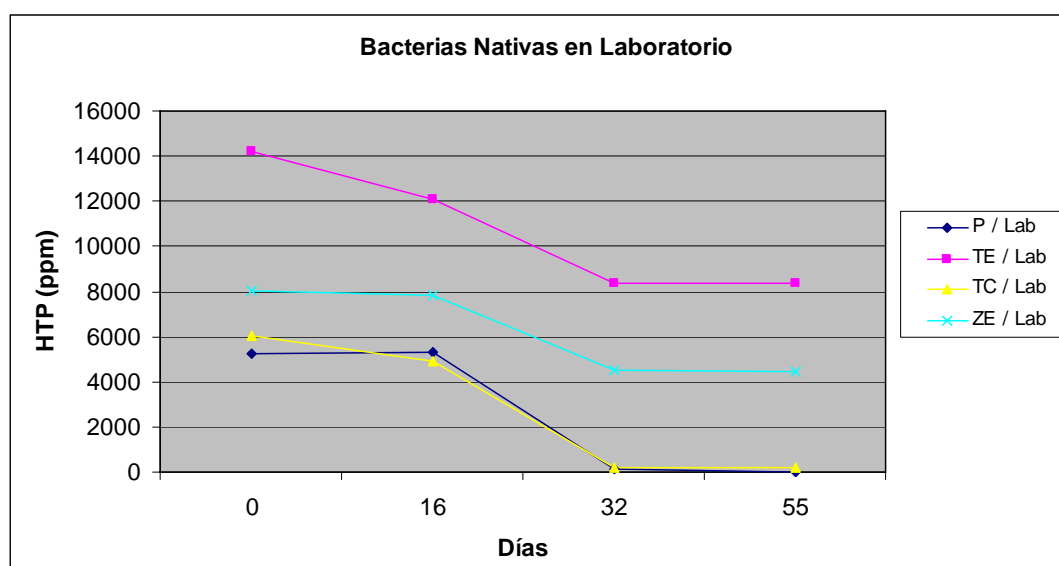


Figura 28.

Degradación de hidrocarburos con bacterias nativas en las pruebas de bioestimulación

De los resultados se observa, que al igual que en los experimentos realizados con las bacterias aisladas en medio mineral, en los suelos contaminados también se lleva a cabo la degradación de los hidrocarburos. En un periodo de prácticamente dos meses en el suelo del Polvorín y de la fosa de combustóleo la degradación es aproximadamente del 100 %, mientras que en el suelo de La Encantada y del tanque de diesel en la zona de embarque es superior al 40 %.

La cuenta viable de microorganismos heterotróficos se hizo al inicio y al final de las pruebas y los resultados se muestran en el Cuadro 21.

Cuadro 21
Cuenta viable de microorganismos en las pruebas de bioestimulación

Muestra	UFC/g	UFC/g
	Muestra Inicial	Muestra Final
P / Lab	1.6 X10 ⁶	5.01 X10 ⁵
TE / Lab	1.0 X10 ⁵	5.61 X10 ⁶
TC / Lab	5.0X10 ⁴	1.37 X10 ⁷
ZE / Lab	7.6X10 ⁷	1.85 X10 ⁶

Se observa que en el caso de la fosa de combustóleo (TC/Lab) hay un aumento considerable en la población de microorganismos que podría relacionarse con el elevado porcentaje de degradación alcanzado en corto tiempo. Sin embargo, en la muestra del Polvorín (P/Lab), se alcanza casi el 100 % de degradación pero la población de microorganismos disminuye de 1.6×10^6 a 5.01×10^5 . Sin embargo, el aspecto importante es que la población de microorganismos se mantiene dentro del intervalo recomendado para la remediación de los suelos.

En conclusión, las pruebas a nivel laboratorio confirmaron que es factible la aplicación de un método de biorremediación ya que se identificaron bacterias nativas que tienen la capacidad de degradar los hidrocarburos presentes en los suelos.

4.4 PRUEBAS EN CAMPO

4.4.1 Preparación de las muestras para campo

Para las pruebas con lodos de la planta de tratamiento, en cada sitio se tomaron dos muestras compuestas de 30 kg cada una. Las concentraciones de HTP que se determinaron en estas muestras se presentan en el Cuadro 22.

Adicionalmente se tomaron dos muestras en el talle La Encantada para hacer las pruebas con medio mineral, las concentraciones de estas muestras se muestran en el Cuadro 23.

Cuadro 22
Concentración de HTP en muestras de suelo para las pruebas en campo con lodos

Clave	Sitio	Concentración (mg/kg)
PC1	Polvorín	9,966
PC2	Polvorín	307
TEC1	Taller La Encantada	18,521
TEC2	Taller La Encantada	14,529
TCC1	Fosa de combustóleo	6,521
TCC2	Fosa de combustóleo	4,662
ZEC1	Tanque de diesel en la Z E	17,489
ZEC2	Tanque de diesel en la Z E	11,818

Cuadro 23
Concentración de HTP en muestras de suelo para las pruebas en campo con medio mineral

Clave	Sitio	Concentración mg/kg
TE / 32	Taller La Encantada	13,709
TE / 33	Taller La Encantada	12,439

4.4.2 Caracterización de lodos

En el Cuadro 24 se muestran los resultados de los análisis físicos y químicos de los lodos. Se observa que contienen bajas concentraciones de nitrógeno y fósforo, pero las cantidades de micronutrientes son más elevadas, principalmente de hierro y zinc. Esto permite suponer que los lodos pueden funcionar como una fuente significativa de nutrientes para estimular el crecimiento de microorganismos en un proceso de biodegradación.

La cuenta viable indica que existe una población elevada de microorganismos heterotróficos en los lodos (Cuadro 25). Comparando estos resultados con la cuenta viable obtenida en los suelos (Cuadro 17), se observa que el contenido de microorganismos en los lodos solamente es un poco mayor que en los suelos, lo cual indica que en estos últimos existen condiciones para el desarrollo de los microorganismos.

Cuadro 24
Caracterización física y química de lodos de la planta de tratamiento

Parámetros	Muestras	
	Pila de Lodos Secos	Pila de Lodos Frescos
% de humedad	92.84	95.05
% de nitrógeno total	2.471	2.042
% de materia orgánica	55.37	58.09
pH	7.35	7.44
Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1,514	1,760
Fósforo total (ppm)	12,075.47	12,783.01
Fósforo disponible (ppm)	654.72	567.66
Cu (ppm)	259.80	290.20
Mn (ppm)	382.40	230.60
Zn (ppm)	2,471.00	3,404.00
Fe (%)	5.9	4.9
Pb (ppm)	170.60	91.80
Ni (ppm)	31.70	17.30
Mg (ppm)	3,730.00	4,080.00

Cuadro 25
Cuenta viable de microorganismos heterotróficos en lodos de la planta de tratamiento

Muestra	Resultado (UFC/mL)
Lodo pila seca	3.15×10^8
Lodo pila fresca	3.6×10^8
Agua residual sedimentada y decantada	5.5×10^7

En los Cuadros 26, 27 y 28 se presentan los resultados de los análisis realizados para determinar coliformes totales, coliformes fecales y estreptococos, respectivamente. Estos tres grupos son utilizados como indicadores biológicos.

Cuadro 26
Coliformes totales en lodos de la planta de tratamiento

Muestra	NMP/mL
Lodo pila seca	2.8×10^7
Lodo pila fresca	1.6×10^8
Agua residual sedimentada y decantada	3.5×10^7

Cuadro 27
Coliformes fecales en lodos de la planta de tratamiento

Muestra	NMP/mL
Lodo pila seca	1.4X10 ⁷
Lodo pila fresca	2.8X10 ⁶
Agua residual sedimentada y decantada	4.8X10 ⁶

Cuadro 28
Estreptococos fecales en lodos de la planta de tratamiento

Muestra	UFC/mL
Lodo pila seca	10.87X10 ⁶
Lodo pila fresca	9.49X10 ⁶
Agua residual sedimentada y decantada	4.8X10 ⁶

También se analizó la presencia de parásitos en los lodos, los resultados se muestran en el Cuadro 29.

Cuadro 29
Parásitos en lodos de la planta de tratamiento

Muestra	Huevos de Helmintos en 10 g de Muestra
Lodo pila seca	5
Lodo pila fresca	12
Agua residual sedimentada y decantada	15

Por otro lado, se detectó la presencia de *Salmonella* en todas las muestras, aunque no se definió el tipo.

Actualmente los lodos de la planta de tratamiento constituyen un desecho sin utilidad para la empresa por lo que su reuso como medio para degradar hidrocarburos y remediar los suelos,

representa un ventaja económica y ambiental, y un prototipo de solución aplicable a muchos casos de contaminación de suelos.

Los lodos contienen macro y micronutrientes esenciales para estimular el crecimiento de los microorganismos, entre los que se encuentran nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, hierro, cobre, zinc y magnesio. Los nutrientes no se encuentran en formas disponibles, pero las bacterias presentes catalizan su mineralización (formación de sales asimilables).

Los lodos también tienen una población significativa de microorganismos. Al salir del reactor contienen 3.5×10^6 UFC/mL y los depositados en la pila fresca 3.6×10^8 UFC/mL. Esta población complementa la acción de las bacterias nativas del suelo para descomponer los HTP.

La existencia de organismos patógenos en los lodos no es una limitante para utilizarlos, ya que éstos se mezclan en baja proporción con el suelo y aún después del tratamiento, el suelo se pueden mantener aislado durante un tiempo bajo las condiciones climáticas del lugar esperando a que estos organismos no persistan. Además, en caso necesario, se puede adicionar cal.

4.4.3 Pruebas con lodos de la planta de tratamiento

Las pruebas con lodos se llevaron a cabo durante 177 días, en este tiempo se realizaron seis muestreos, al inicio de las pruebas, a 24, 45, 67, 104 y 177 días. Las muestras tomadas se analizaron para determinar la concentración de HTP en los suelos; los resultados se muestran en el Cuadro 30 y en las Figuras 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35 y 36, se muestran las tendencias de la degradación de los hidrocarburos en los cajones de prueba.

Las pruebas realizadas mostraron que después de seis meses (177 días) en la mayoría de los cajones se alcanzaron concentraciones de HTP inferiores al límite permisible señalado en la NOM-138-SEMARNAT/SS-2003 que es de 5,000 mg/kg.

De los 16 cajones preparados con suelo de la mina, en 9 se alcanzaron valores menores a 5,000 mg/kg, sin considerar los cajones 3, 4, 18 y 28 del Polvorín cuya concentración inicial fue muy inferior a este valor. En estos cajones no fue posible observar con claridad la tendencia de la degradación de los hidrocarburos, por lo que no se incluyeron en el análisis general.

Por otro lado, en los 15 cajones con suelo de la planta de pelletizado se alcanzaron los niveles deseados, aunque en los cajones de la muestra TCC2 (11, 12, 22 y 26) la concentración inicial fue ligeramente menor al límite permisible. Sin embargo, en estos cajones si se observó una clara tendencia en la degradación de los hidrocarburos.

Los resultados obtenidos durante la prueba (en total 6 muestreos), indicaron que la degradación de los hidrocarburos es gradual, aunque a diferente velocidad en cada tipo de suelo.

Cuadro 30
Degradación de hidrocarburos en las pruebas de campo con lodos

Núm. Cajón	Descripción	Clave	Concentración de HTP (mg/kg)					Degradación %	
			Inicial	A 24 Días	A 45 Días	A 67 Días	A 104 Días		A 177 Días
1	Polvorín C1	PC1 A	9 966	4 020	2 046	9 145	8 390	729	92
2	Polvorín C1	PC1 B	9 966	9 294	6 194	5 161	6 838	2 880	71
17	Repetición del cajón 2	PC1 B	9 966	10 367	5 547	6 733	7 689	256	97
31	Polvorín C1	PC1	9 966	9 009	9 267	7 828	9 085	571	94
3	Polvorín C2	PC2 A	307	725	2 459	216	746	341	---
4	Polvorín C2	PC2 B	307	257	91	73	636	89	---
18	Repetición del cajón 4	PC2 B	307	121	70	226	247	43	---
28	Polvorín C2	PC2	307	138	303	69	494	562	---
5	Taller La Encantada C1	TEC1 A	18 521	19 575	13 699	13 694	17 772	4 171	78
6	Taller La Encantada C1	TEC1 B	18 521	15 375	16 425	13 989	14 268	2 497	87
19	Repetición del cajón 6	TEC1 B	18 521	18 171	14 165	11 646	13 995	3 150	83
30	Taller La Encantada C1	TEC1	18 521	20 877	15 249	17 352	10 325	6 357	66
7	Taller La Encantada C2	TEC2 A	14 529	11 645	10 851	9 768	10 814	5 441	63
8	Taller La Encantada C2	TEC2 B	14 529	12 535	12 137	12 591	10 827	2 114	85
20	Repetición del cajón 8	TEC2 B	14 529	15 907	13 088	11 200	12 130	5 737	61
29	Taller La Encantada C2	TEC2	14 529	15 049	9 857	7 484	6 514	2 245	85

Cuadro 30
Degradación de hidrocarburos en las pruebas de campo con lodos (continuación)

Núm. Cajón	Descripción	Clave	Concentración de HTP (mg/kg)					Degradación %	
			Inicial	A 24 Días	A 45 Días	A 67 Días	A 104 Días		A 177 Días
9	Fosa de Combustóleo C1	TCC1 A	6 521	3 229	3 484	3 264	3 202	870	87
10	Fosa de Combustóleo C1	TCC1 B	6 521	8 219	5 732	5 986	1 300	1 524	77
21	Repetición del cajón 10	TCC1 B	6 521	8 387	5 673	4 480	5 654	1 855	72
27	Fosa de Combustóleo C1	TCC1	6 521	6 793	3 702	2 489	1 837	1 683	72
11	Fosa de Combustóleo C2	TCC2 A	4 662	3 581	3 478	2 217	402	86	98
12	Fosa de Combustóleo C2	TCC2 B	4 662	4 995	2 371	1 731	788	ND	100
22	Repetición del cajón 12	TCC2 B	4 662	1 417	1 058	917	473	483	90
26	Fosa de Combustóleo C2	TCC2	4 662	2 623	4 257	2 780	345	560	88
13	Tanque diesel en Z E C1	ZEC1 A	17 489	10 904	5 943	5 224	5 737	1 202	93
14	Tanque diesel en Z E C1	ZEC1 B	17 489	12 343	9 884	7 160	5 095	2 523	86
23	Repetición del cajón 14	ZEC1 B	17 489	9 955	7 720	6 156	5 771	1 191	93
25	Tanque diesel en Z E C1	ZEC1	17 489	10 353	8 513	7 309	6 789	2 824	84
15	Tanque diesel en Z E C2	ZEC2 A	11 818	6 871	7 212	5 267	3 823	314	97
16	Tanque diesel en Z E C2	ZEC2 B	11 818	6 428	7 185	7 234	4 545	252	98
24	Repetición del cajón 16	ZEC2 B	11 818	6 020	8 728	6 471	5 376	2 465	79

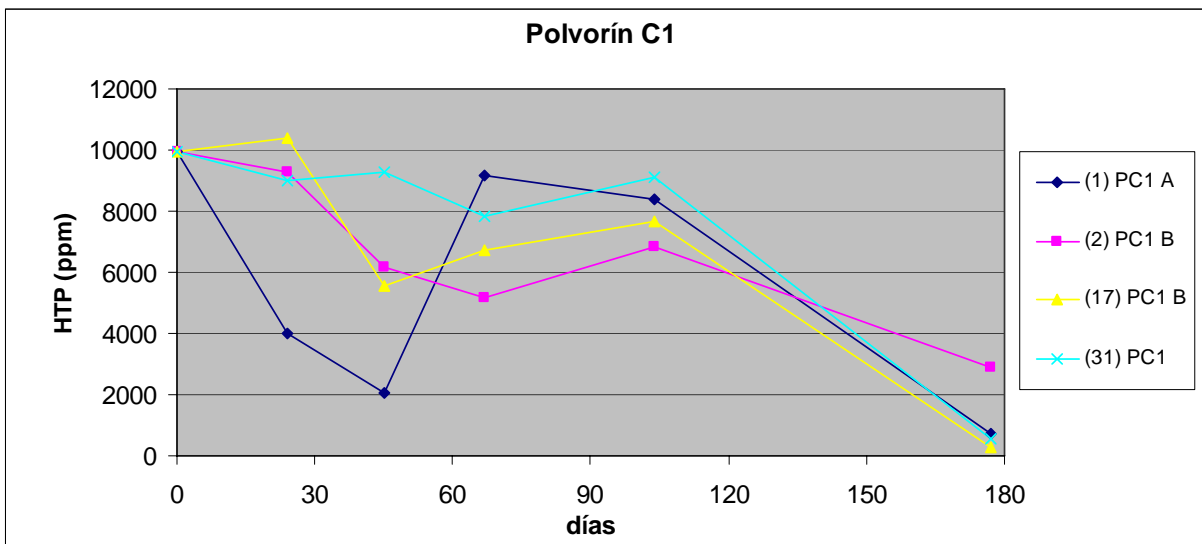


Figura 29.
Degradación de hidrocarburos en el suelo del polvorin C1 (prueba con lodos)

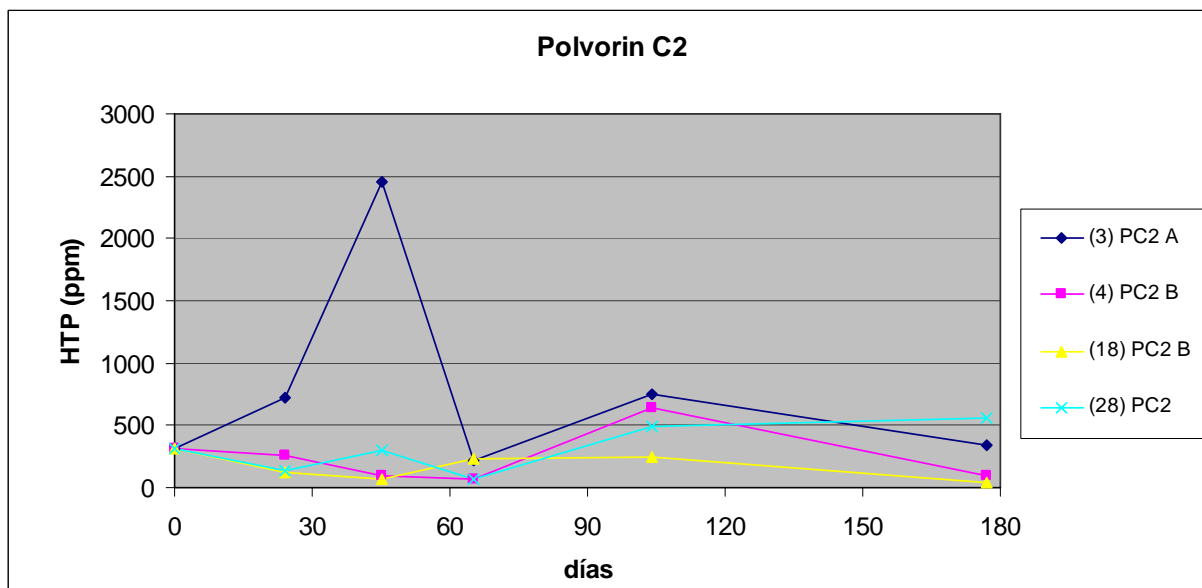


Figura 30.
Degradación de hidrocarburos en el suelo del polvorin C2 (prueba con lodos)

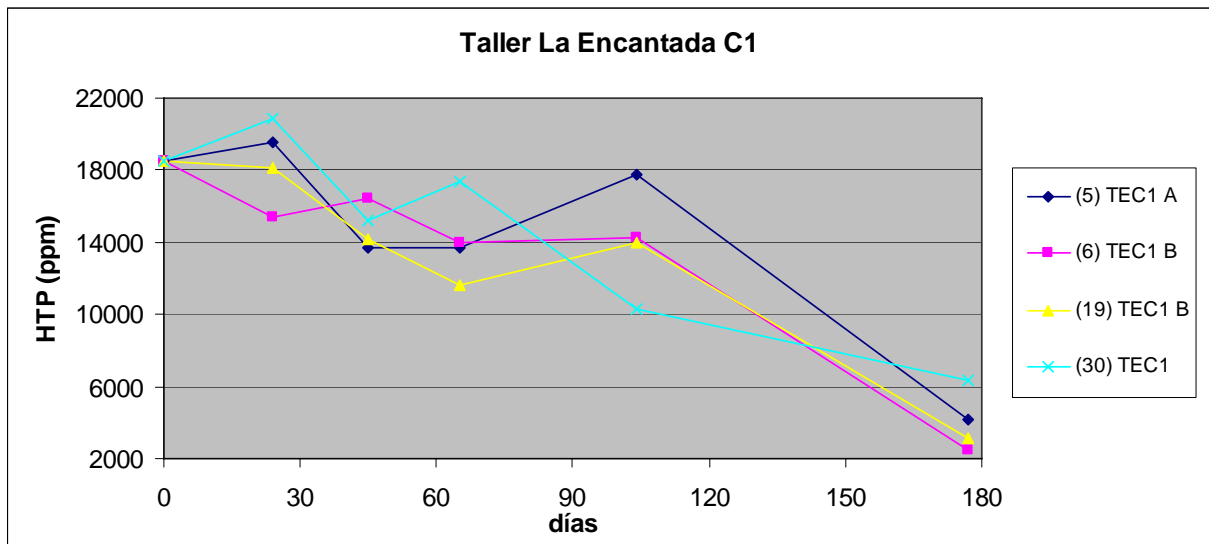


Figura 31.
Degradación de hidrocarburos en el suelo de La Encantada C1 (prueba con lodos)

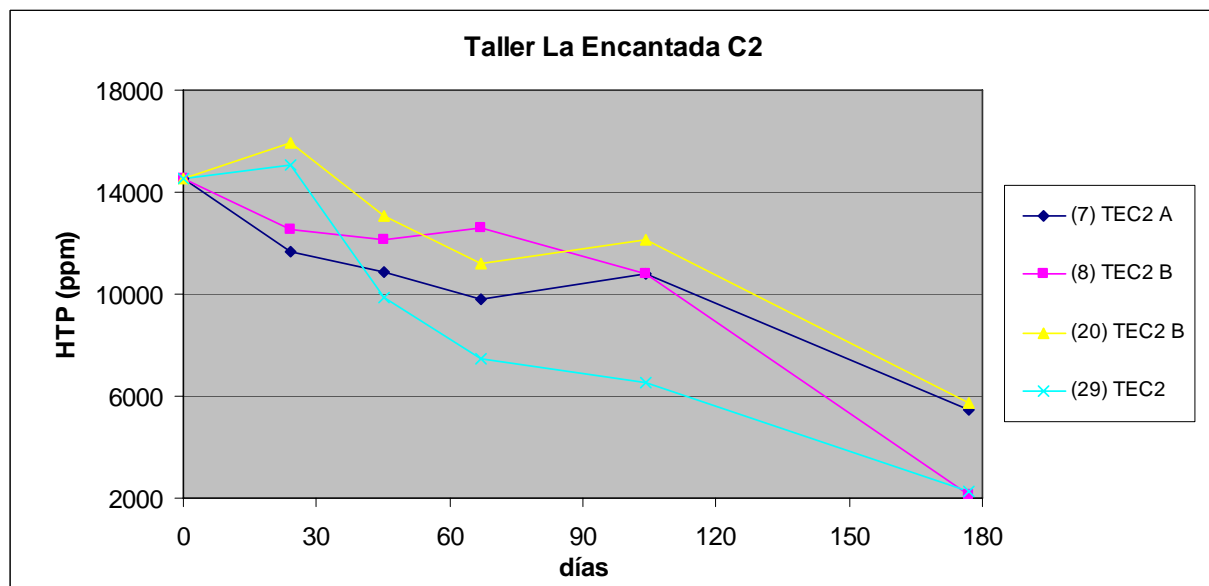


Figura 32.
Degradación de hidrocarburos en el suelo de La Encantada C2 (prueba con lodos)

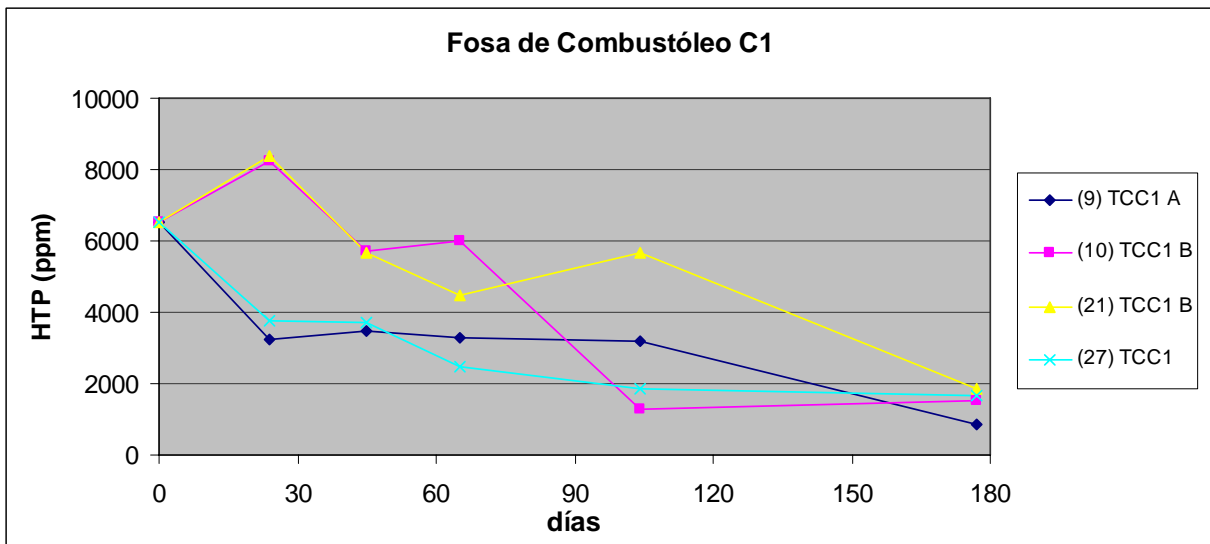


Figura 33.

Degradación de hidrocarburos en el suelo de la fosa de combustóleo C1 (prueba con lodos)

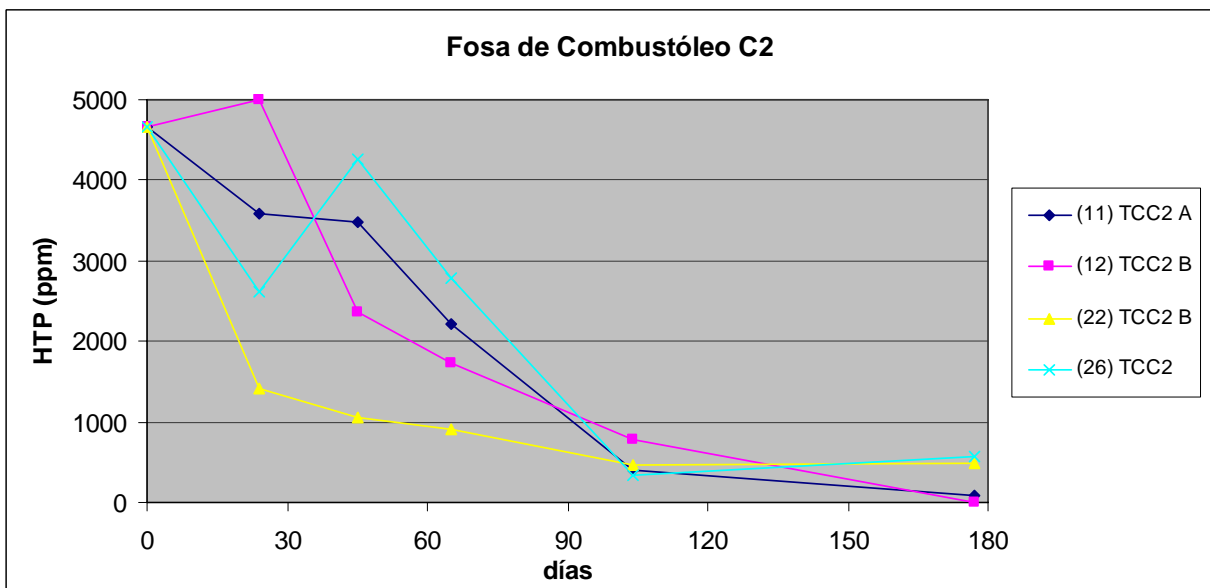


Figura 34.

Degradación de hidrocarburos en el suelo de la fosa de combustóleo C2 (prueba con lodos)

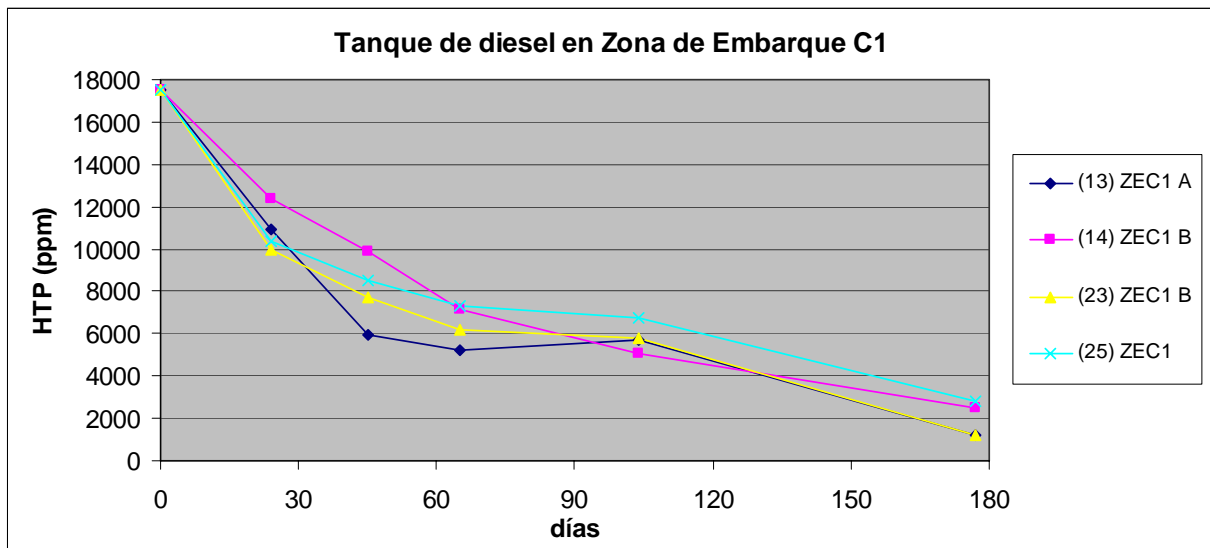


Figura 35.

Degradación de hidrocarburos en el suelo del tanque de diesel en la zona de embarque C1 (prueba con lodos)

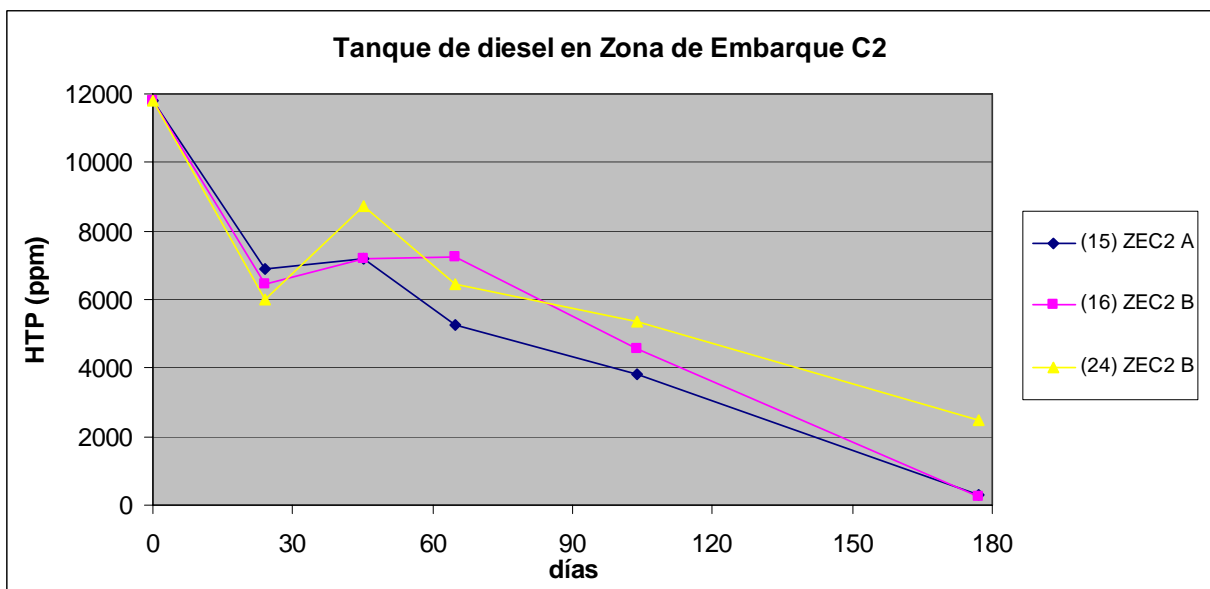


Figura 36.

Degradación de hidrocarburos en el suelo del tanque de diesel en la zona de embarque C2 (prueba con lodos)

En general la degradación en los suelos de la planta de peletizado es más rápida que en los suelos de la mina. Los cajones que tuvieron un comportamiento regular y que alcanzaron los más altos porcentajes de degradación a los 177 días, se presentan en el Cuadro 31.

Se observa que no existe una clara relación entre la eficiencia de degradación y la proporción en peso de suelo y lodo, ya que pueden influir diversos factores como: a) la concentración de hidrocarburos, que es mayor en La Encantada y en el tanque de diesel de la zona de embarque, b) el tipo de hidrocarburos, ya que dependiendo de su estructura molecular pueden ser más o menos resistentes a la degradación (en La Encantada hay una mezcla de diesel y aceites); y c) el tipo de bacterias nativas y las características de cada tipo de suelo (en la mina el suelo está formado por material estéril producto del descapote).

También es importante notar que en la mayoría de los cajones con suelo de la mina, se alcanzaron niveles inferiores a los 5,000 mg/kg, lo que confirma la capacidad de degradación de las bacterias bajo las condiciones ambientales del lugar; así como la utilidad de los lodos como fuente de nutrimentos para el proceso.

Cuadro 31
Cajones con mejor degradación en las pruebas con lodos

Sitio	Núm. Cajón	Relación Suelo/ Lodo	Concentración de HTP Inicial (mg/kg)	Concentración de HTP Final (mg/kg)	Degradación (%)
Fosa de combustóleo	12	5/3	4,662	N.D.	99
Fosa de combustóleo	11	1/1	4,662	86	98
Tanque en zona de embarque	15	1/1	11,818	314	97
Tanque en zona de embarque	13	1/1	17,489	1,202	93
Tanque en zona de embarque	23	5/3	17,489	1,191	93
Fosa de combustóleo	9	1/1	6,521	870	87
Taller La Encantada	6	5/3	18,521	2,497	87
Taller La Encantada	29	10/3	14,529	2,245	85
Taller La Encantada	8	5/3	14,529	2,114	85
Taller La Encantada	19	5/3	18,521	3,150	83
Fosa de combustóleo	27	10/3	6,521	1,683	72
Polvorín	2	5/3	9,966	2,880	71

N.D. No se detectó señal, concentración por debajo del límite de detección del equipo (30 mg/kg).

En algunos cajones la degradación no siguió un comportamiento lineal, más bien el comportamiento fue irregular (por ejemplo, cajones 1, 3, 21, 24 y 26). En algunas muestras tomadas en estos cajones, la concentración de HTP resultó mayor a la obtenida en la muestra inmediata anterior. Esta variación pudo deberse a que no se homogeneizó adecuadamente el material de los cajones antes de tomar la muestra; sin embargo, lo importante es seguir la tendencia general.

Cuadro 32
Cuenta viable de microorganismos heterotróficos en las pruebas con lodos

Núm. Cajón	Descripción	Clave	UFC/g					
			Inicial	A 24 Días	A 45 Días	A 67 Días	A 104 Días	A 177 Días
1	Polvorín C1	PC1 A	5.4×10^7	8.84×10^6	4.80×10^6	1.67×10^5	2.37×10^5	6.5×10^6
2	Polvorín C1	PC1 B	6.05×10^7	6×10^3	1.30×10^5	1.86×10^6	3.75×10^4	1.67×10^6
3	Polvorín C2	PC2 A	5.4×10^7	3.24×10^5	5.50×10^5	2.23×10^6	1.63×10^5	7.00×10^5
4	Polvorín C2	PC2 B	6.05×10^7	1.2×10^5	7.56×10^4	2.40×10^6	6.30×10^5	1.38×10^7
5	Taller Encantada C1	TEC1 A	1.44×10^7	9.66×10^7	6.63×10^5	2.09×10^5	9.9×10^4	2.15×10^6
6	Taller Encantada C1	TEC1 B	1.1×10^7	1.95×10^7	5.80×10^5	5.84×10^5	4.48×10^5	4.71×10^6
7	Taller Encantada C2	TEC2 A	2.48×10^7	4.09×10^7	1.54×10^5	9.25×10^4	3.85×10^5	1.11×10^7
8	Taller Encantada C2	TEC2 B	2.4×10^7	5.03×10^5	3.17×10^5	4.20×10^4	3.55×10^5	5.03×10^5
9	Fosa de Combustóleo C1	TCC1 A	1.18×10^8	3.27×10^6	1.68×10^6	2.23×10^6	1.00×10^5	1.40×10^6
10	Fosa de Combustóleo C1	TCC1 B	1.41×10^8	3.00×10^5	2.68×10^5	1.57×10^5	1.57×10^5	2.19×10^6
11	Fosa de Combustóleo C2	TCC2 A	3.76×10^7	9.57×10^5	8.49×10^5	2.20×10^4	6.57×10^4	2.80×10^6
12	Fosa de Combustóleo C2	TCC2 B	4×10^7	2.90×10^5	4.70×10^4	2.86×10^7	4.00×10^4	5.80×10^6
13	Tanque diesel en la ZE C1	ZEC1 A	3.18×10^8	4.76×10^7	1.5×10^5	1.74×10^7	3.50×10^5	9.60×10^6
14	Tanque diesel en la ZE C1	ZEC1 B	3.91×10^8	5.04×10^{10}	1.00×10^5	4.15×10^4	9.25×10^4	9.10×10^5
15	Tanque diesel en la ZE C2	ZEC2 A	3.18×10^8	2.85×10^8	1.66×10^5	4.60×10^5	5.20×10^5	9.20×10^5
16	Tanque diesel en la ZE C2	ZEC2 B	3.91×10^8	5.45×10^6	8.60×10^6	4.25×10^5	6.75×10^5	1.86×10^5

La cuenta viable de microorganismos heterotróficos sólo se practicó a los cajones 1 a 16 y los resultados se presentan en el Cuadro 32. En general el comportamiento de la población de microorganismos es irregular, en algunas muestras aumenta y en otras disminuye. Este comportamiento puede relacionarse con diversas variables, pero de las pruebas de bioestimulación realizadas en laboratorio y en campo, se puede concluir que la humedad es un factor determinante. En este caso lo realmente importante fue que densidad de la población se mantuvo constante a lo largo de la prueba.

En estas pruebas los lodos aportaron el agua necesaria para humedecer el material; sin embargo, la periodicidad con la que se agregaron no fue suficiente para mantener la humedad constante y esto pudo ocasionar que se limitara el crecimiento de las bacterias y por ende la velocidad de degradación.

No obstante, a partir del día 104 y hasta el día 177, se observa un incremento notable de la población en prácticamente todos los cajones, a excepción del 16. Este fenómeno resulta interesante ya que en este tiempo se dejaron de agregar lodos a los cajones y solo se agregó agua en forma periódica, lo que explica la importancia del factor de humedad en el proceso de biodegradación. Además, el crecimiento de la población entre 104 y 177 días, indica que las bacterias continuaron realizando sus funciones metabólicas ya que en este tiempo también hubo degradación de HTP (Cuadro 30).

El contenido de huevos de helmintos en las muestras se presenta en el Cuadro 33, los estreptococos fecales en el Cuadro 34 y la *Salmonella* spp en el Cuadro 35.

Cuadro 33
Presencia de huevos de helmintos en los cajones de las pruebas con lodos

Núm. de Cajón	Huevos / 10 g de Suelo			
	A 24 Días	A 45 Días	A 67 Días	A 104 Días
1	3	Negativo	12	3
2	Negativo	4	7	2
3	Negativo	Negativo	3	4
4	Negativo	2	Negativo	Negativo
5	Negativo	Negativo	2	1
6	2	4	3	Negativo
7	Negativo	Negativo	Negativo	3
8	Negativo	Negativo	Negativo	1
9	3	Negativo	Negativo	Negativo
10	Negativo	Negativo	Negativo	Negativo
11	Negativo	Negativo	3	2
12	4	3	Negativo	Negativo
13	Negativo	Negativo	Negativo	3
14	Negativo	Negativo	Negativo	4
15	Negativo	Negativo	2	Negativo
16	2	Negativo	Negativo	2

Los resultados obtenidos muestran que en el 60 % de los análisis no se detectó la presencia de huevos de helmintos en el suelo y en los cajones restantes el contenido varía de 1 a 4 huevos / 10 g de suelo, a excepción de la tercera muestra tomada en los cajones 1 y 2, donde se encontraron 12 y 7 huevos, respectivamente.

Los análisis iniciales practicados a los lodos de la planta de tratamiento, indican que en el lodo reciente (a la salida del reactor) hay 10 huevos/10 g de suelo y que en la pila de lodos frescos el contenido es de 12 huevos/10 g de suelo. Comparando estos datos con los obtenidos en los cajones, se ve que en estos últimos el contenido de huevos de helmintos es menor, lo que podría ser un indicador de que el suelo tratado no representa un riesgo por su contenido de organismos patógenos, sobre todo considerando que aún falta por determinar la viabilidad de los huevos encontrados¹.

Los estreptococos fecales no están presentes en todos los cajones; por ejemplo en la muestra del Polvorín no se identificaron, mientras que en los suelos de La Encantada su presencia es constante, aunque inferior a las cantidades encontradas en los lodos (5.0×10^6 y 9.49×10^6 UFC/g). En los suelos de la planta de pelletizado hay ausencia en algunos de los cajones, mientras que en otros las cantidades son menores a las de los lodos.

Cuadro 34
Presencia de estreptococos fecales en los cajones de las pruebas con lodos

Núm. de Cajón	UFC/g			
	A 24 Días	A 45 Días	A 67 Días	A 104 Días
1	Negativa	Negativa	Negativa	Negativa
2	Negativa	Negativa	Negativa	Negativa
3	Negativa	Negativa	Negativa	Negativa
4	Negativa	Negativa	Negativa	Negativa
5	2.00×10^3	9.12×10^4	1.50×10^3	1.00×10^3
6	3.00×10^3	3.65×10^4	8.00×10^3	5.50×10^3
7	1.00×10^4	Negativa	8.00×10^3	3.00×10^3
8	9.50×10^4	5.00×10^3	3.25×10^4	1.62×10^4
9	5.60×10^4	Negativa	1.77×10^4	4.60×10^4
10	Negativa	Negativa	3.00×10^3	1.37×10^4
11	4.00×10^3	1.65×10^4	2.30×10^4	9.00×10^3
12	1.00×10^4	Negativa	4.50×10^3	4.50×10^3
13	Negativa	Negativa	Negativa	1.10×10^4
14	Negativa	Negativa	Negativa	1.67×10^4
15	8.00×10^3	Negativa	Negativa	Negativa
16	1.05×10^4	2.95×10^4	1.00×10^3	6.00×10^3

¹ Los huevos son *viabiles* cuando pueden reproducirse y *no viabiles* cuando no tienen esta capacidad.

En el primer muestreo se identificó la *Salmonella* en todos los cajones, pero en los tres restantes su presencia se limita sólo a 12 muestras (25 % del total de las muestras correspondientes a los tres últimos muestreos). Este comportamiento también puede ser un indicador de que la *Salmonella* no persiste en los suelos durante su tratamiento.

La presencia de organismos patógenos es un parámetro que debe ser cuidadosamente vigilado, sobre todo al final del proceso de tratamiento. Los análisis practicados durante las pruebas con lodos indican que por el bajo contenido de estos organismos en el suelo tratado, éste no representa riesgo para su uso posterior en la reforestación de los terreros de la mina; considerando además, que los terreros están en zonas apartadas dentro de las instalaciones de la empresa.

Cuadro 35
Presencia de *Salmonella* spp en los cajones de las pruebas con lodos

Núm. de Cajón	A 24 Días	A 45 Días	A 67 Días	A 104 Días
1	Positiva	Negativa	Negativa	Negativa
2	Positiva	Negativa	Negativa	Negativa
3	Positiva	Negativa	Negativa	Negativa
4	Positiva	Negativa	Negativa	Negativa
5	Positiva	Positiva	Positiva	Negativa
6	Positiva	Negativa	Negativa	Negativa
7	Positiva	Positiva	Negativa	Positiva
8	Positiva	Positiva	Negativa	Positiva
9	Positiva	Negativa	Negativa	Negativa
10	Positiva	Negativa	Negativa	Positiva
11	Positiva	Negativa	Negativa	Positiva
12	Positiva	Positiva	Negativa	Negativa
13	Positiva	Positiva	Positiva	Negativa
14	Positiva	Negativa	Positiva	Negativa
15	Positiva	Negativa	Negativa	Negativa
16	Positiva	Negativa	Negativa	Negativa

4.4.4 Pruebas con medio mineral

Los resultados del seguimiento de las pruebas de campo realizadas con el medio mineral en vez de lodos, se presentan en el Cuadro 36 y en la Figura 37 se muestra el comportamiento de la degradación en los cajones de prueba.

Cuadro 36
Degradación de hidrocarburos en las pruebas de campo con medio mineral

Cajón	Sitio	Concentración de HTP (mg/kg)				Degradación %
		Inicial	A 21 Días	A 56 Días	A 94 Días	
TE / 32	La Encantada	13,709	8,573	5,077	6,745	51
TE / 33	La Encantada	12,439	4,930	5,748	5,923	52

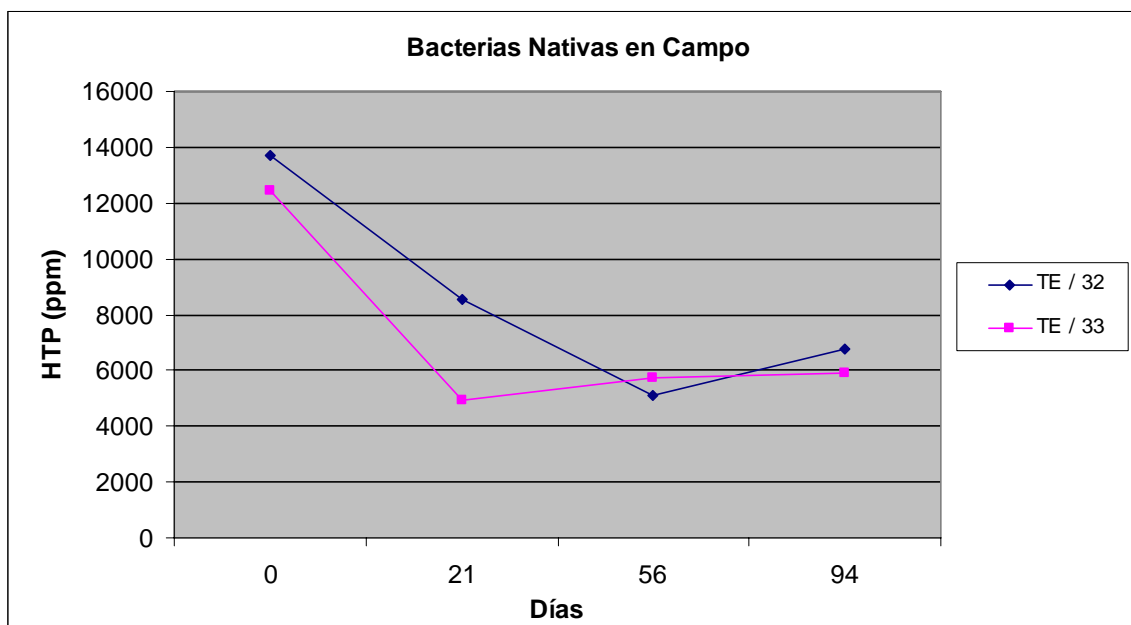


Figura 37.
Degradación de hidrocarburos en suelo de La Encantada con medio mineral

Los resultados muestran que las bacterias nativas del suelo tienen la capacidad de degradar los hidrocarburos bajo las condiciones naturales del sitio. En tres meses se alcanza en ambas pruebas, el 50 % de degradación. En el cajón TE/32 se alcanza el valor máximo de degradación a los dos meses (Figura 37), mientras que en el TE/33 hay una fuerte degradación en el primer mes y en los dos restantes ya no hay disminución de HTP. Este experimento se hizo bajo las condiciones climáticas que prevalecen en la mina y la adición de medio mineral se hizo cada tercer día en promedio para mantener la humedad constante.

Comparando estos resultados con los obtenidos en las pruebas realizadas con lodos, se observa en general que la degradación con lodos es más lenta que en las pruebas de bioestimulación realizadas con adición de un medio mineral. Este comportamiento se explica por los siguientes factores:

- ☑ Los nutrimentos contenidos en los lodos no están disponibles en forma inmediata para las bacterias y es necesario que las propias bacterias primero los mineralicen antes de asimilarlos. Caso contrario a las pruebas hechas con medio mineral, ya que en esta solución los nutrimentos están disponibles en forma inmediata.
- ☑ Aun cuando los lodos contienen los macro y micronutrimentos necesarios para el crecimiento de las bacterias, la cantidad es baja comparada con la concentración de nutrimentos en el medio mineral.
- ☑ La humedad, que es un factor muy importante para optimizar la actividad bacteriana, no se mantuvo constante durante el experimento, ya que la adición de lodos que contienen el agua necesaria para humedecer el suelo, se hizo cada tres semanas. En las pruebas de bioestimulación la humedad se mantuvo constante agregando medio mineral cada tercer día.

Finalmente la importancia de esta prueba es que confirma la capacidad de las bacterias nativas para degradar los hidrocarburos presentes en el suelo y permite demostrar que es conveniente el uso de lodos como fuente de nutrimentos ya que con éstos se obtienen resultados similares, aunque en mayor tiempo, que utilizando el medio mineral.

La cuenta viable se practicó al inicio y al final de la prueba. Los resultados se muestran en el Cuadro 37.

Cuadro 37
Cuenta viable en las pruebas de campo con medio mineral

Cajón	UFC/g	
	Muestra Inicial	Muestra Final
TE / 32	29.3 X 10 ⁶	4.87 X 10 ⁵
TE / 33	15.5 X 10 ³	2.11 X 10 ⁶

De acuerdo a los resultados del Cuadro 35 no hay una clara relación entre el crecimiento de las bacterias y la degradación de HTP. En el cajón TE/33 hay un incremento en la población de microorganismos, sin embargo, la degradación es rápida al inicio y se detiene en los dos últimos meses. Por el contrario, en el TE/32 baja la población de microorganismos pero la degradación es más constante hasta los dos meses. La relación entre población de microorganismos y degradación de hidrocarburos puede ser variable debido a que en las pruebas de campo no se pueden controlar las variables de la misma forma que en las pruebas de laboratorio.

5. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA CELDA DE TRATAMIENTO

Una vez que se demostró la factibilidad del método de biorremediación con el uso de lodos de la planta de tratamiento de aguas residuales, el siguiente paso fue llevar a cabo el diseño y construcción de un sistema de tratamiento que permitiera ajustar los parámetros que controlan el proceso de degradación y establecer las condiciones de operación del propio sistema para su escalamiento.

La prueba de escalamiento es de gran importancia y constituye una fase crítica después del trabajo experimental realizado a nivel laboratorio y antes de elaborar un programa de remediación, ya que con esta prueba se pueden definir los parámetros que influyen de manera significativa en la degradación de los hidrocarburos bajo las condiciones ambientales propias del sitio donde se llevará a cabo la remediación del suelo (Cookson J., 1995). Asimismo, se puede evaluar el desempeño del sistema de tratamiento y estimar la inversión requerida para las operaciones a gran escala, la cual incluye los costos de la construcción de la celda de tratamiento, de las instalaciones auxiliares requeridas, del movimiento del suelo y lodos de la planta de tratamiento y del uso de insumos que pudieran ser requeridos como fuente adicional de nutrientes (fertilizantes). De igual forma, la prueba de escalamiento sirve para establecer la logística por aplicar en la remoción del suelo contaminado en las diferentes áreas afectadas, ya que en el caso particular de Peña Colorada se debe hacer una cuidadosa programación de esta actividad para evitar interrumpir las operaciones en talleres y áreas de trabajo.

5.1 CONSIDERACIONES GENERALES

Para hacer el diseño conceptual de un sistema de tratamiento con el método de biolabranza, se partió de las siguientes consideraciones básicas:

1. Generalmente se necesitan grandes extensiones de terreno.
2. El sitio de tratamiento queda expuesto a la radiación solar y a la precipitación pluvial, lo cual influye considerablemente en el desempeño de los microorganismos y por ende en la velocidad de degradación.
3. El tratamiento se lleva a cabo a la intemperie por lo que no se controla la emisión de compuestos volátiles a la atmósfera.
4. El sitio debe estar alejado de poblaciones que pudieron estar expuestas a la dispersión por viento del suelo en tratamiento.
5. Como se trata de un método *ex situ*, se requiere contar con maquinaria adecuada para remover el suelo contaminado y trasladarlo al sitio donde se realizará el tratamiento, esto implica un costo considerable.

6. El sistema requiere de un diseño adecuado para captar los posibles lixiviados principalmente durante la época de lluvia.
7. El sitio de tratamiento requiere de un sistema de impermeabilización en la base para evitar la posible infiltración de lixiviados al subsuelo.
8. La operación de este método es sencilla pero es necesario establecer controles estrictos para optimizar la degradación de los contaminantes.
9. El lodo utilizado se genera en la planta de tratamiento de aguas residuales de la colonia de trabajadores por lo que es necesario transportarlo al sitio donde se construya el sistema de tratamiento de suelos.

5.2 UBICACIÓN DEL SITIO PARA EL TRATAMIENTO

Uno de los aspectos de mayor relevancia para la aplicación de un método *ex situ*, es la ubicación del sitio donde será el tratamiento. En particular, el método de biolabranza por sus características requiere de cumplir ciertos requisitos que garanticen la seguridad del entorno. Algunas de estas características son las siguientes:

- 1) Este método requiere de una gran superficie ya que el suelo a tratar debe ser extendido formando una delgada capa que por lo general varía entre 30 y 50 cm de espesor.
- 2) La celda de tratamiento generalmente queda al descubierto ya que su recubrimiento para evitar la entrada de agua lluvia resulta altamente costoso cuando se manejan grandes volúmenes de suelo.
- 3) Debido a que este método permite la entrada del agua de lluvia, la celda requiere de un sistema para manejar de manera segura el lixiviado o el agua de escurrimiento proveniente del suelo en tratamiento y evitar que esta solución pueda afectar sitios aledaños.
- 4) El tiempo que se requiere para la degradación de contaminantes bajo este método, da oportunidad a que en los sitios donde se presentan lluvias durante una época del año, se tenga un periodo en el que se deben extremar las medidas para el control de las operaciones.
- 5) Al no estar cubierta la celda de tratamiento permite que los compuestos volátiles presentes en el suelo se liberen a la atmósfera durante la acción de remoción del material para airearlo. Esto puede resultar en una situación de riesgo cuando existe población potencialmente expuesta.

Se buscó un espacio dentro de la empresa que tuviera las características suficientes para el desarrollo óptimo de las operaciones de tratamiento y que cumpliera con las condiciones de

seguridad necesarias para evitar situaciones de riesgo para la población o alguna afectación adversa sobre el ambiente.

En el caso particular de Peña Colorada, y puede decirse que en general en el caso del sector minero, el espacio deja de ser una limitante para establecer este tipo de métodos de tratamiento ya que en esta actividad se destina una extensa superficie de terreno para las diversas instalaciones de apoyo que se requieren en la explotación de un yacimiento mineral.

Por otro lado, la ubicación geográfica de las unidades mineras respecto a los centros de población en la mayoría de los casos permite realizar actividades que por sus características requieren de un cuidado extremo, como es el caso del uso de explosivos, sin que estas representen un riesgo para la población cercana. Esta condición resulta importante ya que permite asumir que una actividad como el tratamiento de suelos contaminados con hidrocarburos pueda realizarse dentro de las instalaciones mineras y que esto no ponga en riesgo a la población de las comunidades cercanas.

En la mina de Peña Colorada existen áreas libres en las que ya no se realizan actividades pero que pueden estar reservadas para algún uso futuro, o bien, estar restringidas para la exploración. Esta condición obligó a hacer una evaluación de sitios alternativos que pudieran ser utilizados para tratar el suelo contaminado. De esta evaluación se decidió ocupar la superficie de un terrero¹ inactivo denominado Las Moscas ubicado al norte del taller La Encantada. Este sitio cuenta con características adecuadas para realizar la prueba (Figura 38):



Figura 38. Sitio para la construcción de la celda de tratamiento

¹ Terrero se le llama al depósito del material estéril que se remueve durante las operaciones de explotación del mineral.

Las características generales de este sitio son las siguientes:

1. Está localizado en un área que actualmente no interfiere con las operaciones de la mina.
2. La superficie es aproximadamente de 3,000 m², suficiente para instalar la celda de tratamiento.
3. Está cerca del taller La Encantada que es la instalación en donde se localiza el mayor volumen de suelo contaminado.
4. La misma cercanía con el taller La Encantada permite llevar hasta el lugar los servicios necesarios, principalmente energía eléctrica y agua.
5. Está alejado considerablemente de cualquier asentamiento de población. Las comunidades más cercanas son El Poblado (a 2.8 km) y Minatitlán (a 4.5 km).
6. La diferencia de elevación entre el sitio y los acuíferos de la zona es aproximadamente de 600 m.
7. No es un área en operación donde existan trabajadores laborando.

Pese a las ventajas que tiene el terrero Las Moscas para construir el sistema de tratamiento, una desventaja importante es la distancia a la cual se encuentra la planta de aguas negras de El Poblado que es de donde se obtienen los lodos que se utilizarán para el tratamiento del suelo.

La ubicación del terrero Las Moscas, respecto a la planta de aguas residuales, obligó a optimizar la cantidad de lodos requerida para el tratamiento y a realizar una planeación cuidadosa para transportarlos hacia la celda de tratamiento.

5.3 DISEÑO CONCEPTUAL DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO

El método de biolabranza puede considerarse como un método de tratamiento biológico sencillo ya que requiere de poca infraestructura y equipo. El sistema de tratamiento consiste básicamente de una celda debidamente impermeabilizada en el fondo, en la cual se lleva a cabo el tratamiento. La celda además cuenta con un sistema de drenaje para captar los lixiviados que se pueden generar por la captación de agua pluvial o por el ingreso de una corriente superficial de agua. La remoción del material para airearlo y proporcionar el oxígeno requerido para la acción de los microorganismos se debe realizar con un equipo mecánico como puede ser un tractor, un cargador, o un equipo acondicionado con rastras (Bandyopadhyay S. 1994, Heely D. 1994, Piotrowski M. 1991).

En el caso de Peña Colorada, además de la celda de tratamiento debe considerarse un sistema para el manejo y transporte de los lodos de la planta de tratamiento que serán utilizados como sustrato para los microorganismos nativos del suelo contaminado.

Dadas las condiciones existentes en la empresa, se deben hacer las siguientes consideraciones para el diseño del sistema de tratamiento:

- 1) Los lodos para utilizar en el proceso son los que se encuentran en el reactor de la planta de tratamiento, por lo que se requiere de un sistema para extraerlos.
- 2) Los lodos del reactor tienen una relación promedio de sólidos/agua de 240 mL de sólidos/L y lo que se aprovecha como sustrato es precisamente la parte sólida, por lo que es necesario concentrarlos para transportar el menor volumen de agua posible.
- 3) La adición de lodos en la celda tiene que hacerse mediante un sistema de irrigación para hacerlo de manera homogénea.
- 4) La distancia que existe entre la planta de tratamiento de El Poblado y el sitio donde se construirá la celda (terrero Las Moscas) es de aproximadamente 5 km. Esta distancia puede ser una limitante para optimizar el proceso y es un factor que eleva el costo de operación.
- 5) La remoción del suelo de los sitios afectados, debe hacerse de manera programada, ya que no es posible detener por mucho tiempo las actividades rutinarias en cada sitio.
- 6) En la zona donde se ubica la mina la precipitación pluvial es moderada, de acuerdo con datos de CNA, la precipitación anual promedio es de 1,499 mm (CNA, 2002). Por esta razón es importante considerar que durante la época de lluvias el suelo en tratamiento estará expuesto a un exceso de agua lo cual afecta directamente el gradiente de degradación.
- 7) Durante la época de lluvias se pueden generar lixiviados, por lo que debe considerarse un sistema para la captación, manejo, y en caso de ser necesario, tratamiento de dicho lixiviado.

De acuerdo con lo anterior, el sistema de tratamiento diseñado se muestra en la Figura 39.

En la planta de tratamiento de aguas residuales se extraen los lodos del reactor utilizando un sistema de bombeo. Debido a que la concentración de sólidos en los lodos es baja (240 mL sólidos /L) es necesario concentrarlos de tal manera que se reduzca el volumen de agua y se aumente el contenido de sólidos. Por esta razón, en la planta de tratamiento se debe instalar un tanque donde se realice la concentración de lodos antes de embarcarlos hacia la celda de tratamiento.

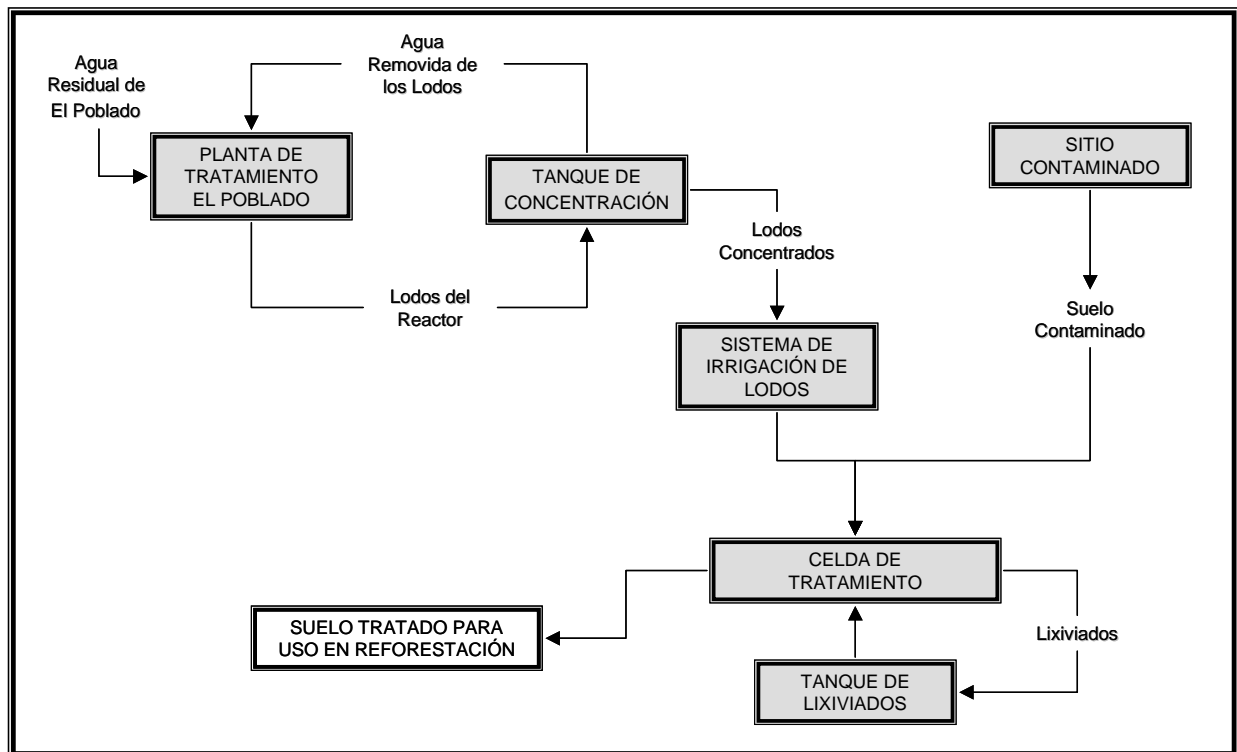


Figura 39. Diagrama de flujo del sistema de tratamiento

El transporte de lodos es el punto más crítico del proceso por dos razones principales; a) los lodos necesariamente se tienen que transportar en una pipa o en un carro tanque debido al volumen de agua que contienen, y b) la distancia que hay entre la planta de tratamiento de aguas residuales y la celda de tratamiento en la mina (5 km), así como la diferencia de elevaciones que existe entre ambos puntos (600 m). Esta condición puede representar una seria limitante para eficientar el proceso de tratamiento y su impacto en el costo de tratamiento puede ser considerable. Será muy importante durante la prueba de escalamiento analizar el efecto que tiene esta situación en la eficiencia del proceso, y en caso de ser necesario, evaluar dos alternativas que puedan dar solución al problema; manejar los lodos secos, o bien, sustituir los lodos por la adición de fertilizantes con los nutrientes básicos.

El área de tratamiento consta de tres instalaciones básicas para la operación: a) la celda de tratamiento, b) el sistema de irrigación de los lodos y c) el sistema para captar y manejar los lixiviados que se formen.

El suelo contaminado se trasladada en camiones hasta el sitio de tratamiento y se coloca dentro de la celda. Aquí, se distribuye uniformemente formando una capa entre 30 y 40 cm de espesor, y una vez hecho esto se hace el muestreo para la caracterización del material.

Los lodos se transportan en un tanque o pipa, se vacían dentro de los tanques de almacenamiento colocados junto a la celda, y a partir de éstos los lodos se distribuyen mediante bombeo sobre el suelo en tratamiento. El sistema de irrigación de lodos se construye con tubería galvanizada y aspersores colocados sobre el bordo perimetral de la celda.

Los lixiviados que se generan durante la época de lluvias, se captan en un tanque colocado fuera de la celda y en un sitio de menor elevación para que el lixiviado escurra por gravedad hacia el tanque. A partir de este punto los lixiviados que se captan se recirculan a la celda.

En los incisos posteriores se presentan los criterios y las especificaciones para la construcción y operación de la celda de tratamiento.

5.4 CELDA DE TRATAMIENTO

La celda constituye la parte central del sistema de tratamiento y para definir su capacidad es necesario hacer algunas consideraciones importantes:

- a) La prueba debe hacerse con un volumen de suelo significativo que permita valorar el proceso de degradación a gran escala bajo las condiciones ambientales propias del sitio.
- b) El volumen de suelo a emplear en la prueba debe permitir definir los parámetros que limitan el proceso de degradación y establecer los mecanismos de control.
- c) El diseño de la celda debe considerar las condiciones que se tendrán para las operaciones a gran escala y el equipo o maquinaria de apoyo que tendrá que ser utilizado.
- d) La construcción de la celda debe hacerse con los materiales que se van a utilizar en las celdas para el tratamiento a gran escala.
- e) La construcción de la celda debe proporcionar información sobre la inversión requerida y sobre los costos de operación del proceso.

La prueba de escalamiento tiene como propósito definir y ajustar los parámetros de diseño, construcción y operación que serán utilizados en el sistema que se construirá para tratar volúmenes mayores de suelo contaminado².

² De acuerdo con la estimación del volumen de suelo contaminado en las áreas afectadas, la capacidad de la celda de tratamiento puede ser de 1,000 m³.

La capacidad propuesta para la celda de tratamiento es de 300 toneladas. Con esta cantidad de material se puede garantizar lo siguiente:

- 1) Valorar el comportamiento de los microorganismos nativos del suelo y la velocidad de degradación bajo las condiciones climáticas que prevalecen en el lugar.
- 2) Tomar en cuenta diversos factores de ingeniería en el diseño de la celda, mismos que serán decisivos para garantizar la seguridad de las operaciones.
- 3) Evaluar diversos aspectos de la construcción, mismos que deberán tomarse en consideración para construir celdas de mayor capacidad.
- 4) Utilizar equipo auxiliar pesado para las operaciones y estimar la capacidad de los equipos que se requieran para manejar mayores volúmenes de suelo.
- 5) Establecer la cantidad de lodos necesaria para estimular la actividad de los microorganismos y evaluar si la planta de tratamiento tiene la capacidad de generarlos.
- 6) Definir las condiciones para el manejo de lodos y su transporte desde la planta de aguas residuales hasta la celda de tratamiento.
- 7) Evaluar la eficiencia del sistema de irrigación de lodos.
- 8) Evaluar la eficiencia y representatividad del muestreo que se realice para dar seguimiento al proceso de degradación de los contaminantes.

Es importante señalar que el volumen de material que se determine para una prueba de escalamiento puede ser variable y depende de los objetivos que se propongan para la prueba; en este caso la capacidad de 300 toneladas cubre los requisitos propuestos.

La celda de tratamiento diseñada se muestra en la Figura 40; esta celda cuenta con un bordo perimetral que delimita el área de tratamiento. La superficie tiene una ligera pendiente para obligar a que el agua pluvial o los lixiviados que se generen, escurran hacia la parte baja de la celda hasta una canaleta de captación y posteriormente hasta un tanque de almacenamiento para recircularlos. Dentro de la celda se construye un bordo de contención que evita que el suelo en tratamiento sea arrastrado hacia la canaleta de captación. A continuación se presentan los detalles de la celda.

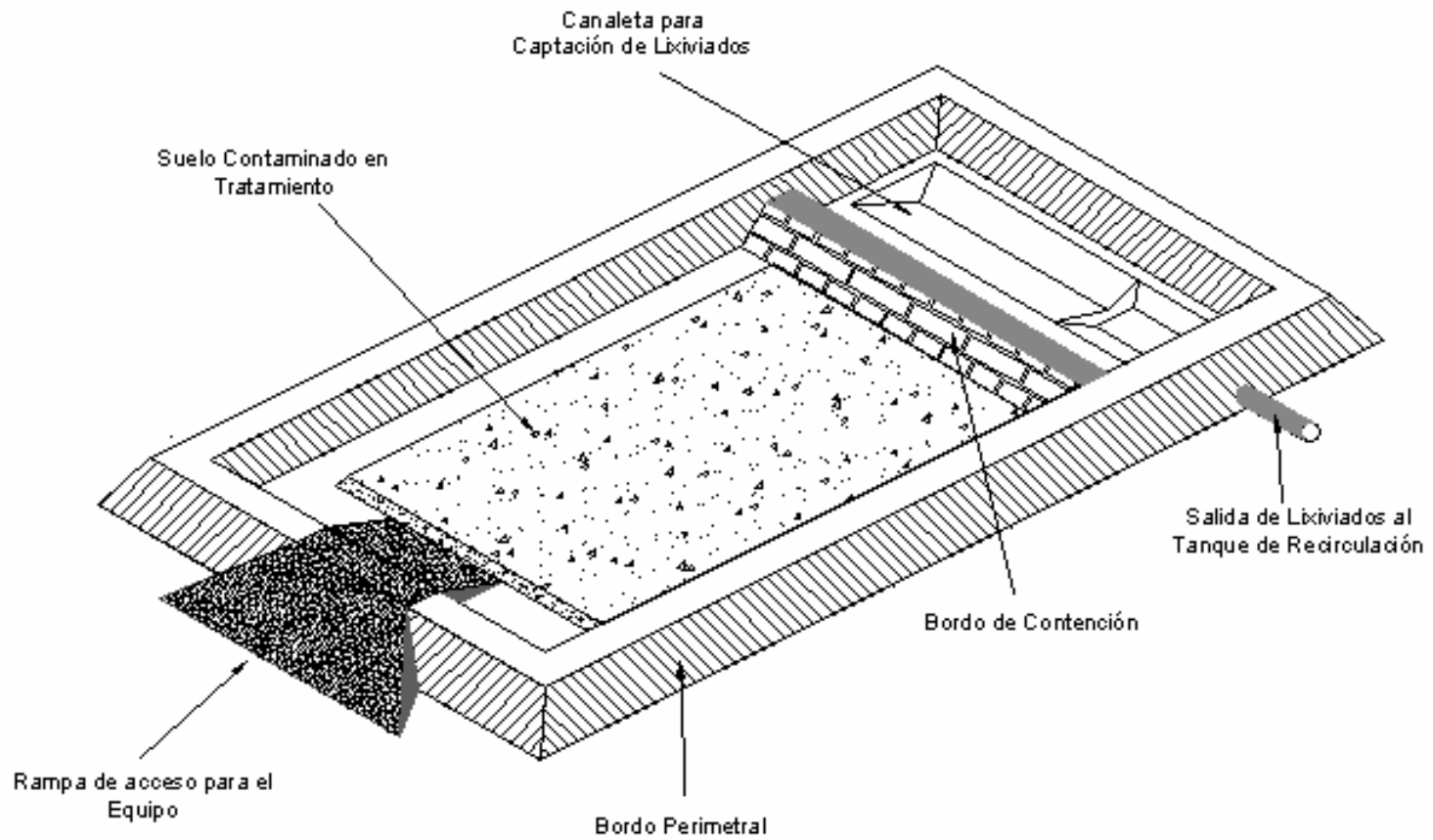


Figura 40.
Celda para el tratamiento del suelo contaminado

5.4.1 Superficie requerida

La densidad del suelo contaminado en promedio es de 1.8 ton/m³, pero en algunos sitios como el caso de los suelos de la planta de peletizado la densidad puede aumentar dado que existe la presencia de mineral de hierro³. Con el dato de la densidad se determinó el volumen de suelo.

$$d = W / V$$

$$d = \text{densidad del suelo (ton/m}^3\text{)}$$

$$W = \text{peso del suelo (ton)}$$

$$V = \text{volumen del suelo (m}^3\text{)}$$

$$V = W / d$$

$$V = 300 / 1.8$$

$$V = 167 \text{ m}^3$$

La celda de tratamiento debe tener las dimensiones que permitan el tratamiento de 167 m³ de suelo. Para estimar la superficie requerida se debe considerar el espesor de la capa de suelo que se colocará dentro de la celda. De acuerdo con los parámetros establecidos en la literatura y en los estudios de caso consultados, el espesor de la capa de suelo varía entre 30 y 60 cm (Piotrowski M. 1991, NYSDEC 1996, UFGS 1998, U.S. Army Corps of Engineers 1996); sin embargo, hay coincidencia que entre más delgada es la capa es mejor la aireación del material aunque con ello se aumenta la superficie requerida. En el caso de Peña Colorada, en el área de la mina, la superficie no es una limitante por lo que se optó por el espesor de 30 cm para garantizar una mejor aireación del material.

$$A = V / h$$

$$A = \text{área que ocupa el material extendido (m}^2\text{)}$$

$$V = \text{volumen de material (m}^3\text{)}$$

$$h = \text{altura de la capa de material o espesor (m)}$$

³ La densidad del suelo en la planta de peletizado, es en promedio de 2.1 ton/m³.

$$A = 167 \text{ m}^3 / 0.30 \text{ m}$$

$$A = 557 \text{ m}^2$$

La superficie requerida para extender el material contaminado es de aproximadamente 557 m². Con este dato se pudo establecer la configuración de la celda de tratamiento conforme mejor convenga para la prueba. Por cuestiones prácticas es recomendable que la celda tenga una forma rectangular ya que esto facilita las maniobras para el manejo del material.

En este caso particular, para definir las dimensiones de la celda fue importante considerar que como parte de la operación se tenían que agregar al suelo contaminado los lodos de la planta de tratamiento de aguas residuales. Esta operación se realizaría utilizando un sistema de irrigación para arrojar los lodos por aspersión desde los costados de la celda. Para facilitar esta operación y que la adición fuera homogénea era necesario que la celda fuera más angosta por uno de sus lados.

Considerando lo anterior se establecieron las siguientes dimensiones:

$$\text{Largo} = 47 \text{ m}$$

$$\text{Ancho} = 12 \text{ m}$$

$$\text{Área}_{\text{suelo}} = 564 \text{ m}^2$$

La superficie es ligeramente mayor a la requerida y se utilizó este dato para fines de cálculo. Esta superficie corresponde a la que ocupa el material contaminado formando una capa de 30 cm de espesor, sin embargo, las dimensiones de la celda debían ser mayores ya que se tenía que incluir el espacio requerido para realizar las maniobras de remoción del material y un área destinada a captar los lixiviados durante la época de lluvias.

Aquí se consideró que para airear el material se requería un equipo mecánico que facilitara la operación. Un tractor con rastras de uso agrícola era la mejor alternativa para remover el suelo en tratamiento.

Para captar los lixiviados que se pueden formar durante la adición de los lodos o por el agua de lluvia, en uno de los extremos de la celda se consideró construir una canaleta donde se concentre el lixiviado para después enviarlo a un tanque de almacenamiento temporal; para ello se requiere que la celda tenga cierta pendiente que facilite el escurrimiento del lixiviado. El espacio requerido para la canaleta se estimó en 5 m.

De lo anterior, a la superficie requerida para extender el material contaminado se aumentaron 2 m en cada lado para permitir las maniobras del tractor y en el extremo donde está la canaleta de captación se aumentaron 5 m. Con esto, la superficie total para el tratamiento fueron las siguientes:

Largo = 54 m

Ancho = 16 m

Área tratamiento = 864 m²

A estas dimensiones se aumentó la superficie que ocupa el bordo perimetral de la celda que es de 2.5 m por cada lado.

En la Figura 41 se muestra una sección de planta de la celda de tratamiento donde se especifican las dimensiones.

5.4.2 Bordo perimetral

El diseño del bordo perimetral se basó en el volumen de agua que puede captar la celda a partir de la precipitación pluvial durante la época de lluvias. El agua de lluvia es un factor que puede afectar la operación de la celda ya que modifica las condiciones bajo las cuales se lleva a cabo la degradación, además ésta contribuye a la generación de lixiviados a partir del suelo que está en tratamiento, los cuales si no son controlados pueden derramarse de la celda ocasionando una afectación del sitio aledaño.

Por esta razón, para calcular la altura óptima del bordo perimetral, se recomienda considerar los datos de la precipitación pluvial en la zona. Estos datos son los siguientes (U.S. Army Corps of Engineers 1996, UFGS 1998):

1. Precipitación media anual
2. Precipitación máxima mensual
3. Precipitación máxima en 24 hrs
4. Lluvias con un periodo de retorno de 25 años

Los datos que se utilizaron en este caso fueron los de precipitación máxima mensual, reportados en la estación meteorológica de Minatitlán; así como también la precipitación máxima en 24 hrs. Los datos de precipitación pluvial en la estación meteorológica de Minatitlán durante el periodo comprendido del año 1958 al 2003 se muestran en el Cuadro 38.

Cuadro 38
Precipitación pluvial medida en la estación meteorológica de Minatitlán
en el periodo de 1958 a 2003

AÑO	PRECIPITACION PLUVIAL (EN mm)											ANUAL	
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV		DIC
1958	EN JUNIO SE INICIO LA ESTACION					40.3	163.5	242.6	164.7	261.0	150.5	20.9	1,043.5
1959	14.0	0.0	0.0	88.5	6.0	143.0	432.5	356.0	305.5	S/D	S/D	S/D	1,345.5
1960	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	101.5	242.5	261.0	313.5	112.5	1.0	29.5	1,061.5
1961	72.0	0.0	0.0	0.0	2.5	391.0	435.0	264.5	390.0	87.5	57.0	0.0	1,699.5
1962	0.0	0.0	0.0	3.0	0.0	245.0	299.0	518.0	390.5	147.0	19.0	23.0	1,644.5
1963	0.0	0.0	0.0	1.5	7.5	267.0	458.0	501.4	395.8	169.5	11.5	44.5	1,856.7
1964	0.5	0.0	1.0	0.5	0.0	299.6	279.3	276.3	388.0	58.4	14.0	34.0	1,351.6
1965	12.5	26.0	0.0	36.5	17.0	133.5	285.7	287.0	333.0	139.5	7.0	94.0	1,371.7
1966	8.0	15.0	0.0	25.0	19.0	241.5	350.5	275.5	417.0	195.0	12.0	0.0	1,558.5
1967	208.5	8.9	0.0	0.0	19.0	142.5	344.5	231.5	511.5	206.7	34.5	35.0	1,742.6
1968	0.0	39.0	164.8	0.0	0.0	65.0	205.0	302.9	563.0	127.0	44.0	81.1	1,591.8
1969	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	61.0	299.5	340.5	474.5	322.5	0.0	10.5	1,508.5
1970	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	273.0	378.0	371.6	389.0	78.0	0.0	0.0	1,489.6
1971	3.5	0.0	1.0	0.0	0.0	293.0	459.5	381.5	195.0	275.0	7.0	2.0	1,617.5
1972	19.5	0.0	0.0	0.0	83.5	233.0	386.0	314.0	319.0	165.5	114.0	0.0	1,634.5
1973	24.0	16.0	0.0	3.0	5.0	236.5	250.5	489.5	458.5	204.0	7.0	0.0	1,694.0
1974	0.0	5.0	0.0	3.0	126.5	399.6	375.5	426.0	388.5	60.0	18.5	60.0	1,862.6
1975	9.0	0.0	0.0	0.0	20.0	356.0	642.5	878.5	437.5	398.5	5.0	0.0	2,747.0
1976	27.0	0.0	0.0	0.0	0.0	597.5	883.5	474.0	308.0	78.0	132.0	7.0	2,507.0
1977	3.0	0.0	0.0	0.0	7.0	246.5	416.0	352.0	302.5	7.9	33.1	1.0	1,369.0
1978	21.5	24.9	0.0	0.0	0.0	243.4	240.6	334.9	400.4	122.0	INAP	26.0	1,413.7
1979	5.4	13.4	0.0	0.0	0.0	56.0	378.1	435.2	281.5	36.9	0.0	18.6	1,225.1
1980	190.0	0.0	0.0	0.0	0.0	128.9	S/D	S/D	249.5	S/D	S/D	0.0	568.4
1981	130.9	S/D	S/D	S/D	0.0	139.0	227.8	325.5	533.7	108.3	8.0	5.0	1,478.2
1982	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	77.7	322.0	S/D	249.5	26.6	S/D	S/D	675.8
1983	49.5	27.0	0.0	0.0	222.0	129.6	274.0	392.7	308.2	140.0	22.9	0.0	1,565.9
1984	40.3	0.0	0.0	0.0	22.2	354.0	401.0	279.0	445.1	48.7	S/D	S/D	1,590.3
1985	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	149.9	454.6	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	604.5
1986	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	S/D	152.6	314.1	S/D	S/D	S/D	0.0	466.7
1987	0.0	20.2	0.0	S/D	S/D	S/D	472.7	88.8	212.3	20.1	0.0	S/D	814.1
1988	0.0	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	445.6	378.5	43.3	0.0	0.0	867.4
1989	S/D	0.0	0.0	0.0	0.0	107.4	366.6	446.6	S/D	135.3	1.0	S/D	1,056.9
1990	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	214.0	296.4	S/D	417.6	146.9	0.0	0.0	1,074.9
1991	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	180.3	S/D	285.5	189.3	60.5	79.2	53.4	848.2
1992	103.9	9.0	0.0	0.0	0.0	69.8	433.2	485.9	258.5	252.9	33.2	67.5	1,713.9
1993	34.5	19.3	0.0	0.0	0.0	0.0	S/D	S/D	380.5	153.6	S/D	S/D	587.9
1994	17.0	0.0	0.0	0.0	0.0	30.4	244.9	240.5	333.3	148.6	0.0	2.9	1,017.6
1995	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	S/D	140.9	495.4	707.9	0.0	0.0	0.0	1,344.2
1996	0.0	0.0	0.0	0.0	35.2	310.0	304.6	285.1	143.6	306.5	31.4	0.0	1,416.4
1997	2.0	0.0	17.0	24.0	3.4	50.0	296.9	D/I	390.5	223.1	S/D	18.3	1,025.2
1998	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	112.3	400.1	392.0	586.9	174.3	19.4	0.0	1,685.0
1999	0.0	0.0	0.0	0.0	2.3	453.8	270.7	643.0	402.6	0.0	0.0	0.0	1,772.4
2000	0.0	0.0	0.0	0.0	59.7	153.5	228.0	326.9	237.7	33.3	24.0	3.4	1,066.4
2001	0.0	0.0	43.5	0.0	0.0	171.9	268.5	235.3	396.1	116.2	6.9	0.0	1,238.4
2002	39.7	0.0	0.0	0.0	0.0	131.7	390.7	82.6	439.2	180.0	0.0	0.0	1,263.9
2003	35.3	67.2	0.0	0.0	22.3	113.6	156.8	189.9	440.5	321.7	0.0	0.0	1,347.3
2004	78.1												
SUMA	1,149.6	290.9	227.3	185.0	680.1	8,143.2	14,308.2	14,268.8	15,827.9	5,892.3	893.1	637.6	62,425.9
PROM.	26.1	6.9	5.4	4.5	16.2	193.9	340.7	356.7	368.1	140.3	24.1	16.3	1,499.3
MINIMA	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	140.9	82.6	143.6	0.0	0.0	0.0	466.7
MAXIMA	208.5	67.2	164.8	88.5	222.0	597.5	883.5	878.5	707.9	398.5	150.5	94.0	2,747.0

Fuente: Comisión Nacional del Agua. Gerencia Estatal en Colima. Subgerencia Técnica. Departamento de Hidrometeorología.

En este cuadro se observa que el periodo de lluvia comprende los meses de junio a octubre y la mayor precipitación se presenta en los meses de julio a septiembre (en promedio 355 mm). La precipitación promedio anual es de 1,499.3 mm, con una mínima de 466.7 (año 1986) y máxima de 2,747 mm (año 1975). El mes con más lluvia ha sido el de julio de 1975 con 883.5 mm.

De acuerdo con los datos reportados por esta estación meteorológica en el periodo de 1958 a 2003, la precipitación máxima en 24 horas para un periodo de retorno de 20 años es de 209 mm, mientras que para un periodo de retorno de 50 años la precipitación máxima es de 270 mm (CNA, 2002). Este es un dato importante ya que la celda de tratamiento debe tener capacidad para captar el volumen de agua durante un evento extraordinario de precipitación.

Para calcular la altura del bordo perimetral se consideró la precipitación máxima en 24 hrs y las lluvias con un periodo de retorno de 20 y 50 años. Para el cálculo se consideró la superficie total de la celda y el volumen de agua que cae dentro de la celda durante 24 horas. A partir de este dato se determinó la altura que alcanza el agua durante este tiempo y se aplicó un factor de seguridad del 50 %. Los cálculos se presentan en el Apéndice 3.

De los cálculos que se presentan en el Apéndice 3, se estableció una altura de 0.74 m para el bordo perimetral. Con esta altura se garantiza poder captar el agua durante un evento extraordinario de precipitación y evitar el posible derrame de lixiviados fuera de la celda. Como medida de seguridad se aumentó la altura del bordo hasta 1 m.

El bordo perimetral se construye con el material producto de la excavación del sitio (aproximadamente 20 cm de profundidad para colocar el material impermeable) y se recubre con arcilla compactada. Al finalizar el bordo, éste se cubre con un zampeado de cemento lanzado y se sellan las uniones del bordo con la plancha de concreto.

En la Figura 42 se muestra una sección longitudinal de la celda con el detalle del bordo perimetral.

5.4.3 Basamento

La base de la celda debe reunir ciertas características de impermeabilidad para evitar la afectación del suelo debido a posibles infiltraciones de los lixiviados que se pueden generar durante la operación, principalmente en la época de lluvias (U.S. Army Corps of Engineers 1996, UFGS 1998, Heely D. *et al.* 1994). Sin embargo, a este respecto es importante considerar las condiciones del entorno ya que éstas pueden determinar la necesidad de una base con mayor o menor índice de impermeabilidad.

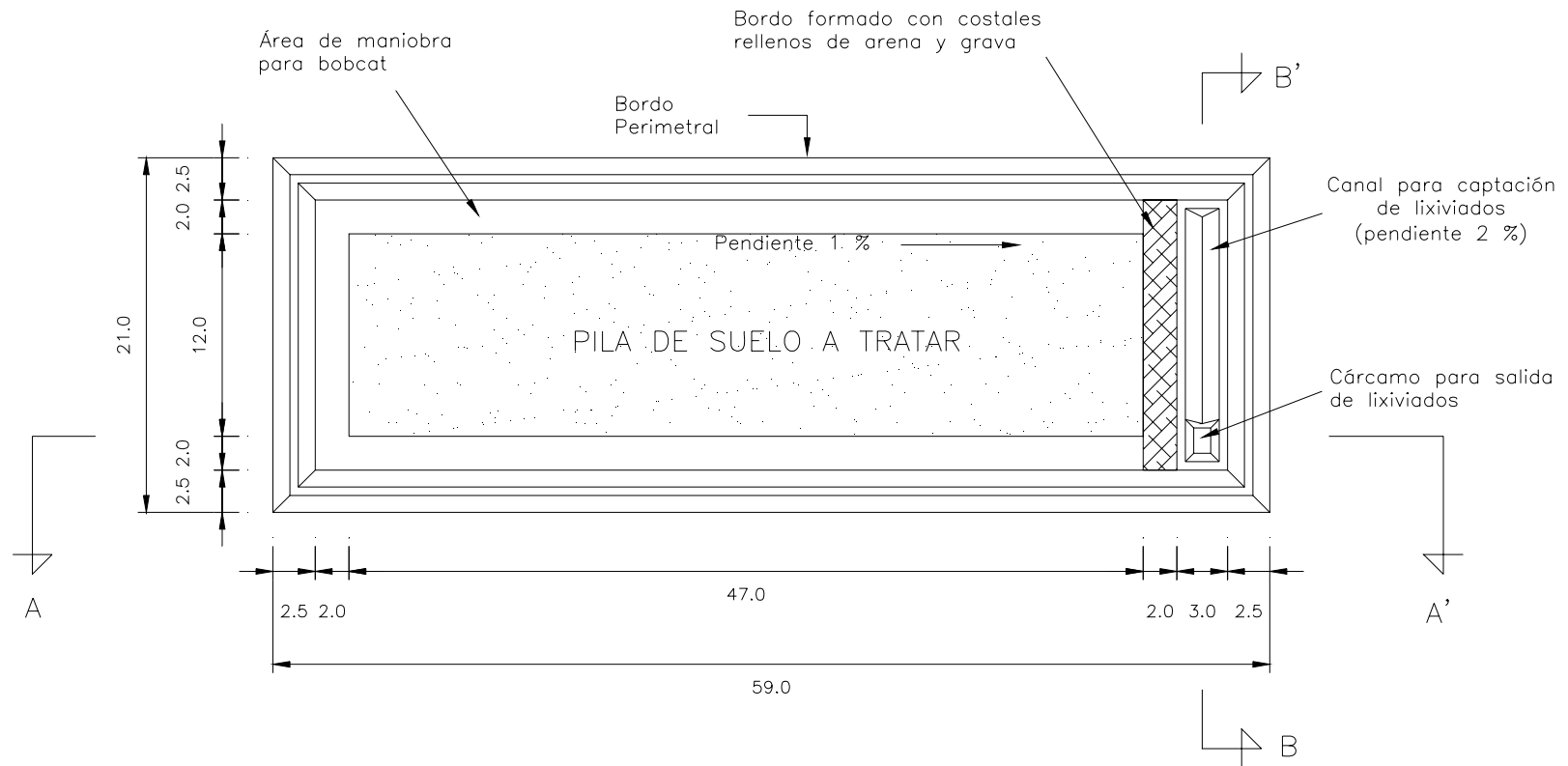


Figura 41.
Dimensiones de la celda de tratamiento (vista en planta)

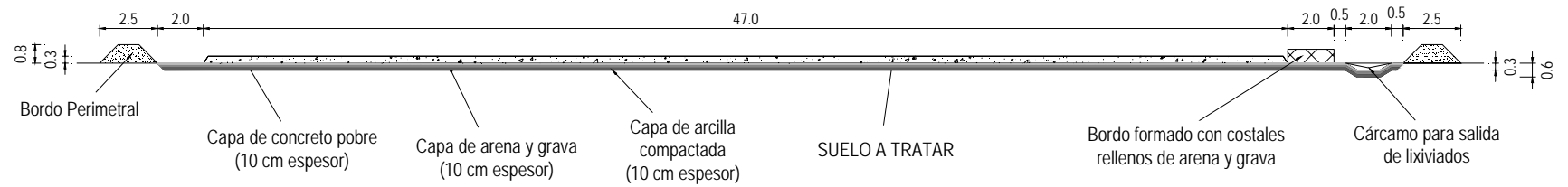


Figura 42.
Sección Longitudinal de la Celda de Tratamiento
(Sección A - A')

El sitio seleccionado para construir la celda tiene las siguientes características:

- En el sitio el suelo está constituido por material de relleno proveniente de las mismas actividades de explotación del mineral; el suelo original fue removido al inicio de las operaciones. De hecho, el sitio se encuentra dentro de un terrero⁴ inactivo.
- El sitio está ubicado a una elevación de 1,240 msnm, en la parte alta del cerro Los Juanes, donde se encuentra la mina. El acuífero en la zona está a una elevación de 650 msnm y el punto más cercano del río Minatitlán a este sitio es de 2,650 m en línea recta.
- En la zona no hay población potencialmente expuesta a la operación de la celda de tratamiento.

Estas condiciones disminuyen considerablemente la posibilidad de ocasionar alguna afectación a los acuíferos, al suelo o de representar un riesgo para la población.

Con esta consideración se propuso para la celda colocar una base formada de la siguiente manera:

1. Capa de arcilla compactada de 10 cm de espesor y una permeabilidad entre 10^{-5} y 10^{-6} cm/seg.
2. Capa de arena compactada de 10 cm de espesor
3. Capa de grava compactada de 10 cm de espesor
4. Capa de concreto de 10 cm de espesor. Esta capa puede estar reforzada con malla electrosoldada, pero si el costo es elevado se puede colocar una capa de cemento pobre (sin refuerzo metálico).

Se propuso el uso del concreto por las siguientes razones:

- Evitar que se mezcle el suelo contaminado con el material compactado y evitar el deterioro de la capa impermeable (arcilla).
- Facilitar las maniobras del tractor para remover el suelo contaminado y propiciar la aireación.
- Facilitar el escurrimiento del agua pluvial y del lixiviado hacia la canaleta de captación.

En la Figura 43 se muestra una sección transversal de la celda con el detalle del basamento.

⁴ Un terrero es un depósito de material estéril (material rocoso) removido durante la etapa de explotación para descubrir el yacimiento mineral.

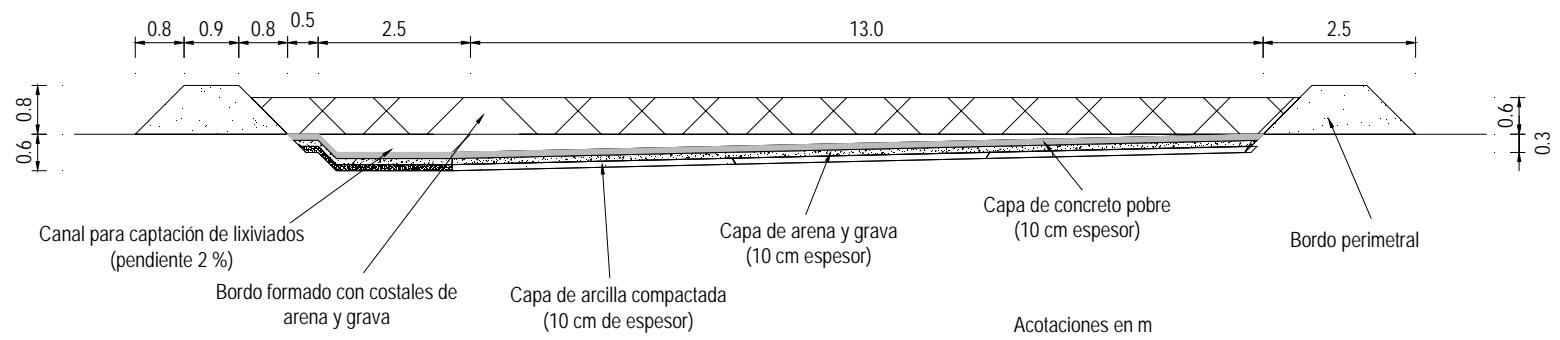


Figura 43.
Sección transversal de la celda de tratamiento
(Sección B - B')

5.4.4 Sistema de drenaje y captación de lixiviados

Durante la época de lluvias se espera que se generen lixiviados debido al escurrimiento del agua a través del material. De acuerdo con los trabajos de la U.S. Army Corps of Engineers 1996, y de la UFGS 1998, para captar este lixiviado y evitar que salga de la celda y cause alguna afectación en el terreno aledaño se recomienda que la superficie de la celda tenga una pendiente de 1.5 a 2 % hacia uno de los costados para propiciar el escurrimiento del agua hacia la parte baja de la celda, donde el lixiviado se capta en la canaleta. A partir de ésta, el lixiviado sale por gravedad a través de una tubería hacia un tanque de captación con capacidad de 10 m³, ubicado en un nivel inferior al de la celda (12 m de diferencia de altura). El tanque está equipado con una bomba de gasolina para recircular el agua hacia la celda. En la Figura 44 se muestra un esquema con el arreglo del tanque de captación de lixiviados.

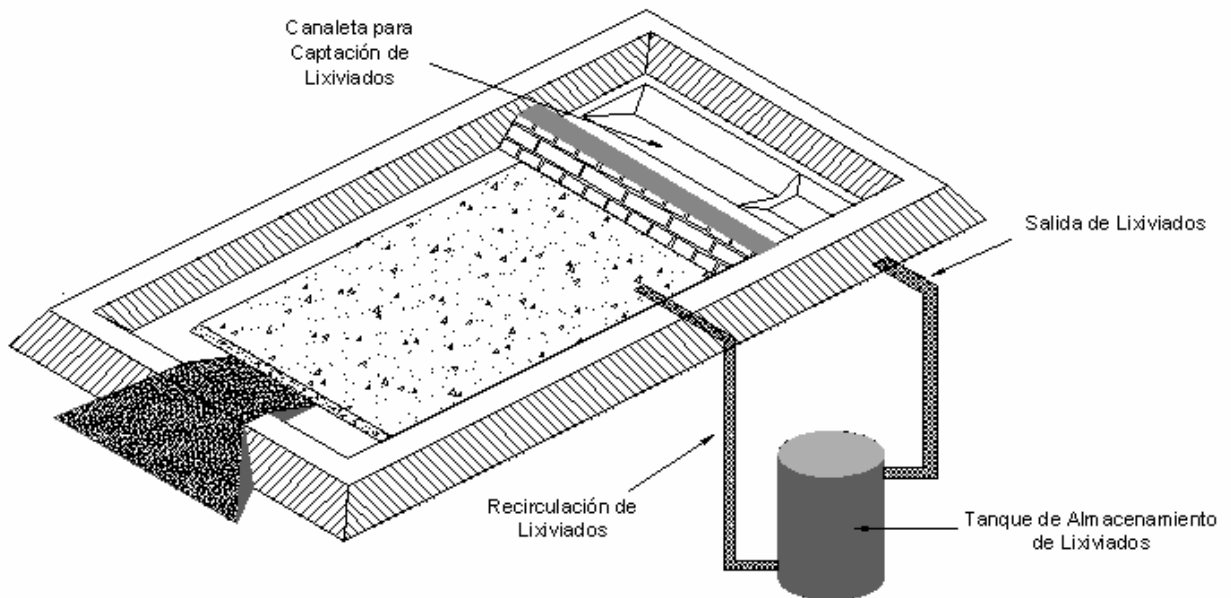


Figura 44.
Arreglo del sistema de captación de lixiviados

5.4.5 Sistema de irrigación de lodos

La adición de lodos debe hacerse de una manera uniforme y rápida, procurando que el suelo en tratamiento sea impregnado en su totalidad para lograr una buena distribución de los nutrimentos. Para garantizar esto, se planeó un sistema de irrigación con tubería montada sobre el bordo perimetral de la celda para agregar los lodos mediante bombeo a partir de los tanques de almacenamiento donde descarga la pipa que los transporta desde la planta de tratamiento.

La celda cuenta con dos líneas de aspersores a los costados, una de cada lado. La longitud del área de tratamiento es de 47 m; considerando que cada aspersor puede tener un radio de acción mínimo de 2.5 m entonces son necesarios diez aspersores en cada lado de la celda. La separación entre cada aspersor es de 4.3 m. El arreglo del sistema de irrigación se muestra en la Figura 45.

Para hacer más eficiente la adición de lodos el sistema de irrigación se divide en cuatro secciones, dos en cada lado, con cinco aspersores por sección. De esta manera el bombeo puede hacerse por secciones de tal forma que en una se esté irrigando el lodo y las tres restantes permanezcan cerradas.

Los lodos provenientes de la planta de tratamiento se almacenan en un tanque de 5 m³ y a partir de este se bombean a la celda.

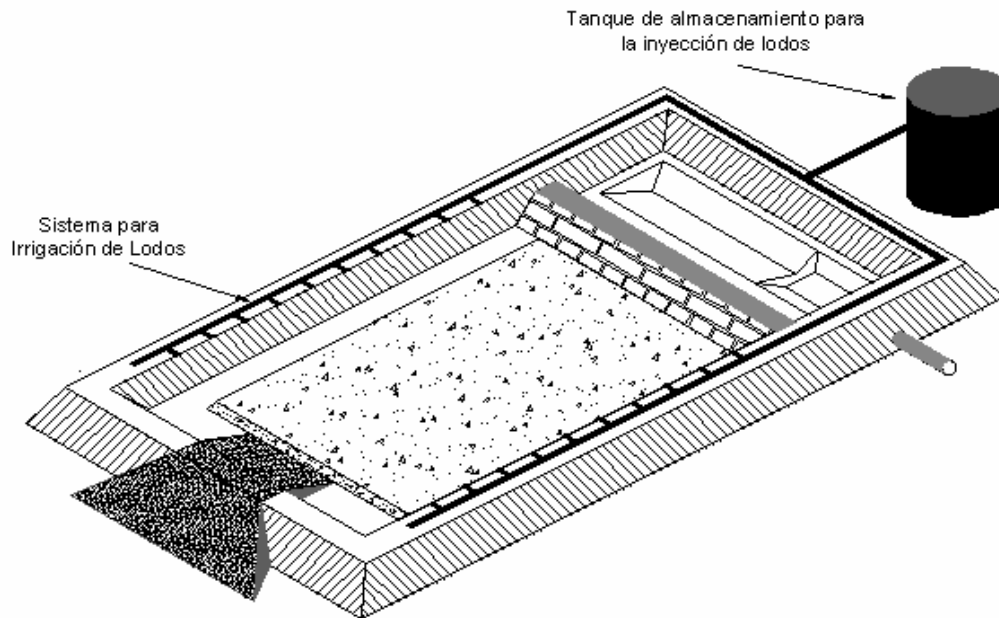


Figura 45. Arreglo del sistema de irrigación de lodos

5.4.6 Bordo de contención

El bordo de contención dentro de la celda delimita el área de tratamiento y constituye una barrera para evitar el arrastre del material en tratamiento por efecto del agua de lluvia hacia la canaleta de captación de lixiviados. Propiamente el bordo hace la función de un filtro que permite el paso del agua y retiene el material sólido.

El bordo está formado con grava y arena confinada con tela de gallinero (tipo gavión) para contener el suelo que se esté tratando y que pueda ser arrastrado por el escurrimiento del agua. Para el bordo se consideró una altura de 0.70 m.

5.5 PARÁMETROS DE OPERACIÓN

En los procesos de degradación con bacterias, y en particular en el caso del método propuesto de biolabranza utilizando lodos del tratamiento de aguas residuales, los parámetros que deben ser controlados para garantizar una adecuada actividad bacteriana, son los siguientes (EPA-OUST 2005, NYSDEC. 1996, Fletcher R. 1994, U.S. Army Corps of Engineers 1996, EPA 510-B-94-003 y EPA 510-B-95-007):

- Relación lodos / suelo
- Cantidad de nutrimentos
- Humedad
- Aireación
- pH
- Temperatura

5.5.1 Relación suelo / lodos

La cantidad de lodos resulta importante debido a que éstos proporcionan por un lado los nutrimentos que requieren las bacterias para su actividad y por otro, los lodos también aportan una población importante de bacterias.

En los incisos 3.4.3 y 4.4.3, se detalla el trabajo experimental que se realizó en campo con los lodos y se analizan los resultados obtenidos. Aunque los resultados en general son buenos, se puede observar con claridad la influencia que tiene la cantidad de lodo sobre la velocidad de degradación, principalmente en los cajones con relación 1:1 y 5:3.

Los cajones que mostraron mejor degradación de hidrocarburos en las pruebas de campo son: el 9, 11, 13 y 15 (con relación 1:1), el 2, 6, 8, 12, 19 y 23 (con relación 5:3) y el 27 y 29 (con relación 10:3). Sin embargo, no hay un patrón regular en el comportamiento, las tres relaciones de suelo/lodo dieron buenos resultados, probando con el suelo de los cuatro sitios afectados. Sin

embargo, por el número de cajones en los que se alcanzaron concentraciones más bajas de hidrocarburos y por que en estos están los cuatro diferentes tipos de suelo, se consideró que la relación 5:3 es la más adecuada.

Analizando las cantidades de lodos que se agregaron para los cajones con relación 5:3 y 1:1 durante el tiempo que duró la experimentación (177 días), se obtuvo una cantidad semanal promedio de lodos por cada kilogramo de suelo. De manera comparativa, también se consideró la cantidad agregada semanalmente a los cajones en los que se hicieron pruebas con medio mineral (Cuadro 39) .

Cuadro 39
Cantidad de lodos agregada semanalmente en las pruebas de campo

Cajones con relación 1:1	203	mL de lodo/kg suelo/semana
Cajones con relación 5:3	128	mL de lodo/kg suelo/semana
Cajones con medio mineral	298	mL de medio mineral/kg suelo/semana

Los resultados obtenidos en los cajones fueron similares utilizando las diferentes cantidades de lodos, e incluso en aquellos en los que se usó el medio mineral. Sin embargo, en un buen número de cajones con la relación 5:3 se logró reducir hasta los niveles deseados la concentración de hidrocarburos, por lo que se consideró esta relación como la más apropiada para hacer la prueba a mayor escala.

Finalmente, el volumen de lodos calculado para agregar por kilogramo de suelo y por semana es de 150 mL.

5.5.2 Cantidad de nutrimentos

La cantidad de nutrientes que requieren las bacterias para desarrollar sus funciones de degradación, está incluida en los lodos de la planta de tratamiento. Fue importante hacer un balance de los mismos para determinar si la cantidad agregada es suficiente, ya que de lo contrario será necesario utilizar una fuente complementaria de nutrimentos.

Partiendo de los lodos por agregar cada semana, 150 mL/kg de suelo, y del contenido de nutrimentos que hay en los lodos, principalmente nitrógeno y fósforo, se determinaron las cantidades de nutrimentos en el tratamiento de un lote.

El volumen de material para realizar la prueba es de 170 m³ (300 ton) y el tiempo de tratamiento estimado es de seis meses, ya que éste fue el tiempo que duraron las pruebas experimentales.

En la literatura se menciona que es importante mantener una adecuada relación entre el contenido de carbono (C), nitrógeno (N) y fósforo (F), para lograr una buena actividad bacteriana. Las cantidades recomendadas varían, por ejemplo en los criterios del Departamento de Conservación Ambiental del Estado de Nueva York (NYSDEC. 1996) se recomienda una proporción 19:3:3; Baker K, 1994 menciona que algunos autores reportan que una proporción de 25:1:0.5 resulta en una óptima degradación y la EPA (EPA 510-B-94-003 y EPA 510-B-95-007) señala que la degradación se favorece en el intervalo de 100:1:0.5 a 100:10:1. Esta última relación (100:10:1) de C:N:P es la que se consideró para realizar un balance de nutrimentos y con ello determinar la cantidad de lodos necesaria.

Partiendo del contenido de carbono en el suelo contaminado se determinan las cantidades de nitrógeno y fósforo necesarias. Sin embargo, en la caracterización del suelo contaminado no fue posible hacer un análisis para determinar el contenido de carbón orgánico total (TOC), por lo que se consideró la recomendación que se hace en la literatura de que el 90 % en peso del contenido total de hidrocarburos es carbón orgánico (EPA 510-B-94-003 y EPA 510-B-95-007).

En el Apéndice 4, se presentan las cantidades requeridas tanto de nitrógeno como de fósforo, así como la cantidad contenida en los lodos que se agregarán durante la prueba. Para el cálculo se consideró una concentración de 14,500 mg/kg, que son las concentraciones más altas encontradas en el taller La Encantada. Considerando que el 90 % de esta concentración es carbón orgánico (US Army Corps of Engineers. 2000), entonces se tiene un contenido de 13,050 mg/kg de carbono. En el Cuadro 40 se resumen las cantidades de nutrimentos considerando la cantidad de lodos que se adicionará durante los 6 meses que durará la prueba:

Cuadro 40
Cantidad de nutrimentos por agregar en la prueba de escalamiento

Elemento	Cantidad recomendada (g / kg de suelo)	Cantidad total requerida para 306 ton (kg)	Cantidad total agregada con los lodos (kg)
Carbono	13.05		
Nitrógeno	1.305	399.33	3,893
Fósforo	0.1305	39.933	108

Del análisis anterior se observa que con la cantidad de lodos que se agregará durante la prueba, se cubre por mucho la cantidad de nitrógeno y fósforo requerida.

5.5.3 Humedad

La humedad es un parámetro importante para la actividad de las bacterias. De acuerdo con lo señalado en la literatura, es recomendable mantener la humedad en un intervalo de 40 a 85 % de

la capacidad de campo del suelo (NYSDEC. 1996, EPA 510-B-94-003 y EPA 510-B-95-007, Baker K. 1994, U.S. Army Corps of Engineers 1996); o bien, de 12 a 30 % en peso (EPA 510-B-94-003 y EPA 510-B-95-007). Dado que para la caracterización de las muestras de suelo contaminado no fue posible determinar la capacidad de campo, entonces la humedad se determinó por el porcentaje en peso.

En el caso de los suelos en la mina la humedad en peso que se determinó en algunas muestras fue de 7 % y en algunos casos llegó a 10 %. Los lodos, además de contener los nutrientes requeridos, aportan el agua necesaria para aumentar la humedad del suelo en tratamiento.

La humedad en peso de una muestra de suelo está representada por la siguiente relación:

$$H = [Pa / (Ps + Pa)] * 100$$

Donde

H = Humedad en %

Pa = Peso del agua

Ps = Peso seco del suelo

Partiendo de que el suelo tiene una humedad del 7 %, la cantidad de agua contenida en una muestra de 1 kg, es de 70 g.

Por otro lado, los lodos que se utilizarán en el tratamiento se concentrarán hasta que en 1 L se tengan 840 mL de sólidos. A esta concentración, el contenido de sólidos medido es de 173.25 g, por lo que la cantidad de agua a esta concentración es de 827.75 g. Dado que se van a agregar 150 mL de lodos por kg de suelo, entonces la cantidad de agua que se agrega junto con los lodos es de 124 g.

Con estos datos se tiene que

$$Pa = 70 + 124 = 194 \text{ g}$$

Por lo que la humedad que tendrá el suelo una vez que se hayan agregado los lodos es:

$$H = [Pa / (Ps + Pa)] * 100$$

$$H = [194 / (930 + 194)] * 100$$

$$H = 17.26 \%$$

En caso de que la humedad del suelo sea del 10 %, entonces la humedad después de agregar los lodos será del 19.9 %.

Estos porcentajes de humedad están dentro del intervalo recomendado. Sin embargo, será importante observar durante el desarrollo de la prueba el porcentaje de evaporación que se tenga en las diferentes épocas del año para hacer los ajustes convenientes.

5.5.4 Aireación

La aireación en este método de tratamiento se hace manualmente removiendo el suelo con un equipo mecánico. Con la remoción del suelo se proporciona el oxígeno que optimiza la cinética de degradación. Además la remoción ayuda a disolver el oxígeno, favorece la mezcla y distribución de nutrientes, humedad, microorganismos y sustrato.

La frecuencia con la que se remueve el suelo está en función de la textura de la matriz, su capacidad para drenar el agua y permitir la entrada de aire, del contenido de arcillas y de la velocidad de degradación. Generalmente la frecuencia con la que se mezcla el suelo varía desde tres veces por semana hasta una vez por mes, depende de las características propias del suelo y de las condiciones ambientales (U.S. Army Corps of Engineers 1996). Sin embargo, algunos documentos señalan que la frecuencia se determina por observaciones del suelo y de los resultados obtenidos.

En este caso en particular, y de acuerdo con las pruebas experimentales realizadas con los cajones, se estableció que la remoción del suelo en tratamiento fuera de una vez por semana. Conforme avance el tratamiento y se vayan teniendo resultados del monitoreo, se podrán hacer los ajustes pertinentes.

5.5.5 pH

Un pH entre 6 y 8 en la matriz suelo/agua es recomendable para acelerar el proceso de degradación (NYSDEC. 1996, EPA 510-B-94-003 y EPA 510-B-95-007, Baker K. 1994, U.S. Army Corps of Engineers 1996, Fletcher R. 1994).

Contar con un factor de amortiguamiento en el sistema es importante para prevenir cambios bruscos de pH que puedan retardar el proceso de degradación. La capacidad de amortiguamiento es una estimación de la cantidad de una base o un ácido que se puede agregar sin que se tenga un repentino o significativo cambio en el pH. Esto es de gran utilidad cuando se tienen que hacer modificaciones en el pH durante el tratamiento.

Mantener el pH en el intervalo señalado también es importante cuando en los suelos se tienen cantidades significativas de metales pesados, ya que así, se mantienen los metales en formas insolubles y poco disponibles, con lo cual se reducen sus efectos tóxicos sobre los microorganismos.

En el caso de los suelos de los sitios contaminados, las muestras que se caracterizaron muestran un pH que varía de 6.5 a 7.8. Con estos valores no es necesario hacer ajustes en el pH, pero es recomendable hacer un seguimiento de este parámetro para identificar posibles variaciones durante el proceso.

5.5.6 Temperatura

La temperatura es un factor importante para estimular las funciones metabólicas de los microorganismos. Sin embargo, este parámetro es difícil de controlar en el método de biolabranza, ya que el suelo en tratamiento queda expuesto a la intemperie y su temperatura estará en función de la temperatura del ambiente.

De acuerdo con los datos reportados en la estación meteorológica de Minatitlán en el periodo de 1964 a 2003, las temperaturas promedio anual es de 23 °C, con una temperatura máxima promedio anual de 26.4 °C y una mínima promedio anual de 21.2 °C. Los meses más calurosos son de abril a octubre con una temperatura promedio de 28.6 °C; el mes más frío es enero con una temperatura promedio de 12.5 °C (CNA 2002).

5.6 OPERACIÓN DEL PROCESO

La operación consiste en colocar el suelo contaminado sobre la plataforma formando una capa de 30 cm de espesor. De manera periódica se agregan lodos de la planta de tratamiento y de ser necesario se adiciona algún tipo de fertilizante que contenga nitrógeno y fósforo. Para airear el suelo y proporcionar de esta forma el oxígeno que se requiere para la degradación del hidrocarburo, el material se revuelve una vez por semana utilizando un equipo mecánico.

Las actividades que se realizan para la operación del proceso son las siguientes:

- Remoción del suelo contaminado
- Colocación del suelo dentro de la celda y caracterización
- Adición de lodos
- Aireación periódica
- Recirculación de lixiviados
- Registro de datos

5.6.1 Remoción del suelo contaminado

El suelo contaminado para realizar la prueba de escalamiento se obtendrá de alguna de las áreas de mantenimiento en el taller La Encantada. La cantidad de suelo por remover es de 306 toneladas. En estos accesos la concentración de hidrocarburos es elevada hasta una profundidad de 60 cm, por lo que la superficie afectada es de aproximadamente 290 m².

Para aflojar el suelo en el área seleccionada se propone utilizar un tractor con riper. Después el material se remueve con un cargador y se transporta en camiones de 12 m³ al área de tratamiento. El camión entra directamente a la celda para descargar el material.

5.6.2 Colocación del suelo dentro de la celda y caracterización

Una vez que el suelo contaminado esté dentro de la celda, con el uso de un cargador frontal se homogeneiza y se distribuye a lo largo y ancho de la celda formando una capa de 47 m de largo, 12 m de ancho y 0.30 m de espesor.

Ya que esté formada la capa se puede hacer el muestreo inicial para la caracterización del suelo. El muestreo diseñado para la caracterización inicial y para hacer el monitoreo de la prueba consiste en dividir la capa de material en seis secciones y en cada una de ellas tomar una muestra compuesta. Cada una de estas muestras está compuesta por 8 submuestras que se toman en cada sección.

Los parámetros por analizar en las muestras incluyen aquellos señalados en la Norma Oficial Mexicana NOM-138-SEMARNAT/SS-2003, además de otros parámetros generales necesarios para valorar la eficiencia de degradación, los cuales se describen más adelante.

5.6.3 Adición de lodos

El volumen de lodos en el reactor de la planta de tratamiento de aguas residuales es de 236 m³. Sin embargo, sólo se puede disponer de 175 m³ en una semana a una concentración entre 221 y 240 mL de sólidos por L de lodos.

El volumen de lodos requerido en una semana para el tratamiento de 300 toneladas de suelo es de 45 m³. Sin embargo, dado que la proporción de sólidos en los lodos va de 221 a 240 mL de sólidos / L de lodos, es necesario hacer una concentración de los sólidos (base húmeda) para transportar la menor cantidad de agua posible a la celda de tratamiento.

Con la concentración se alcanza un contenido de 840 mL sólidos / L de lodos, así que de los 45 m³ requeridos semanalmente para la prueba, es necesario remover 32.13 m³ de agua quedando un volumen de lodos para transportar a la celda de tratamiento de 12.87 m³.

La adición de lodos debe ser de dos veces por semana. En cada adición se saca del reactor de la planta de tratamiento un volumen de 22.5 m³.y se almacena en un tanque para realizar la

concentración. Del tanque se remueven 16.065 m³ de agua y quedan 6.435 m³ de lodos (con 84 % de sólidos) que son transportados a la celda de tratamiento.

Para concentrar los lodos se utiliza un tanque (tipo Rotoplas) con capacidad de 15 m³ y un sistema de bombeo para extraer los lodos del reactor. El mismo sistema de bombeo sirve para descargar el agua removida en el cárcamo de alimentación de la planta. Para transportar los lodos a la celda de tratamiento se utiliza un tanque horizontal (marca Rotoplas) de 5 m³ de capacidad montado en un camión.

En la celda, los lodos se descargan en los tanques de almacenamiento del sistema de irrigación. La adición se hace por sección para hacer una distribución uniforme, de tal forma que en una sección se esté irrigando el lodo y las tres restantes permanezcan cerradas.

5.6.4 Aireación

El suministro de oxígeno requerido para el proceso de degradación, se hace removiendo la capa de suelo una vez por semana. Para ello se utiliza un tractor con rastras que entra por la rampa de acceso a un costado de la celda. El tractor recorre la celda a lo largo haciendo surcos en el suelo como si estuviera arando. La remoción del suelo con el equipo también sirve para hacer una mezcla homogénea entre el lodo y el suelo.

5.6.5 Registro de datos

Durante la operación se debe llevar un registro de datos que permita evaluar el desempeño de la prueba. Los datos se registran tanto en la planta de tratamiento de El Poblado como en la celda de tratamiento.

Registro de datos en la planta de El Poblado

- Flujo de entrada y salida de agua
- Concentración de sólidos
- Tiempo de recuperación (después de extraídos los lodos del reactor)
- Volumen retirado de lodos

Registro de datos en la celda de tratamiento

- Volumen de lodos agregado
- Aireación
- Temperatura ambiente
- Humedad del suelo durante el tratamiento
- Precipitación pluvial
- Evaporación

5.7 MUESTREO PARA EL SEGUIMIENTO DEL PROCESO

5.7.1 Caracterización inicial

Para las pruebas que se realicen en la celda, se hará una caracterización física, química y microbiológica de los lodos de la planta de tratamiento y de los suelos contaminados para tener los parámetros iniciales de la prueba. Los parámetros a analizar son los siguientes:

Parámetros químicos

- Hidrocarburos Totales del Petróleo (Fracción Media)
- Hidrocarburos Totales del Petróleo (Fracción Pesada)
- Hidrocarburos Aromáticos Polinucleares (HAP)
- Carbón Orgánico Total
- pH
- Conductividad eléctrica
- Nitrógeno total y disponible
- Fósforo total y disponible
- Potasio, calcio, magnesio y sodio
- Micronutrientes (Cu, Zn, Fe y Mn)

Parámetros físicos

- Humedad del suelo saturado
- Humedad del material en la pila de tratamiento
- Densidad
- Porosidad
- Temperatura
- Relación en peso suelo / lodo

Parámetros microbiológicos

- Cuenta viable de microorganismos heterotróficos
- Coliformes totales y fecales
- *Escherichia coli* fecales
- Huevos de Helminths
- *Salmonella* y *Shigella*

5.7.2 Muestreo de control

Durante la prueba, que durará seis meses, se llevarán a cabo ocho muestreos de control. En los dos primeros meses se tomarán muestras cada 15 días y en los cuatro meses restantes se tomarán cada mes. En cada uno de los muestreos se tomarán 6 muestras compuestas que sean representativas de toda la pila de tratamiento. La Figura 46 muestra las secciones en la celda para tomar las muestras. Los parámetros que se analizarán en estas muestras son los siguientes:

- Hidrocarburos Totales del Petróleo (HTP)
- pH
- Humedad
- Cuenta viable de microorganismos heterotróficos

En los muestreos que se realicen a los 45 y a los 120 días de iniciada la prueba, además de los señalados se analizarán algunos parámetros adicionales como son:

- HAP
- Carbón Orgánico Total
- Nitrógeno total y disponible
- Fósforo total y disponible
- Coliformes totales y fecales
- Estreptococos fecales

Al término de la prueba, y de preferencia después de pasados dos meses, se realizarán análisis para verificar que el material tratado cumpla con los niveles de limpieza establecidos y que el contenido de organismos patógenos no represente riesgo alguno para el ambiente. Dichos análisis son los siguientes:

- Hidrocarburos Totales del Petróleo
- HAP
- Coliformes totales y fecales
- Estreptococos fecales
- Huevos de Helmintos
- Salmonella y Shigella

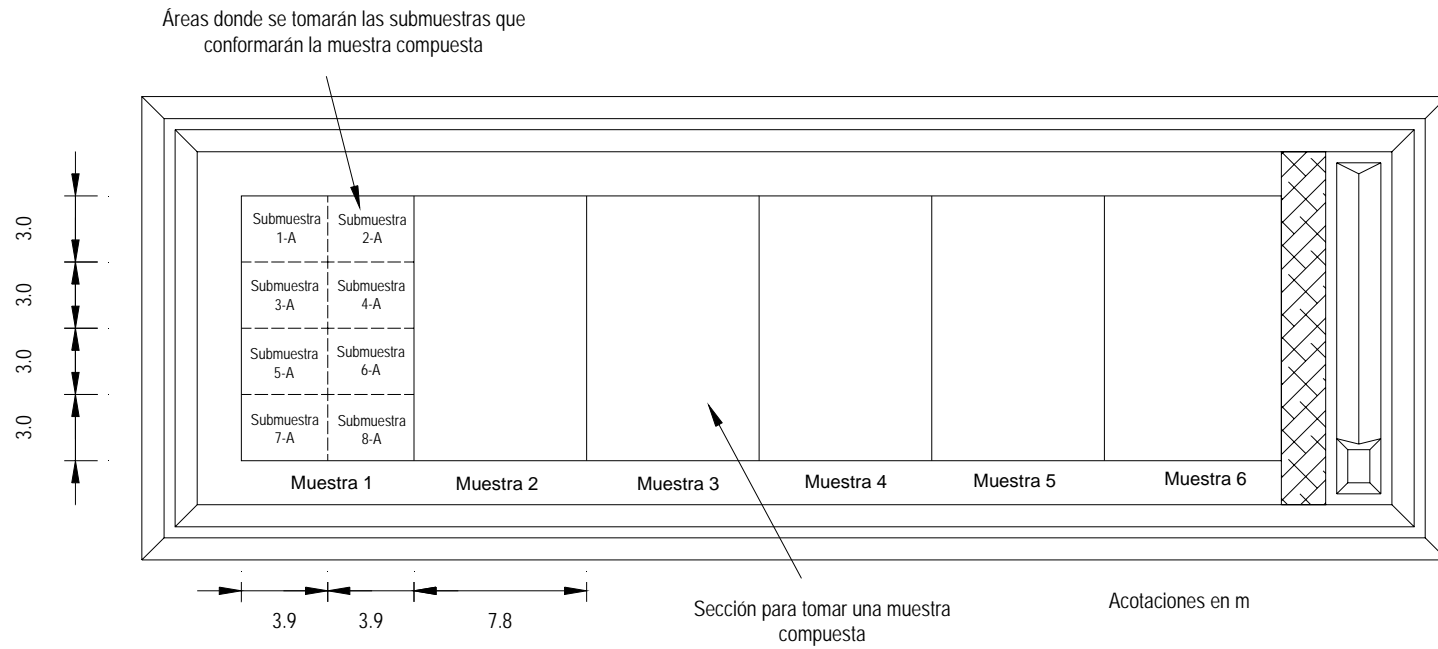


Figura 46. Plan de muestreo para el seguimiento de la prueba de escalamiento

5.7.3 Análisis

Como parte del proyecto remediación de suelos para la etapa operativa, se propuso a la empresa montar en su laboratorio un método analítico sencillo para determinar hidrocarburos totales del petróleo en el suelo contaminado y de esta manera poder llevar un control directo sobre la eficiencia de degradación del contaminante durante el tratamiento de un lote de suelo. Además, con esta propuesta se pretende abatir los costos por concepto de análisis, ya que la empresa podrá dar seguimiento al tratamiento de un lote y recurrir a un laboratorio acreditado sólo al inicio y a la terminación del mismo.

El método propuesto fue el gravimétrico, el cual está señalado en la NOM-138-SEMARNAT/SS-2003 para determinar la fracción pesada de hidrocarburos. Los métodos de referencia señalados en la norma son el EPA 9071B para la extracción de los HCFP del suelo con n-hexano y su purificación y determinación gravimétrica por el método EPA 1664A. La norma señala que la determinación cuantitativa se debe realizar gravimétricamente a partir del extracto con n-hexano de la muestra de suelo cribada y secada con sulfato de sodio anhidro y procesada con sílica gel estandarizada.

5.8 CONSTRUCCIÓN DE LA CELDA

5.8.1 Aspectos generales

La construcción de la celda estuvo a cargo de la propia empresa minera siguiendo el diseño presentado en este trabajo. El tiempo de ejecución de la obra fue aproximadamente de tres meses, y en este tiempo se llevaron a cabo las siguientes actividades:

1. Limpieza y nivelación del terreno
2. Excavación del sitio ocupado por la celda
3. Colocación de la arcilla compactada al 90 % Proctor
4. Construcción y compactación (90% Proctor) del bordo perimetral
5. Construcción losa de concreto de 14 cm de espesor (F_c 200 kg/cm²)
6. Revestimiento con cemento del bordo perimetral
7. Construcción de la rampa de acceso
8. Instalación del tanque para la captación de lixiviados
9. Instalación de tanque de almacenamiento de lodos y agua
10. Instalación del sistema de irrigación de lodos
11. Instalación de una cerca de alambre

5.8.2 Detalles de la construcción

La construcción se inició con la preparación del sitio seleccionado para la celda. Primero se hizo la limpieza y nivelación del terreno. Posteriormente se excavaron 30 cm en el terreno para colocar la capa de arena y grava y después la capa de arcilla compactada. A continuación se hizo la construcción del bordo perimetral también con arcilla y se compactó al 90 % de la prueba proctor. La Figura 47 muestra detalles del inicio de la construcción de la celda, en ella se puede observar la base de arcilla ya compactada y el bordo perimetral prácticamente concluido; se aprecia que la celda quedó al mismo nivel que el resto del terreno fuera de la celda.



Figura 47. Capa de arcilla y bordo perimetral de la celda de tratamiento

La Figura 48 muestra una imagen de la celda terminada. Se observa la base de concreto y el bordo perimetral con el revestimiento de cemento, así como la rampa de acceso en la parte frontal y al fondo la canaleta para captar los lixiviados. Durante la construcción se hicieron algunos cambios en el diseño como es el caso de los tanques de almacenamiento de lodos, que en vez de un solo tanque se colocaron dos con capacidad de 2,500 m³ cada uno, los cuales se observan al lado derecho de la celda en la Figura 49. Adicionalmente la celda fue cercada con alambre de púas para evitar el acceso de animales o de alguna persona ajena al proyecto (Figura 49).

Al área de tratamiento se le dio una pendiente de 1.5 % para favorecer el escurrimiento de los lixiviados que se generen durante la época de lluvias. A la canaleta de captación se le dio pendiente de 3 % para también facilitar la salida de los lixiviados hacia el tanque de captación. Las Figuras 50 y 51 muestran el escurrimiento del agua a lo largo de la celda y en la canaleta de captación durante las pruebas realizadas previamente.



Figura 48. Celda terminada con la base de concreto y el bordo perimetral con revestimiento de cemento



Figura 49. Vista panorámica con los tanques de almacenamiento de lodos y la cerca de alambre



Figura 50. Prueba realizada para verificar el escurrimiento del lixiviado hacia la canaleta



Figura 51. Salida del lixiviado por la canaleta hacia el tanque de almacenamiento

Los tanques de almacenamiento para lodos y agua se colocaron a un costado de la celda (Figura 52), y se puso una bomba de 2 HP con capacidad de 120 L/min para mandar los lodos o el agua al sistema de irrigación. Este sistema se construyó con tubería de 1.5 y 1 pulgadas de diámetro y se colocó arriba del bordo perimetral alrededor de la celda (Figura 53). En cada lado se colocaron 10 aspersores separados 4 m uno de otro, con lo cual se logra irrigar por completo el suelo en tratamiento. En la Figura 53 se observan las pruebas realizadas con el sistema de irrigación.



Figura 52. Tanques de almacenamiento de agua y lodos



Figura 53. Sistema de irrigación colocado encima del bordo perimetral. Pruebas realizadas con agua.

El tanque de captación de lixiviados con capacidad de 10 m³, aprovechando las condiciones del terreno, se colocó en un sitio que está a 12 m abajo de la superficie donde se encuentra la celda, esto con el propósito de facilitar el escurrimiento de los lixiviados por gravedad (Figura 54). En el tanque se instaló también una bomba de 2 HP con capacidad de 120 L/min para recircular los lixiviados a la celda; la tubería de retorno de los lixiviados se conectó al mismo sistema de irrigación de lodos y agua.



Figura 54. Tanque de captación de lixiviados colocada a 12 m debajo de la celda

5.8.3 Inversión y costos

La inversión realizada para la construcción de la celda fue de \$ 771,115.00 (setecientos setenta y un mil ciento quince pesos 00/100 MN) que incluye la obra civil y la ingeniería del proyecto. En el Cuadro 41 se presenta el desglose de los costos incluidos en la inversión realizada (costos que corresponden a los años 2004 y 2005).

Los costos estimados para el tratamiento de un lote de material, es decir, para 300 ton de suelo contaminado, incluye los conceptos señalados en el Cuadro 42. Estos costos se estimaron con base en las actividades planeadas para la operación de la celda y de acuerdo con los costos proporcionados con la empresa; sin embargo, pueden variar en función de los ajustes que se tengan que hacer conforme avanza el tratamiento del suelo. El costo de operación total estimado es de \$ 219,256.00, por lo que el costo de operación para el tratamiento de 300 toneladas de suelo es de \$ 731.00 por tonelada. Este costo por tonelada es bajo comparado con otras alternativas como podrían ser el confinamiento, coprocesamiento, o bien, un tratamiento *in-situ*.

Cuadro 41
Costos de inversión para la construcción de la celda

Concepto	Inversión (M.N.)
Construcción de la celda (materiales, equipo y personal)	334,925.00
Tanques para lodos y sistema de irrigación	51,550.00
Tanque de lixiviados y sistema de recirculación	80,391.00
Adecuaciones en planta de tratamiento de aguas residuales	14,540.00
Lonas y otros materiales	75,250.00
Ingeniería del proyecto	214,459.00
TOTAL INVERSIÓN INICIAL	771,115.00

Cuadro 42
Costos de operación estimados para un lote de 300 toneladas

Concepto	Costo (M.N.)
Personal de apoyo	84,006.00
Vehículo para la supervisión de operaciones	34,500.00
Tractor y camiones para remover el suelo contaminado	6,142.00
Renta de equipo para la aireación del suelo	7,185.00
Acarreo de lodos y/o agua	18,720.00
Análisis para la caracterización de suelo	64,300.00
Materiales diversos	4,403.00
TOTAL COSTO DE OPERACIÓN	219,256.00

En cuanto a la propuesta de instalar en el laboratorio de la empresa el método gravimétrico señalado en la NOM-138 para hacer los análisis de control durante el tratamiento de un lote de suelo, se hizo una estimación de la inversión con base en el costo del equipo y los materiales requeridos, considerando que ya se cuenta con parte de la infraestructura necesaria en el laboratorio. El costo estimado que se refiere a materiales y equipo de laboratorio se presenta en el Cuadro 43.

La inversión realizada para la construcción de la celda, así como la estimada para montar el método analítico por gravimetría en el laboratorio, serán amortizadas conforme se vayan tratando los lotes del suelo contaminado, por lo que al final de la remediación del suelo contaminado se espera que el costo de inversión por tonelada tratada sea también bajo.

Cuadro 43
Inversión estimada para la instalación del método analítico por gravimetría

Concepto	Inversión (M.N.)
Equipo (rotavapor, bomba vacío y agitador ultrasonido)	78,207.00
Materiales y cristalería	61,100.00
Acondicionamiento del sitio en el laboratorio	23,018.00
Reactivos	2,817.00
TOTAL INVERSIÓN EN LABORATORIO	165,142.00

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

En los cuatro sitios caracterizados se encontraron concentraciones de hidrocarburos totales del petróleo (HTP) superiores a los límites permisibles señalados en la NOM-138-SEMARNAT/SS-2003 (5,000 mg/kg fracción media y 6,000 mg/kg fracción pesada, ambos para suelo de uso industrial). Las mayores concentraciones están en la parte superficial del terreno y disminuyen gradualmente hasta una profundidad de 1.5 m en los sitios de la mina y a 3.0 m en la planta de peletizado. En el taller La Encantada las concentraciones de HTP van de 486 a 42,309 mg/kg, en el Polvorín de 654 a 24,704 mg/kg, en la fosa de recepción de combustóleo de 316 a 14,661 mg/kg y en el tanque de diesel de la zona de embarque de 439 a 26,236 mg/kg.

Con los resultados obtenidos de la caracterización de los sitios se estima que el volumen de suelo potencialmente contaminado es de aproximadamente 5,509 m³, de los cuales 1,706 m³ son de La Encantada, 362 m³ del Polvorín, 2,527 m³ de la fosa de recepción de combustóleo y 464 m³ del tanque de diesel en la zona de embarque. Sin embargo, el volumen estimado debe verificarse haciendo un muestreo más detallado al momento de remover el suelo para su remediación ya que el muestreo realizado para la caracterización fue de carácter exploratorio.

Algunas de las bacterias nativas que se identificaron en los suelos contaminados, como es el caso de la *Flavobacterium* (encontrada los suelos de La Encantada), la *Pseudomona* (que se encontró en La Encantada y en los lodos de la planta de tratamiento), la *Vibrio* (presente en el suelo del Polvorín) y la *Serratia* (en los lodos de la planta de tratamiento), están reportadas en la literatura como bacterias con capacidad para degradar diversos contaminantes orgánicos. La población de microorganismos presente en los suelos de la mina y de la planta de peletizado varía entre 1×10^5 UFC/g y 7.6×10^7 UFC/g, que de acuerdo con lo reportado en la literatura, es suficiente para llevar a cabo una biorremediación.

Las pruebas de laboratorio con muestras de suelo colocadas en matraces y en condiciones controladas de humedad y con la adición de un medio mineral preparado, permitieron comprobar la capacidad de degradación de las bacterias. Después de dos meses se alcanzó una degradación de 41 % en el suelo del taller La Encantada (de 14,181 a 8,359 mg/kg de HTP), de aproximadamente 99 % en el suelo del Polvorín (de 5,215 mg/kg de HTP a menos de 30mg/kg¹), de 96 % en el suelo de la fosa de recepción de combustóleo (de 6,016 a 217 mg/kg de HTP) y de 45 % en el suelo del tanque de diesel en la zona de embarque (de 8,058 a 4,457 mg/kg de HTP).

Las pruebas realizadas en campo con lodos de la planta de tratamiento confirmaron la capacidad de degradación de las bacterias nativas bajo las condiciones ambientales del lugar.

¹ 30 mg/kg fue el límite de detección del método analítico utilizado para determinar los HTP.

Después de seis meses, en la mayoría de los cajones se alcanzaron concentraciones de HTP inferiores a los límites permisibles señalados en la NOM-138-SEMARNAT/SS-2003. De los 16 cajones preparados con suelo de la mina, en 9 se alcanzaron concentraciones menores a 5,000 mg/kg; mientras que en los 15 cajones con suelo de la planta de peletizado se alcanzaron los niveles deseados prácticamente en todos.

Los resultados obtenidos en las pruebas de campo indican que la degradación de los hidrocarburos es gradual, aunque a diferente velocidad en cada tipo de suelo. En general la degradación en los suelos de la planta de peletizado es más rápida que en los suelos de la mina. La eficiencia de degradación fue del 71 al 99 % en los cajones con mejores resultados. Por ejemplo, en el cajón 2 con suelo del Polvorín la concentración de HTP se redujo de 9,966 a 2,880 mg/kg, en el cajón 6 con suelo de La Encantada de 18,521 a 2,497 mg/kg, en el cajón 13 con suelo del tanque de diesel en la zona de embarque de 17,489 a 1,202 mg/kg y en el cajón 12 de la fosa de recepción de combustóleo se logró disminuir de 4,662 a menos de 30 mg/kg.

Las pruebas realizadas en campo con medio mineral alcanzaron una degradación del orden del 50 % en tres meses. En el cajón 32 se redujo la concentración de HTP de 13,709 a 6,745 mg/kg y en el cajón 33 de 12,439 a 5,923 mg/kg. Comparando estos resultados con los obtenidos en las pruebas con lodos, se observa en general que la degradación con lodos es más lenta.

Las pruebas en campo con medio mineral confirman la capacidad de las bacterias nativas para degradar los hidrocarburos presentes en el suelo y permiten demostrar que es conveniente el uso de lodos como fuente de nutrientes, ya que con éstos se obtienen resultados similares, aunque en mayor tiempo, que utilizando el medio mineral.

La infraestructura disponible en el Consorcio Minero Benito Juárez Peña Colorada, así como las condiciones ambientales del sitio fueron las adecuadas para proponer el método de biolabranza. Disposición de amplio espacio en una zona segura en la que no existe riesgo de contaminar acuíferos, aguas superficiales y donde no hay riesgo para el personal de la empresa y poblaciones cercanas. También la disponibilidad de maquinaria y equipo pesado para la construcción de la celda de tratamiento y la remoción y manejo del suelo contaminado. Las condiciones de temperatura, precipitación pluvial y en general el clima, son favorables para la aplicación del método seleccionado.

Las dimensiones de la celda de tratamiento para el método de biolabranza depende específicamente de la cantidad de suelos a tratar (300 toneladas) y del espesor de la capa que se coloca dentro de la celda, mientras más delgada es la capa mayor es la extensión de terreno necesaria. El espesor de capa establecido de 30 cm es óptimo para promover la distribución de aire dentro del suelo en tratamiento y con esto la superficie requerida es de 557 m². Las dimensiones finales de la celda se aumentaron a 864 m² ya que se consideró adicionalmente una superficie para maniobras del equipo utilizado en la aireación y para construir la canaleta de captación de lixiviados.

El cálculo de la altura del bordo perimetral estuvo en función de los datos de precipitación pluvial en el sitio, específicamente de la precipitación máxima en 24 horas con periodos de

retorno de 20 y 50 años. También fueron importantes los datos de precipitación media anual y máxima mensual.

La configuración rectangular de la celda se determinó a partir del diseño del sistema de irrigación de lodos. Considerando dos líneas de aspersores colocadas a los costados de la celda, la aspersion de lodos tenía que llegar por lo menos a la mitad de la celda para cubrir en su totalidad el suelo en tratamiento.

Las dimensiones de la canaleta de captación de lixiviados y de la capacidad del tanque para su almacenamiento, estuvieron en función de la cantidad de lodos agregada periódicamente y de los datos de precipitación media mensual durante la época de lluvias. Estos datos permitieron estimar el volumen máximo de lixiviados por manejar.

Los parámetros de operación para el tratamiento de las 300 toneladas de suelo se definieron con base a los datos de humedad, relación inicial de suelo:lodo, cantidad agregada de lodos y periodicidad de aireación, que se obtuvieron en las pruebas de campo. Estos datos también fueron fundamentales para calcular la capacidad de los tanques de almacenamiento de lodos, el sistema de irrigación y el diseño del equipo para la aireación del suelo.

El diseño de la celda de tratamiento que incluye sistemas para la adición de lodos y para captar y recircular los lixiviados que se generen durante el tratamiento del suelo, garantiza la seguridad de los elementos ambientales del sitio.

La inversión inicial realizada para la construcción de la celda es baja (\$ 771,115.00) y se podrá amortizar satisfactoriamente con el tratamiento del volumen de suelo estimado. De igual forma, el costo de operación estimado por tonelada de suelo (\$ 731.00) es bajo si se compara con otros métodos de biorremediación o con otras alternativas como podrían ser el confinamiento o coprocesamiento.

6.2 RECOMENDACIONES

Con base en el trabajo realizado y de acuerdo con los alcances establecidos, a continuación se hacen algunas recomendaciones.

Dado que el muestreo realizado para la caracterización de los sitios fue de carácter general, es conveniente verificar las concentraciones de hidrocarburos a profundidad con un muestreo a detalle al momento de remover el suelo para su remediación. Con estos datos se podrá tener una estimación más precisa del volumen de suelo por remediar.

Sería conveniente incluir en el muestreo a detalle la determinación de otros parámetros en el suelo como contenido de nitrógeno, fósforo y materia orgánica, con el propósito de mejorar el balance de nutrimentos para la estimulación del crecimiento de las bacterias. También sería

necesario determinar el contenido de metales pesados que puedan limitar o inhibir la actividad de las bacterias.

Realizar algunas pruebas de remediación con el uso de fertilizantes en vez de lodos de la planta de tratamiento, para comparar la eficiencia del proceso y poder sustituir el uso de lodos en caso de que existan problemas con su manejo o traslado a la celda.

Realizar algunas pruebas con lodos y fertilizantes aplicando un exceso de agua, con el propósito de evaluar la eficiencia de la degradación durante la época de lluvias y poder tomar medidas para evitar que se prolongue el tiempo de tratamiento de un lote de suelo.

Hacer el tratamiento de un lote de suelo (300 toneladas) para evaluar los parámetros de operación que se determinaron y determinar si el tiempo establecido de 6 meses es suficiente para alcanzar los límites de limpieza señalados por la norma.

En el tratamiento del primer lote de suelo, evaluar los aspectos operativos como transporte de lodos, adición de lodos en la celda, aireación del suelo y recirculación de lixiviados, con el propósito de hacer los ajustes que sean necesarios.

Determinar y llevar un registro de los costos reales de operación para el tratamiento del primer lote de suelo.

Es recomendable que el suelo, después de ser remediado, se utilice en la reforestación de los terreros. Ya que este es un programa permanente que tiene la empresa y se requiere promover la formación de un suelo capaz de sustentar el crecimiento de vegetación. Además, el suelo después del tratamiento, puede mejorarse con la adición de composta que se puede fabricar con los residuos orgánicos que se generan en la zona habitacional de El Poblado y con los lodos de la planta de tratamiento de aguas residuales.

APÉNDICE 1

CARACTERÍSTICAS DEL MEDIO FÍSICO Y BIOLÓGICO

Las condiciones del entorno determinan en gran medida el riesgo que representa la contaminación del suelo para el ambiente y la salud de la población. Estas condiciones varían considerablemente entre las dos unidades productivas, por lo que se puede determinar que el riesgo asociado a la problemática de los hidrocarburos también es diferente en cada sitio. A continuación se hace una descripción de las características del medio, tanto para la mina como para la planta de peletizado (PIQAYQA, 1992).

MINA

Medio Físico

Localización

De acuerdo con la carta de CETENAL (CETENAL_a, 1976) las instalaciones de la mina están en las coordenadas geográficas 19° 27' latitud N y 104° 05' longitud W, a una altitud de 1 100 msnm. Al noreste de la mina, a 4.5 km, se encuentra el poblado de Minatitlán y al sur, a aproximadamente a 2.8 km en línea recta, está El Poblado Peña Colorada donde habitan los empleados de la empresa.

Geología

En la mina y zonas aledañas afloran rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas. Las rocas metamórficas son las más escasas y las más antiguas, y pertenecen al Jurásico. Las rocas sedimentarias marinas, que corresponden al Cretácico, están ampliamente distribuidas en la zona y forman estructuras plegadas discontinuas.

En el área de la mina, las rocas más antiguas corresponden a una secuencia marina vulcano-sedimentaria, la cual cambia de rocas calcáreas masivas arrecifales a una secuencia vulcanoclástica representada por calizas arenosas, tobas, derrames basálticos y sedimentos conglomeráticos. Las rocas mesozoicas están afectadas por un cuerpo intrusivo de composición diorítica.

Una parte de las instalaciones de la mina se encuentra en una zona de skarn y/o hornfels en granates con bandas de mineral de hierro (magnetita), pirita, calcopirita, epidota, calcita y wollastonita. El skarn se produce a partir de las rocas volcánicas de composición andesítica, interstratificadas con rocas sedimentarias de tipo calcáreo-pelítico, afectadas por metamorfismo de contacto. El resto de las instalaciones se ubica en una área caracterizada por una secuencia de rocas vulcano-sedimentarias formadas a partir de rocas volcánicas de composición andesítica, interstratificadas con estratos de calizas pelíticas y lutitas.

Hidrología y geohidrología

El estado de Colima, de acuerdo con sus características hidrológicas, forma parte de las regiones Núm. 15 “Costa de Jalisco” y Núm. 16 “Armería-Coahuayana”. El CMBJPC se encuentra en la región Núm. 15, que se extiende a lo largo de la vertiente del Océano Pacífico con características hidrográficas y orográficas homogéneas. Los ríos son de trayectorias cortas debido a la cercanía de la región costera con las zonas montañosas. A esta región pertenece la cuenca del río Minatitlán-Marabasco-Cihuatlán; específicamente el río Minatitlán se encuentra a 2,650 m en línea recta del área donde se ubica la mina.

El régimen de corrientes superficiales de la zona es variable debido, principalmente, a la influencia de los ciclones durante los meses de agosto a octubre. Las lluvias más fuertes generalmente se presentan desde junio hasta octubre, con volúmenes y frecuencias máximas en el mes de septiembre. El período de estiaje, por lo general, comprende del mes de noviembre al mes de mayo.

Un estudio geohidrológico de la cuenca del río Minatitlán, realizado en 1996 para el CMBJPC (GEOEX, 1996), reporta el afloramiento superficial de cuatro unidades geológicas: calizas y lutitas, conglomerado poligmítico, andesitas viejas y granulares formados por aluviones y fluvisoles. Las tres primeras unidades geológicas conforman una unidad geohidrológica impermeable, mientras que la unidad de aluvión y fluvisoles conforma una unidad geohidrológica de permeabilidad alta, en la que se encuentra el acuífero de la zona con un espesor de 25 m. Las instalaciones del CMBJPC quedan dentro de la unidad geohidrológica impermeable; sin embargo, el grado de escurrimiento superficial es alto, debido a la impermeabilidad de las rocas y a la inclinación de las laderas en los cerros de la mina.

En el estudio mencionado, también se tomaron dos secciones para determinar el nivel estático de los acuíferos en la cuenca del río, cerca del poblado de Minatitlán. La primera sección se hizo con orientación NNE-SSO y mostró el nivel estático a 3 m de profundidad; la segunda sección fue orientada O-E y en ella el nivel estático se encontró a 5 m.

Suelo

De acuerdo con la clasificación FAO-UNESCO, las principales unidades de suelo que se presentan en el área de la mina y en sus alrededores son: litosol, regosol éutrico, regosol dístrico, cambisol dístrico, cambisol ferrálico y fluvisol.

En extensión superficial predominan los litosoles, que cubren la zona de explotación del mineral de hierro y las laderas aledañas. Las características de estos suelos son variables, debido principalmente al tipo de materiales que los forman; además son poco profundos por el incipiente desarrollo que muestran. La susceptibilidad de los litosoles a la erosión se incrementa con la pendiente existente en los cerros. Los regosoles se localizan hacia el norte y sur del área de la mina, en las partes bajas de los montes. Son suelos de origen residual, poco desarrollados y frecuentemente asociados a los litosoles y cambisoles. Los cambisoles están en la parte baja de los montes junto a las planicies del río Minatitlán, éstos se distinguen por tener en el subsuelo una capa de alteración en la roca que gradualmente se convierte en suelo. La susceptibilidad de los cambisoles a la erosión es de moderada a alta. En las planicies del río Minatitlán se

encuentran los fluvisoles. Estos suelos se caracterizan por ser de origen aluvial y de reciente formación, sin estructura y poco desarrollados.

Debido a que en la mina la explotación del mineral es a cielo abierto, el suelo original se ha removido y en la zona donde se ubican las instalaciones y los caminos predomina un recubrimiento con material de relleno (principalmente roca fragmentada).

Clima

La precipitación promedio anual es de 1 629 mm, con una máxima de 2,747 mm, en el año de 1975, y una mínima de 1,017 mm, en el año de 1994. Los meses más lluviosos son de junio a octubre y la precipitación mensual máxima registrada es de 878.5 mm en junio de 1975. Los meses de menor precipitación son febrero, marzo y abril (INEGI, 2004). La temperatura media anual en Minatitlán es de 23.5 °C.

Considerando los valores anteriores de temperatura y precipitación, y de acuerdo con la clasificación climática de Köppen modificada por García (García E., 1988), el clima que impera en la zona de Minatitlán es AW2(w)i, cálido subhúmedo con lluvias de verano.

Medio Biológico

Flora

En el municipio de Minatitlán, en sus principales elevaciones existe el bosque de pino encino con ocotes, pino chino, y en el estrato arbustivo el madroño. En sus límites con el estado de Jalisco, al noreste de Minatitlán se encuentra el bosque mesófilo de montaña con especies características como el liquidámbar, se considera que este tipo de bosque en el municipio se encuentra entre los 800 y 2,400 msnm estando limitado por superficies de pino-encino.

La selva baja caducifolia se encuentra al noroeste y noreste con una pequeña franja de selva mediana subcaducifolia en el centro de ambas con especies como parota, capomo y copal. A diferentes altitudes encontramos de igual forma extensiones de pastizales inducidos con gramma de la costa y pasto. El bosque representa para el municipio el 52% de su superficie total, la selva en general 38.84%, los pastizales el 3.23% y la superficie dedicada a la agricultura el 5.63%.

Las especies predominantes en el área de la mina y zonas aledañas, son: selva baja caducifolia, selva mediana subcaducifolia, matorral espinoso y bosque de encino. Aproximadamente a 10 km en línea recta del predio minero, están los límites de la zona de amortiguamiento de la Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán.

Fauna

La fauna está integrada por jaguar, onza, puma, tigrillo, jabalí, coyote, mapache, tejón, zorra, armadillo, venado, conejo, ardilla e iguana, en cuanto a las aves: aguilillas, gavilanes, lechuzas, cuervos y perdices.

PLANTA DE PELETIZADO

Medio Físico

Localización

La planta de peletizado se localiza aproximadamente a 3 km al noreste del puerto de Manzanillo. De acuerdo con las cartas de CETENAL (CETENAL_b, 1976), la planta se encuentra en las coordenadas geográficas 19° 05' latitud N y 104° 18' longitud W, a una altitud de 25 msnm. Al noroeste de la planta, a menos de 2 km, está la laguna Las Garzas; al sur, a 1.5 km, está el poblado de Tapeixtles; y al norte, a 3 km, está el poblado de Jalipa. La planta colinda al norte con una almacenadora de contenedores, al sur con una estación satélite de PEMEX, y al oeste con la carretera federal Núm. 98 (Manzanillo-Minatitlán).

Geología

La geología de la provincia de la Sierra Madre del Sur se conforma por una litología compleja, con rocas intrusivas como el granito y rocas metamórficas. La subprovincia de la Sierra de Jalisco y Colima está constituida principalmente por cuerpos de granito intrusivo, denominados batolitos, que generalmente se asocian con las cordilleras. Los batolitos integran una sierra de mediana altitud que se levanta abruptamente del mar. El valle de Jalipa-Tapeixtles, y en general los valles que rodean la bahía de Manzanillo, están formados por depósitos aluviales, lacustres, palustres y litorales.

La información obtenida de la perforación de pozos en el valle¹ muestra que hay un predominio de aluvi3n, que es un material granular no cementado de diferente granulometr3a con capas combinadas de boleos, gravas, arenas, limos y arcillas. El aluvi3n tiene un espesor aproximado de 40 m y su basamento lo constituye un granito intrusivo impermeable.

Hidrolog3a y geohidrolog3a

Como se mencion3 anteriormente, el estado de Colima forma parte de las regiones hidrol3gicas N3m. 15 "Costa de Jalisco" y N3m. 16 "Armer3a-Coahuayana". La primera se divide a su vez en dos cuencas hidrol3gicas la del r3o Cihuatl3n y la de la laguna de Cuyutl3n. Los principales r3os que recorren el estado son: Cihuatl3n, Armer3a, Coahuayana y Salgado (SARH, 1990).

La planta de peletizado est3 dentro de la cuenca de la laguna de Cuyutl3n. La cuenca presenta corrientes poco desarrolladas, entre las que destacan los arroyos Chandiablo, Punta de Agua, el Rancho Viejo, el Zacate y Agua Blanca; 3stas nacen en la Sierra Perote y desembocan en la bah3a de Manzanillo o en la laguna de Cuyutl3n. En el valle de Jalipa-Tapeixtles, las corrientes del arroyo el Rancho Viejo viajan de este a oeste, con un r3gimen transitorio. Cerca de la planta de peletizado est3 la laguna Tapeixtles y la laguna Las Garzas.

En el valle de Jalipa-Tapeixtles, como en la mayor3a de los valles que se encuentran en la costa, se aprovecha el agua superficial y subterr3nea de manera combinada, para uso agr3cola, urbano y en menor medida el industrial; sin embargo, el reducido espesor de los mantos acu3feros y la proximidad del litoral imponen restricciones para el aprovechamiento de agua.

¹ El CMBJPC cuenta en la planta de peletizado con dos pozos para el abastecimiento de agua para el proceso.

En el valle Jalipa-Tapeixtles la dirección del flujo de agua subterránea es de noreste a suroeste; es decir, de las zonas elevadas hacia la bahía. Debido a la explotación de los acuíferos se ha reducido el gradiente de flujo hacia el litoral, la carga hidráulica ha generado depresiones piezométricas con elevaciones negativas, provocando que el flujo sea inverso. En el valle ya se tuvieron problemas por la explotación intensiva y la distribución de pozos en el puerto de Manzanillo, pues se presentaron indicios de una intrusión salina incipiente de agua de mar (ICGA, 1975).

El nivel estático del agua subterránea varía dependiendo de la recarga, volumen de bombeo, configuración topográfica y transmisividad de los acuíferos. En las zonas costeras los niveles freáticos son próximos a la superficie del terreno y llegan a una profundidad de 4 m en algunos pozos (CNA, 1998).

Suelo

El valle de Jalipa-Tapeixtles está constituido por suelos de origen aluvial, lacustre, conglomerados y areniscas semiconsolidadas. Los primeros se componen por partículas que van de finas a gruesas, mientras que los conglomerados y areniscas se forman principalmente por fragmentos de rocas ígneas ácidas. Los suelos se caracterizan por un desarrollo incipiente, con permeabilidad de media a alta y un basamento de material consolidado (roca intrusiva).

De acuerdo con la clasificación FAO-UNESCO, las unidades de suelo que existen en la zona de estudio y en las zonas aledañas son: feozem háplico, fluvisol éutrico, regosol éutrico y cambisol éutrico. Específicamente en el lugar que ocupa la planta de pelletizado, se tienen suelos feozem y regosol, aunque son pocas las zonas que superficialmente conservan el suelo original dado que éste se ha removido o recubierto con el polvo de hierro que se genera en el proceso; sin embargo, a mayor profundidad el material aluvial se conserva.

Clima

El clima de Manzanillo, según la clasificación de Köppen modificada por García (García E., 1988), corresponde al tipo Aw0(w)i, clima cálido subhúmedo con lluvias en verano.

La temporada de lluvias comprende los meses de junio a octubre, siendo septiembre el mes más lluvioso debido a los frecuentes ciclones que llegan a las costas de Manzanillo. La precipitación promedio anual es de 963.8 mm, con una máxima de 1,553.5 mm, en el año de 1993, y una mínima de 393.3 mm, en el año de 1995. La precipitación mensual máxima registrada es de 446.3 mm en julio de 1993. Los meses con menor precipitación son de febrero a mayo (INEGI, 2004). La temperatura media anual en Minatitlán es de 23.5 °C. La temperatura media anual es de 26.5 °C, con las temperaturas más altas en julio y las más bajas en marzo.

Medio Biológico

Flora

En el municipio de Manzanillo predomina la selva baja caducifolia a menos de 500 msnm. En las elevaciones de más de 500 msnm se encuentra la selva mediana subcaducifolia con especies

como capomo, parota y copal. Ejemplo de esta vegetación se encuentra en los cerros el Toro, Centinela, Espumilla y los Naranjos, estos dos últimos con más de 1000 msnm. Una pequeña porción de selva baja subcaducifolia se encuentra al este del puerto de Manzanillo.

Al noreste del municipio, en las zonas templadas hay vegetación de bosque de encino, aproximadamente desde los 600 msnm y por último en el cerro del Ocote, límite entre Manzanillo y Minatitlán, se presenta una pequeña superficie de bosque de pino-encino con especies como el encino, nogal, fresno, tescalama y sangre de drago. Existen también pastizales inducidos a orillas de la carretera como la que va de Cihuatlán al puerto de Manzanillo. La grama de la costa y el pasto son las especies dominantes.

Actualmente los pastizales representan el 4.7% de la superficie municipal, el bosque el 4.39%, la selva el 64% de la misma, el manglar y la vegetación halófito el 9.08% y la superficie municipal destinada a la agricultura solo el 17.83%.

Fauna

Existen jabalíes, ardillas, venado cola blanca, zorra, ocelote, tigrillo, y onza principalmente en las mayores elevaciones del municipio; en los valles se encuentran: torcaza, tlacuache, coyote, conejo y por último en el litoral: agujón, dorado, tiburón, cornuda, y tortuga de carey.

APÉNDICE 2

ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN DE SUELO CONTAMINADO

ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN DE SUELO CONTAMINADO DE ACUERDO CON LOS LÍMITES ESTABLECIDOS EN LA NOM-138-SEMARNAT/SS-2003

Límites máximos permisibles

Fracción media	5,000 mg/kg
Fracción pesada	6,000 mg/kg

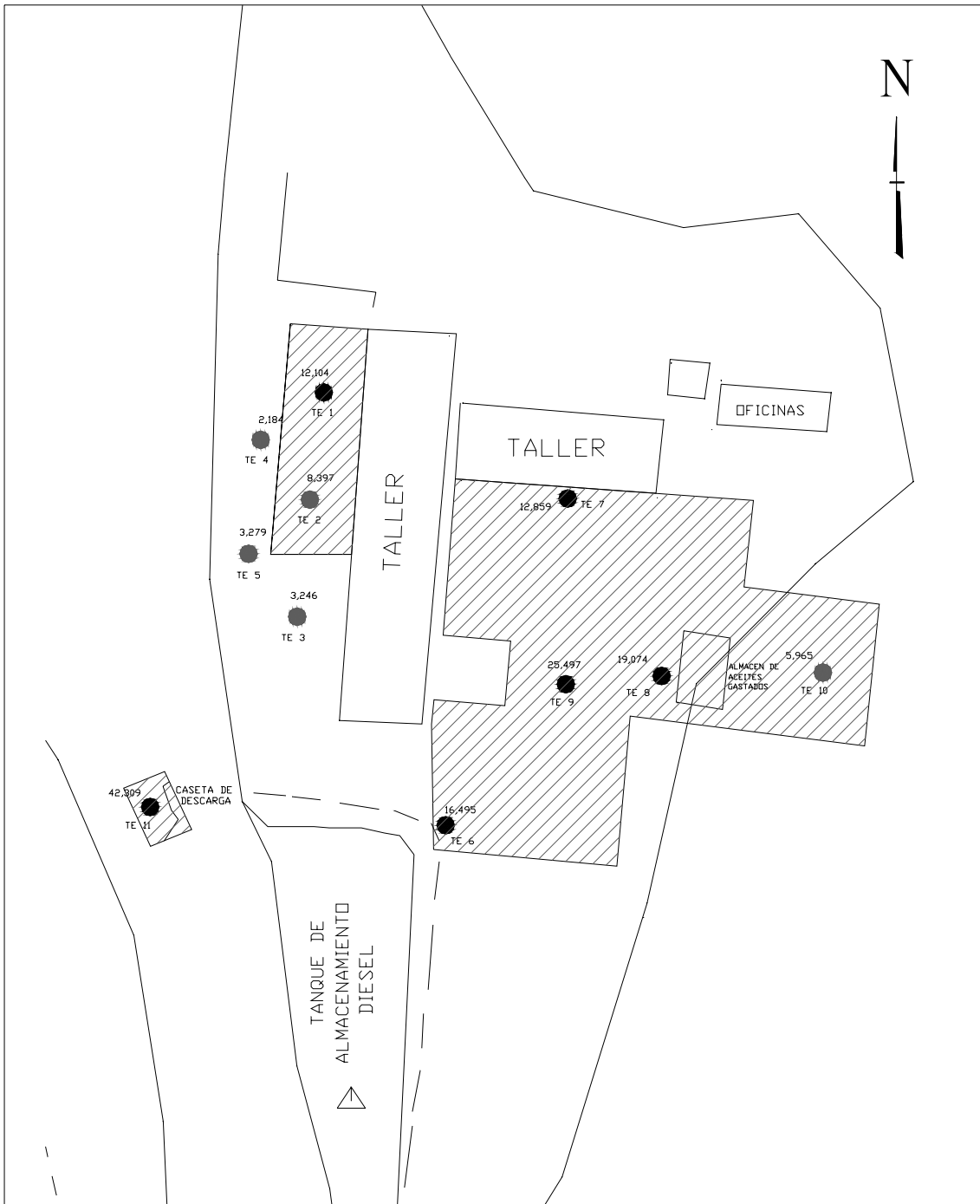
Planta de Peletizado

Combustóleo	Profundidad de la muestra (cm)	Espesor considerado (m)	Superficie en planos (m ²)	Volumen de suelo (m ³)
	0 a 40	0.85	779	662
	130 a 170	1.4	643	900
	280 a 320	1.5	643	965
		<i>Volumen Combustóleo</i>		<i>2,527</i>
Embarque				
	0 a 40	0.85	240	204
	130 a 170	1.4	93	130
	280 a 320	1.4	93	130
		<i>Volumen Embarque</i>		<i>464</i>
Total Planta de Peletizado				2,991

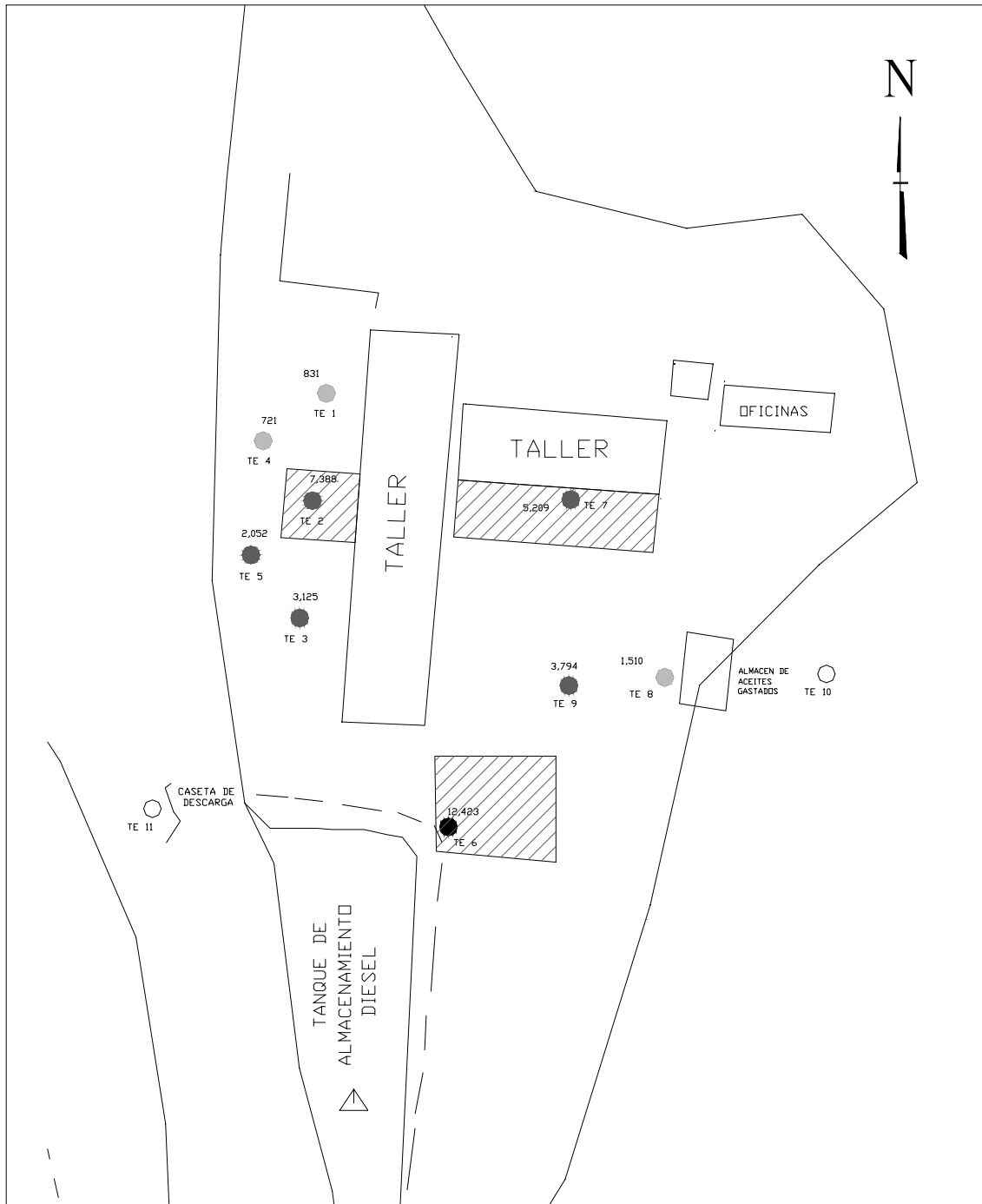
Mina



La Encantada	Profundidad de la muestra (cm)	Espesor considerado (m)	Superficie en planos (m ²)	Volumen de suelo (m ³)
	0 a 30	0.30	4,134	1,240
	30 a 80	0.50	931	466
	80 a 120	0.40	0	0
		<i>Volumen La Encantada</i>		<i>1,706</i>
Polvorín				
	0 a 50	0.50	537	269
	50 a 100	0.50	187	94
		<i>Volumen Polvorín</i>		<i>362</i>
Total Mina Nivel Alto				2,068

Total Suelo Contaminado	5,059 m³
--------------------------------	----------------------------



AREA AFECTADA = 4,134 m ² VOLUMEN DE SUELO ESTIMADO = 1,240 m ³ PUNTO DE MUESTREO	CARACTERIZACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS EN UNA EMPRESA MINERA Y DESARROLLO DE UN MÉTODO BIOLÓGICO PARA SU REMEDIACIÓN		
	AREA AFECTADA (0.00 - 0.30 m) EN EL TALLER LA ENCANTADA		
ESC	FIGURA A - 1	FECHA	



 AREA AFECTADA = 931 m²
 VOLUMEN DE SUELO ESTIMADO = 466 m³
 PUNTO DE MUESTREO

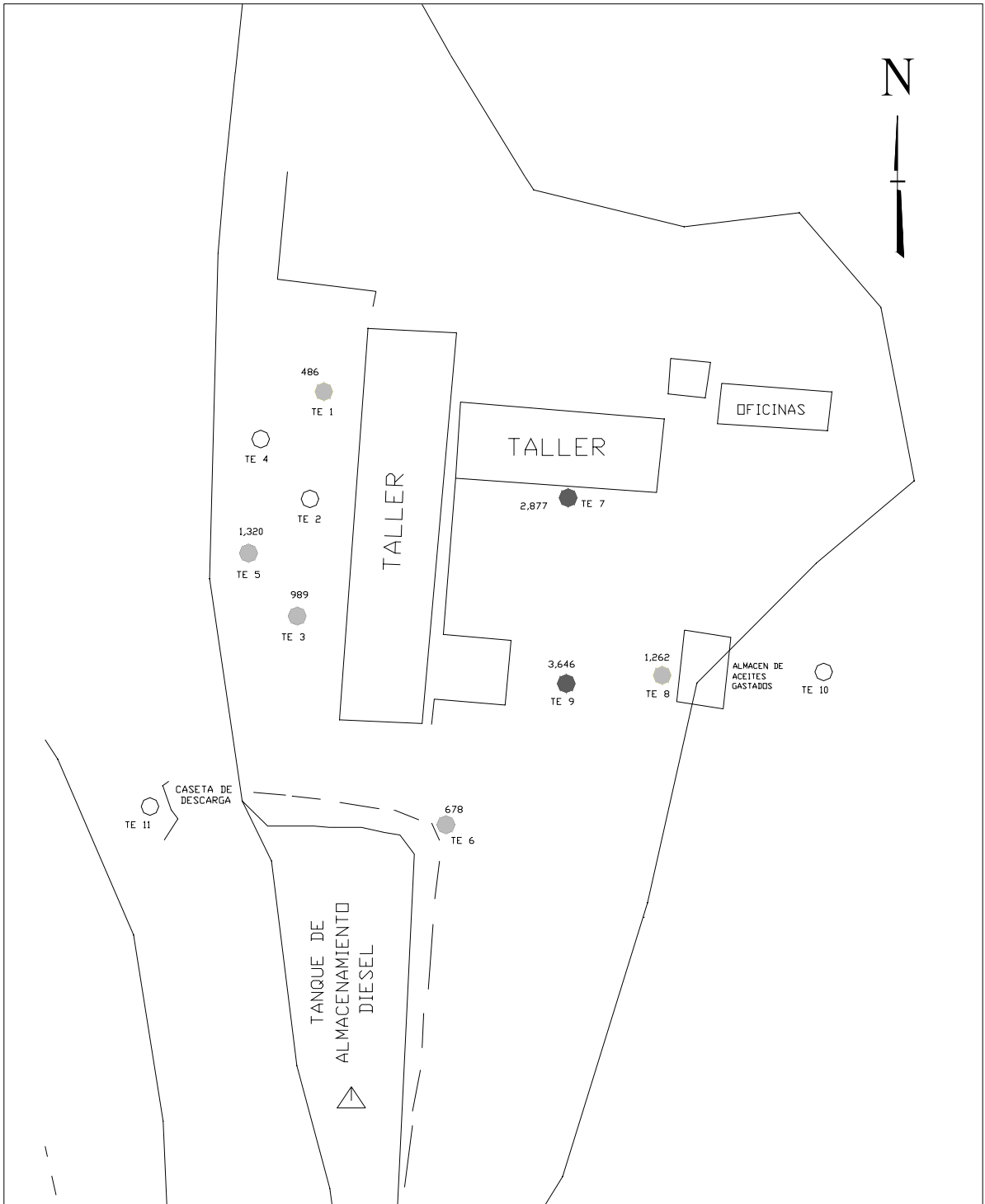
CARACTERIZACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBURDS
 EN UNA EMPRESA MINERA Y DESARROLLO DE UN MÉTODO
 BIOLÓGICO PARA SU REMEDIACIÓN



AREA AFECTADA (0.30 - 0.80 m)
 EN EL TALLER LA ENCANTADA

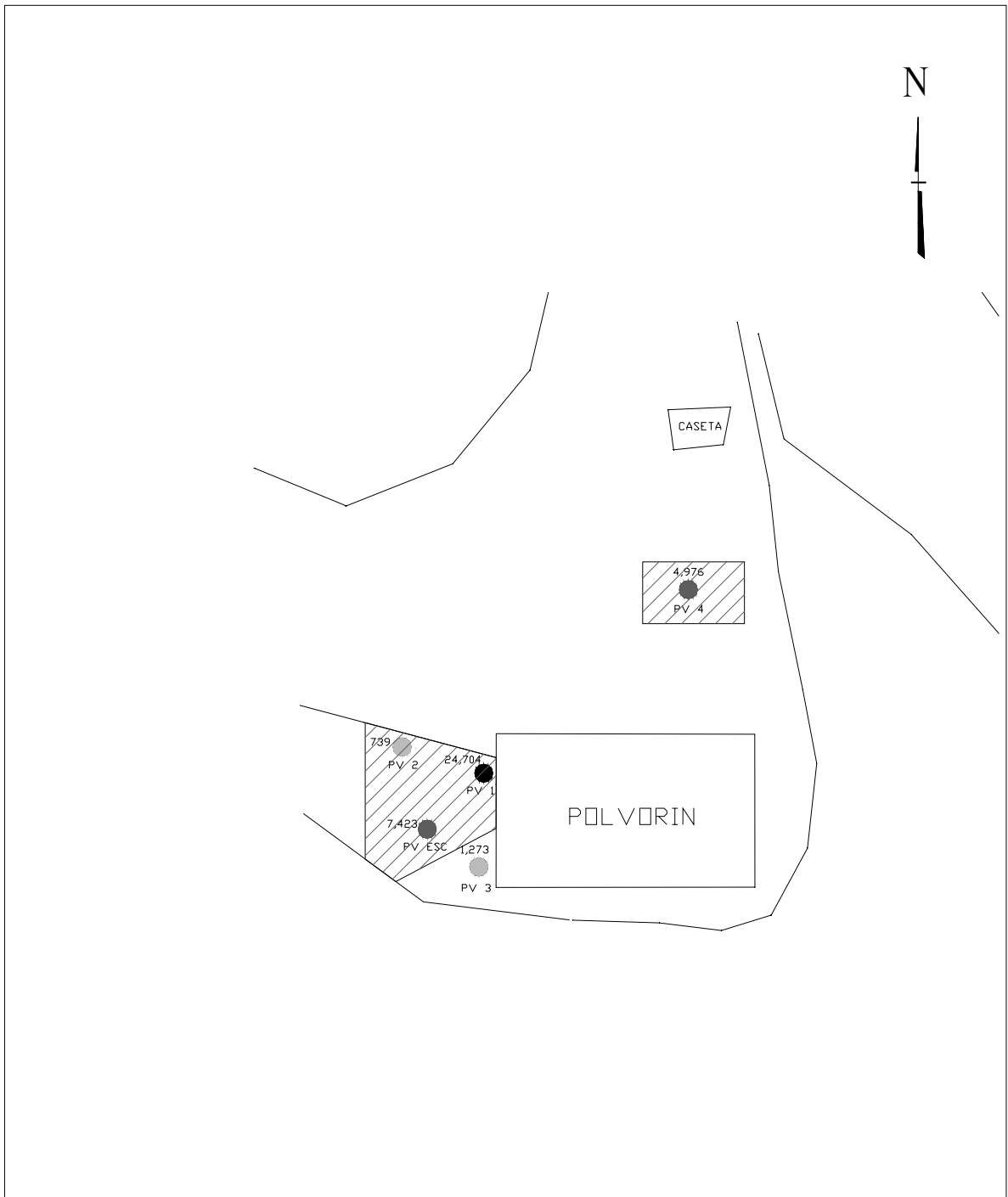
ESC



FIGURA A-2

FECHA



 AREA AFECTADA = 0 m ² VOLUMEN DE SUELO ESTIMADO = 0 m ³  PUNTO DE MUESTREO	CARACTERIZACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS EN UNA EMPRESA MINERA Y DESARROLLO DE UN MÉTODO BIOLÓGICO PARA SU REMEDIACIÓN		
	AREA AFECTADA (0.80 - 1.20 m) EN EL TALLER LA ENCANTADA		
ESC	FIGURA A-3	FECHA	



 AREA AFECTADA = 537 m²
 VOLUMEN DE SUELO ESTIMADO = 269 m³
 PUNTO DE MUESTREO

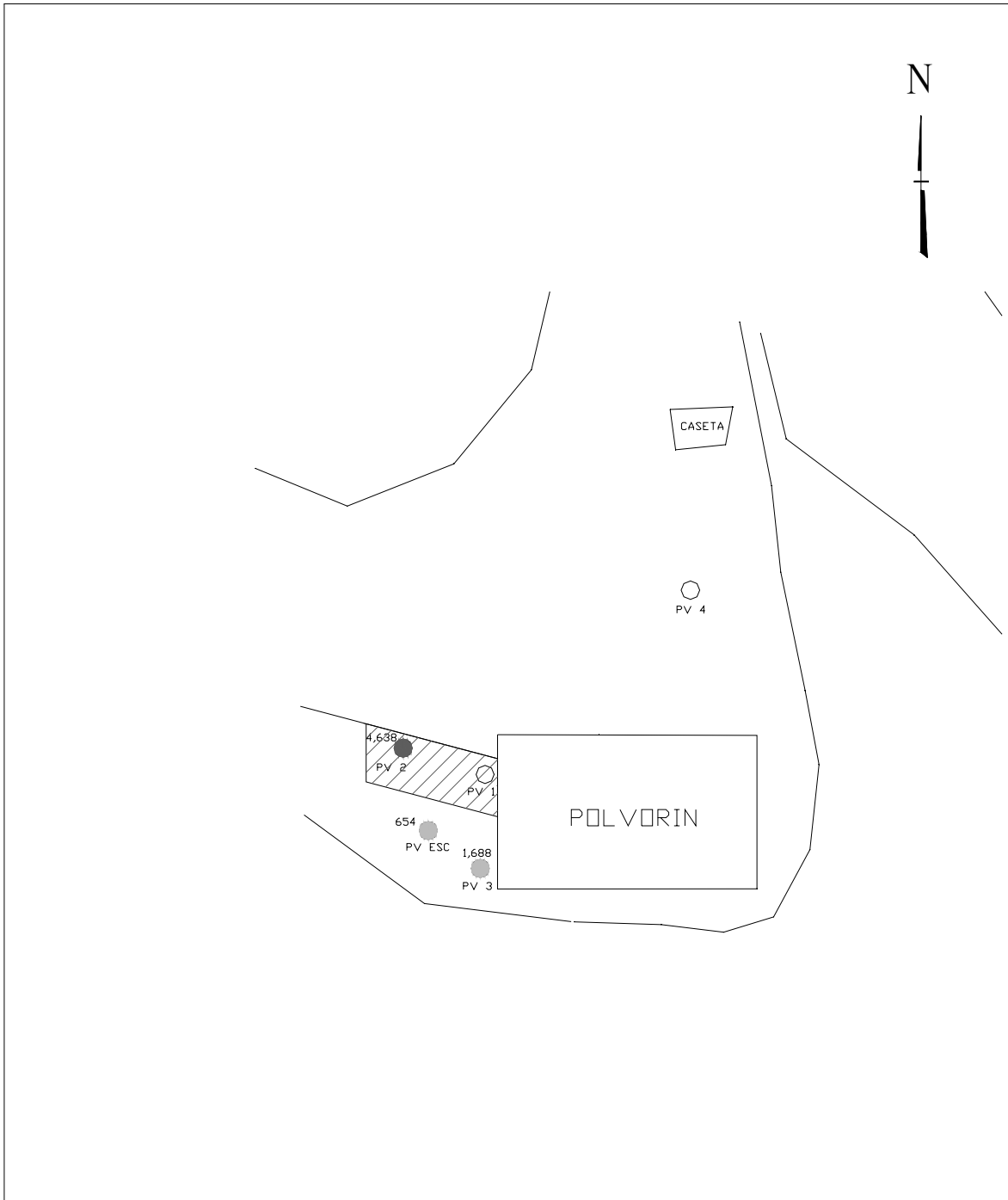
CARACTERIZACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS
 EN UNA EMPRESA MINERA Y DESARROLLO DE UN MÉTODO
 BIOLÓGICO PARA SU REMEDIACIÓN

AREA AFECTADA (0.00 - 0.50 m)
 EN EL POLVORIN

ESC

FIGURA A-4

FECHA



AREA AFECTADA = 187 m²
 VOLUMEN DE SUELO ESTIMADO = 93 m³



PUNTO DE MUESTREO

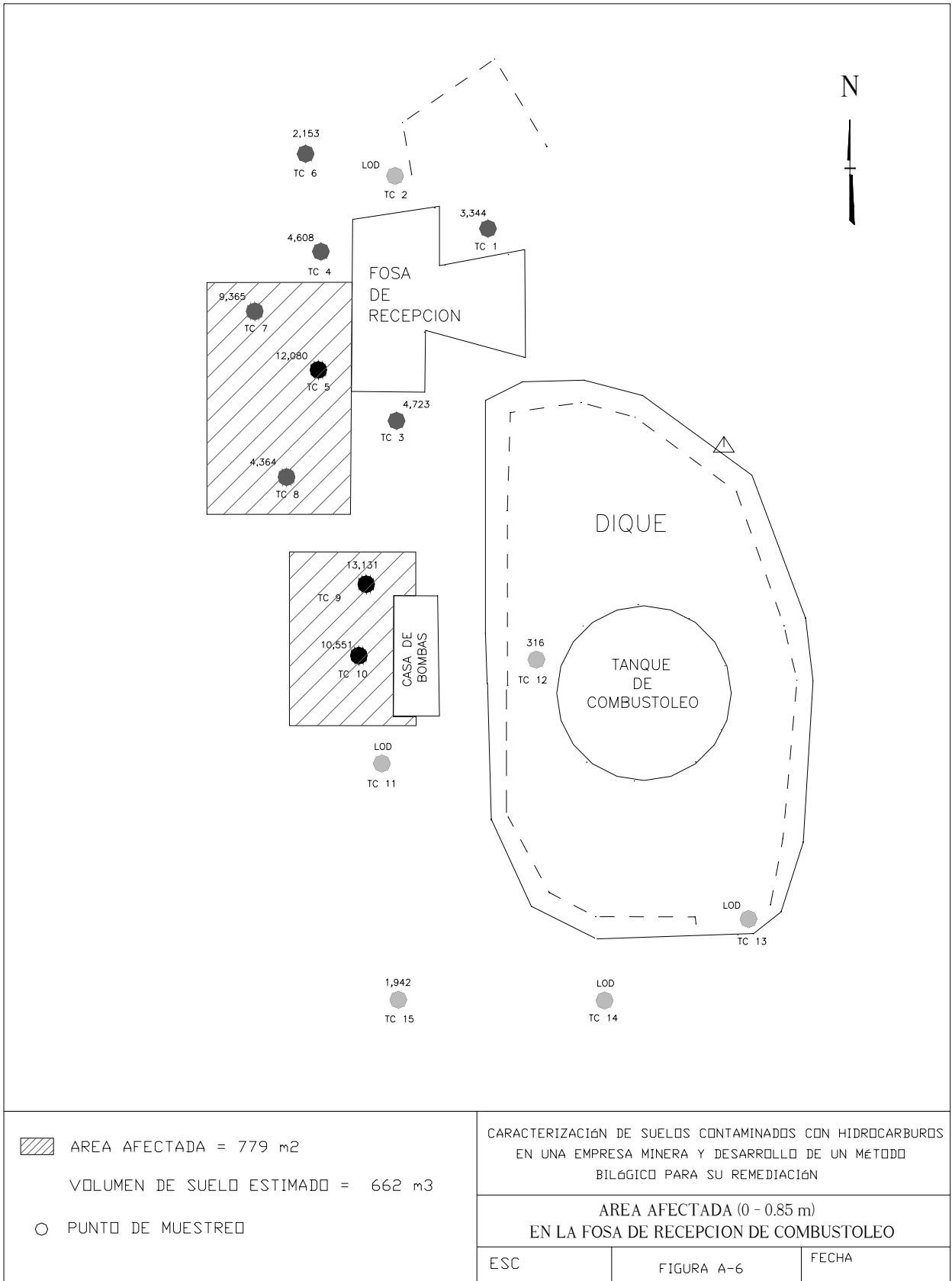
CARACTERIZACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS
 EN UNA EMPRESA MINERA Y DESARROLLO DE UN MÉTODO
 BIOLÓGICO PARA SU REMEDIACIÓN

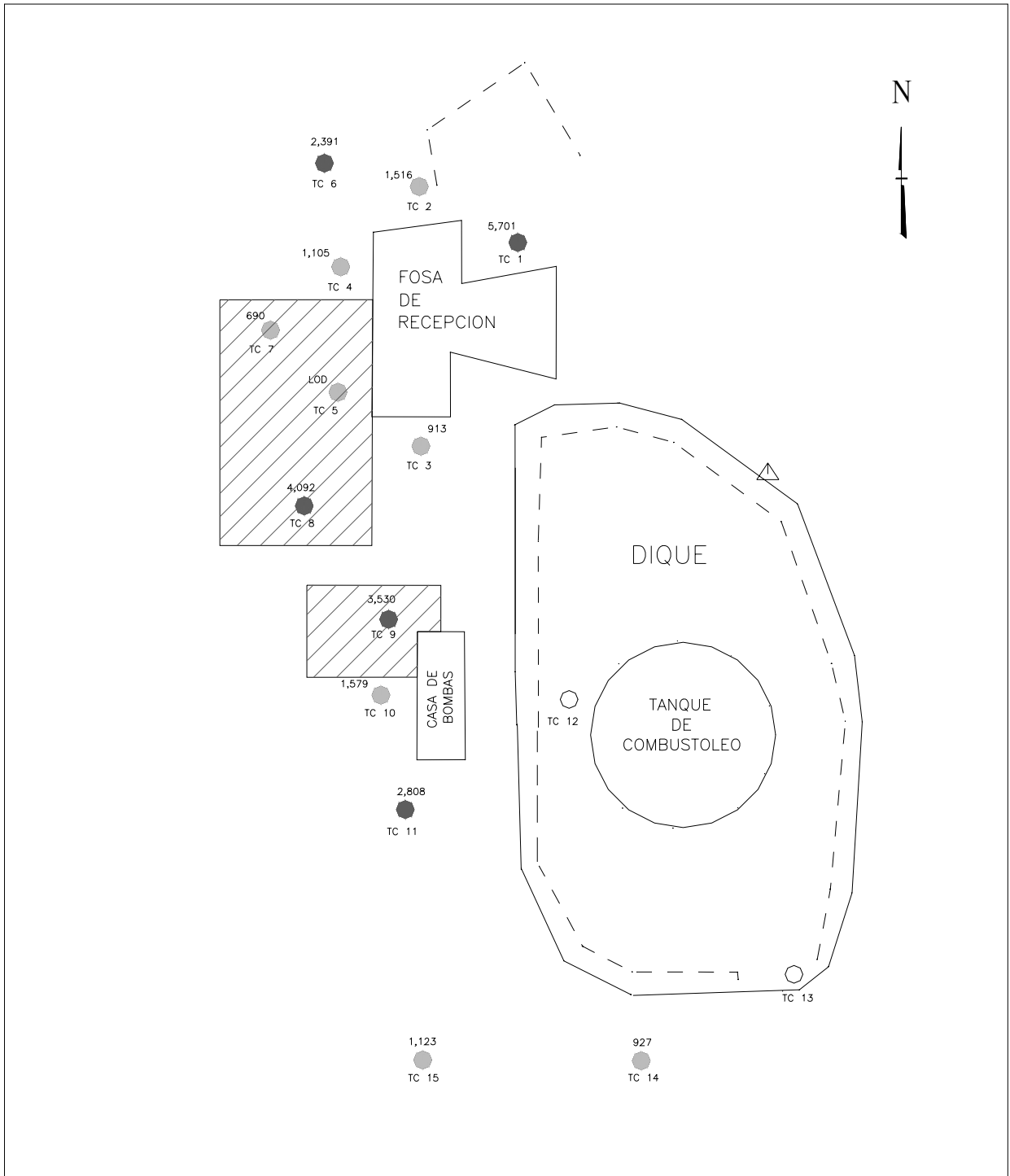
AREA AFECTADA (0.50 - 1.00 m)
 EN EL POLVORIN



ESC

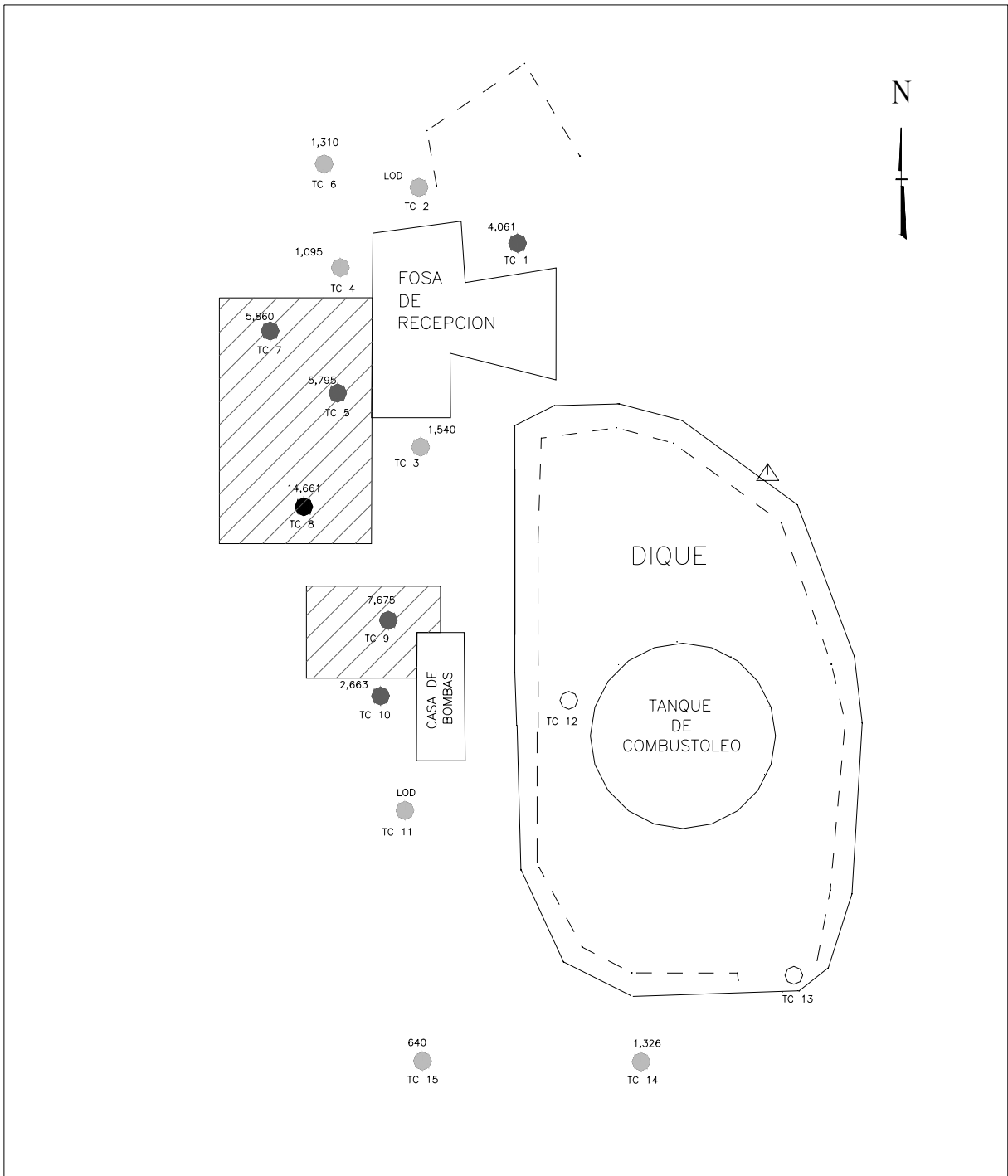
FIGURA A-5



FECHA

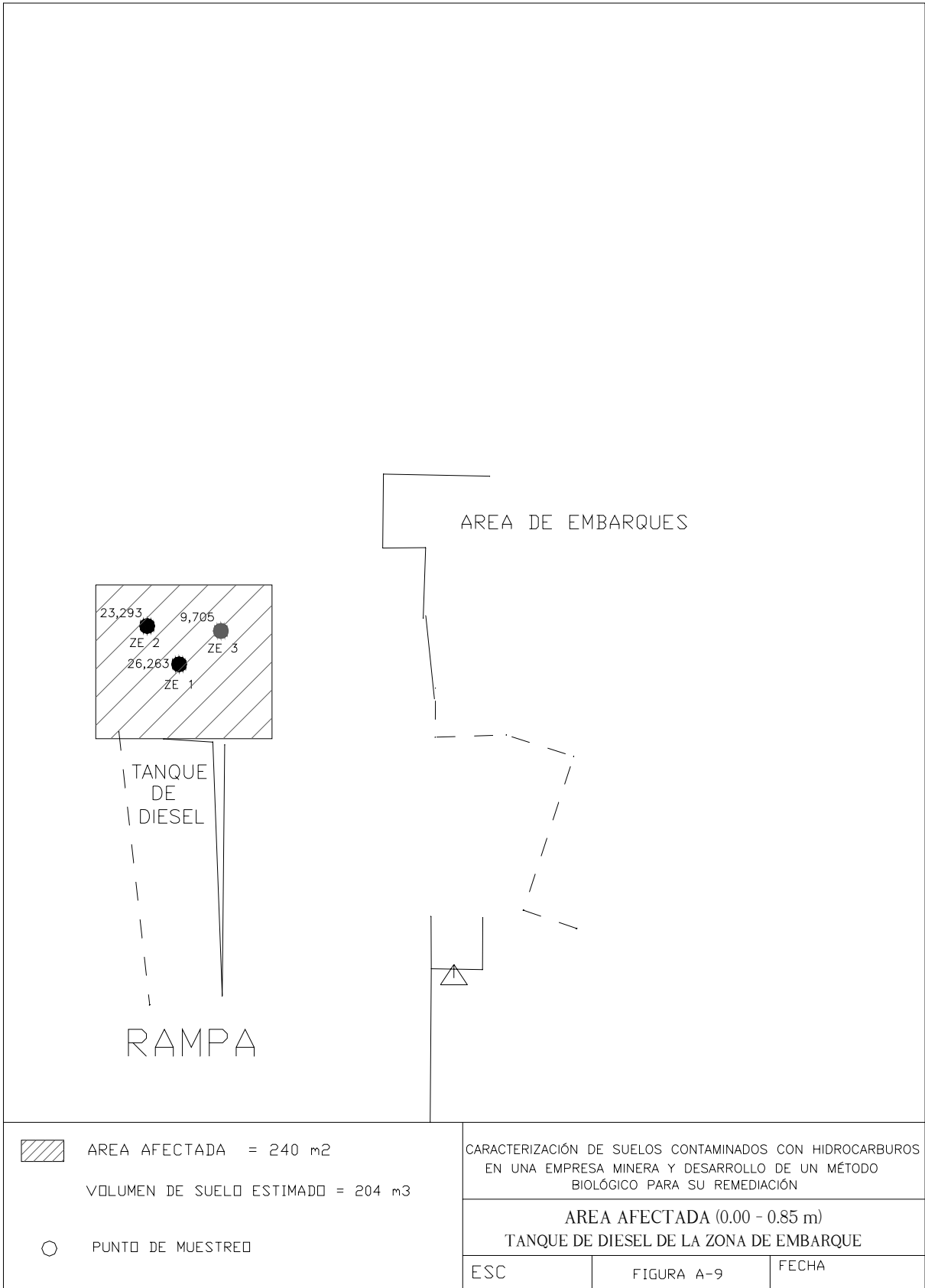




 AREA AFECTADA = 643 m ² VOLUMEN DE SUELO ESTIMADO = 900 m ³	CARACTERIZACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS EN UNA EMPRESA MINERA Y DESARROLLO DE UN MÉTODO BIOLÓGICO PARA SU REMEDIACIÓN	
	AREA AFECTADA (0.85 - 2.25 m) EN LA FOSA DE RECEPCION DE COMBUSTOLEO	
 PUNTO DE MUESTREO	ESC	FECHA
	FIGURA A-7	



<p>  AREA AFECTADA = 643 m² VOLUMEN DE SUELO ESTIMADO = 965 m³  PUNTO DE MUESTREO </p>	CARACTERIZACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS EN UNA EMPRESA MINERA Y DESARROLLO DE UN MÉTODO BILÓGICO PARA SU REMEDIACIÓN		
	AREA AFECTADA (2.25 - 3.75 m) EN LA FOSA DE RECEPCION DE COMBUSTOLEO		
ESC	FIGURA A-8	FECHA	



AREA AFECTADA = 240 m²
 VOLUMEN DE SUELO ESTIMADO = 204 m³



PUNTO DE MUESTREO

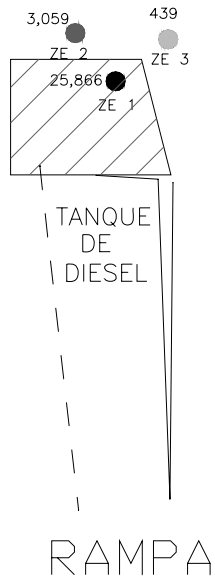
CARACTERIZACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS
 EN UNA EMPRESA MINERA Y DESARROLLO DE UN MÉTODO
 BIOLÓGICO PARA SU REMEDIACIÓN

AREA AFECTADA (0.00 - 0.85 m)
 TANQUE DE DIESEL DE LA ZONA DE EMBARQUE

ESC

FIGURA A-9

FECHA



AREA AFECTADA = 93 m²
VOLUME DE SUELO ESTIMADO = 130 m³



PUNTO DE MUESTREO

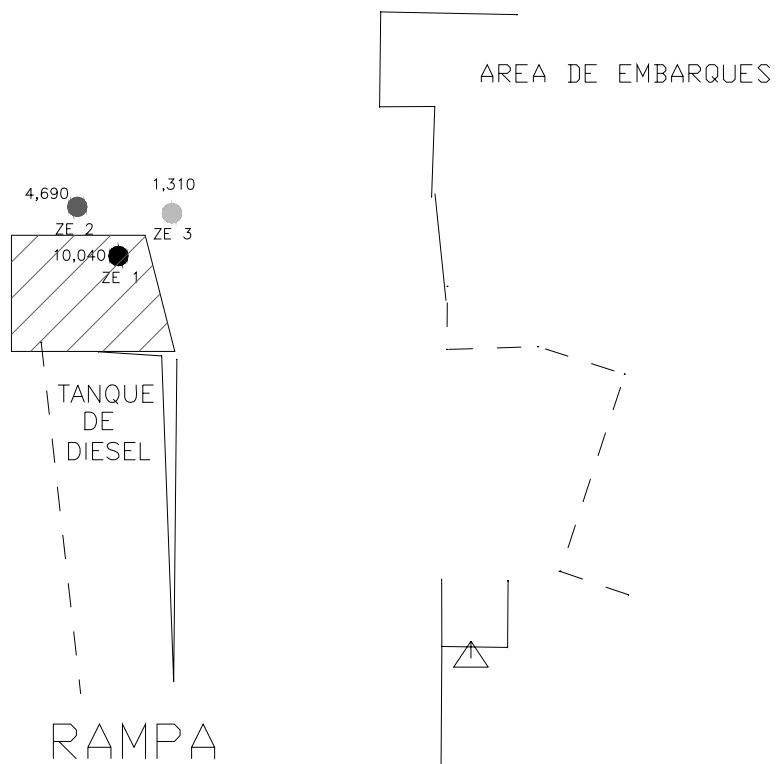
CARACTERIZACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS
EN UNA EMPRESA MINERA Y DESARROLLO DE UN MÉTODO
BIOLÓGICO PARA SU REMEDIACIÓN



AREA AFECTADA (0.85 - 2.25 m)
TANQUE DE DIESEL EN LA ZONA DE EMBARQUE

ESC

FIGURA A-10

FECHA



-  AREA AFECTADA = 93 m²
- VOLUMEN DE SUELO ESTIMADO = 130 m³
-  Punto de muestreo

CARACTERIZACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS
EN UNA EMPRESA MINERA Y DESARROLLO DE UN MÉTODO
BIOLÓGICO PARA SU REMEDIACIÓN

AREA AFECTADA (2.25 - 3.75 m)
TANQUE DE DIESEL EN LA ZONA DE EMBARQUE

ESC

FIGURA A-11

FECHA

APÉNDICE 3

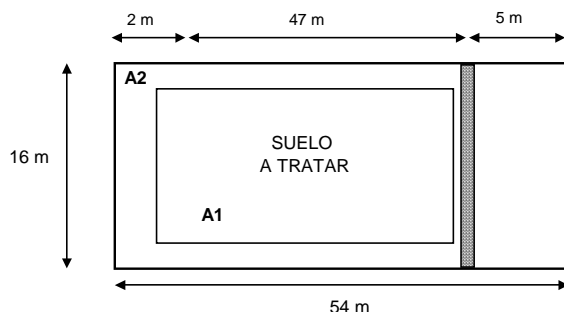
CÁLCULO DE LA ALTURA DEL BORDO PERIMETRAL DE LA CELDA DE TRATAMIENTO

Volumen de suelo a tratar	170 m³	306 ton
Espesor de la capa de suelo		0.3 m
Área que ocupa el suelo a tratar (A1)	12 m x 47 m =	564 m ²
Superficie total de la celda	16 m x 54 m =	864 m ²

Dimensiones del bordo perimetral

Para el cálculo se toma en cuenta la precipitación pluvial máxima en 24 horas considerando que en 24 horas no hubiera extracción de agua de la pila

Precipitación máxima en 24 horas	270 mm 270 L / m ² 0.27 m ³ / m ²	Con periodo de retorno de 50 años
----------------------------------	---	-----------------------------------



Área total de la Celda (A2)	864 m ²
-----------------------------	--------------------

Volumen de agua en un **evento de precipitación máxima en 24 hrs**

$$\mathbf{V \text{ agua max} = 864 \times 0.27 = 233.28 \text{ m}^3}$$

Nivel de agua considerando que el material a tratar está saturado y no hay extracción de agua

Superficie disponible hasta 0.30 m = A2 - A1

Superficie disponible hasta 0.30 m = 864 - 564 = 300 m²

Volumen disponible hasta 0.30 m = 300 x 0.30 = 90 m³

Volumen de agua arriba de 0.30 m = 233.28 - 90 = 143.28 m³

Nivel de agua arriba de 0.30 m = 143.28 / 864 = 0.17 m

Nivel teórico de agua en evento de precipitación Máxima en 24 hrs
0.30 + 0.17 = **0.47 m**

Considerar un factor de seguridad de 100 %

Altura del bordo Perimetral =	0.47 x 2.00 =	0.93 m
-------------------------------	---------------	---------------

APÉNDICE 4

CÁLCULO DE LA CANTIDAD DE NITRÓGENO Y FÓSFORO EN LOS LODOS AGREGADOS

REQUERIMIENTOS DE NUTRIENTES PARA 300 TON (170 M3)

Relación recomendada de nutrientes, referida al contenido de carbón **C:N:P** **100:10:1**

A) Se asume que el total de la masa de hidrocarburos en el suelo representa la masa de carbón disponible para la biodegradación

B) El contenido de carbón en hidrocarburos del petróleo, es aproximadamente 90 % en peso (dato sacado de un estudio de caso en E.U.)

Concentración de TPH en suelo de La Encantada 14,500 mg/kg

Contenido de carbón 90.00% 13,050 mg/kg

Relación C:N:P por kg de suelo C 13.05 g
N 1.305 g
P 0.1305 g

Densidad del suelo 1.8 ton/m³

Volumen del suelo 170 m³

Peso del suelo **306.00 ton**
306,000.00 kg

Nitrógeno requerido **399,330 g**

Fósforo requerido **39,933 g**

Núm de adiciones de lodos en 6 meses 24 adiciones

Cantidad de lodo en cada adición **150 mL/kg de suelo**

Cantidad total de lodo agregado 1,101,600,000 mL de lodo

igual a 1,101,600.00 L

Cálculo del Nitrógeno Requerido

Cantidad de sólidos en el lodo concentrados a 840 mL 173.25 g

Concentración de N en los lodos 2.04%

Contenido de N en el lodo 3.5343 g/L

Cantidad de N agregada con el lodo **3,893,385 g de N**

Diferencia entre N requerido y N agregado **-3,494,055 g** **Se cubre el requerimiento de nitrógeno**

Cálculo del Fósforo Requerido

Cantidad de sólidos en el lodo concentrados a 840 mL 173.25 g

Concentración de P disponible en los lodos 0.06%

Contenido de P disponible en el lodo 0.028 0.098406 g/L

Cantidad de P agregada con el lodo **108,404 g de P**

Diferencia entre P requerido y P agregado **-68,471 g** **Se cubre el requerimiento de fósforo**

BIBLIOGRAFÍA

REFERENCIAS DOCUMENTALES

Baker Katherine y Herson Diane, 1994. *Introduction and overview of bioremediation*. En: Bioremediation. Katherine H. Baker and Diane S. Hersun (eds). McGraw-Hill. pp 1-7.

Baker Katherine, 1994. *Bioremediation of surface and subsurface soils*. En: Bioremediation. Katherine H. Baker and Diane S. Hersun (eds). McGraw-Hill. pp 203-259.

Bandyopadhyay Subrata, Bhattacharya Sanjoy K. y Majumdar Priyodarshi, 1994. *Engineering Aspects of Bioremediation*. En: Remediation of Hazardous Waste Contaminated Soils. Wise Donald L. y Trantolo Debra J. Editores. Marcel Dekker, Inc. U.S.A. Pag55 a 76.

Bauman Bruce, 1991. *Research Needs: Motor Fuel Contaminated Soils*. En: Hydrocarbons Contaminated Soils, Volume I. Calabrese Edward J. y Kostecki Paul T. Editores. Lewis Publishers, Inc. 1991 U.S.A. Pag 41 a 56 R

Bautista Salazar Guadalupe, 2004. *Aplicación de Lodos de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales en la rehabilitación de Suelos Contaminados con Hidrocarburos*. Tesis. Maestría en Ingeniería Ambiental. División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, UNAM. 76 pp.

Bell F.G., Genske D.D. and Bell A.W., 2000. *Rehabilitation of Industrial Areas: case histories from England and Germany*. Environmental Geology 40 (1-2) December 2000. 121 a 134 pp.

Block Robert N., Allworth Norm y Bishop Mark, 1991. *Assessment of Diesel Contamination in Soils*. En: Hydrocarbons Contaminated Soils, Volume I. Calabrese Edward J. y Kostecki Paul T. Editores. Lewis Publishers, Inc. 1991 U.S.A. Pag 135 a 148 R

Cancino M.A., Rodriguera J.D. y Muñoz J.M., 1998. *Restauración de Sitios Contaminados, el papel de la autoridad*. Teorema. México. Año 5. No. 18 Septiembre-Noviembre. pp 73-75.

Carberry Judith B., 1994. *Bioremediation of Hydrocarbons-Contaminated Soils Using Indigenous Microbes*. En: Remediation of Hazardous Waste Contaminated Soils. Wise Donald L. y Trantolo Debra J. Editores. Marcel Dekker, Inc. U.S.A. Pag 317 a 343 R

CETENAL_a, 1976. *Carta Edafológica. Minatitlán E-13-B-33*. Esc. 1:50 000. Comisión de Estudios del Territorio Nacional. México.

CETENAL_b, 1976. *Carta Edafológica. Manzanillo E-13-B-43*. Esc. 1:50 000. Comisión de Estudios del Territorio Nacional. México.

CETENAL_c, 1976. *Carta Geológica. Minatitlán E-13-B-33*. Esc. 1:50 000. Comisión de Estudios del Territorio Nacional. México.

CETENAL, 1977. *Carta Geológica. Manzanillo E-13-B-43*. Esc. 1:50 000. Comisión de Estudios del Territorio Nacional. México.

Clark F., 1965. *Agar-plate method for total microbial count*. En: Methods of soil analysis part 2, chemical and microbiological properties. C.A. Black editor. American Society of Agronomy Inc. Publisher. E.U.A. Pag. 1461 a 1465.

CNA, 1998. *Piezometría 1990-1997, zona de Jaipa-Tapeixtles*. Registros. Comisión Nacional del Agua, Delegación Colima. [s. p.]

CNA, 2002. *Datos de precipitación pluvial, estación meteorológica Minatitlán, Colima*. Comisión Nacional del Agua. Gerencia Estatal en Colima. Subgerencia Técnica. Departamento de Hidrometeorología.

Cole Mattney G, 1994. *Assessment and Remediation of Petroleum Contaminated Sites*. Lewis Publishers. EUA. 359 pp.

Cookson John T., 1995. *Bioremediation Engineering, design and application*. McGaw-Hill, Inc. U.S.A. 524 pp.

Cortinas de Nava Cristina, 2002. *Contaminación por residuos: Prevención y remediación. Manual 2*. Serie Manuales para regular los residuos con sentido común. 1ª Edición. Talleres Gráficos de la Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. 306 p.p.

Cram Donald J., Hammond George S., 1964. *Organic Chemistry*. Second Edition. Mc Graw Hill, Inc. U.S.A., p.p. 846.

Fletcher Ronald D., 1994. *Practical Considerations During Bioremediation*. En: Remediation of Hazardous Waste Contaminated Soils. Wise Donald L. y Trantolo Debra J. Editores. Marcel Dekker, Inc. U.S.A. Pag 39 a 53. R

García E., 1988. *Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen*. Instituto de Geología de la UNAM. México, 246 pp.

GEOEX, 1996. *Estudio Geohidrológico de la Cuenca del Río Minatitlán Mpo. Minatitlán, Colima. Área Peñitas*. Reporte técnico para Consorcio Minero Benito Juárez Peña Colorada. GEOEX, S.A. de C.V.. México. 34 pp.

Heat Jennifer S., Kobils Kristin and Sager Shawn, 1993. *Review of Chemical, Physical, and Toxicologic Properties of Components of Total Petroleum Hydrocarbons*. Journal of Soil Contamination. 2(1):1-25 1993.

Heely Douglas A., Werk Elliot S., y Kowalski Richard G., 1994. *Bioremediation and Reuse of Soils Containing No. 5 Fuel Oil in New England Using an Above-Ground Treatment Cell: A Case Study*. En: Remediation of Hazardous Waste Contaminated Soils. Wise Donald L. y Trantolo Debra J. Editores. Marcel Dekker, Inc. U.S.A. Pag 163 a 174. R

ICGA, 1975. *Ampliación del Estudio Geohidrológico de los Valles Costeros Cercanos a Manzanillo, en el Estado de Colima*. Ingenieros Civiles y Geólogos Asociados, S.A. de C.V.. Secretaría de Recursos Hidráulicos. México. 7.12 mapas. 7.35 pp.

Krieg N. y Holt J., 1984. *Bergey's Manual of Systematic Bacteriology*. Volume 7. Williams and Wilkins editors. E.U.A. Pag. 140 a 254.

LAFQA, 1998. *Determinación del Contenido Total de Hidrocarburos de Petróleo (TPH) con el Espectrofotómetro de Infrarrojo Nicolet Impact 410*. Instrucciones de Operación SOP 3-12. Laboratorio de Análisis Físicos y Químicos del Ambiente, Instituto de Geografía, UNAM. México. 16 pp.

Manahan Stanley E., 1990. *Toxicological Chemistry*. Third Printing. Lewis Publishers, Inc. U.S.A. 317 pp.

Miller Glenn C., Nye Alan C. y James Robert C., 1992. *"Human Health Based Soil Cleanup Guidelines for Diesel Fuel No. 2"*. En: Contaminated Soils Diesel Fuel Contamination. Calabrese E.J. y Kostecki P. T. Eds. Lewis Publishers.

Norma Oficial Mexicana. *NOM-138-SEMARNAT/SS-2003*. Límites máximos de hidrocarburos en suelos y las especificaciones para su caracterización y remediación. Diario Oficial de la Federación 30 de marzo de 2005.

Ortiz, L., Gutiérrez, R.M. y Sánchez, S.E., 1995. *Propuesta de manejo de lodos residuales de la planta de tratamiento de la Ciudad Industrial del Valle de Cuernavaca, Estado de Morelos, México*. Rev. Int. Contam. Ambient. 11 (2), 105-115..

Piotrowski Michael R., 1991. *U.S. EPA-Approved, Full-Scale Biological Treatment for Remediation of a Superfund Site in Montana*. En: Hydrocarbons Contaminated Soils, Volume I. Calabrese Edward J. y Kostecki Paul T. Editores. Lewis Publishers, Inc. 1991 U.S.A. Pag 433 a 457.

Profepa, 1999. *Manual Técnico para la Atención de Emergencias Ambientales*. Dirección General de Emergencias Ambientales, Subprocuraduría de Auditoría Ambiental, Procuraduría Federal de Protección al Ambiente. México. 213 pp.

Profepa, 2000. *Disposiciones y procedimientos para la caracterización y restauración de suelos contaminados*. Versión electrónica en Disco Compacto. Dirección General de Emergencias Ambientales, Subprocuraduría de Auditoría Ambiental. Procuraduría Federal de Protección al Ambiente.

- PIQAYQA, 1992. *Evaluación de las Afectaciones al Ambiente Relacionadas con las Actividades del Consorcio Minero Benito Juárez Peña Colorada, S.A. de C.V.*. Programa de Ingeniería Química Ambiental y Química Ambiental, Instituto de Geografía-Facultad de Química, UNAM. México. 115 pp.
- Piotrowski Michael R., 1991. *U.S. EPA-Approved, Full-Scale Biological Treatment for Remediation of a Superfund Site in Montana*. En: Hydrocarbons Contaminated Soils, Volume I. Calabrese Edward J. y KostECKI Paul T. Editores. Lewis Publishers, Inc. 1991 U.S.A. Pag 433 a 457.
- Roberts John D., Stewart Ross y Caserio Marjorie C., 1974. *Química Orgánica, De Metano a Macromoléculas*. Fondo Educativo Interamericano, S.A.. E.U.A. pp 787.
- Roldán Martín Adriana, 2001. *Biopilas como alternativa de tratamiento para la rehabilitación de suelos contaminados con hidrocarburos*. Tesis. Maestría en Ingeniería Ambiental. División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, UNAM. 183 pp.
- SARH, 1990. *Sinopsis Geohidrológica del Estado de Colima*. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. México. 7 planos esc. 1:200 000. 65 pp.
- Saval Susana., 1995. *“Remediación y Restauración”*. En: PEMEX Ambiente y Energía, los Retos del Futuro. UNAM-Petróleos Mexicanos. México. 151-189 pp.
- Saval Susana, 1996. *Biorremediación de suelos contaminados*. En: Biodegradación de Compuestos Orgánicos Industriales 1. Instituto de Ingeniería, UNAM. México, D.F. pag. 84-94.
- Saval Susana, 1998. *Biorremediación: alternativa para la limpieza de suelos y acuíferos contaminados con hidrocarburos*. Ingeniería y ciencias ambientales. Año 10. Núm. 34. Enero-Febrero de 1998. Pag. 6-9.
- Semarnat, 1998. *Ley general del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente*. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 244 pp
- Semarnat, 2001. *“Bases de política para la prevención de la contaminación del suelo y su remediación”*. 1ª Edición. Subsecretaría de Gestión para la Protección del Ambiente. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 63 p.p.
- Stone William A., 1991. *“Assessing Health Risks Associated with Diesel Contaminated Soils and Groundwater”*. En: Hydrocarbon Contaminated Soils. Vol. 1. Calabrese Edward y KostECKI Paul Editores. Lewis Publishers, Inc. Pags 167 a 179. R
- TPHCWG, 1998. *Analysis of Petroleum Hydrocarbons in Environmental Media..* Total Petroleum Hydrocarbon Criteria Working Group, Vol 1. Weisman Wade Ed. Amherst Scientific Publishers. U.S.A.

TPHCWG, 1998. *Composition of Petroleum Mixtures*. Total Petroleum Hydrocarbon Criteria Working Group. Vol 2. Potter Thomas y Simmons Kathleen Ed. Amherst Scientific Publishers. U.S.A.

TPHCWG, 1997. *Development of Fraction Specific Reference Doses (RfDs) and Reference Concentrations (RfCs) for Total Petroleum Hydrocarbons (TPH). Volume 4*. Prepared for: Chevron, British Petroleum, and the Total Petroleum Hydrocarbon Criteria Working Group. Amherst Scientific Publishers. U.S.A.

Troy M. A., 1994. *Bioengineering of Soils and Ground Waters*. En: Bioremediation. Katherine H. Baker and Diane S. Hersun (eds). McGraw-Hill. pp 173-174.

Troy Marleen A., Allen L. Bruce y Jerger Douglas E., 1994. *Bioremediation of Petroleum-Contaminated Soils at Railroad Facilities*. En: Remediation of Hazardous Waste Contaminated Soils. Wise Donald L. y Trantolo Debra J. Editores. Marcel Dekker, Inc. U.S.A. Pag 227 a 243 R

Van Ruymbeke C., 1996. *"Evaluación de Riesgo y Definición de Criterios de Limpieza"*. En: Memorias del Curso de Biorremediación de Suelos y Acuíferos Contaminados. Programa Universitario del Medio Ambiente, UNAM. México. 24 pp

REFERENCIAS DE INTERNET

ATSDR, 1995. *Toxicological Profile for Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs)*. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. U.S.A. <http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp69.html>. Marzo 2004.

EPA 510-B-94-003 and EPA 510-B-95-007. *How to Evaluate Alternative Cleanup Technologies for Underground Storage Tank Sites: A Guide for Corrective Action Plan Reviewers.* Chapter V. EPA-OUST Underground Storage Tanks. (<http://www.epa.gov/swerust1/pubs/tums.htm>)

EPA_a, 1995. *Land Treatment at the Brown Wood Preserving Superfund Site Live Oak, Florida. Cost and Performance Report*. Office of Solid Waste and Emergency Response Technology Innovation Office. US-EPA. <http://www.clu-in.org/products/costperf/LNDTREAT/Brown.htm>

EPA_b, 1995. *Land Treatment at the Burlington Northern Superfund Site Brainerd/Baxter, Minnesota. Cost and Performance Report*. Office of Solid Waste and Emergency Response Technology Innovation Office. US-EPA. <http://www.clu-in.org/products/costperf/LNDTREAT/Burling.htm>

EPA_c, 1995. *Land Treatment at the Scott Lumber Company Superfund Site Alton, Missouri. Cost and Performance Report*. Office of Solid Waste and Emergency Response Technology Innovation Office. <http://www.clu-in.org/products/costperf/lndtreat/scott.htm>

EPA-OUST_a, 2003. Underground Storage Tanks. Remediation/Cleanup Technologies. *Air Sparging*. <http://www.epa.gov/swerust1/cat/airsparg.htm>

EPA-OUST_b, 2003. Underground Storage Tanks. Remediation/Cleanup Technologies. *Biopiles*. <http://www.epa.gov/swerust1/cat/biopiles.htm>

EPA-OUST_c, 2003. Underground Storage Tanks. Remediation/Cleanup Technologies. *Biosparging*. <http://www.epa.gov/swerust1/cat/biosparg.htm>

EPA-OUST_d, 2003. Underground Storage Tanks. Remediation/Cleanup Technologies. *Bioventing*. <http://www.epa.gov/swerust1/cat/biovent.htm>

EPA-OUST_e, 2003. Underground Storage Tanks. Remediation/Cleanup Technologies. *Landfarming*. <http://www.epa.gov/OUST/cat/landfarm.htm>

EPA-OUST_f, 2003. Underground Storage Tanks. Remediation/Cleanup Technologies. *Low-Temperature Thermal Desorption*. <http://www.epa.gov/swerust1/cat/ltd.htm>

EPA-OUST_g, 2003. Underground Storage Tanks. Remediation/Cleanup Technologies. *Soil Vapor Extraction (SVE)*. <http://www.epa.gov/swerust1/cat/sve1.htm>

FRTR_a, 2004. Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide. Clu-in. *Ex Situ Biological Treatment for Soil, Sediment Bedrock and Sludge*. (http://www.frtr.gov/matrix2/section3/3_4.html)

FRTR_b, 2004. Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide. Clu-in. Ex Situ Biological Treatment for Soil, Sediment Bedrock and Sludge. *Composting*. (http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4_12.html)

FRTR_c, 2004. Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide. Clu-in. Ex Situ Biological Treatment for Soil, Sediment Bedrock and Sludge. *Composting*. (http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4_13a.html)

FRTR_d, 2004. Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide. Clu-in. Ex Situ Biological Treatment for Soil, Sediment Bedrock and Sludge. *Biopiles*. (http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4_11.html)

FRTR_e, 2004. Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide. Clu-in. Ex Situ Biological Treatment for Soil, Sediment Bedrock and Sludge. *Slurry Phase Biological Treatment*. (http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4_14.html)

FRTR_f, 2004. Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide. Clu-in. *In Situ Biological Treatment for Soil, Sediment Bedrock and Sludge*. (http://www.frtr.gov/matrix2/section3/3_1.html)

FRTR_g, 2004. Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide. Clu-in. In Situ Biological Treatment for Soil, Sediment Bedrock and Sludge. *Bioventing*. (http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4_1.html)

FRTR_h, 2004. Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide. Clu-in. In Situ Biological Treatment for Soil, Sediment Bedrock and Sludge. *Enhanced Bioremediation*. (http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4_2.html)

FRTR_i, 2004. Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide. Clu-in. In Situ Biological Treatment for Soil, Sediment Bedrock and Sludge. *Phytoremediation*. (http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4_3.html)

Hunter Nolen y Gilbert Long, 2002. *Comparison of Biopile Effectiveness with Land Treatment*. Memorias del International Petroleum Environmental Conference. Houston, Texas. 2002. http://ipec.utulsa.edu/Conf2001/conf_toc.html

INEGI, 2004. Datos estadísticos del Estado de Colima. <http://www.inegi.gob.mx/geo/default.asp?t=&e=06>

Iturbe Rosario, Torres Luis, Flores Rosa, Flores Carlos, 2001. *Natural attenuation of hydrocarbons in a Mexican refinery*. Memorias del International Petroleum Environmental Conference. Houston, Texas. 2002.

http://ipec.utulsa.edu/Conf2001/rosario_luis_rosa_carlos_38.pdf

Mayfield Colin I., 2003. *Bioremediation*. Department of Biology University of Waterloo.

<http://wvlc.uwaterloo.ca/biology447/modules/intro/assign2/oil2.html>. Agosto 2003.

Navarro Manuel y Venegas Sandra, 2001. *Bioremediation of polluted soil with heavy hydrocarbons onshore location from Lobitos, Talara, Peru*. Informe Técnico. Memorias del International Petroleum Environmental Conference. Houston, Texas. 2002.

http://ipec.utulsa.edu/Conf2001/navarro_vanegas_24.pdf

NYSDEC, 1996. *Biocell and Biopile Designs for Small-Scale Petroleum-Contaminated Soils Projects*. New York State Department of Environmental Conservation. Division of Environmental Remediation. Spill Technology and Remediation Series (STARS). STARS MEMO #2. (<http://www.dec.state.ny.us/website/der/stars/pr6star2.html>)

UFGS, 1998. *Bioremediation Using Landfarming Systems*. Unified Facilities Guide Specifications (UFGS -02190A). US Army Corps of Engineers (USACE) / Naval Facilities Engineering Command (NAVFAC) / Air Force Civil Engineer Support Agency (AFCEA). (<http://www.ccb.org/docs/ufgshome/pdf/02190.pdf>)

U.S. Army Corps of Engineers, 1996. *Bioremediation Using Landfarming Systems (Engineering and Design)*. Technical Letter No. 1110-1-176. Department of the Army. (<http://www.usace.army.mil/usace-docs/eng-tech-ltrs/etl1110-1-176/toc.html>)

US Army Corps of Engineers, 2000. *Bioremediation Treatability Study for Remedial Action at Popile, Inc., Site, El Dorado, Arkansas. Phase II. Pilot-Scale Evaluation*. Engineer Research and Development Center ERDC/EL TR-00-13. September 2000. <http://www.usace.army.mil/inet/informationhttp://www.usace.army.mil/inet/information/usace-docs/eng-tech-ltrs/etl1110-1-176/usace-docs/eng-tech-ltrs/etl1110-1-176/>

Schmidt Wini. *Suelos contaminados con hidrocarburos: la bioremediación como una solución ecológicamente compatible*. Agencia de Cooperación Alemana GTZ en México.

http://www.gtz.org.mx/sitios-contam/articulos/Bioremed_Mex2.pdf