

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON**  
**FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL**



**EVALUACION Y PROPUESTAS DE REMEDIACION  
A SUELOS CONTAMINADOS CON METALES PESADOS  
E HIDROCARBUROS DE PROCEDENCIA INDUSTRIAL**

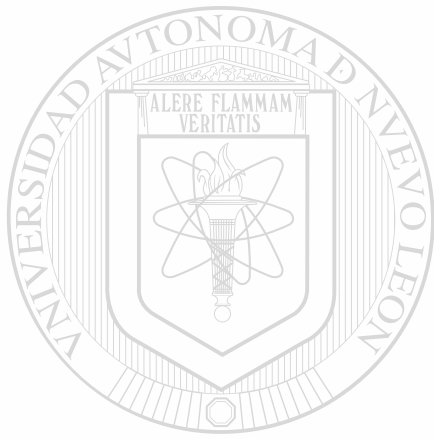
**Por:**

**MARIA GABRIELA ROSSI**

**Como requisito parcial para obtener el Grado de  
MAESTRIA EN CIENCIAS con Especialidad  
en Ingeniería Ambiental**

**JUNIO 2002**

TM  
TD879  
.H4  
R6  
c.1



# UANL

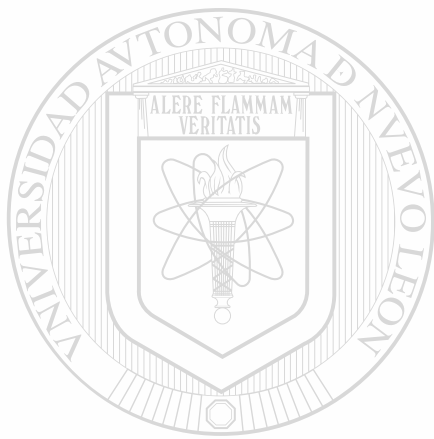
---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

304937



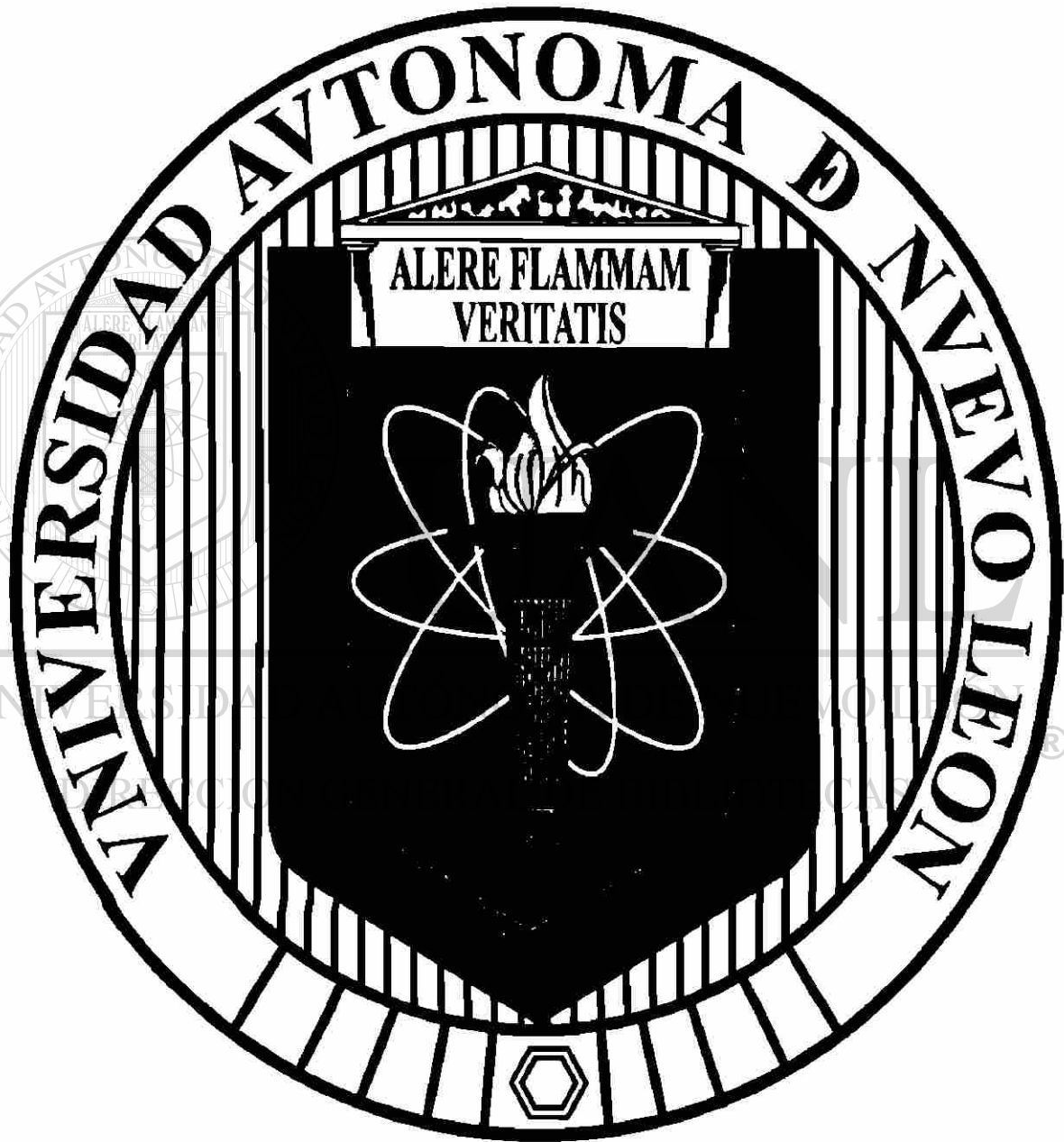
# UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



**EVALUACIÓN Y PROPUESTAS DE REMEDIACIÓN A SUELOS  
CONTAMINADOS CON METALES PESADOS E  
HIDROCARBUROS DE PROCEDENCIA  
INDUSTRIAL**

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

Por

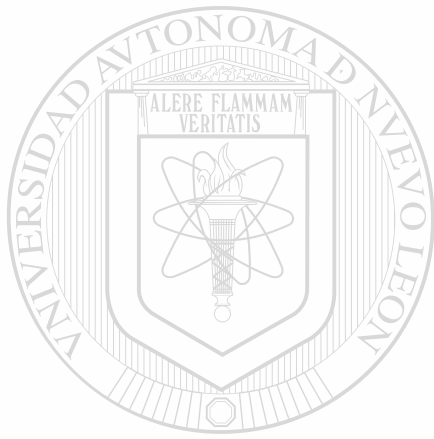
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

**MARÍA GABRIELA ROSSI**

**Como requisito parcial para obtener el Grado de  
MAESTRIA EN CIENCIAS con Especialidad  
en Ingeniería Ambiental**

**JUNIO 2002**

TM  
TD879  
.H4  
R6



# UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



Monterrey, 10 de Junio de 2002

**ING. JUSTINO CÉSAR GONZÁLEZ ÁLVAREZ**  
**SUB-DIRECTOR DE POSGRADO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**  
**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**

Presente:

Solicito a Ud. De la manera más atenta, la tramitación correspondiente para sustentar mi examen de grado, ya que he concluido con la elaboración de mi tesis titulada: "Evaluación y Propuestas de Remediación para Suelos Contaminados con Metales Pesados e Hidrocarburos Procedentes de Fuentes Industriales".

Mi tesis ya ha sido aprobada, en el aspecto técnico por mi directora de tesis, la Dra. Cecilia Rodríguez de Barbarín, y en el aspecto metodológico de redacción y ortografía, por el Arq. Ramón Longoria Ramírez.

Sin más por el momento, quedo desde ya agradecida por su atención.

Atentamente

---

ING. MARÍA GABRIELA ROSSI





**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**  
**FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS**  
**Coordinación de Escuela de Graduados en Ciencias**

**ING. JUSTINO CÉSAR GONZÁLEZ ÁLVAREZ, M. en I.**  
**SUB-DIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**  
**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**

Presente.-

**Asunto: Carta de Aprobación  
de Tesis y Solicitud de  
Revisión y Evaluación.**

Estimado Ing. González Álvarez:

Me dirijo a Usted por medio de la presente para comunicarle que he revisado y aprobado la tesis de mi asesorada, la I.Q. María Gabriela Rossi, dándome por satisfecha con su trabajo titulado:

**"Evaluación y Propuestas de Remediación para Suelos  
Contaminados con Metales Pesados e Hidrocarburos de  
Procedencia Industrial"**

Por lo anterior, le solicito comedidamente que gire las instrucciones pertinentes para la revisión de estilo y la evaluación académica de la tesis.

Sin otro asunto en particular le hago llegar un saludo cordial.

Monterrey, N.L. a 03 de Junio 2002.

**ATENTAMENTE**

**DRA. CECILIA RODRÍGUEZ DE BARBARÍN**  
**DIRECTORA DE TESIS**

c.c.p. I.Q. María Gabriela Rossi

Guerrero y Progreso  
Col. Treviño, Monterrey, N.L.  
Tel.: (Conm.) 83 74 61 37  
y 83 75 34 47 ext. 111 y 107  
e-mail: cerodrig@ccr.dsi.uanl.mx  
cecy\_barbarin@hotmail.com  
cgonzalez@fcq.uanl.mx  
egc@fcq.uanl.mx





**COMPROBANTE DE CORRECCIÓN**

Tesista: MARÍA GABRIELA ROSSI

Tema de la tesis: EVALUACIÓN Y PROPUESTAS DE REMEDIACIÓN A SUELOS CONTAMINADOS CON METALES PESADOS E HIDROCARBUROS DE PROCEDENCIA INDUSTRIAL

Este documento certifica la corrección DEFINITIVA del trabajo de tesis arriba identificado, en los aspectos: ortográfico, metodológico y estilístico.

Recomendaciones adicionales:

(NINGUNAS)

\_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Nombre y firma de quien corrigió:

*Ramón Longoria*

Arq. Ramón Longoria Ramírez

*Justino*

M.I. JUSTINO CÉSAR GONZÁLEZ ALVAREZ  
 SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Ciudad Universitaria, a 8 de JULIO de 2002



09 de agosto de 2002

**ING. JUSTINO CÉSAR GONZÁLEZ ÁLVAREZ, M EN I**  
**SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**  
Presente.-

Estimado M en I González Álvarez:

En atención a su oficio en el que me informa que fui designado Evaluador de la Tesis: **“EVALUACIÓN Y PROPUESTAS DE REMEDIACIÓN PARA SUELOS CONTAMINADOS CON METALES PESADOS É HIDROCARBUROS PROCEDENTES DE FUENTES INDUSTRIALES”**, que presenta la Sra. Ing. María Gabriela Rossi, como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ciencias con especialidad en Ingeniería Ambiental, me permito informar a usted que después de haber leído y evaluado la calidad de la tesis, dictamino que la misma es **APROBADA**.

Sin otro particular por el momento, le manifiesto mi disposición para cualquier duda o aclaración que considere usted pertinente,

Atentamente,



MC Jimmy Luis Loaiza Navía



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS  
Subdirección de Posgrado

**ING. JUSTINO CÉSAR GONZÁLEZ ÁLVAREZ, M. en I.  
SUB-DIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**

Presente.-

**Asunto: Carta de Aprobación  
de Tesis por Revisor.**

Estimado Ing. González Álvarez:

Me dirijo a Usted por medio de la presente para comunicarle que he revisado y aprobado la tesis de nuestra alumna de la Maestría en Ciencias con orientación en Ingeniería Ambiental, la I.Q. María Gabriela Rossi, dándome por satisfecho con la calidad académica y de investigación de su trabajo titulado:

**"Evaluación y Propuestas de Remediación para Suelos Contaminados con Metales Pesados e Hidrocarburos de Procedencia Industrial"**

Sin otro asunto en particular le hago llegar un saludo cordial.

Monterrey, N.L. a 21 de Agosto de 2002.

**ATENTAMENTE**

  
**DR. JUAN MANUEL BARBARÍN CASTILLO  
REVISOR DE TESIS**

c.c.p. I.Q. María Gabriela Rossi

Guerrero y Progreso  
Col. Treviño, Monterrey, N.L.  
Tel. (Conm) 83 74 61 37 y 83 75 34 47  
ext. 140, (Directo) 83 72 70 31  
e-mail: jbarbarin@yahoo.com  
postgrado@fcq.uanl.mx  
jbarbarin@fcq.uanl.mx

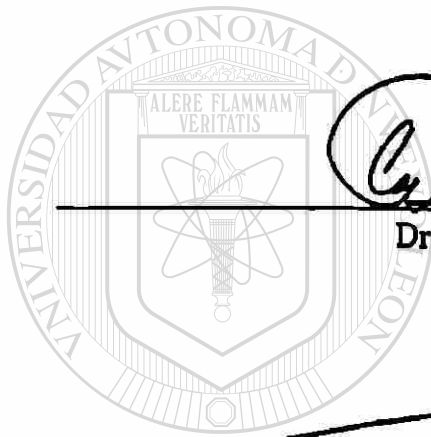
 Educación  
PARA LA VIDA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

®

**EVALUACIÓN Y PROPUESTAS DE REMEDIACIÓN A SUELOS  
CONTAMINADOS CON METALES PESADOS E  
HIDROCARBUROS DE PROCEDENCIA  
INDUSTRIAL**

**Aprobación de la Tesis:**



---

**Dra. Cecilia O. Rodríguez de Barbarín**  
Directora de la Tesis

---

**Dr. Juan Manuel Barbarín Castillo**  
Evaluador de la Tesis

---

**M.C. Jimmy Luis Loaiza Navia**  
Evaluador de la Tesis

---

**Ing. Justino César González Álvarez**  
Sub-Director de Posgrado  
Facultad de Ingeniería Civil

EVALUACIÓN Y PROPUESTAS DE REMEDIACIÓN PARA SUELOS CONTAMINADOS CON METALES  
PESADOS E HIDROCARBUROS DE PROCEDENCIA INDUSTRIAL  
DEDICATORIA

**DEDICATORIA**

Les dedico esta tesis a mis padres, Araceli y Manuel, por su esfuerzo y su apoyo en mis estudios y a mi esposo, Gustavo, que siempre estuvo a mi lado apoyándome e instándome a continuar. Los amo.

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

## **AGRADECIMIENTOS**

**A la Secretaría de Relaciones Exteriores de México por el apoyo económico para la realización de mis estudios.**

**A la Subdirección de Postgrado de la Facultad de Ingeniería Civil, a sus maestros y a su personal, por sus enseñanzas y su apoyo.**

**A la Facultad de Ciencias Químicas, por su apoyo y su confianza.**

**Quiero agradecer especialmente a la Dra. Cecilia Rodríguez de Barbarín, Directora de mi tesis, por todo su apoyo, todo su interés y todo el tiempo que me dedicó.**

**Al Dr. Juan Manuel Barbarín Castillo, quien atendió todas mis inquietudes y dudas con interés y dedicación.**

**A mi familia, por el apoyo moral, la confianza y el amor que siempre me ha brindado.**

---

**A todas las personas que contribuyeron, de una forma u otra, en la realización de este trabajo.**

## RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

**Nombre:**

María Gabriela Rossi

**Candidato para el Grado de:**

Maestro en Ciencias con Especialidad en Ingeniería Ambiental

**Tesis:**

EVALUACIÓN Y PROPUESTAS DE REMEDIACIÓN PARA SUELOS  
CONTAMINADOS CON METALES PESADOS E HIDROCARBUROS DE  
PROCEDENCIA INDUSTRIAL

**Campo de Estudio:**

Ingeniería Ambiental

**Biografía:**

Datos Personales: Nacido en la Ciudad de Buenos Aires, Argentina, el 30 de Marzo de 1965, hija de Manuel Rossi y Araceli Barra.

**Educación:**

Egresada de la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Buenos Aires, Argentina, en el año 1990, obteniendo el grado de Ingeniera Química.

Postgrado en Diseño de Recipientes y Tuberías Sujetos a Presión en la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Buenos Aires, egresada en el año 1991.

**Experiencia Profesional:**

Maestra de la Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Nuevo León desde 1999.

Asesora Técnica en Filtración Productiva S.A. de C.V., desde 2001 hasta la fecha.

Ingeniero Ambiental/Ingeniero de Proyectos en G&E Engineering de México S.A. de C.V., desde 1999 hasta 2000.

Gerente de Control de Calidad e Implementación de ISO 9000 en Corporación General de Alimentos desde 1997 hasta 1998.

Jefe de Producción y Desarrollo de Nuevos Productos en Helga S.R.L., desde 1993 hasta 1997.

Jefe de Control de Calidad y Desarrollo de Nuevos Productos en Besimar S.A. desde 1990 hasta 1992.



## RESUMEN

### **Evaluación y propuestas de remediación para suelos contaminados con metales pesados e hidrocarburos de procedencia industrial**

Por María Gabriela Rossi

El presente estudio se realizó en una empresa ubicada en Ciudad Juárez, Chihuahua, dedicada a la producción de ácido fluorhídrico, además de subproductos como mono y bifluoruro de amonio, la que utiliza materias primas tales como ácido sulfúrico, amoníaco y fluorita de origen mineral.

Debido a manchas de diesel observadas en el suelo durante una evaluación ambiental *in situ* y a la existencia de un montículo de anhídrita como desecho industrial, se supuso la existencia de contaminación del suelo como consecuencia de su actividad, además de la causada por las posibles fugas en lugares donde se manipulaban y se almacenaban hidrocarburos.

Se realizó un "Estudio de Afectación de Suelos" en el lugar, en Julio de 1997, pero estos estudios se hicieron hasta una profundidad limitada (7,6 m), además de ser limitados también en cuanto a la cantidad de especies químicas analizadas, por lo que fue necesario ampliarlo con un estudio complementario.

Para efectuar el estudio complementario se realizaron sondeos en algunos sectores, hasta alcanzar el nivel del agua subterránea, se sondearon zonas que no habían sido estudiadas previamente y, por último, se analizó la presencia de sustancias químicas que no habían sido analizadas. Además se estudió la estratificación del suelo.

Muchas veces la cantidad de contaminantes detectados puede ser excesiva y, sin embargo, a menudo sólo unos pocos de éstos provocan riesgos a la salud. El resto de los contaminantes detectados tienen una mínima influencia en el riesgo total.

Por este motivo se realizó un análisis minucioso de los potenciales efectos para la salud causados por cada una de las sustancias químicas presentes en el sitio de estudio, de acuerdo al siguiente procedimiento:

- Se determinó qué sustancias químicas están presentes como contaminantes y cuáles están presentes como componentes del suelo nativo mediante:
  - Comparación entre muestras del sitio en estudio y muestras del suelo nativo sin contaminar.
  - Comparación de las sustancias químicas presentes en el suelo con las que se encuentran en los depósitos de minerales adyacentes.
- Se estudiaron las rutas de exposición de cada contaminante y su toxicidad específica.
- Se calculó la toxicidad equivalente de cada contaminante.
- Se seleccionaron los contaminantes significativos.
- Se evaluaron los efectos aditivos de los contaminantes no significativos, para poder estimar los riesgos a la salud en los casos en que se hallaron presentes dos o más contaminantes.

---

Una vez conocidos los contaminantes presentes en los suelos del área estudiada, también se caracterizó la extensión de la contaminación del lugar.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

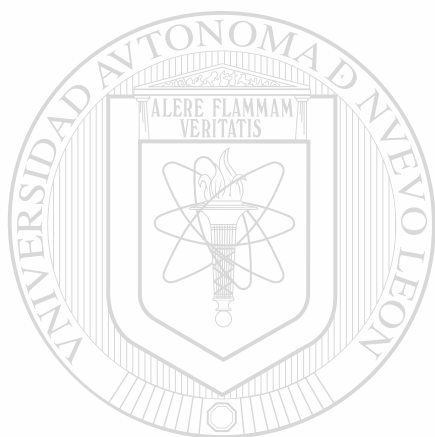
En base a la estimación de los potenciales riesgos para la salud y para el medio ambiente, provocados por dichos contaminantes, se identificaron los niveles de remediación que deben alcanzarse, con el fin de proteger tanto la salud humana como el medio ambiente.

Por último, se evaluaron las distintas técnicas de remediación existentes para cada contaminante, y se propusieron las técnicas a utilizar en base a:

- Factibilidad de la alternativa propuesta para la remediación de los contaminantes presentes

EVALUACIÓN Y PROPU STAS DE REMEDIACIÓN PARA SUELOS CONTAMINADOS CON METALES  
PESADOS E HIDROCARBUROS DE PROCEDENCIA INDUSTRIAL  
RESUMEN

- **Nivel de remediación que sea posible alcanzar mediante las alternativas propuestas, en comparación con el nuevo uso del suelo y de la propiedad**
- **Tiempo que tomará la remediación, según las distintas alternativas**
- **Costo de las distintas alternativas**
- **Compatibilidad de las opciones con las características regionales**



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

## PRÓLOGO

México, junto con Canadá y Estados Unidos, forman parte del Tratado de Libre Comercio, debido a lo cual, gran cantidad de empresas de capital estadounidense han establecido alguna subsidiaria en territorio mexicano. Esto trae como consecuencia que dichas empresas, hoy, deban cumplir con los más estrictos estándares ambientales; en primer lugar, deben apegarse a la normatividad mexicana y, en caso de ausencia de dicha normatividad, deben cumplir las condiciones establecidas por la Environmental Protection Agency (EPA).

El presente estudio se refiere a una empresa de capital norteamericano, recientemente adquirida por una empresa multinacional del mismo origen, ubicada en la frontera, específicamente en Ciudad Juárez, Chihuahua, dentro de una zona delimitada como polígono de alto riesgo.

Durante muchos años se acumuló a cielo abierto, dentro de los límites del terreno de la planta, un gran montículo de anhídrita que ocupa todo el límite sur de la propiedad.

Este material ha sido analizado y estudiado en repetidas ocasiones por las autoridades competentes, incluyendo la PROFEPA y el Municipio. Como resultado de esos análisis CRETIB, se llegó a la conclusión de que el material no presenta peligrosidad. Sin embargo, la anhídrita sometida a esos análisis es la producida en la tercera etapa de la historia de la planta, la que anteriormente tuvo otros propietarios que se abastecieron de fuentes de fluorita de calidad inferior o material de ganga, con contenidos importantes de metales pesados.

Debido a la presión ejercida por los medios periodísticos, junto con personas de comunidades adyacentes afectadas en su salud y las autoridades competentes, los nuevos propietarios de la empresa decidieron evaluar el estado del suelo y acordaron con las autoridades llevar a cabo las tareas de remediación requeridas, de acuerdo con lo establecido en el Tratado de Libre Comercio.

## TABLA DE CONTENIDO

Capítulo	Página
1. INTRODUCCION	1
1.1. Toxicidad de una sustancia	1
1.1.1. Rutas de exposición	2
1.1.2. Dosis	4
1.1.3. Exposición	4
1.1.4. Reacción e interacción	5
1.1.5. Efectos tóxicos	5
1.2. Contaminación de suelos	6
2. ANTECEDENTES	9
2.1. Identificación del sitio de estudio	9
2.2. Características del sitio	9
2.2.1. Localización	9
2.2.2. Clima	10
2.2.2.1. Condiciones de temperatura	10
2.2.2.2. Precipitaciones	11
2.2.2.3. Estaciones	11
2.2.2.4. Tormentas tropicales	12
2.2.2.5. Desertificación	13
2.2.2.6. Otras características climáticas	13
2.2.2.7. Intemperismos climáticos	14
2.2.3. Fisiografía regional	14
2.2.3.1. Fisiografía del sitio	16
2.2.4. Historia geológica	16
2.2.4.1. Geología del sitio	17
2.2.4.2. Movimientos tectónicos	18

<b>Capítulo</b>	<b>Página</b>
2.2.5. Geografía: geomorfología y orografía regional	18
2.2.6. Hidrología regional	21
2.2.6.1. Hidrología del sitio	22
2.2.6.2. Unidades hidrológicas	23
2.2.7. Vegetación	25
2.2.7.1. Matorrales desérticos	25
2.3. Descripción de los procesos productivos de la planta en estudio	27
2.3.1. Planta de ácido fluorhídrico	28
2.3.1.1. Secado de la fluorita	28
2.3.1.2. Producción de HFA	29
2.3.1.3. Ultrapurificación del HFA	31
2.3.1.4. Planta de HF-70%	32
2.3.2. Planta de bifluoruro de amonio	32
2.3.3. Planta de solución de fluoruro de amonio	33
2.3.4. Servicios auxiliares	34
2.3.5. Generación de residuos no peligrosos	35
2.3.5.1. Anhidrita	35
2.3.5.2. Chatarra	36
3. ESTUDIO PREVIO DE AFECTACIÓN DE SUELOS	37
3.1. Perforaciones profundas	37
3.2. Perforaciones manuales	38
3.3. Muestras de suelo	38
3.3.1. Área del antiguo tanque subterráneo de almacenamiento de combustible (U)	38
3.3.2. Área del tanque superficial de diesel (A)	39
3.3.3. Lagunas de evaporación (L)	39
3.3.4. Área de procesos químicos (P)	40

<b>Capítulo</b>	<b>Página</b>
3.3.5. Área de la antigua planta de procesos químicos (O)	40
3.3.6. Perímetro de la propiedad (B)	40
3.4. Análisis de los resultados	41
<b>4. ESTUDIO COMPLEMENTARIO DE AFECTACIÓN DE SUELOS</b>	<b>42</b>
4.1. Introducción	42
4.2. Estudios de suelos	44
4.3. Estudio de terrenos adyacentes	47
4.4. Resultado de las perforaciones	48
4.5. Resultado de los análisis químicos	48
4.5.1. Montículo de anhidrita (M)	49
4.5.2. Cárcamo de tratamiento de residuos (R)	49
4.5.3. Tanques de diesel (D)	50
4.5.4. Tanques sépticos (S)	50
4.5.5. Propiedades adyacentes (E)	50
4.6. Conclusiones previas	51
<hr/>	
<b>5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS</b>	<b>52</b>
5.1. Introducción	52
5.2. Determinación de especies presentes como contaminantes	53
5.2.1. Geología económica - Depósitos de minerales adyacentes	53
5.2.2. Análisis de la estratigrafía del sitio	54
5.2.2.1. Arenas y limos	55
5.2.2.2. Arcillas	55
5.2.2.3. Carbonato de calcio	56
5.2.2.4. Coloración del suelo	56
5.2.3. Comparación de muestras de suelo contaminado con muestras de suelo nativo	56

TABLA DE CONTENIDO

<b>Capítulo</b>	<b>Página</b>
5.3. Selección de los contaminantes significativos	58
5.3.1. TPH	60
5.4. Evaluación de los contaminantes no significativos	61
5.4.1. Efectos sobre la salud	62
5.4.2. Efecto aditivo	64
6. REVISIÓN A LAS ALTERNATIVAS DE REMEDIACIÓN	66
6.1. Introducción	66
6.2. Alternativas de remediación	66
6.2.1. TPH	67
6.2.1.1. Remediaciones biológicas	67
6.2.1.1.1. Bioceldas	70
6.2.1.1.2. Aireación o aspersión de aire	72
6.2.1.1.3. Biodegradación	76
6.2.1.1.4. Bioextracción	78
6.2.1.1.5. Bioventilación	82
6.2.1.1.6. Atenuación natural	86
6.2.1.2. Remediaciones físico-químicas	92
6.2.1.2.1. Desorción térmica a baja temperatura	93
6.2.1.2.2. Extracción de vapor de suelos	98
6.2.1.2.3. Extracción en dos fases	103
6.2.2. Arsénico	106
6.2.2.1. Remediaciones biológicas	107
6.2.2.1.1. Medidas fitocorrectivas	107
6.2.2.2. Remediaciones físico-químicas	112
6.2.2.2.1. Enjuague del suelo <i>in situ</i>	112
6.2.2.2.2. Lavado del suelo	115



<b>Capítulo</b>	<b>Página</b>
<b>7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>120</b>
7.1. Introducción	120
7.2. Alternativas de remediación propuestas	121
7.2.1. Área del antiguo tanque subterráneo de almacenamiento de combustible	123
7.2.2. Área del tanque superficial de diesel	124
7.2.3. Área de la laguna de evaporación	125
7.2.4. Área de proceso químico actual	126
7.2.5. Área de proceso químico antiguo	127
7.2.6. Perímetro de la propiedad	128
7.2.7. Área del cárcamo de tratamiento de residuos	128
7.2.8. Área del montículo de anhidrita	129
TABLAS	130
GRÁFICOS	176
ANEXO A - FOTOGRAFÍAS	197
ANEXO B - ESTRATIGRAFÍA	201
GLOSARIO	218
ABREVIATURAS	230
CITAS BIBLIOGRÁFICAS	232

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla</b>	<b>Página</b>
3.1 Lista de muestras	130
3.2 Análisis en el área del antiguo tanque de almacenamiento de combustible (U)	131
3.3 Análisis en el área del tanque superficial de diesel (A)	132
3.4 Análisis en el área de la laguna de evaporación (L)	132
3.5 Análisis en el área de proceso químico actual (F)	135
3.6 Análisis en el área de procesos químicos antigua (O)	137
3.7 Análisis en el perímetro de la propiedad (B)	138
4.1 Control de muestras	139
4.2 Resumen de sustancias químicas detectadas en el suelo	140
4.3 Resumen de sustancias detectadas en el suelo de las propiedades adyacentes	141
5.1 Parámetros de fondo	142
5.2 Presencia de contaminantes en concentraciones superiores a los parámetros de fondo - Área del antiguo tanque subterráneo de almacenamiento de combustible	143
5.3 Presencia de contaminantes en concentraciones superiores a los parámetros de fondo - Área del tanque superficial de diesel	144
5.4 Presencia de contaminantes en concentraciones superiores a los parámetros de fondo - Área de la laguna de evaporación	145
5.5 Presencia de contaminantes en concentraciones superiores a los parámetros de fondo - Área de proceso químico actual	147
5.6 Presencia de contaminantes en concentraciones superiores a los parámetros de fondo - Área de procesos químicos antigua	150

LISTA DE TABLAS

<b>Tabla</b>		<b>Página</b>
5.7	Presencia de contaminantes en concentraciones superiores a los parámetros de fondo – Perímetro de la propiedad	150
5.8	Presencia de contaminantes en concentraciones superiores a los parámetros de fondo – Montículo de anhidrita	151
5.9	Presencia de contaminantes en concentraciones superiores a los parámetros de fondo – Área del antiguo tanque séptico	151
5.10	Presencia de contaminantes en concentraciones superiores a los parámetros de fondo – Cárcamo de tratamiento de residuos	151
5.11	Presencia de contaminantes en concentraciones superiores a los parámetros de fondo – Área del tanque séptico actual	152
5.12	Presencia de contaminantes en concentraciones superiores a los parámetros de fondo – Propiedad adyacente	152
5.13	Presencia de contaminantes en concentraciones superiores a los parámetros de fondo – Aguas abajo del tanque de diesel	152
5.14	Contaminantes significativos y a evaluar – Área del antiguo tanque subterráneo de almacenamiento de combustible	153
5.15	Contaminantes significativos y a evaluar – Área del tanque superficial de diesel	154
5.16	Contaminantes significativos y a evaluar – Área de la laguna de evaporación	155
5.17	Contaminantes significativos y a evaluar – Área de proceso químico actual	157
5.18	Contaminantes significativos y a evaluar – Área de proceso químico antigua	158
5.19	Contaminantes significativos y a evaluar – Perímetro de la propiedad	159
5.20	Contaminantes significativos y a evaluar – Área del montículo de anhidrita	159

<b>Tabla</b>	<b>Página</b>
5.21 Contaminantes significativos y a evaluar - Cárcamo de tratamiento de residuos	160
5.22 Contaminantes significativos y a evaluar - Propiedad adyacente de la antigua excavación	160
5.23 Sondeos con mayor presencia de contaminantes no significativos y/o contaminantes significativos por debajo de la concentración de riesgo	161
5.24 Cálculo de coeficientes aditivos - Área del tanque de combustible superficial	162
5.25 Cálculo de coeficientes aditivos - Área de los tanques de diesel	163
5.26 Cálculo de coeficientes aditivos - Área de la laguna de evaporación	163
5.27 Cálculo de coeficientes aditivos - Área de proceso	164
5.28 Cálculo de coeficientes aditivos - Área de la planta antigua	164
5.29 Cálculo de coeficientes aditivos - Perímetro de la propiedad	165
5.30 Cálculo de coeficientes aditivos - Área del montículo de anhidrita - Interfase entre el montículo y el suelo nativo	166
5.31 Cálculo de coeficientes aditivos - Área del montículo de anhidrita - Superficie del montículo	167
5.32 Cálculo de coeficientes aditivos - Área del montículo de anhidrita - Aguas abajo del montículo	169
5.33 Cálculo de coeficientes aditivos - Área del cárcamo de tratamiento de residuos	170
5.34 Cálculo de coeficientes aditivos - Área del antiguo tanque séptico	171
5.35 Cálculo de coeficientes aditivos - Área del tanque séptico en uso	172
5.36 Cálculo de coeficientes aditivos - Aguas abajo del tanque de diesel	173
5.37 Cálculo de coeficientes aditivos - Propiedad con la antigua excavación	173
5.38 Áreas a remediar	175

## 1. INTRODUCCIÓN

Según el Centro para Procesos Biológicos en Suelos y Sedimentos Contaminados de Dinamarca,<sup>1</sup> en la actualidad aún se siguen utilizando sustancias catalogadas como peligrosas, tanto para la salud del hombre como para los ecosistemas, a pesar de que algunos compuestos identificados como tóxicos ya están siendo reemplazados. En muchos procesos industriales se utilizan productos químicos peligrosos de los que aún no se han encontrado los substituyentes adecuados, por lo que la liberación de estas sustancias al medio ambiente debe ser minimizada haciendo uso de tecnologías limpias, particularmente selectivas para los compuestos peligrosos.

Algunos compuestos químicos se consideran peligrosos por el riesgo de incendio o explosión que conllevar; se los considera peligrosos por una cuestión de seguridad, más que por su toxicidad. La toxicidad de una sustancia es su potencial de causar daño y es sólo uno de los factores para determinar su peligrosidad.<sup>2</sup>

Según la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA) de México,<sup>3</sup> los materiales peligrosos son aquellos elementos, sustancias, compuestos, residuos o mezclas de ellos que, independientemente de su estado físico, representen un riesgo para el ambiente, la salud o los recursos naturales, por sus características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables o biológico-infecciosas.

### 1.1 TOXICIDAD DE UNA SUSTANCIA

Según el organismo "California Occupational Health Branch de U.S.A.",<sup>4</sup> la toxicidad de una sustancia es la habilidad de causar efectos dañinos. Estos efectos pueden ser sobre una sola célula, un grupo de células, un órgano, o sobre todo el cuerpo. El efecto tóxico puede dañar visiblemente, disminuir el rendimiento de una persona o ser detectado sólo a través de estudios. Cuando una sustancia química causa daño sólo cuando la persona se expone a grandes cantidades, se considera que esta sustancia es

relativamente no tóxica, pero cuando una pequeña cantidad de sustancia es capaz de causar daño, entonces se la considera tóxica.

La toxicidad de una sustancia depende de tres factores: su estructura química, la cantidad de sustancia absorbida por el cuerpo y la habilidad del cuerpo para eliminar esta sustancia o convertirla en una sustancia menos tóxica. De éstos, el factor más importante es su estructura química: cómo está hecha, qué tipo de átomos y moléculas contiene y cuál es su estructura cristalina.

La toxicidad de una sustancia es sólo uno de los factores utilizados para determinar si es peligrosa. Su peligrosidad depende de los siguientes factores:

- **Toxicidad:** qué cantidad de sustancia se necesita para causar daño
- **Ruta de exposición:** cómo entra la sustancia al cuerpo
- **Dosis:** la cantidad que entra al cuerpo
- **Duración:** tiempo de exposición
- **Reacción e interacción:** otras sustancias a las que se está expuesto
- **Sensibilidad:** cómo reacciona el cuerpo a la sustancia, en comparación a otras personas.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

### 1.1.1 RUTAS DE EXPOSICIÓN

La exposición a una sustancia química generalmente ocurre por inhalación, contacto con la piel u ojos o ingestión.

- **Inhalación:** la exposición más común se presenta cuando se introduce una sustancia a los pulmones, a través de la respiración. En el caso de estudio, puede haber pequeñas partículas en forma de polvos o neblinas presentes en el aire. Algunas de estas partículas, dependiendo del tamaño, pueden depositarse en los bronquios y/o alvéolos, pudiendo causar daños pulmonares. Otras partículas

pueden disolverse y ser absorbidas por el torrente sanguíneo, afectando a otras partes del cuerpo.

- **Contacto dérmico:** la piel actúa como una barrera protectora contra las sustancias químicas extrañas. Sin embargo, algunas sustancias pueden atravesar la piel y penetrar al torrente sanguíneo. La absorción dérmica es una de las rutas más comunes de exposición por contacto con suelos contaminados. La exposición dérmica puede seguir tres mecanismos: contacto directo, contacto indirecto a través de una superficie contaminada y transporte a la piel a través de polvos, humos o neblinas.
- **Ingestión:** La fuente de exposición más común en el trabajo es la ingestión de sustancias químicas. Éstas pueden ingerirse por haber tenido contacto con las manos, con la ropa o por haber contaminado, accidentalmente, la comida, la bebida o los cigarrillos. Los polvos metálicos, como plomo o cadmio, son fácilmente ingeridos.

Los niños en edad preescolar y los fetos en gestación son los segmentos de población más vulnerables a la exposición con metales.<sup>5</sup> Lo anterior se debe a una combinación de factores:

1. El sistema nervioso todavía en desarrollo en los fetos y los neonatos incrementa la susceptibilidad a los efectos neurotóxicos de metales como el plomo.
2. Los niños son más propensos a jugar en lugares sucios y a poner sus manos y otros objetos en la boca, incrementando la posibilidad de ingestión de sustancias presentes en el suelo.
3. La eficiencia de absorción de metales por el tracto intestinal es mayor en los niños que en los adultos.
4. Las deficiencias nutricionales en calcio y hierro, prevalentes en los niños, facilitan la absorción de plomo y exacerban los efectos tóxicos del mismo.

### 1.1.2 DOSIS

En general, mientras mayor es la cantidad de sustancias que ingresan al cuerpo, mayor es el efecto producido. A esta relación se le denomina dosis. La dosis depende de cuatro factores, en el caso de que un compuesto químico tóxico ingrese por inhalación:

- La concentración de sustancias químicas en el aire
- La forma de respirar de la persona
- La proporción de la sustancia inhalada que permanece en los pulmones y la cantidad que de ella se absorbe por el torrente sanguíneo
- La duración de la exposición

Como algunas sustancias son más tóxicas que otras, es necesario que la exposición sea mínima. La menor concentración capaz de causar efectos nocivos se denomina concentración límite y este factor es diferente para cada sustancia química. Concentraciones por encima de la concentración límite indican que se podría afectar la salud.

### 1.1.3 EXPOSICIÓN

Mientras mayor es la exposición a una sustancia, mayor es la probabilidad de que ésta afecte la salud. Si la dosis es pequeña, no habrá efectos, independientemente del tiempo de exposición. A mayores concentraciones puede no haber efectos con períodos de exposición cortos, pero la exposición repetitiva puede causar daños. La exposición continua, por largos períodos de tiempo, a menudo es muy peligrosa porque algunas sustancias pueden acumularse en el cuerpo o porque no hay oportunidad de que se



repare el daño causado. La combinación de dosis y exposición es lo que se llama nivel de exposición.

Los efectos de una sustancia pueden no aparecer inmediatamente después de la exposición, incluso pueden pasar años antes de que aparezcan. La demora entre el inicio de la exposición y la aparición de los efectos se denomina período latente.

Una sustancia química puede producir efectos por exposición aguda o crónica. Los primeros son los que aparecen inmediatamente después de la exposición o, a lo sumo, después de algunas semanas. Los efectos crónicos son los que aparecen por exposiciones repetitivas y tienen un período latente extenso.

#### 1.1.4 REACCIÓN E INTERACCIÓN

Dependiendo del tipo de trabajo se puede estar expuesto a más de una sustancia química. Una reacción ocurre cuando las sustancias químicas se combinan para dar una nueva sustancia con propiedades distintas de las originales, pudiendo ser esta última aún más peligrosa. Una interacción ocurre cuando la exposición a más de una sustancia produce efectos en la salud distintos de los efectos que cada una de las sustancias aisladas pueden producir.

#### 1.1.5 EFECTOS TÓXICOS

Los efectos tóxicos pueden ser de dos tipos, dependiendo del lugar donde se muestra la toxicidad. Efecto local es aquel que se presenta cuando una sustancia química causa daño donde se produjo el contacto. Los puntos donde el efecto local se produce con mayor frecuencia son la piel, los ojos, la nariz, la garganta y los pulmones. Las sustancias tóxicas también pueden ingresar a los órganos internos, a través del torrente sanguíneo y estos efectos se denominan sistémicos. Los órganos internos más

comúnmente afectados son el hígado, los riñones, el corazón, el sistema nervioso y el sistema reproductivo.

Por otra parte, los efectos tóxicos pueden variar, dependiendo de la forma de la sustancia. En el caso de estudio, las formas físicas de interés son sólidos, polvos, humos y neblinas.

- **Sólidos:** La mayoría de los sólidos de tamaño de partícula mayor a 250 micrones no son peligrosos, debido a que no pueden ser absorbidos por el cuerpo.
- **Polvos:** Consisten en pequeñas partículas sólidas suspendidas en el aire y pueden formarse cuando se pulverizan los sólidos o cuando el aire levanta las partículas depositadas. Estos polvos pueden ser peligrosos debido a que pueden inhalarse y retenerse dentro del tracto respiratorio. Las partículas más grandes generalmente quedan retenidas en la nariz, pero las más pequeñas pueden llegar a los pulmones y dañarlos. Algunos polvos, como los de plomo, pueden ingresar al torrente sanguíneo a través de los pulmones; otros, como los polvos orgánicos, pueden explotar en el aire cuando se alcanzan altas concentraciones.
- **Humos:** Consisten en partículas muy pequeñas de sólidos (a menudo de metales) en el aire, que son peligrosos debido a la facilidad con que se inhalan. El tamaño de las partículas que componen los humos es mucho menor que el tamaño de las partículas en los polvos.
- **Neblinas:** Consisten en partículas líquidas de distintos tamaños, producidas por agitación o vaporización de líquidos.

## 1.2 CONTAMINACIÓN DE SUELOS

Los suelos contaminados constituyen un problema muy conocido, pero difícil de resolver en el área de la protección ambiental. Estos suelos a menudo contienen una mezcla de compuestos tóxicos tales como disolventes, hidrocarburos poliaromáticos, hidrocarburos aromáticos clorados y metales pesados procedentes de la actividad

industrial, actual o pasada, los cuales deben ser remediados utilizando la tecnología adecuada.

Los sitios contaminados no sólo encierran un problema ambiental en sí mismos, sino que también representan un importante problema ecológico. Los diferentes contaminantes provocan un problema complejo en la comunidad biológica y en la salud humana. Las comunidades presentes en el suelo se ven afectadas de manera directa e indirecta. Por ejemplo, una bacteria puede no verse afectada directamente, pero si se ven afectados los protozoos con los que se alimenta, el número de bacterias disminuirá debido a la liberación del contaminante en cuestión. Además, algunos contaminantes pueden persistir en el suelo, por muchos años, sin degradarse.

Datos provenientes de estudios de salud de 951 sitios contaminados, realizados por la Agencia de Substancias Tóxicas y Registro de Decesos de Estados Unidos,<sup>5</sup> mostraron que los metales y los compuestos orgánicos volátiles (VOCs de sus siglas en Inglés) fueron los contaminantes más detectados, los cuales, a su vez, comúnmente migraban desde las áreas de disposición hacia el agua subterránea. Los metales estaban presentes en 564 (59%) de los 951 sitios, incluyendo plomo, cromo, arsénico y cadmio, entre los metales encontrados con mayor frecuencia.

Según la Administración de Salud y Seguridad Ocupacional de Estados Unidos (OSHA),<sup>2</sup> las sustancias peligrosas y tóxicas pueden definirse como aquellas presentes en el lugar de trabajo, que son capaces de causar daño. En esta definición, el término "sustancias químicas" incluye polvos, mezclas y materiales comunes como pinturas, combustibles y solventes. La OSHA actualmente regula la exposición a aproximadamente 400 sustancias y, además, contiene información sobre unos 1 500 productos. Por otra parte, el inventario de sustancias químicas de la Environmental Protection Agency (EPA) contiene información sobre 62 000 sustancias químicas, mientras que existen Hojas de Seguridad (MSDS) para más de 100 000 sustancias químicas.

Cada sitio contaminado con sustancias peligrosas requiere un examen particular para determinar los riesgos para la salud de las personas expuestas a ellas. Este examen debe considerar la extensión de la contaminación y el posible contacto con la gente, la toxicología de las sustancias liberadas y la naturaleza y extensión de la posible exposición por parte de la población vulnerable.

Las sustancias químicas peligrosas presentes en el suelo, en el sitio que se estudiará durante el desarrollo de este trabajo, son:

- **Metales Pesados:** arsénico, cadmio, plomo, mercurio, bario, cromo, plata, aluminio, calcio, cobalto, cobre, hierro, magnesio, manganeso, níquel, potasio, sodio, zinc y vanadio;
- **Hidrocarburos Totales de Petróleo (TPH)** procedentes de los tanques de almacenamiento de combustible diesel;
- **Compuestos Orgánicos Volátiles (VOCs)** como tolueno, xileno, cetonas y diclorobenceno;
- **Compuestos Orgánicos Semivolátiles (SVOCs)** como fluoreno, antraceno, ácido benzoico, piridina y metilfenol; y
- **Bifenilos Policlorados (PCBs)**, específicamente Aroclor 1242. Los PCBs tienen doscientos nueve isómeros posibles en teoría, pero existen cerca de cien formulaciones comerciales. El Aroclor 1242 es una combinación de isómeros de formulación comercial.

## 2. ANTECEDENTES

### 2.1 IDENTIFICACIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO

El lugar seleccionado para la ejecución del presente estudio es una planta industrial ubicada en el km 23.5 de la Carretera Panamericana, al Norte de Ciudad Juárez, en el Estado de Chihuahua, México. El terreno que ocupa esta planta industrial fue originalmente una superficie rural, sin desarrollo hasta el año 1978.

En 1979 se inició a la construcción de una planta industrial productora de ácido fluorhídrico, demorándose el inicio de la producción, por diversos motivos, hasta 1984. En 1993, esta planta cambió de propietarios y se llevaron a cabo importantes modificaciones en el proceso, para poder diversificar la producción.

### 2.2 CARACTERÍSTICAS DEL SITIO

#### 2.2.1 LOCALIZACIÓN

El sitio de estudio se encuentra ubicado al Norte del municipio de Juárez, en el Estado de Chihuahua. Este municipio ocupa el 1,4% de la superficie del Estado. Las coordenadas geográficas extremas del municipio son: límite norte a los 31° 47' de Latitud Norte; límite sur a los 31° 07' de Latitud Norte; límite este a los 106° 11' de Longitud Oeste; y límite poniente a los 106° 54' de Longitud Oeste.<sup>6</sup>

El municipio de Juárez colinda al norte con los Estados Unidos de América; al este con los Estados Unidos de América y el municipio de Guadalupe; al sur con los municipios de Guadalupe, Ahumada y Ascensión; y al oeste con el municipio de Ascensión.

Ciudad Juárez se encuentra ubicada en la parte norte del Estado de Chihuahua, en los paralelos 31°44'22" de Latitud Norte y 106°29'29" de Longitud Oeste y a una altitud de 1116 msnm.

## 2.2.2 CLIMA

Existen cuatro zonas climáticas principales en el estado: árida, semiárida, tropical húmeda y subtropical húmeda y seca.<sup>7</sup>

El sistema modificado de Koppen es el que se usa en las cartas oficiales de climas de México. Este sistema incorpora subdivisiones que indican áreas de uso potencial del suelo para la agricultura, mediante un señalamiento de las áreas más secas:

La aridez domina el paisaje de Chihuahua; de los dos tercios a las tres cuartas partes del Estado son clasificadas como de climas áridos y semiáridos, con una proporción aproximadamente igual para ambos tipos de clima. Según la carta de climas CGSNEGI, el 100% de la superficie municipal tiene un clima del tipo *muy seco templado*, clave BWk árido, como se indica en la Figura 2.1

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

### 2.2.2.1 Condiciones de temperatura

El más importante control climático de la temperatura en Chihuahua es la altitud, como resultado de lo cual, las isotermas y las isoyetas generalmente corren paralelas con la orientación de las montañas. Es sólo en las secciones norte y centro-oriental del estado, en donde hay muy poca variación de altitud, que los datos de temperatura reflejan un zoneamiento dependiente de las latitudes.

La temperatura media anual en Ciudad Juárez es de 17,7 °C (promedio reportado para el período comprendido entre 1957 y 1991), contando con registros máximos de 45,5 °C y mínimos de hasta -15 °C.

### 2.2.2.2 Precipitaciones

En el Estado de Chihuahua existe un considerable contraste entre los totales de precipitación promedio anual recibidos en las zonas áridas y los que se tienen sobre la sierra. En la región de cuencas y sierras, por lo general, la lluvia es menor a 300 mm anuales, que se incrementa hasta 500 mm por año en los taludes orientales de la serranía. Por otra parte, las precipitaciones en la sierra varían de 500 a 1250 mm anuales. Como resultado de la elevación orográfica, la proximidad al Océano Pacífico y los vientos predominantes del sudoeste, la mayor parte de las lluvias en el estado se concentra en la parte sur de la sierra y en las tierras bajas del interior, a diferencia de la zona norte, que permanece seca.

En Ciudad Juárez, la precipitación promedio anual (promedio entre los años 1957 y 1991) fue de 256 mm, con una precipitación máxima anual de 461,5 mm y una mínima de 119,6 mm. Los meses de sequía corresponden a los meses de octubre a junio, mientras que la temporada de lluvias corresponde a los meses de julio, agosto y septiembre.

### 2.2.2.3 Estaciones

El estado de Chihuahua recibe más de dos tercios de su precipitación durante el verano, a mediados del año, durante los meses de mayo a octubre y registra las máximas durante julio y agosto. Ninguna estación meteorológica registra un máximo de precipitaciones en invierno; las del verano coinciden con la expansión de la celda de alta presión subtropical semipermanente.

A medida que avanza el verano, los anticiclones en el Atlántico y el centro de alta presión de Bermuda -, así como su contraparte en el Pacífico - el centro de alta presión de Hawai -, se desplazan hacia el oeste de la región sur-central de los Estados Unidos. La circulación en sentido de las manecillas del reloj alrededor de la celda de alta presión de Bermuda lleva el aire cargado de humedad del Golfo de México hacia Estados Unidos y norte de México. Se incrementa la cubierta de nubes, aumenta la humedad relativa y se presentan tormentas como resultado de la entrada o flujo de este aire tropical húmedo.

Hacia el norte, las sierras en ambos lados del continente disminuyen su altura y se localizan más retiradas de las costas. Como resultado, hay una disminución general en las precipitaciones de sur a norte de la Sierra Madre Occidental.

Debido a que el territorio chihuahuense se localiza en el interior del continente y a la sombra de la Sierra Madre Occidental y otras montañas, especialmente hacia el norte, el Estado no tiene un período de lluvias de invierno. Las precipitaciones son así mucho menores en invierno, a pesar de que los ciclones de latitudes medias transportan el aire húmedo del Pacífico hacia el interior de la región. Como resultado del largo período seco, la vegetación en el interior continental no es tan saludable y rebosante, ni tan diversa como la que se encuentra en los taludes occidentales de la sierra y en las tierras bajas.

#### **2.2.2.4 Tormentas tropicales**

Otra fuente de agua muy importante para el régimen de lluvias en Chihuahua es el efecto de las tormentas tropicales, algunas de las cuales alcanzan la intensidad de huracán. Por lo general, dichas tormentas son responsables de la mayoría de las grandes desviaciones en las precipitaciones totales anuales, en especial aquellas que se presentan durante los meses más calientes.



Se utilizaron imágenes satelitales para determinar el origen de la humedad convertida en precipitaciones de verano sobre el área de Ciudad Juárez y El Paso, cuando la lluvia diaria fue de 2,5 mm. Durante los años 1973, 1974, 1975 y 1978 se encontró que, al menos el 55% de la precipitación anual ocurrida en la zona, fue originada en tormentas tropicales. El estudio de las fuentes de humedad principales, excluyendo las tormentas aisladas no relacionadas con tormentas de mayor magnitud, indica que aproximadamente el 45% de la lluvia tuvo origen en las tormentas tropicales del Océano Pacífico, y que el 55% provenía de las tormentas tropicales del Golfo de México.

### **2.2.2.5 Desertificación**

La dinámica y las posibles variaciones del clima en el Estado ilustran claramente el potencial de desertificación y otros problemas asociados con el uso de los recursos naturales en un ambiente muy frágil. Aunque la precipitación mínima y máxima no ocurre durante el mismo año en todas las estaciones, el cambio potencial en las diferentes regiones climáticas es drástico, en especial en las zonas árida y semiárida.

---

## UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

### **2.2.2.6 Otras características climáticas**

Las peores características del clima en la zona árida y semiárida del norte son el polvo y las tormentas de arena, aunque por fortuna los vientos fuertes del sudoeste se hallan limitados a los meses de febrero y abril. Aun cuando las velocidades del viento no son extremadamente altas, rara vez alcanzan los 75 nudos (140 km/h) en áreas abiertas, los rasgos topográficos crean bolsas o vacíos de viento y ondas de sotavento en las montañas que pueden dar como resultado que la atmósfera se cargue de polvo y se cierren temporalmente los aeropuertos y las carreteras.

Las características más atractivas del clima de Chihuahua son los cielos claros, la baja humedad relativa y las temperaturas moderadas en invierno.

### 2.2.2.7 Intemperismos climáticos

Se presenta un período de heladas que inicia en el mes de noviembre y finaliza, generalmente, en el mes de febrero, si bien, en ocasiones se presentan heladas tardías.

Además, se presenta un promedio de los siguientes intemperismos:

Vientos mayores a 65 km/h	1 día por año
Nublados	63 días por año
Granizo	17 días por año
Tormenta	35 días por año
Heladas	25 días por año

### 2.2.3 FISIOGRAFÍA REGIONAL

Fisiográficamente, el Estado de Chihuahua ha sido dividido en dos grandes provincias, hasta cierto punto contrastantes en su morfología: la Mesa Central y la Sierra Madre Occidental.<sup>8</sup> Esta última provincia fisiográfica se divide en tres subprovincias conocidas como: sección de Llanuras Altas, sección de la Mesa Alta y sección de Barrancas. Ordoñez y Raisz, por su parte, tomaron juntas a la subprovincia de Llanuras Altas y a la Región de Bolsones (que pertenece a la provincia de la Mesa Central) considerándolas como un nuevo conjunto denominado "Provincia Fisiográfica de Cuencas y Sierras", llamada así debido a la peculiar distribución de las elevaciones y depresiones que se pueden observar en ella, como se muestra en las Figuras 2.2 y 2.3.

La Provincia Fisiográfica de la Mesa Central se distingue por sus sierras, constituidas en su mayor parte por estructuras anticlinales de rocas del Mesozoico hasta terciarias (en la parte oriental) y con predominio de rocas volcánicas terciarias ligeramente tectonizadas, en la sección occidental. De la provincia fisiográfica de la Mesa Central

sólo está representada en el Estado de Chihuahua la subprovincia de Bolsones, a la cual pertenece Ciudad Juárez. Se caracteriza por tener sierras paralelas, angostas, alargadas y aisladas, separadas por amplias cuencas planas, igualmente alargadas y con orientación norte-sur y noroeste-sudeste.

La región oriental del Estado se distingue por tener amplias y dilatadas llanuras, con elevaciones medias entre los 1200 y 1500 msnm; algunas de ellas se convierten en cuencas internas o endorreicas llamadas bolsones. Estos bolsones se encuentran separados por sierras angostas que se levantan de 600 a 1000 m sobre el nivel medio de las planicies; la distancia que separa una sierra de otra va aumentando de poniente a oriente; así se desarrollan amplias y marcadas llanuras. Este rasgo puede observarse claramente yendo de la Sierra Madre Occidental hacia el oriente, ya que en esa dirección el ancho de las llanuras crece de manera considerable, al alejarse del núcleo de la Sierra Madre, mientras que simultáneamente disminuyen la altura y la amplitud de las sierras interiores

Al oriente, la mayor parte de los bolsones han sido capturados por el sistema fluvial de los ríos Conchos-Bravo; no obstante, todavía existen algunos con sistema de drenaje endorreico en el centro del estado. En la parte media de esos bolsones se forman lagos y lagunas debido a que el agua, al no tener salida superficial, se acumula en su interior. Los bolsones endorreicos se caracterizan por ser prácticamente peneplaneados y en épocas de prolongada sequía generan grandes barriales. Los bolsones exorreicos, por su parte, cuentan con sistemas de desagüe fluvial que, en algunas ocasiones, no son lo bastante eficientes, lo cual también conlleva a la formación de grandes barriales. Sin embargo, los bolsones de este tipo están casi siempre cortados por profundos arroyos de tipo efímero intermitente en los que se pueden apreciar las terrazas aluviales y las planicies de inundación generadas por las corrientes principales. Los desiertos del Estado de Chihuahua se desarrollan, sobre todo, en la zona de bolsones endorreicos, ya que las sierras que los limitan sirvieron como barreras para impedir la migración tanto de las dunas, como el traslado de aluvión y suelo hacia el mar. Tal es el caso del desierto de Samalayuca.

### **2.2.3.1 Fisiografía del sitio**

El Municipio de Juárez se encuentra completamente dentro de la Provincia Fisiográfica de Sierras y Llanuras del Norte y comprende dos Subprovincias Fisiográficas: Llanuras y Médanos del Norte y Sierras Plegadas del Norte. El sitio objeto de estudio se encuentra dentro de la Subprovincia Fisiográfica Sierras Plegadas del Norte, con Sistema de Topoformas tipo Llanura, que abarca el 36,85% de la superficie del Municipio de Juárez.

Ciudad Juárez se encuentra dentro de un área constituida por montañas plegadas, entre las cuales se han desarrollado largos y angostos valles intermontañosos bordeados por fajas de pie de montaña y de abanicos aluviales, formando parte de la Provincia Geológica de la Cuenca de Chihuahua.

### **2.2.4 HISTORIA GEOLÓGICA**

La complejidad de la formación geológica de México es enorme; para interpretarla es necesario, en principio, aclarar que el extremo norte de la placa de Sudamérica se sobrepuso a lo que sería la mitad de la actual República Mexicana. Campa y Coney, apoyándose en análisis tectono-estratigráficos, concluyeron que alrededor del 80% de la superficie del país se halla constituida por microcontinentes o microplacas (terrenos) cuya relación con la placa norteamericana aún es incierta. De acuerdo con estos modelos tectono-estratigráficos, el origen de la mayor parte del basamento mexicano está todavía por descubrirse o quizá se trata de un conjunto de microplacas que se unieron debido al avance de la placa norteamericana hacia el poniente, o bien no existía basamento alguno antes de los períodos Pérmico-Triásico. En general hay pocos afloramientos pre-mesozoicos y menos aún precámbricos que permitan definir las

**características del basamento de la República Mexicana.**

El Estado de Chihuahua está formado, en parte, por el cratón o placa norteamericana y por otros microcontinentes o terrenos alóctonos acrecionados a la placa, como se muestra en la Figura 2.3. Su basamento, constituido por el terreno de Coahuila al oriente de Chihuahua, permite suponer que es una acreción ocurrida durante el Paleozoico Tardío, relacionada con el cierre del Proto-Atlántico. Los terrenos de Caborca en Sonora, al poniente de Chihuahua, y de la Sierra Madre Occidental (al sur del Estado), parecen ser terrenos desplazados hacia la placa norteamericana, pero sus inciertos y complejos basamentos aún no han sido bien definidos, aunque también podría tratarse de fragmentos de la misma placa norteamericana. Es posible que casi toda la parte norte y central del Estado de Chihuahua pertenezca a la porción sur del cratón o placa no desplazada de Norteamérica.

En la Figura 2.4 puede observarse cómo la mayor parte del Estado de Chihuahua y parte del Estado de Sonora parecen ser el extremo sur del cratón de Norteamérica. En la misma Figura 2.4 pueden verse también los "terrenos alóctonos", fragmentos microcontinentales que se añadieron paulatinamente a este extremo sur de Norteamérica durante su desplazamiento al noroeste

#### **2.2.4.1 Geología del sitio**

Ciudad Juárez forma parte de la Provincia Geológica de la Cuenca de Chihuahua, la cual está constituida por rocas sedimentarias, ígneas y metamórficas. Las terrazas existentes en el área son depósitos clásticos procedentes de la desintegración de rocas preexistentes. Los abanicos aluviales que se presentan en los alrededores de la sierra muestran pendientes suaves y están constituidos por material clástico de tamaño variable.

En el área de estudio se pueden encontrar calizas de color gris claro, de grado fino, las

que se presentan estratificadas en capas de escaso espesor, presentando un rumbo general NO-SE. Se estima que estas rocas pertenecen al Cretácico Superior.

Las rocas que sobreyacen a las calizas son las areniscas de color amarillo pardo, constituidas por partículas de cuarzo y feldespato, con una matriz arcillosa cementada, pertenecientes al Plioceno, de origen continental. A estas rocas les sobreyace un material clástico constituido por areniscas y conglomerados con una matriz arenolimsa no cementada que se estima son de edad reciente. Enseguida aparece un suelo residual que se encuentra ubicado en la parte central de la zona, de arcilla-arenosa, diferente a la que se encuentra en la planicie fluvial, debido a su mayor porcentaje de arcilla.

#### 2.2.4.2 Movimientos tectónicos

**Sismicidad:** De acuerdo con la regionalización sísmica de la República Mexicana, publicada por L. Esteve en 1970,<sup>8</sup> Ciudad Juárez se localiza en la zona "0" que significa que su intensidad sísmica es baja o casi nula.

**Deslizamientos:** La ciudad no tiene grandes pendientes, especialmente en la zona de estudio. Esta zona es prácticamente plana, por lo que no se la considera zona de posibles deslizamientos.

**Derrumbes:** La zona de interés es un área donde no hay movimientos tectónicos, por lo que queda descartada la posibilidad de derrumbes por movimientos tectónicos.

#### 2.2.5 GEOGRAFÍA: GEOMORFOLOGÍA Y OROGRAFÍA REGIONAL

La superficie del territorio Chihuahuense puede dividirse en dos Provincias Fisiográficas mayores:

- La Sierra Madre Occidental
- Las Cuencas y Sierras del Desierto de Chihuahua.

A consecuencia de los procesos de erosión y la estructura geológica, la meseta volcánica elevada y relativamente plana formada por la Sierra Madre Occidental se puede dividir en cuatro subprovincias:

- i) Las sierras y valles del norte
- ii) Las sierras con cuencas del este
- iii) La gran altiplanicie o mesa alta del sur
- iv) Las barrancas o tierra de cañones

El sitio de estudio se encuentra dentro de la provincia de Sierras y Cuencas del Desierto de Chihuahua.

Las cuencas y sierras de Chihuahua forman parte de una provincia fisiográfica mayor. Se extiende desde el oeste y sur de Arizona, cruza el oeste de Nuevo México hasta incluir una porción de Texas; hacia el sur se expande incluyendo una buena parte de México. Las formas superficiales que genera esta provincia de cuencas y sierras están caracterizadas por la unión de los bolsones parcialmente rellenos, enmarcados por sierras orientadas hacia el nornoroeste (NNW). La variación de alturas de los pisos de las cuencas se encuentra entre 1200 y 1500 msnm como lo muestra la Figura 2.5. Por lo común las montañas son aquellas porciones con alturas superiores a 1800 msnm. La composición geológica de las sierras forma una amplia zona de transición entre las rocas sedimentarias plegadas del Cretácico (125 a 100 millones de años) falladas y cabalgadas en los lados oriental y sur, y las rocas ígneas del Terciario (65 a 20 millones de años) que se asocian con la Sierra Madre Occidental en el oeste. Muchas de las sierras aisladas están constituidas de rocas carbonatadas, en especial calizas cretácicas intensamente plegadas y acompañadas de pequeñas fallas de cabalgamiento.

Otras sierras son las clásicas montañas de fallamiento en bloque. La mayoría de las montañas en este grupo son pilares o bloques basculados o rotados, producidos cuando los sedimentos fueron levantados en forma despareja, a lo largo de fallas más o menos paralelas.

Muchos de los bolsones parecen ser profundas fosas (de aproximadamente 2750 m) o depresiones estructurales; son bloques caídos a lo largo de fallas paralelas y limitados por pilares o bloques levantados. Estas cuencas fueron parcialmente rellenas con sedimentos fluviales de edad reciente, sobrepuestos en los depósitos lacustres pleistocénicos. El material de los abanicos aluviales sepultados y los sedimentos eólicos también se encuentran presentes. Las superficies de las cuencas se caracterizan por ser planicies levemente onduladas o con suaves pendientes aluviales.

Entre los bolsones y las sierras montañosas, las que se levantan por encima de los pisos de las cuencas, como las islas sobre el nivel del mar, se encuentra el talud aluvial. Este talud intermedio se constituye por dos partes: un piedemonte - piamonte- y una bajada. Lo que se conoce como piedemonte es una superficie de roca sobre la cual se transporta el material erosionado. Se forma al pie del talud de montaña en retroceso; es decir, que se encuentra en proceso de erosión activa y con frecuencia se cubre por una delgada capa de hasta 25 m de aluvi6n. La porci6n mas baja del talud - parte distal del mismo - consiste en gruesos dep6sitos de material erosionado y acarreado de las partes altas de la montaña. Por su forma y composici6n, la totalidad del talud, desde la boca del ca6n hasta la base, recibe el nombre de abanico aluvial. La bajada, en general, se define como la uni6n o coalescencia de abanicos aluviales unidos.

T6picamente, en la base del talud aluvial se encuentra una superficie plana casi siempre referida como una superficie des6rtica, que gradúa a una playa - barrial -. Por playa se entiende, com6nmente, una zona nivelada que ocupa la parte m6s baja de una cuenca cerrada y que, a intervalos irregulares, se cubre por el agua. Las playas que merecen nombrarse son medianamente grandes en tama6o, generalmente mayores a los 600 m de di6metro, llegando incluso a los 900 m. Las cuencas con drenaje interior u o



endorreicas - ocupan casi la mitad de la superficie de Chihuahua. Las playas de los lagos, los lagos secos y los lagos o lagunas ocupan las partes más bajas de estos bolsones.

La zona más grande de planicies cubierta con aguas efímeras se ubica en el norte, desde el piedemonte de la sierra en dirección al oriente, hasta cerca de 15 km del Río Bravo. Las cuencas endorreicas más grandes son: el bolsón de los Muertos, el área del río Casas Grandes y laguna de Guzmán, el del río Santa María y la laguna de Santa María, además del río del Carmen y la laguna de Patos. Este complejo de lagos es un remanente del antiguo lago pluvial de Palomas. El lago Palomas, que inunda 7770 km<sup>2</sup>, fue un estanque aislado de una masa de agua aún más grande llamada lago Cabeza de Vaca, que existió desde el Pleistoceno Temprano.

El bolsón de los Muertos, a menos de 75 km al sudoeste de Ciudad Juárez, es la playa más grande del Estado y de México. Sus dimensiones totales son de aproximadamente 240 km de largo y 80 km de ancho.

El sitio de estudio se encuentra al nordeste del bolsón de los Muertos, en un bolsón menor, denominado bolsón del Hueco.

## 2.2.6 HIDROLOGÍA REGIONAL

El único sistema de drenaje que cruza la provincia fisiográfica de Sierras y Cuencas de México que fluye hacia el mar es el de los ríos Conchos y Bravo. También el río Conchos es la cuenca hidrológica más grande y el sistema fluvial más extenso de Chihuahua, mostrado claramente en las Figuras 2.6 y 2.7.

La cuenca del río Conchos cubre más de 77090 km<sup>2</sup>, casi un tercio de la superficie del Estado. Históricamente, el Conchos abastece a alrededor del 18% de los depósitos forestales y minerales y una gran proporción de la riqueza agrícola en Chihuahua se

**encuentra dentro del sistema de drenaje de los ríos Conchos y Bravo.**

Las cuencas endorreicas del norte y oriente ocupan el 43% de la superficie del Estado; entre ellas, los sistemas río Casas Grandes-laguna de Guzmán, río Santa María con la laguna del mismo nombre y el río Carmen- laguna de Patos, son las más extensas. Dichos lagos se están secando gradualmente, a medida que se usan para irrigación cantidades cada vez mayores de agua del río que fluía a la cuenca.

### **2.2.6.1 Hidrología del sitio**

En el área de estudio se pueden distinguir unidades hidrológicas permeables e impermeables, por lo que se explicarán las formaciones geológicas atendiendo a las características físicas como permeabilidad, porosidad y ubicación estructural, las cuales intervienen directamente en el funcionamiento del sistema hidráulico.

Las unidades hidrológicas permeables están constituidas por materiales granulares que van del Terciario al Reciente y se clasifican en las siguientes unidades, en función de sus condiciones de depósito:

**Cuaternario aluvial:** Localizados en las planicies de inundación del Río Bravo, estos depósitos están constituidos por gravas, arenas y arcilla en su parte superficial. Hidrogeológicamente, esta unidad presenta características de buena permeabilidad, constituyendo un acuífero que se encuentra en explotación. Los aportes de este acuífero provienen directamente del agua subálvea del Río Bravo y por el agua que ceden los materiales terciarios localizados en las partes aledañas al río. Este acuífero recibe aportaciones por la infiltración del agua precipitada y por la recirculación del agua que se utiliza en la zona agrícola.

**Abanicos aluviales y depósitos de piamonte del Cuaternario:** Se ubican en la zona periférica de las sierras, donde el cambio de pendiente ocasiona el depósito de los sedimentos arrastrados por las corrientes. Esta unidad está constituida por arenas y

gravas provenientes de la meteorización de las rocas preexistentes en la localidad. Hidrogeológicamente estos depósitos presentan condiciones de permeabilidad y tienen la capacidad de transmitir el agua a las formaciones subyacentes.

**Sedimentos continentales del Terciario:** Estos depósitos cubren una extensa superficie, formando Terrazas en las zonas aledañas al Río Bravo. Están constituidos por gravas y arenas con intercalaciones de arcillas y lentes de yeso, razón por la cual esta unidad se considera de menor permeabilidad que las anteriores. Sin embargo, es capaz de construir acuíferos que, por la heterogeneidad de los materiales, se pueden comportar como confinados.

**Rocas calcáreas del Cretácico:** Éstas son rocas sedimentarias marinas que presentan plegamiento y fallamiento secundario. Debido a su fracturamiento, estas rocas pueden poseer cierta permeabilidad, pero como estas fracturas se presentan sólo de manera superficial, la zona puede clasificarse como impermeable.

#### **2.2.6.2 Unidades hidrológicas**

El único cauce superficial en el sitio es el Río Bravo, aunque existen otros cauces como son los canales de riego denominados Acequia Madre y Acequia del Pueblo, con diferentes ramificaciones en el área agrícola señalada en la Figura 2.8. También existen varios arroyos de menor importancia, como son La Morita, Los Indios, Jarudo, El Mimbres, El Gordo y el Tres Jacales, entre otros, que llevan agua únicamente en la temporada de lluvias.

El municipio de Juárez se halla comprendido en dos regiones hidrológicas:

**Región hidrológica de Cuencas Cerradas del Norte (Casas Grandes):** Esta región hidrológica está subdividida en dos cuencas: Río del Carmen y Río Santa María.

**Región hidrológica Bravo-Conchos:** Esta región comprende una sola cuenca, la del Río Bravo-Ciudad Juárez. Esta cuenca, a su vez, se encuentra subdividida en tres subcuencas: Río Bravo-Tornillo, Río Bravo-Island y Río Bravo-Ciudad Juárez. En esta última subcuenca se encuentra ubicada Ciudad Juárez, la que ocupa el 14,84% de la superficie municipal.

Por otra parte, la región descrita queda ubicada dentro de dos cuencas geohidrológicas: el Bolsón del Hueco, que abastece de agua potable a Ciudad Juárez y El Paso, y el Bolsón de la Mesilla.

**Bolsón del Hueco:** El Bolsón del Hueco se encuentra localizado al sureste del Estado de Texas y al norte del Estado de Chihuahua. Aún cuando sus límites no están perfectamente definidos, se considera que el bolsón abarca una zona comprendida entre las Sierras del Hueco y Franklin, del Estado de Texas, y la Sierra Juárez y del Presidio, en el Estado de Chihuahua. El acuífero de este Bolsón consiste en rellenos no consolidados divididos en el aluvión del Río Bravo y los depósitos más viejos del Bolsón, la mayoría depositados antes del aluvión. El grosor total de las capas alternas de arcilla, arena y grava varía entre los 300 y los 2700 m.

La recarga natural del Bolsón del Hueco ocurre a lo largo del pie de la montaña que rodea al Bolsón, en donde los sedimentos son más permeables. Otros medios naturales de recarga lo constituyen el Río Bravo y el agua de lluvia. Se estima que del lado mexicano la recarga del Bolsón es de apenas 3,5 millones de metros cúbicos anuales y, adicionalmente, la Ciudad de El Paso cuenta con una planta de tratamiento de aguas residuales, la cual inyecta al Bolsón una cantidad de agua tratada equivalente a 10 millones de galones por día. Las profundidades mayores del acuífero se localizan a mayores distancias del Río Bravo y las mínimas en las proximidades de éste.

**Bolsón de la Mesilla:** Este acuífero se ubica entre los estados de Nuevo México y Texas, en los Estados Unidos y el estado mexicano de Chihuahua. Se estima que su extensión llega, al norte, hasta la ciudad de Las Cruces, en Nuevo México; al sur, a 80 km de la

**línea divisoria internacional; al oeste, hasta el Cerro del Potrillo y la Sierra Boca Grande; y al este hasta la Sierra de Juárez. Ocupa una amplia planicie desértica de más de 3500 km<sup>2</sup> que se ubica al occidente del Municipio de Juárez.**

## **2.2.7 VEGETACIÓN**

La distribución de la vegetación en el Estado coincide estrechamente con sus zonas climáticas, provincias fisiográficas y el uso de suelo, por lo que pueden identificarse cuatro unidades biogeográficas principales señaladas en las Figuras 2.9 y 2.10 :

- **Matorrales desérticos de las bajadas y planicies desérticas**
- **Zacatales y bosques de robles que se encuentran en los taludes al pie de la sierra**
- **Bosques de pinos y encinos-robles de la Sierra Madre Occidental**
- **Bosques subtropicales de hojas no permanentes localizados en el talud occidental de la sierra, en el lado del Océano Pacífico y en los cañones profundos.**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

### **2.2.7.1 Matorrales desérticos**

La vegetación del sitio de estudio es del tipo de matorrales desérticos, al igual que la vegetación de Ciudad Juárez y sus alrededores.

En las elevaciones menores, al oriente de la sierra, domina la vegetación desértica. Por lo general, las xerófitas están confinadas a altitudes de menos de 1500 m. La zona árida de Chihuahua se asocia fuertemente con los drenajes internos, los suelos derivados de rocas calizas y volcánicas y con los matorrales desérticos. Se ha establecido que, en todo el desierto de Chihuahua, existen más de un millar de plantas endémicas.

La planta que domina en la zona árida es la gobernadora o cresota (*Larrea tridentata*), seguida por el arbusto alquitranado (*Flourensia cernua*), ocotillo (*Koeberlinia spinosa*) y el mezquite (*Prosopis glandulosa*). La lechuguilla (*Agave lechuguilla*) y el sotol (*Dasyliroium leiophyllum wheeleri*) son plantas importantes indicadoras del Desierto de Chihuahua. En general, las cactáceas están bien distribuidas y representadas, sin embargo son pequeñas y no tan abundantes. Los únicos cactus notables en esta zona árida son las choyas (*Opuntia imbricatea*) y las peras espinosas (*Opuntia violácea var. macrocentra*). El cactus cilíndrico o biznaga (*Echinocactus acanthonades*) es más bien común en los taludes, pero sólo medianamente visible.

El típico arbusto de *larrea*, guami o gobernadora de Chihuahua, es más corto y tiene menos follaje, con hojas más alargadas y más abiertas hacia la base que su contraparte de Sonora. Las características de esta especie son, probablemente, el resultado de una fuerte concentración de la precipitación durante los meses de verano. Las áreas más extensas de distribución de este arbusto se localizan sobre las pendientes aluviales, mientras que el mezquite y las acacias son las más abundantes en las áreas de aguas subterráneas cercanas a la superficie - 10 o 15 m - y de suelos poco compactados.

Observaciones de campo de la cubierta vegetal, en altitudes y exposición comparables con suelos del mismo origen, muestra que las plantas de la cubierta sobre los suelos derivados de las calizas son consistentemente más xerófilas que las de los suelos derivados de las rocas ígneas, y también que la vegetación xerófila sobre las calizas se extiende a elevaciones mayores.

Las tres especies de arbustos: la gobernadora, el alquitranado y la acacia de espina blanca, son las plantas dominantes de las zonas de planicie del Desierto de Chihuahua. Sólo localmente estas plantas permiten la dominancia del mezquite, los ocotillos, los gatuños (uña de gato) o los arbustos salados. En las depresiones de las cuencas endorreicas, tales como la parte norte del bolsón de los Muertos, hay más humedad en el suelo. En estas áreas los zacatales circundan las superficies del barrial o playas más bajas y más salinas. Aparentemente, los más comunes de estos zacates o pastos son la

tobosa (*Hilaria mutica*) y los zacatones (*Sporobolus, s. airoides*).

### 2.3 DESCRIPCIÓN DE LOS PROCESOS PRODUCTIVOS DE LA PLANTA EN ESTUDIO

El principal producto que se obtiene en la planta industrial en estudio es ácido fluorhídrico. El ácido fluorhídrico anhidro (HFA) se produce reaccionando un mineral llamado Fluorita ( $\text{CaF}_2$ ), en estado seco, con ácido sulfúrico y óleum, en un horno rotatorio. Esta reacción genera, además, como subproducto, al sulfato de calcio o Anhidrita ( $\text{CaSO}_4$ ). El proceso de obtención del HFA finaliza con un proceso de purificación, que a su vez genera como subproducto al ácido fluorosilícico ( $\text{H}_2\text{SiF}_6$ ).

El HFA se almacena en cinco tanques horizontales de acero al carbón, tres de los cuales tienen una capacidad de 68 Ton y los otros dos con capacidad de 40 Ton cada uno. Adicionalmente, se destinan dos o tres vagones-tanque de ferrocarril de 70 Ton cada uno para el almacenamiento temporal del HFA en la planta.

La mayor parte del HFA producido se embarca como líquido, ya sea anhidro, en vagones-tanque y camiones pipa, o como disolución al 70%, en vagones-tanque y tambores de 200 L. Se estima que se embarca un vagón-tanque cada tres días, dos pipas por mes y de dos a tres embarques de 80 tambores de HF-70% por semana.

Por otra parte, se utiliza ácido fluorosilícico para producir bifluoruro de amonio ( $\text{NH}_4\text{FHF}$ ) y monofluoruro de amonio ( $\text{NH}_4\text{F}$ ), haciendo reaccionar amoníaco anhidro ( $\text{NH}_3$ ) con ácido fluorhídrico en presencia del ácido fluorosilícico. El amoníaco requerido se conduce a la planta en vagones-tanque y se almacenan temporalmente en dos tanques horizontales de  $36 \text{ m}^3$  cada uno.

El amoníaco anhidro también se utiliza en un sistema de refrigeración de respaldo a

base de compresores de tornillo, el que contiene una cantidad aproximada de 10 Ton de  $\text{NH}_3$ , incluyendo un tanque de almacenamiento de 8 Ton.

El agua de lavado de pisos y equipos, así como el agua pluvial, se descargan a través de canaletas cubiertas, a una laguna de evaporación ubicada en la parte norte de la planta. El agua residual generada en el sitio proviene de la cocina, los baños, el laboratorio y la planta potabilizadora de agua de la empresa. Esta agua residual ingresa a un tanque séptico ubicado dentro de la propiedad. Antiguamente, estas aguas residuales se descargaban hacia lagunas de evaporación. El tanque séptico original está ubicado, aproximadamente, a 10 metros del tanque nuevo y, si bien está fuera de operación desde hace más de 3 años, actualmente se encuentra lleno a toda su capacidad.

Un gran montículo de anhídrita ocupa todo el límite sur de la propiedad. La anhídrita es el residuo que se genera durante el proceso productivo de ácido fluorhídrico. La cantidad de anhídrita residual que hay actualmente en el sitio es de unos  $6 \cdot 10^5 \text{ m}^3$  equivalentes a un millón de toneladas, cuya ubicación se muestra en las Figuras 2.11 y 2.12.

A continuación se presenta una descripción detallada de las principales operaciones de la planta, por áreas específicas de producción, ilustrada por la Figura 2.13.

### 2.3.1 PLANTA DE ÁCIDO FLUORHÍDRICO

#### 2.3.1.1 Secado de la fluorita

La fluorita se recibe en la planta en camiones de 70 Ton de capacidad. Una vez en la planta, la fluorita húmeda (10% de contenido de agua en peso) se almacena en un edificio con una capacidad de 3000 Ton.

Esta fluorita húmeda se alimenta, mediante un cargador frontal, al horno rotatorio de



secado, pasando previamente por una criba vibratoria gruesa, la que retiene los terrones grandes. La capacidad de secado de la planta es de 180 a 200 Ton de material húmedo por día. La fluorita seca sale del horno a través de un transportador helicoidal para ser movida, posteriormente, mediante un elevador de cangilones, hacia otra criba vibratoria, la que remueve los materiales sólidos extraños que pudieran quedar.

Los gases de combustión del horno pasan primero por un ciclón, luego son filtrados con el objeto de eliminar las partículas finas; posteriormente pasan por un sistema de lavado con agua a contracorriente en circuito cerrado y, por último, son liberados a la atmósfera.

### 2.3.1.2 Producción de HFA

La planta de ácido fluorhídrico (HF) está diseñada para la producción diaria de 50 Ton de HFA, mediante la reacción de ácido sulfúrico sobre la fluorita seca. Para ello se utiliza un pre-reactor, consistente en una máquina de mezclado y amasado de diseño especial en donde el ácido sulfúrico se mezcla íntimamente con la fluorita, iniciando la reacción y generando grandes cantidades de gas. La mezcla de reacción se mantiene en el pre-reactor a 100 °C y se alimenta al horno como una masa seca y desmoronadiza. El pre-reactor cuenta con una camisa de vapor, para ayudar a la reacción y prevenir la reconversión. Luego se envía la mezcla a un reactor rotatorio, también calentado indirectamente.

La reacción puede representarse por la siguiente ecuación:



La reacción es endotérmica, es decir, que requiere de un suministro constante de energía calorífica para que se lleve a cabo.

Al ácido fluorhídrico que resulta de la reacción se le libera de una gran parte del ácido sulfúrico no consumido, del agua y de las impurezas no volátiles, en una columna de pre-purificación, para luego condensarse en forma de HF, con una pureza aproximada del 99%. Los gases de reacción que salen del pre-reactor se conducen al fondo de la columna de pre-purificación. Aquí tiene lugar un intercambio de calor y de masa; el contenido calorífico de los gases de reacción causa la evaporación del HF que pasa, en estado líquido, de la parte superior a inferior de la columna. En la parte superior de la columna los gases de reacción se enfrían a aproximadamente 20 °C, por contacto directo con HF líquido y se liberan de ácido sulfúrico y agua. Esta condensación se lleva a cabo en tres condensadores, enfriados por medio de salmuera.

El condensado del condensador I se colecta en el tanque de ácido crudo I. La columna de pre-purificación se alimenta con reflujo desde el tanque de ácido crudo I. El condensado del condensador II se colecta en el tanque de ácido crudo II, el que representa la producción de HF crudo de alta concentración. Este ácido crudo se bombea a la columna de destilación.

Posteriormente, se separa el HF por destilación presurizada (2,04 Kg/cm<sup>2</sup>) de las diversas impurezas volátiles, tales como SO<sub>2</sub> y SiF<sub>4</sub>. El calentamiento se realiza por medio del suministro constante de vapor al calentador de la columna de destilación. El reflujo se lleva a cabo por el condensador de la columna que se enfría con agua del circuito de la torre de enfriamiento. La presión en la columna se regula controlando la corriente de gases de venteo.

El ácido puro fluye continuamente desde el fondo del depósito de la columna de destilación, pasando por el enfriador de ácido destilado, para descargar finalmente dentro de los tanques de recepción de HF. Las impurezas volátiles (SO<sub>2</sub> y SiF<sub>4</sub>) y el HF que es arrastrado con los gases inertes de las etapas de condensación y destilación, se absorben en H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> en una columna de absorción, de manera tal que sólo un 2% del total de HF producido pasa a la etapa siguiente de absorción en agua. En esta columna se absorben los vapores de HF de tal forma que los gases que salen de la columna

contienen sólo la cantidad de HF consumida en la formación de ácido fluorosilícico. El HF residual que permanece en los gases que dejan la columna de absorción en  $H_2SO_4$ , así como todo el  $SiF_4$  presente, se absorben en agua en una torre empacada con carbón. Los gases de cola que salen de esta unidad son enviados a la atmósfera.

La planta está equipada con un sistema de absorción secundaria o de emergencia, compuesto de un absorbente secundario y un ventilador. Si la presión en el reactor se eleva, los gases contenidos en él pueden ventearse al sistema de absorción secundaria a través de un sistema automático. La succión del gas la proporciona el ventilador, el efluente líquido se bombea al drenaje químico de la planta y los gases agotados de la absorción secundaria se ventean a la atmósfera. Como subproducto de la reacción se obtiene anhídrita.

### 2.3.1.3 Ultrapurificación del HFA

El proceso de ultrapurificación del HPA cuenta con dos reactores por lotes agitados mecánicamente y con capacidad de  $10\text{ m}^3$  cada uno, en los cuales el HFA reacciona con diversos agentes químicos para producir un precipitado de sales insolubles. El ácido en este proceso es conducido por bombeo desde los reactores hasta un tanque de sedimentación donde se separan los sólidos formados.

El ácido libre de agentes reductores pasa por gravedad del tanque de sedimentación a un evaporador, luego a un recalentador y, finalmente, a otra columna de destilación, en la que se destila el producto utilizando una corriente de ácido frío como reflujo en la parte superior de la columna.

Los gases purificados de HFA salen de la columna por su parte superior, mientras que el agua y otras impurezas permanecen en la sección inferior de la misma, de donde son purgadas periódicamente.

El HFA gaseoso se enfría y condensa en un intercambiador de calor enfriado con  $\text{NH}_3$ ; de allí fluye por gravedad a un tanque de bombeo, desde donde se envía a los tanques de almacenamiento de producto terminado.

#### 2.3.1.4 Planta de HF-70%

El proceso es una dilución directa del HFA en agua des-ionizada hasta una concentración en peso del 70%.

El HF en estado gaseoso se alimenta a la parte inferior de un reactor cilíndrico vertical de acero al carbono, recubierto interiormente de teflón, denominado "mezclador"; el agua se alimenta a contracorriente por el extremo superior del reactor. El ácido diluido que sale del mezclador por su extremo inferior pasa a través de un intercambiador de calor enfriado con agua antes de ser almacenado temporalmente en dos tanques verticales de polietileno con capacidad para 20 Ton de HF-70% cada uno.

#### 2.3.2 PLANTA DE BIFLUORURO DE AMONIO

Las materias primas para este proceso son HF y  $\text{NH}_3$  anhidro, según la siguiente reacción:



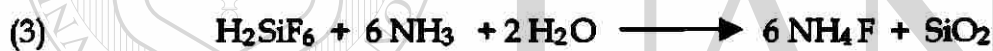
El HF se alimenta al área de proceso desde un vagón-tanque presurizado. Una vez en el área, pasa a través de un evaporador, un recalentador y un amortiguador, para finalmente ser enviado al reactor de bifluoruro de amonio (BFA). Por otra parte, el  $\text{NH}_3$  procedente de los tanques de almacenamiento de la planta pasa por un proceso similar, con el objeto de ser alimentado al reactor en fase gaseosa.

El HF y el NH<sub>3</sub> reaccionan produciendo BFA, el que se condensa parcialmente en el reactor. La reacción se completa en un condensador, desde donde fluye BFA líquido a una temperatura entre 150 y 160°C hacia la escamadora, pasando previamente por un enfriador de acero al carbón enfriado con agua. En la escamadora, que es un cilindro rotatorio de magnesio, el BFA pasa de líquido a sólido, sobre la superficie enfriada interiormente con agua, cuando se alcanza una temperatura de 126°C.

El producto en forma de escamas se empaqueta en bolsas de polietileno de 22,7 y 25 kg.

### 2.3.3 PLANTA DE SOLUCIÓN DE FLUORURO DE AMONIO

Las materias primas para este proceso son ácido fluorosilícico (AFS) al 25-27% y amoníaco anhidro según la siguiente reacción:



Estos productos se alimentan a un reactor de acero inoxidable de 8000 litros, en el que se mantiene un cierto nivel de agua amoniacal. La solución se recircula continuamente a través de un intercambiador de calor enfriado con agua. El NH<sub>3</sub> líquido se alimenta al reactor hasta alcanzar un pH = 10; en este momento se inicia la alimentación del AFS. La recirculación se mantiene para remover parte del calor de reacción, manteniendo la temperatura del sistema entre 60 y 70°C y el pH se ubica entre 10 y 11. Con ello se asegura la completa reacción del AFS y la precipitación de sílice (SiO<sub>2</sub>) como subproducto del proceso.

El proceso de producción del monofluoruro de amonio (MFA) opera como sistema intermitente o por cargas, deteniéndose cuando la capacidad efectiva del reactor disminuye a un 80%. En ese momento se detiene la alimentación de materias primas y la mezcla se centrifuga para remover el sílice formado.

La solución de MFA, con una concentración en peso del 36-37%, se envía a los tanques de almacenamiento temporal y, posteriormente, a una unidad de separación de sílice, desde donde se transfiere por bombeo a los vagones-tanque que transportan el producto final fuera de la planta.

### 2.3.4 SERVICIOS AUXILIARES

La planta cuenta con distintos sistemas auxiliares entre los que se cuentan:

- **Suministro de agua;** compuesto por 2 pozos profundos, piletas de almacenamiento, equipos de bombeo y sistema de distribución.
- **Agua de enfriamiento;** formado por dos torres de enfriamiento, equipos de bombeo, dosificación de productos químicos y líneas de distribución.
- **Generación de vapor;** compuesto por 2 calderas de 600 HP, suavizadores, equipos de precalentamiento de agua, bombas, recuperación de condensados y líneas de distribución.
- **Refrigeración;** que consta de 2 unidades (una a base de freón-12 y la otra a base de HFC-122), 3 compresores de amoníaco, condensadores, trampas de NH<sub>3</sub>, tanque colector, tanque de almacenamiento y evaporadores.
- **Abastecimiento de aire,** formado por 3 compresores con motores de 75 a 100 HP
- **Energía eléctrica,** con alimentación de CFE, de 13200 voltios, subestaciones, transformadores, equipos de medición y líneas de transmisión y distribución.

- **Taller central de mantenimiento mecánico y soldadura.**
- **Laboratorio de control de calidad.**
- **Consultorio médico y área de primeros auxilios.**

### **2.3.5 GENERACIÓN DE RESIDUOS NO PELIGROSOS**

Los residuos no peligrosos (según análisis CRETIB), generados en las diversas operaciones de la planta, que son de interés para el presente estudio, son la anhidrita y la chatarra.

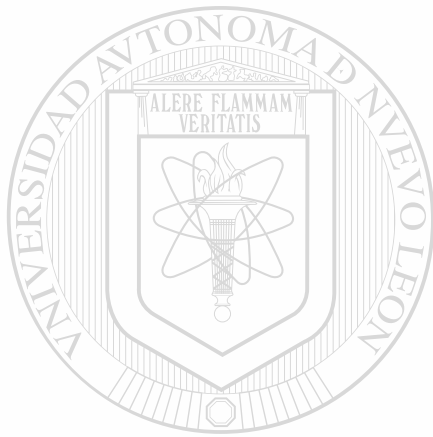
#### **2.3.5.1 Anhidrita**

Constituida en un 98-99% por sulfato de calcio anhidro (yeso), es un subproducto de la fabricación del HFA. Se acumula en un depósito a cielo abierto dentro de los límites del terreno de la planta.

Este material ha sido analizado y estudiado en repetidas ocasiones por las autoridades competentes, incluyendo la PROFEPA y el Municipio. Como resultado de esos análisis (CRETIB), se llegó a la conclusión de que el material no es peligroso. Sin embargo, la anhidrita sometida a esos análisis es la producida en la tercera etapa de la historia de la planta, la que anteriormente tuvo otros propietarios que se abastecieron de fuentes de fluorita de calidad inferior con contenidos importantes de metales pesados. Esta observación viene a proveer con la mayor justificación a los estudios que son descriptos a partir del siguiente capítulo.

### 2.3.5.2 Chatarra

La chatarra metálica, proveniente del desmantelamiento de equipos y tuberías de proceso obsoletas o substituidas, se almacena temporalmente en un área específica de la planta, sobre una losa de yeso impermeable. Previa limpieza o neutralización, y posterior inspección por el Departamento de Seguridad, la chatarra se entrega para su reciclaje a una empresa local especializada.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



### **3. ESTUDIO PREVIO DE AFECTACIÓN DE SUELOS**

Para conocer la afectación que presentaban los suelos de la planta industrial en estudio, se llevó a cabo un estudio previo al realizado para la presentación de este trabajo. Este Estudio de Afectación de Suelos fue realizado en el sitio por una consultoría privada, entre el 4 y el 16 de noviembre de 1996, mismo que se describe a continuación.

Durante el estudio previo de afectación de los suelos se llevaron a cabo las siguientes actividades:

- 20 perforaciones profundas
- 17 perforaciones manuales superficiales
- Recolección de un total de 194 muestras de suelo
- Monitoreo de pH y conductividad eléctrica en el sitio
- Análisis químico de las muestras de suelo

Las 20 perforaciones profundas se llevaron a cabo en las áreas susceptibles de estar contaminadas, mientras que las 17 perforaciones manuales fueron realizadas en la planta, para caracterizar las condiciones superficiales.

#### **3.1 PERFORACIONES PROFUNDAS**

Las perforaciones profundas se llevaron a cabo en puntos preseleccionados por los consultores, con la participación de personal de la planta química. El procedimiento fue aprobado por representantes de la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA), antes de iniciar las tareas de campo. Todas las perforaciones fueron efectuadas utilizando un equipo para perforaciones profundas de suelo, de barrenas huecas, tipo CME-75 (HSA) y con alcance hasta una profundidad máxima de 7,2 m.

### 3.2 PERFORACIONES MANUALES

Las 17 perforaciones manuales se practicaron en áreas inaccesibles para realizar perforaciones profundas o en puntos donde sólo se requería caracterización superficial. La máxima profundidad de las perforaciones fue de 30 cm.

### 3.3 MUESTRAS DE SUELO

Las muestras de suelo fueron tomadas de las siguientes áreas conforme a la descripción hecha en la Figura 3.1:

- Área del antiguo tanque subterráneo de combustible (U)
- Área del tanque superficial de diesel (A)
- Lagunas de evaporación (L)
- Área de procesos químicos (P)
- Área de la planta antigua (O)
- Perímetro de la propiedad (B)

La información detallada sobre el muestreo se encuentra reportada en la Tabla 3.1.

A continuación se hace el análisis, por separado, para cada una de las áreas muestreadas.

#### 3.3.1 ÁREA DEL ANTIGUO TANQUE SUBTERRÁNEO DE ALMACENAMIENTO DE COMBUSTIBLE (U)

En esta área se tomaron 18 muestras de suelo; 4 a partir de perforaciones con barrena y 1 con perforación manual, a profundidades que van desde 0,15 m hasta 6,10 m por debajo del nivel del suelo. Cada una de estas muestras fue analizada para determinar la

presencia de compuestos orgánicos volátiles (VOCs), hidrocarburos totales de petróleo (TPH) y los metales definidos en la "Resource Conservation and Recovery Act" (RCRA) de la EPA (Arsénico, Bario, Cadmio, Cromo, Mercurio, Níquel, Plata, Plomo y Selenio).<sup>9</sup> Los resultados obtenidos de los análisis de laboratorio, para todas las muestras, se enlistan en la Tabla 3.2.

### **3.3.2 ÁREA DEL TANQUE SUPERFICIAL DE DIESEL (A)**

En esta área, localizada al oeste-noroeste del área anterior y de las áreas de procesos químicos, se realizaron 2 perforaciones con barrena y 2 perforaciones manuales, colectándose un total de 12 muestras. Las profundidades a las que se obtuvieron las muestras van desde 0,15 m hasta los 6,10 m por debajo del nivel del suelo. Cada una de estas muestras fue analizada para determinar la presencia de VOCs, TPH y los metales definidos por la RCRA. Los resultados completos obtenidos de los análisis de laboratorio, se muestran en la Tabla 3.3.

### **3.3.3 LAGUNAS DE EVAPORACIÓN (L)**

Los dos estanques de contención se localizan al norte de las vías del ferrocarril que dividen la propiedad. Estos estanques de contención contienen residuos provenientes de procesos y aguas residuales generados en el sitio. Se realizaron 5 perforaciones de suelo con barrena y 5 perforaciones manuales, dentro y alrededor de los estanques, con el fin de caracterizar el suelo y el material que se encuentra por debajo y en las orillas de dichos estanques. Se obtuvieron 56 muestras de suelo y de sólidos, a profundidades comprendidas entre los 0,15 m y los 6,10 m. Cada una de estas muestras fue analizada para determinar la presencia de VOCs, TPH y los metales definidos por la RCRA. Los resultados completos, obtenidos de los análisis de laboratorio, se muestran en la Tabla 3.4.

### **3.3.4 ÁREA DE PROCESOS QUÍMICOS (P)**

En el área de procesos químicos se realizaron 5 sondeos con barrena y 6 con perforación manual, localizados entre el área de tanques subterráneos y el área de la planta antigua, señalados en la Figura 3.1. A partir de estos sondeos se obtuvieron 59 muestras, a profundidades comprendidas entre los 0,15 m y los 4,57 m, a partir del nivel del suelo. Cada una de estas muestras fue analizada para determinar la presencia de VOCs, TPH y los metales definidos por la RCRA. Los resultados completos, obtenidos de los análisis de laboratorio, se muestran en la Tabla 3.5.

### **3.3.5 ÁREA DE LA ANTIGUA PLANTA DE PROCESOS QUÍMICOS (O)**

Esta área se encuentra localizada en la porción oeste central del sitio. Es el punto en el que la planta inició sus operaciones. Aquí sólo permanecen algunos edificios, donde se realizó un sondeo con barrena y 2 sondeos manuales. Se tomaron un total de 7 muestras de suelo, las cuales correspondieron a profundidades de entre 0,15 m y 6,10 m por debajo del nivel del suelo. Cada una de estas muestras fue analizada para determinar la presencia de VOCs, TPH y los metales definidos por la RCRA. Los resultados completos, obtenidos de los análisis de laboratorio, se muestran en la Tabla 3.6.

### **3.3.6 PERÍMETRO DE LA PROPIEDAD (B)**

Se realizaron 4 sondeos mediante perforación con barrena, a lo largo del perímetro de la propiedad y en cada uno de los vértices del sitio de estudio. Se tomaron un total de 20 muestras, a profundidades comprendidas entre los 0,15 m y los 6,10 m por debajo del nivel del suelo. Cada una de estas muestras fue analizada para determinar la presencia de VOCs, TPH y los metales definidos por la RCRA. Los resultados

completos obtenidos en los análisis de laboratorio se muestran en la Tabla 3.7.

### 3.4 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

De la cuidadosa observación de los resultados de los análisis químicos en los puntos de muestreo surgió que:

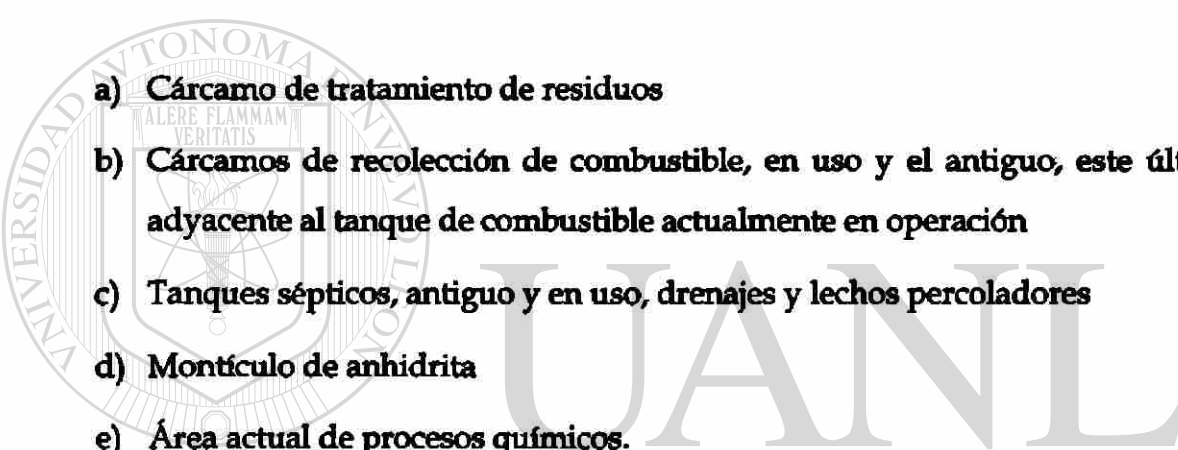
- Los sondeos no se realizaron hasta la profundidad adecuada. Ello puede advertirse en que las muestras tomadas a mayor profundidad todavía presentan signos de contaminación, por lo que el estudio preliminar no sirvió para indicar hasta qué profundidad debiera llevarse a cabo una posible remediación.
- Hay muestras cuyos resultados son sospechosos. Ello puede observarse en algunas muestras que arrojan resultados sumamente disímiles dentro del mismo sondeo, por ejemplo la muestra L4 presenta variaciones extrañas tanto en los resultados de Arsénico como en los de TPH.
- Hay posible contaminación con otros metales. A excepción de la plata, en los resultados de los análisis químicos de estas muestras se encontraron presentes todos los metales buscados en los análisis, cuya procedencia se debe a las probables impurezas contenidas en la fluorita y que, por consiguiente, deberán hallarse ahora en la anhidrita apilada. Por lo anterior no puede descartarse la contaminación del suelo con otros metales cuya existencia no se buscó probar en el estudio previo.

Debido a los motivos expresados anteriormente, se llevarán a cabo análisis complementarios en el sitio de estudio, como parte del contenido de la presente tesis.

## 4. ESTUDIO COMPLEMENTARIO DE AFECTACIÓN DE SUELOS

### 4.1 INTRODUCCIÓN

Debido a que en el estudio previo de afectación de suelos hubo áreas que no fueron incluidas, o áreas que no fueron estudiadas hasta la profundidad adecuada, según lo mostraron los resultados obtenidos descritos en el capítulo anterior, se procedió a realizar un estudio complementario que incluyó a los siguientes sitios, indicados en la Figura 4.1:

- 
- a) Cárcamo de tratamiento de residuos
  - b) Cárcamos de recolección de combustible, en uso y el antiguo, este último adyacente al tanque de combustible actualmente en operación
  - c) Tanques sépticos, antiguo y en uso, drenajes y lechos percoladores
  - d) Montículo de anhídrita
  - e) Área actual de procesos químicos.

Estas áreas, las cuales no fueron debidamente caracterizadas en el estudio previo, podrían estar contaminadas, por las razones que a continuación se mencionan:

- a) **Cárcamo de tratamiento de residuos.** Esta estructura consiste en una fosa de concreto recubierta con un protector plástico colectivamente conocido como *liner*; esta fosa se utiliza para neutralizar los residuos peligrosos (corrosivos y contaminados con arsénico procedentes de la fluorita utilizada originalmente como materia prima). Si bien el *liner* que recubre la fosa es relativamente nuevo, éste se encuentra perforado en diversas porciones y no se conoce el estado del concreto debajo de él, por lo que pudieron haber existido fugas sub-superficiales.

- b) **Cárcamos de recolección de combustibles, antiguo y en uso.** Al momento de la inspección ocular de la planta, uno de estos cárcamos contenía agua con diesel, desconociéndose el origen de dicho combustible. Además, como la empresa reportó la clausura del antiguo cárcamo, debido a que era "demasiado grande", el personal actual de la planta desconoce si dicho cárcamo ya contenía diesel al momento de la clausura.
- c) **Tanques sépticos, antiguo y en uso.** Se reemplazó el antiguo tanque séptico por otro ubicado junto a él, debido a que el primero se había tapado. Estos tanques reciben aguas residuales provenientes de los siguientes puntos: el laboratorio, el sistema de ósmosis inversa de la planta potabilizadora, la cocina y los baños de la planta. Los planos de los servicios auxiliares no se encuentran en la planta, por lo que no puede descartarse la posibilidad de que estos tanques reciban o hayan recibido otros tipos de descargas diferentes o adicionales a las identificadas actualmente.
- d) **Montículo de anhídrita.** Este montículo actualmente ocupa un área de 26 000 m<sup>2</sup> y debido al tamaño del mismo no puede descartarse la posibilidad de que allí se hayan depositado otros residuos.
- e) **Área actual de procesos químicos.** Debido a las fugas y/o emanaciones de gases de la planta (amoníaco y ácido fluorhídrico, principalmente), existe la posibilidad de que el suelo de esta área pueda haberse afectado.

Por lo expresado anteriormente, durante el periodo comprendido entre el 2 y el 11 de febrero de 2000, se llevaron a cabo en las áreas mencionadas los siguientes trabajos de campo:

- Estudios de suelos sub-superficiales en la planta
- Estudios de suelos superficiales, en el exterior de la planta.

## 4.2 ESTUDIOS DE SUELOS

Se realizaron once sondeos, ubicados según se muestra en la Figura 4.1. Las muestras de suelo fueron tomadas de manera que pudiera ser estudiada la extensión, tanto horizontal como vertical, de los posibles efectos adversos al suelo sub-superficial en las siguientes áreas:

- Cárcamo de tratamiento de residuos (R)
- Cárcamo de recolección de diesel (D)
- Tanques sépticos (S)
- Área comprendida entre el montículo de anhidrita y la planta (I)
- Montículo de anhidrita (M)

Además, se tomaron muestras superficiales de suelo en dos propiedades adyacentes a la planta (E).

Para realizar las perforaciones se subcontrató a la empresa Estudios Especializados de Mecánica de Suelos, S.A. de C.V. (EEMSSA) la que utilizó una perforadora del tipo rotatoria, marca Foremost Mobile, modelo B-59, la cual se encuentra montada sobre un camión Dodge RAM 6500, utilizando para el avance barrenas sólidas de 4.25 pulgadas de diámetro externo, de acuerdo con la Norma ASTM-D-1452-95. El muestreo del subsuelo se llevó a cabo a profundidades entre 8 y 82 pies por debajo del nivel del suelo (2,4 y 25 m), obteniendo las muestras de suelo con un muestreador de prueba estándar y de muestreadores California de 2.5 y 3 pulgadas de diámetro interno, todos con longitud de 2 pies (0,60 m).

Para el muestreo se utilizó el muestreador del tipo tubo partido de la prueba de penetración estándar, de acuerdo con la norma ASTM D1586-84. Esta prueba consiste



en hincar, mediante golpes, el tubo partido de 60 cm de largo, 5,08 cm de diámetro exterior y 3,49 cm de diámetro interior, mediante la energía proporcionada por una masa de 64 kg. de peso que se deja caer libremente desde una altura de 75 cm. De esta misma forma se realizaron los hincados de los muestreadores California. Se registraron el número de golpes necesarios para que el tubo partido penetrara la distancia requerida y el tipo de suelo encontrado. La Figura 4.2 muestra la clasificación de los suelos que resultó de este procedimiento experimental.

Como paso previo a cada una de las perforaciones, se descontaminó todo el equipo a utilizar, incluyendo las barrenas, las brocas y los muestreadores, utilizando detergente y agua a presión. Además, antes de la toma de cada muestra se descontaminó el muestreador de cuchara partida, según los procedimientos especificados.

Se hicieron observaciones de campo, en busca de evidencias de la presencia de sustancias químicas, clasificando las muestras en el campo, según el método manual-visual que indica la Norma ASTM-2488-93. La descripción completa del suelo en cada punto de los sondeos se presenta en el Anexo B.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
Se tomaron hasta tres muestras de cada sondeo, para su posterior análisis de VOCs, compuestos orgánicos semivolátiles (SVOCs), metales (plata, arsénico, berilio, cadmio, cromo, mercurio, níquel, plomo, antimonio, selenio, talio, vanadio y zinc), cianuros, y bifenilos policlorados (PCBs), utilizando los métodos de la USEPA 8260,<sup>10</sup> 8015,<sup>10</sup> series 6010/7000<sup>11</sup> y 8080,<sup>12</sup> respectivamente. Para los análisis de laboratorio se subcontrató a Intertek Testing Service, Laboratorio Ambiental (ITS). ITS está certificado por el Sistema Nacional de Acreditamiento de Laboratorios de Prueba (SINALP).

Cada muestra recolectada durante los sondeos se dividió en dos porciones: una porción se colocó en una bolsa plástica con cierre zip, en la que se analizaron los vapores orgánicos; la segunda porción de la muestra se colocó en una doble bolsa con cierre zip, manteniéndola refrigerada hasta ser enviada al laboratorio, para los correspondientes

**análisis químicos.**

Las bolsas con las muestras de suelo se estabilizaron a temperatura ambiente. Luego se analizó el aire contenido en cada bolsa para detectar la presencia de vapores orgánicos mediante un detector de fotoionización (PID - Gastech Inc, Modelo 1314 SMPN), utilizado como dispositivo de análisis presuntivo.

En base a la presencia de vapores orgánicos fue seleccionado un mínimo de tres muestras de cada sondeo para ser analizadas. Las muestras seleccionadas fueron aquellas que presentaron la mayor lectura durante la determinación de vapores con el PID y las que tenían una mayor probabilidad de contener compuestos orgánicos. Para definir con mayor precisión la extensión vertical del suelo afectado con agentes químicos, se tomó en cuenta también la capa de suelo subyacente, en donde los análisis no mostraron presencia de contaminantes químicos, o que presentaba una mínima evidencia de impacto, o bien la muestra tomada del fondo de la perforación.

De acuerdo con las observaciones de campo y con las lecturas del PID, se detectó la presencia de sustancias químicas en las muestras de suelos tomadas en los sondeos BH1, BH4, MW2 y MW3. Para estos puntos se seleccionaron, para el análisis químico, las muestras de suelo correspondientes al intervalo en el que se encontró evidencia de impacto. En el resto de los sondeos, donde no había evidencia visual de impacto, se seleccionaron para análisis una muestra superficial, una del fondo de la perforación y el intervalo más representativo del sondeo, de acuerdo a las lecturas del PID.

Una vez finalizado el muestreo, los puntos de los sondeos se sellaron con *grout* (una mezcla de agua, cemento-bentonita y arena).

### **4.3 ESTUDIO DE TERRENOS ADYACENTES**

Se tomaron muestras de suelo poco profundo en terrenos adyacentes al sitio de estudio. Para ello se seleccionó una parcela al oriente de la propiedad, la que está separada de la misma por la carretera Panamericana (E1) y una segunda parcela en la que, en un hoyo existente, se depositaron desperdicios en el pasado (E2).

Estas muestras se tomaron en forma superficial, a una profundidad no mayor de 8 pulgadas, utilizando una pala previamente lavada, para fines de descontaminación, siguiendo el método descrito anteriormente.

Para obtener la muestra compuesta E1, se tomaron cinco alícuotas, mientras que para la muestra compuesta E2 se tomaron cuatro alícuotas. Las alícuotas se tomaron en distintos puntos de los terrenos que fueron seleccionados al azar. Las muestras se colocaron en frascos de vidrio limpios, suministrados por el laboratorio y se enviaron a ITS para su análisis químico. Dicho laboratorio realizó los análisis para detectar la presencia de TPH, metales (plata, arsénico, berilio, cadmio, cromo, mercurio, níquel, plomo, antimonio, selenio, talio y zinc), cianuros y PCBs, utilizando los métodos de la USEPA (métodos 8260, 8015, series 6010/7000 y 8080, respectivamente).

### **DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS**

Como resultado de estos estudios, se generaron residuos, principalmente residuos de la perforación, los que se colocaron en tambores de 200 litros y se depositaron en el Almacenamiento Temporal de Residuos Peligrosos de la planta, para su posterior disposición final.

### **4.4 RESULTADO DE LAS PERFORACIONES**

La anhídrita es un residuo generado durante la producción de HF. Se generan 3,5 Ton de anhídrita por cada tonelada de HF producida. Actualmente, este residuo se

almacena a cielo abierto, en el límite sur de la propiedad. Se estima que hay acumulados aproximadamente 600 000 m<sup>3</sup> (1 000 000 Ton).

El montículo de anhidrita tiene un color gris claro, con manchas aisladas rojizas y verdosas. Las perforaciones iniciales se realizaron en la base del montículo para confirmar que éste estaba compuesto de anhidrita colocada directamente sobre suelo nativo. Este suelo se halla compuesto principalmente de limo arenoso, arena limosa, limo areno-arcilloso y arcilla limosa.

Los resultados de las cinco perforaciones realizadas en el montículo de anhidrita, así como las seis perforaciones efectuadas en otros lugares de la planta y propiedades adyacentes, confirman que el subsuelo está compuesto por capas alternadas de limo arenoso, arena limosa, arcilla limosa, arena, arena con grava, arcilla-caliche, arcilla con arena y arcilla-caliche con gravilla de caliza. La estratigrafía de cada una de las perforaciones se incluye en el Anexo B.

#### 4.5 RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS QUÍMICOS

La Tabla 4.1 detalla de qué sondeo se tomó cada muestra y cuáles fueron los parámetros analizados. El resumen de los resultados de los análisis químicos de laboratorio, de las muestras de suelos, se detallan en las Tablas 4.2 y 4.3.

##### 4.5.1 MONTÍCULO DE ANHIDRITA (M)

Se recolectaron tres muestras compuestas de suelo, cada una de las cuales estaba formada por alícuotas tomadas según se describe en la Tabla 4.1. Estas muestras se recolectaron en la superficie, en el interior y debajo del montículo de anhidrita, respectivamente.

En las muestras tomadas en la superficie y en el interior del montículo de anhidrita, se observó un ligero olor a hidrocarburos. El análisis de TPH de la muestra compuesta superficial reportó una concentración de 207 mg/kg. También se detectó la presencia de PCBs en una concentración de 0,0314 mg/kg. En ninguna de las otras muestras tomadas en el montículo de anhidrita se detectó la presencia de TPH, PCB, SVOCs, o VOCs. Se detectó una pequeña concentración de tolueno en la superficie del montículo de anhidrita (0,012 mg/kg) y en la interfase entre el montículo y el suelo nativo (0,009 mg/kg).

La concentración de metales en el interior y debajo del montículo fue consistente con la del resto de los sondeos, a excepción de la muestra compuesta superficial. Esta muestra produjo elevadas concentraciones de plomo (65,5 mg/kg), mercurio (3,127 mg/kg) y selenio (0,36 mg/kg), en comparación con la concentración hallada en el resto de las perforaciones.

#### 4.5.2 CÁRCAMO DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS (R)

Se hizo el análisis de una muestra del sondeo R1, adyacente al cárcamo de tratamiento de residuos. La muestra tomada a una profundidad de 4,3 a 4,9 m, por debajo del nivel del suelo, fue la que mostró una mayor lectura de vapores orgánicos con el PID (1400 ppm) debajo de la base del cárcamo. La concentración reportada para TPH de la muestra fue de 1291 mg/kg. Todas las concentraciones de metales presentes en los análisis químicos son consistentes con las concentraciones del resto de las muestras, a excepción del plomo.

#### **4.5.3 TANQUES DE DIESEL (D)**

El sondeo D1 está localizado junto al tanque de diesel, actualmente en uso, y al cárcamo de recolección. El sondeo D2 se perforó aguas abajo del punto D1.

En el sondeo D1 se detectó olor a diesel a una profundidad aproximada de 6,1 m. La concentración de TPH de la muestra tomada a esa profundidad fue de 13 mg/kg. En el sondeo D2 no hubo evidencia de la presencia de TPH. Por otra parte, la concentración de metales en ambos sondeos, se mantuvo dentro del intervalo de las concentraciones normales detectadas en el resto de las muestras del sitio de estudio.

#### **4.5.4 TANQUES SÉPTICOS (S)**

Los sondeos S2 y S1 se realizaron en las inmediaciones de los tanques sépticos, uno actualmente en uso y el otro abandonado, respectivamente. En las muestras analizadas no se detectó la presencia de TPH, PCB ni SVOCs. Se detectó la presencia de tolueno, a nivel de trazas (0,008 mg/kg), en la muestra de suelo tomada del sondeo S1. La concentración de metales, en general, fue consistente con la del resto de las muestras, a excepción del potasio, cuya concentración fue mayor, y del magnesio, cuya concentración fue menor que las concentraciones típicas presentes en el lugar.

#### **4.5.5 PROPIEDADES ADYACENTES (E)**

De las muestras tomadas en los dos sitios seleccionados en el exterior de la planta, aquella tomada en el lote cruzando la Carretera Panamericana (E1), no mostró estar afectada por su uso del suelo, por lo que se la tomó como base para determinar los parámetros de fondo.

La muestra tomada en la excavación del terreno ubicado al noroeste de la propiedad

(E2) mostró concentraciones, a nivel de trazas, de PCBs (0,0174 mg/kg) y concentraciones ligeramente elevadas de plomo (55,5 mg/kg) y mercurio (0,375 mg/kg). No se detectó la presencia de TPH en ninguna de las dos muestras.

#### 4.6 CONCLUSIONES PREVIAS

Además de los impactos identificados durante el Estudio de Afectación de Suelos realizado previamente, con el Estudio Complementario descrito en este capítulo se identificaron otras áreas cuyos suelos se encuentran también afectados.

Se encontraron elevadas concentraciones de TPH en el suelo sub-superficial adyacente al cárcamo de tratamiento de residuos. Puede haber mayores concentraciones de TPH, entre otros compuestos, debajo y alrededor de dicho cárcamo. Con los datos disponibles se debe determinar la extensión y concentración de la contaminación, para poder determinar la necesidad de remediación.

La operación de los tanques sépticos parece haber ocasionado impactos leves en el suelo, por lo que por el momento no habría necesidad de remediación en esta zona. Para evitar, en el futuro, una mayor contaminación proveniente de dichos tanques sépticos, el tanque abandonado debería vaciarse y cerrarse de manera apropiada y definitiva.

En las muestras compuestas del montículo de anhídrita se encontraron concentraciones relativamente bajas de TPH y PCBs. Si bien estas concentraciones no parecen ser significativas, durante la futura reubicación de este material deberán realizarse tareas para identificar posibles puntos contaminados dentro de este montículo.

## 5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

### 5.1 INTRODUCCIÓN

Una vez conocidos los contaminantes presentes en los suelos del área estudiada, y como paso previo a las propuestas de remediación, debe caracterizarse la extensión de la contaminación del lugar, estimar los potenciales riesgos a la salud y al medio ambiente provocados por dichos contaminantes e identificar los niveles de remediación que deben alcanzarse con el fin de proteger tanto la salud humana como el medio ambiente.<sup>12</sup>

Para poder estimar los riesgos a la salud en los casos en que se hallen presentes dos o más contaminantes, deberá tomarse en cuenta el efecto aditivo de éstos. Esto se debe a que, aún si la cantidad presente de cada uno de ellos, en lo individual, no debiera causar efectos nocivos a la salud, cuando la contaminación se debe a múltiples productos químicos puede haber efectos relacionados.

Por otra parte, muchas veces la cantidad de contaminantes detectados puede ser excesiva y, sin embargo, a menudo sólo unos pocos de entre ellos provocan riesgos a la salud. El resto de los contaminantes detectados tienen una mínima influencia en el riesgo total.<sup>13</sup>

Por este motivo, es necesario realizar un análisis minucioso de los potenciales efectos a la salud causados por cada una de las sustancias químicas presentes en el sitio de estudio de acuerdo al siguiente procedimiento:

- Determinar qué sustancias químicas están presentes como contaminantes y cuáles están presentes como componentes del suelo nativo, lo cual puede realizarse mediante:



- o Comparación entre muestras del sitio en estudio y muestras del suelo nativo sin contaminar.
- o Comparación de las sustancias químicas presentes en el suelo con las que se encuentran en los depósitos de minerales adyacentes.
- Estudio de las rutas de exposición de cada contaminante.
- Estudio de la toxicidad específica de cada contaminante.
- Cálculo de toxicidad equivalente de cada contaminante.
- Selección de los contaminantes significativos.

## 5.2 DETERMINACIÓN DE ESPECIES PRESENTES COMO CONTAMINANTES

### 5.2.1 GEOLOGÍA ECONÓMICA - DEPÓSITOS DE MINERALES ADYACENTES

Se ha realizado una distribución zonal general de los depósitos minerales del Estado de Chihuahua. Estos depósitos minerales pueden ser clasificados de acuerdo al tipo de mineralización y ella a su vez se encuentra en relación con la intensidad y el tipo de actividad ígnea, como se muestra en las Figuras 5.1 y 5.2.

Como se puede observar en la Figura 5.2, Ciudad Juárez está ubicada en una zona caracterizada por la presencia de mineralizaciones de los tipos siguientes:

- ✓ Depósitos epitermales de Oro y Plata
- ✓ Vetas de Zinc, Plomo, Plata y Cobre
- ✓ Reemplazamientos de Zinc, Plomo, Plata y Cobre en calizas

Debido a la presencia de los reemplazamientos de metales en las calizas, se pueden descartar el zinc, el plomo, la plata y el cobre como contaminantes. En el caso particular del plomo, la presencia del mismo tiene dos orígenes: la geología del sitio y la contaminación con hidrocarburos, por lo que sólo se descartará como contaminante la fracción de origen geológico.

Por otra parte, existen ocurrencias de mineralización prácticamente en todo el Estado de Chihuahua. Las mineralizaciones de manganeso se encuentran casi siempre asociadas con rocas félsicas del Terciario (rocas ácidas debido a su composición mineral), pero pueden llegar a estar asociadas con rocas sedimentarias, en la forma de depósitos someros de óxido de manganeso. Debido a estas mineralizaciones se puede descartar al manganeso como contaminante.

### 5.2.2 ANÁLISIS DE LA ESTRATIGRAFÍA DEL SITIO

Los tipos de suelo predominantes en el sitio de estudio son:

MATERIAL	COLOR	OBSERVACIONES
Arcilla limosa	Café Café claro Café rojizo Café oscuro Gris verdoso Negra	Vetas de arena Grava de caliza Grumos de CaCO <sub>3</sub> Vetas de arcilla limosa Vetas de limo arenoso Vetas de arcilla limo-arenosa negra
Arcilla limo-arenosa	Café claro Café rojiza	Gravas de caliza Grumos de CaCO <sub>3</sub>
Arcilla limo-calichosa	Beige	Grumos de CaCO <sub>3</sub> Vetas de arena limosa Grumos y nódulos de arcilla limo-calichosa
Arena	Café rojiza Café claro Gris Verdosa Gris	Gravas de caliza Vetas de CaCO <sub>3</sub> Vetas de limo arenoso
Arena limosa	Café rojiza Café oscuro Café claro Café Gris oscuro	Vetas de arcilla Gravas de caliza Grumos de CaCO <sub>3</sub> Vetas de arcilla limosa Vetas de arcilla calichosa
Limo arenoso	Café rojizo Café claro	Vetas de arcilla limosa Nódulos de limo arenoso Lentes de arena Gravas de caliza Arcilla calichosa
Limo areno-arcilloso	Café rojizo	Vetas de arena
Limo	Café rojizo	Gravas de caliza
Gravas		

En el cuadro anterior se puede observar que los suelos predominantes consisten de arena, limo y arcilla, además de la presencia de  $\text{CaCO}_3$  y calizas. Por otra parte los colores predominantes del suelo son: café claro, café rojizo y gris verdoso.

### 5.2.2.1 · Arenas y Limos

Las arenas y limos están constituidos esencialmente por fragmentos de roca madre, cuarzo, minerales complejos inalterados (del amplio grupo de los silicatos, como feldespatos y biotitas o micas), carbonato de calcio y dolomita (carbonato de calcio y magnesio).<sup>14</sup>

### 5.2.2.2 Arcillas

Las arcillas provienen de la descomposición lenta de materiales primitivos tales como micas o feldespatos. Son silicatos de alúmina, más o menos hidratados. Se pueden distinguir cuatro familias principales de arcillas:

- ✓ Caolinita:  $2\text{SiO}_2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
- ✓ Montmorillonitas:  $4\text{SiO}_2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
- ✓ Ilitas: con composición intermedia entre las citadas anteriormente
- ✓ Attapulgitas: con frecuencia son magnésicas

En el caso de las ilitas y las montmorillonitas (como el talco o la clorita), algunos iones aluminio de la estructura molecular son reemplazados por iones magnesio. Por otra parte, las ilitas presentan fijación de iones potasio entre los estratos.<sup>15</sup> Por este motivo

no puede considerarse la presencia de aluminio, potasio y/o magnesio como posibles contaminantes.

### 5.2.2.3 Carbonato de Calcio

El carbonato de calcio, en la mayoría de los casos, va acompañado de carbonato de magnesio (dolomitizado). La presencia de  $\text{CaCO}_3$  en el suelo indica que pueden descartarse el Calcio y el Magnesio como posibles contaminantes.

### 5.2.2.4 Coloración del Suelo

La coloración del suelo depende del grado de hidratación de los óxidos de hierro y suministra información sobre el microclima del suelo. El estado reducido de las sales de hierro, es decir Fe II, es el que indica insuficiencia de aireación y produce un color gris verdoso. El hierro en estado férrico, Fe III, se dispone en forma pelicular, dando una coloración rojiza a las arcillas, típica de los suelos deshidratados de climas cálidos y secos. Ambas coloraciones están presentes en el suelo en estudio, por lo que se puede descartar la presencia de Hierro como contaminante.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

## 5.2.3 COMPARACIÓN DE MUESTRAS DE SUELO CONTAMINADO CON MUESTRAS DE SUELO NATIVO

Después de analizar el tipo de suelo de la región y determinar cuáles son las sustancias comúnmente presentes, fue necesario hacer una comparación de las muestras de suelo contaminado con muestras de suelo sin contaminar. Esta comparación se realizó para poder identificar si el resto de los metales presentes en las muestras pueden ser considerados como contaminantes o no.

Para ello se consideró al suelo de la propiedad adyacente, ubicada al Oriente de la planta, como suelo nativo, sin contaminación significativa. Los parámetros analizados en esta muestra de suelo se tomaron como parámetros de fondo y se muestran en la Tabla 5.1. Para considerar a un metal cualquiera como contaminante se tomó el criterio de que su concentración debía superar en más de un 30% el valor de concentración de dicho metal en la muestra de suelo nativo.

Una vez realizada esta comparación se pudo concluir que los posibles contaminantes presentes en cada una de las áreas son:

- ✓ **Área del Antiguo Tanque Subterráneo de Combustible:** Arsénico, Cobalto, Bario, Mercurio, Níquel, Plomo y TPH, descritos por los resultados de la Tabla 5.2
- ✓ **Área del Tanque Superficial de Diesel:** Arsénico, Bario, Cobalto, Mercurio, Plomo y TPH, como se muestra en la Tabla 5.3
- ✓ **Área de la Laguna de Evaporación:** Arsénico, Bario, Mercurio, Níquel, Plomo, Selenio, Benceno, Etilbenceno, Diclorobenceno y TPH, como se muestra en la Tabla 5.4
- ✓ **Área de Procesos Químicos:** Arsénico, Bario, Cadmio, Mercurio, Níquel, Plomo, Selenio, Benceno, Etilbenceno, Diclorobenceno, Tolueno, Xilenos y TPH, mostrados en la Tabla 5.5
- ✓ **Antigua Área de Procesos Químicos:** Arsénico, Bario, Mercurio, Plomo, Xilenos y Diclorobenceno, mostrados en la Tabla 5.6
- ✓ **Perímetro de la Propiedad:** Arsénico, Mercurio, Plomo, Selenio, Xilenos, Diclorobenceno y TPH, resumidos en los datos de la Tabla 5.7
- ✓ **Montículo de Anhidrita:** Arsénico, Plomo, Bario, Mercurio, Cromo, Selenio, Níquel, Cobalto, Sodio, Tolueno, Xilenos y TPH, mostrados en la Tabla 5.8
- ✓ **Aguas Abajo del Montículo de Anhidrita:** Arsénico, Bario y Cobalto, reportados en la Tabla 5.8
- ✓ **Antiguo Tanque Séptico:** Bario, Cromo, Cobalto, Sodio y Tolueno, con sus datos contenidos en la Tabla 5.9
- ✓ **Cárcamo de Tratamiento de Residuos:** Arsénico, Bario, Cobalto, TPH, Fluoreno y

**Antraceno.** Sus datos de concentración se reportan en la Tabla 5.10

- ✓ **Tanque Séptico Actual:** Bario, Cromo, Cobalto, Sodio y Tolueno, reportados en la Tabla 5.11
- ✓ **Propiedad Adyacente, Junto a la Excavación:** Cadmio, Plomo, Mercurio, Cromo, Cobalto, Níquel y PCBs, mostrados en la Tabla 5.12
- ✓ **Aguas Abajo de los Tanques de Diesel:** Bario, Cromo, Cobalto, Sodio y Tolueno, reportados en la Tabla 5.13

Por otra parte, también se revisaron los valores de concentración de todos los metales presentes en el suelo y que no son considerados contaminantes, para verificar que no superaran las concentraciones de los RBC (EPA's Risk Based Concentrations).<sup>16</sup> Las concentraciones presentes de Hierro, Calcio, Magnesio, Aluminio, Potasio, Zinc, Plata, Cobre y Manganeseo, en ningún momento superaron el 5% de las concentraciones de RBC. Para estos análisis y revisión se incluyó al suelo nativo.

### 5.3 SELECCIÓN DE LOS CONTAMINANTES SIGNIFICATIVOS

En las Tablas 5.1 a 5.13 puede observarse la presencia de contaminantes en concentraciones significativamente diferentes. Para poder predecir cuál de estas sustancias debe ser considerada como contaminante significativo, se utilizó el método de comparación directa, tomando como base las tablas de toxicidad relativa de la EPA.<sup>17</sup> Esta tabla contiene datos de concentración para casi 600 sustancias e incluye si se hallan en el aire, el agua para beber o el suelo. Estas concentraciones corresponden a un cociente de peligro sistémico de 0,1 para sustancias no carcinogénicas y un riesgo de cáncer de  $10^{-6}$  para sustancias carcinogénicas. Este método consiste en:

- Comparar la concentración de cada una de las sustancias presentes como contaminantes en el suelo frente a la Tabla de Concentraciones Basadas en el Riesgo (RBC) de la EPA para suelo tipo industrial.
- Si hay presentes contaminantes no incluidos en la tabla de RBC, se calcula la

concentración de riesgo alternativa, para poder realizar esta comparación.

- Si la concentración presente excede la concentración especificada en la tabla de RBC, el contaminante se considera como significativo.
- Si el contaminante no excede la concentración estipulada en la tabla de RBC, se excluye este contaminante.
- Con todos los contaminantes excluidos se prepara otra lista, para poder incluirlos posteriormente, en caso necesario.

Del procedimiento descrito anteriormente surgieron los siguientes resultados:

**Contaminantes Significativos:** Arsénico

**Contaminantes a evaluar:** TPH

**Contaminantes no significativos:** Bario, Cadmio, Cobalto, Cromo, Níquel, Plomo Mercurio, Selenio, Sodio, Aroclor 1242, Antraceno, Benceno, Diclorobenceno, Etilbenceno, Fluoreno, Tolueno y Xilenos.

Para evaluar los contaminantes no significativos se utilizó el método descrito en la publicación "*Technical Background Document*" de la EPA, para suelos.<sup>18</sup> Este método considera ecuaciones para calcular la concentración de contaminantes considerando tres rutas de exposición:

- Ingestión de suelo
- Inhalación de sustancias volátiles y polvos fugitivos
- Ingestión de agua subterránea contaminada por migración de contaminantes, a través del suelo, hasta acuíferos someros factibles de potabilizar

En el sitio en estudio, el agua subterránea se encuentra a una profundidad de 130 m por debajo del nivel del suelo, por lo que no se considerará la tercer ruta de exposición.

### 5.3.1 TPH

El análisis de TPH se utiliza normalmente para evaluar la presencia de petróleo crudo o de productos derivados del petróleo en suelos. Sin embargo, debido a que la movilidad y la toxicidad dependen de las especies o familias químicas que constituyen al hidrocarburo (o mezcla de hidrocarburos), y más fundamentalmente a la fracción de constituyentes alifáticos y aromáticos, los TPH hasta ahora no se utilizaban para la evaluación de riesgo, sino que se utilizaban indicadores tales como BTEX para hidrocarburos alifáticos y PAH para hidrocarburos aromáticos.

Los TPH existentes en esta planta se originaron a partir de diesel. Este combustible contiene compuestos volátiles y semivolátiles aromáticos, mayormente de cadenas pesadas, tales como benceno, antraceno, fluoreno, etilbenceno y diclorobenceno, los que están considerados entre las sustancias más tóxicas de los combustibles refinados. Además de estas sustancias, se sabe que el diesel contiene mayormente alcanos y alquenos alifáticos de baja toxicidad. Uno de los posibles substituyentes del contenido alifático del diesel puede ser el hexano, un hidrocarburo de cadena recta relativamente poco tóxico. Suponiendo que los TPH hubieran sido originados por hexano, la tabla de RBC nos indica una concentración máxima permisible para suelos industriales de 120 000 mg/kg de suelo.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Recientemente se comenzaron a utilizar los TPH como indicadores de riesgo para suelos contaminados.<sup>17</sup> Para los casos en que se desconozca la mezcla de hidrocarburos presentes, se hace primero un análisis para determinar la concentración de compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles, con lo que posteriormente la RBC se calcula sumando el riesgo individual que representa cada uno de los compuestos.

Para determinados casos, en los que se conoce el tipo de hidrocarburo que causó la contaminación, por ejemplo diesel o gasolina, los TPH pueden utilizarse como indicadores de contaminación.<sup>19</sup> Ello se debe a que se conoce la mezcla típica de hidrocarburos que componen la gasolina o el diesel. Las distintas regiones de la EPA



están adoptando valores de RBC para TPH comprendidos entre 5 000 y 10 000 mg/kg de suelo.

En base a lo anterior, para este estudio se adoptó como criterio un valor de RBC para combustible Diesel de 5 000 mg/kg de suelo contaminado, por lo que se puede considerar a los hidrocarburos de petróleo, en conjunto, como un contaminante significativo.

#### 5.4 EVALUACIÓN DE LOS CONTAMINANTES NO SIGNIFICATIVOS

La mayor parte de los contaminantes no significativos, y de los contaminantes pendientes de evaluación, se hallan presentes junto con los contaminantes significativos. Sin embargo, hay zonas en las que cada uno de los contaminantes, en lo individual, no presentan riesgos a la salud, pero no se puede determinar a simple vista si el conjunto de contaminantes presentes podrían representar un peligro.

Para realizar esta evaluación se utilizó el método descrito en la sección 5.2, eligiendo los puntos que mostraron mayor concentración en las siguientes especies, conforme a los datos reportados en la Tabla 5.23:

- Bario
- Cadmio
- Cobalto
- Cromo
- Mercurio
- Níquel
- Plomo
- Selenio
- Aroclor 1242
- Antraceno

- Benceno
- Diclorobenceno
- Etilbenceno
- Fluoreno
- Tolueno
- Xilenos
- Arsénico (concentraciones menores a las de la tabla de RBC) y
- TPH (concentraciones menores a las de la tabla de RBC).

#### 5.4.1 EFECTOS SOBRE LA SALUD

En primer lugar, es necesario evaluar los efectos de cada una de las sustancias sobre la salud. Una vez determinado ello, se calcula el efecto aditivo de aquellas sustancias que afectan al mismo órgano. Enseguida se presentan las rutas de exposición y los efectos del grupo de sustancias de interés para este trabajo.<sup>20</sup>

- **Bario:** Las rutas de exposición son a través de inhalación e ingestión. Afecta al sistema circulatorio, al sistema reproductivo, al sistema respiratorio y al gastrointestinal, especialmente al corazón, la piel y los pulmones, aunque se sabe que también afecta a los ojos.<sup>21</sup>
- **Cadmio:** Las rutas de exposición son a través de inhalación e ingestión. Afecta a los riñones y al hígado y puede causar fragilidad en los huesos.<sup>22, 23</sup>
- **Cobalto:** Las rutas de exposición a humos y polvos de cobalto metálico son a través de inhalación, ingestión y por contacto dérmico y ocular. La exposición crónica al cobalto metálico puede producir trastornos dérmicos y al sistema respiratorio, así como disminución de las funciones pulmonares, fibrilación y respiración entrecortada. El envenenamiento crónico con cobalto puede afectar a los huesos, la glándula tiroides, el pericardio y el páncreas.<sup>24</sup>
- **Cromo:** Las rutas de exposición a los compuestos de cromo II, al igual que para el cromo III, son a través de inhalación, ingestión y por contacto dérmico u ocular.<sup>25</sup>

Tiene una baja toxicidad comparada con la del cromo hexavalente, afectando al sistema respiratorio y causando asma. La exposición crónica al cromo III puede ocasionar dermatitis y daños al hígado y los riñones.<sup>26</sup>

- **Níquel:** Las rutas de exposición a los compuestos solubles de níquel son inhalación, ingestión y contacto dérmico y ocular. Puede afectar al sistema cardiovascular, los riñones y el sistema nervioso central. La exposición crónica puede producir alergias severas en piel, ojos y sistema respiratorio, infecciones de piel, dificultad o dolor para respirar, asma o bronquitis. El contacto con la piel puede causar manchas con cambios de pigmentación.<sup>27</sup>
- **Plomo:** Las rutas de exposición al plomo son a través de inhalación e ingestión. La absorción dérmica es una ruta de exposición sólo para el plomo orgánico.<sup>28</sup> Afecta a la hemoglobina causando anemia. También afecta a los sistemas nerviosos central y periférico. Produce trastornos gastrointestinales, renales y afecta al sistema reproductivo, tanto femenino como masculino.<sup>29</sup>
- **Arsénico:** Las rutas de exposición al arsénico son a través de inhalación, ingestión y contacto dérmico.<sup>30</sup> El arsénico orgánico es poco dañino, pero el arsénico inorgánico está considerado como un fuerte veneno.<sup>31</sup> La exposición a altas concentraciones puede afectar al sistema nervioso periférico, al estómago, los intestinos y la piel. La exposición crónica puede ocasionar un oscurecimiento de la piel y la aparición de pequeñas úlceras en las manos, los pies y el torso, anemia, lesiones vasculares, al hígado y a los riñones. Además, puede clasificarse como carcinógeno produciendo, principalmente, melanomas de piel.<sup>32, 33</sup>
- **Mercurio:** Las rutas de exposición son inhalación, ingestión y absorción dérmica. La exposición crónica afecta al sistema nervioso central, al sistema digestivo y los riñones.<sup>34</sup>
- **Selenio:** Efectos en la salud no determinados.<sup>35</sup>
- **Aroclor 1242 (PCB):** Las vías de exposición a esta sustancia son inhalación, ingestión, contacto ocular y dérmico y absorción dérmica. Afecta al aparato reproductivo, es un posible carcinógeno, puede ocasionar dificultades en el aprendizaje de los niños, irritación de los ojos, daños al hígado y daños pulmonares.<sup>36</sup>

- **Benceno:** Las rutas de exposición son a través de inhalación, ingestión y absorción dérmica. Está considerado como posible carcinógeno. Puede afectar la sangre, causando leucemia y anemia.<sup>37</sup>
- **Tolueno:** La exposición al tolueno es a través de inhalación, ingestión y por contacto ocular y dérmico. Afecta al sistema nervioso central y causa irritación de ojos, membranas mucosas y piel. Puede causar daños irreversibles en las córneas. Afecta además a los riñones e hígado. <sup>38</sup>
- **Diclorobenceno:** No se conocen sus efectos.
- **Etilbenceno:** No se conocen sus efectos.
- **Xilenos:** Las vías de exposición a este grupo de compuestos son; inhalación, ingestión, contacto ocular y dérmico y, en menor medida, absorción dérmica. La exposición crónica afecta fundamentalmente al sistema nervioso central; además, pueden producir anemia y ocasionar daños al hígado y los riñones. Como efecto secundario causan sequedad de la piel y dermatitis.<sup>39</sup>
- **TPH provenientes de Diesel:** Las rutas de exposición son a través de inhalación e ingestión. El Diesel está clasificado como producto carcinógeno. Además, puede causar daños a los pulmones y al sistema cardiovascular.<sup>40</sup>
- **PAH (Hidrocarburos poliaromáticos):** Las rutas de exposición son inhalación, ingestión y absorción dérmica. La mayor parte de estas sustancias están consideradas como carcinógenas.<sup>41</sup>
  - ❑ **Antraceno:** está considerado como probable carcinógeno.<sup>42</sup>
  - ❑ **Fluoreno:** Afecta al sistema circulatorio.<sup>43</sup>

#### 5.4.2 EFECTO ADITIVO

Para evaluar el efecto aditivo de cada uno de los contaminantes en la salud se procedió de la siguiente forma:

- ❖ En primer lugar se descartaron los sondeos cuyos contaminantes son significativos. Ello se debe a que estas áreas ya debieran ser remediadas, por lo

**cual los contaminantes no significativos son irrelevantes.**

- ❖ **Se determinó qué contaminantes están presentes en cada sondeo.**
- ❖ **Se determinó la profundidad en los sitios de mayor carga de contaminantes.**
- ❖ **Se evaluó qué contaminantes afectan al mismo órgano. En los casos en que no se conocieron los efectos de alguno de los contaminantes, se consideró que afecta a los mismos órganos que los demás contaminantes presentes.**

**Esta evaluación se realizó por áreas, mismas que se hallan señaladas en las Tablas 5.24 a 5.37.**

**Una vez realizada dicha evaluación, se procedió a calcular los coeficientes de contaminación y los coeficientes aditivos. Pueden considerarse como áreas contaminadas aquellas cuyo coeficiente aditivo es mayor que la unidad.**

**En el caso en estudio, puede considerarse como área contaminada a la superficie del montículo de anhidrita, debido al efecto aditivo de los contaminantes cuyo coeficiente aditivo es 1,27 según se reporta en la Tabla 5.31.**

**El área del cárcamo de tratamiento de residuos también podría ser considerada como un área contaminada, debido a que, si bien su coeficiente aditivo es menor que la unidad (0.94), es muy próximo a ella, como se muestra en la Tabla 5.33.**

**Finalmente, puede considerarse que el resto de las áreas evaluadas no necesitan remediación.**

## **6. REVISIÓN A LAS ALTERNATIVAS DE REMEDIACIÓN**

### **6.1 INTRODUCCIÓN**

Una vez conocidos los contaminantes presentes en el suelo, la extensión de la contaminación de cada sitio, y después de estimar los riesgos para la salud y para el medio ambiente provocados por dichos contaminantes y habiendo identificado los niveles de remediación que deben alcanzarse, con el fin de proteger tanto la salud humana como el medio ambiente, se procedió a evaluar las distintas técnicas de remediación conocidas. Estas técnicas de remediación debieron evaluarse para los distintos grupos de contaminantes, fundamentalmente metales pesados e hidrocarburos.

En el sitio de estudio están presentes dos contaminantes principales en el suelo, arsénico y TPH, ambos con concentraciones mayores a los RBC, por lo que se deben proponer alternativas de remediación para cada uno de ellos.

### **6.2 ALTERNATIVAS DE REMEDIACIÓN**

En forma general, para evaluar las distintas alternativas de remediación, hay que tomar en cuenta distintos factores tales como:<sup>44</sup>

- Factibilidad de la alternativa propuesta para la remediación de los contaminantes presentes
- Nivel de remediación que sea posible de alcanzar, mediante las alternativas propuestas, en comparación con el nuevo uso del suelo y de la propiedad
- Tiempo que tomará la remediación, según las distintas alternativas
- Costo de las distintas alternativas
- Compatibilidad de las opciones con las características regionales

A continuación se presenta una descripción de las distintas alternativas de remediación factibles, de acuerdo con el contaminante a tratar.

### 6.2.1 TPH

Para la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos, es posible agrupar las principales alternativas de remediación en los tipos 1) biológicas y 2) físico-químicas.<sup>45</sup>

#### Remediaciones biológicas

- ◆ Bioceldas
- ◆ Aireación
- ◆ Biodegradación
- ◆ Bioextracción
- ◆ Bioventilación
- ◆ Atenuación natural

#### Remediaciones físico-químicas

- ◆ Desorción térmica a baja temperatura
- ◆ Extracción de vapor de suelos
- ◆ Extracción en dos fases

#### 6.2.1.1 Remediaciones biológicas

Las remediaciones biológicas se basan en la biodegradación de los hidrocarburos a través de microorganismos y la volatilización.

Los productos derivados del petróleo de peso medio (diesel o queroseno), contienen menor porcentaje de componentes volátiles, por lo que la biodegradación viene a ser más importante que la volatilización. Los productos más pesados (aceites lubricantes)

no se evaporan durante la aireación, por lo que el mecanismo dominante para estos productos es la biodegradación. Por otra parte, a medida que los cortes son más pesados (mayor longitud de cadena molecular) requieren un mayor período de tiempo para su degradación.

Los suelos normalmente contienen un gran número de microorganismos, incluyendo: bacterias, algas, hongos, protozoos y actinomicetos. En los suelos bien drenados, que son los más apropiados para la biodegradación, estos microorganismos normalmente son aeróbicos. De estos microorganismos, las bacterias son el grupo más numeroso y bioquímicamente más activo, especialmente cuando el nivel de oxígeno es bajo. Las bacterias necesitan una fuente de carbono para su crecimiento celular, una fuente de energía para sustentar las funciones metabólicas del crecimiento y una fuente de nitrógeno y fósforo para el crecimiento y reproducción celular. Si bien generalmente hay suficiente variedad y cantidad de microorganismos presentes en el suelo, actualmente se agregan microorganismos cultivados y abono animal (de vacas y pollos). La incorporación del abono ayuda tanto para incrementar la población microbiana como para proveer nutrientes adicionales.

Para el proceso metabólico de la generación de energía de las bacterias se necesita un electrón aceptor terminal (TEA). De esta manera se oxida enzimáticamente la fuente de carbono a dióxido de carbono. Los microbios son clasificados por las fuentes de carbono y el TEA que utilizan para llevar a cabo el proceso metabólico. A las bacterias que utilizan compuestos orgánicos (hidrocarburos y otros compuestos orgánicos naturales) se las denomina heterotróficas mientras que a aquellas que utilizan carbono inorgánico (dióxido de carbono) se las denomina autotróficas. Las bacterias que utilizan oxígeno como su TEA son aeróbicas; a aquellas que utilizan otros compuestos (nitratos o sulfatos) se las denomina anaeróbicas; y a aquellas que utilizan tanto oxígeno como otros compuestos como su TEA, se las llama facultativas. Para el proceso de biodegradación de hidrocarburos, las bacterias importantes son las aeróbicas (o facultativas) y las heterotróficas.



La efectividad de la biodegradación depende de tres clases de parámetros:

- ❖ **Características del suelo:** La textura del suelo afecta su permeabilidad, el contenido de humedad y la densidad del suelo. Para asegurar que la oxigenación, la distribución de nutrientes y el contenido de humedad del suelo pueden mantenerse dentro de los niveles efectivos (entre 40 y 85% de la capacidad de saturación del suelo, o entre un 12 y un 30% en peso), debe tenerse en cuenta la textura del suelo. Los suelos que tienden a agruparse (como las arcillas) son difíciles de airear, por lo que su contenido de oxígeno resulta bajo; la distribución de nutrientes se torna dificultosa y retienen la humedad durante períodos más prolongados después de las lluvias. Con la mezcla del suelo debe adicionarse: (a) abono, con el objetivo de incrementar la población microbiana y proveer nutrientes adicionales, (b) correctores de suelo (yeso) y materiales de relleno (aserrín o paja), para asegurar una textura dividida, y (c) sustancias químicas para ajustar el pH del suelo, debido a que el crecimiento bacteriano se realiza en un intervalo de pH entre 6 y 8, siendo 7 el valor óptimo
- ❖ **Características de los hidrocarburos:** Si bien casi todos los hidrocarburos que generalmente se almacenan en tanques son biodegradables, mientras más compleja es la estructura molecular del hidrocarburo, más dificultoso y más lento es el tratamiento biológico. La mayoría de los hidrocarburos alifáticos y monoaromáticos de bajo peso molecular (con 9 átomos de carbono o menos) son más fáciles de degradar que los hidrocarburos alifáticos más pesados o poliaromáticos.
- ❖ **Condiciones climáticas:** El suelo en tratamiento generalmente no está cubierto, por lo que está expuesto a factores climáticos como la lluvia, la nieve, el viento y los cambios en la temperatura ambiente. El agua de lluvia puede infiltrarse o escurrirse sobre el área tratada, lo que aumentaría el contenido de humedad del suelo y causaría erosión. Los microorganismos necesitan una humedad adecuada del suelo para su crecimiento; un suelo demasiado húmedo restringe

el movimiento del aire a través del suelo sub-superficial, reduciendo la disponibilidad de oxígeno, por lo que durante o después de una lluvia importante, el contenido de humedad del suelo podría ser excesivo para mantener una actividad microbiana efectiva. Por otra parte, durante los períodos de sequía, el contenido de humedad del área podría disminuir en exceso, por lo que podría ser necesario incrementarla. La erosión de los suelos en proceso de biodegradación puede darse durante períodos ventosos, en especial durante el traslado y/o roturado de la tierra. El crecimiento bacteriano es una función de la temperatura y para las bacterias que biodegradan los hidrocarburos de petróleo, el intervalo de temperaturas óptimas es entre los 10 y los 45°C. Como la temperatura del suelo varía con la temperatura ambiente, hay ciertas épocas del año en las que el crecimiento bacteriano disminuye. Cuando la temperatura ambiente vuelve a ser óptima, la actividad bacteriana se restablece gradualmente.

Por otra parte, la presencia en el suelo de concentraciones muy altas de compuestos orgánicos derivados del petróleo, o de metales pesados, puede ser tóxica e inhibir el crecimiento y la reproducción bacteriana.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

#### 6.2.1.1.1 Bioceldas

Las bioceldas se utilizan para reducir la concentración de constituyentes del petróleo, en suelos excavados, por medio de la biodegradación.<sup>46</sup> Esta tecnología consiste en amontonar el suelo contaminado formando montículos o celdas y estimulando la actividad microbiana aeróbica dentro del suelo por medio de la aireación y la adición de minerales y nutrientes. Esta actividad microbiana produce la degradación de los componentes del petróleo por medio de la respiración microbiana. En general, para las bioceldas se utiliza aireación forzada, ya sea por inyección o por extracción, mediante tubos perforados que cruzan la celda.

### **Aplicación**

Las bioceldas son efectivas para reducir la concentración de casi todas las sustancias presentes en los productos derivados del petróleo.

### **Diseño y operación de un sistema de bioceldas**

Las bioceldas se diseñan con el propósito de optimizar las condiciones para que las bacterias aeróbicas biodegraden los contaminantes orgánicos. Generalmente, su altura varía entre 1 y 3 metros. Se requiere un área adicional de tierra alrededor de las bioceldas para los taludes, las banquetas y los accesos. La longitud y el ancho de las bioceldas no tienen restricciones, excepto cuando la aireación se realiza por roturación manual, en cuyo caso no debería exceder los 2 a 2,5 metros de ancho, debido a que durante la vida útil de las Bioceldas, el suelo tiene que ser roturado para permitir que siga degradándose.

En general, las bioceldas se construyen en capas o pisos. Se coloca una capa de unos pocos pies de altura, luego se colocan las tuberías de aireación y, por último, se coloca la siguiente capa. Este proceso se repite hasta alcanzar la altura deseada.

Durante el mezclado del suelo deben adicionarse nutrientes (abono), correctores de suelo, materiales de relleno y sustancias químicas para ajustar el pH. Periódicamente debe también agregarse humedad al suelo, debido a que éste se seca, como resultado de la evaporación, la cual se incrementa durante las operaciones de aireación. Puede haber una excesiva acumulación de humedad dentro de las bioceldas en regiones con mucha precipitación, o con drenajes ineficientes.

Debido a que los constituyentes volátiles tienden a evaporarse y migrar desde las bioceldas al aire, durante la extracción o inyección, se necesita un sistema de captación o contención de vapores. Ésto puede realizarse cubriendo las bioceldas e instalando

tuberías de colección. Los vapores extraídos pueden reinyectarse para producir una biodegradación adicional o pueden adsorberse en carbón activado.

Las bioceldas se construyen sobre una capa de *liner* impermeable, para prevenir el lixiviado de contaminantes hacia el agua subterránea. Los lixiviados provenientes de las bioceldas se colectan para su tratamiento y disposición.

**Ventajas y desventajas de las bioceldas**

Ventajas	Desventajas
Relativamente simple de diseñar e implementar	Reducciones de la concentración > 95% y concentraciones de los constituyentes < 0.1 ppm son muy difíciles de lograr.
Tiempo de tratamiento corto: generalmente entre 6 meses y 2 años bajo condiciones óptimas.	Puede no ser muy efectivo para altas concentraciones de TPH (TPH > 50 000 ppm).
Costo competitivo: US \$30-90/ton de suelo contaminado.	Concentraciones altas (mayores a > 2 500 ppm) pueden inhibir el crecimiento microbiano.
Efectivo para eliminar contaminantes orgánicos con baja rapidez de biodegradación.	Los contaminantes volátiles tienden a evaporarse más que a biodegradarse durante el tratamiento.
Requiere menos tierra que la biodegradación.	Requiere una superficie para tratamiento grande, aunque menor que para la biodegradación.
Puede diseñarse como un sistema cerrado; la emisión de vapores puede ser controlada.	La generación de vapor durante la aireación puede necesitar tratamiento antes de la descarga.
Puede diseñarse para ser efectiva para cualquier combinación de condiciones del sitio a remediar y para cualquier hidrocarburo.	Puede requerirse un <i>liner</i> para contener los lixiviados de las bioceldas.

**6.2.1.1.2 Aireación o aspersión de aire**

La aireación es una tecnología de remediación *in situ* que reduce la concentración de hidrocarburos volátiles.<sup>47</sup> Esta tecnología, también conocida como volatilización *in situ*

*(stripping in situ)*, se basa en la inyección de aire libre de contaminantes a una zona sub-superficial saturada, mediante una transferencia de masa, desde un estado disuelto hacia una fase vapor. El aire es luego venteado a través de una zona no saturada.

La aireación generalmente se utiliza junto con una extracción de vapor del suelo (SVE por *Soil Vapour Extraction*), pero puede utilizarse junto con otras tecnologías de remediación. Cuando se utilizan estos dos sistemas combinados, el sistema SVE crea una presión negativa en la zona no saturada a través de una serie de pozos de extracción, con los que se controla la migración de la pluma de vapor.

### Aplicación

La aireación, correctamente utilizada, puede ser muy efectiva en la reducción de la concentración de VOCs de los hidrocarburos utilizados como combustible. Generalmente se aplica para los compuestos más ligeros que la gasolina (como benceno, etilbenceno, tolueno y xileno) porque se transfieren de una fase a otra muy rápidamente. Es menos aplicable al diesel y al queroseno.

El sistema de aspersión de aire puede usar tanto pozos verticales como horizontales. La orientación de los pozos debe adecuarse a las necesidades y condiciones específicas del lugar a remediar.

No debe usarse esta tecnología ante la presencia de alguna de las siguientes condiciones:

- **Productos libres presentes:** La difusión de aire puede generar una acumulación de agua subterránea, la que puede provocar la migración del producto, con la consiguiente diseminación de la contaminación.
- **Zapatatas, drenajes u otros espacios confinados sub-superficiales cerca del sitio:** Pueden alcanzarse concentraciones peligrosas de contaminantes en las zapatas,

a menos que se utilice algún sistema de extracción para controlar la migración de los vapores.

- Agua subterránea contaminada localizada en un acuífero confinado: La aireación no puede utilizarse para tratar agua subterránea de acuíferos confinados, porque el aire inyectado quedaría atrapado en la capa confinante y no podría migrar hacia zonas no saturadas.

### Diseño y operación del sistema

La efectividad de la aireación depende fundamentalmente de dos factores:

- ❖ La proporción de contaminantes en las fases vapor y líquido determina la concentración de equilibrio entre las dos fases. Este factor es muy importante para determinar la rapidez a la cual los contaminantes disueltos pasan a la fase vapor.
- ❖ La permeabilidad del suelo determina la velocidad a la cual el aire puede inyectarse en la zona saturada. Este factor también determina la rapidez de transferencia de masa de los contaminantes de una fase a otra.

En general, la aireación es más efectiva para los contaminantes más volátiles y de menor solubilidad, en combinación con los suelos más permeables. La rapidez de remoción de los contaminantes disminuye a medida que la aireación se lleva a cabo y se reduce la concentración de contaminantes disueltos.

Las características del suelo determinan las zonas de flujo de vapor y la facilidad con la que los vapores pueden ser controlados.

Los suelos estratificados o muy heterogéneos crean barreras para la difusión del aire. Tanto el aire inyectado como los vapores extraídos tienden a atravesar los caminos que

ofrecen menor resistencia (zonas de partículas medias y no aglomeradas) incluso desplazándose lateralmente a grandes distancias del punto de inyección. Este fenómeno puede ocasionar el esparcimiento de la contaminación, debido a la migración de vapores fuera del área de control de extracción de vapores.

Los objetivos principales durante el diseño de un sistema de difusión de aire son la configuración de los pozos y la ubicación de los puntos de monitoreo, a fin de:

- Optimizar la influencia de la pluma, maximizando la eficiencia de remoción del sistema.
- Localizar puntos de monitoreo y de extracción de vapor óptimos, con el objeto de asegurar una mínima migración de la pluma de vapor y de evitar las migraciones no detectadas, tanto de la pluma de fase disuelta como la de fase vapor.

La ubicación y la cantidad de puntos de difusión de aire requeridos para guiar la pluma de la fase disuelta están determinadas por la permeabilidad y la estructura del suelo, debido a que éstas afectan la presión de difusión y la distribución del aire en la zona saturada. Los suelos medianamente particulados (arena o grava) tienen una mayor permeabilidad intrínseca que los suelos de partículas finas (arcilla o limo) y el aire (o el agua) se desplaza con mayor facilidad a través de los suelos más permeables. La dispersión lateral del aire se produce con mayor frecuencia en los suelos de partículas finas.

**Ventajas y desventajas de la aireación**

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Disponibilidad de equipo; fácil instalación.	No puede utilizarse cuando hay presentes contaminantes libres (Deben removerse previo a la aireación)
Puede implementarse prácticamente sin perturbar las operaciones en el sitio.	No puede utilizarse para tratar acuíferos confinados.
Tiempo de tratamiento breve (generalmente toma entre 1 y 3 años para alcanzar las condiciones óptimas)	Los suelos estratificados pueden tornar inefectiva a la aireación.
Costo de US \$20-50/ton de suelo saturado. Es más económico que los tratamientos superficiales.	Algunas interacciones entre procesos químicos, físicos y biológicos complejos no se entienden totalmente.
El agua subterránea no necesita remoción, tratamiento, almacenamiento o descarga.	Se necesitan datos de campo y de laboratorio para el diseño.
Puede utilizarse junto con otros procesos de remoción.	Puede provocar la migración de los contaminantes.
	Requiere una prueba piloto detallada y monitoreos para asegurar controlar el vapor y limitar la migración.

**6.2.1.1.3 Biodegradación**

La biodegradación, también conocida como tratamiento en tierra o aplicación en tierra, es una tecnología de remediación superficial de suelos.<sup>48</sup> En esta tecnología se excavan los suelos contaminados y se extienden en finas capas sobre la superficie. Se estimula la actividad microbiana aeróbica dentro del suelo por medio de la aireación y/o la adición de minerales, nutrientes y humedad. Si los suelos contaminados son superficiales (poco profundos, menos de 90 cm de profundidad) es posible estimular la actividad microbiana sin excavarlos. Si la profundidad es mayor que 1,5 m, el suelo debe ser excavado y extendido sobre la superficie del terreno.

**Aplicación**

La biodegradación es efectiva para reducir la concentración de casi todos los hidrocarburos presentes en los combustibles más utilizados, desde la gasolina, con una



fracción de compuestos volátiles significativa, hasta aceites lubricantes prácticamente no volátiles. Los productos derivados del petróleo generalmente contienen más de cien compuestos diferentes, con un amplio intervalo de valores de volatilidad. En general, la gasolina, el queroseno y el diesel contienen compuestos lo suficientemente volátiles como para evaporarse, por lo que dependiendo de las reglamentaciones vigentes habría que controlar las emisiones de VOCs. Este control de las emisiones involucra la captura de vapores y el tratamiento apropiado de los mismos, antes de ser liberados a la atmósfera.

### **Diseño y operación del sistema**

La etapa de construcción incluye: preparación del sitio (deshierbe, limpieza y nivelación); tendido de banquetas; instalación del *liner* (si es necesario); sistemas de recolección y tratamiento de lixiviados; pretratamientos del suelo (trituration, mezclado y control de pH); e instalaciones de encapsulamiento y tratamiento del vapor.

Los métodos de ajuste del pH y el suministro de nutrientes generalmente incluyen la aplicación periódica de fertilizantes sólidos, cal y/o azufre, durante la trituration y mezcla del suelo, o la aplicación de nutrientes líquidos por aspersión. La composición de los nutrientes y de la solución ácida/alcalina para controlar el pH se desarrolla en los estudios de biotratabilidad y su frecuencia de incorporación se realiza de acuerdo a las necesidades, según se vea durante la operación.

Pudiera ser necesario controlar las emisiones a la atmósfera (cubiertas o estructuras de encapsulamiento) si el suelo contiene contaminantes volátiles. En general, las emisiones de VOCs se estiman de acuerdo a la concentración inicial de hidrocarburos presente. Se deben monitorear los vapores durante las fases iniciales de la biodegradación, a fin de cumplir las normas de emisiones a la atmósfera. Puede ser necesario especificar un tratamiento para el vapor que incluya los parámetros de operación y monitoreo.

Se necesita un monitoreo periódico para asegurar la optimización de la rapidez de biodegradación, a fin de encauzar la reducción de la concentración de los contaminantes y para monitorear las emisiones de vapor, la migración de contaminantes al suelo y vigilar constantemente la calidad del agua subterránea.

**Ventajas y desventajas de la biodegradación**

Ventajas	Desventajas
Relativamente simple de diseñar e implementar.	Reducción de la concentración mayor del 95% y concentración final de contaminantes menor a 0.1 ppm son difíciles de alcanzar.
Corto tiempo de tratamiento (generalmente entre 6 meses y 2 años en condiciones óptimas)	No es efectivo para altas concentraciones de contaminantes (50 000 ppm de TPH)
Costo competitivo: US \$30-60/ton de suelo contaminado.	Concentraciones altas de metales pesados (mayores a 2 500 ppm) pueden inhibir el crecimiento bacteriano.
Efectivo sobre compuestos orgánicos de baja rapidez de biodegradación.	Los compuestos volátiles tienden a evaporarse más que a biodegradarse durante el tratamiento.
	Se necesita un área muy grande para el tratamiento.
	La generación de polvo y vapor durante la aireación puede afectar la calidad del aire de los alrededores.
	Se podría necesitar un <i>liner</i> para la contención de lixiviados.

**6.2.1.1.4 Bioextracción**

La bioextracción es una tecnología *in situ* que utiliza microorganismos nativos para biodegradar los compuestos orgánicos en la zona saturada.<sup>49</sup> En la Bioextracción, el aire (u oxígeno) y los nutrientes (en caso de ser necesario) se inyectan a la zona saturada para incrementar la actividad biológica de los microorganismos nativos. La bioextracción puede utilizarse para reducir la concentración de hidrocarburos disueltos en el agua subterránea o adsorbidos en el suelo; pero para estos últimos, en general, es

más efectiva la bioventilación. La bioextracción se utiliza combinada con la extracción de vapor (SVE) o bioventilación cuando hay presencia de contaminantes volátiles. Cuando se combina la bioextracción con la SVE, el sistema de extracción de vapor genera una presión negativa en la zona, debido a la existencia de una serie de pozos de extracción que controlan la migración de la pluma.

### Aplicación

Cuando se la utiliza de manera apropiada, la bioextracción es efectiva en la reducción de hidrocarburos provenientes de tanques de almacenamiento. A menudo se utiliza esta tecnología en lugares contaminados con hidrocarburos de peso molecular medio como por ejemplo el diesel.

La bioextracción no debe utilizarse cuando exista alguna de las siguientes condiciones:

- **Presencia de productos libres:** La bioextracción puede generar una acumulación de agua subterránea y así provocar la migración del producto, con la consiguiente diseminación de la contaminación.
- **Zapatatas, drenajes u otros espacios confinados sub-superficiales cerca del sitio:** Pueden acumularse concentraciones peligrosas de contaminantes en las zapatas, a menos que se utilice algún sistema de extracción de vapor para controlar la migración de los vapores.
- **Agua subterránea contaminada localizada en un acuífero confinado:** Debido a que el aire inyectado quedaría atrapado en la capa confinante y no podría migrar hacia zonas no saturadas.

### Diseño y operación del sistema

El proceso de bioextracción es similar al de aireación; sin embargo, mientras la aireación remueve los contaminantes principalmente a través de la volatilización, la bioextracción promueve la degradación más que la volatilización (generalmente

utilizando flujos de aire menores que los utilizados en la aireación). En la práctica, tanto la bioextracción como la aireación utilizan ambos mecanismos.

La efectividad de la bioextracción depende principalmente de dos factores:

- ❖ La permeabilidad del suelo, que determina la velocidad a la cual el oxígeno puede suministrarse a los microorganismos que degradan los hidrocarburos en la zona sub-superficial.
- ❖ La biodegradabilidad de los hidrocarburos presentes, la que determina la rapidez y el grado al cual los hidrocarburos serán biodegradados por los microorganismos.

Para la bioextracción, las bacterias aeróbicas son las más importantes en el proceso de la biodegradación. La rapidez de biodegradación dependerá, en parte, del suministro de oxígeno al área contaminada, debido a que el metabolismo aeróbico es mucho más rápido que el anaeróbico. Cuando hay una cantidad insuficiente de oxígeno disuelto disponible, los organismos que requieren utilizar otro electrón aceptor, pueden degradar los contaminantes pero más lentamente.

Las metas esenciales del diseño del sistema de bioextracción y del sistema de aireación son la configuración de los pozos y los puntos de monitoreo, a fin de:

- ❖ Optimizar la influencia de la pluma, maximizando la eficiencia de remoción del sistema.
- ❖ Proveer un monitoreo y puntos de extracción de vapor óptimos para asegurar una mínima migración de la pluma de vapor y poder detectar la migración tanto de la fase disuelta como de la fase vapor. En algunas aplicaciones, como áreas muy grandes, o debajo de edificios y pavimento, los pozos de extracción de vapor horizontales son muy eficientes para controlar la migración del vapor.

La ubicación y el número de puntos de aspersión de aire necesarios para airear la fase disuelta se determina según la permeabilidad y la estructura del suelo. El radio de burbuja (análogo al radio de influencia de los sistemas de aireación) se define como la mayor distancia desde el pozo de aspersión a la cual la presión de aspersión y el flujo de aire pueden inducirse para biodegradar los contaminantes. El radio de burbuja determinará el número de los pozos y su espaciamiento. Este radio se determina en base a los resultados de pruebas piloto; depende de la heterogeneidad del suelo y de sus diferencias de permeabilidad, tanto en sentido vertical como horizontal. Generalmente, el radio de burbuja está en un intervalo comprendido entre 1,5 m, para suelos de partícula fina, y 30 m, para suelos de partícula gruesa.

Se pueden utilizar estudios de biodegradación en laboratorio, para estimar la rapidez de suministro de oxígeno y para determinar si es necesario agregar nutrientes inorgánicos, aunque los estudios de laboratorio no pueden reproducir con exactitud las condiciones de campo.

Debe realizarse una Prueba de Factibilidad de Bioextracción en Campo para determinar la efectividad de la bioextracción caracterizando:

- La rapidez de la biodegradación
- El radio de burbuja
- La posible pluma de migración

**Ventajas y desventajas de la bioextracción**

Ventajas	Desventajas
Tiene la misma efectividad que la aireación para una mayor cantidad de hidrocarburos de petróleo	Solo puede utilizarse en lugares donde la aireación sea adecuada (en suelos permeables y uniformes, acuíferos no confinados, sin hidrocarburos libres, lejos de espacios confinados, etc.)
Implementación con un mínimo de disturbios a las operaciones del sitio	Algunas interacciones entre los complejos procesos químicos, físicos y biológicos aún no se entienden claramente
Tiempo de tratamiento corto, 6 meses a 2 años, bajo condiciones óptimas	Falta de datos de campo y de laboratorio para apoyar las consideraciones de diseño
Costo competitivo	Posible inducción a la migración de contaminantes
Disponibilidad de equipos; fácil instalación	
La inyección de aire a baja velocidad minimiza la necesidad de captura y tratamiento del vapor	

**6.2.1.1.5 Bioventilación**

La bioventilación es una tecnología de remediación *in situ*, que utiliza microorganismos nativos para biodegradar los compuestos orgánicos adsorbidos por el suelo en la zona insaturada.<sup>50</sup> En la bioventilación la actividad de las bacterias se refuerza mediante la inducción de aire u oxígeno dentro de la zona insaturada y se agregan nutrientes cuando es necesario.

Cuando se utilizan pozos de extracción para la bioventilación, el proceso que se lleva a cabo es similar al utilizado en SVE; la diferencia está en que, mientras el SVE remueve los contaminantes principalmente a través de la volatilización, los sistemas de bioventilación facilitan la biodegradación de los contaminantes y minimizan la volatilización (generalmente mediante el uso de bajos caudales de aire). En la práctica, en ambos sistemas tienen lugar tanto la volatilización como la biodegradación.

### Aplicación

Pueden tratarse mediante la bioventilación todos los contaminantes degradables aeróbicamente, en particular las fugas de hidrocarburos como gasolina, queroseno y diesel. Ésta es una de las tecnologías más utilizadas para degradar hidrocarburos de peso molecular medio.

La bioventilación no es apropiada cuando la napa de agua subterránea (nivel hidrostático) se encuentra a menos de 1 m por debajo de la superficie. Cuando la napa se encuentra localizada entre 1 y 3 m de profundidad, deben tomarse consideraciones especiales, debido a que el agua subterránea puede penetrar a los pozos de bioventilación (o extracción), reduciendo o incluso eliminando el flujo de aire. Este problema se evita si en lugar de extraer el aire se inyecta aire a presión para inducir su flujo.

### Diseño y operación de un sistema de bioventilación

Para degradar grandes cantidades de hidrocarburos derivados del petróleo mediante la bioventilación, se necesita una población bacteriana substancial, la que a su vez necesita oxígeno, tanto para su proceso metabólico como para el crecimiento de la masa bacteriana. Se requieren de 1,3 a 1,6 Kg de oxígeno para degradar 0,5 Kg de hidrocarburos de petróleo.

La bioventilación difiere del sistema de SVE en un aspecto fundamental: el objetivo es inducir sólo el flujo de aire suficiente para ayudar a la biodegradación natural de los contaminantes, no para volatilizarlos. El flujo de aire puede inducirse mediante la inyección de aire atmosférico o por la extracción de aire del suelo. Debido a que se necesita un menor flujo de aire para bioventilar, existen menos posibilidades de que los contaminantes lleguen a áreas donde pudieran ocasionar problemas (como la

acumulación de vapor en las zapatas) y también es menor la posibilidad de necesitar algún tratamiento para el vapor extraído.

Los factores más importantes para controlar la efectividad de la bioventilación son:

- La permeabilidad del suelo contaminado: Ésta determinará el caudal de oxígeno que se deberá suministrar para que los microorganismos degradadores de hidrocarburos se localicen en la zona sub-superficial.
- La biodegradabilidad de los hidrocarburos presentes: Ésta determinará la rapidez y el grado con que los contaminantes serán metabolizados por los microorganismos.

La estructura y la estratificación del suelo son importantes para la bioventilación, debido a que afectan el modo y el lugar hacia donde fluirán los vapores cuando el aire sea extraído o inyectado. Las características estructurales, como la microfracturación, pueden ocasionar una mayor permeabilidad del suelo que la esperada, por lo que un suelo fracturado tendrá un incremento del flujo. La estratificación del suelo con capas de diferente permeabilidad puede incrementar desmesuradamente el flujo lateral de los vapores en los estratos más permeables, mientras que se reduce el flujo de vapor en las capas menos permeables. Este tipo de flujo puede llevar a tiempos de remediación demasiado prolongados, a que la remediación sea inefectiva en las capas menos permeables, o a una posible diseminación de la contaminación, en caso de utilizar pozos de inyección.

En general, las remediaciones basadas en procesos biológicos deben recurrir a pruebas piloto para verificar y cuantificar su efectividad y proveer los datos necesarios para diseñar el sistema.

El diseño del radio de influencia (RI) es una estimación de la máxima distancia desde el pozo de extracción (o inyección) a la cual puede inducirse un flujo de aire suficiente para aceptar una rapidez de degradación aceptable. Este RI depende de muchos



factores como la permeabilidad del suelo, la química del suelo, el contenido de humedad y el tiempo de remediación deseado. Generalmente se determina por medio de pruebas piloto en campo, pero también puede determinarse en forma empírica. El RI puede variar entre 1,5 m (para suelos de grano fino) y 30 m (para suelos de grano grueso). Para suelos de geología estratificada, el RI debe definirse para cada estrato, de manera de asegurar una adecuada aireación a las capas menos permeables. Este parámetro es muy importante para determinar la cantidad de pozos de extracción o inyección necesarios y el espaciamiento adecuado entre ellos.

El flujo de aire es muy importante para los suelos con efecto capilar, debido a que en los capilares se localiza una porción importante de los contaminantes. Los capilares suelen extenderse algunos metros sobre la napa de agua, por lo que este tipo de suelos puede tener un contenido de humedad demasiado alto para que la bioventilación sea efectiva. En estos casos, se deberá extraer el agua necesaria como para formar un cono de depresión en la napa de agua subterránea, de manera que pueda llevarse a cabo la bioventilación.

También deben considerarse las fluctuaciones del agua subterránea, debido a que fluctuaciones demasiado grandes pueden sumergir la zona contaminada, extendiendo la gravedad de la contaminación y dificultando, además, su remediación porque no habrá flujo de aire que alcance a la pluma en su totalidad.

El contenido de humedad ideal para este proceso está comprendido entre el 40 y el 85% de la capacidad de absorción de agua del suelo. Si se incrementa el flujo de aire, la bioventilación provoca la deshidratación de los suelos húmedos; una excesiva deshidratación disminuye la eficiencia del proceso, extendiendo el tiempo de operación.

**Ventajas y desventajas de la bioventilación**

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Disponibilidad del equipamiento y facilidad de instalación	Altas concentraciones de contaminantes pueden ser tóxicas para los microorganismos
Crea mínimas molestias a las operaciones del lugar. Puede utilizarse para áreas inaccesibles (debajo de edificios)	No aplicable para ciertas condiciones (suelos de baja permeabilidad o con alto contenido de arcillas)
Requiere tiempo de tratamiento corto: entre 6 meses y 2 años en condiciones óptimas	No siempre se pueden alcanzar niveles de contaminación residual bajos
Costo competitivo: US \$45-140/ton de suelo contaminado	Sólo se puede tratar la zona insaturada del suelo; para la zona saturada es necesario otro método.
Fácilmente combinable con otras tecnologías (aireación y extracción de agua subterránea)	
No es necesario el tratamiento del gas extraído	

**6.2.1.1.6 Atenuación natural**

La atenuación natural, también conocida como medidas correctivas intrínsecas, bioatenuación o biocorrección intrínseca o pasiva, aprovecha procesos naturales para degradar y disipar los compuestos derivados del petróleo del suelo y del agua subterránea.<sup>51</sup> Es un método de tratamiento *in situ* para contener la contaminación causada por derrames de productos químicos y reducir así la concentración y la cantidad de contaminantes en los lugares afectados.<sup>52</sup> Algunos de los procesos involucrados en la atenuación natural son: biodegradación aeróbica y anaeróbica, dispersión, volatilización y adsorción. En general, para los hidrocarburos derivados de petróleo, la biodegradación es el mecanismo más importante; es el único proceso natural que reduce la masa de contaminantes. La atenuación natural es una técnica no invasiva que permite usar productivamente el lugar mientras se realiza la limpieza. Puede ser menos costosa que otras opciones dirigidas para el tratamiento, especialmente las que se usan para el agua subterránea, y no requiere una fuente de energía ni equipo especial. Con frecuencia se utiliza como parte de la limpieza de un

sitio donde también se recurre al control o a la extracción de la fuente de contaminación.

Los procesos de atenuación natural a menudo se clasifican en destructivos y no destructivos. Los procesos destructivos destruyen al contaminante mientras que los procesos no destructivos reducen su concentración.

Estos procesos de atenuación natural pueden reducir la masa del contaminante (por medio de procesos destructivos, tales como la biodegradación y las transformaciones químicas), reducir su concentración (mediante dilución o dispersión) o unir los contaminantes a partículas de tierra, de manera que la contaminación no se propague o no se extienda demasiado (adsorción). Los procesos químicos son importantes para muchos compuestos (incluso para algunos aditivos para gasolina como el dibromuro de etileno); pero, prácticamente, sus efectos no tienen importancia sobre los combustibles.

La biodegradación hace uso de microorganismos naturales, aeróbicos o anaeróbicos, los cuales descomponen o degradan sustancias peligrosas transformándolas en sustancias menos tóxicas o incluso inocuas. La biodegradación anaeróbica es importante en el proceso de atenuación, debido a que cuando la rapidez de consumo de oxígeno para las funciones metabólicas de los microorganismos excede la capacidad de recuperación del mismo, se produce el agotamiento del oxígeno.

El centro de la pluma de contaminantes generalmente está en condiciones anaeróbicas, mientras que sólo en sus extremos las condiciones son aeróbicas. Si bien la rapidez de biodegradación anaeróbica es mucho menor que la aeróbica, el proceso anaeróbico domina la degradación de los hidrocarburos. Cuando se agota el oxígeno, la presencia de un electrón aceptor alternativo (ej.  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Fe(III)}$ ) y de un microorganismo capaz de utilizarlo, posibilitan la biodegradación anaeróbica. Una vez degradados los contaminantes, la población de microorganismos disminuye, porque ha agotado su fuente de alimentos. Los microorganismos muertos o una población pequeña de microorganismos sin alimentos no presentan riesgo de contaminación.

Cuando el suelo es relativamente poroso y permeable, el oxígeno requerido se recupera rápida y naturalmente desde la atmósfera, aunque si la permeabilidad es alta, puede haber migración de contaminantes. Cuando el suelo es poco poroso y relativamente impermeable se reduce la posibilidad de migración, pero el oxígeno no se recupera con rapidéz. Los materiales menos permeables, en general, contienen altos porcentajes de materia orgánica. Estas dos características favorecen la adsorción y retardan la migración de los contaminantes. En este caso, los contaminantes pueden permanecer casi sin degradarse cerca de la fuente.

En los casos de sitios no contaminados por petróleo, la acción es más difícil de prever y es eficaz en un porcentaje menor de sitios. Los solventes clorados se encuentran entre los contaminantes orgánicos más comunes del agua subterránea. Es importante hacer notar que cuando los compuestos clorados se biodegradan, la degradación deberá ser completa, porque algunos productos de la descomposición pueden ser aún más tóxicos que los compuestos originales.

Los efectos de dilución y dispersión parecen reducir la concentración del contaminante, pero no lo destruyen. Se puede infiltrar agua relativamente limpia desde la superficie y mezclarse con agua subterránea contaminada, diluyéndola. Puede también fluir agua subterránea limpia de un lugar en el subsuelo hacia zonas contaminadas; la dispersión de contaminantes que van alejándose del trayecto principal de la estela contaminada también lleva a una disminución de la concentración del contaminante en una zona determinada. Los hidrocarburos se dispersan en el suelo debido a la gravedad y a las fuerzas capilares (succión). Por otro lado, en el agua subterránea los hidrocarburos se dispersan por disolución en el caudal de agua subterránea, o por dispersión hidrodinámica, como resultado de mezcla mecánica y difusión molecular. La mezcla mecánica es el proceso dominante si el flujo de agua subterránea es relativamente alto. Si el flujo es bajo, el proceso dominante es entonces la difusión.

La volatilización remueve los contaminantes del agua subterránea, o del suelo, mediante su transferencia a la fase gaseosa. La volatilización produce, en general, una pérdida de masa entre 5 y 10%.

La adsorción se produce cuando los contaminantes se adhieren a partículas del subsuelo, es decir, son adsorbidos. Los hidrocarburos tienden a repeler el agua, igual que la mayoría de las sustancias oleosas, por lo que tienden a escaparse del agua subterránea adhiriéndose a la materia orgánica y minerales arcillosos que también repelen al agua. Esto es beneficioso porque puede retardar la migración de algunos hidrocarburos, prolongando el tiempo para la biodegradación. La adsorción, al igual que la dilución y la dispersión, parece reducir la concentración y la masa de contaminantes en el agua subterránea, pero no los destruye.

### Aplicación

En ciertas situaciones, la atenuación natural es una opción eficaz y económica para realizar una limpieza y la forma más apropiada de corregir algunos problemas de contaminación. A veces se dice erróneamente que la atenuación natural es el método de la inacción; sin embargo, es realmente un método activo centrado en la confirmación y la vigilancia de procesos de corrección naturales, en vez de depender totalmente de técnicas dirigidas.

Los hidrocarburos móviles y tóxicos, por ejemplo, son buenos candidatos para la atenuación natural. No sólo son difíciles de atrapar debido a su movilidad, sino que también se encuentran entre los contaminantes que más fácilmente se destruyen con la biodegradación. Sin embargo, cuando los hidrocarburos se encuentran en estado libre es necesario considerar otras alternativas.

La atenuación natural podría ser una opción aceptable para lugares donde se haya reducido la concentración de contaminantes, como resultado de la aplicación de otras

medidas correctivas. No es una opción apropiada para cualquier lugar debido a que los procesos naturales generalmente son lentos, se necesita una vigilancia a largo plazo para comprobar que la concentración de contaminantes disminuya continuamente y lo suficiente para que no se convierta en una amenaza para la salud. De no ser así, se debería considerar la posibilidad de aplicar medidas correctivas más enérgicas.

En ciertas circunstancias, puede considerarse que esta tecnología es una alternativa de remediación viable, aún si hubiese contaminación del agua subterránea, especialmente cuando no se la utilizará para potabilizar a causa de características tales como alta salinidad o por previa contaminación química o biológica y si, además, no se tiene previsto utilizarla como fuente de agua en un futuro inmediato.

Como la eficacia de la atenuación natural depende de diversas condiciones, es necesario caracterizar bien el sitio, a fin de determinar si ya se están llevando a cabo o se producirán los procesos característicos de la atenuación natural.

Los suelos con gran contenido de materia orgánica, como las zonas pantanosas o antiguos pantanos, con frecuencia son aptos para esta alternativa. Ciertas formaciones geológicas, como los acuíferos de lecho rocoso fracturado o zonas con calizas, son menos apropiadas para la atenuación natural porque en estos entornos a menudo hay suelos muy diversos que ocasionan un flujo imprevisible del agua subterránea y dificultan predecir el movimiento de los contaminantes.

### **Diseño y operación de un sistema de atenuación natural**

Para evaluar la efectividad de la atenuación natural se debe realizar un estudio detallado a fin de obtener datos sobre las condiciones del sitio y de los contaminantes presentes. Las condiciones del lugar deben monitorearse para confirmar si los contaminantes están siendo degradados o no y, además, a qué velocidad.

A través de un balance de masas de los contaminantes se puede conocer la extensión y la rapidez de degradación de la atenuación natural. Para esto se necesita un monitoreo extensivo que defina la extensión de la pluma, tanto horizontal como vertical. Además se necesitan otros indicadores como:

- **Características de la pluma de contaminantes:** En ausencia de mecanismos de atenuación la concentración de contaminantes permanecerá constante dentro de la pluma y decrecerá rápidamente al final de la misma. Si la atenuación se está llevando a cabo correctamente, la concentración de los contaminantes decrecerá con la distancia de la fuente y a lo largo de toda la pluma, como resultado de la dispersión. Si simultáneamente existe otro mecanismo de atenuación, se acelerará la reducción de la concentración de los contaminantes.
- **Indicadores de oxígeno disuelto:** La rapidez de biodegradación dependerá en parte del suministro de oxígeno. A niveles de OD inferiores a 1-2 mg/L en el agua subterránea, la rapidez de biodegradación es muy baja. Durante la biodegradación aeróbica hay una relación inversa entre la concentración de OD y la concentración esperada de contaminantes.
- **Indicadores geoquímicos:** Algunas características geoquímicas pueden servir como indicadores de la atenuación natural. La biodegradación aeróbica de hidrocarburos produce dióxido de carbono y ácidos orgánicos; ambos productos tienden a bajar el pH en la región y a aumentar la alcalinidad de los componentes de la pluma, en clara manifestación de condiciones oxidantes. La biodegradación anaeróbica aumenta el pH, reduce el Fe(III) a Fe(II) aumentando la concentración de hierro soluble y también aumenta la concentración de metano, característico de la biodegradación en un medio reductor.
- **Potencial Redox Eh:** Es una medida de la actividad electrónica y un indicador relativo de la tendencia de una solución a aceptar o transferir electrones, la cual

resulta del equilibrio entre todas las especies iónicas presentes en sus diversos estados de oxidación. Muchos procesos biológicos operan sólo dentro de un intervalo de este potencial. El Eh puede ser utilizado como indicador geoquímico de ciertas reacciones como la reducción de sulfatos, nitratos o hierro. Un potencial redox bajo, entre -100 y 50 mV, es un indicador de condiciones anaeróbicas o reductivas. Muchos procesos naturales de biodegradación en la superficie del planeta ocurren con valores de Eh entre 100 y 500 mV, indicando condiciones aeróbicas y oxidantes. El potencial redox del área contaminada será mayor que el valor de fondo fuera de la pluma.

**Ventajas y desventajas de la atenuación natural**

Ventajas	Desventajas
Menor costo que las demás alternativas de remediación	No es efectivo cuando la concentración de hidrocarburos es alta (mayor a 20 000 - 25 000 ppm de TPH)
Mínimas molestias en el lugar de operaciones	No es adecuado bajo ciertas condiciones del lugar (suministros de agua, presencia de producto libre)
	Puede migrar parte de los contaminantes; no es adecuado cuando puede afectarse un cuerpo receptor de agua
	Tiempo de remediación prolongado, especialmente para hidrocarburos pesados
	No siempre se alcanzan los niveles de remediación deseados dentro de un tiempo razonable

**6.2.1.2 Remediaciones físico - químicas**

Las remediaciones físico-químicas se basan en las propiedades físicas y químicas de los contaminantes, como la volatilización o evaporación por efecto de la temperatura para separarlos del suelo, la desorción de los compuestos volatilizados, la combustión retardada y la oxidación catalítica para destruir los constituyentes orgánicos y la condensación y adsorción para atraparlos y darles un tratamiento posterior.



### 6.2.1.2.1 Desorción térmica a baja temperatura

La desorción térmica a baja temperatura (LTTD), también conocida como volatilización térmica a baja temperatura, *stripping* térmico o cocción de suelos, es una tecnología de remediación exterior que utiliza el calor para separar físicamente los hidrocarburos del suelo excavado.<sup>53</sup>

Se diseñan desorbedores térmicos para calentar el suelo a una temperatura lo suficientemente alta para provocar la volatilización de los contaminantes y desorberlos del suelo. A pesar de que no son diseñados para descomponer los compuestos orgánicos, la desorción térmica puede causar la descomposición parcial o total de los mismos, dependiendo de los compuestos presentes. Los hidrocarburos vaporizados generalmente son tratados en una unidad de tratamiento secundaria (equipo de combustión retardada, chimenea de oxidación catalítica, condensador o unidad de adsorción de carbón activado) antes de descargarlos a la atmósfera.

Para utilizar esta tecnología de remediación se necesitan algunos procesos previos y otros posteriores. El suelo excavado se tamiza para remover los objetos mayores que 5 cm de diámetro, los que se muelen y se reingresan a la alimentación. Después de la desorción, el suelo se enfría, se le agrega agua para controlar el polvo y se lo estabiliza, en caso de ser necesario, con el objeto de prepararlo para su disposición o reuso. El suelo tratado puede volver a depositarse en el lugar o usarse como cubierta en rellenos sanitarios.

### **Aplicación**

La desorción térmica a baja temperatura es muy efectiva en la reducción de hidrocarburos derivados del petróleo, como gasolina, queroseno, diesel y lubricantes. Se puede utilizar para compuestos volátiles, a temperaturas tan altas como 650 °C. La mayoría de los desorbedores operan a temperaturas entre 150°C y 550°C. Los desorbedores que pueden operar hasta 650°C se construyen de aleaciones especiales. Los productos más volátiles, como la gasolina, pueden desorberse a temperaturas más bajas; mientras que los semivolátiles, como el queroseno y el diesel, generalmente necesitan temperaturas superiores a los 370°C; los productos relativamente no volátiles, como los aceites lubricantes, deben operar a temperaturas aún mayores.

Esencialmente, todas las clases de suelo pueden ser tratadas por el sistema LTTD, pero dependiendo de la clase de suelo puede variar el grado y el tipo de pretratamiento. Por ejemplo, un suelo de gravas y cantos rodados puede necesitar una molienda; los suelos finamente graneados y cohesivos, como la arcilla, pueden necesitar una trituración.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
Antes de iniciar la remediación debe realizarse una prueba piloto de la efectividad de este tratamiento, con muestras del suelo a remediar. A esta prueba se le llama "prueba de quemado". Los resultados de la prueba con muestras de suelo identifican las propiedades relevantes de los contaminantes, mientras que el examen del desempeño de las máquinas indica cuán efectivo es este sistema para tratar el suelo. Es importante asegurar que el suelo examinado sea representativo de las condiciones promedio y que se analicen suficientes muestras, antes y después del tratamiento, como para asegurar que el sistema LTTD será efectivo.

La decisión acerca de si los sistemas de LTTD son una alternativa de remediación práctica, depende, fundamentalmente, de las características específicas del sitio en estudio, como su ubicación, el volumen de suelo contaminado y el plano del lugar. Los

factores económicos a evaluar en los sistemas LTTD dependen del lugar específico y, entre los más importantes, se encuentran: uso del suelo, costo de LTTD por unidad de volumen de suelo relativo a otras opciones de remediación y ubicación del sistema de LTTD más cercano.

### Diseño y operación de un sistema de desorción térmica

El término “desorbedor térmico” describe una operación unitaria consistente en el calentamiento de los suelos contaminados con hidrocarburos, seguido de la desorción de esos materiales orgánicos arrastrados en un gas de purga. El diseño mecánico y las condiciones de operación varían considerablemente, dependiendo del sistema de LTTD. Hay cuatro clases de unidades de desorción o desorbedores disponibles en el mercado:

- ❖ Secadores o desorbedores rotativos
- ❖ Tornillos térmicos
- ❖ Plantas de asfalto con agregado seco
- ❖ Hornos convectivos.

Si bien todos estos sistemas utilizan calor para separar o desorber a los contaminantes orgánicos del suelo, cada sistema opera de una manera diferente y tiene sus propias ventajas y desventajas. La decisión de utilizar un sistema u otro depende de la naturaleza de los contaminantes, de la maquinaria disponible, del desempeño del sistema y de consideraciones económicas.

Los sistemas de desorción térmica pueden ser de dos clases: instalaciones fijas y unidades móviles. Los suelos contaminados son excavados y transportados a las instalaciones fijas; las unidades móviles pueden operarse *in situ*. Hay distintos tipos de

unidades de desorción disponibles en el mercado, como desorbedores rotativos, tornillos térmicos y hornos convectivos.

El tipo de suelo en que se hallan los contaminantes es un factor muy importante que influye en la selección del equipo desorbedor y de los pretratamientos necesarios. La plasticidad es una de las propiedades que se utilizan para definir el tipo de un suelo dado. La plasticidad del suelo es una medida de su habilidad para deformarse sin aplicarle un esfuerzo cortante y es, en parte, función de su contenido de agua. Los suelos plásticos tienden a pegarse en los equipos y a formar coágulos. Además, si se disminuye levemente la velocidad de alimentación, estos suelos son difíciles de tratar. El calentamiento de los suelos plásticos requiere de altas temperaturas, debido a su baja relación área superficial /volumen y su alto contenido de humedad. Debido a que los suelos plásticos tienden a ser muy finamente particulados, los compuestos orgánicos tienden a estar muy adsorbidos. El tratamiento térmico de los suelos altamente plásticos requiere pretratamientos tales como trituración o mezcla con otros suelos más fáciles de tratar u otros aditivos, como yeso.

El material cuyo tamaño de partícula sea mayor que 5 cm de diámetro debe ser molido o removido. El material molido se recircula en la alimentación para ser procesado. Los suelos de granos grandes tienden a fluir más libremente y a no formar flóculos; generalmente no retienen excesiva humedad y por ello los contaminantes son fácilmente desorbidos. Los suelos de granos más finos, que retienen más humedad y forman flóculos, una vez secos pueden contener grandes cantidades de partículas que deberán ser recirculadas.

La capacidad de proceso de sólidos de un sistema de desorción térmica es inversamente proporcional al contenido de humedad del material alimentado. La presencia de humedad en los suelos excavados determinará el tiempo de residencia necesario en la unidad LTTD y las necesidades de calor para una efectiva remoción de los contaminantes. La mayor parte de la humedad del suelo deberá evaporarse en el desorbedor a fin de que se lleve a cabo apropiadamente la desorción de los

hidrocarburos. Este proceso puede necesitar una gran cantidad de energía térmica adicional y un excesivo tiempo de residencia del suelo en el desorbedor. El contenido de humedad también influye en la plasticidad, la que afecta el manejo del suelo como ya se explicó arriba. Los suelos con excesivo contenido de humedad (mayor al 20%) deben ser presecados. Los métodos de presecado típicos son con aire seco (si hay capacidad de almacenamiento suficiente), mezclado con suelos secos ó presecado mecánico.

La presencia de metales en el suelo puede tener dos consecuencias: 1) limitaciones en la disposición de los residuos sólidos generados por desorción y 2) un necesario mayor control de las emisiones aéreas debido a la emisión de metales. A temperaturas de operación normales los metales pesados no se separan del suelo en grandes cantidades.

Las concentraciones altas de hidrocarburos en el suelo pueden liberar gran cantidad de calor. La liberación de calor del suelo puede ocasionar el sobrecalentamiento y daño del desorbedor. Los suelos que liberan más de 225kcal/kg deben mezclarse con suelos limpios, para diluir la gran cantidad de hidrocarburos. Altas concentraciones de hidrocarburos en el gas pueden exceder la capacidad térmica del equipo de combustión retardada, por lo que podrían liberarse a la atmósfera vapores sin tratar. Por otra parte, una excesiva cantidad de hidrocarburos en el suelo podría generar vapores en el desorbedor, en concentraciones superiores al límite inferior de explosividad, por lo que podría provocarse una explosión dentro del desorbedor.

**Ventajas y desventajas de la desorción térmica a baja temperatura**

Ventajas	Desventajas
Disponibilidad de equipos tanto para tratamiento <i>in situ</i> como externo	Debe excavar el suelo; generalmente está limitado a profundidades máximas de excavación de 7,6 m
Tiempo de tratamiento muy rápido; la mayoría de los sistemas comerciales tienen capacidades superiores a 25 ton/hora	El tratamiento <i>in situ</i> requiere una gran área para ubicar la unidad de LTTD y almacenar el suelo en proceso
Costo competitivo para grandes volúmenes de suelo (mayores a 750 m <sup>3</sup> ): US \$30-70/ton de suelo contaminado, excluyendo los costos de excavación y transporte	El tratamiento externo tiene un alto costo en transporte
Puede utilizarse para remediar áreas con muy altas concentraciones de hidrocarburos	Los suelos excavados debajo de la napa de agua deben ser presecados antes de su tratamiento debido a su alto contenido de humedad
Fácilmente combinable con otras tecnologías como la aireación	
El suelo tratado puede volver a depositarse en el sitio o puede utilizarse como cubierta en rellenos sanitarios	
Puede reducir la concentración de TPH a valores de 10 ppm, incluso a veces pueden llegar a ser menores	

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

**6.2.1.2.2 Extracción de vapor de suelos**

La extracción de vapor de suelos (SVE) es un proceso relativamente sencillo que separa físicamente los contaminantes del suelo.<sup>54</sup> Como su nombre lo indica, consiste en la extracción de contaminantes del suelo, en forma de vapor, por lo que sólo sirven para retirar contaminantes que tienden a volatilizarse o a evaporarse con facilidad. Con esta técnica se extraen compuestos orgánicos volátiles y algunos compuestos orgánicos semivolátiles de la zona no saturada del subsuelo que se halla arriba de la napa freática. Por medio de un sistema de pozos subterráneos se crea un vacío y los contaminantes

ascienden a la superficie en forma de vapor o gas. A menudo, además de los pozos de extracción, se instalan pozos de inyección de aire para aumentar la corriente de aire y mejorar la rapidez de remoción del contaminante. Otra ventaja de la introducción de aire en el suelo es que puede estimular la biodegradación de algunos contaminantes.

La extracción de vapores del suelo se conoce también como volatilización *in situ*, volatilización mejorada, aireación del suelo *in situ*, aireación forzada del suelo, remoción *in situ* por chorro de aire o extracción al vacío.

### Aplicación

Esta tecnología es efectiva en la reducción de la concentración de VOCs y de algunos SVOCs presentes en los hidrocarburos derivados de petróleo. Es más eficiente cuando se aplica a hidrocarburos livianos, como la gasolina. El diesel y el queroseno, que son menos volátiles, no son bien removidos mediante esta tecnología, por lo que es más conveniente utilizar la bioventilación. La inyección de aire caliente se puede utilizar para volatilizar los productos más pesados debido a que la presión de vapor generalmente aumenta con la temperatura, pero esta opción incrementa los costos de energía.

Los sistemas de SVE no son adecuados cuando la napa de agua subterránea se encuentra a menos de 1 m de profundidad; se deben tener consideraciones especiales si la napa se halla entre 1 y 3 m de profundidad.

La extracción de vapores del suelo es muy eficaz para retirar compuestos orgánicos volátiles de la zona no saturada. Con la adición de un sistema de aspersión de aire, se pueden retirar también contaminantes de la zona saturada. Para ninguna de las dos técnicas se necesita excavar el suelo contaminado (es mejor evitar la excavación porque es costosa, levanta polvo y permite que salgan a la atmósfera contaminantes volátiles sin tratar) Los vapores extraídos generalmente necesitan un tratamiento, pero el costo del tratamiento de los vapores y líquidos extraídos es bajo, en comparación con el costo

de las técnicas que requieren excavación. El equipo es relativamente fácil de instalar, se puede usar eficazmente en combinación con otras técnicas de tratamiento y es eficaz para sitios con diferentes condiciones.

La extracción de vapores del suelo y la aspersión de aire pueden ser buenas opciones para lugares contaminados con solventes, otros compuestos orgánicos volátiles (como el tricloroetano, el tricloroetileno, el benceno, el tolueno, el etilbenceno y el xileno) y combustibles. Como las propiedades del suelo tienen un efecto muy importante en el movimiento de los vapores, la eficacia y el diseño de sistemas de extracción de vapores y aspersión de aire dependen en gran medida de las propiedades del suelo. La extracción de vapores del suelo da mejor resultado en suelos flojos no saturados, como arena, grava y limo grueso o lecho de roca fracturado. Sin embargo, se ha usado en suelos más densos, aunque el tratamiento lleva más tiempo. Además, cuanto más humedad contenga el suelo, más lenta será la extracción.

### Diseño y operación del sistema

En esta tecnología se aplica vacío al suelo por medio de pozos de extracción, los que crean una presión negativa que origina el movimiento del vapor hacia estos pozos. Los contaminantes volátiles en fase vapor se remueven fácilmente del suelo sub-superficial a través de pozos de extracción. Los vapores extraídos se tratan (en caso de ser necesario) y se descargan a la atmósfera.

Algunos de los factores que determinan la eficiencia de SVE son:

- Permeabilidad del suelo
- Estructura y estratificación del suelo
- Humedad del suelo
- Profundidad del agua subterránea



La permeabilidad del suelo afecta la rapidez del movimiento del aire y del vapor a través del suelo; mientras mayor es la permeabilidad del suelo, este movimiento es más rápido y mayor la cantidad de vapor que puede extraerse. La estructura y estratificación del suelo son importantes, debido a que pueden afectar la forma y el lugar donde se extraerán los vapores del suelo. Las características estructurales como capas y fracturas pueden producir un flujo preferencial que puede llevar a tiempos de remediación demasiado extensos.

Un alto contenido de humedad puede reducir la permeabilidad del suelo y, en consecuencia, restringir el flujo a través de los poros del suelo. Los sistemas de SVE generalmente no son efectivos debajo del punto donde se presentan efectos capilares, a menos que se utilicen bombas para provocar un cono de depresión mayor.

El primer paso para construir un sistema de extracción de vapores del suelo consiste en instalar pozos de extracción de vapor y pozos de inyección (o respiraderos) en la zona contaminada. Los pozos de inyección de aire usan compresores de aire para forzar la entrada de aire en el suelo. Los respiraderos desempeñan la misma función que los pozos de inyección, pero son pasivos: en vez de bombear aire, simplemente constituyen un pasaje para que se introduzca aire en el suelo. Cuando el aire que entra pasa por el suelo camino a los pozos de extracción, los contaminantes se evaporan de los espacios entre las partículas del suelo, son arrastrados por el aire hasta los pozos y allí se extraen.

Los pozos de extracción de vapores pueden ser verticales u horizontales. Generalmente son verticales y penetran hasta las capas inferiores de la zona no saturada. Los vapores extraídos con este proceso por lo general son sometidos a un tratamiento de adsorción con carbón, incineración, oxidación catalítica o condensación. También se han usado otros métodos, como el tratamiento biológico y la oxidación ultravioleta. El tipo de tratamiento que se seleccione dependerá de los contaminantes presentes y su concentración. La adsorción con carbón es el tratamiento que más se usa para los vapores contaminados y se puede adaptar a una amplia gama de compuestos orgánicos

volátiles. Si se proyecta y se utiliza bien, el sistema de extracción de vapores del suelo es un proceso seguro que requiere pocas tareas de mantenimiento,

**Extracción de vapores del suelo mejorada térmicamente.** Se puede mejorar la extracción de vapores del suelo con la inyección de aire caliente o vapor en el suelo contaminado por medio de los pozos de inyección. El aire caliente o el vapor ayuda a aflojar algunos compuestos menos volátiles del suelo. Se han realizado demostraciones en gran escala de extracción de vapores del suelo con inyección de vapor, en varios lugares. Además del aire caliente o el vapor, otra mejora de la extracción de vapores del suelo es el uso de radiofrecuencias para calentar el suelo y vaporizar o volatilizar mejor los compuestos en suelos arcillosos y limosos.

**Extracción de doble fase.** La extracción de doble fase es un sistema de tratamiento similar a la extracción de vapores del suelo, pero los pozos de extracción son más profundos y llegan a la zona saturada, debajo de la napa freática. Se aplica un fuerte vacío por medio de los pozos de extracción para extraer simultáneamente agua subterránea y vapores del subsuelo. Cuando los vapores y el agua subterránea llegan a la superficie, se separan y se someten a un tratamiento. En suelos densos y arcillosos, la extracción de doble fase es más eficaz que el método corriente de extracción de vapores. Cuando la extracción de doble fase se combina con medidas biocorrectivas, aspersión de aire o bioaireación, la limpieza lleva menos tiempo.

El parámetro más importante en el diseño es el radio de influencia (RI). El RI se define como la mayor distancia desde un pozo de extracción a la cual se produce suficiente vacío y flujo de vapor como para inducir adecuadamente la volatilización y extracción de los contaminantes del suelo. Los pozos de extracción deben estar ubicados de tal manera que sus RI se traslapen y cubran completamente el área contaminada.

Para el diseño de estos sistemas son muy importantes los estudios piloto. Estos estudios proveen datos sobre la concentración de VOCs que serán extraídos durante las primeras etapas de operación del sistema, además de proporcionar los datos para el

diseño a escala. Los sistemas de SVE se deben diseñar para prevenir la infiltración de agua de la superficie, la que puede reducir la rapidez de flujo del aire y reducir las emisiones de vapor fugitivas.

**Ventajas y desventajas de la extracción de vapor de suelos**

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Desempeño probado; equipo de fácil obtención; fácil instalación	Reducciones de concentración mayores al 90% son difíciles de alcanzar
Molestias mínimas en el lugar de operación	Tiene menor efectividad cuando se aplica a sitios con suelos poco permeables o estratificados
Tiempo de tratamiento corto (generalmente de 6 meses a 1 año en condiciones óptimas)	Puede requerir tratamientos costosos para descargar los vapores extraídos a la atmósfera
Costo competitivo: US \$20-50/ton de suelo contaminado	Generalmente se requiere permiso para las emisiones a la atmósfera
Puede aplicarse en sitios con producto libre y puede combinarse con otras tecnologías	Sólo se puede tratar la zona no-saturada del suelo; para suelos saturados y para agua subterránea se necesitan otros métodos de tratamiento

**6.2.1.2.3 Extracción en dos fases**

La extracción en dos fases (DPE), también conocida como extracción en multifase, es una tecnología de remediación *in situ*, que usa bombas para remover distintas combinaciones de agua subterránea contaminada, derivados del petróleo en fase separada y vapores de hidrocarburos de la zona sub-superficial.<sup>55</sup> Los líquidos y vapores extraídos se tratan y se llevan a disposición final o se reinyectan al suelo sub-superficial.

**Aplicación**

Los sistemas DPE pueden ser efectivos en la remoción de producto libre de la zona sub-superficial, reduciendo las concentraciones de hidrocarburos derivados del petróleo,

tanto en la zona saturada como en la zona no saturada del suelo sub-superficial. Generalmente están diseñados para maximizar la rapidez de extracción, pero esta tecnología también estimula la biodegradación de los constituyentes del petróleo en la zona insaturada, debido al incremento en el suministro de oxígeno. A menudo se seleccionan estos sistemas debido a su eficiencia, especialmente en suelos finamente particulados y en capas.

### **Diseño y operación de un sistema de extracción en dos fases**

Se aplica vacío en la zona sub-superficial con el sistema DPE, lo que genera un gradiente en la presión de vapor hacia el pozo de vacío. Este gradiente se trasmite a la fase líquida sub-superficial. Estos líquidos están en una fase continua (agua o derivados de petróleo libres) y fluirán hacia el pozo de vacío, como consecuencia de este gradiente. Mientras mayor es el vacío que se aplica, mayor es el gradiente hidráulico que se obtiene, tanto en fase líquida como gaseosa, y mayor es la rapidez de recuperación de ambas fases.

El cono de depresión que se forma en el agua subterránea debido a la rapidez de recuperación, sirve para controlar hidráulicamente su migración y para incrementar la eficiencia de la extracción de vapor.

Si bien a esta tecnología se la conoce como extracción en doble fase, tiene muchas variantes. Cuando se aplica un vacío relativamente grande, se la conoce como sistema DPE de alto vacío. La tecnología DPE puede dividirse en dos grandes categorías:

- Se extraen juntos los líquidos sub-superficiales y el vapor del suelo, como una corriente de dos fases (líquido-vapor) de alta velocidad, utilizando una sola bomba.

- Los líquidos sub-superficiales y el vapor del suelo se extraen en forma separada, utilizando dos o más bombas.

**Sistemas de una bomba:** Estos sistemas cuentan con un flujo de aire de alta velocidad para suspender las gotas de líquido y arrastrarlas a través de un tubo de extracción hasta la superficie. Puede utilizarse para extraer agua subterránea o combinaciones de agua subterránea y productos en fases inmiscibles. Generalmente son más adecuados para suelos poco permeables y son difíciles de implementar en sitios donde existen variaciones substanciales en el nivel del agua subterránea.

**Sistemas de dos o más bombas:** El sistema de dos bombas más convencional, utiliza una bomba para extraer líquidos del pozo y un soplador superficial (la segunda bomba) para extraer el vapor del suelo. Existe una tercera configuración, que usa un total de tres bombas, un soplador superficial junto con una bomba de extracción de productos sobrenadantes y otra para extraer el agua subterránea. Estos sistemas de dos y tres bombas extraen los líquidos del pozo separados del vapor del suelo y tanto su aplicación como su operación son similares.

Los sistemas de extracción DPE de dos bombas son simplemente una combinación del sistema tradicional de extracción de vapor de suelos y sistemas de recuperación de aguas subterráneas y/o productos sobrenadantes. Ellos son más flexibles que los sistemas de una sola bomba, siendo más fáciles de operar para distintas condiciones del lugar, el nivel del agua subterránea fluctuante y una amplia variación de permeabilidad del suelo; pero los costos de los equipos son más altos.

**Ventajas y desventajas de la extracción en dos fases**

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Probada efectividad en un amplio intervalo de condiciones. No requiere bombas de pozo profundo, pero es lo suficientemente flexible como para permitir su uso en caso de ser necesario	Los sistemas de una sola bomba son caros de implementar e ineficientes en suelos de media o alta permeabilidad. Los sistemas de dos bombas son ineficientes en suelos de baja permeabilidad
Molestias mínimas en el lugar de operación; puede utilizarse debajo de edificios sin excavación	Difficil de aplicar en sitios con nivel de agua fluctuante a menos que se utilicen bombas por debajo del cono de depresión
Tiempo de tratamiento corto (generalmente de 6 meses a 1 año en condiciones óptimas)	El tratamiento de los vapores extraídos y de separación de agua y aceite puede ser costoso
Aumenta substancialmente la rapidez de extracción del agua subterránea	Grandes volúmenes de agua extraída pueden requerir tratamiento
Puede aplicarse en sitios con producto libre y puede combinarse con otras tecnologías	Requiere equipos especializados con controles sofisticados
Puede reducir el costo de tratamiento del agua subterránea por medio de un stripping dentro del tubo de extracción de vacío	Requiere sistemas de monitoreo y control complejos durante la operación

**6.2.2 ARSÉNICO**

Para la descontaminación o remediación de suelos contaminados con elementos traza, como el arsénico, las principales alternativas de remediación son:<sup>56</sup>

**Remediaciones biológicas**

- Medidas fitocorrectivas

**Remediaciones físico-químicas**

- Enjuague del suelo *in situ*
- Lavado del suelo

### **6.2.2.1 Remediaciones biológicas**

En el caso del arsénico, así como para los metales pesados, las remediaciones biológicas no se basan en la biodegradación de los compuestos, sino en la estabilización o extracción de los elementos químicos presentes, tanto del suelo como del agua subterránea. Esta extracción se realiza por medio de la absorción de los elementos o compuestos químicos realizados por diversos tipos de plantas.

#### **6.2.2.1.1 Medidas fitocorrectivas**

Las medidas fitocorrectivas consisten en el uso de plantas y árboles para limpiar el agua y el suelo contaminados.<sup>57</sup> Cultivar plantas en un lugar contaminado y en algunos casos cosecharlas, como método correctivo, es una técnica pasiva estéticamente agradable que aprovecha la energía solar y se puede usar junto con métodos de limpieza mecánicos o, en algunos casos, en vez de métodos de este tipo.

Fitocorrección (el prefijo fito- significa planta) es un término general que se refiere a varios usos de plantas para limpiar o corregir sitios extrayendo contaminantes del suelo y el agua. Las plantas actúan como filtros o trampas y pueden descomponer o degradar contaminantes orgánicos o estabilizar contaminantes metálicos.

#### **Aplicación**

Las medidas fitocorrectivas pueden usarse para limpiar metales, plaguicidas, solventes, explosivos, petróleo crudo, hidrocarburos poliaromáticos y lixiviados de vertederos. La fitocorrección se combina con otros métodos de limpieza, en la etapa de acabado. Aunque las medidas fitocorrectivas son mucho más lentas que los métodos mecánicos y llegan solamente hasta la profundidad a la cual llegan las raíces, pueden eliminar los últimos restos de contaminantes atrapados en el suelo que a veces quedan después de utilizar las técnicas mecánicas de tratamiento.

Generalmente las medidas fitocorrectivas se utilizan en lugares con baja concentración de contaminantes y en suelos, en cursos de agua y en agua subterránea poco profundos. Sin embargo, se ha observado que con árboles (en vez de plantas más pequeñas) se puede tratar la contaminación a mayor profundidad, porque las raíces de los árboles penetran a mayor profundidad en el suelo. El agua subterránea contaminada a gran profundidad se puede extraer por bombeo y usarla para regar arboledas, acercando de esa manera a las sustancias contaminantes con sus potenciales destructores, los microorganismos del suelo superior.

Se necesitan más investigaciones para estudiar los efectos que se producirían en la cadena alimentaria si algunos insectos y roedores pequeños comieran las plantas con metales acumulados y fuesen, a su vez, comidos por mamíferos de mayor tamaño. Por otra parte, todavía no se sabe si se pueden acumular contaminantes en las hojas y la madera de los árboles utilizados con fines de fitocorrección y, aún menos, si ellos son liberados después cuando se caen las hojas en el otoño o cuando se usa la leña o la corteza desmenuzada de los árboles.

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
**Diseño y operación de un sistema fitocorrectivo** ®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Estos sistemas se diseñan y operan de distinta forma, ya sea que se trate de medidas correctivas para metales o para contaminantes orgánicos, como se discute enseguida.

#### **A.- Medidas correctivas para metales**

En lugares contaminados con metales se usan plantas para estabilizar o retirar los metales del suelo y del agua subterránea, por medio de dos mecanismos: fitoextracción y rizofiltración.

La fitoextracción, conocida también como fitoacumulación, es la captación de metales contaminantes por las raíces de las plantas y su acumulación en los tallos y las hojas.



Algunas plantas absorben cantidades extraordinarias de metales, en comparación con otras. Se selecciona una de estas plantas o varias de este tipo y se plantan en un sitio, según los metales presentes y las características del lugar. Después de un tiempo, cuando las plantas han crecido, se cortan y se incineran o se deja que se transformen en abono vegetal para reciclar los metales. Este procedimiento se puede repetir la cantidad de veces que sea necesario para reducir la concentración de contaminantes en el suelo a límites aceptables. Si se incineran las plantas, las cenizas deben colocarse en un confinamiento para residuos peligrosos, pero la cantidad de ceniza será sólo alrededor del 10% del volumen de los desechos que habría que eliminar si se excavara el suelo contaminado para tratarlo.

Los mejores candidatos para la fitoextracción son el níquel, el cinc y el cobre porque son los preferidos de las 400 plantas, aproximadamente, que se sabe que absorben cantidades extraordinarias de metales. Se están estudiando y probando plantas que absorben plomo y cromo.

La rizofiltración (rizo- significa raíz) es una técnica prometedora para abordar el problema de la contaminación del agua con metales. La rizofiltración es similar a la fitoextracción, pero las plantas que se usan para la limpieza se cultivan en invernaderos con las raíces en agua, en vez de tierra. Cuando las plantas tienen un sistema de raíces bien desarrollado, se recoge agua contaminada de un vertedero, se transporta hasta el lugar donde están las plantas y se colocan las plantas en esta agua. Las raíces absorben el agua junto con los contaminantes. A medida que las raíces se saturan de contaminantes, se cortan y se eliminan. Además de extraer metales del agua, la rizofiltración puede ser útil para descargas industriales, escurrimiento de tierras agrícolas, drenaje de minas de ácidos y contaminantes radiactivos.

## **B.- Tratamiento de contaminantes orgánicos**

Los contaminantes orgánicos son comunes en el medio ambiente. Hay varias formas en que se pueden usar plantas para la fitocorrección de estos contaminantes: fitodegradación, biodegradación mejorada de la rizosfera, bombeo orgánico y fitovolatilización.

La fitodegradación es un proceso mediante el cual las plantas degradan contaminantes orgánicos. En algunos casos, los contaminantes degradados en moléculas más simples se usan para acelerar el crecimiento de las plantas. Las plantas tienen enzimas, algunas de las cuales se descomponen y convierten desechos de municiones, otras degradan solventes clorados tales como tricloroetileno y otras degradan herbicidas.

La biodegradación intensificada de la rizosfera se produce en la tierra que rodea las raíces de las plantas (la rizosfera). Es un proceso mucho más lento que la fitodegradación. Los microorganismos (levaduras, hongos o bacterias) consumen y digieren sustancias orgánicas, de las cuales se alimentan y obtienen energía. Algunos microorganismos pueden digerir sustancias orgánicas tales como combustibles o solventes, que son peligrosas para los seres humanos, y descomponerlas en productos inocuos mediante la biodegradación. Las sustancias naturales liberadas por las raíces de las plantas (azúcar, alcohol y ácidos) contienen carbono orgánico, del cual se alimentan los microorganismos del suelo, y los nutrientes adicionales intensifican su actividad. Además, las plantas aflojan la tierra y transportan agua al lugar, facilitando así la biodegradación.

Los árboles pueden realizar una acción de bombeo orgánico cuando sus raíces bajan hacia la capa freática, formando una masa densa de raíces que absorbe una gran cantidad de agua. Los álamos, por ejemplo, absorben 113 litros de agua por día, y hay una variedad de álamo (*Populus deltoides*) que absorbe hasta 1 325 litros por día.

La acción de bombeo de las raíces disminuye la tendencia de los contaminantes superficiales a descender hacia el agua subterránea y el agua potable. En zonas agrícolas, los álamos plantados a lo largo de cursos de agua reducen el excedente de fertilizantes y herbicidas que va a parar a los cursos de agua y al agua subterránea. Asimismo, los árboles plantados en vertederos como sustitutos orgánicos de la tradicional capa de arcilla o de plástico absorben agua de lluvia que, de lo contrario, se filtraría por el vertedero y llegaría al fondo en forma de lixiviado contaminado.

La fitovolatilización se produce a medida que los árboles y otras plantas en crecimiento absorben agua junto con contaminantes orgánicos. Algunos de los contaminantes pueden llegar hasta las hojas y evaporarse o volatilizarse en la atmósfera. Los álamos, por ejemplo, volatilizan el 90% del tricloroetileno que absorben.

**Ventajas y desventajas de las medidas fitocorrectivas**

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Puede adaptarse al tratamiento de distintos contaminantes, como metales y compuestos orgánicos	Sólo para lugares con contaminación poco profunda y no muy extensa
Es estéticamente agradable	No se conocen las consecuencias para la cadena alimentaria
Puede utilizarse junto con métodos de limpieza mecánicos	Se desconoce si los contaminantes acumulados en madera y hojas pueden ser reliberados al caer las hojas en otoño o al usar la madera como leña
Extrae contaminantes tanto del suelo como del agua subterránea, disminuyendo la tendencia de los contaminantes superficiales a descender hacia el agua subterránea	La factibilidad y nivel de descontaminación depende de la capacidad de cada planta de absorber cada metal o sustancia orgánica específica
Pueden incinerarse las plantas contaminadas, con una reducción del volumen a confinar a un 10% del necesario con técnicas de excavación	

### 6.2.2.2 Remediaciones físico-químicas

Las remediaciones físico-químicas consisten básicamente en el lavado o enjuague del suelo para extraer los contaminantes del mismo.

#### 6.2.2.2.1 Enjuague del suelo *in Situ*

El enjuague del suelo *in situ* es una técnica de tratamiento que consiste en inundar suelos contaminados con una solución que conduce a los contaminantes hasta un lugar donde pueden extraerse.<sup>58</sup>

El tipo de solución que se necesita para el tratamiento depende de los contaminantes que se hallen en el suelo. La solución de enjuague generalmente es uno de los siguientes líquidos:

- Agua
- Agua con aditivos tales como ácidos, bases o agentes tensoactivos
- Agua con solventes orgánicos

El agua se usa para tratar contaminantes que se disuelven fácilmente en ella. Una solución ácida es una mezcla de agua y un ácido, como nítrico o clorhídrico. Las soluciones ácidas se usan para extraer metales y contaminantes orgánicos, como los que se encuentran generalmente en el reciclaje de baterías o en procesos de cromado industrial. Por ejemplo, la contaminación con zinc, una de las posibles consecuencias de las operaciones de cromado, se trata con una solución ácida. Una solución básica es una mezcla de agua y una base como hidróxido de sodio. Las soluciones básicas se usan para tratar fenoles y algunos metales. Un agente tensoactivo puede ser un detergente o un dispersante. Los dispersantes facilitan la mezcla de sustancias que normalmente no

se mezclan, como aceite y agua. Por esta razón, las soluciones tensoactivas son eficaces para eliminar contaminantes oleosos.

Se está investigando el uso de agua con solventes orgánicos como solución de enjuague. Los solventes orgánicos, como el etanol, se usan para disolver ciertos contaminantes que el agua sola no puede disolver.

### **Aplicación**

Con el enjuague del suelo *in situ* se obtienen resultados óptimos en lugares donde hay espacios en el suelo que permiten el paso de la solución de lavado. Si el suelo tiene un alto porcentaje de limo o arcilla, la solución de enjuague no podrá desplazarse fácilmente en su interior, de modo que no entrará fácilmente en contacto con los contaminantes, lo que limita la eficacia general del proceso de enjuague del suelo. Por otra parte, algunos líquidos de enjuague contienen aditivos que pueden contaminar el agua subterránea si no se retiran por completo.

En la selección de esta técnica influyen también los siguientes factores, entre otros:

- Se debe comprender bien el flujo del agua subterránea, a fin de proyectar el sistema de pozos para un lugar determinado. Posiblemente se necesiten extensos estudios sobre el terreno para lograr un conocimiento completo del flujo del agua subterránea.
- Es necesario conocer bien la composición y disposición de las capas rocosas subterráneas, para predecir el trayecto que seguirán el líquido de enjuague y los contaminantes y asegurarse así de que los contaminantes no se extiendan fuera del lugar donde se pueden recuperar.

- Como el enjuague del suelo *in situ* se adapta al tratamiento de determinados contaminantes, éste no es muy eficaz para los suelos contaminados con mezclas de sustancias peligrosas, como metales y aceites. Sería difícil preparar una solución de enjuague capaz de eliminar varios tipos diferentes de contaminantes al mismo tiempo y con la misma o similar eficacia.

Esta técnica puede tratar eficientemente los siguientes contaminantes:

- ✓ Metales pesados (plomo, cobre, zinc y otros)
- ✓ Solventes halogenados (tricloroetano, tricloroetileno, etc)
- ✓ Hidrocarburos aromáticos (benceno, tolueno, cresol, fenol, etc)
- ✓ Gasolina
- ✓ Combustóleo
- ✓ Bifenilos policlorados
- ✓ Clorofenol

### Diseño y operación del sistema

El proceso comienza con la perforación de pozos de inyección y de extracción en el suelo contaminado. El número, la ubicación y la profundidad de los pozos de inyección y de extracción dependen de varios factores geológicos y de consideraciones técnicas. Los pozos pueden instalarse en forma vertical u horizontal. Además de la colocación de los pozos, deben trasladarse hasta el sitio otros equipos como, por ejemplo, un sistema de tratamiento de aguas residuales o construirlos en el lugar.

La solución de enjuague se introduce en los pozos de inyección por bombeo y atraviesa el suelo, arrastrando contaminantes mientras se dirige a los pozos de extracción. En los pozos de extracción se recoge la solución de enjuague mezclada con los contaminantes llamada elutriado.

El elutriado se extrae del suelo por bombeo en los pozos de extracción y generalmente pasa a un sistema de tratamiento de aguas residuales para retirar los contaminantes. Los contaminantes son tratados o eliminados y el agua tratada puede reutilizarse en la solución de enjuague o eliminarse de otra forma aceptable. Debido a que se trata de un proceso en ciclo, los sistemas de enjuague del suelo *in situ* a menudo se denominan sistemas de inyección y recirculación.

El humo o los vapores contaminados que puedan emitirse durante el tratamiento de las aguas residuales se recogen y se someten a un tratamiento.

### Ventajas y desventajas del enjuague del suelo

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Puede adaptarse al tratamiento de distintos contaminantes mediante el agregado de aditivos específicos al agua	Algunos líquidos de enjuague contienen aditivos que podrían contaminar el agua subterránea si no se retiran por completo
Como el enjuague se realiza en el sitio, se reduce la necesidad de excavación, movimientos o transporte de las sustancias peligrosas	Requiere la perforación de pozos de inyección y de extracción en el lugar
Es sumamente eficaz para el tratamiento de suelos con alta permeabilidad	Es ineficiente en suelos con alto contenido de limo o arcilla
El equipo es portátil y puede llevarse hasta el lugar de las operaciones	Exige una mayor comprensión de las características geológicas del sitio que otras técnicas
	No es muy eficaz para los suelos contaminados con una mezcla de sustancias peligrosas como metales y aceites

#### 6.2.2.2 Lavado del suelo

El lavado del suelo es una técnica que consiste en el uso de líquidos (generalmente agua, a veces modificada con aditivos químicos) y un procedimiento mecánico para depurar el suelo.<sup>59</sup>

Con este procedimiento se retiran contaminantes peligrosos y se los concentra, reduciendo su volumen.

### Aplicación

El lavado del suelo se puede usar por sí solo, pero a menudo se usa combinado con otras técnicas de tratamiento. El uso principal del lavado del suelo es para reducir el volumen, concentrando los contaminantes en una masa relativamente pequeña de material. Cuanto mayor sea el porcentaje de arena gruesa y grava en el material que deba tratarse (que se puede limpiar y quizá llevar de vuelta al sitio), más eficaz será el lavado del suelo en función del costo.

El proceso de lavado del suelo puede reducir el volumen de material a tratar en un 90% (lo cual significa que sólo el 10% del volumen original necesitaría tratamiento posterior). Si los desechos tienen un alto porcentaje de limo fino y arcilla, entonces una parte mayor del material deberá ser sometida a otro tratamiento subsiguiente más costoso. Estos suelos no son los apropiados para un proceso de lavado.

El lavado del suelo se usa para tratar una amplia gama de contaminantes, como metales, gasolina, combustóleo y plaguicidas. El uso de esta técnica presenta varias ventajas:

- Crea un sistema cerrado que no se ve afectado por condiciones externas. Este sistema permite controlar las condiciones (como el pH y la temperatura) en las cuales se tratan las partículas del suelo.
- Permite excavar los desechos peligrosos y tratarlos *in situ*.
- Ofrece la posibilidad de retirar una gran variedad de contaminantes del suelo.



- Es eficaz en función del costo, porque puede usarse como tratamiento preliminar, reduciendo considerablemente la cantidad de material que necesitaría tratamiento posterior con otro método.
- Produce un material más uniforme, al cual se aplicarán otras técnicas de tratamiento.

### Diseño y operación de un sistema de lavado de suelo

El suelo se compone de partículas finas (limo y arcilla) y partículas gruesas (arena y grava), material orgánico (plantas en estado de descomposición y materia animal), agua y aire. Los contaminantes tienden a unirse fácilmente, en forma química o física, al limo, la arcilla y el material orgánico. El limo, la arcilla y el material orgánico, a su vez, se unen físicamente a la arena y la grava. Cuando el suelo contiene una gran cantidad de arcilla y material orgánico, los contaminantes se unen más fácilmente a la tierra y, por lo tanto, son más difíciles de separar que cuando hay poca arcilla y material orgánico.

En el procedimiento de lavado del suelo se separa la tierra fina contaminada (limo y arcilla) de la tierra gruesa (arena y grava). Una vez concluido el procedimiento, la tierra de volumen más reducido, que contiene la mayoría de las partículas finas de limo y arcilla, puede ser sometida a un tratamiento ulterior con otros métodos (como incineración o medidas biocorrectivas) o se puede eliminar. La tierra más limpia, de mayor volumen, no es tóxica y se puede usar como tierra de relleno.

Durante el procedimiento de lavado, las partículas de grava y de arena más pesadas se asientan y son sometidas a pruebas para detectar la presencia de contaminantes. Si están limpias, este material se puede usar en el sitio o llevarse a otro lugar para usarlo como relleno. Si todavía quedan vestigios de contaminantes, se debe someter el material a otro ciclo de lavado, recogerlo para aplicarle un tratamiento diferente o eliminarlo en otro lugar.

El limo y la arcilla contaminados que están en el agua del lavado se asientan y se separan del agua del lavado. Como el agua del lavado ahora contiene contaminantes, es sometida a un tratamiento a fin de que se pueda reciclar para otros usos. Como ya se dijo, el agua de lavado podría contener aditivos, algunos de los cuales podrían interferir en el tratamiento. En ese caso, hay que retirar los aditivos o neutralizarlos con un tratamiento preliminar.

Después de separar el limo y la arcilla del agua del lavado se los somete a una prueba para determinar si contienen contaminantes. Si todos los contaminantes pasaron al agua del lavado y el limo y la arcilla están limpios, ellos se pueden usar en el sitio o se pueden llevar a otro lugar para usarlos como relleno. Si el material todavía está contaminado se debe someter a otro ciclo de lavado y recogerlo para aplicarle un tratamiento diferente o eliminarlo.

Algunas características del proceso son:

- **Se separan las partículas finas (limo y arcilla) de las partículas gruesas (arena y grava)**
- **Reduce considerablemente la cantidad de tierra contaminada**
- **Es una alternativa con un costo relativamente bajo para separar los desechos y reducir al mínimo la cantidad de desechos que requieren un tratamiento ulterior**
- **Se usa equipo portátil que se puede llevar hasta el lugar de las operaciones**

**Ventajas y desventajas del lavado del suelo**

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Puede utilizarse solo o combinado con otros métodos de tratamiento	Algunos líquidos de enjuague contienen aditivos que podrían contaminar el agua subterránea si no se retiran por completo
Reduce el volumen hasta en un 90% concentrando los contaminantes	En suelos con alto contenido de limos finos o arcilla la reducción de volumen es menor
Eficaz para varios contaminantes como metales, gasolina y combustóleo	Requiere de perforación de pozos de inyección y extracción en el lugar
Permite controlar las condiciones (como pH y temperatura) en las cuales se trata el suelo	
Se realiza en el sitio, reduciendo la necesidad de excavación, movimiento o transporte de sustancias peligrosas	
Produce un material más uniforme para otras técnicas de tratamiento	
El equipo es portátil y puede llevarse hasta el lugar de las operaciones	
Su costo es relativamente bajo	

Una vez evaluadas las distintas técnicas de remediación para los diversos grupos de contaminantes, se procederá a escoger la técnica de remediación adecuada para cada zona a remediar.

## **7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **7.1 INTRODUCCIÓN**

El propósito de estudiar las distintas tecnologías de remediación es evaluar con cuál de ellas se pueden alcanzar los niveles esperados de limpieza, teniendo en cuenta el futuro uso del suelo. Para seleccionar la tecnología adecuada, se deben tener en cuenta diversos factores, tales como:

- Nivel de toxicidad,
- Rutas de exposición
- Implementación de la remediación
- Futuro uso de suelo
- Tiempo de remediación
- Costo de la remediación
- Efectos, a corto y largo plazo, de las tecnologías involucradas
- Uso del sitio durante la remediación
- Protección de la comunidad durante la remediación y su posterior uso de suelo
- Requerimiento de controles, por parte de las autoridades, durante la remediación y una vez finalizada.

Teniendo en cuenta los factores enumerados, se seleccionaron las alternativas más convenientes.

Como en el suelo del sitio de estudio están presentes dos contaminantes principales, el arsénico y TPH, ambos con concentraciones mayores que los RBC, se deben proponer alternativas de remediación para cada uno de ellos.

## 7.2 ALTERNATIVAS DE REMEDIACIÓN PROPUESTAS

Para seleccionar las alternativas de remediación adecuadas, en primer lugar, se deben descartar aquellas con escasa factibilidad de dar óptimos resultados debido a la alta concentración de contaminantes o al tipo de suelo inconveniente para la misma, como:

- **Aireación o aspersion de aire:** Es menos aplicable al diesel.
- **Bioextracción:** Sólo puede utilizarse en lugares donde la aireación sea adecuada, mientras que en las áreas a remediar el suelo es arcilloso con escasa aireación.
- **Bioventilación:** No es aplicable para ciertas condiciones, como en suelos de baja permeabilidad o con alto contenido de arcillas. Además, las altas concentraciones de contaminantes pueden ser tóxicas para los microorganismos.
- **Extracción de vapor de suelos:** El diesel y el queroseno, que son menos volátiles, no son bien removidos mediante esta tecnología, por lo que es más conveniente utilizar la bioventilación.
- **Extracción en dos fases:** Se utiliza para remover distintas combinaciones de agua subterránea contaminada, derivados del petróleo en fase separada y vapores de hidrocarburos de la zona sub-superficial, mientras que en las áreas a remediar no hay ni agua contaminada ni hidrocarburos libres.
- **Enjuague del suelo:** Si el suelo tiene un alto porcentaje de limo o arcilla, la solución de enjuague no podrá desplazarse fácilmente en su interior, de modo que no entrará fácilmente en contacto con los contaminantes, lo que limita la eficacia general del proceso de enjuague del suelo.

Otras técnicas, como la biodegradación y la atenuación natural, se basan en la degradación de los hidrocarburos a través de microorganismos o biodegradación. La remediación del diesel, al ser un hidrocarburo de peso medio y contener menor porcentaje de productos volátiles, es un caso típico para el uso de estas técnicas, pero en

este caso, no se dan las condiciones óptimas para que la biodegradación pueda llevarse a cabo debido a los siguientes factores:

- ❑ Los suelos que tienden a agrumarse (como las arcillas) son difíciles de airear, por lo que su contenido de oxígeno resulta bajo; la distribución de nutrientes se torna dificultosa y retienen la humedad durante períodos más prolongados después de las lluvias.
- ❑ Durante los períodos de sequía, habitual en Ciudad Juárez, el contenido de humedad del área podría disminuir en exceso, por lo que podría ser necesario incrementarla. La erosión de los suelos en proceso de biodegradación puede darse durante períodos ventosos, en especial durante el traslado y/o roturado de la tierra.
- ❑ La temperatura óptima es entre los 10 y 45°C
- ❑ Las áreas contaminadas con diesel también presentan alta contaminación con Arsénico, y las concentraciones muy altas de compuestos orgánicos derivados del petróleo, o de metales pesados, puede ser tóxica e inhibir el crecimiento y la reproducción bacteriana.

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
Una vez descartadas estas alternativas de remediación, la limpieza de las áreas contaminadas queda reducida al uso de los siguientes métodos:

- Bioceldas
- Desorción Térmica a Baja Temperatura
- Medidas Fitocorrectivas
- Lavado del Suelo

Debido a la presencia conjunta de diesel y arsénico, la mayoría de las áreas a remediar necesitarán tratamientos combinados que incluyen un pretratamiento como lavado de suelo, para la eliminación de metales pesados, seguido de un tratamiento como

**desorción térmica a baja temperatura o bioceldas para la eliminación del diesel, y, por último, medidas fitocorrectivas para la etapa de acabado.**

**A continuación se propondrán las distintas alternativas de remediación para cada zona contaminada, teniendo en cuenta los contaminantes existentes en cada área.**

### **7.2.1 ÁREA DEL ANTIGUO TANQUE SUBTERRÁNEO DE ALMACENAMIENTO DE COMBUSTIBLE**

**Contaminantes:**

**Diesel:** con una concentración máxima de 27 200 ppm

**Arsénico:** con una concentración máxima de 81 ppm

**Profundidad de la remediación:** 6,1 m

**Remediación propuesta:**

**Pretratamiento:**

**Se realizará un primer lavado de suelo con solución ácida, para la eliminación de arsénico y otro lavado posterior con un agente tensoactivo, para la eliminación de diesel. Esto garantiza la limpieza del suelo no arcilloso, el cual será sometido a medidas fitocorrectivas para su etapa de acabado.**

**Tratamiento:**

**Para el suelo arcilloso se utilizará la desorción térmica a baja temperatura (370°C) para la eliminación del diesel. Debido al suelo arcilloso, finamente graneado y cohesivo, se necesitará una trituración como paso previo. Si bien la presencia de metales en el suelo puede tener como consecuencias limitaciones en la disposición de los residuos sólidos generados por desorción y un mayor control de las emisiones aéreas debido a la emisión de metales, a temperaturas de operación normales los metales pesados no se**

separan del suelo en grandes cantidades. Una vez libre de hidrocarburos este suelo se someterá a una etapa de acabado para la eliminación de arsénico y de posibles restos de diesel.

**Acabado:**

La etapa de acabado, tanto para el suelo arcilloso como para su componente de arena se realizará mediante medidas fitocorrectivas combinadas de fitoextracción (para la eliminación de arsénico) y biodegradación intensificada de la rizósfera (para la eliminación de restos de Diesel). Una vez que las plantas han crecido, se cortan, se incineran y se confinan las cenizas como residuo peligroso.

**7.2.2 ÁREA DEL TANQUE SUPERFICIAL DE DIESEL**

**Contaminantes:**

**Diesel:** con una concentración máxima de 16 300 ppm

**Arsénico:** con una concentración máxima de 63 ppm

**Profundidad de la remediación:** 3 m

**Remediación propuesta:**

**Pretratamiento:**

Se realizará un primer lavado de suelo con solución ácida, para la eliminación de arsénico y otro lavado posterior con un agente tensoactivo, para la eliminación de diesel. Esto garantiza la limpieza del suelo no arcilloso, el cual será sometido a medidas fitocorrectivas para su etapa de acabado.

**Tratamiento:**

Para el suelo arcilloso se utilizará la desorción térmica a baja temperatura (370°C) para la eliminación del Diesel. Debido al suelo arcilloso finamente graneado y cohesivo se



necesitará una trituración como paso previo. Si bien la presencia de metales en el suelo puede tener como consecuencias limitaciones en la disposición de los residuos sólidos generados por desorción y un mayor control de las emisiones aéreas debido a la emisión de metales, a temperaturas de operación normales los metales pesados no se separan del suelo en grandes cantidades. Una vez libre de hidrocarburos este suelo se someterá a una etapa de acabado para la eliminación de arsénico y de posibles restos de diesel.

**Acabado:**

La etapa de acabado, tanto para el suelo arcilloso como para su componente de arena se realizará mediante medidas fitocorrectivas combinadas de fitoextracción (para la eliminación de arsénico) y biodegradación intensificada de la rizósfera (para la eliminación de restos de Diesel). Una vez que las plantas han crecido, se cortan, se incineran y se confinan las cenizas como residuo peligroso.

**7.2.3 ÁREA DE LA LAGUNA DE EVAPORACIÓN**

**Contaminantes:**

**Diesel:** con una concentración máxima de 6 500 ppm

**Arsénico:** con una concentración máxima de 89 ppm

**Profundidad de la remediación:** 7,6 m

**Remediación propuesta:**

**Pretratamiento:**

Se realizará un primer lavado de suelo con solución ácida, para la eliminación de arsénico. Esto garantiza la limpieza del suelo no arcilloso, el cual será sometido a medidas fitocorrectivas para su etapa de acabado.

**Tratamiento:**

Debido a que la concentración de diesel es levemente superior que los niveles de RBC, no se realizará desorción térmica, sino que se procederá directamente a la etapa de acabado.

**Acabado:**

La etapa de acabado, tanto para el suelo arcilloso como para su componente de arena se realizará mediante medidas fitocorrectivas combinadas de fitoextracción (para la eliminación de arsénico) y biodegradación intensificada de la rizósfera (para la eliminación de restos de diesel). Una vez que las plantas han crecido, se cortan, se incineran y se confinan las cenizas como residuo peligroso.

**7.2.4 ÁREA DE PROCESO QUÍMICO ACTUAL**

**Contaminantes:**

**Diesel:** con una concentración máxima de 20 500 ppm

**Arsénico:** con una concentración máxima de 738 ppm

**Profundidad de la remediación:** 5 m

**Remediación propuesta:**

**Pretratamiento:**

Se realizará un primer lavado de suelo con solución ácida, para la eliminación de arsénico y otro lavado posterior con un agente tensoactivo, para la eliminación de diesel. Esto garantiza la limpieza del suelo no arcilloso, el cual será sometido a medidas fitocorrectivas para su etapa de acabado.

**Tratamiento:**

Para el suelo arcilloso se utilizará la desorción térmica a baja temperatura (370°C) para la eliminación del diesel. Debido al suelo arcilloso finamente graneado y cohesivo, se necesitará una trituración como paso previo. Si bien la presencia de metales en el suelo puede tener como consecuencias limitaciones en la disposición de los residuos sólidos generados por desorción y un mayor control de las emisiones aéreas debido a la emisión de metales, a temperaturas de operación normales los metales pesados no se separan del suelo en grandes cantidades. Una vez libre de hidrocarburos, este suelo se someterá a una etapa de acabado para la eliminación de arsénico y de posibles restos de diesel.

**Acabado:**

La etapa de acabado, tanto para el suelo arcilloso como para su componente de arena se realizará mediante medidas fitocorrectivas combinadas de fitoextracción (para la eliminación de arsénico) y biodegradación intensificada de la rizósfera (para la eliminación de restos de diesel). Una vez que las plantas han crecido, se cortan, se incineran y se confinan las cenizas como residuo peligroso.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



**7.25 ÁREA DE PROCESO QUÍMICO ANTIGUA**

**Contaminantes:**

**Arsénico:** con una concentración máxima de 78 ppm

**Profundidad de la remediación:** 0,15 m

**Remediación propuesta:**

Debido a que sólo existe contaminación por arsénico y de manera superficial, sólo se procederá a la etapa de acabado.

**Acabado:**

La etapa de acabado se realizará mediante medidas fitocorrectivas de fitoextracción para la eliminación de arsénico. Una vez que las plantas han crecido, se cortan, se incineran y se confinan las cenizas como residuo peligroso.

## 7.2.6 PERÍMETRO DE LA PROPIEDAD

**Contaminantes:**

**Arsénico:** con una concentración máxima de 16 ppm

**Profundidad de la remediación:** 0,30 m

**Remediación propuesta:**

Debido a que sólo existe contaminación por arsénico y de manera superficial, sólo se procederá a la etapa de acabado.

**Acabado:**

La etapa de acabado se realizará mediante medidas fitocorrectivas de fitoextracción para la eliminación de arsénico. Una vez que las plantas han crecido, se cortan, se incineran y se confinan las cenizas como residuo peligroso.

## 7.2.7 ÁREA DEL CÁRCAMO DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS

**Contaminantes:**

**Diesel:** con una concentración máxima de 1 300 ppm

**Arsénico:** con una concentración máxima de 2,6 ppm

**Profundidad de la remediación:** 5 m

**Remediación propuesta:**

Debido a que los contaminantes se encuentran en concentraciones menores a los RBC, sólo se llevará a cabo la etapa de acabado.

**Acabado:**

La etapa de acabado se realizará mediante medidas fitocorrectivas combinadas de fitoextracción (para la eliminación de arsénico) y biodegradación intensificada de la rizósfera (para la eliminación de restos de Diesel). Una vez que las plantas han crecido, se cortan, se incineran y se confinan las cenizas como residuo peligroso.

**7.2.8 ÁREA DEL MONTÍCULO DE ANHIDRITA**

**Contaminantes**

**Arsénico:** con una concentración máxima de 3,2 ppm

**Plomo:** 66 ppm

**Profundidad de la remediación:** 0,30 m

**Remediación propuesta:**

Debido a que sólo existe contaminación por metales pesados (arsénico y plomo), y de manera superficial, sólo se procederá a la etapa de acabado.

**Acabado:**

La etapa de acabado se realizará mediante medidas fitocorrectivas de fitoextracción para la eliminación de arsénico. Una vez que las plantas han crecido, se cortan, se incineran y se confinan las cenizas como residuo peligroso.

Tabla 3.1  
LISTA DE MUESTRAS

N° de Muestras	Ubicación	Profundidad [m]	Metales ICP	Metales TCLP	TPH 418,1	VOCs 8020	VOCs 8060	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Fluoruros	Monitoreo en Campo
24	B1, B2, B3, B4	0,15; 0,31; 1,52; 3,05; 4,57; 6,10	5 c/punto (20 Total)	1 c/punto (4 Total)	24 Total	--	24 Total	2 c/punto (8 Total)	2 c/punto (8 Total)	Todas muestras
16	U1, U2, U3, U4	0,15; 0,31; 1,52; 3,05; 4,57; 6,10	3 c/punto (12 Total)	1 c/punto (4 Total)	16 Total	--	16 Total	--	--	Todas muestras
4	O1	0,15; 0,31; 1,52; 3,05; 4,57; 6,10	3 Total	1 Total	4 Total	--	4 Total	2 Total	2 Total	Todas muestras
52	L1, L2, L3, L4	0,15; 0,31; 0,61; 0,91; 1,22; 1,52; 2,13; 2,74; 3,35; 3,96; 4,57; 6,10; 7,62	12 c/punto (48 Total)	1 c/punto (4 Total)	52 Total	--	52 Total	4 c/punto (16 Total)	4 c/punto (16 Total)	Todas muestras
1	L5	1,52	1 Total	1 Total	1 Total	--	1 Total	1 Total	1 Total	Todas muestras
8	A1, A2	1,52; 3,05; 4,57; 6,10	3 c/punto (6 Total)	1 c/punto (2 Total)	8 Total	8 Total	--	--	--	Todas muestras
65	P1, P2, P3, P4, P5	0,15; 0,31; 0,61; 0,91; 1,22; 1,52; 2,13; 2,74; 3,35; 3,96; 4,57; 6,10; 7,62	12 c/punto (60 Total)	1 c/punto (5 Total)	65 Total	--	65 Total	4 c/punto (20 Total)	4 c/punto (20 Total)	Todas muestras
6	H (U/A Areas) 3	0,15; 0,31	1 c/punto (3 Total)	1 c/punto (3 Total)	6 Total	6 Total	--	1 c/punto (3 Total)	1 c/punto (3 Total)	Todas muestras
12	H (P/L Areas) 12	0,15	6 Total	6 Total	12 Total	--	12 Total	1 c/punto (6 Total)	1 c/punto (6 Total)	Todas muestras
2	H (O Areas) 2	0,15	1 c/punto (2 Total)	1 c/punto (2 Total)	2 Total	--	2 Total	1 c/punto (2 Total)	1 c/punto (2 Total)	Todas muestras
4	H (Reserva) 2	0,15; 0,31	1 c/punto (2 Total)	1 c/punto (2 Total)	--	--	4 Total	1 c/punto (2 Total)	1 c/punto (2 Total)	Todas muestras
194	MUESTRAS TOTALES		161	34	190	30	164	60	60	194

UNIVERSIDAD  
 TABLA 3.2  
 ANÁLISIS EN EL ÁREA DEL ANTIGUO TANQUE SUBTERRÁNEO DE ALMACENAMIENTO DE COMBUSTIBLE (U)

Muestra	Profundidad [m]	Fecha de muestreo	Arsénico	Bario	Cadmio	Cromo	Mercurio	Níquel	Plata	Plomo	Selenio	Benceno	Etilbenceno	Tolueno	Xilenos Totales	TPH
U1	1,52	11-Nov-96	< 0,6	36,8	< 0,08	NM	< 0,004	< 0,6	< 0,04	12,9	< 2	ND	ND	ND	ND	< 10
	3,05	11-Nov-96	< 0,02	0,058	< 0,002	< 0,05	< 0,0001	< 0,015	< 0,001	< 0,04	< 0,05	ND	ND	ND	ND	< 10
	4,57	11-Nov-96	11,4	155	< 0,08	NM	0,2	4,86	< 0,04	< 1,6	< 3	ND	ND	ND	ND	< 10
	6,10	11-Nov-96	6,9	28,7	< 0,08	NM	0,06	< 0,6	< 0,04	< 1,6	< 2	ND	ND	ND	ND	< 10
U2	1,52	11-Nov-96	< 0,02	0,962	< 0,002	< 0,05	< 0,0001	< 0,015	< 0,001	< 0,04	< 0,05	ND	ND	ND	ND	27192
	3,05	11-Nov-96	20,6	155	< 0,08	NM	0,23	10	< 0,04	22	< 2	ND	ND	ND	ND	2503
	4,57	11-Nov-96	10,8	94,9	< 0,08	NM	0,2	5,6	< 0,04	9,95	< 2	ND	ND	ND	ND	15918
	6,10	11-Nov-96	12,7	106	< 0,08	NM	0,06	< 0,6	< 0,04	10	< 2	ND	ND	ND	ND	9630
U3	1,52	11-Nov-96	< 0,02	0,365	< 0,002	< 0,05	< 0,0001	< 0,015	< 0,001	< 0,004	< 0,05	ND	ND	ND	ND	< 10
	3,05	11-Nov-96	15,3	102	< 0,08	NM	0,6	7,63	< 0,04	13,7	< 2	ND	ND	ND	ND	< 10
	4,57	11-Nov-96	12,6	113	< 0,08	NM	0,4	5,19	< 0,04	19,6	< 2	ND	ND	ND	ND	< 10
	6,10	11-Nov-96	12,6	85,3	< 0,08	NM	0,36	5,83	< 0,04	10	< 2	ND	ND	ND	ND	< 10
U4	1,52	12-Nov-96	< 0,02	0,063	< 0,002	< 0,05	< 0,0001	0,226	< 0,001	< 0,04	< 0,05	ND	ND	ND	ND	105
	3,05	12-Nov-96	24	37,7	< 0,08	NM	0,14	8,21	< 0,04	17,1	< 2	ND	ND	ND	ND	81,5
	4,57	12-Nov-96	9,7	226	< 0,08	NM	0,08	< 0,6	< 0,04	7,43	< 2	ND	ND	ND	ND	< 10
	6,10	12-Nov-96	10,7	43,4	< 0,08	NM	0,14	< 0,6	< 0,04	7,8	< 2	ND	ND	ND	ND	3743
HU1	0,15	14-Nov-96	< 0,8	69,8	< 0,08	NM	0,072	6,6	< 0,04	65,6	< 2	ND	ND	ND	ND	6397
	0,31	14-Nov-96	81,1	66	3,68	NM	0,081	15,3	< 0,04	76,6	< 2	ND	ND	ND	ND	8643

UNIVERSIDAD NACIONAL DE BUENOS AIRES  
 TABLA 3.3  
 ANÁLISIS EN EL ÁREA DEL TANQUE SUPERFICIAL DE DIESEL (A)

Muestra	Profundidad [m]	Fecha de muestreo	Arsénico	Bario	Cadmio	Cromo	Mercurio	Níquel	Plata	Piombo	Selenio	Benceno	Etilbenceno	Tolueno	Xilenos Totales	TPH
A1	1,52	15-Nov-96	< 0,8	92,4	<0,08	NM	0,016	11,4	<0,04	< 1,6	<2	ND	ND	ND	ND	125
	3,05	15-Nov-96	< 0,02	0,24	< 0,002	< 0,05	< 0,0001	< 0,015	< 0,001	< 0,04	< 0,05	ND	ND	ND	ND	124
	4,57	15-Nov-96	< 0,8	108	< 0,08	NM	0,01	< 0,6	< 0,04	< 1,6	< 2	ND	ND	ND	ND	139
A2	6,10	15-Nov-96	< 0,8	39,3	< 0,08	NM	0,008	< 0,6	< 0,04	< 1,6	< 2	ND	ND	ND	ND	187
	1,52	15-Nov-96	< 0,02	0,109	< 0,002	< 0,05	< 0,0001	< 0,015	< 0,001	< 0,04	< 0,05	ND	ND	ND	ND	73,1
	3,05	15-Nov-96	47,4	70,1	< 0,08	NM	0,038	< 0,6	< 0,04	< 1,6	39,7	ND	ND	ND	ND	89,2
HA1	4,57	15-Nov-96	< 0,8	77,2	< 0,08	NM	0,015	< 0,6	< 0,04	< 1,6	< 2	ND	ND	ND	ND	85,6
	6,10	15-Nov-96	< 0,8	77	< 0,08	NM	0,018	< 0,6	< 0,04	< 1,6	< 2	ND	ND	ND	ND	98,9
	0,15	15-Nov-96	< 0,02	0,042	< 0,002	< 0,05	< 0,0001	< 0,015	< 0,001	< 0,004	< 0,05	ND	ND	ND	ND	501
HA2	0,31	15-Nov-96	63,8	56	4	NM	0,021	< 0,6	< 0,04	78,5	< 2	ND	ND	ND	ND	16311
	0,15	15-Nov-96	< 0,02	0,05	< 0,002	< 0,05	< 0,0001	0,226	< 0,001	< 0,04	< 0,05	ND	ND	ND	ND	10418
	0,31	15-Nov-96	< 0,8	35,1	< 0,08	NM	0,01	< 0,6	< 0,04	74,2	< 2	ND	ND	ND	ND	6502

UNIVERSIDAD NACIONAL DE BUENOS AIRES  
 TABLA 3.4  
 ANÁLISIS EN EL ÁREA DE LA LAGUNA DE EVAPORACIÓN (L)

Muestra	Profundidad [m]	Fecha de muestreo	Arsénico	Bario	Cadmio	Cromo	Mercurio	Níquel	Plata	Piombo	Selenio	Benceno	Etilbenceno	Tolueno	Xilenos Totales	Diclorobenceno	TPH
L1	0,91	13-Nov-96	0,443	0,08	< 0,08	< 0,05	< 0,0001	< 0,015	< 0,001	< 0,04	< 0,05	0,443	0,08	< 0,08	< 0,05	ND	< 0,015
		12-Nov-96	19,9	126	< 0,08	NM	0,16	8,66	< 0,04	17,7	< 2	ND	ND	ND	ND	ND	75,2
L2	0,31	12-Nov-96	15,7	131	< 0,08	NM	0,09	7,13	< 0,04	10,5	< 2	ND	ND	ND	ND	ND	35,4
	0,61	12-Nov-96	19,5	102	< 0,08	NM	0,08	8,03	< 0,04	16,9	< 2	ND	ND	ND	ND	ND	69,2
	0,91	12-Nov-96	15	448	< 0,08	NM	0,11	6,86	< 0,04	13,3	< 2	ND	ND	ND	ND	ND	< 10
	1,22	12-Nov-96	22,2	81,1	< 0,08	NM	0,2	7,64	< 0,04	13,4	< 2	ND	ND	ND	ND	ND	< 10



TABLA 3.4  
ANÁLISIS EN EL ÁREA DE LA LAGUNA DE EVAPORACIÓN (L)

Muestra	Profundidad [m]	Fecha de muestreo	Arsénico	Bario	Cadmio	Cromo	Mercurio	Níquel	Plata	Plomo	Selenio	Benceno	Etilbenceno	Tolueno	Xilenos Totales	Diclorobenceno	TPH
	1,52	12-Nov-96	19,6	44,9	<0,08	NM	0,08	7,52	<0,04	14,5	<2	ND	ND	ND	ND	ND	<10
	2,13	12-Nov-96	19	43	<0,08	NM	0,09	6,2	<0,04	15,9	<2	ND	ND	ND	ND	ND	<10
	2,74	12-Nov-96	21,9	97,5	<0,08	NM	0,11	9,11	<0,04	15,9	<2	ND	ND	ND	ND	ND	<10
	3,35	12-Nov-96	40,2	70,7	<0,08	NM	0,14	9,96	<0,04	22,1	<2	ND	ND	ND	ND	ND	743
	3,96	12-Nov-96	32,7	93,7	<0,08	NM	0,035	10,5	<0,04	<1,6	<2	ND	ND	ND	ND	ND	483
	4,57	12-Nov-96	13,9	46	<0,08	NM	0,04	<0,6	<0,04	<1,6	<2	ND	ND	ND	ND	ND	<10
	6,10	12-Nov-96	<0,02	0,1045	<0,002	<0,05	<0,0001	<0,015	<0,001	<0,04	<0,05	ND	ND	ND	ND	ND	<10
	7,62	12-Nov-96	11,1	50,8	<0,08	NM	0,035	<0,6	<0,04	<1,6	<2	ND	ND	ND	ND	ND	<10
	0,15	12-Nov-96	19,2	35	<0,08	NM	0,083	8,34	<0,04	<1,6	<2	ND	ND	ND	ND	ND	135
L3	0,31	12-Nov-96	22	20,7	<0,08	NM	0,059	9,58	<0,04	<1,6	<2	ND	ND	ND	ND	ND	<10
	0,61	12-Nov-96	21	50	<0,08	NM	0,088	9,65	<0,04	<1,6	30,2	ND	ND	ND	ND	ND	<10
	0,91	12-Nov-96	17,3	111	<0,08	NM	0,3	7,98	<0,04	19,5	<2	ND	ND	ND	ND	ND	<10
	1,22	12-Nov-96	19,1	132	<0,08	NM	0,1	8,59	<0,04	17,2	<2	ND	ND	ND	ND	ND	81,2
	1,52	12-Nov-96	16,6	274	<0,08	NM	0,08	7,03	<0,04	11,3	<2	ND	ND	ND	ND	ND	86,2
	2,13	12-Nov-96	<0,02	0,43	<0,002	<0,05	<0,0001	<0,015	<0,001	<0,04	<0,05	ND	ND	ND	ND	ND	92,8
	2,74	12-Nov-96	17,1	275	<0,08	NM	0,08	7,81	<0,04	11,2	<2	ND	ND	ND	ND	ND	83
	3,35	12-Nov-96	32,7	91,6	<0,08	NM	0,1	10,2	<0,04	17,9	<2	ND	ND	ND	ND	ND	92
	3,96	12-Nov-96	19,2	116	<0,08	NM	0,21	8,24	<0,04	10,3	<2	ND	ND	ND	ND	ND	55,5
	4,57	12-Nov-96	17,3	1745	<0,08	NM	0,15	4,33	<0,04	7,9	<2	ND	ND	ND	ND	ND	221
	6,10	12-Nov-96	32,3	213	1,07	NM	0,12	<0,6	<0,04	8,9	<2	ND	ND	ND	ND	ND	450
	7,62	12-Nov-96	36,9	69,8	<0,08	NM	0,12	<0,6	<0,04	11,8	<2	ND	ND	ND	ND	ND	243
	0,15	12-Nov-96	59,1	13,7	2,77	NM	0,074	<0,6	<0,04	<1,6	<2	ND	ND	ND	ND	ND	1146
L4	0,31	12-Nov-96	55,3	7,01	<0,08	NM	0,132	<0,6	<0,04	<1,6	<2	ND	ND	ND	ND	ND	<10
	0,61	12-Nov-96	31,6	19,2	2,03	NM	0,108	<0,6	<0,04	54,1	<2	ND	ND	ND	ND	ND	<10
	0,91	12-Nov-96	<0,02	0,076	<0,002	<0,05	<0,0001	<0,015	<0,001	0,745	<0,05	ND	ND	ND	ND	ND	40,3
	1,22	12-Nov-96	42,8	74,1	<0,08	NM	0,146	<0,6	<0,04	99,8	<2	ND	ND	ND	ND	ND	<10
	1,52	12-Nov-96	30,5	69	<0,08	NM	0,078	<0,6	<0,04	71,1	30,2	ND	ND	ND	ND	ND	1532

TABLA 3.4  
ANÁLISIS EN EL ÁREA DE LA LAGUNA DE EVAPORACIÓN (L)

Muestra	Profundidad [m]	Fecha de muestreo	Arsénico	Bario	Cadmio	Cromo	Mercurio	Níquel	Plata	Plomo	Selenio	Benceno	Etilbenceno	Tolueno	Xilenos Totales	Diclorobenceno	TPH
	1,52	12-Nov-96	19,6	44,9	<0,08	NM	0,08	7,52	<0,04	14,5	<2	ND	ND	ND	ND	ND	<10
	2,13	12-Nov-96	19	43	<0,08	NM	0,09	6,2	<0,04	15,9	<2	ND	ND	ND	ND	ND	<10
	2,74	12-Nov-96	21,9	97,5	<0,08	NM	0,11	9,11	<0,04	15,9	<2	ND	ND	ND	ND	ND	<10
	3,35	12-Nov-96	40,2	70,7	<0,08	NM	0,14	9,96	<0,04	22,1	<2	ND	ND	ND	ND	ND	743
	3,96	12-Nov-96	32,7	93,7	<0,08	NM	0,035	10,5	<0,04	<1,6	<2	ND	ND	ND	ND	ND	483
	4,57	12-Nov-96	13,9	46	<0,08	NM	0,04	<0,6	<0,04	<1,6	<2	ND	ND	ND	ND	ND	<10
	6,10	12-Nov-96	<0,02	0,1045	<0,002	<0,05	<0,0001	<0,015	<0,001	<0,04	<0,05	ND	ND	ND	ND	ND	<10
	7,62	12-Nov-96	11,1	50,8	<0,08	NM	0,035	<0,6	<0,04	<1,6	<2	ND	ND	ND	ND	ND	<10
	0,15	12-Nov-96	19,2	35	<0,08	NM	0,083	8,34	<0,04	<1,6	<2	ND	ND	ND	ND	ND	135
L3	0,31	12-Nov-96	22	20,7	<0,08	NM	0,059	9,58	<0,04	<1,6	<2	ND	ND	ND	ND	ND	<10
	0,61	12-Nov-96	21	50	<0,08	NM	0,088	9,65	<0,04	<1,6	30,2	ND	ND	ND	ND	ND	<10
	0,91	12-Nov-96	17,3	111	<0,08	NM	0,3	7,98	<0,04	19,5	<2	ND	ND	ND	ND	ND	<10
	1,22	12-Nov-96	19,1	132	<0,08	NM	0,1	8,59	<0,04	17,2	<2	ND	ND	ND	ND	ND	81,2
	1,52	12-Nov-96	16,6	274	<0,08	NM	0,08	7,03	<0,04	11,3	<2	ND	ND	ND	ND	ND	86,2
	2,13	12-Nov-96	<0,02	0,43	<0,002	<0,05	<0,0001	<0,015	<0,001	<0,04	<0,05	ND	ND	ND	ND	ND	92,8
	2,74	12-Nov-96	17,1	275	<0,08	NM	0,08	7,81	<0,04	11,2	<2	ND	ND	ND	ND	ND	83
	3,35	12-Nov-96	32,7	91,6	<0,08	NM	0,1	10,2	<0,04	17,9	<2	ND	ND	ND	ND	ND	92
	3,96	12-Nov-96	19,2	116	<0,08	NM	0,21	8,24	<0,04	10,3	<2	ND	ND	ND	ND	ND	55,5
	4,57	12-Nov-96	17,3	1745	<0,08	NM	0,15	4,33	<0,04	7,9	<2	ND	ND	ND	ND	ND	221
	6,10	12-Nov-96	32,3	213	1,07	NM	0,12	<0,6	<0,04	8,9	<2	ND	ND	ND	ND	ND	450
	7,62	12-Nov-96	36,9	69,8	<0,08	NM	0,12	<0,6	<0,04	11,8	<2	ND	ND	ND	ND	ND	243
	0,15	12-Nov-96	59,1	13,7	2,77	NM	0,074	<0,6	<0,04	<1,6	<2	ND	ND	ND	ND	ND	1146
L4	0,31	12-Nov-96	55,3	7,01	<0,08	NM	0,132	<0,6	<0,04	<1,6	<2	ND	ND	ND	ND	ND	<10
	0,61	12-Nov-96	31,6	19,2	2,03	NM	0,108	<0,6	<0,04	54,1	<2	ND	ND	ND	ND	ND	<10
	0,91	12-Nov-96	<0,02	0,076	<0,002	<0,05	<0,0001	<0,015	<0,001	0,745	<0,05	ND	ND	ND	ND	ND	40,3
	1,22	12-Nov-96	42,8	74,1	<0,08	NM	0,146	<0,6	<0,04	99,8	<2	ND	ND	ND	ND	ND	<10
	1,52	12-Nov-96	30,5	69	<0,08	NM	0,078	<0,6	<0,04	71,1	30,2	ND	ND	ND	ND	ND	1532

TABLA 3.5  
ANÁLISIS EN EL ÁREA DE PROCESO QUÍMICO ACTUAL (P)

Muestra	Profundidad [m]	Fecha de muestreo	Arsénico	Bario	Cadmio	Cromo	Mercurio	Níquel	Plata	Plomo	Selenio	Benceno	Etilbenceno	Tolueno	Xilenos Totales	Diclorobenceno	TPH
P1	0,15	15-Nov-96	< 0,8	63,2	< 0,08	NM	0,028	< 0,6	< 0,04	59	< 2	ND	ND	ND	0,2283	ND	14,8
	0,31	15-Nov-96	< 0,8	60,4	< 0,08	NM	0,028	< 0,6	< 0,04	62,4	< 2	ND	ND	ND	ND	0,2337	< 10
	0,61	15-Nov-96	< 0,8	42,9	< 0,08	NM	0,033	< 0,6	< 0,04	139	< 2	ND	ND	ND	ND	ND	< 10
	0,91	15-Nov-96	< 0,8	46,4	< 0,08	NM	0,025	< 0,6	< 0,04	116	< 2	ND	ND	ND	ND	ND	38,3
	1,22	15-Nov-96	63	44,1	1	NM	0,028	< 0,6	< 0,04	66,1	41	ND	ND	ND	ND	0,2303	122
P2	1,52	15-Nov-96	66,7	86,4	2,52	NM	0,054	5,4	< 0,04	73,3	42,9	ND	ND	ND	ND	ND	3219
	2,13	15-Nov-96	0,534	0,09	< 0,002	< 0,05	< 0,0001	< 0,015	< 0,001	< 0,04	< 0,05	ND	ND	ND	ND	ND	20460
	2,74	15-Nov-96	< 0,8	89,1	< 0,08	NM	0,033	12,4	< 0,04	132	32	ND	ND	ND	ND	ND	301
	3,35	15-Nov-96	36,7	120	< 0,08	NM	0,036	12,3	< 0,04	< 1,6	21	ND	ND	ND	ND	ND	48,5
	0,15	14-Nov-96	195	50,2	7,42	NM	0,069	< 0,6	< 0,04	171	< 2	ND	ND	ND	ND	ND	235
P3	0,31	14-Nov-96	138	36,8	5,53	NM	0,035	< 0,6	< 0,04	111	< 2	ND	ND	ND	ND	ND	250
	0,61	14-Nov-96	144	46,1	5,24	NM	0,033	< 0,6	< 0,04	15,9	< 2	ND	ND	ND	ND	ND	209
	0,91	14-Nov-96	223	82,6	8,73	NM	0,057	10,7	< 0,04	< 1,6	< 2	ND	ND	ND	ND	ND	175
	1,22	14-Nov-96	19	0,057	0,715	< 0,05	< 0,0001	< 0,015	< 0,001	< 0,04	< 0,05	ND	ND	ND	ND	ND	294
	1,37	14-Nov-96	209	69,4	7,8	NM	0,072	< 0,6	< 0,04	24	< 2	ND	ND	ND	ND	ND	31,2
P4	1,52	14-Nov-96	208	39,7	7,63	NM	0,076	5,72	< 0,001	24,4	< 2	ND	ND	ND	ND	0,2267	< 10
	2,13	14-Nov-96	102	14,6	4,6	NM	0,081	< 0,6	< 0,04	42,2	< 2	ND	ND	ND	ND	ND	13142
	2,29	14-Nov-96	225	30,6	9,27	NM	0,047	< 0,6	< 0,04	59,3	< 2	ND	ND	ND	ND	ND	6405
	2,74	14-Nov-96	185	41,5	7,55	NM	0,033	4,28	< 0,04	31,9	< 2	ND	ND	ND	ND	ND	821
	3,10	14-Nov-96	< 0,02	0,01	< 0,002	NM	< 0,0004	< 0,015	< 0,001	< 0,04	< 0,05	ND	ND	ND	ND	ND	NM
P5	3,35	14-Nov-96	80,9	13,9	3,85	NM	0,023	12,5	< 0,04	< 1,6	< 2	ND	ND	ND	ND	ND	174
	3,96	14-Nov-96	71,7	50,6	< 0,08	NM	0,042	12,7	< 0,04	< 1,6	< 2	ND	ND	ND	ND	ND	< 10
	4,57	14-Nov-96	222	40	8,12	NM	0,033	3,75	< 0,04	< 1,6	< 2	ND	ND	ND	ND	ND	498
	0,15	14-Nov-96	230	48,3	8,47	NM	0,074	8,24	< 0,04	106	< 2	ND	ND	ND	ND	ND	2781
	0,31	14-Nov-96	330	52,2	12,2	NM	0,069	< 0,06	< 0,04	68,9	< 2	ND	ND	ND	ND	ND	279
P6	0,61	14-Nov-96	12,3	0,038	0,474	< 0,05	< 0,0001	0,091	< 0,001	< 0,04	< 0,05	ND	ND	ND	ND	ND	270
	0,91	14-Nov-96	214	33,1	6,86	NM	0,04	7,24	< 0,04	< 1,6	< 2	ND	ND	ND	ND	ND	191

TABLA 3.5  
ANÁLISIS EN EL ÁREA DE PROCESO QUÍMICO ACTUAL (P)

Muestra	Profundidad [m]	Fecha de muestreo	Arsénico	Bario	Cadmio	Cromo	Mercurio	Níquel	Plata	Plomo	Selenio	Benceno	Etilbenceno	Tolueno	Xilenos Totales	Diclorobenceno	TPH
	1,22	14-Nov-96	361	30,5	12,3	NM	0,035	10,1	< 0,04	< 1,6	< 2	ND	ND	ND	ND	0,2404	192
	1,52	14-Nov-96	323	40	10,9	NM	0,035	47,9	< 0,04	< 1,6	< 2	ND	ND	ND	ND	ND	185
	2,13	14-Nov-96	639	46,2	19,8	NM	0,055	11,9	< 0,04	< 1,6	< 2	ND	ND	ND	ND	ND	243
	2,74	14-Nov-96	738	45,4	24,7	NM	0,059	13,3	< 0,04	< 1,6	< 2	ND	ND	ND	ND	ND	233
	3,35	14-Nov-96	656	27,9	23,6	NM	0,064	11	< 0,04	< 1,6	< 2	ND	ND	ND	ND	ND	216
	3,96	14-Nov-96	263	69,2	9,17	NM	0,069	18,4	< 0,04	< 1,6	< 2	ND	ND	ND	ND	ND	192
	4,57	14-Nov-96	377	49,6	13,3	NM	0,074	16,2	< 0,04	< 1,6	< 2	ND	ND	ND	ND	ND	313
	0,15	14-Nov-96	169	88,2	7,27	NM	0,052	6,26	< 0,04	140	< 2	ND	ND	ND	ND	ND	< 10
P4	0,31	14-Nov-96	174	72,4	7,49	NM	0,057	6,29	< 0,04	122	< 2	ND	ND	ND	ND	ND	< 10
	0,61	14-Nov-96	1	0,039	< 0,002	< 0,05	< 0,0001	< 0,015	< 0,001	< 0,04	< 0,05	ND	ND	ND	ND	0,2094	< 10
	2,74	14-Nov-96	30,4	25,4	< 0,08	NM	0,023	12,1	< 0,04	< 1,6	< 2	ND	ND	ND	ND	ND	13,5
	2,90	14-Nov-96	29,1	35	< 0,08	NM	0,033	12,9	< 0,04	< 1,6	< 2	ND	ND	ND	ND	ND	18,5
	3,10	14-Nov-96	30	65,3	< 0,08	NM	0,023	6,4	< 0,04	< 1,6	< 2	ND	ND	ND	ND	ND	9,04
	3,35	14-Nov-96	174	67,5	6,22	NM	0,028	< 0,6	< 0,04	48,1	< 2	ND	ND	0,2038	ND	ND	10896
	3,66	14-Nov-96	< 0,8	76,3	< 0,08	NM	0,004	< 0,6	< 0,04	< 1,6	< 2	ND	0,2178	ND	0,2803	ND	9407
	3,96	14-Nov-96	208	39,2	7,7	NM	0,052	< 0,6	< 0,04	71	< 2	ND	ND	ND	0,2115	ND	20866
	0,15	15-Nov-96	< 0,8	77,6	< 0,08	NM	0,02	10,4	< 0,04	< 1,6	< 2	ND	ND	ND	ND	ND	373
P5	0,31	15-Nov-96	< 0,02	0,046	< 0,002	< 0,05	< 0,0001	< 0,015	< 0,001	< 0,04	< 0,05	ND	ND	ND	ND	ND	< 10
	0,61	15-Nov-96	< 0,8	88,1	< 0,08	NM	0,033	12,6	< 0,04	< 1,6	29,3	ND	ND	ND	ND	ND	115
	0,91	15-Nov-96	< 0,8	106	< 0,08	NM	0,015	11,9	< 0,04	34,4	< 2	ND	ND	ND	ND	ND	52,6
	1,22	15-Nov-96	< 0,8	98,1	< 0,08	NM	0,018	13,5	< 0,04	< 1,6	36,7	ND	ND	ND	ND	ND	52,9
	1,52	15-Nov-96	< 0,8	49,8	< 0,08	NM	0,021	11,6	< 0,04	< 1,6	< 2	ND	ND	ND	ND	ND	55
	2,13	15-Nov-96	< 0,8	64,6	< 0,08	NM	0,025	14,7	< 0,04	< 1,6	< 2	ND	ND	ND	0,2085	0,2309	12
	2,74	15-Nov-96	38	61,3	< 0,08	NM	0,035	8,66	< 0,04	< 1,6	34,5	ND	ND	ND	ND	ND	37,1
	3,10	15-Nov-96	53,1	51,7	1,75	NM	0,04	< 0,6	< 0,04	41,4	18,3	ND	ND	ND	ND	ND	11649
	3,35	15-Nov-96	34,6	14,9	< 0,08	NM	0,025	< 0,6	< 0,04	50,3	7,04	ND	ND	ND	ND	ND	650
HP1	0,15	15-Nov-96	< 0,02	0,04	< 0,002	< 0,05	< 0,0001	< 0,015	< 0,001	< 0,04	< 0,05	ND	ND	ND	ND	ND	130

TABLA 3.5  
ANÁLISIS EN EL ÁREA DE PROCESO QUÍMICO ACTUAL (P)

Muestra	Profundidad [m]	Fecha de muestreo	Arsénico	Bario	Cadmio	Cromo	Mercurio	Níquel	Plata	Plomo	Selenio	Benceno	Etilbenceno	Tolueno	Xilenos Totales	Diclorobenceno	TPH
HP2	0,15	14-Nov-96	< 0,02	0,045	< 0,002	< 0,05	< 0,0001	0,054	< 0,001	< 0,04	< 0,05	ND	ND	ND	ND	ND	47
HP4	0,15	15-Nov-96	13	0,052	0,489	< 0,05	< 0,0001	< 0,015	< 0,001	< 0,04	< 0,05	ND	ND	ND	ND	ND	206
HP5	0,15	15-Nov-96	33,7	0,034	1,22	< 0,05	< 0,0001	< 0,015	< 0,001	< 0,04	< 0,05	0,2093	ND	ND	ND	0,5924	577
HP6	0,15	15-Nov-96	< 0,02	0,051	< 0,002	< 0,05	< 0,0001	< 0,015	< 0,001	< 0,04	< 0,05	ND	ND	ND	ND	ND	2388
HP7	0,15	15-Nov-96	< 0,02	0,065	< 0,002	< 0,05	< 0,0001	< 0,015	< 0,001	< 0,04	< 0,05	ND	ND	ND	ND	0,297	2314

TABLA 3.6  
ANÁLISIS EN EL ÁREA DE PROCESOS QUÍMICOS ANTIGUA (O)

Muestra	Profundidad [m]	Fecha de muestreo	Arsénico	Bario	Cadmio	Cromo	Mercurio	Níquel	Plata	Plomo	Selenio	Benceno	Etilbenceno	Tolueno	Xilenos Totales	Diclorobenceno	TPH
O1	1,52	14-Nov-96	< 0,8	21	< 0,08	NM	< 0,004	< 0,6	< 0,04	116	< 2	ND	ND	ND	ND	ND	< 10
	3,10	14-Nov-96	< 0,02	0,06	< 0,002	< 0,05	< 0,0001	< 0,015	< 0,001	< 0,04	< 0,05	ND	ND	ND	ND	ND	< 10
	3,20	14-Nov-96	< 0,8	41,9	< 0,08	NM	0,057	8,23	< 0,04	39,2	< 2	ND	ND	ND	0,2427	ND	< 10
	4,57	14-Nov-96	< 0,8	35	< 0,08	NM	0,037	6,93	< 0,04	20,1	< 2	ND	ND	ND	ND	ND	< 10
HO1	6,10	14-Nov-96	< 0,8	87,4	< 0,08	< 0,05	0,042	5,96	< 0,04	< 1,6	< 2	ND	ND	ND	ND	0,2396	< 10
	0,15	14-Nov-96	77,9	66,9	2,88	NM	0,033	12	< 0,04	100	< 2	ND	ND	ND	ND	0,2346	< 10
HO2	0,15	14-Nov-96	< 0,02	69,2	< 0,08	NM	0,042	9,7	< 0,04	149	< 2	ND	ND	ND	ND	0,3302	< 10

TABLA 3.7  
ANÁLISIS EN EL PERÍMETRO DE LA PROPIEDAD (B)

Muestra	Profundidad [m]	Fecha de muestreo	Arsénico	Bario	Cadmio	Cromo	Mercurio	Níquel	Plata	Piombo	Selenio	Benceno	Etilbenceno	Tolueno	Xilenos Totales	Diclorobenceno	TPH
B1	0,15	15-Nov-96	< 0,02	0,061	< 0,002	< 0,05	< 0,0001	< 0,015	< 0,001	< 0,04	< 0,05	ND	ND	ND	0,2369	ND	45
	0,31	15-Nov-96	< 0,8	69,5	< 0,08	NM	0,015	9,52	< 0,04	< 1,6	27	ND	ND	ND	ND	ND	113
	0,15	13-Nov-96	< 0,8	67,5	< 0,08	NM	0,04	6,23	< 0,04	38,6	< 2	ND	ND	ND	ND	ND	7,78
B2	0,31	13-Nov-96	< 0,02	0,067	< 0,002	< 0,05	< 0,0001	< 0,015	< 0,001	< 0,04	< 0,05	ND	ND	ND	ND	ND	< 10
	1,52	13-Nov-96	< 0,8	57,7	0,845	NM	0,069	6,67	< 0,04	< 1,6	< 2	ND	ND	ND	ND	ND	23
	3,10	13-Nov-96	< 0,8	70,8	1,05	NM	0,055	< 0,6	< 0,04	< 1,6	< 2	ND	ND	ND	ND	ND	288
B3	4,57	13-Nov-96	< 0,8	39,1	< 0,8	NM	0,035	< 0,6	< 0,04	< 1,6	< 2	ND	ND	ND	ND	0,3703	282
	6,10	13-Nov-96	< 0,8	58,6	1,23	NM	0,035	6,53	< 0,04	< 1,6	< 2	ND	ND	ND	ND	0,3026	161
	0,15	13-Nov-96	< 0,02	0,115	< 0,002	< 0,05	< 0,0001	< 0,015	< 0,001	< 0,04	< 0,05	ND	ND	ND	ND	0,5699	101
B4	0,31	13-Nov-96	< 0,8	57	0,601	NM	0,04	5,7	< 0,04	< 1,6	< 2	ND	ND	ND	ND	0,2782	100
	1,52	13-Nov-96	< 0,8	68,4	0,883	NM	0,035	7,62	< 0,04	< 1,6	< 2	ND	ND	ND	ND	0,3529	174
	3,10	13-Nov-96	< 0,8	24,5	0,835	NM	0,04	11,1	< 0,04	< 1,6	< 2	ND	ND	ND	ND	0,4186	105
B4	4,57	13-Nov-96	< 0,8	66	1,05	NM	0,055	9,56	< 0,04	< 1,6	< 2	ND	ND	ND	ND	0,3482	87,1
	6,10	13-Nov-96	< 0,8	28,2	< 0,08	NM	0,045	< 0,6	< 0,04	< 1,6	< 2	ND	ND	ND	ND	ND	131
	0,15	13-Nov-96	15,7	67,6	< 0,08	NM	0,074	7,49	< 0,04	< 1,6	15,7	ND	ND	ND	ND	ND	20,9
B4	0,31	13-Nov-96	11,4	58,8	< 0,08	NM	0,059	5,34	< 0,04	< 1,6	< 2	ND	ND	ND	ND	ND	< 10
	1,52	13-Nov-96	< 0,02	0,397	< 0,002	< 0,05	< 0,0001	< 0,015	< 0,001	< 0,04	< 0,05	ND	ND	ND	ND	ND	< 10
	3,10	13-Nov-96	< 0,8	26,6	< 0,08	NM	0,059	8,16	< 0,04	< 1,6	< 2	ND	ND	ND	ND	ND	< 10
B4	4,57	13-Nov-96	< 0,8	95,9	< 0,08	NM	0,035	6,55	< 0,04	< 1,6	< 2	ND	ND	ND	ND	ND	< 10
	6,10	13-Nov-96	< 0,08	35,8	0,73	NM	0,025	< 0,6	< 0,04	< 1,6	< 2	ND	ND	ND	ND	ND	37

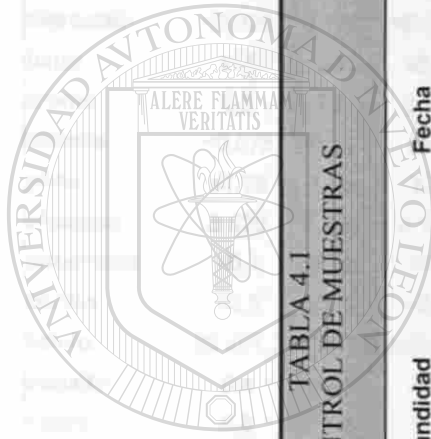


TABLA 4.1  
CONTROL DE MUESTRAS

Punto de Muestreo	Nombre	Ubicación	Profundidad Pies	Muestra	Fecha Muestreo	Fecha		Resultados									
						Resultados	TPH Metales	PCBS	VOC	VOC	pH	CN	Sólidos				
R1	R1	Cárcamo de tratamiento de residuos	14-16 FT.	014	02/11/00	02/18/00	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
D1	D1	Tanques de diesel	18-20 FT	011	02/11/00	02/18/00	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
D2	D2	6 m aguas abajo del sondeo BH-1	9-11 FT	022	02/15/00	02/18/00	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
S1	S1	Entre los dos tanques sépticos	14-16 FT.	006	02/09/00	02/15/00	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
S2	S2	Antiguo tanque séptico	8-10 FT	002	02/09/00	02/15/00	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Para las tres muestras compuestas AN1, AN2, AN3, AN4 y AN5	M1	Superficie montículo de anhídrita-muestra compuesta	2 FT	016	02/11/00	02/18/00	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	M2	Muestra compuesta debajo de la interfase	3-5 FT	018	02/15/00	02/18/00	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	M3	Muestra compuesta en la interfase	+/- 1 FT.	017	02/11/00	02/18/00	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
I1	I1	Entre la planta y el montículo de anhídrita	38-40 FT	008	02/11/00	02/18/00	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
E1	E1	Superficie terreno adyacente al este - muestra compuesta	0-1 FT	019	02/15/00	02/18/00	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
E2	E2	Terreno con excavación - muestra compuesta	0-1 FT	020	02/15/00	02/18/00	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

TABLAS

TABLA 4.2 RESUMEN DE SUBSTANCIAS QUIMICAS DETECTADAS EN EL SUELO									
	UBICACIÓN								
	M3	M1	M2	I1	D1	S24	D25	R1	S1
	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	38 a 40 pies (mg/kg)	18 a 20 pies (mg/kg)	8 a 10 pies (mg/kg)	9 a 11 pies (mg/kg)	14 a 16 pies (mg/kg)	14 a 16 pies (mg/kg)
<b>Metales</b>									
arsénico	1,7	3,2	NA	0,5	0,85	<0,1	NA	2,6	<0,1
cadmio	1,4	2,65	3,2	2,35	1,25	<0,6	3,2	1,95	<0,6
plomo	14,0	65,5	12,5	19,5	11,0	17,0	14,5	14,5	19,5
mercurio	<0,025	3,127	<0,025	<0,025	<0,025	<0,075	<0,025	<0,025	<0,075
bario	115	25	40,0	85	60	100,5	80,0	130	85,0
chromo	5,6	7,9	3,85	4,75	4,2	8,1	5,35	5,85	8,0
selenio	<0,075	0,36	NA	<0,075	<0,075	<0,075	NA	<0,075	<0,075
plata	<1,08	1,75	1,7	1,5	1,5	1,9	<1,08	1,0	2,2
aluminio	8 820	7 780	4 135	6 120	6 700	13 300	2 855	8 020	364
antimonio	<0,1	<0,1	NA	<0,1	<0,1	<0,1	NA	<0,1	<0,1
berilio	<2,5	<2,5	<2,5	<2,5	<2,5	<2,5	<2,5	<2,5	<2,5
calcio	20 491,2	77 041,2	26 625,0	112 366,2	18 741,2	33 491,2	20 250,0	39 941,2	57 491,0
cobalto	5,4	6,95	4,1	8,25	5,1	7,85	5,5	7,3	9,06
cobre	5,6	17,4	5,4	4,0	4,35	8,7	10,0	6,0	5,25
hierro	9 138,3	5 168,3	5 320,0	5 688,3	8 323,3	9 923,7	7 875	10 058,3	7 093,7
magnesio	1 248	1 249,5	3 749,5	1 331	1 498	<500,0	2 999,5	1 998	<250
manganeso	155,5	84,1	131,4	226,8	158	226,1	213,4	131	147,4
níquel	9,15	14,4	10,45	11,8	7,65	11,2	11,3	11,6	12,85
potasio	2 462,0	1 598,0	6 516,7	914,0	1 073,0	19 262,5	11 766,7	1 434,0	17 387,5
sodio	398,5	703,5	536	337,5	555,5	886,5	763	465,0	561,0
zinc	16,4	83,4	13,95	11,65	17,75	26,8	19,1	19,1	18,8
TPH	<2,0	207,0	<2,0	<2,0	13,0	<2,0	<2,0	1 291,0	<2,0
PCB	<0,01	0,0314	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<2	<0,01	<0,01
<b>VOC</b>									
tolueno	0,008	0,012	ND	ND	ND	0,009	ND	ND	0,008
xilenos totales	0,009	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
<b>SVOC</b>									
fluoreno	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0,653	ND
antraceno	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	1,695	ND



**TABLA 4.3**  
**RESUMEN DE SUBSTANCIAS DETECTADAS EN EL SUELO DE LAS PROPIEDADES ADYACENTES**

	Ubicación	
	E1 (mg/kg)	E2 (mg/kg)
<b>Metales</b>		
arsénico	NA	NA
cadmio	3,0	7,9
plomo	16,0	55,5
mercurio	<0,025	0,375
bario	60,0	70,0
cromo	5,95	8,9
selenio	NA	NA
plata	<1,08	2,0
aluminio	9 085	7 965
antimonio	NA	NA
berilio	<2,5	<2,5
calcio	22 000	122 875
cobalto	5,0	10,5
cobre	7,4	27,4
hierro	7 095,0	7 735
magnesio	3 249,5	5 499,5
manganeso	125,7	204,2
níquel	10,15	17,8
potasio	12 316,70	12 616,7
sodio	469	439
zinc	19,45	55,85
TPH	<2,0	<2,0
PCB	<0,01	0,0174

EVALUACIÓN Y PROPUESTAS DE REMEDIACIÓN PARA SUELOS CONTAMINADOS CON METALES PESADOS E HIDROCARBUROS DE PROCEDENCIA INDUSTRIAL

TABLAS

**TABLA 5.1**  
**PARÁMETROS DE FONDO**  
**(Muestra Compuesta Superficial- E1)**

Metales	(mg/kg)
Arsénico	NA
Cadmio	3,0
Plomo	16,0
Mercurio	<0,025
Bario	60,0
Cromo	5,95
Selenio	NA
Plata	<1,08
Aluminio	9 085
Antimonio	NA
Berilio	<2,5
Calcio	22 000
Cobalto	5,0
Cobre	7,4
Hierro	7 095,0
Magnesio	3 249,5
Manganeso	125,7
Niquel	10,15
Potasio	12 316,70
Sodio	469
Zinc	19,45
TPH	<2,0
PCB	<0,01

TABLAS

Tabla 5.2

PRESENCIA DE CONTAMINANTES EN CONCENTRACIONES SUPERIORES A LOS PARÁMETROS DE FONDO  
Área del Antiguo Tanque Subterráneo de Almacenamiento de Combustible

Muestra	Profundidad [m]	Fecha de muestreo	Arsénico (mg/kg)	Bario (mg/kg)	Mercurio (mg/kg)	Niquel (mg/kg)	Plomo (mg/kg)	TPH (mg/kg)
	1,52	11-Nov-96						
U1	3,05	11-Nov-96						
	4,57	11-Nov-96	11,4	155	0,2			
	6,10	11-Nov-96	6,9		0,08			
U2	1,52	11-Nov-96						27192
	3,05	11-Nov-96	20,6	155	0,23			2503
	4,57	11-Nov-96	10,8	94,9	0,2			15918
	6,10	11-Nov-96	12,7	106	0,06			9830
U3	1,52	11-Nov-96						
	3,05	11-Nov-96	15,3	102	0,6			
	4,57	11-Nov-96	12,6	113	0,4			
	6,10	11-Nov-96	12,6	85,3	0,36			
U4	1,52	12-Nov-96						105
	3,05	12-Nov-96	24		0,14			81,5
	4,57	12-Nov-96	9,7	226	0,08			
	6,10	12-Nov-96	10,7		0,14			3743
	0,15	14-Nov-96			0,072		65,8	6397
HU1	0,31	14-Nov-96	81,11		0,081	15,3	76,6	8643

EVALUACIÓN Y PROPUESTAS DE REMEDIACIÓN PARA SUELOS CONTAMINADOS CON METALES PESADOS E HIDROCARBUROS DE PROCEDENCIA INDUSTRIAL

TABLAS

Tabla 5.3

PRESENCIA DE CONTAMINANTES EN CONCENTRACIONES SUPERIORES A LOS PARÁMETROS DE FONDO  
Área del Tanque Superficial de Diesel

Muestra	Profundidad [m]	Fecha de muestreo	Arsénico (mg/kg)	Bario (mg/kg)	Mercurio (mg/kg)	Plomo (mg/kg)	Selenio (mg/kg)	TPH (mg/kg)	Cobalto (mg/kg)
A1	1,52	15-Nov-96		92,4				125	
	3,05	15-Nov-96						124	
	4,57	15-Nov-96		108				139	
	6,10	15-Nov-96						187	
A2	1,52	15-Nov-96						73,1	
	3,05	15-Nov-96	47,4		0,038		39,7	89,2	
	4,57	15-Nov-96						85,6	
HA1	6,10	15-Nov-96						98,9	
	0,15	15-Nov-96						501	
	0,31	15-Nov-96	63,8			78,5		16311	
HA2	0,15	15-Nov-96						10418	
	0,31	15-Nov-96				74,2		6502	
D1	18-20 pies		0,85					13	5,1

TABLAS

Tabla 5.4  
PRESENCIA DE CONTAMINANTES EN CONCENTRACIONES SUPERIORES A LOS PARÁMETROS DE FONDO  
Área de la Laguna de Evaporación

Muestra	Profundidad [m]	Fecha de muestreo	Arsénico (mg/kg)	Bario (mg/kg)	Mercurio (mg/kg)	Níquel (mg/kg)	Plomo (mg/kg)	Selenio (mg/kg)	Benceno (mg/kg)	Etilbenceno (mg/kg)	Diclorobenceno (mg/kg)	TPH (mg/kg)
L1	0,91	13-Nov-96	0,443						0,443	0,08		
	0,15	12-Nov-96	19,9	126	0,16							75,2
L2	0,31	12-Nov-96	15,7	131	0,09							35,4
	0,61	12-Nov-96	19,5	102	0,08							69,2
	0,91	12-Nov-96	15	448	0,11							
	1,22	12-Nov-96	22,2	81,1	0,2							
	1,52	12-Nov-96	19,6		0,08							
	2,13	12-Nov-96	19		0,09							
	2,74	12-Nov-96	21,9	97,5	0,11							
	3,35	12-Nov-96	40,2		0,14							743
	3,96	12-Nov-96	32,7	93,7	0,035							483
	4,57	12-Nov-96	13,9		0,04							
	6,10	12-Nov-96										
	7,62	12-Nov-96	11,1		0,035							
	0,15	12-Nov-96	19,2		0,083							135
L3	0,31	12-Nov-96	22		0,059							
	0,61	12-Nov-96	21		0,088			30,2				
	0,91	12-Nov-96	17,3	111	0,3							
	1,22	12-Nov-96	19,1	132	0,1							81,2
	1,52	12-Nov-96	16,6	274	0,08							86,2
	2,13	12-Nov-96										92,8
	2,74	12-Nov-96	17,1	275	0,08							83
	3,35	12-Nov-96	32,7	91,6	0,1							92
	3,96	12-Nov-96	19,2	116	0,21							55,5
	4,57	12-Nov-96	17,3	1745	0,15							221
	6,10	12-Nov-96	32,3	213	0,12							450
	7,62	12-Nov-96	36,9		0,12							243
	0,15	12-Nov-96	59,1		0,074							1146
L4	0,31	12-Nov-96	55,3		0,132							
	0,61	12-Nov-96	31,6		0,108		54,1					
	0,91	12-Nov-96										40,3
	1,22	12-Nov-96	42,8		0,146		99,8					
	1,52	12-Nov-96	30,5		0,078		71,1	30,2				1532
	3,35	12-Nov-96	14,9		0,122		96,5					5500
	3,96	12-Nov-96	12,4		0,108		61					
	4,57	12-Nov-96	61		0,141			52,2				1779
	6,10	12-Nov-96	36,8		0,078	16						3492
	7,62	12-Nov-96	43	85,5	0,093			29,6				289

Tabla 5.4  
PRESENCIA DE CONTAMINANTES EN CONCENTRACIONES SUPERIORES A LOS PARÁMETROS DE FONDO  
Área de la Laguna de Evaporación

Muestra	Profundidad [m]	Fecha de muestreo	Arsénico (mg/kg)	Bario (mg/kg)	Mercurio (mg/kg)	Níquel (mg/kg)	Plomo (mg/kg)	Selenio (mg/kg)	Benceno (mg/kg)	Etilbenceno (mg/kg)	Diclorobenceno (mg/kg)	TPH (mg/kg)
	0,15	13-Nov-96	39,1		0,141	20,2						43,2
L5	0,31	13-Nov-96	44,2		0,069			4,8				718
	0,61	13-Nov-96										
	0,91	13-Nov-96	16,6		0,074							76,6
	1,22	13-Nov-96	25,4		0,088			6,2				
	1,52	13-Nov-96			0,093			6				
	2,13	13-Nov-96	42,2		0,161		43,6	41				411
	2,74	13-Nov-96	78,7		0,103		57,2	57,9				2439
	3,35	13-Nov-96	81		0,108			41,5				
	3,96	13-Nov-96	25,9		0,078	13,3		17,4				54,2
	4,57	13-Nov-96	27		0,055	22,4		17,4				21
	6,10	13-Nov-96	18,8		0,035			15,6				16,3
	7,62	13-Nov-96	38		0,103			26,5				2573
HL1	0,15	13-Nov-96	72		0,055		92,3					5971
HL2	0,15	13-Nov-96	88,8		0,059	44,5	53,2	75,8				2246
HL3	0,15	13-Nov-96	69,4		0,035							6492
HL4	0,15	13-Nov-96	54,3		0,035		27,3					3021
HL5	0,15	13-Nov-96	61,15		0,069		35,6					2815
HR1	0,15	15-Nov-96										372
	0,31	15-Nov-96								76,1	0,1588	221

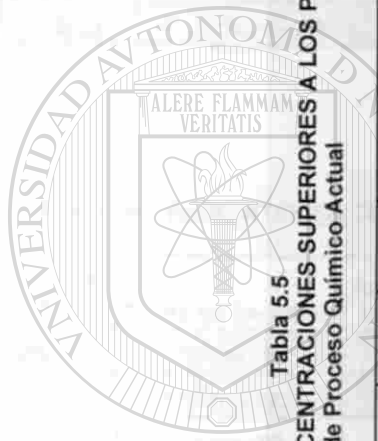
Tabla 5.5  
PRESENCIA DE CONTAMINANTES EN CONCENTRACIONES SUPERIORES A LOS PARÁMETROS DE FONDO  
Área de Proceso Químico Actual

Muestra	Profundidad [m]	Fecha de muestreo	Arsénico (mg/kg)	Bario (mg/kg)	Cadmio (mg/kg)	Mercurio (mg/kg)	Níquel (mg/kg)	Piombo (mg/kg)	Selenio (mg/kg)	Benceno (mg/kg)	Etilbenceno (mg/kg)	Tolueno (mg/kg)	Xilenos (mg/kg)	Diclorobenceno (mg/kg)	TPH (mg/kg)
P1	0,15	15-Nov-96						59					0,2283		14,8
	0,31	15-Nov-96						62,4						0,2337	
	0,61	15-Nov-96						139							
	0,91	15-Nov-96						116							
	1,22	15-Nov-96	63					66,1	41						38,3
P2	1,52	15-Nov-96	66,7	86,4		0,054		73,3	42,9					0,2329	122
	2,13	15-Nov-96	0,534												3219
	2,74	15-Nov-96		89,1		0,033		132	32						20460
	3,35	15-Nov-96	36,7	120		0,036			21						301
	0,15	14-Nov-96	195		7,42	0,069		171							48,5
	0,31	14-Nov-96	138		5,53	0,035		111							235
	0,61	14-Nov-96	144		5,24	0,033									250
	0,91	14-Nov-96	223	82,6	8,73	0,057									209
	1,22	14-Nov-96	19												175
	1,37	14-Nov-96	209		7,8	0,072		24							294
	1,52	14-Nov-96	208		7,63	0,076		24,4						0,2267	31,2
	2,13	14-Nov-96	102		4,6	0,081		42,2							13142
	2,29	14-Nov-96	225		9,27	0,047		59,3							6405
	2,74	14-Nov-96	185		7,55	0,033		31,9							821
	3,10	14-Nov-96													
	3,35	14-Nov-96	80,9		3,85										174
	3,96	14-Nov-96	71,7			0,042									
	4,57	14-Nov-96	222		8,12	0,033									498
	0,15	14-Nov-96	230		8,47	0,074		106							2781

Tabla 5.5 PRESENCIA DE CONTAMINANTES EN CONCENTRACIONES SUPERIORES A LOS PARÁMETROS DE FONDO  
Área de Proceso Químico Actual

Muestra	Profundidad [m]	Fecha de muestreo	Arsénico (mg/kg)	Bario (mg/kg)	Cadmio (mg/kg)	Mercurio (mg/kg)	Níquel (mg/kg)	Piombo (mg/kg)	Selenio (mg/kg)	Benceno (mg/kg)	Etilbenceno (mg/kg)	Tolueno (mg/kg)	Xilenos (mg/kg)	Diclorobenceno (mg/kg)	TPH (mg/kg)	
P3	0,31	14-Nov-96	330		12,2	0,069		68,9							279	
	0,61	14-Nov-96	12,3												270	
	0,91	14-Nov-96	214		6,86	0,04									191	
	1,22	14-Nov-96	361		12,3	0,035								0,2404	192	
	1,52	14-Nov-96	323		10,9	0,035	47,9								185	
	2,13	14-Nov-96	639		19,8	0,055									243	
	2,74	14-Nov-96	738		24,7	0,059									233	
	3,35	14-Nov-96	656		23,6	0,064									216	
	3,96	14-Nov-96	263		9,17	0,069	18,4								192	
	4,57	14-Nov-96	377		13,3	0,074	16,2								313	
	0,15	14-Nov-96	169	88,2	7,27	0,052		140								
	P4	0,31	14-Nov-96	174		7,49	0,057		122						0,2094	
0,61		14-Nov-96	1													
2,74		14-Nov-96	30,4												13,5	
2,90		14-Nov-96	29,1			0,033									18,5	
3,10		14-Nov-96	30												9,04	
3,35		14-Nov-96	174		6,22	0,028		48,1				0,2038			10896	
3,66		14-Nov-96									0,2178				9407	
3,96		14-Nov-96	208		7,7	0,052		71					0,2803		20866	
0,15		15-Nov-96													373	
0,31		15-Nov-96														
0,61		15-Nov-96		88,1		0,033			29,3						115	
0,91		15-Nov-96		106				34,4							52,6	
1,22	15-Nov-96		98,1					36,7						52,9		





**Tabla 5.5**  
**PRESENCIA DE CONTAMINANTES EN CONCENTRACIONES SUPERIORES A LOS PARÁMETROS DE FONDO**  
 Área de Proceso Químico Actual

Muestra	Profundidad [m]	Fecha de muestreo	Arsénico (mg/kg)	Bario (mg/kg)	Cadmio (mg/kg)	Mercurio (mg/kg)	Níquel (mg/kg)	Plomo (mg/kg)	Selenio (mg/kg)	Benceno (mg/kg)	Etilbenceno (mg/kg)	Tolueno (mg/kg)	Xilenos (mg/kg)	Diclorobenceno (mg/kg)	TPH (mg/kg)
	1,52	15-Nov-96													55
	2,13	15-Nov-96					14,7						0,2085	0,2309	12
	2,74	15-Nov-96	38			0,035			34,5						37,1
	3,10	15-Nov-96	53,1			0,04		41,4	18,3						11649
	3,35	15-Nov-96	34,6					50,3	7,04						650
HP1	0,15	15-Nov-96													130
HP2	0,15	14-Nov-96													47
HP4	0,15	15-Nov-96	13												206
HP5	0,15	15-Nov-96	33,7							0,2093				0,5924	577
HP6	0,15	15-Nov-96													2388
HP7	0,15	15-Nov-96												0,297	2314

TABLAS

**Tabla 5.6**  
**PRESENCIA DE CONTAMINANTES EN CONCENTRACIONES SUPERIORES A LOS PARÁMETROS DE FONDO**  
**Área de Procesos Químicos Antigua**

Muestra	Profundidad [m]	Fecha de muestreo	Arsénico (mg/kg)	Bario (mg/kg)	Mercurio (mg/kg)	Plomo (mg/kg)	Xilenos (mg/kg)	Diclorobenceno (mg/kg)
	1,52	14-Nov-96				116		
O1	3,10	14-Nov-96						
	3,20	14-Nov-96			0,057	39,2	0,2427	
	4,57	14-Nov-96			0,037			
	6,10	14-Nov-96		87,4	0,042			0,2396
HO1	0,15	14-Nov-96	77,9	66,9	0,033	100		0,2346
HO2	0,15	14-Nov-96		69,2	0,042	149		0,3302

**Tabla 5.7**  
**PRESENCIA DE CONTAMINANTES EN CONCENTRACIONES SUPERIORES A LOS PARÁMETROS DE FONDO**  
**Perímetro de la Propiedad**

Muestra	Profundidad [m]	Fecha de Muestreo	Arsénico (mg/kg)	Mercurio (mg/kg)	Plomo (mg/kg)	Selenio (mg/kg)	Xilenos (mg/kg)	Diclorobenceno (mg/kg)	TPH (mg/kg)
	0,15	15-Nov-96					0,2369		45
B1	0,31	15-Nov-96				27			113
	0,15	13-Nov-96		0,04	38,6				7,78
B2	0,31	13-Nov-96							
	1,52	13-Nov-96		0,069					23
	3,10	13-Nov-96		0,055					288
	4,57	13-Nov-96		0,035				0,3703	282
	6,10	13-Nov-96		0,035				0,3026	161
	0,15	13-Nov-96						0,5699	101
B3	0,31	13-Nov-96		0,04				0,2782	100
	1,52	13-Nov-96		0,035				0,3529	174
	3,10	13-Nov-96		0,04				0,4186	105
	4,57	13-Nov-96		0,055				0,3482	87,1
	6,10	13-Nov-96		0,045					131
	0,15	13-Nov-96	15,7	0,074		15,7			20,9
B4	0,31	13-Nov-96	11,4	0,059					
	1,52	13-Nov-96							
	3,10	13-Nov-96		0,059					
	4,57	13-Nov-96		0,035					
	6,10	13-Nov-96							37

TABLAS

**Tabla 5.8**  
**PRESENCIA DE CONTAMINANTES EN CONCENTRACIONES SUPERIORES A LOS PARÁMETROS DE FONDO**  
**Montículo de Anhidrita**

	Arsénico (mg/kg)	Plomo (mg/kg)	Mercurio (mg/kg)	Bario (mg/kg)	Cromo (mg/kg)	Selenio (mg/kg)	Cobalto (mg/kg)	Níquel (mg/kg)	Sodio (mg/kg)	TPH (mg/kg)	PCB (mg/kg)	Tolueno (mg/kg)	Xilenos (mg/kg)
M3 (Muestra Compuesta)	1,7			115			5,4					0,008	0,009
M1 (Muestra Compuesta)	3,2	65,5	3,127		7,9	0,36	6,95	14,4	703,5	207,0	0,031	0,012	
M2 (Muestra Compuesta)													
I1 38 a 40 pies	0,5			85			8,25						

**Tabla 5.9**  
**PRESENCIA DE CONTAMINANTES EN CONCENTRACIONES SUPERIORES A LOS PARÁMETROS DE FONDO**  
**Área del Antiguo Tanque Séptico**

	Bario (mg/kg)	Cromo (mg/kg)	Cobalto (mg/kg)	Sodio (mg/kg)	Tolueno (mg/kg)
S2 8 a 10 pies	100,5	8,1	7,85	886,5	0,009

**Tabla 5.10**  
**PRESENCIA DE CONTAMINANTES EN CONCENTRACIONES SUPERIORES A LOS PARÁMETROS DE FONDO**  
**Cárcamo de Tratamiento de Residuos**

	Arsénico (mg/kg)	Bario (mg/kg)	Cobalto (mg/kg)	TPH (mg/kg)	Fluoreno (mg/kg)	Antraceno (mg/kg)
R1 14 a 16 pies	2,6	130	7,3	1 291,0	0,653	1,695

**Tabla 5.11**  
**PRESENCIA DE CONTAMINANTES EN CONCENTRACIONES SUPERIORES A LOS PARÁMETROS DE FONDO**  
**Área del Tanque Séptico Actual**

	Bario (mg/kg)	Cromo (mg/kg)	Cobalto (mg/kg)	Sodio (mg/kg)	Tolueno (mg/kg)
S1 14 a 16 pies	85,0	8,0	9,06	561,0	0,008

**Tabla 5.12**  
**PRESENCIA DE CONTAMINANTES EN CONCENTRACIONES SUPERIORES A LOS PARÁMETROS DE FONDO**  
**Propiedad Adyacente**

	Cadmio (mg/kg)	Plomo (mg/kg)	Mercurio (mg/kg)	Cromo (mg/kg)	Cobalto (mg/kg)	Níquel (mg/kg)	PCB (mg/kg)
E2 Muestra Compuesta Superficial	7,9	55,5	0,375	8,9	10,5	17,8	0,0174

**Tabla 5.13**  
**PRESENCIA DE CONTAMINANTES EN CONCENTRACIONES SUPERIORES A LOS PARÁMETROS DE FONDO**  
**Aguas Abajo del Tanque de Diesel**

	Bario (mg/kg)	Cobalto (mg/kg)	Sodio (mg/kg)
D2 9 a 11 pies	80,0	5,5	763

TABLAS

Tabla 5.14  
CONTAMINANTES SIGNIFICATIVOS Y A EVALUAR  
Área del Antiguo Tanque Subterráneo de Almacenamiento de Combustible

Muestra	Profundidad [m]	Fecha de muestreo	Arsénico (mg/kg)	Mercurio (mg/kg)	TPH (mg/kg)
RBC			3,8	20	5000
	1,52	11-Nov-96			
U1	3,05	11-Nov-96			
	4,57	11-Nov-96	11,4	0,2	
	6,10	11-Nov-96	6,9	0,08	
	1,52	11-Nov-96			27192
U2	3,05	11-Nov-96	20,6	0,23	2503
	4,57	11-Nov-96	10,8	0,2	15918
	6,10	11-Nov-96	12,7	0,06	9830
	1,52	11-Nov-96			
U3	3,05	11-Nov-96	15,3	0,6	
	4,57	11-Nov-96	12,6	0,4	
	6,10	11-Nov-96	12,6	0,36	
	1,52	12-Nov-96			
U4	3,05	12-Nov-96	24	0,14	
	4,57	12-Nov-96	9,7	0,08	
	6,10	12-Nov-96	10,7	0,14	3743
	0,15	14-Nov-96		0,072	6397
HU1	0,31	14-Nov-96	81,11	0,081	8643
D1	18-20 pies		0,85		13,0

TABLAS

**Tabla 5.15  
CONTAMINANTES SIGNIFICATIVOS Y A EVALUAR  
Área del Tanque Superficial de Diesel**

Muestra	Profundidad [m]	Fecha de muestreo	Arsénico (mg/kg)	Mercurio (mg/kg)	TPH (mg/kg)
RBC			3.8	20	5000
	1,52	15-Nov-96		0,016	
A1	3,05	15-Nov-96			
	4,57	15-Nov-96		0,01	
	6,10	15-Nov-96		0,008	
	1,52	15-Nov-96			
A2	3,05	15-Nov-96	47,4	0,038	
	4,57	15-Nov-96		0,015	
	6,10	15-Nov-96		0,018	
	0,15	15-Nov-96			
HA1	0,31	15-Nov-96	63,8	0,021	16311
	0,15	15-Nov-96			10418
HA2	0,31	15-Nov-96		0,01	6502

TABLAS

**Tabla 5.16**  
**CONTAMINANTES SIGNIFICATIVOS Y A EVALUAR**  
**Área de la Laguna de Evaporación**

Muestra	Profundidad [m]	Fecha de muestreo	Arsénico (mg/kg)	Mercurio (mg/kg)	TPH (mg/kg)
<b>RBC</b>			<b>3.8</b>	<b>20</b>	<b>5000</b>
L1	0,91	13-Nov-96			
	0,15	12-Nov-96	19,9	0,16	75,2
L2	0,31	12-Nov-96	15,7	0,09	35,4
	0,61	12-Nov-96	19,5	0,08	69,2
	0,91	12-Nov-96	15	0,11	
	1,22	12-Nov-96	22,2	0,2	
	1,52	12-Nov-96	19,6	0,08	
	2,13	12-Nov-96	19	0,09	
	2,74	12-Nov-96	21,9	0,11	
	3,35	12-Nov-96	40,2	0,14	743
	3,96	12-Nov-96	32,7	0,035	483
	4,57	12-Nov-96	13,9	0,04	
L3	6,10	12-Nov-96			
	7,62	12-Nov-96	11,1	0,035	
	0,15	12-Nov-96	19,2	0,083	135
	0,31	12-Nov-96	22	0,059	
	0,61	12-Nov-96	21	0,088	
	0,91	12-Nov-96	17,3	0,3	
	1,22	12-Nov-96	19,1	0,1	81,2
	1,52	12-Nov-96	16,6	0,08	86,2
	2,13	12-Nov-96			92,8
	2,74	12-Nov-96	17,1	0,08	83
L4	3,35	12-Nov-96	32,7	0,1	92
	3,96	12-Nov-96	19,2	0,21	55,5
	4,57	12-Nov-96	17,3	0,15	221
	6,10	12-Nov-96	32,3	0,12	450
	7,62	12-Nov-96	36,9	0,12	243
	0,15	12-Nov-96	59,1	0,074	1146
	0,31	12-Nov-96	55,3	0,132	
	0,61	12-Nov-96	31,6	0,108	
	0,91	12-Nov-96			40,3
	1,22	12-Nov-96	42,8	0,146	
L4	1,52	12-Nov-96	30,5	0,078	1532
	3,35	12-Nov-96	14,9	0,122	5500
	3,96	12-Nov-96	12,4	0,108	
	4,57	12-Nov-96	61	0,141	1779
	6,10	12-Nov-96	36,8	0,078	3492

TABLAS

**Tabla 5.16**  
**CONTAMINANTES SIGNIFICATIVOS Y A EVALUAR**  
**Área de la Laguna de Evaporación**

	7,62	12-Nov-96	43	0,093	289
	0,15	13-Nov-96	39,1	0,141	43,2
L5	0,31	13-Nov-96	44,2	0,069	718
	0,61	13-Nov-96			
	0,91	13-Nov-96	16,6	0,074	76,6
	1,22	13-Nov-96	25,4	0,088	
	1,52	13-Nov-96		0,093	
	2,13	13-Nov-96	42,2	0,161	411
	2,74	13-Nov-96	78,7	0,103	2439
	3,35	13-Nov-96	81	0,108	
	3,96	13-Nov-96	25,9	0,078	54,2
	4,57	13-Nov-96	27	0,055	21
	6,10	13-Nov-96	18,8	0,035	16,3
	7,62	13-Nov-96	38	0,103	2573
HL1	0,15	13-Nov-96	72	0,055	5971
HL2	0,15	13-Nov-96	88,8	0,059	2246
HL3	0,15	13-Nov-96	69,4	0,035	6492
HL4	0,15	13-Nov-96	54,3	0,035	3021
HL5	0,15	13-Nov-96	61,15	0,069	2815
HR1	0,15	15-Nov-96			372
	0,31	15-Nov-96		0,021	221



TABLAS

Tabla 5.17  
CONTAMINANTES SIGNIFICATIVOS Y A EVALUAR  
Área de Proceso Químico Actual

Muestra	Profundidad [m]	Fecha de muestreo	Arsénico (mg/kg)	Mercurio (mg/kg)	TPH (mg/kg)
RBC			3.8	20	5000
	0,15	15-Nov-96		0,028	14,8
P1	0,31	15-Nov-96		0,028	
	0,61	15-Nov-96		0,033	
	0,91	15-Nov-96		0,025	38,3
	1,22	15-Nov-96	63	0,028	122
	1,52	15-Nov-96	66,7	0,054	3219
	2,13	15-Nov-96	0,534		20460
	2,74	15-Nov-96		0,033	301
	3,35	15-Nov-96	36,7	0,036	48,5
	0,15	14-Nov-96	195	0,069	235
P2	0,31	14-Nov-96	138	0,035	250
	0,61	14-Nov-96	144	0,033	209
	0,91	14-Nov-96	223	0,057	175
	1,22	14-Nov-96	19		294
	1,37	14-Nov-96	209	0,072	31,2
	1,52	14-Nov-96	208	0,076	
	2,13	14-Nov-96	102	0,081	13142
	2,29	14-Nov-96	225	0,047	6405
	2,74	14-Nov-96	185	0,033	821
	3,10	14-Nov-96			NM
	3,35	14-Nov-96	80,9	0,023	174
	3,96	14-Nov-96	71,7	0,042	
	4,57	14-Nov-96	222	0,033	498
	0,15	14-Nov-96	230	0,074	2781
P3	0,31	14-Nov-96	330	0,069	279
	0,61	14-Nov-96	12,3		270
	0,91	14-Nov-96	214	0,04	191
	1,22	14-Nov-96	361	0,035	192
	1,52	14-Nov-96	323	0,035	185
	2,13	14-Nov-96	639	0,055	243
	2,74	14-Nov-96	738	0,059	233
	3,35	14-Nov-96	656	0,064	216
	3,96	14-Nov-96	263	0,069	192
	4,57	14-Nov-96	377	0,074	313
	0,15	14-Nov-96	169	0,052	
P4	0,31	14-Nov-96	174	0,057	
	0,61	14-Nov-96	1		
	2,74	14-Nov-96	30,4	0,023	13,5

**Tabla 5.17**  
**CONTAMINANTES SIGNIFICATIVOS Y A EVALUAR**  
**Área de Proceso Químico Actual**

	2,90	14-Nov-96	29,1	0,033	18,5
	3,10	14-Nov-96	30	0,023	9,04
	3,35	14-Nov-96	174	0,028	10896
	3,66	14-Nov-96		0,004	9407
	3,96	14-Nov-96	208	0,052	20866
	0,15	15-Nov-96		0,02	373
P5	0,31	15-Nov-96			
	0,61	15-Nov-96		0,033	115
	0,91	15-Nov-96		0,015	52,6
	1,22	15-Nov-96		0,018	52,9
	1,52	15-Nov-96		0,021	55
	2,13	15-Nov-96		0,025	12
	2,74	15-Nov-96	38	0,035	37,1
	3,10	15-Nov-96	53,1	0,04	11649
	3,35	15-Nov-96	34,6	0,025	650
HP1	0,15	15-Nov-96			130
HP2	0,15	14-Nov-96			47
HP4	0,15	15-Nov-96	13		206
HP5	0,15	15-Nov-96	33,7		577
HP6	0,15	15-Nov-96			2388
HP7	0,15	15-Nov-96			2314

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

**Tabla 5.18**  
**CONTAMINANTES SIGNIFICATIVOS Y A EVALUAR**  
**Área de Proceso Químico Antigua**

Muestra	Profundidad [m]	Fecha de muestreo	Arsénico (mg/kg)	Mercurio (mg/kg)
RBC			3,8	20
	3,20	14-Nov-96		0,057
O1	4,57	14-Nov-96		0,037
	6,10	14-Nov-96		0,042
HO1	0,15	14-Nov-96	77,9	0,033
HO2	0,15	14-Nov-96		0,042

**Tabla 5.19**  
**CONTAMINANTES SIGNIFICATIVOS Y A EVALUAR**  
**Perímetro de la Propiedad**

Muestra	Profundidad [m]	Fecha de muestreo	Arsénico (mg/kg)	Mercurio (mg/kg)	TPH (mg/kg)
RBC			3.8	20	5000
	0,15	15-Nov-96			45
B1	0,31	15-Nov-96		0,015	113
	0,15	13-Nov-96		0,04	7,78
B2	0,31	13-Nov-96			
	1,52	13-Nov-96		0,069	23
	3,10	13-Nov-96		0,055	288
	4,57	13-Nov-96		0,035	282
	6,10	13-Nov-96		0,035	161
	0,15	13-Nov-96			101
B3	0,31	13-Nov-96		0,04	100
	1,52	13-Nov-96		0,035	174
	3,10	13-Nov-96		0,04	105
	4,57	13-Nov-96		0,055	87,1
	6,10	13-Nov-96		0,045	131
	0,15	13-Nov-96	15,7	0,074	20,9
B4	0,31	13-Nov-96	11,4	0,059	
	1,52	13-Nov-96			
	3,10	13-Nov-96		0,059	
	4,57	13-Nov-96		0,035	
	6,10	13-Nov-96		0,025	37

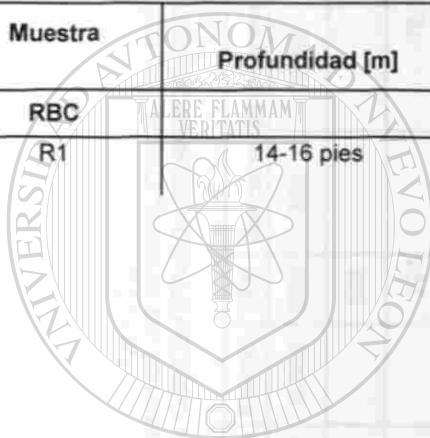
**Tabla 5.20**  
**CONTAMINANTES SIGNIFICATIVOS Y A EVALUAR**  
**Área del Montículo de Anhidrita**

Muestra	Fecha de muestreo	Arsénico (mg/kg)	Mercurio (mg/kg)	TPH (mg/kg)
RBC		3,8	20	5000
M3 (Muestra Compuesta)		1,7		
M1 (Muestra Compuesta)		3,2	3,127	
M2 (Muestra Compuesta)				
I1 38 a 40 pies		0,5		

TABLAS

**Tabla 5.21**  
**CONTAMINANTES SIGNIFICATIVOS Y A EVALUAR**  
**Cárcamo de Tratamiento de Residuos**

Muestra	Profundidad [m]	Fecha de muestreo	Arsénico (mg/kg)	Mercurio (mg/kg)	TPH (mg/kg)
RBC			3,8	20	5000
R1	14-16 pies		2,6		1 291,0



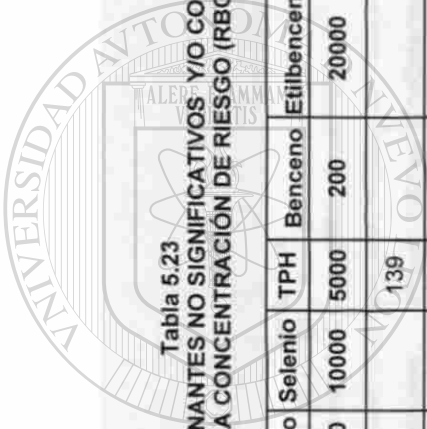
UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

**Tabla 5.22**  
**CONTAMINANTES SIGNIFICATIVOS Y A EVALUAR**  
**Propiedad Adyacente de la Antigua Excavación**

Muestra	Profundidad [m]	Fecha de muestreo	Arsénico (mg/kg)	Mercurio (mg/kg)	TPH (mg/kg)
RBC			3,8	20	5000
E2				0,375	

TABLAS



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
DIRECCION GENERAL DE BIBLIOTECAS

Tabla 5.23  
SONDEOS CON MAYOR PRESENCIA DE CONTAMINANTES NO SIGNIFICATIVOS Y/O CONTAMINANTES SIGNIFICATIVOS  
POR DEBAJO DE LA CONCENTRACION DE RIESGO (RBC)

	Cadmio	Arsénico	Bario	Mercurio	Plomo	Níquel	Cromo	Cobalto	Selenio	TPH	Benceno	Etilbenceno	Diclorobenceno	Xilenos	Tolueno	Fluoreno	Antraceno	PCB	
	2000	3.8	140000	20	300	41000	10000	120000	10000	5000	200	20000	240	4100000	410000	82000	610000	2,9	
AREA										139									
TANQUE SUPERFICIAL			108																
LAGUNA DE EVAPORACION										221		76,1	0,1588						
PROCESO										2314			0,297						
PLANTA ANTIGUA			69,2	0,042	149								0,3302	0,2427					
PLANTA ANTIGUA				0,057	39,2														
PERIMETRO									27	113									
PERIMETRO				0,04	38,6				7,78										
PERIMETRO				0,035					282				0,3703						
INTERFASE MONTICULO-SUELO		1,7	115					5,4						0,009	0,008				
SUP. MONT. DE ANHIDRITA		3,2		3,127	65,5	14,4	7,9	6,95	0,36	207					0,012				0,031
AGUAS ABAJO DEL MONT. DE ANHIDRITA		0,5	85					8,25											
TANQUES DE DIESEL		0,85						5,1		13									
ANTIGUO TANQUE SEPTICO			100,5				8,1	7,85							0,009				
AGUAS ABAJO DEL TANQUE DE DIESEL			80					5,5											
CARCAMO TRAT DE RESIDUOS		2,6	130					7,3		1291						0,653	1,695		
TANQUE SEPTICO			85				8	9,06							0,008				
PROPIEDAD-ANTIGUA EXCAVACION	7,9			0,375	55,5	17,8	8,9	10,5											
SUELO NATIVO	3				16	10,15	5,95	5											0,017

TABLAS

**Tabla 5.24**  
**CÁLCULO DE COEFICIENTES ADITIVOS**  
**Área del Tanque de Combustible Superficial**

Contaminante	RBC	Concentración [ppm]	Órganos Afectados	Efecto Aditivo	Coefficiente de Contaminación	Coefficiente Aditivo
Bario	140000	108	Sistema Circulatorio	SI	0,00077	0,02857
			Pulmones			
TPH	6000	139	Pulmones	SI	0,02780	0,02857
			Sistema Cardiovascular			



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Tabla 5.25  
CÁLCULO DE COEFICIENTES ADITIVOS  
Área de los Tanques de Diesel

Contaminante	RBC	Concentración [ppm]	Órganos Afectados	Efecto Aditivo		Coeficiente de Contaminación		Coeficiente Aditivo	
Arsénico	3,8	0.85	Piel	1	2	0,2237	0,2237		
			Sangre						
			Carcinógeno						
Cobalto	120000	5.1	Dérmicos	1		4E-05	0	0,22373	0,226284
			Sistema Respiratorio						
			Pericardio						
TPH	5000	13	Pulmones		2	0	0,0026		
			Sistema Cardiovascular						
			Carcinógeno						

Tabla 5.26  
CÁLCULO DE COEFICIENTES ADITIVOS  
Área de la Laguna de Evaporación

Contaminante	RBC	Concentración [ppm]	Órganos Afectados	Efecto Aditivo	Coeficiente de Contaminación	Coeficiente Aditivo
Etilbenceno	20000	76,1	No determinados	Si	0,003805	0,04867
Diclorobenceno	240	0,1588	No determinados	Si	0,00066	
TPH	5000	221	Pulmones Sistema Cardiovascular Carcinógeno	Si	0,0442	

TABLAS

**Tabla 5.27**  
**CÁLCULO DE COEFICIENTES ADITIVOS**  
**Área de Proceso**

Contaminante	RBC	Concentración [ppm]	Órganos Afectados	Efecto Aditivo	Coefficiente de Contaminación	Coefficiente Aditivo
Diclorobenceno	240	0,297	No determinados	Si	0,0012375	0,46404
TPH	5000	2314	Pulmones	Si	0,4628	
			Sistema Cardiovascular			
			Carcinógeno			

**Tabla 5.28**  
**CÁLCULO DE COEFICIENTES ADITIVOS**  
**Área de la Planta Antigua**

Contaminante	RBC	Concentración [ppm]	Órganos Afectados	Efecto Aditivo		Coefficiente de Contaminación	Coefficiente Aditivo	
Diclorobenceno	240	0,3302	No determinados	Si	No	0,0014	0	
Bario	140000	69,2	Sistema reproductivo	Si	No	0,0005	0	
			Sistema circulatorio					
			Sistema gastrointestinal					
Mercurio	20	0,042	Sistema nervioso central	Si	Si	0,0021	0,0029	0,501
			Sistema digestivo					
			Riñones					
Plomo	300	149	Sangre	Si	Si	0,4967	0,1307	
			Sistema Nervioso Central					
			Sistema gastrointestinal					
			Riñones					
Xilenos	4100000	0,2427	Sistema reproductivo	No	Si	0	6E-08	
			Sistema nervioso central					
			Higado					
			Riñones					



Tabla 5.29  
CÁLCULO DE COEFICIENTES ADITIVOS  
Perímetro de la Propiedad

Contaminante	RBC	Concentración [ppm]		Órganos Afectados	Efecto Aditivo			Coeficiente de Contaminación			Coeficiente Aditivo	
					No	Sí	No					
Diclorobenceno	240		0,3703	No determinados	No	No	Sí	0	0	0,0015		
Selenio	10000	27		No determinados	Sí	No	No	0,0027	0	0		
Mercurio	20	0,04	0,035	Sistema nervioso central								
				Sistema digestivo	No	Sí	Sí	0	0,002	0,0018		
				Riñones							0,0253	0,192
Plomo	300	38,6		Sangre								
				Sistema nervioso central								
				Sistema gastrointestinal	No	Sí	No	0	0,1287	0		
				Riñones								
TPH	5000	113	7,78	282	Pulmones							
					Sistema Cardiovascular	No	Sí	Sí	0,0226	0,0016	0,0564	
					Carcinógeno							

**Tabla 5.30**  
**CÁLCULO DE COEFICIENTES ADITIVOS**  
**Área del Montículo de Anhidrita - Interfase entre el Montículo y el Suelo Nativo**

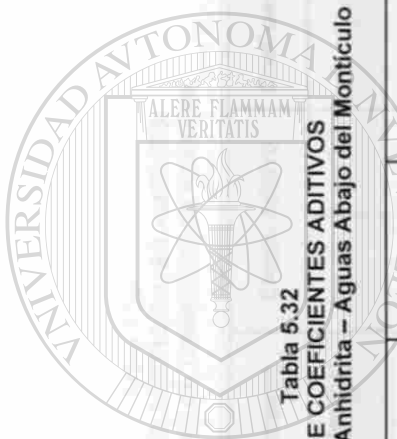
Contaminante	RBC	Concentración [ppm]	Órganos Afectados	Efecto Aditivo	Coefficiente de Contaminación	Coefficiente Aditivo
Arsénico	3.8	1,7	Sistema gastrointestinal	Sí	0,447368421	
			Piel			
			Sangre			
			Hígado			
Bario	140000	115	Riñones	Sí	0,000821429	
			Sistema circulatorio			
			Sistema respiratorio			
			Sistema gastrointestinal			
Cobalto	120000	5,4	Piel	Sí	0,000045	0,44824
			Ojos			
			Sistema respiratorio			
			Pericardio			
Xilenos	4100000	0,009	Sistema nervioso central	Sí	2,19512E-09	
			Sangre			
			Hígado			
			Riñones			
Tolueno	410000	0,008	Piel	Sí	1,95122E-08	
			Sistema nervioso central			
			Ojos			
			Riñones			
			Hígado			

Tabla 5.31  
**CÁLCULO DE COEFICIENTES ADITIVOS**  
Área del Montículo de Anhidrita – Superficie del Montículo

Contaminante	RBC	Concentración [ppm]	Órganos Afectados	Efecto Aditivo	Coefficiente de Contaminación	Coefficiente Aditiv
Arsénico	3,8	3,2	Sistema gastrointestinal	Sí	0,842105	1,270238
			Carcinógeno			
			Piel			
			Sangre			
			Sistema nervioso periférico			
			Hígado			
			Riñones			
			Sistema nervioso central			
			Sistema digestivo			
			Riñones			
Mercurio	20	3,127	Sistema gastrointestinal	Sí	0,15635	
			Sistema nervioso central y periférico			
			Riñones			
			Sistema reproductivo			
			Sistema cardiovascular			
			Riñones			
			Sistema nervioso central			
			Piel			
			Ojos			
			Sistema respiratorio			
Plomo	300	65,5	Sistema gastrointestinal	Sí	0,2183	
			Sistema nervioso central y periférico			
			Riñones			
			Sistema reproductivo			
			Sistema cardiovascular			
			Riñones			
			Sistema nervioso central			
			Piel			
			Ojos			
			Sistema respiratorio			
Níquel	41000	14,4	Sistema gastrointestinal	Sí	0,00035122	
			Sistema nervioso central y periférico			
			Riñones			
			Sistema reproductivo			
			Sistema cardiovascular			
			Riñones			
			Sistema nervioso central			
			Piel			
			Ojos			
			Sistema respiratorio			
Cromo	10000	7,9	Sistema gastrointestinal	Sí	0,00079	
			Sistema nervioso central y periférico			
			Riñones			
			Sistema reproductivo			
			Sistema cardiovascular			
			Riñones			
			Sistema nervioso central			
			Piel			
			Ojos			
			Sistema respiratorio			
Asma						

Tabla 5.31  
CÁLCULO DE COEFICIENTES ADITIVOS  
Área del Montículo de Anhídrida – Superficie del Montículo

Contaminante	RBC	Concentración [ppm]	Órganos Afectados	Efecto Aditivo	Coefficiente de Contaminación	Coefficiente Aditiv
			Piel			
			Hígado			
			Riñones			
			Piel			
Cobalto	120000	5,4	Sistema respiratorio	Si	0,000045	
			Pericardio			
Selenio	10000	0,36	No determinados	Si	0,000036	
			Carcinógeno			
			Pulmones	Si	0,0414	
			Sistema cardiovascular			
			Sistema reproductivo			
			Carcinógeno			
			Ojos	Si	0,010827586	
			Hígado			
			Pulmones			
			Sistema nervioso central			
			Ojos			
			Piel	Si	2,92683E-08	
			Riñones			
			Hígado			
Tolueno	410000	0,012				



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

**Tabla 5.32**  
**CÁLCULO DE COEFICIENTES ADITIVOS**  
**Área del Montículo de Anhidrita – Aguas Abajo del Montículo**

Contaminante	RBC	Concentración [ppm]	Órganos Afectados	Efecto Aditivo	Coefficiente de Contaminación	Coefficiente Aditivo
Arsénico	3,8	0,5	Sistema gastrointestinal	Sí	0,131579	0,132255
			Piel			
			Sangre			
			Hígado			
Bario	140000	85	Riñones	Sí	0,000607	0,132255
			Sistema circulatorio			
			Sistema respiratorio			
Cobalto	120000	8,25	Sistema gastrointestinal	Sí	0,000069	0,132255
			Piel			
			Piel			
			Sistema respiratorio			
			Pericardio			

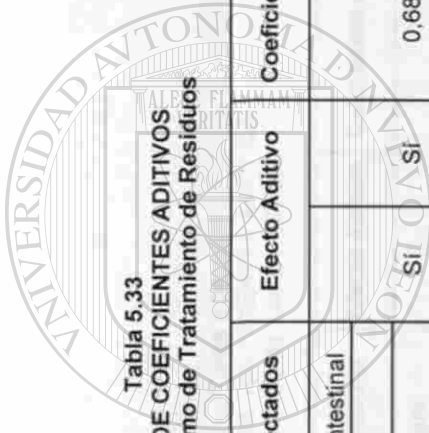


Tabla 5.33  
CÁLCULO DE COEFICIENTES ADITIVOS  
Área del Cárcamo de Tratamiento de Residuos

Contaminante	RBC	Concentración [ppm]	Órganos Afectados	Efecto Aditivo		Coeficiente de Contaminación		Coeficiente Aditivo		
				Si	No	Si	No	Si	No	
Arsénico	3,8	2,6	Sistema gastrointestinal							
			Piel							
			Sangre			0,6842		0,6842		
			Higado							
Bario	140000	130	Carcinógeno							
			Sistema gastrointestinal							
			Sistema respiratorio		No					
			Sistema circulatorio		Si	0,0009		0,0009		
Cobalto	120000	7,3	Piel							
			Ojos							
			Piel		No					
			Sistema respiratorio		Si	0		0,9433	0,9434	
TPH	5000	1291	Pericardio							
			Carcinógeno		Si	0,2582		0,2582		
			Pulmones		Si					
			Sistema cardiovascular		Si					
Antraceno	610000	1,695	Carcinógeno	Si	No	3E-06	0			
Fluoreno	82000	0,653	Sistema circulatorio	No	Si	0	8E-06			

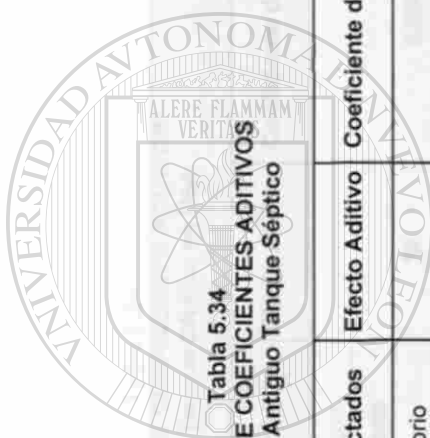


Tabla 5.34  
CÁLCULO DE COEFICIENTES ADITIVOS  
Área del Antiguo Tanque Séptico

Contaminante	RBC	Concentración [ppm]	Órganos Afectados	Efecto Aditivo	Coefficiente de Contaminación	Coefficiente Aditivo
Bario	140000	100,5	Sistema circulatorio	Sí	0,000718	
			Sistema respiratorio			
			Ojos			
			Sistema gastrointestinal			
Cromo	10000	8,1	Piel	Sí	0,00081	0,001593
			Sistema respiratorio			
			Hígado			
			Riñones			
Cobalto	120000	7,85	Piel	Sí	6,54167E-05	
			Sistema respiratorio			
			Pericardio			
Tolueno	410000	0,009	Ojos	Sí	2,19512E-08	
			Piel			
			Riñones			
			Hígado			

**Tabla 5.35**  
**CÁLCULO DE COEFICIENTES ADITIVOS**  
**Área del Tanque Séptico en Uso**

Contaminante	RBC	Concentración [ppm]	Órganos Afectados	Efecto Aditivo	Coefficiente de Contaminación	Coefficiente Aditivo
Bario	140000	85	Sistema circulatorio	Sí	0,000607143	0,000607143
			Sistema respiratorio			
			Ojos			
			Sistema gastrointestinal			
Cromo	10000	8	Piel	Sí	0,0008	0,001483
			Sistema respiratorio			
			Hígado			
			Riñones			
Cobalto	120000	9,06	Piel	Sí	0,0000755	0,0000755
			Sistema respiratorio			
			Pericardio			
			Ojos			
Tolueno	410000	0,008	Piel	Sí	1,95122E-08	1,95122E-08
			Riñones			
			Hígado			



Tabla 5.36

**CÁLCULO DE COEFICIENTES ADITIVOS**  
Aguas Abajo del Tanque de Diesel

Contaminante	RBC	Concentración [ppm]	Órganos Afectados	Efecto Aditivo	Coefficiente de Contaminación	Coefficiente Aditivo
Bario	140000	85	Sistema circulatorio	SI	0,000607143	0,00068264
			Sistema respiratorio			
Cobalto	120000	9.06	Piel	SI	0,0000755	
			Piel			
			Sistema respiratorio			
			Pericardio			

Tabla 5.37  
**CÁLCULO DE COEFICIENTES ADITIVOS**  
Propiedad con la Antigua Excavación

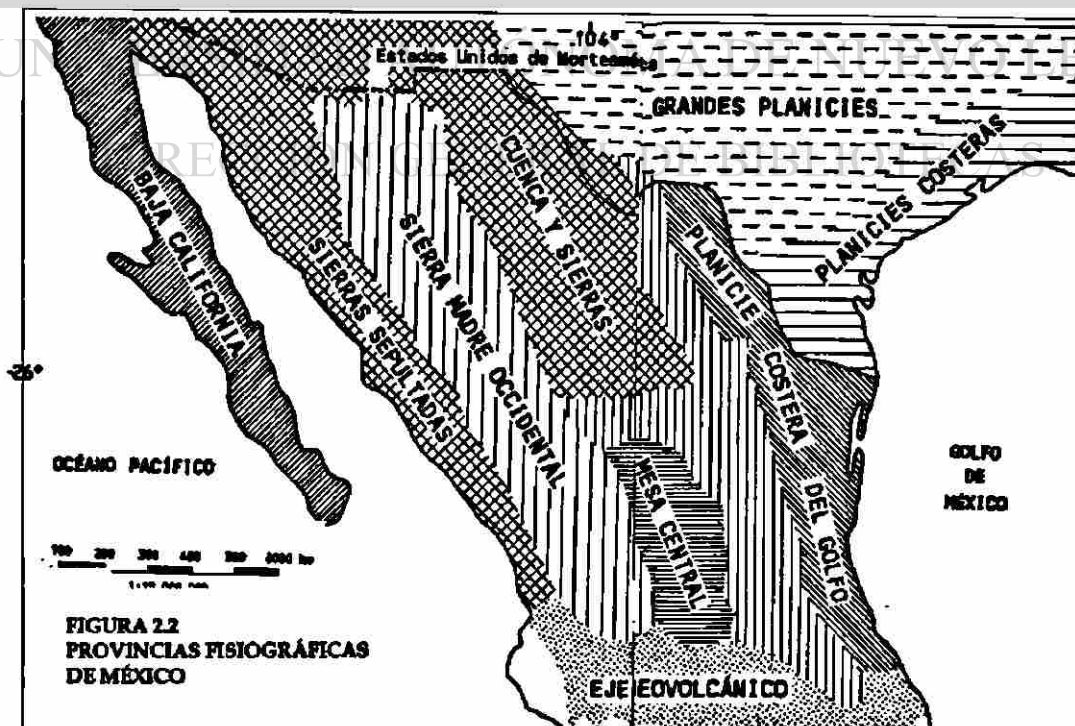
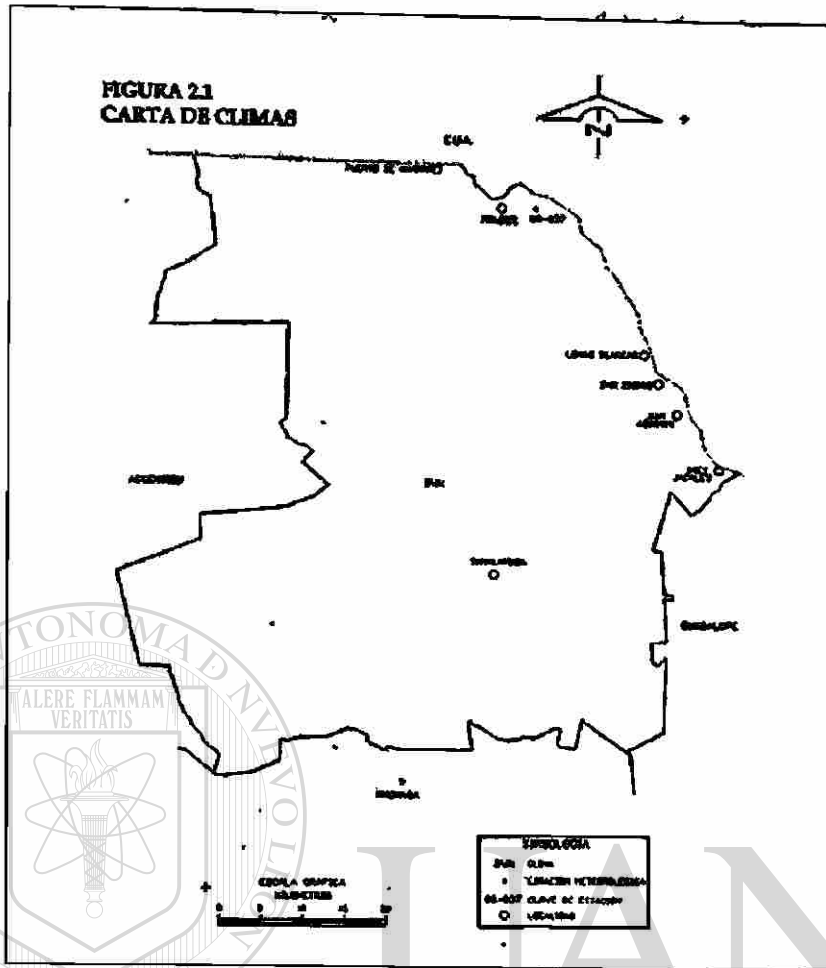
Contaminante	RBC	Concentración [ppm]	Órganos Afectados	Efecto Aditivo	Coefficiente de Contaminación	Coefficiente Aditivo
Cadmio	2000	7,9	Huesos	SI	0,00395	0,220
			Higado			
			Riñones			
Mercurio	20	0,375	Sistema nervioso central	SI	0,01875	
			Sistema digestivo			
Plomo	300	55,5	Riñones	SI	0,185	
			Sangre			
			Sistema gastrointestinal			

**Tabla 5.37**  
**CÁLCULO DE COEFICIENTES ADITIVOS**  
 Propiedad con la Antigua Excavación

Contaminante	RBC	Concentración [ppm]	Órganos Afectados	Efecto Aditivo	Coefficiente de Contaminación	Coefficiente Aditivo
Níquel	41000	17,8	Sistema nervioso central y periférico	Sí	0,000434	
			Riñones			
			Sistema reproductivo			
			Sistema cardiovascular			
			Riñones			
			Sistema nervioso central			
			Piel			
			Ojos			
			Sistema respiratorio			
			Sistema respiratorio			
Cromo	10000	8,9	Asma	Sí	0,00089	
			Piel			
			Hígado			
			Riñones			
			Piel			
Cobalto	120000	10,5	Huesos	Sí	0,0000875	
			Sistema respiratorio			
			Pericardio			
			Sistema reproductivo			
			Ojos			
PCB	2,9	0,0314	Hígado	Sí	0,010827586	
			Pulmones			

Tabla 5.38  
ÁREAS A REMEDIAR

Área	Muestra	Fecha de muestreo	Arsénico	Mercurio	TPH	Plomo
ANTIGUO TANQUE SUBTERRÁNEO DE ALMACENAMIENTO DE COMBUSTIBLE	U1	11-Nov-96	Sí	Sí		
	U2	11-Nov-96	Sí	Sí	Sí	
	U3	11-Nov-96	Sí	Sí		
	U4	12-Nov-96	Sí	Sí		
	HU1	14-Nov-96	Sí	Sí	Sí	
AREA DEL TANQUE SUPERFICIAL DE DIESEL	A2	15-Nov-96	Sí	Sí		
	HA1	15-Nov-96	Sí	Sí	Sí	
	HA2	15-Nov-96			Sí	
AREA DE LA LAGUNA DE EVAPORACION	L2	12-Nov-96	Sí	Sí	Sí	
	L3	12-Nov-96	Sí	Sí	Sí	
	L4	12-Nov-96	Sí	Sí	Sí	
	L5	13-Nov-96	Sí	Sí	Sí	
	HL1	13-Nov-96	Sí	Sí	Sí	
	HL2	13-Nov-96	Sí	Sí	Sí	
	HL3	13-Nov-96	Sí	Sí	Sí	
	HL4	13-Nov-96	Sí	Sí	Sí	
	HL5	13-Nov-96	Sí	Sí	Sí	
AREA DE PROCESO QUIMICO ACTUAL	P1	15-Nov-96	Sí	Sí	Sí	
	P2	14-Nov-96	Sí	Sí	Sí	
	P3	14-Nov-96	Sí	Sí	Sí	
	P4	14-Nov-96	Sí	Sí	Sí	
	P5	15-Nov-96	Sí	Sí	Sí	
	HP4	15-Nov-96	Sí		Sí	
HP5	15-Nov-96	Sí		Sí		
AREA DE PROCESOS QUIMICOS ANTIGUA	HO1	14-Nov-96	Sí	Sí		
PERIMETRO DE LA PROPIEDAD	B4	13-Nov-96	Sí	Sí		
AREA DEL MONTICULO DE ANHIDRITA - SUPERFICIE	Mtra Compuesta		Sí	Sí		Sí
AREA DEL CARCAMO DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS			Sí		Sí	



GRÁFICOS

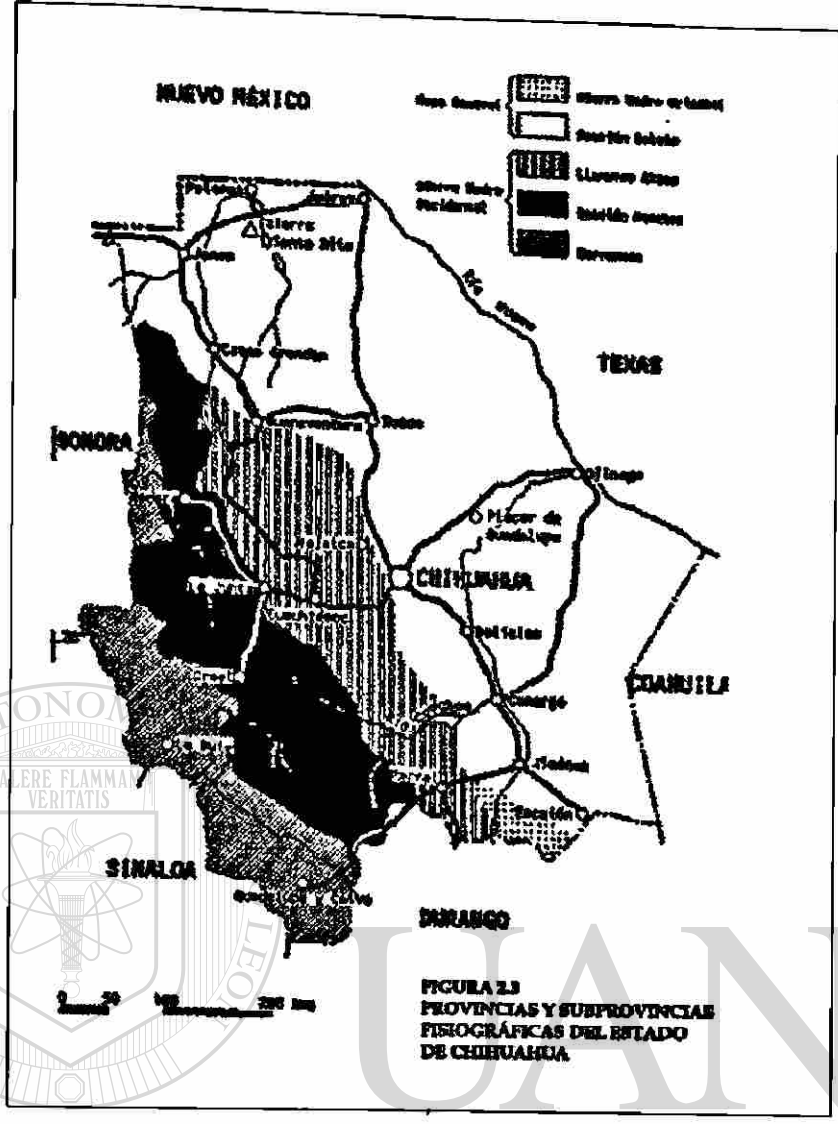
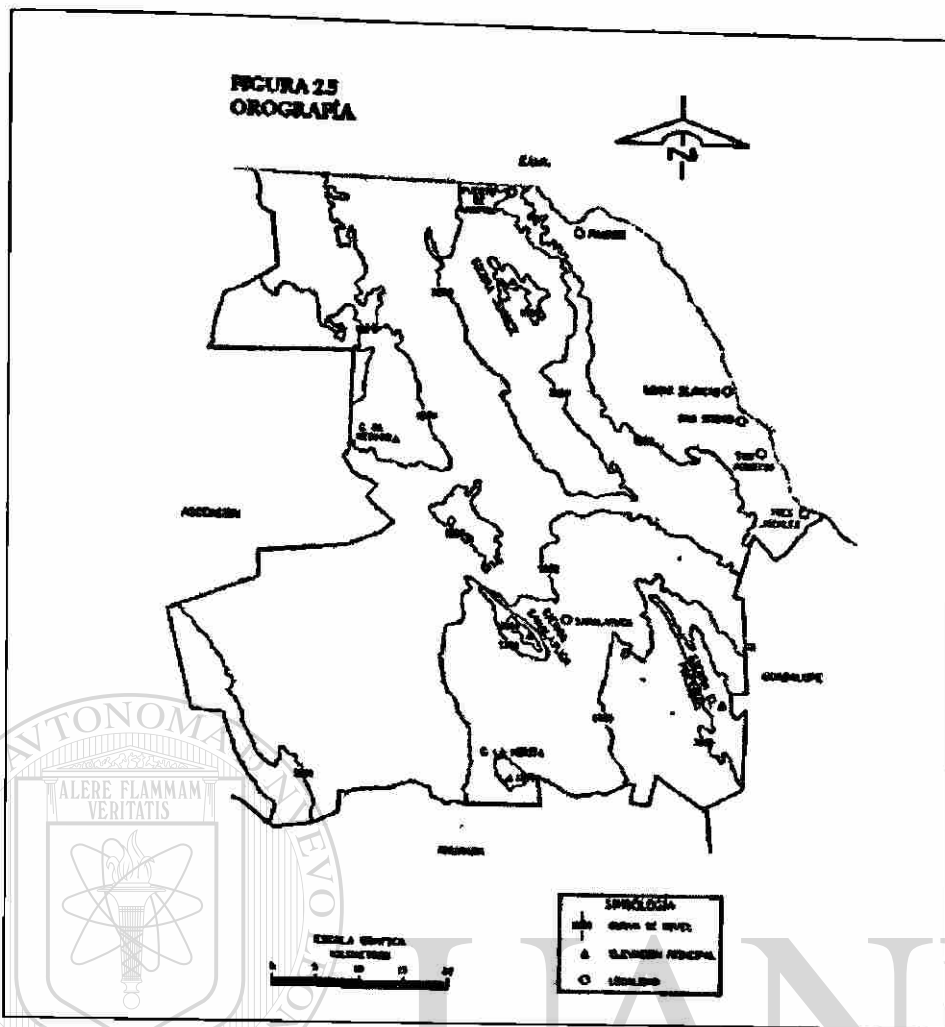


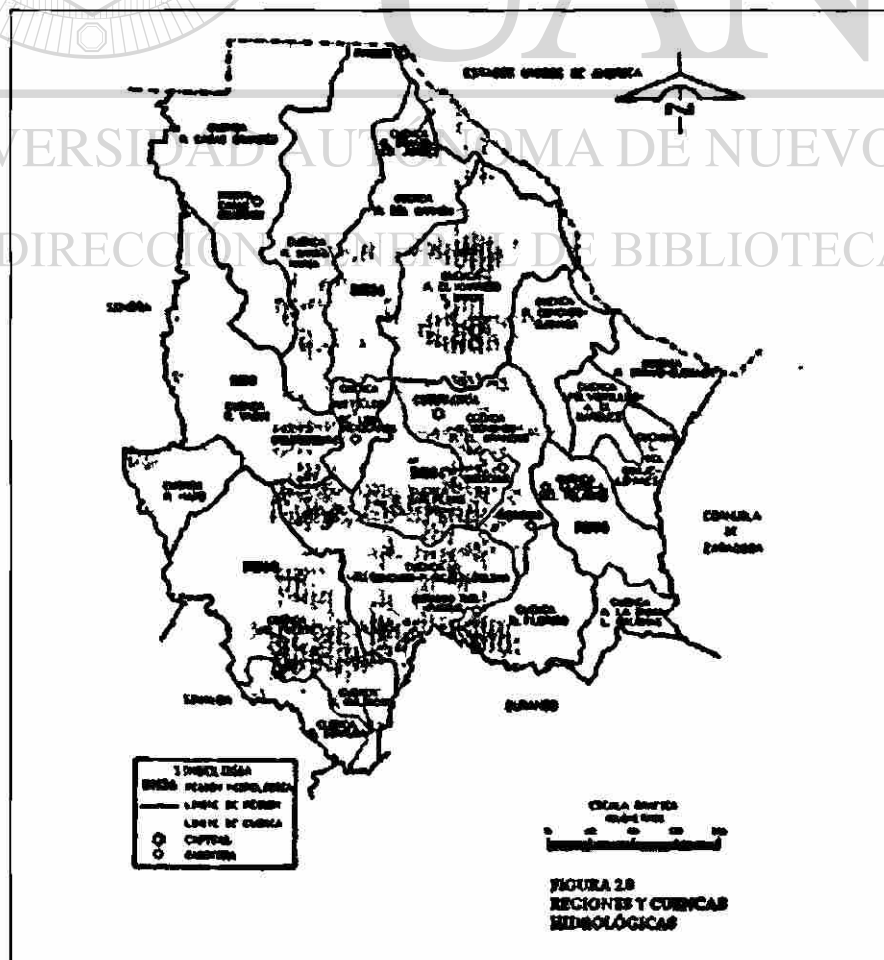
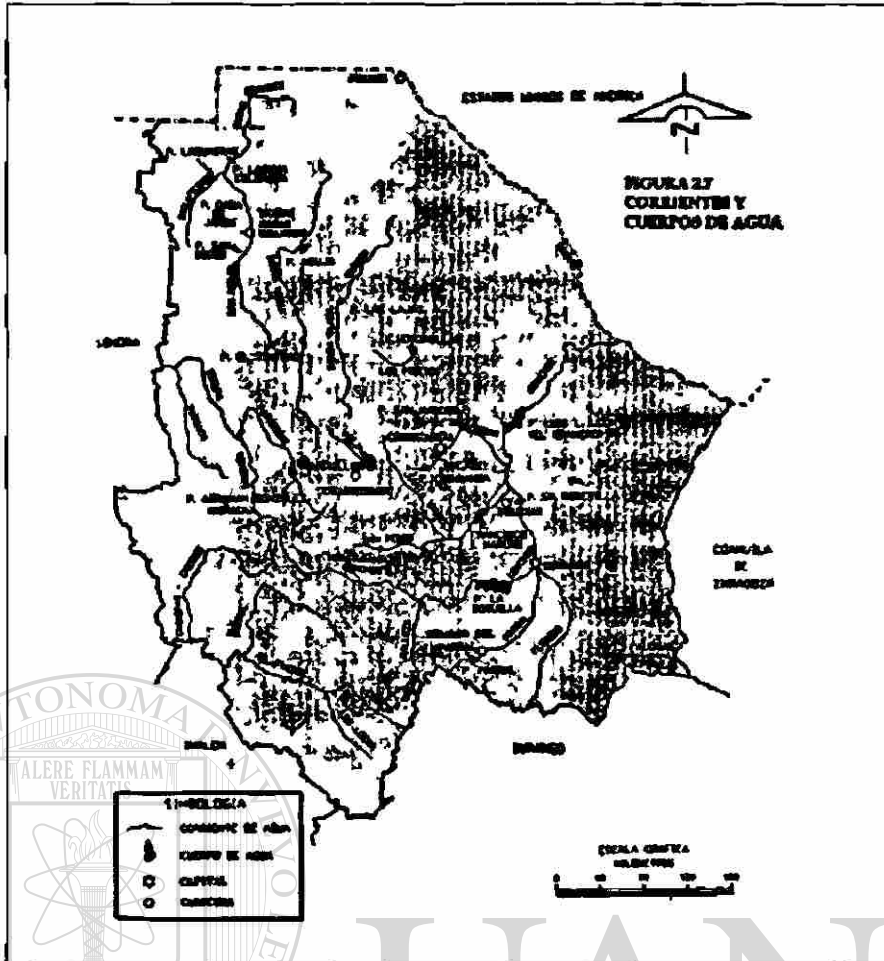
FIGURA 2.3  
PROVINCIAS Y SUBPROVINCIAS  
FISIOGRÁFICAS DEL ESTADO  
DE CHIHUAHUA

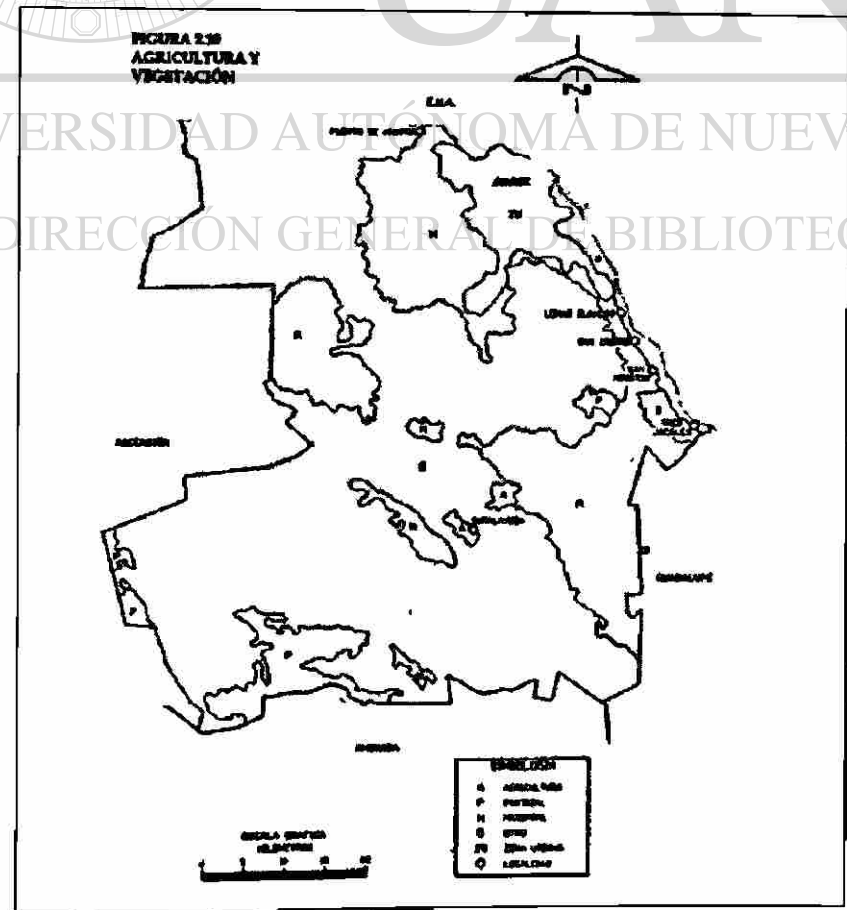
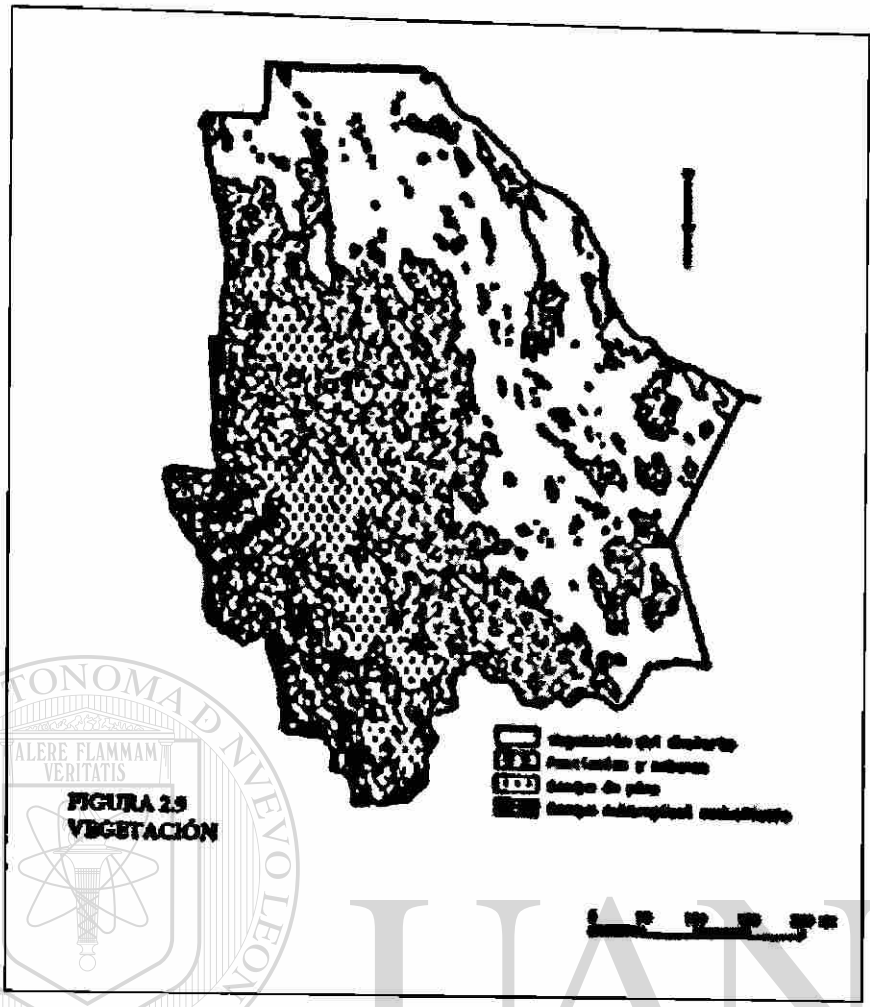


FIGURA 2.4  
TERRENOS TECTONO-ESTRATIGRÁFICOS  
DE MÉXICO

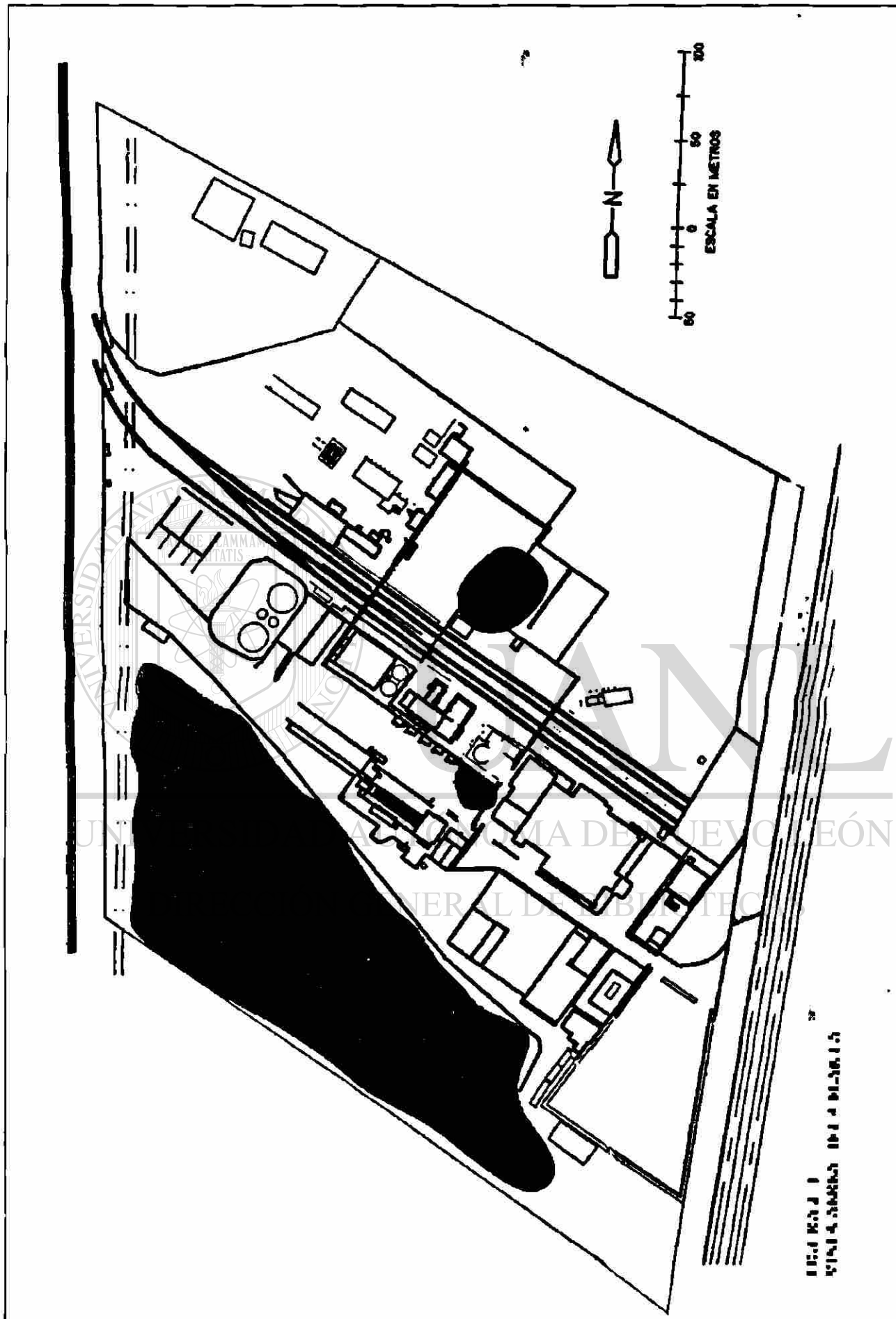


GRÁFICOS









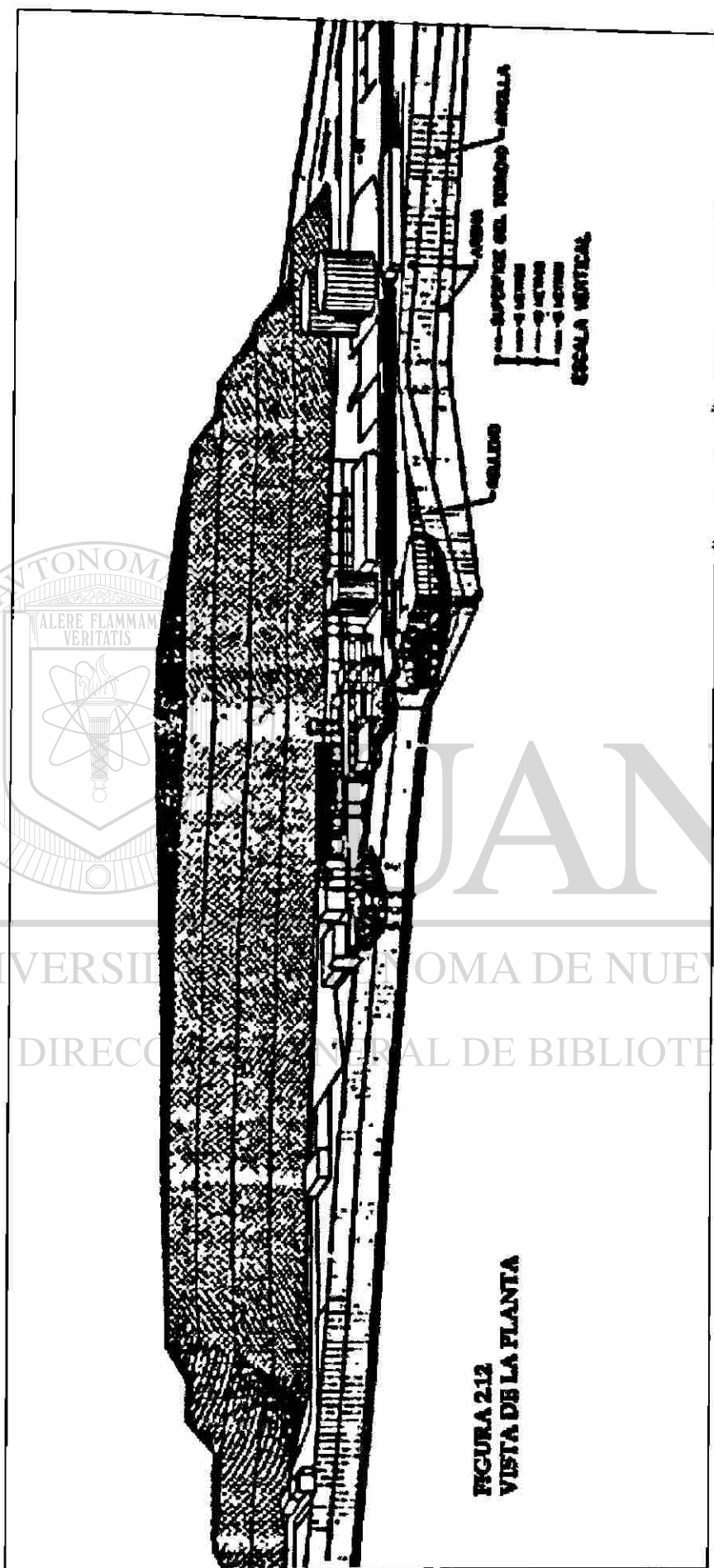


FIGURA 2.12  
VISTA DE LA PLANTA

GRÁFICOS

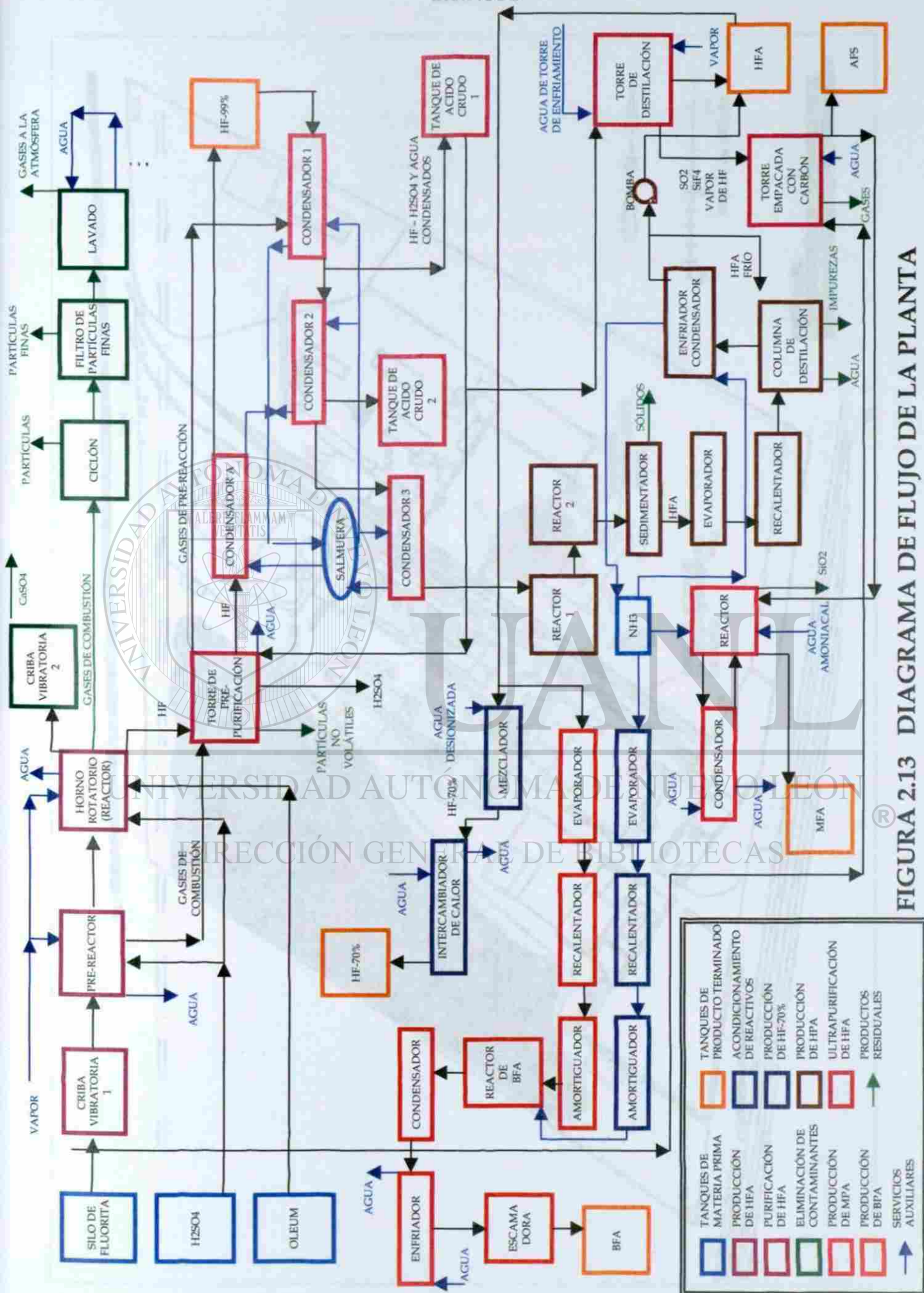
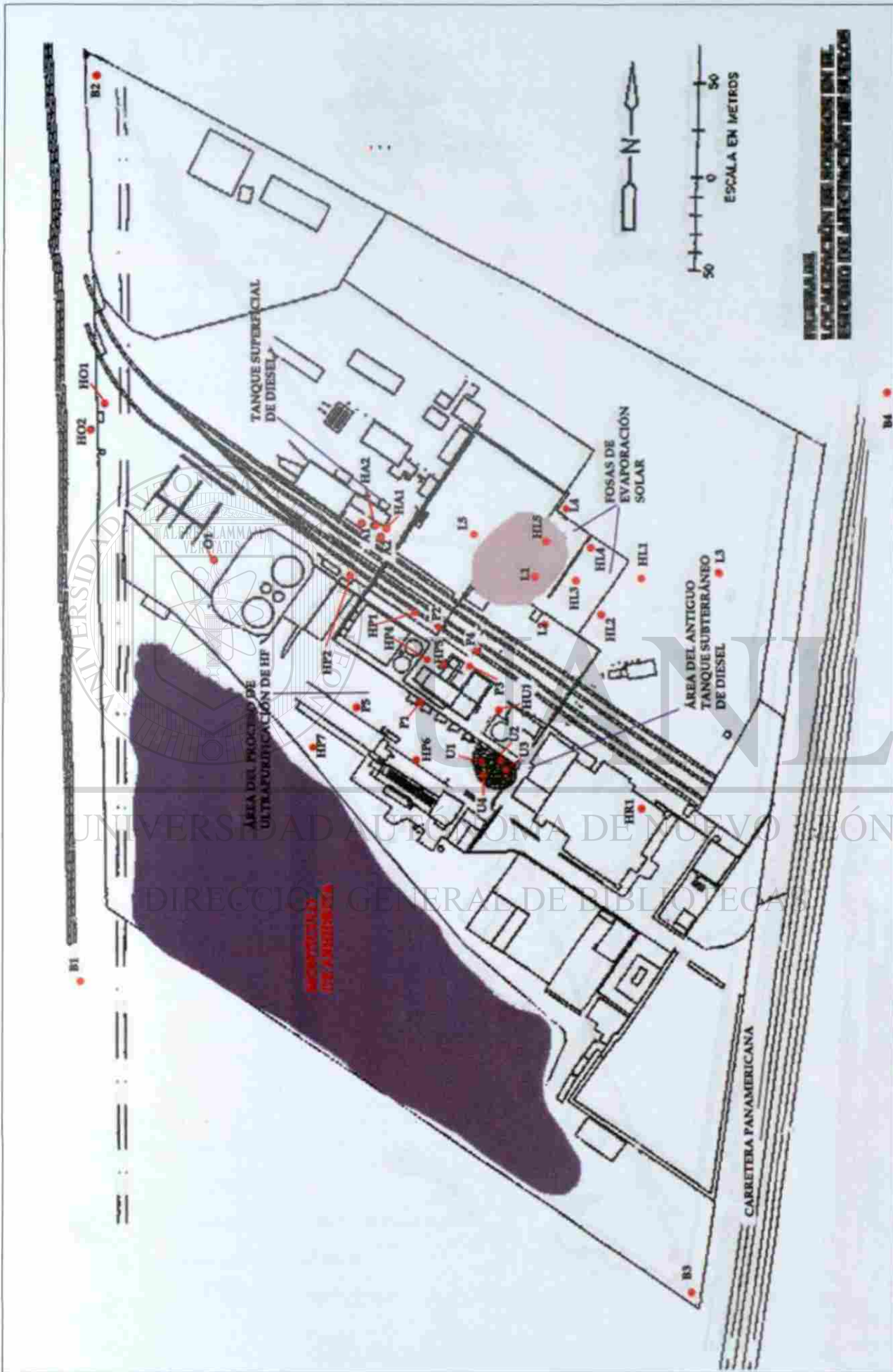
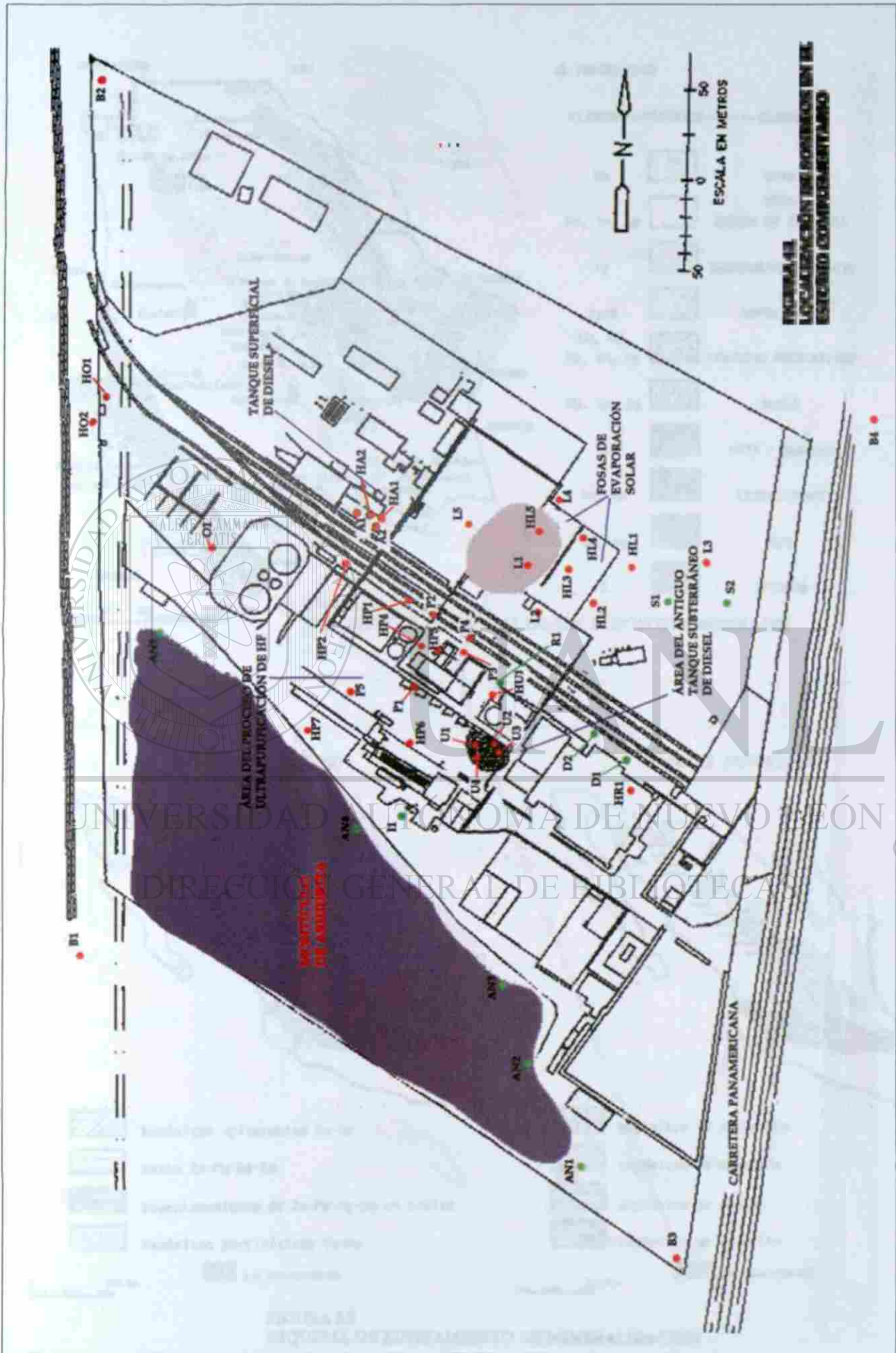
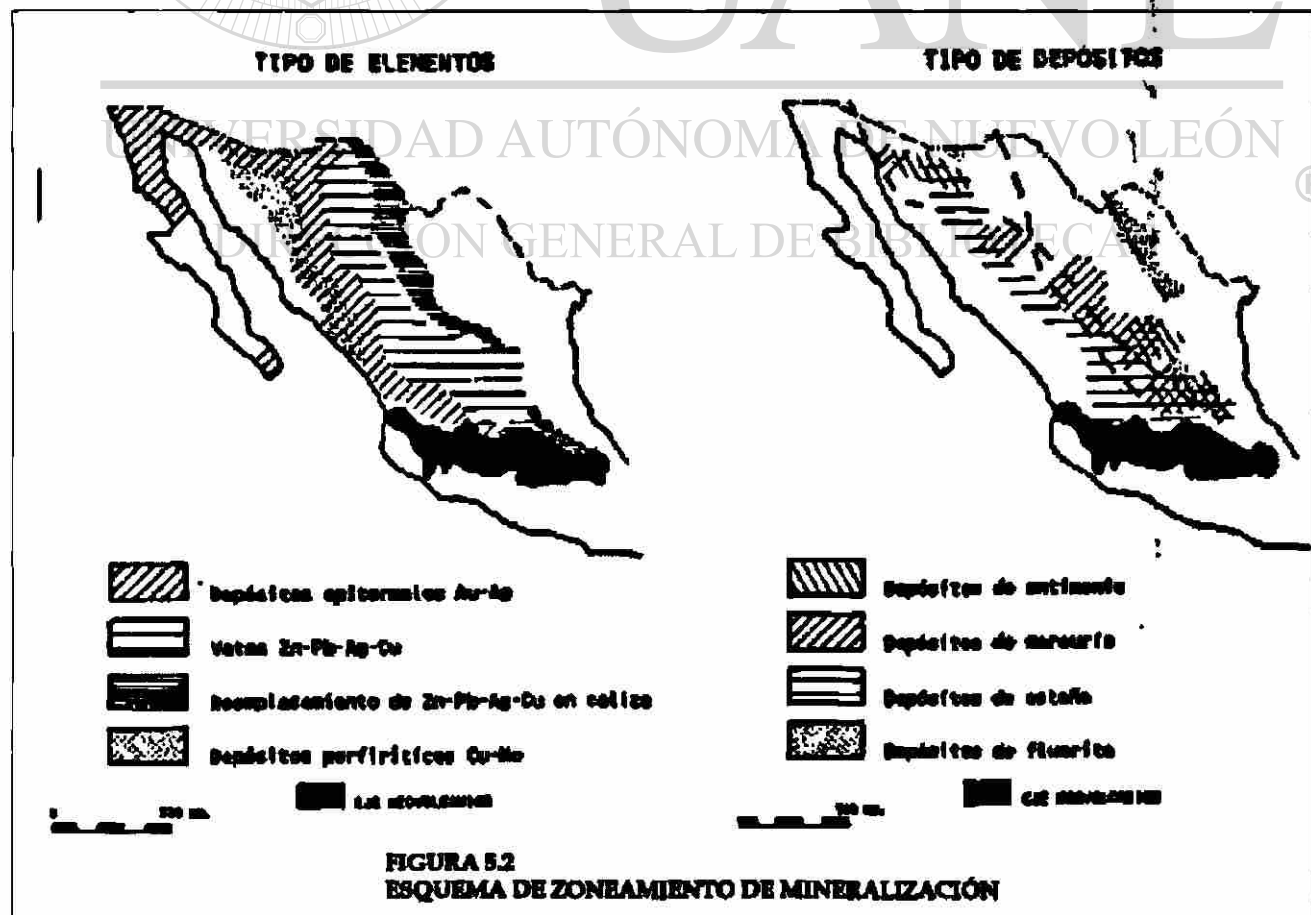
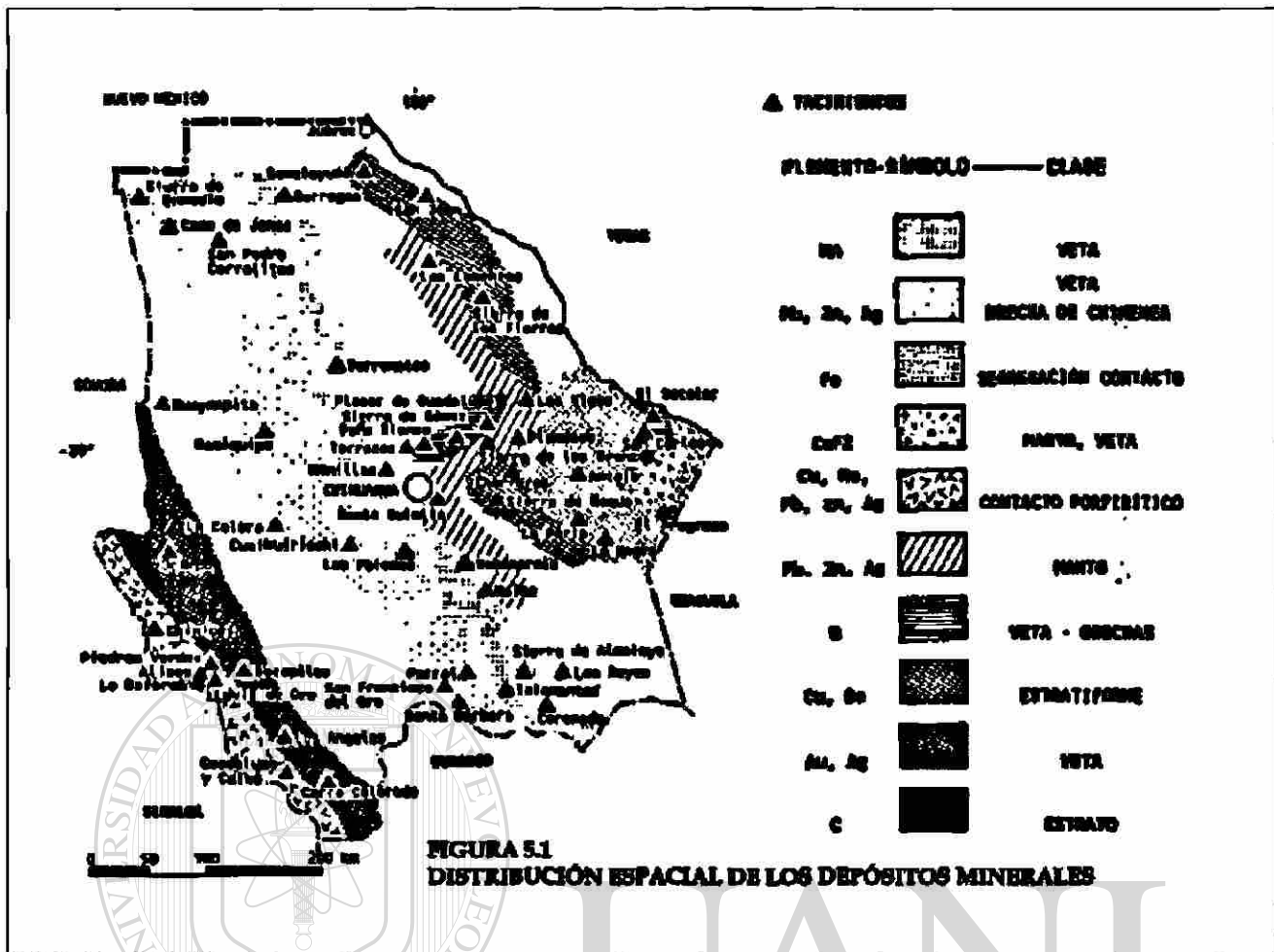


FIGURA 2.13 DIAGRAMA DE FLUJO DE LA PLANTA







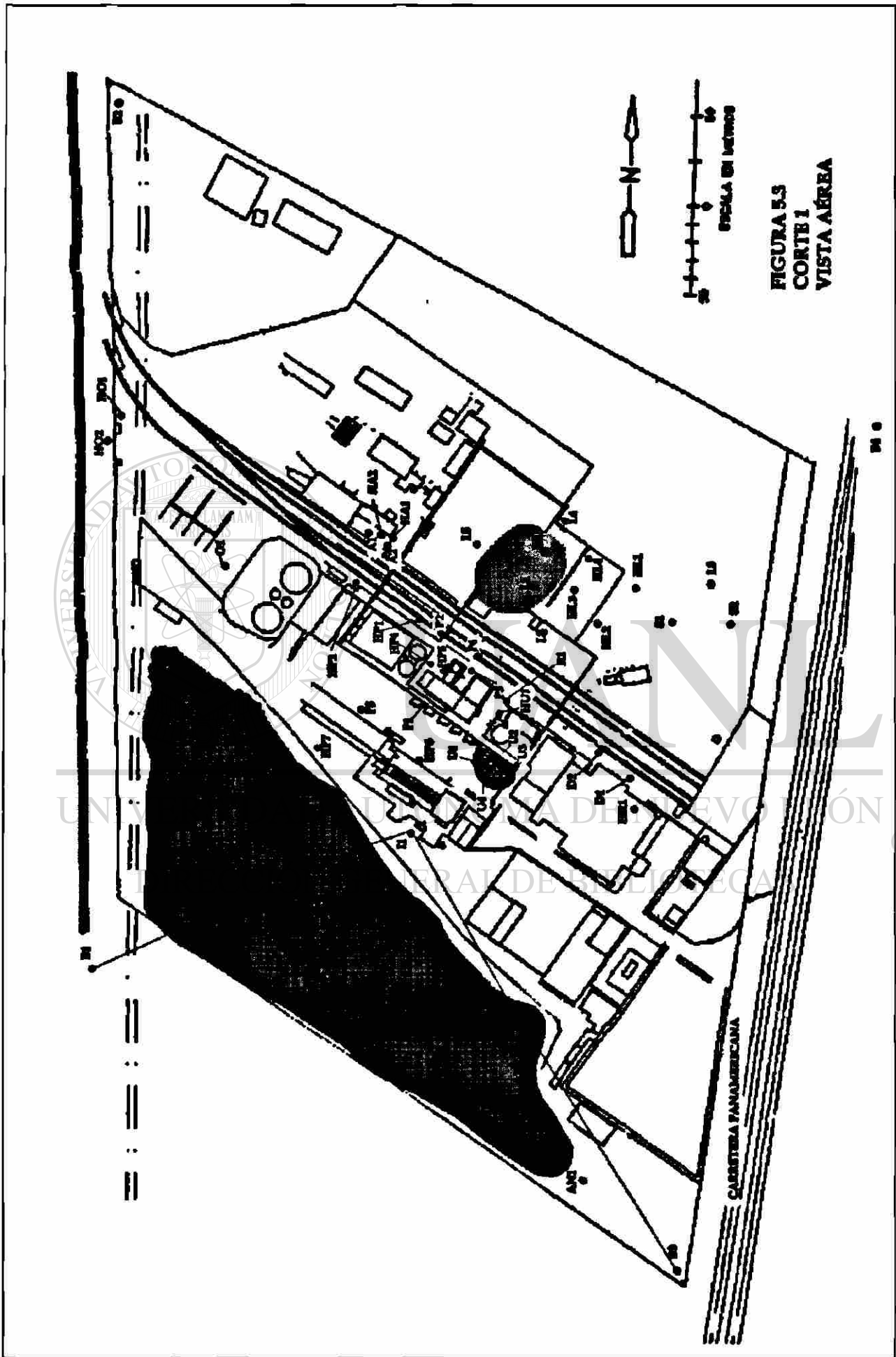


FIGURA 5.3  
CORTE 1  
VISTA AÉREA

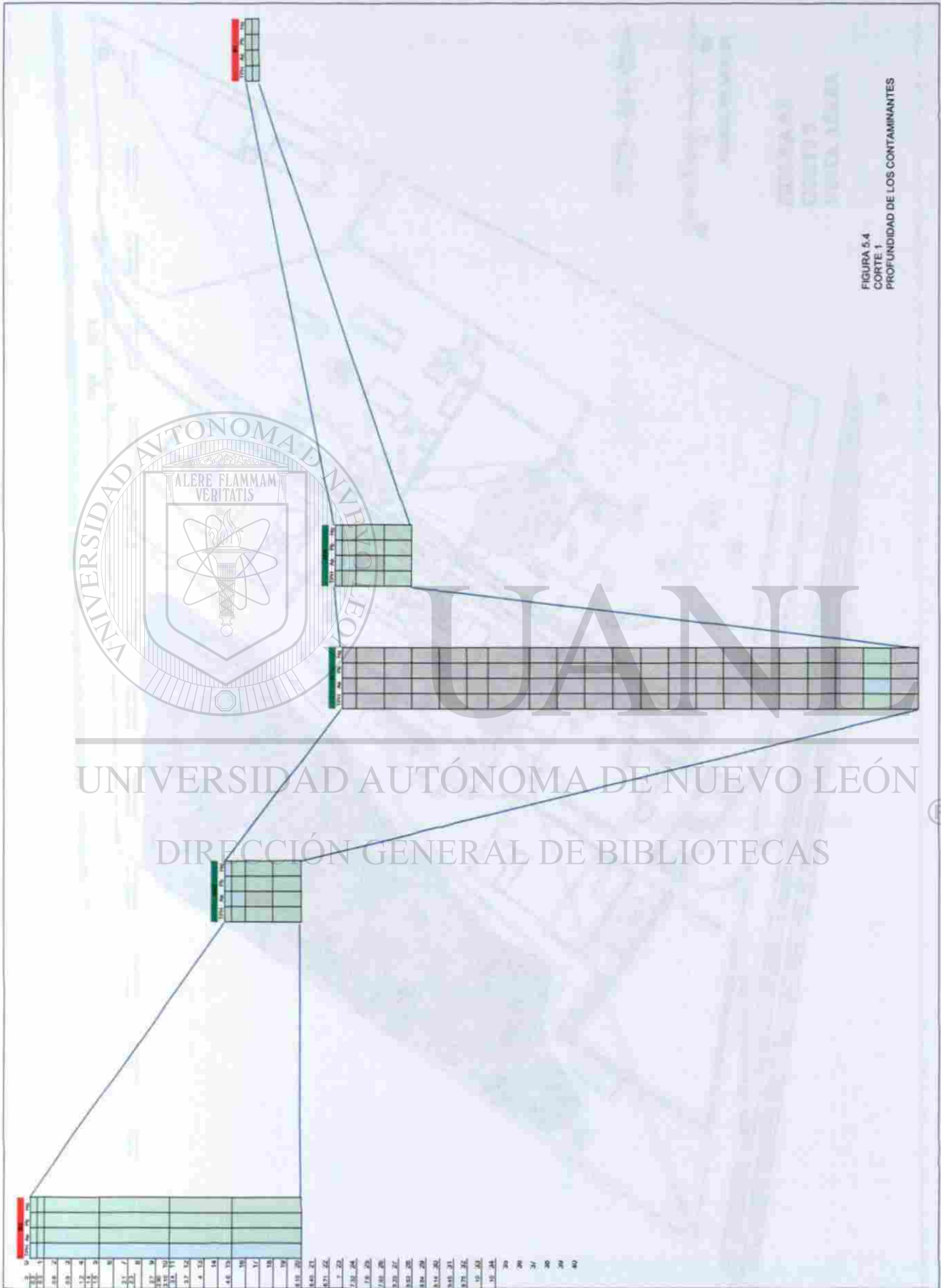
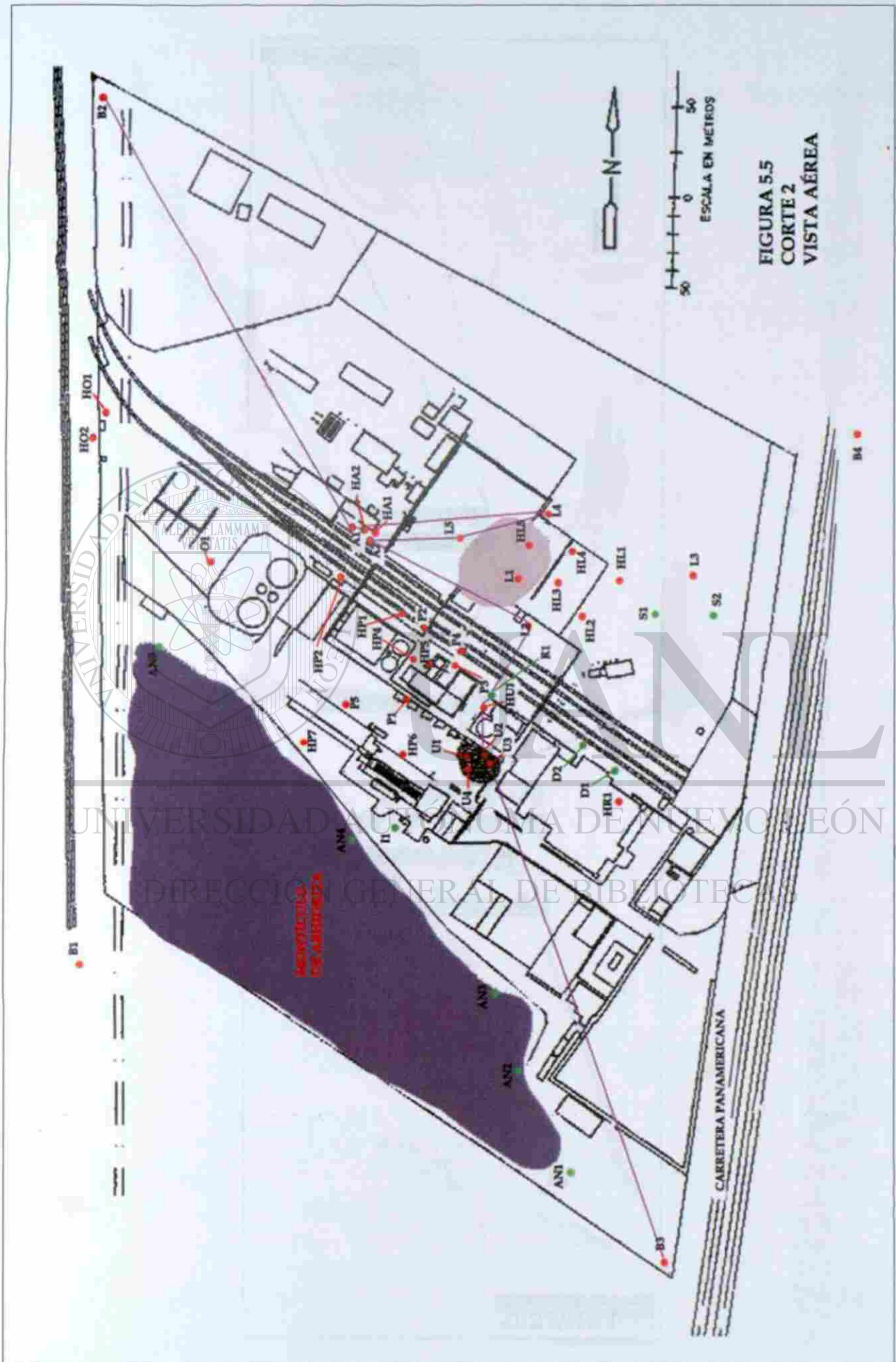


FIGURA 5.4  
CORTE 1  
PROFUNDIDAD DE LOS CONTAMINANTES

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

®





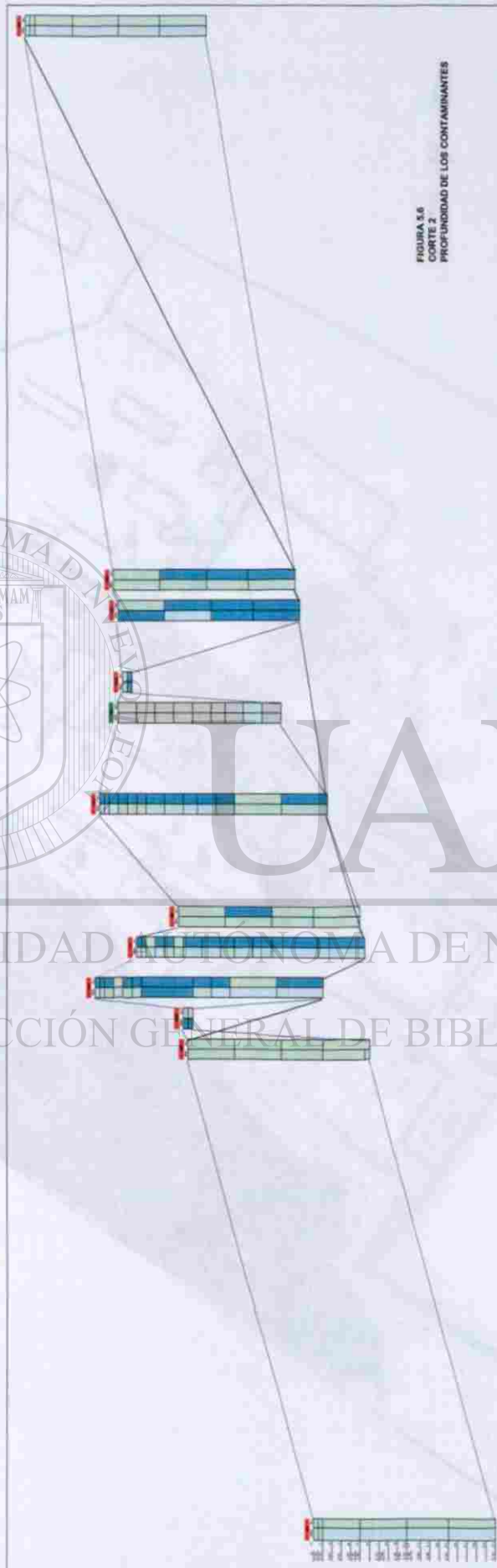
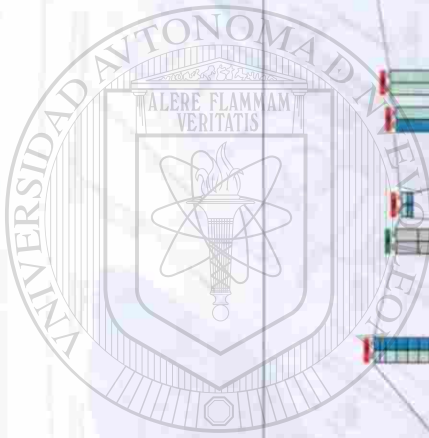


FIGURA 3.6  
CORTE 2  
PROFUNDIDAD DE LOS CONTAMINANTES



UNANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

®

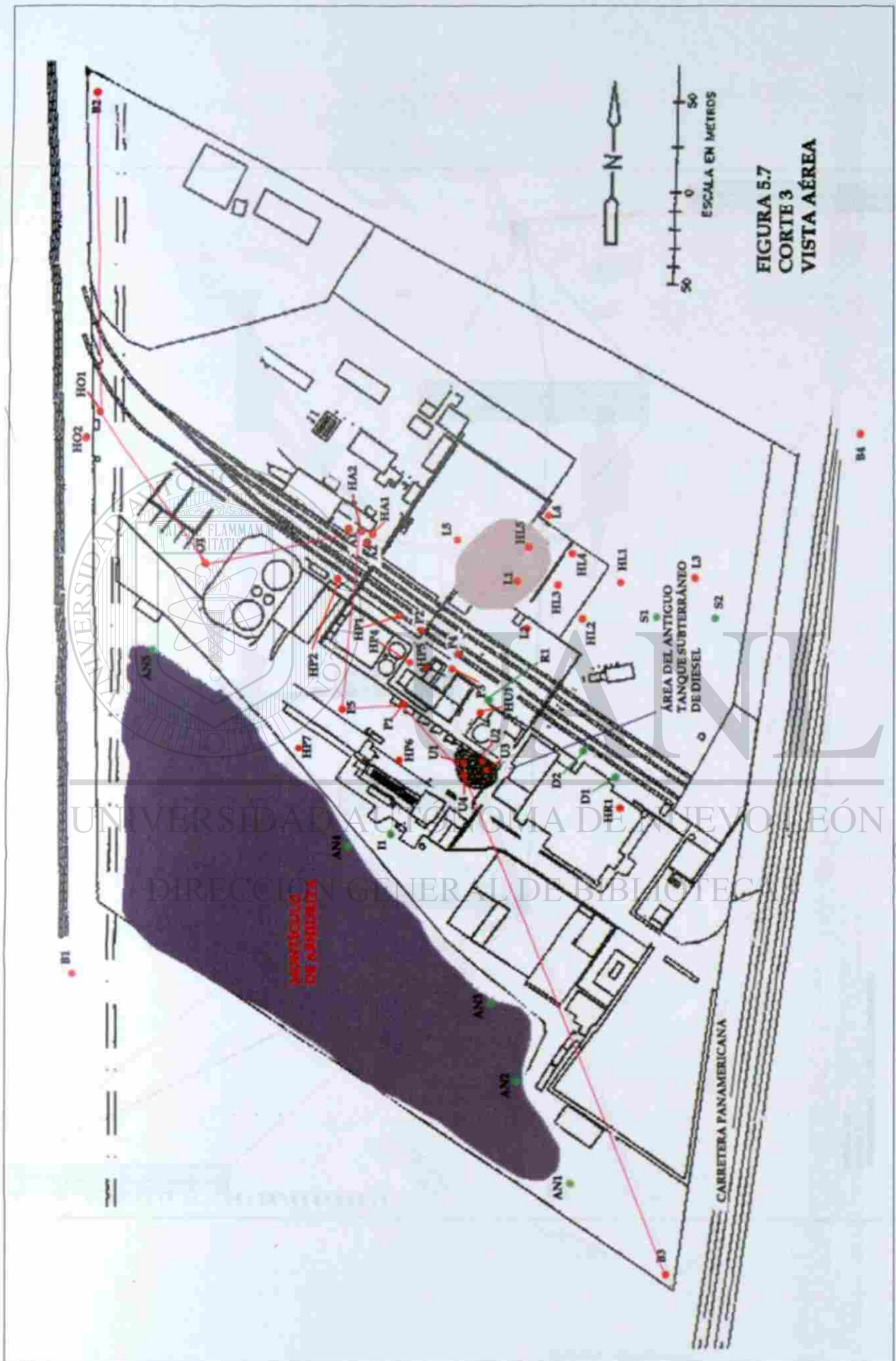


FIGURA 5.7  
CORTE 3  
VISTA AÉREA

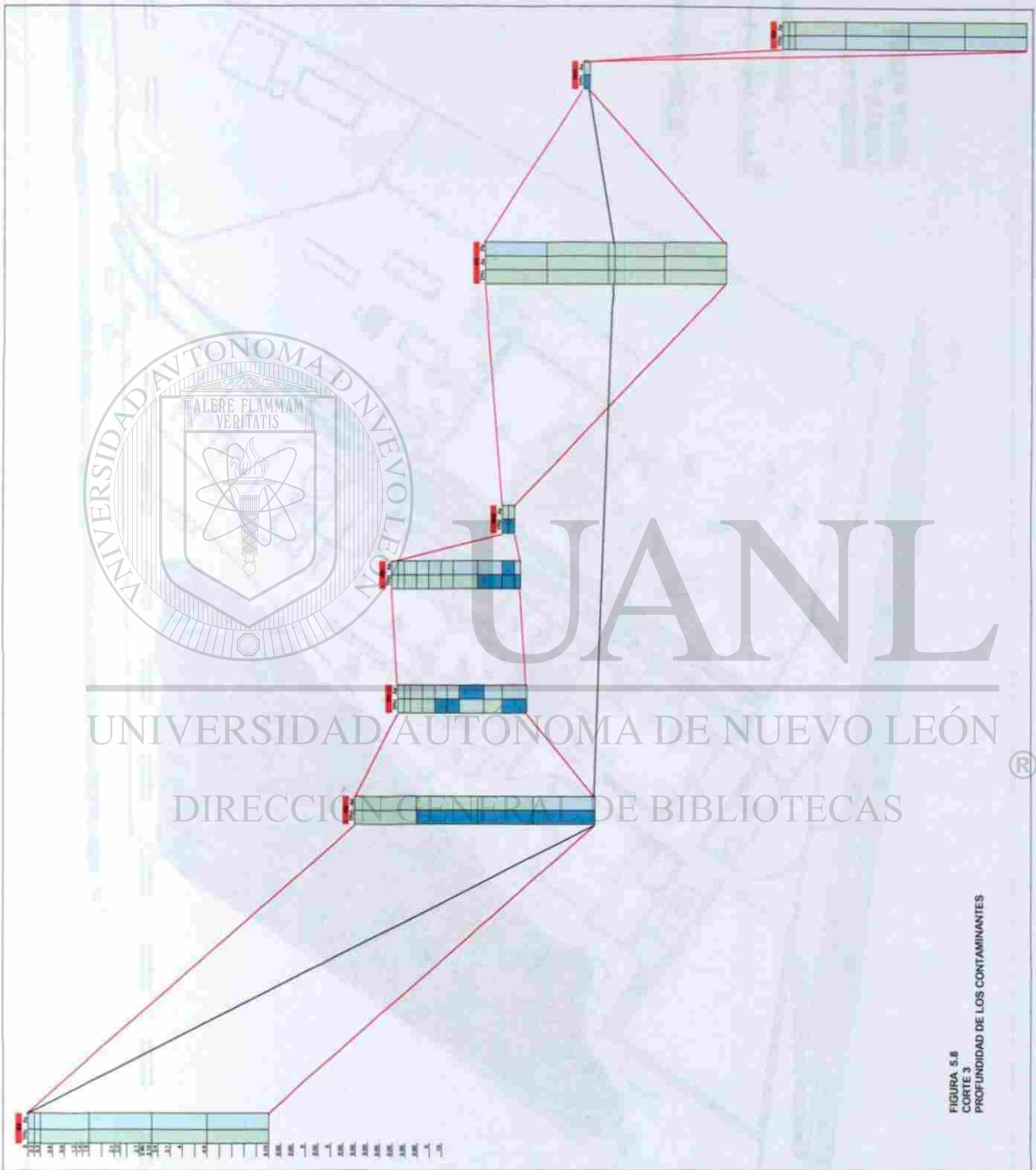
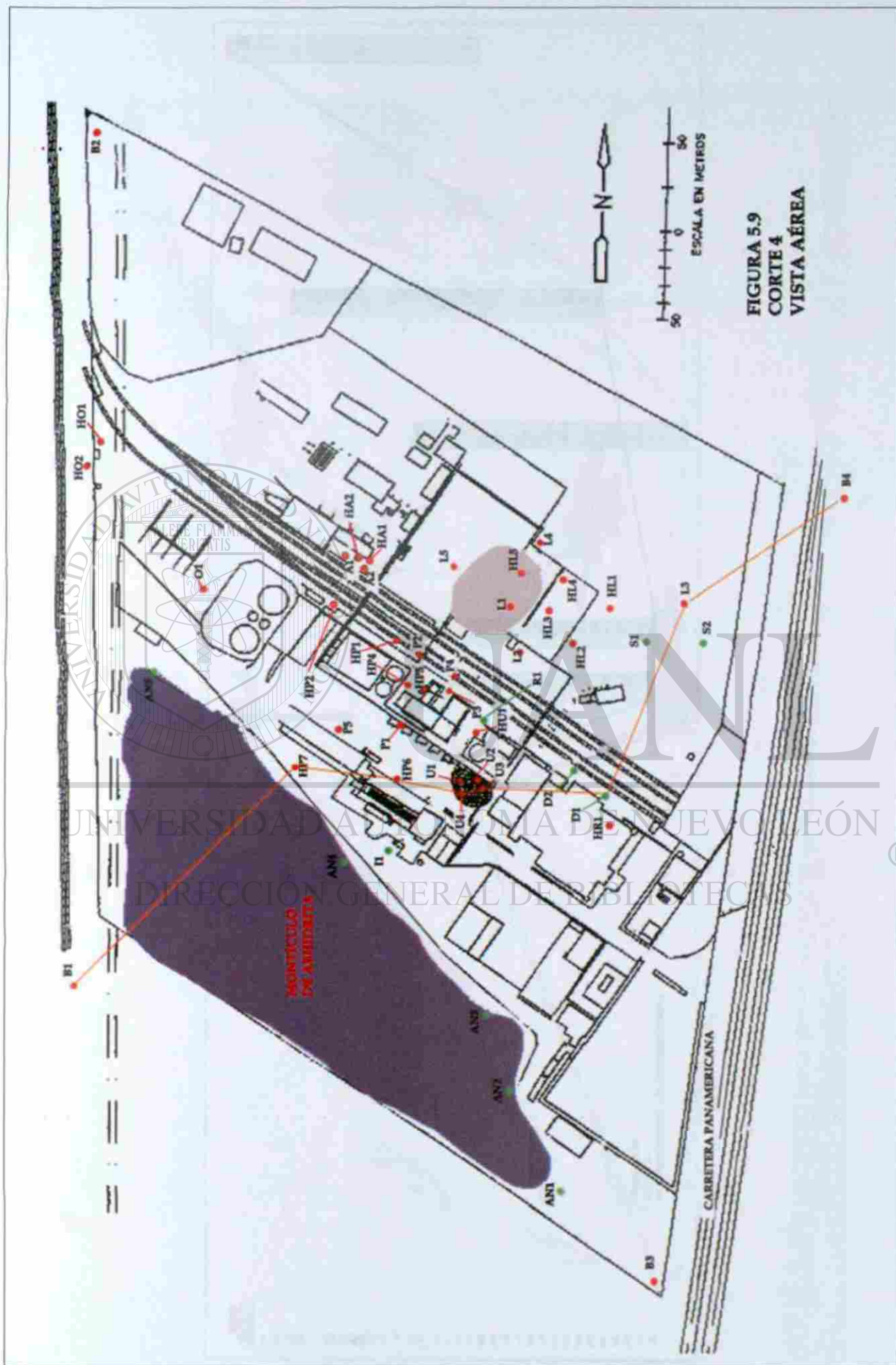
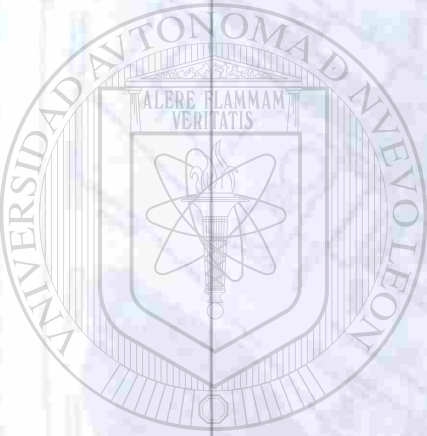


FIGURA 5.8  
CORTE 3  
PROFUNDIDAD DE LOS CONTAMINANTES





UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

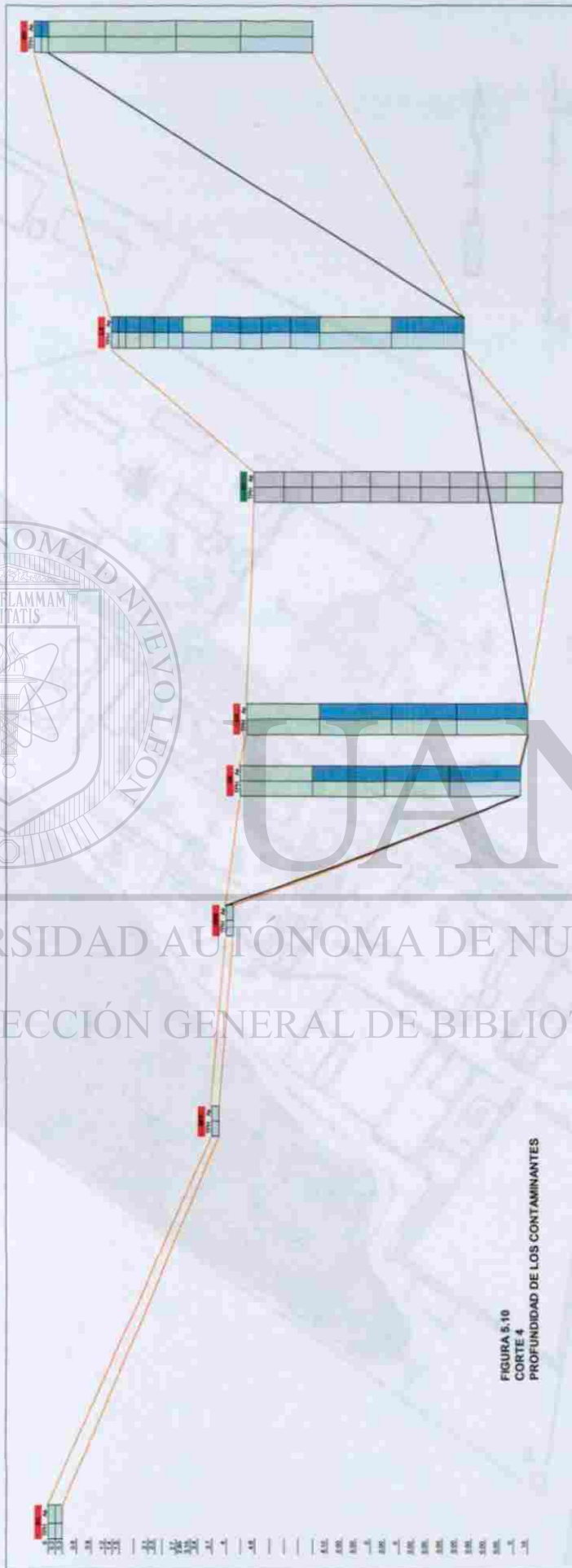


FIGURA 5.10  
CORTE 4  
PROFUNDIDAD DE LOS CONTAMINANTES

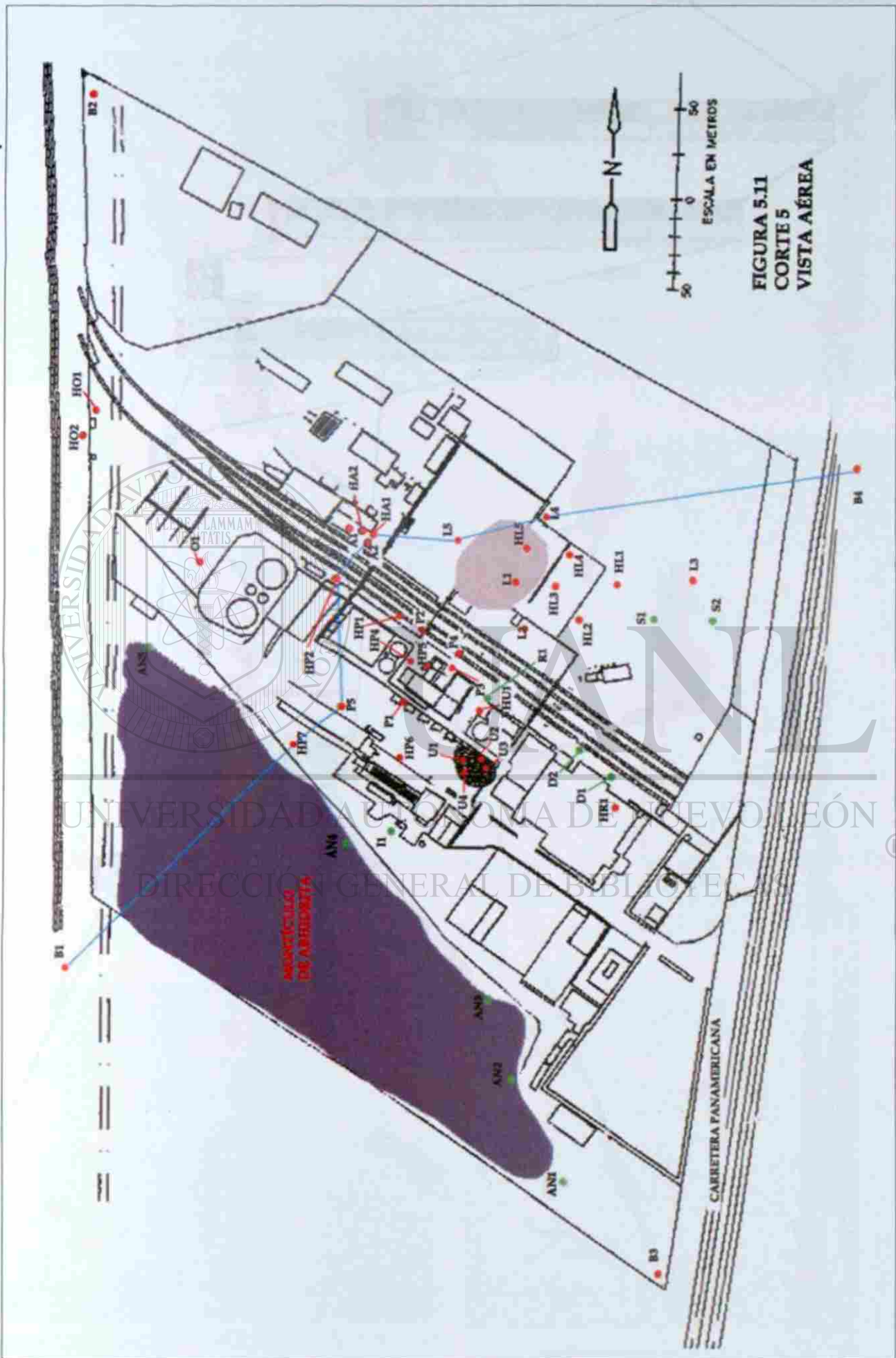
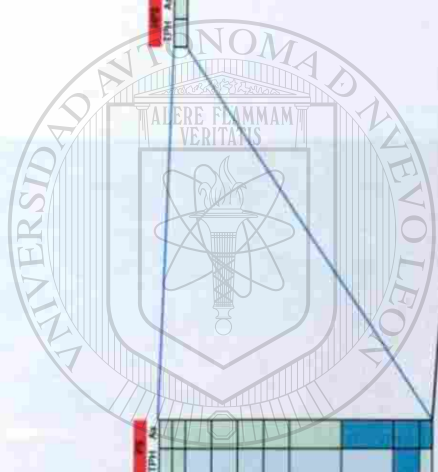


FIGURA 5.11  
CORTE 5  
VISTA AÉREA

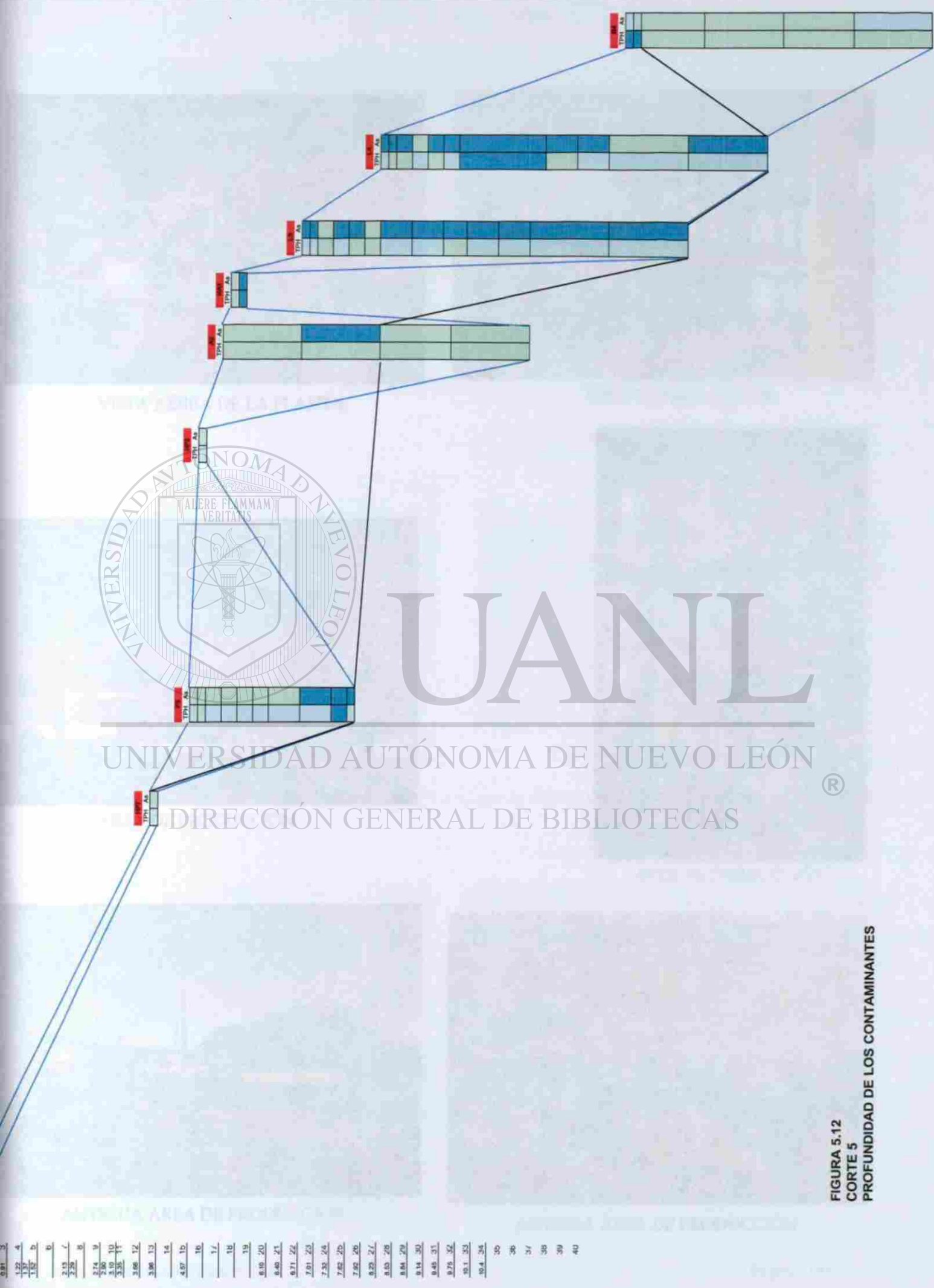


# UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

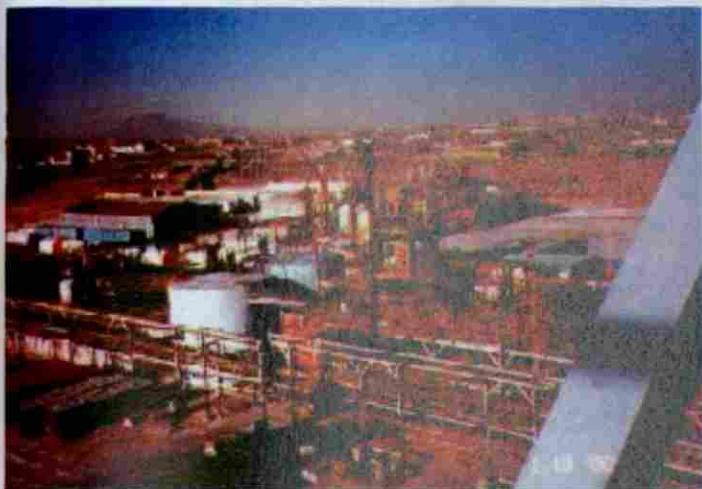
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

FIGURA 5.12  
CORTE 5  
PROFUNDIDAD DE LOS CONTAMINANTES



0.01	2
1.22	4
1.39	5
1.52	5
	6
2.15	7
2.28	8
2.74	9
2.86	10
3.35	11
3.66	12
3.96	13
	14
4.57	15
	16
	17
	18
	19
6.10	20
6.40	21
6.71	22
7.01	23
7.32	24
7.62	25
7.92	26
8.23	27
8.53	28
8.84	29
9.14	30
9.45	31
9.76	32
10.1	33
10.4	34
	35
	36
	37
	38
	39
	40

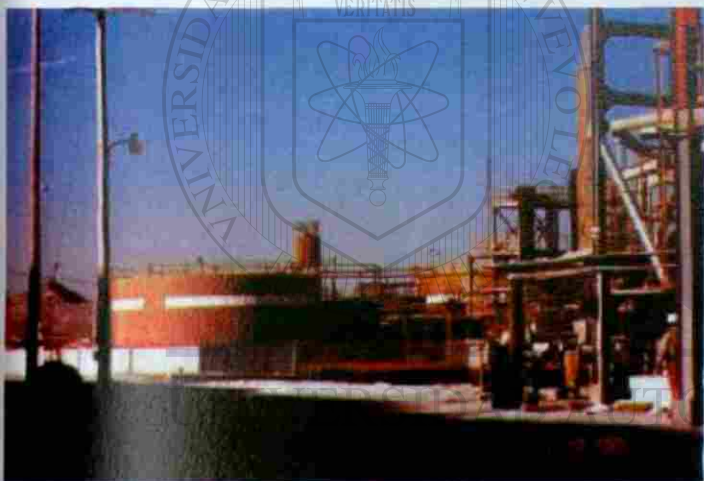




VISTA AÉREA DE LA PLANTA



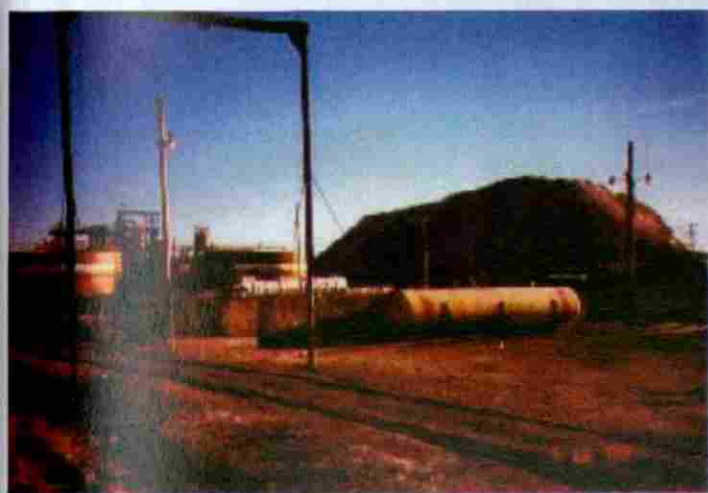
ÁREA DE PRODUCCIÓN



ÁREA DE PRODUCCIÓN



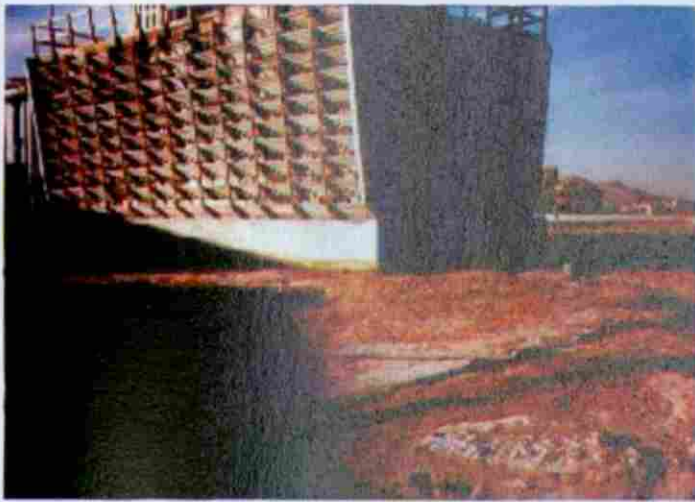
ÁREA DE PRODUCCIÓN



ANTIGUA ÁREA DE PRODUCCIÓN



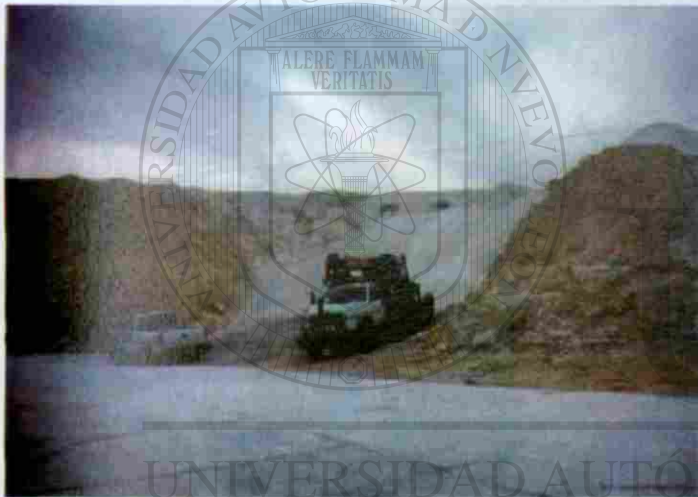
ANTIGUA ÁREA DE PRODUCCIÓN



CÁRCAMO DE RESIDUOS



TANQUES DE DIESEL



MONTÍCULO DE ANHIDRITA



MONTÍCULO DE ANHIDRITA

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



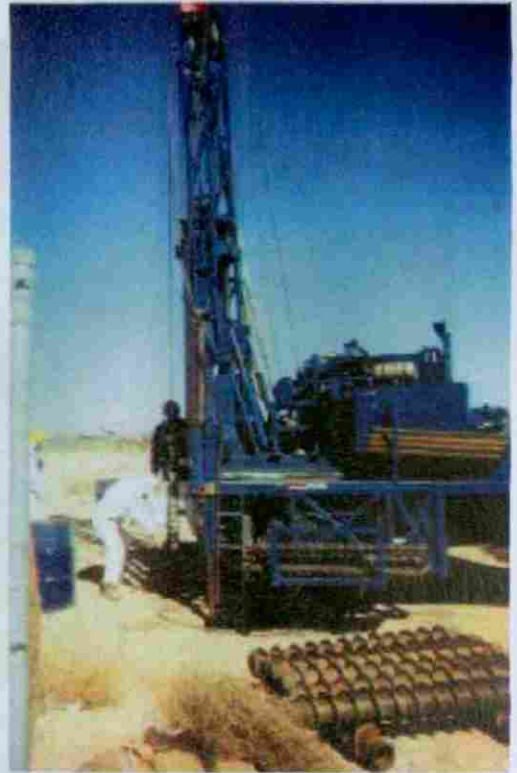
ÁREA DE LA ANTIGUA EXCAVACIÓN



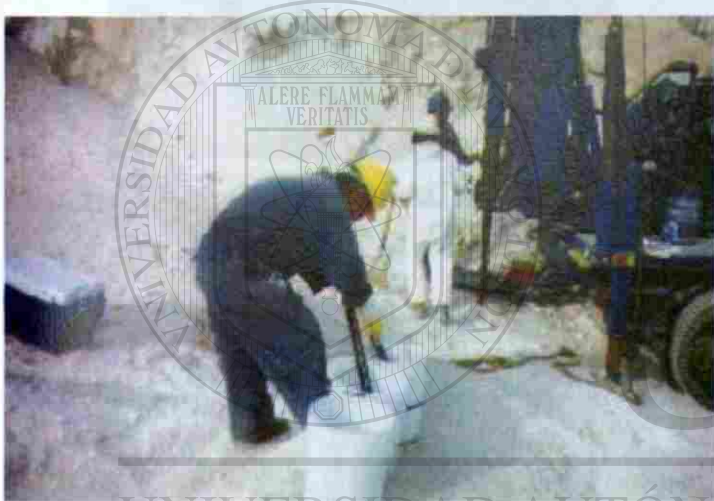
PROPIEDAD ADYACENTE



PERFORACIÓN EN LA PROPIEDAD ADYACENTE



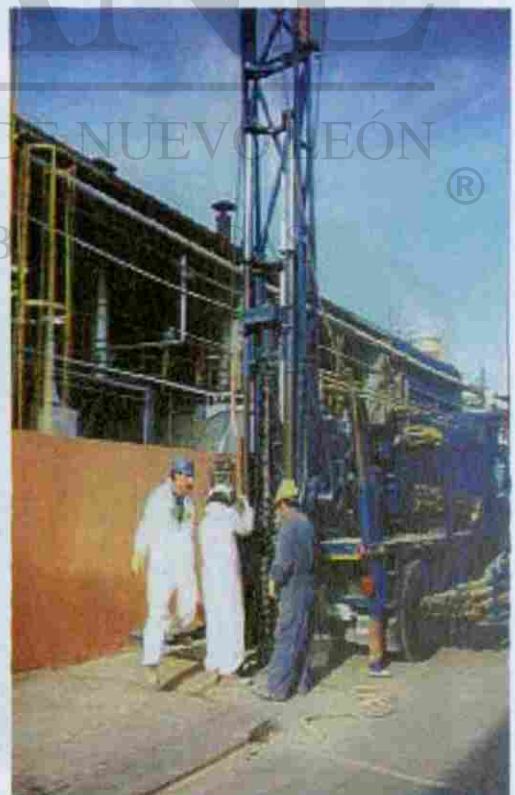
BARRENAS



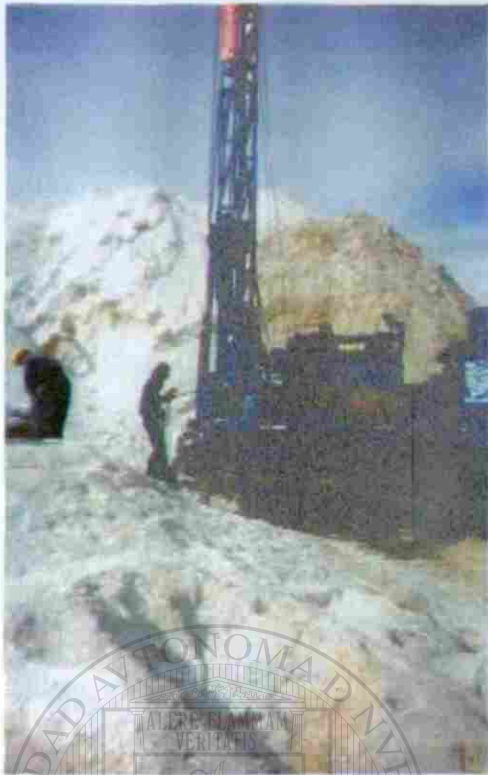
DESCONTAMINACIÓN DE LAS BARRENAS



PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS



SONDEO EN EL ÁREA DE PROCESO



PERFORACIÓN EN EL MONTÍCULO DE ANHIDRITA



PERFORACIÓN AGUAS ABAJO DEL MONTÍCULO DE ANHIDRITA

28 DE FEBRERO DEL 2000.

**PROYECTO: PERFORACION Y MUESTREO DEL SUBSUELO E  
INSTALACION DE POZO DE MONITOREO, EN EL  
INTERIOR DE LA PLANTA PARA LA  
REALIZACION DE UNA CARACTERIZACION  
AMBIENTAL, EN CD. JUAREZ, CHIHUAHUA."**

## **INTRODUCCION**

Se llevó a cabo la caracterización de ciertas áreas del interior de la planta localizada en Ciudad Juárez, Chihuahua; por lo que se subcontrató a la empresa Estudios Especializados de Mecánica de Suelos, S.A. de C.V. para realizar la perforación con máquina rotaria y toma de muestras de subsuelo en diferentes puntos y a diferentes profundidades de acuerdo a las finalidades del proyecto de caracterización.

La localización de las áreas a muestrear fue ubicada por personal de la empresa consultora y por personal de la misma planta, así como la ubicación exacta de cada una de las perforaciones realizadas con máquina rotaria, proporcionándose su identificación.

Todas las actividades realizadas durante la ejecución de este proyecto tales como: perforación, muestreo y descontaminación de todas las herramientas, se realizaron de acuerdo a las normas que aplican del ASTM y lineamientos de la EPA.

## **ACTIVIDADES DE CAMPO**

Se realizaron 11 perforaciones con máquina perforadora del tipo rotaria, marca Foremost Mobile, modelo B-59, la cual se

encuentra montada en un camión Dodge Ram 6500, utilizando para el avance barrenas sólidas de 4 1/4" de diámetro externo de acuerdo a la Norma ASTM D 1452, a continuación se proporciona la nomenclatura de cada una de las perforaciones y su máxima profundidad de muestreo:

Sondeo (pies)	Profundidad de perforación
AN1	8'
AN2	8'
AN3	8'
AN4	12'
AN5	9'
D1	34'
S2	18'
D2	16.5'
I1	81.6'
R	82'
S1	28' Pozo de Monitoreo

Día 3 de Febrero del 2000, la primera actividad realizada en este proyecto fue la identificación de los puntos donde se llevarían a cabo las perforaciones, identificación del área para descontaminado y curso de seguridad de la planta.

#### DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Posteriormente se dio inicio a la perforación y muestreo del sondeo S2 a una profundidad de 12 pies. Después se realizó la perforación y muestreo del S1 a una profundidad de 8 pies, suspendiendo las actividades y realizando el descontaminado de las herramientas de perforación.

Día 04 de Febrero del 2000, se continuó la perforación y muestreo del S1 hasta una profundidad de 28 pies. Así como la profundización del sondeo S2 hasta una profundidad de 18 pies. Se dio inicio a la perforación y muestreo del I1 a 30 pies.

Día 05 de Febrero del 2000 se continuó la perforación y muestreo del I1 hasta 81.5 pies, realizando también el descontaminado de las herramientas de perforación después de terminada la perforación.

Día 06 de Febrero del 2000, se dio inicio a la perforación y muestreo del D1, terminando éste se empezó con el R hasta una profundidad de 17.5 pies, suspendiendo las actividades a esta profundidad.

Día 07 de Febrero del 2000 se continuó con la perforación y muestreo del R hasta 82 pies, continuando con el descontaminado de las herramientas de perforación.

Día 08 de Febrero del 2000, se perforó, muestreo e instaló el S1 a 30 pies, en este mismo día se perforaron en los cinco puntos de la montaña de anhídrita y se tomaron las muestras correspondientes.

Día 09 de Febrero del 2000, se inició y se terminó el sondeo D2 a 16.5 pies de profundidad, continuando con la construcción del brocal del S1, terminada esta operación se inició con el desarrollo del S1.

También se realizó el sellado de todas las perforaciones con grout (agua, cemento-bentonita y arena).

Durante la perforación, el muestreo del subsuelo se realizó a las profundidades requeridas por ustedes mismos, obteniendo las muestras de suelo mediante el uso tanto del muestreador de la prueba de penetración estándar, como los muestreadores California, de 2 1/2" y 3" de diámetro interno, todos los muestreadores tienen una longitud de 2 pies.

A continuación se realiza la descripción del hincado de los muestreadores para la recuperación de muestras de subsuelo.

El muestreo realizado con el muestreador del tipo tubo partido de la prueba de penetración estándar, de acuerdo a

la norma ASTM D-1 586-84, la cual consiste en hincar a base de golpes el tubo partido de 60 cm. de largo, 5.08 cm. de diámetro exterior y 3.49 cm. de diámetro interior mediante la energía proporcionada por una masa de 64 kg. de peso que es dejada caer libremente de una altura de 75 cm., De la misma forma se realizó el hincado de los muestreadores California.

En todos los muestreos, se ejecutó la descontaminación de los muestreadores, antes y después de cada uso de acuerdo al procedimiento descrito en la Norma ASTM D-5088-90. La estratigrafía generalizada detectada en el predio en estudio se describe enseguida:

Los suelos detectados durante la perforación y el muestreo son del tipo aluvial formados por arcilla, limo, arena y mezclas de estos materiales con gravas de caliza y en ocasiones presentando cementación parcial por el contenido de carbonato de calcio, así como arcillas limo calichosas y arcilla calichosas y arenas bien graduadas, cuya coloración va de café obscura, café rojiza, café claro, gris verdosa, gris oscuro y en algunas ocasiones presentando olor a diesel.

Todas las muestras de suelo fueron debidamente colocadas en los contenedores proporcionados por ustedes mismos, identificadas y almacenadas para su transporte al laboratorio<sup>®</sup> seleccionado por ustedes para llevar a cabo las determinaciones analíticas de interés, así como en campo se realizó la toma de lecturas con el fotoionizador.

Sólo se detectó el nivel de aguas freáticas en el sondeo S1 a una profundidad de 21'.

Todas las clasificaciones de los materiales detectados durante las perforaciones, se realizaron de acuerdo a los lineamientos que marca el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, (SUCS) tanto en seco como en húmedo.

A continuación se presenta un listado de las normas ASTM utilizadas durante la realización de este proyecto.



La norma que aplica para la ejecución del descontaminado de las barrenas espirales y herramientas de muestreo del subsuelo, es la norma ASTM-D-5088-90.

La norma que aplica para la ejecución de la exploración utilizando barrenas espirales (solid flight augers), es la norma ASTM-D-1452-95.

La norma que aplica para la descripción e identificación en forma visual y manual de los suelos, es la norma ASTM-D-2488-93.

La norma que aplica para preservación y transportación de las muestras de suelo, es la norma ASTM-D-4220-95.

La finalización de las actividades de campo, que comprende este proyecto de caracterización fue el día 10 de Febrero del 2,000 con las actividades de toma de muestra compuesta y limpieza a los sitios de perforación y muestreo.

Esperando que la información proporcionada, así como los trabajos realizados cumplan con las finalidades de esta etapa del proyecto, quedo de usted como su más atento y seguro servidor.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

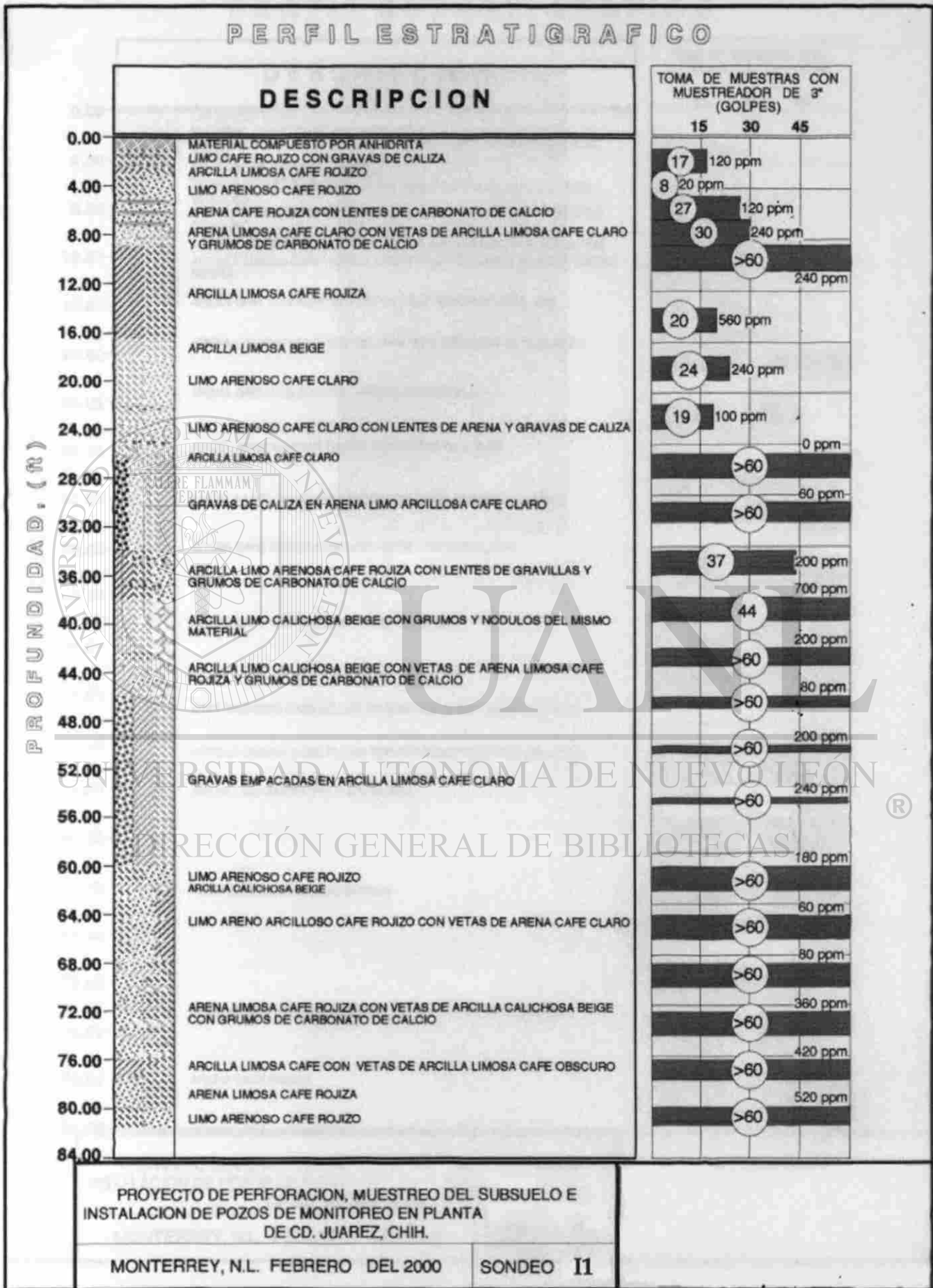
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

ATENTAMENTE

ING. LUIS A. JIMÉNEZ

RDZ.

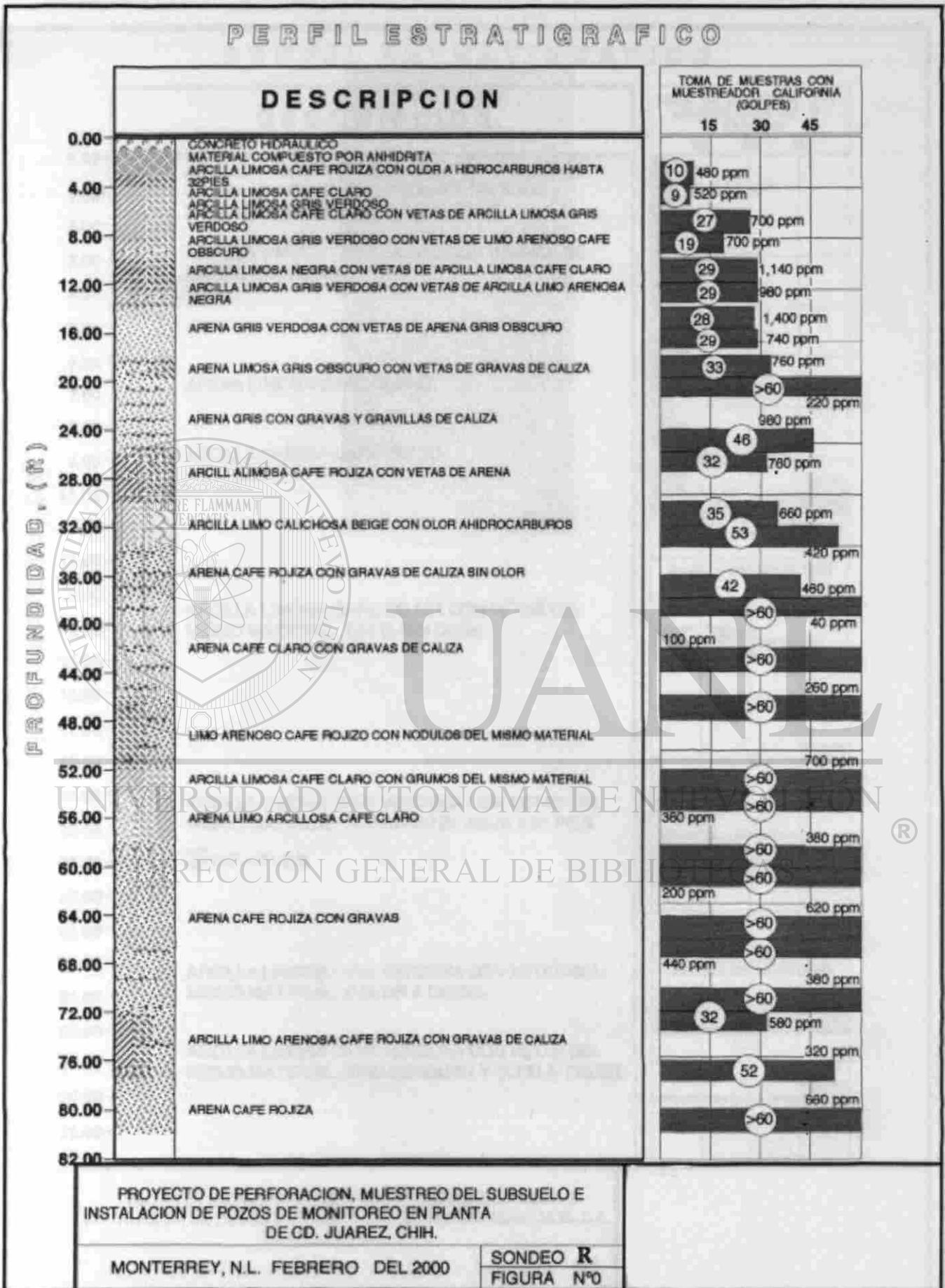
PERFIL ESTRATIGRAFICO



PROYECTO DE PERFORACION, MUESTREO DEL SUBSUELO E  
 INSTALACION DE POZOS DE MONITOREO EN PLANTA  
 DE CD. JUAREZ, CHIH.

MONTERREY, N.L. FEBRERO DEL 2000      SONDEO I1

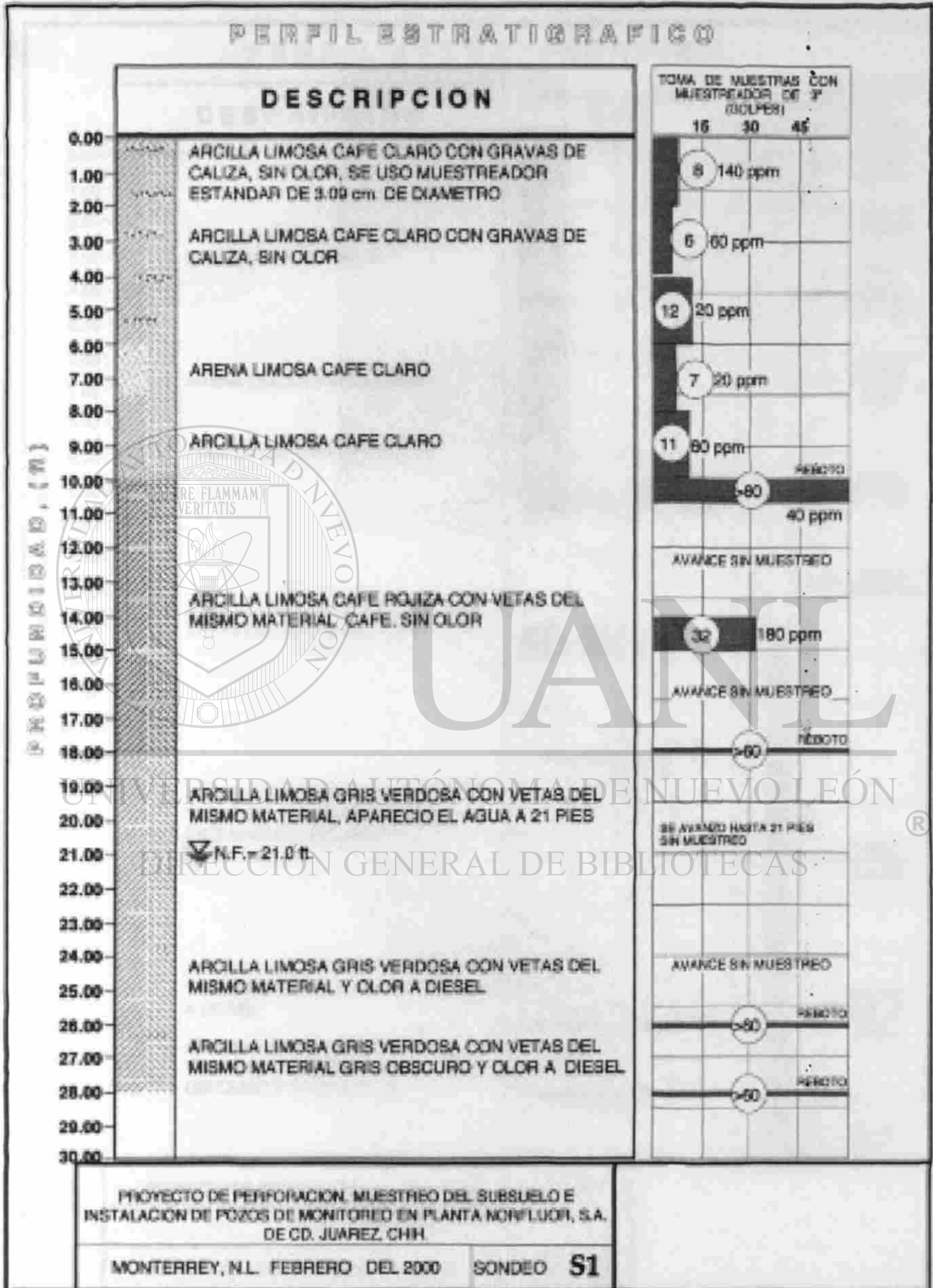
PERFIL ESTRATIGRAFICO

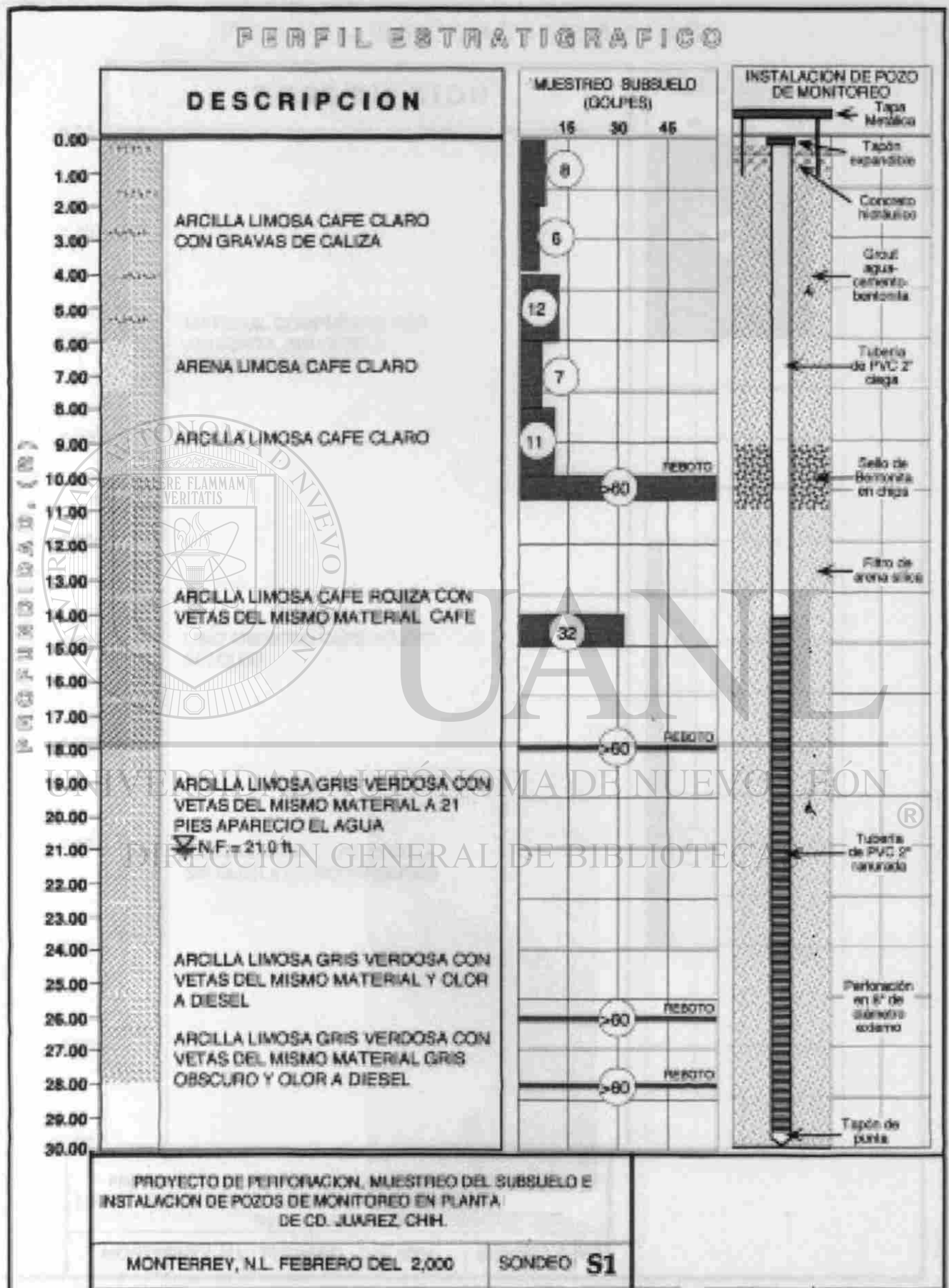


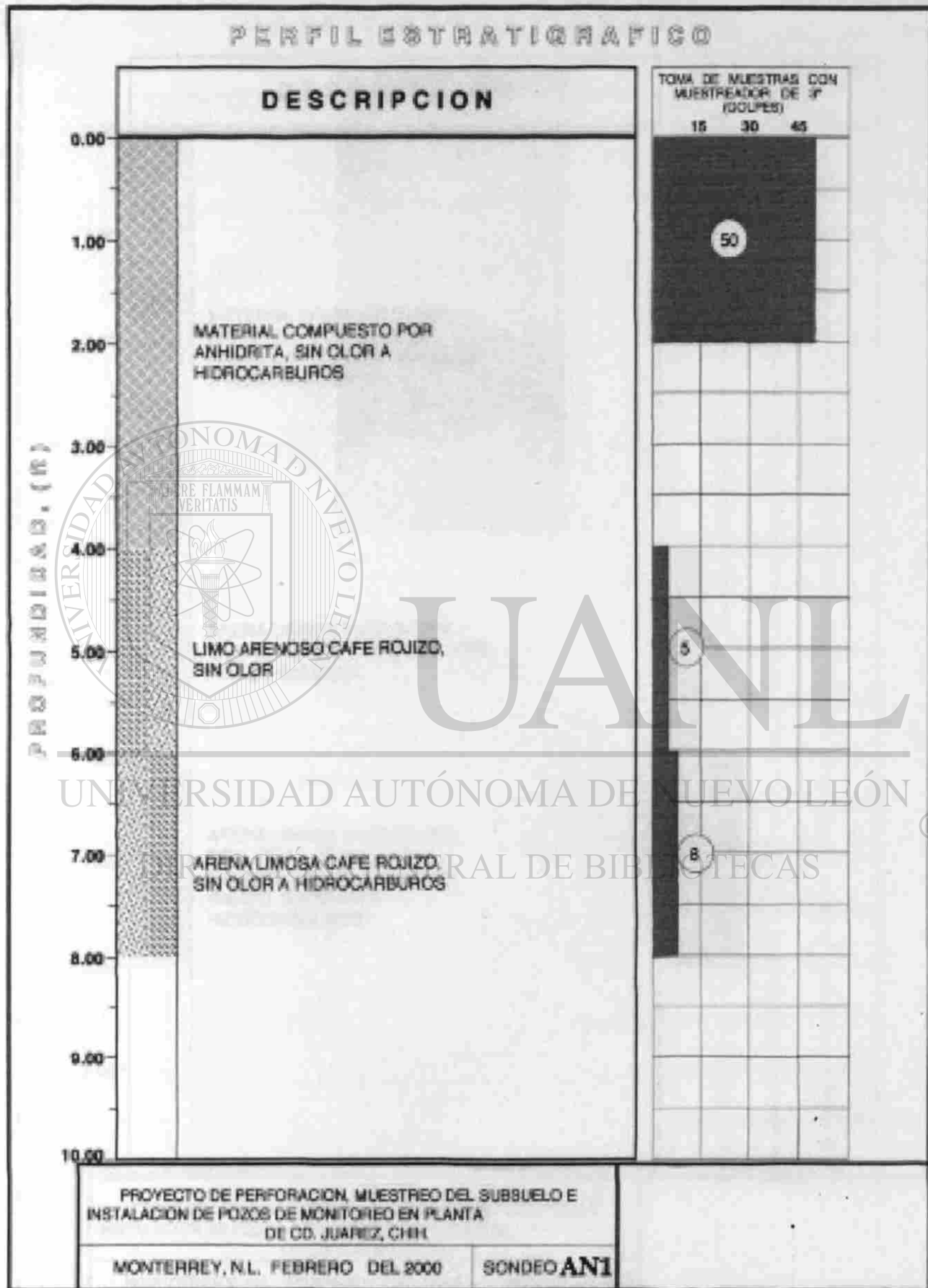
PROYECTO DE PERFORACION, MUESTREO DEL SUBSUELO E  
 INSTALACION DE POZOS DE MONITOREO EN PLANTA  
 DE CD. JUAREZ, CHIH.

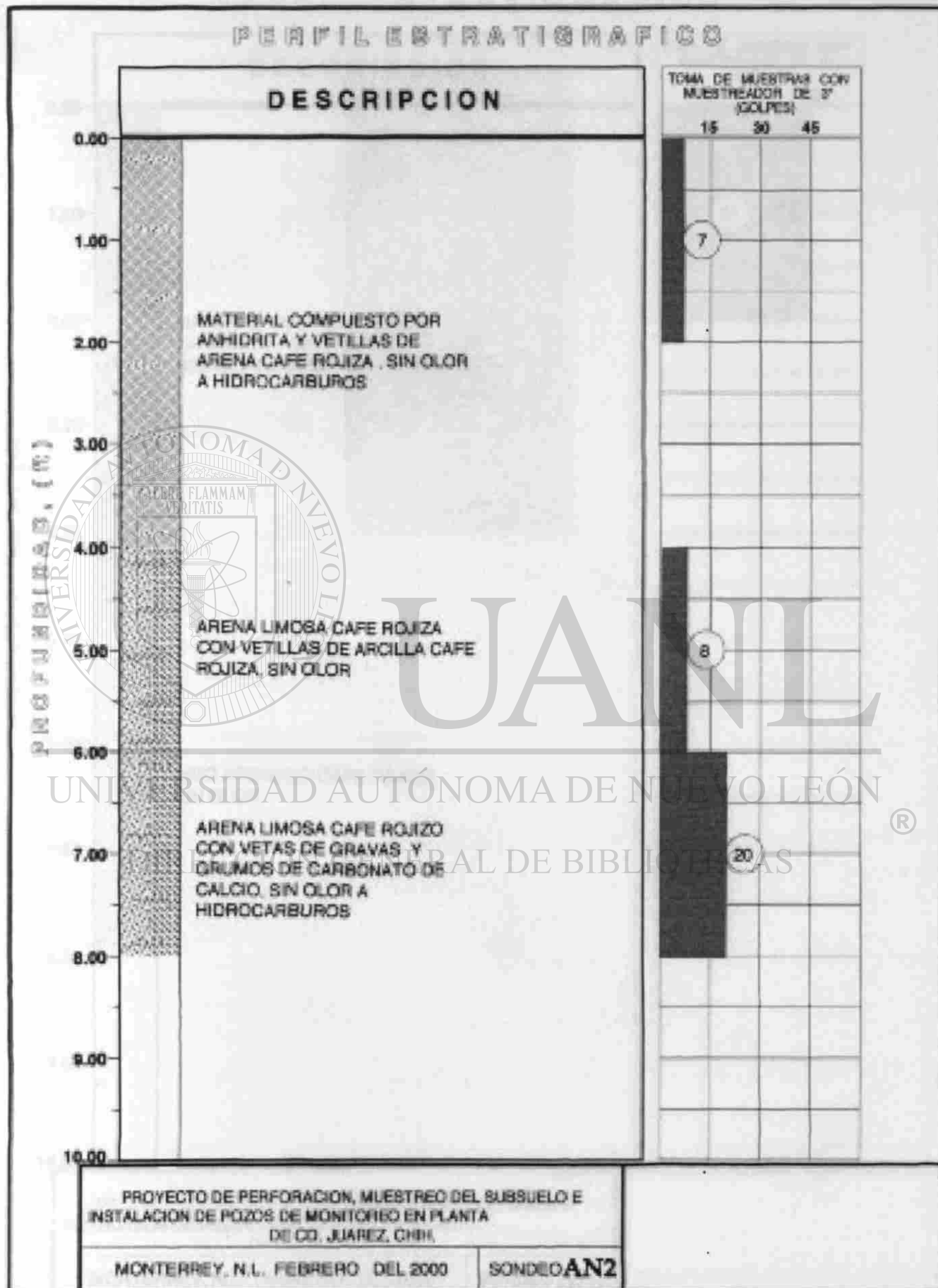
MONTERREY, N.L. FEBRERO DEL 2000

SONDEO R  
 FIGURA N°0

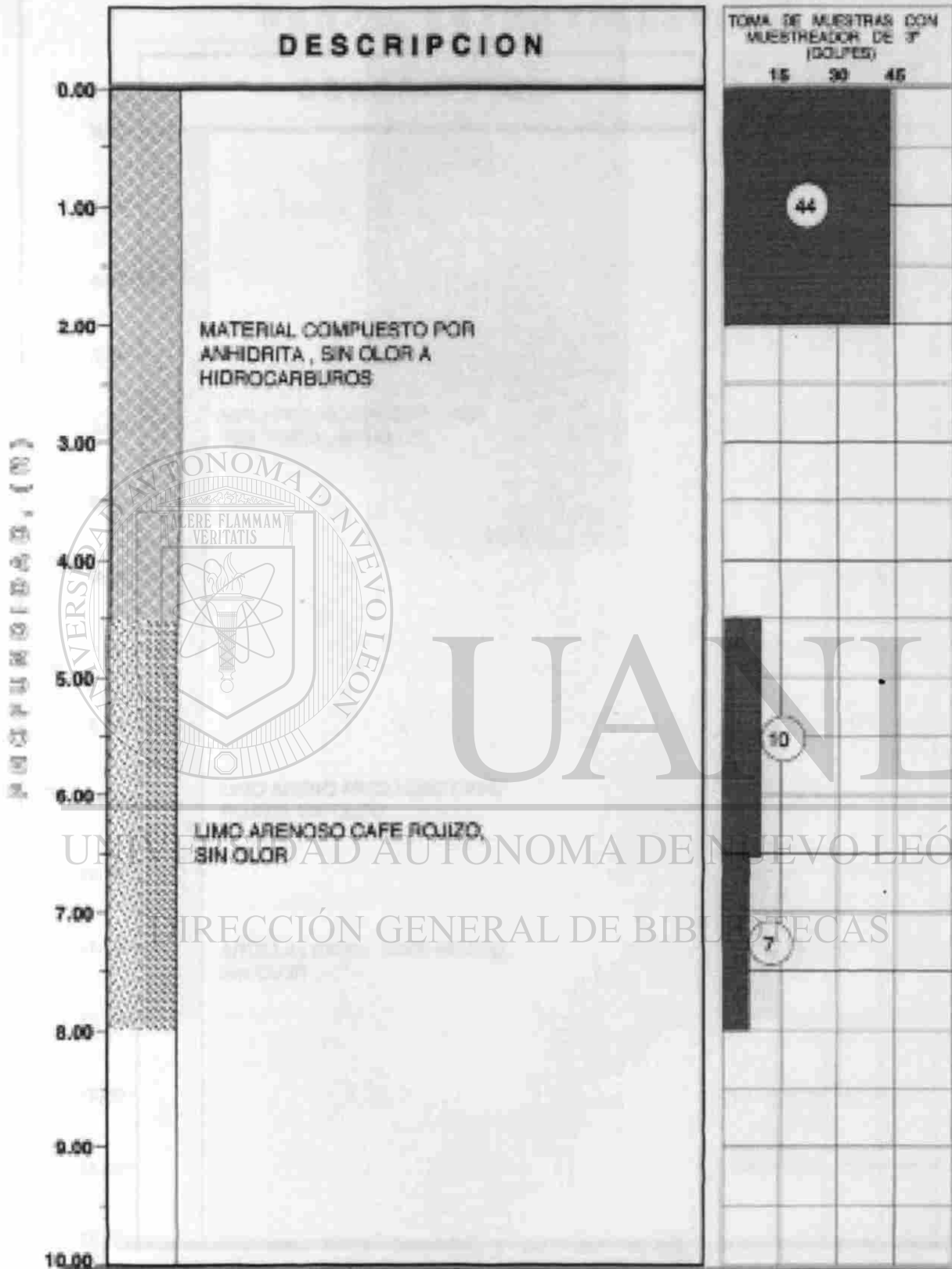








PERFIL ESTRATIGRAFICO

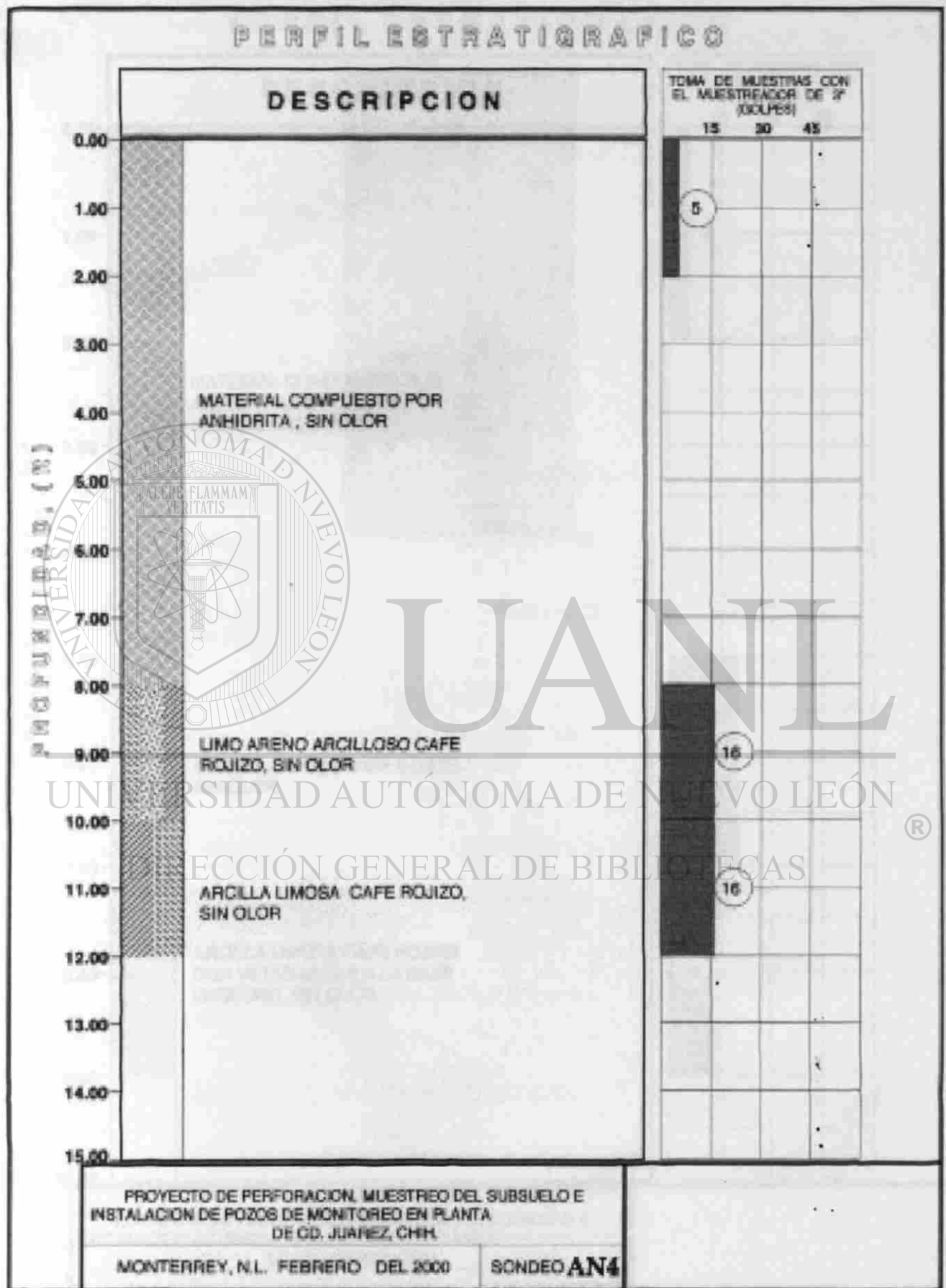


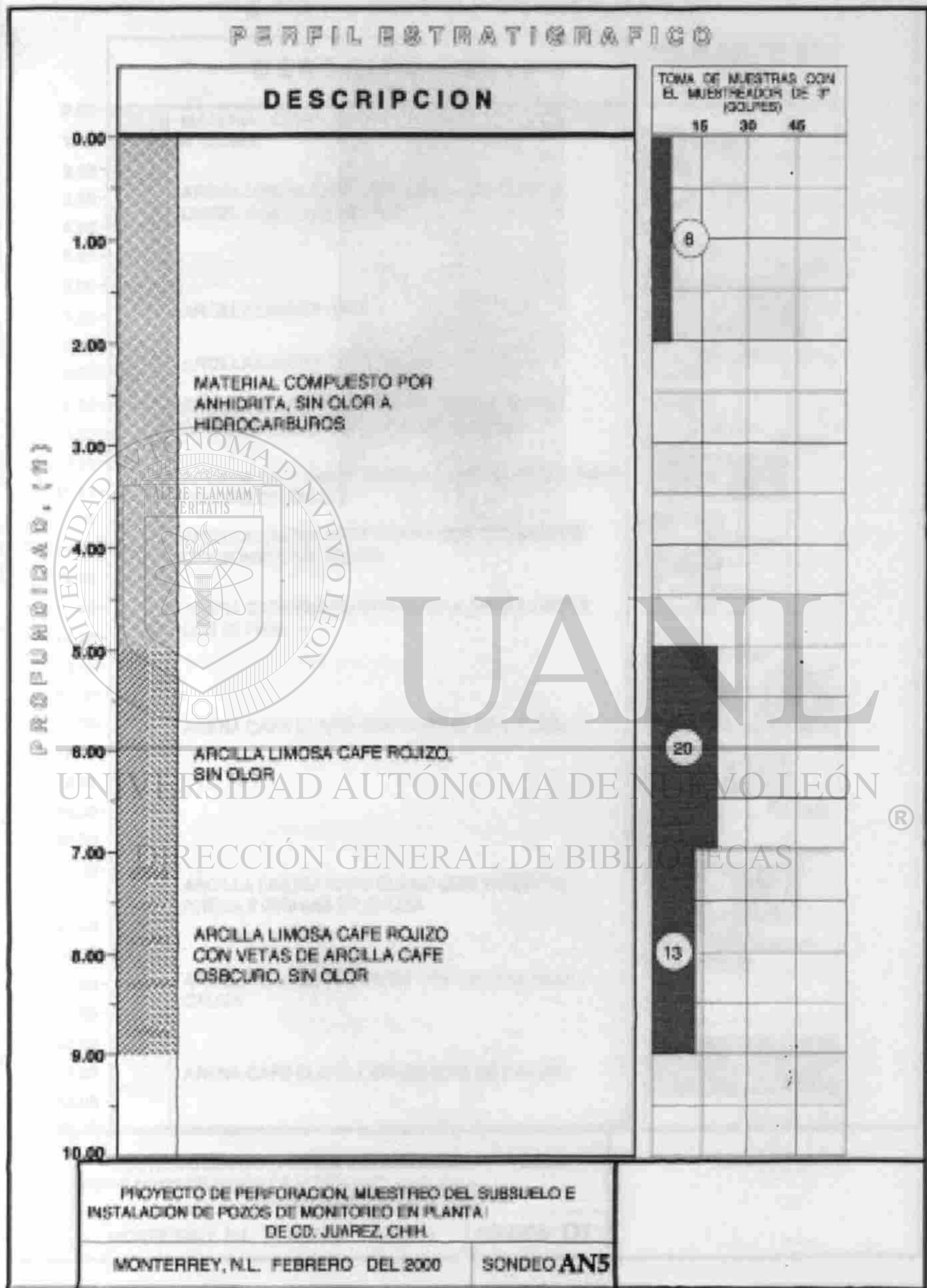
PROYECTO DE PERFORACION, MUESTREO DEL SUBSUELO E INSTALACION DE POZOS DE MONITOREO EN PLANTA DE CD. JUAREZ, CHIH.

MONTERREY, N.L. FEBRERO DEL 2000

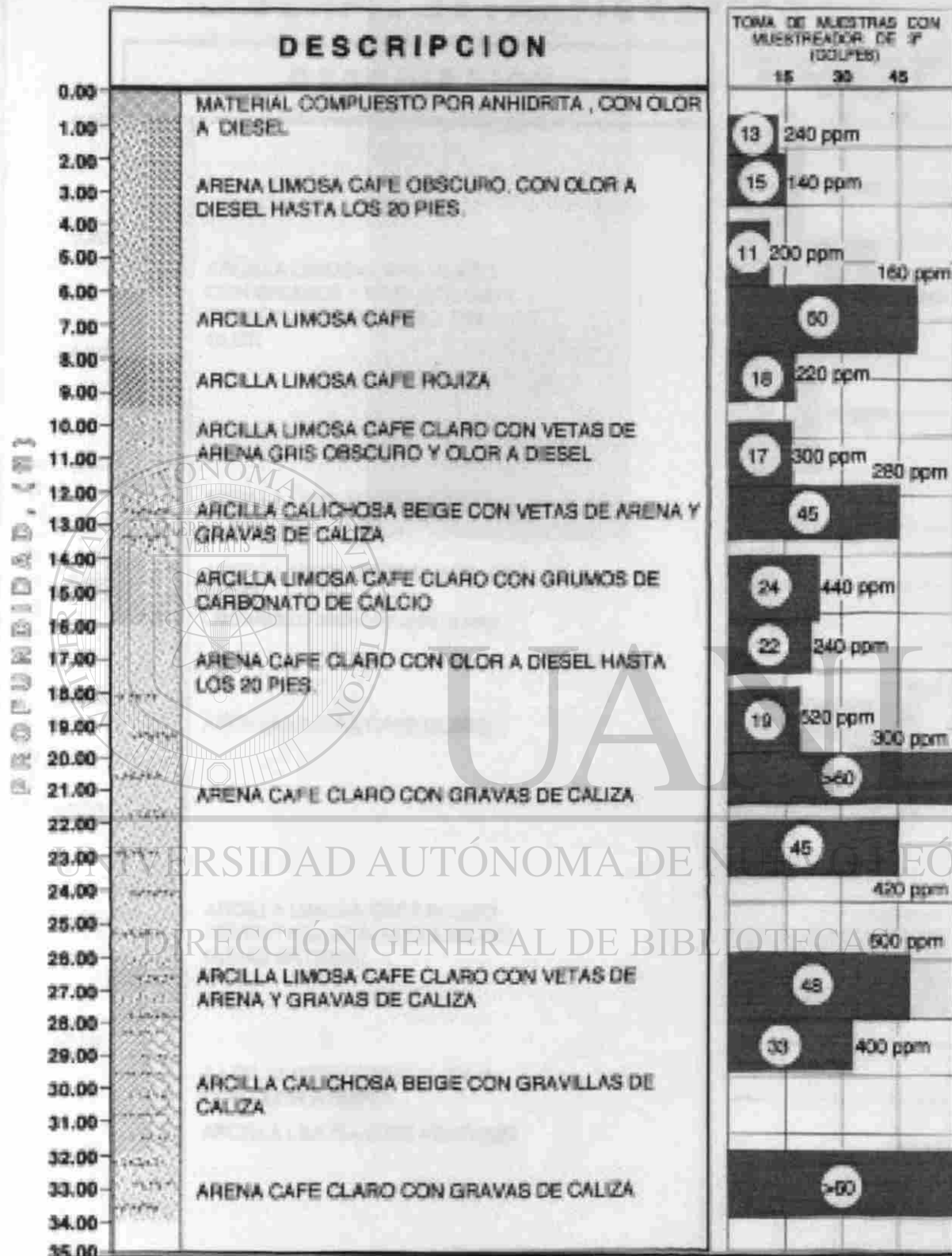
SONDEO AN3







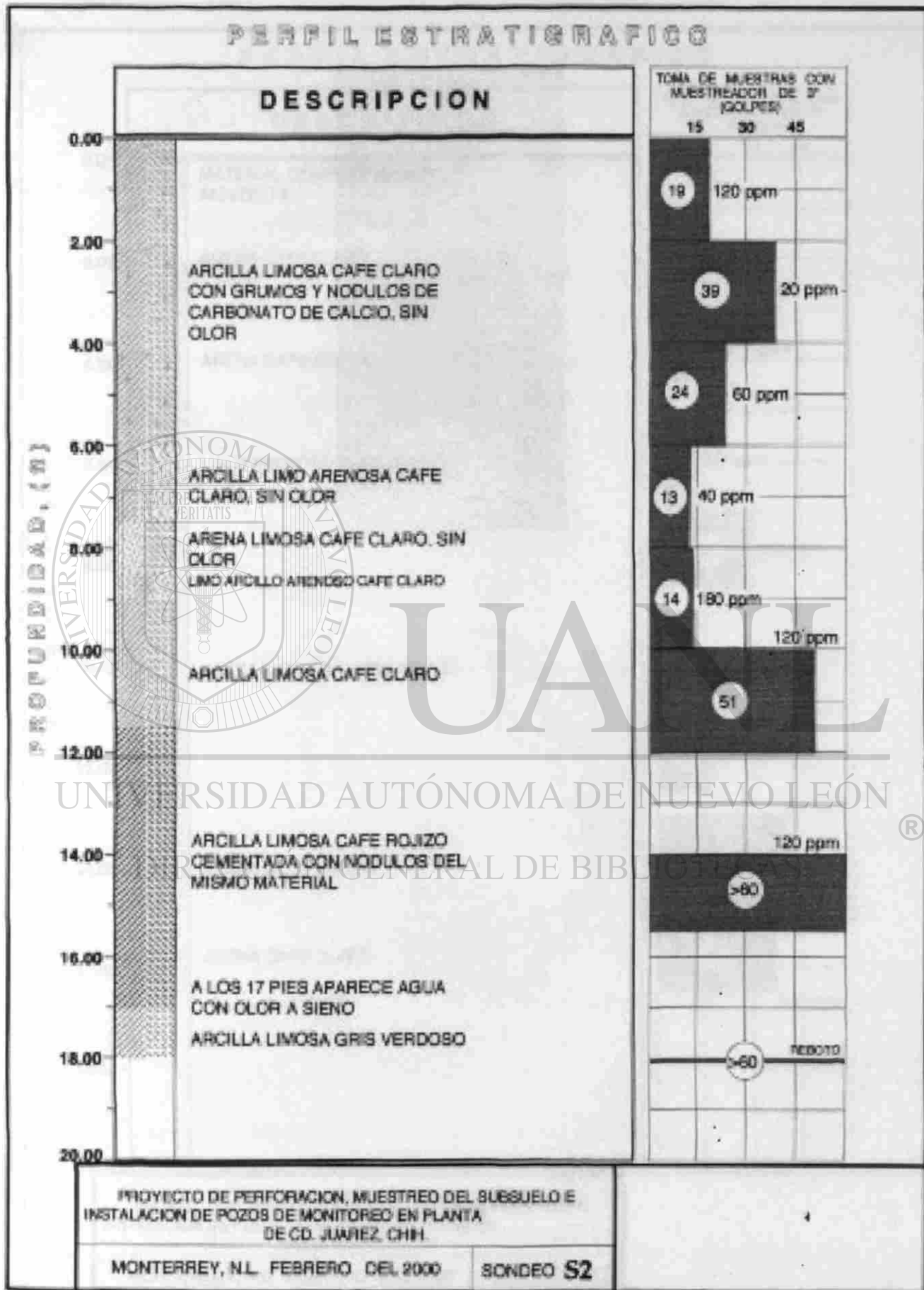
PERFIL ESTRATIGRAFICO

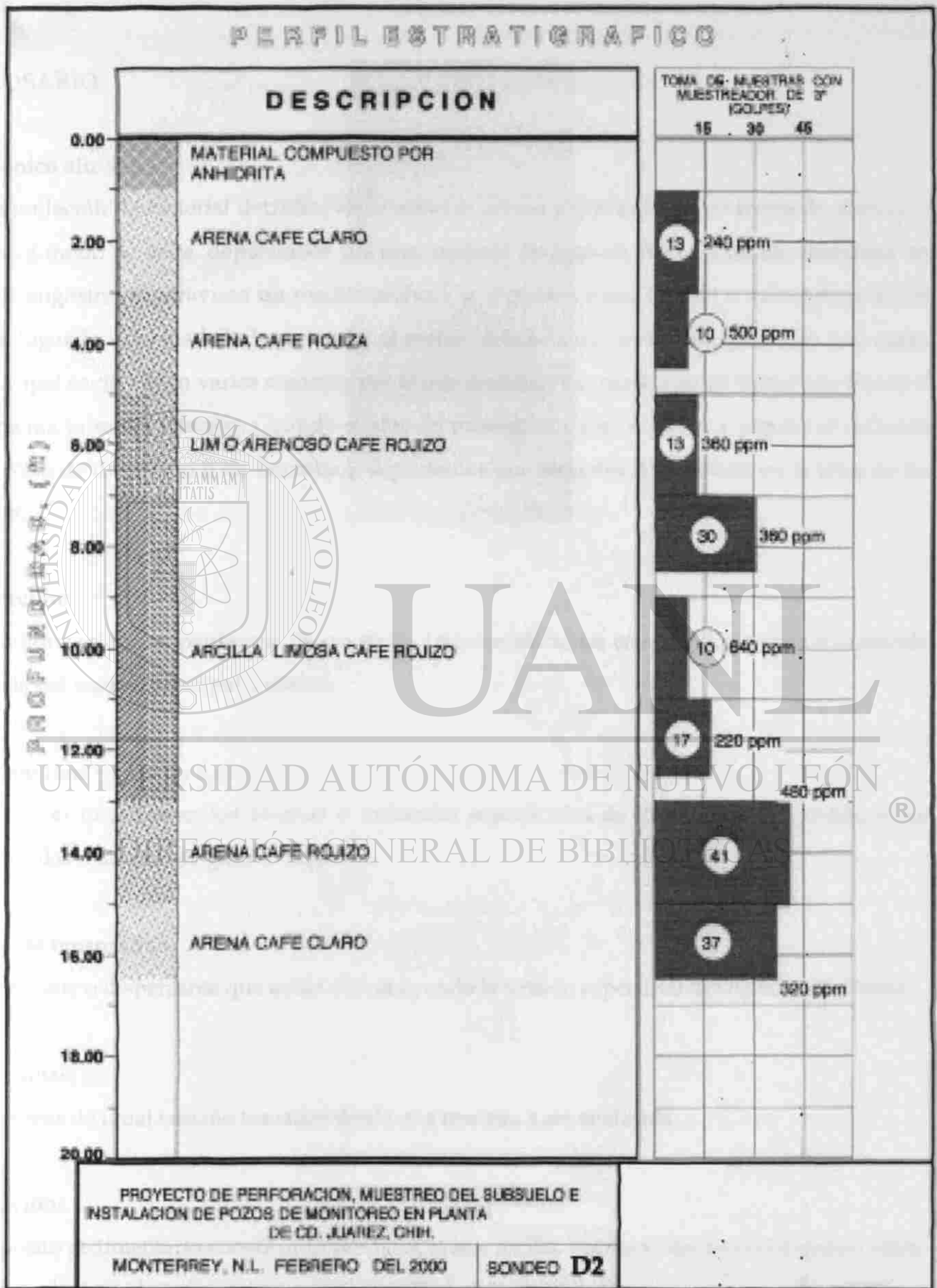


PROYECTO DE PERFORACION, MUESTREO DEL SUBSUELO E INSTALACION DE POZOS DE MONITOREO EN PLANTA DE CD. JUAREZ, CHH.

MONTERREY, N.L. FEBRERO DEL 2000

SONDEO D1





## GLOSARIO

### **Abanico aluvial:**

Acumulación de material detrítico, especialmente arenas y gravas finas, en forma de abanico o cono a modo de delta, depositados por una corriente de agua en el punto donde abandona un valle angosto que atraviesa un macizo montañoso y se abre a una llanura o valle principal. En este lugar la velocidad de la corriente es menor debido a un cambio de gradiente y el curso principal se divide en varios ramales, por lo que disminuye la capacidad de transporte fluvial y aumenta la sedimentación. Cuando el aluvión presenta un mayor grosor y pendiente se habla de cono de deyección o de derrubios, depositados por torrentes de montaña en la boca de un valle.

### **Acreción:**

Añadidos en forma paulatina; dicese de los terrenos alóctonos cuya fábrica rocosa no coincide con la del cuerpo principal o cratón.

### **Adsorción:**

Atracción que ejercen los átomos o moléculas superficiales de los sólidos o líquidos, sobre moléculas o átomos de gases o líquidos.

### **Agente tensoactivo:**

detergente o dispersante que actúa disminuyendo la tensión superficial del líquido disolvente.

### **Alícuotas:**

Muestras de igual tamaño tomadas desde una muestra a ser analizada.

### **Aluvión:**

Depósito sedimentario constituido por limo, arena, arcilla, gravas y otro material grueso suelto que es depositado por corrientes de agua. El aluvión aparece normalmente en cualquier punto

GLOSARIO

en el que la velocidad de las aguas torrenciales se reduce, y con ello la capacidad de transporte de la corriente, hasta que el traslado de sedimentos ya no es posible. Los depósitos aluviales se localizan en las llanuras de inundación de los valles de los ríos, en medio de los deltas y donde los arroyos de montaña descargan en lagos o pasan a fluir por un terreno más llano.

**Anhidrita:**

Sulfato de calcio anhidro, similar al yeso.

**Anticiclones:**

En meteorología es descrito como una zona de alta presión atmosférica rodeada por un sistema de vientos que se mueven en el mismo sentido a las agujas del reloj (en el hemisferio norte). Una zona correspondiente de baja presión, con vientos de sentido contrario se llama ciclón.

**Anticlinales:**

La mayoría de las rocas estratificadas visibles en ríos, canteras o costas eran en su origen sedimentos depositados en capas o lechos horizontales o próximos a la horizontalidad. Sin embargo, cuando hoy los observamos no sólo están solidificados, sino que suelen estar inclinados en una u otra dirección. En ocasiones, cuando los estratos afloran a la superficie se puede ver cómo suben hasta un arco y descienden hacia un seno.

Las rocas se parecen a un montón de manteles arrugados y se dice que muestran pliegues, es decir, que han soportado un proceso de plegamiento. Los pliegues superiores se llaman anticlinales y tienen una cresta y dos ramas inclinadas que descienden hacia senos contiguos, o sinclinales.

**Aroclor 1242:**

Combinación de isómeros de formulación comercial de bifenilos policlorados. También se lo conoce como Cloro Difenilo (42% Cl)

**Bacterias aeróbicas:**

Las bacterias que utilizan oxígeno como su terminal aceptadora de electrones.

**Bacterias anaeróbicas:**

Aquellas que utilizan otros compuestos como nitratos o sulfatos para obtener desde ellos el oxígeno.

**Bacterias autotróficas:**

Aquellas que utilizan carbono inorgánico, como por ejemplo dióxido de carbono, para proveerse del carbono para su crecimiento.

**Bacterias facultativas:**

Aquellas que utilizan tanto oxígeno como otros compuestos como su terminal aceptadora de electrones.

**Bacterias heterotróficas:**

Las que utilizan compuestos orgánicos (hidrocarburos y otros compuestos orgánicos naturales) para proveerse del carbono necesario para su desarrollo.

**Barrenas**

Barra de hierro para sondear terrenos, agujerear rocas, etc.

**Barrial**

Término que alude a un terreno arcilloso o gredoso. Presenta normalmente una estratificación con alternancia de arcillas, turbas y arenas.

**Biodegradación:**

Degradación de la materia orgánica debido a la acción de microorganismos.

**Cabalgamiento:**

En una falla inversa, producida por las fuerzas que comprimen la corteza terrestre, el bloque llamado labio hundido en la falla normal asciende sobre el plano de falla; de esta forma, las



GLOSARIO

rocas de los estratos más antiguos aparecerán colocadas sobre los estratos más recientes, dando lugar así a los cabalgamientos.

**Calcáreas:**

Rocas compuestas fundamentalmente de carbonato de Calcio y conteniendo en menor medida carbonato de Magnesio y otras sales y óxidos. En general son rocas sedimentarias marinas.

**Carcinogénicas:**

Dícese de las sustancias que producen cáncer.

**Celda de alta presión subtropical:**

A los 30° de Latitud Norte coinciden las celdas de Ferrel y de Hadley, para dar lugar a la celda de alta presión subtropical que cruza al estado de Chihuahua. La otra celda de alta presión subtropical se halla a los 30° de Latitud Sur y cruza a Perú, ocasionando al fenómeno del "Niño" cada vez que esta celda tiene anomalías estrechamente relacionadas con las corrientes marinas.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

**Ciclones:**

En meteorología, se le denomina así a la zona de baja presión atmosférica rodeada por un sistema de vientos que se mueven en sentido opuesto a las agujas del reloj (en el hemisferio norte). Una zona correspondiente de alta presión, con vientos de sentido contrario se llama anticiclón.

**Cono de depresión:**

Vórtice generado debido a la extracción del agua por bombeo. En esta zona el agua se encuentra a mayor profundidad que en la zona no afectada por la extracción.

**Contaminante significativo:**

GLOSARIO

**Contaminante** cuya concentración rebasa las concentraciones correspondientes a un cociente de peligro sistémico de 0,1 para sustancias no carcinogénicas y un riesgo de cáncer de  $10^{-6}$  para sustancias carcinogénicas

**Convectivos/Convección:**

Trasmisión del calor en el medio de un fluido, aprovechando el movimiento másico auspiciado por los cambios de densidad originados en el gradiente térmico.

**Cratón:**

Unidad de la corteza terrestre continental que está formada por las rocas más antiguas del planeta. Éstos se encuentran en las zonas centrales de los continentes y son regiones muy estables.

**Cuarcita:**

La cuarcita es una roca dura, de color claro en la que todos los granos de arena de una arenisca se han recristalizado formando una trama de cristales de cuarzo imbricados entre sí.

**Depósitos clásticos:**

Depósitos propios del ambiente costero de playa, compuestos principalmente de arenas y cuarcita

**Depósitos epitermales:**

Depósito hidrotermal formado a menos de 1 km de profundidad y en el intervalo de temperatura de 50 a 200°C, presentándose a menudo en la forma de venas.

**Desorción:**

Liberación de los átomos o moléculas de líquidos o gases adsorbidos por un sólido o líquido.

**Elutriado:**

Solución de enjuague que contiene a los contaminantes.

EVALUACIÓN Y PROPUESTA DE REMEDIACIÓN PARA SUELOS CONTAMINADOS CON METALES  
PES DOS HIDROCARBUROS DE PROCEDENCIA INDUSTRIAL.  
GLOSARIO

**Endémicas:**

Propias de la región, aplicado a especies botánicas.

**Endorréicas:**

Cuencas con drenaje interno.

**Endotérmica:**

Reacción que requiere energía para llevarse a cabo

**Estratificadas:**

Dícese de rocas o formaciones que muestran estructura en capas o estratos.

**Exorreicas:**

Cuencas con drenaje hacia el exterior

**Falladas:**

Falla, en geología, es una línea de fractura a lo largo de la cual una sección de la corteza terrestre se ha desplazado con respecto a otra. El movimiento responsable de la dislocación puede tener dirección vertical, horizontal o una combinación de ambas.

**Feldespatos:**

El más abundante grupo de minerales formadores de rocas y constituyen el 60% de la costra terrestre, de fórmula general  $MAI(AlSi)_3O_8$ , en donde M puede ser K, Na, Ca, Ba, Sr o Fe. Los feldespatos aparecen en casi todo tipo de rocas, se les halla en las rocas de granito mezclado con el cuarzo y las micas. El color de los feldespatos va de blanco a gris y existen también en rosa.

**Fibrilación:**

Contracciones de las fibras musculares de ritmo irregular, alta frecuencia y pequeña amplitud, que no producen una contracción muscular fisiológicamente efectiva.

**Fluorita:**

Mineral compuesto principalmente por fluoruro de calcio.

**Grout:**

Mezcla de agua, cemento-bentonita y arena.

**Hidrocarburos alifáticos:**

Hidrocarburos de cadena lineal.

**Hidrocarburos monoaromáticos:**

Hidrocarburos en cuya cadena se encuentra solamente un grupo bencénico.

**Hidrocarburos poliaromáticos:**

Hidrocarburos que contienen más de un grupo aromático o bencénico.

**Isotermas:**

Líneas imaginarias de igual temperatura

**Isoyetas:**

En Meteorología, son las líneas de igual valor de presión atmosférica, que en grupo o familia dan lugar a diagramas muy semejantes a las cartas de levantamientos topográficos. Los fuertes vientos se originan precisamente cuando dos isoyetas de muy diferente valor se hallan próximas entre sí.

**Lentes:**

Un cuerpo de mineral o de roca que es grueso en el centro y delgado en sus extremos. Son comunes, por ejemplo, las lentes de pedernal en medio de rocas calcáreas, o las lentes de conglomerados en suelos recientes.

EVALUACIÓN Y PROPUESTA DE REMEDIACIÓN PARA SUELOS CONTAMINADOS CON METALES  
PES DOS HIDROCARBUROS DE PROCEDENCIA INDUSTRIAL  
GLOSARIO

**Limite Inferior de Explosividad:**

Mínima concentración de oxígeno necesaria para que se produzca la explosión del combustible

**Liner:**

Capa protectora plástica.

**Microfracturación:**

Pequeñas fracturas dentro de los estratos de roca o suelo que permiten la migración del agua o del vapor desviándolo del curso previsto.

**Oxidación catalítica:**

Oxidación de una sustancia propiciada por la presencia de un catalizador, es decir, de un compuesto que interviene acelerando la rapidez de reacción pero que al final de la misma se encuentra en el mismo estado que cuando ésta se inició

**Peneplaneados:**

Peneplanos, de *pene-* casi *+plain*, plano, una superficie de terreno de extensión considerable, casi plana, sin rasgos topográficos a excepción de algunas ondulaciones suaves. Presumiblemente producida a través de desgaste másico, arrastre superficial y erosión por corrientes de agua, hasta el nivel de la base, en la penúltima etapa de un ciclo pluvial geomórfico; también, tal superficie pudo ser un levantamiento (*uplift*) que formó una altiplano sujeto después a disección.

**Piamonte - Piedemonte:**

Área de pendiente suave que se extiende a los pies de una montaña o cadena, entre las laderas empinadas de la elevación montañosa y la llanura.

**Pluma de contaminantes:**

Zona donde se concentra la mayor parte de la contaminación, ya sea en el aire, en el subsuelo o en el agua superficial o subterránea.

**Potencial Redox (Eh):**

Medida de la actividad electrónica y un indicador relativo de la tendencia de una solución a aceptar o transferir electrones. Este potencial depende del equilibrio iónico entre todos los estados de oxidación posibles de las especies presentes disueltas en un medio.

**Proto-Atlántico:**

El movimiento de las placas tectónicas ha conducido la deriva de los continentes en la dirección al Norte, abriendo el Océano Atlántico a lo largo de los últimos 200 millones de años. En aquél remoto pasado, el rompimiento del supercontinente Pangea dio lugar a cuatro continentes de menor tamaño identificados como América del Norte, América del Sur, África y Europa Occidental, abriéndose un incipiente mar entre las Américas y Europa y África; ese mar es conocido como el Proto-Atlántico.

**Radio de burbuja:**

La mayor distancia desde el pozo de aspersión a la cual la presión de aspersión y el flujo de aire pueden inducirse para biodegradar los contaminantes.

**Radio de Influencia:**

Es una estimación de la máxima distancia desde el pozo de extracción (o inyección) a la cual puede inducirse un flujo de aire suficiente para obtener una rapidez de degradación aceptable.

**Reemplazamientos:**

Cambio de un ion calcio por un ion metálico dentro de la estructura cristalina de la caliza.

**Rizosfera:**

Tierra que rodea las raíces de las plantas.

**Rocas ígneas :**

GLOSARIO

Rocas formadas por el enfriamiento y la solidificación de materia rocosa fundida, conocida como magma. Según las condiciones bajo las que el magma se enfríe, las rocas que resultan pueden tener granulados gruesos o finos. Las rocas ígneas, compuestas casi en su totalidad por minerales silicatos, suelen clasificarse según su contenido de sílice.

**Roca madre:**

Roca sólida e intacta que forma el horizonte R, también D, de un suelo. Sobre la roca madre se suele encontrar el horizonte C, que está formado por los productos resultantes de la meteorización de la misma roca y que está levemente afectado por la actividad biológica. En ocasiones, el horizonte que está sobre la roca madre es el B, que presenta la acumulación de materiales procedentes de los niveles superiores. La alteración de la roca madre es el inicio de la formación del suelo. La roca madre influye en las características del suelo, sobre todo en su estructura y textura. Sin embargo, esta influencia es menor cuanto más evolucionado es el suelo.

**Rocas metamórficas:**

Rocas cuya composición y textura originales han sido alteradas por el calor y la presión existentes en las profundidades de la corteza terrestre. Hay cuatro variedades comunes de rocas metamórficas, las que pueden provenir de rocas sedimentarias o de rocas ígneas, según el grado de metamorfismo que presenten y dependiendo de la temperatura y presión a las que se han visto sometidas. Entre las rocas metamórficas no foliadas, las más comunes son la cuarcita, originada en areniscas, y el mármol que se produce por metamorfosis de calizas en la proximidad de un cuerpo intrusivo.

**Rocas sedimentarias:**

Rocas compuestas por materiales transformados, originadas en la acumulación y consolidación de materia mineral pulverizada, depositada por la acción del agua y, en menor medida, del viento o del hielo glaciar. La mayoría de las rocas sedimentarias se caracterizan por presentar lechos paralelos o discordantes que reflejan cambios en la velocidad de sedimentación o en la naturaleza de la materia depositada.

**Rocas silíceas**

Cualquiera de las distintas rocas sedimentarias en las que el sílice (óxido de silicio) es el constituyente principal. El pedernal es la variedad más común; otras rocas silíceas son la arenisca, el conglomerado de cuarzo, el ópalo, la arcosa y la novaculita.

**Rocas terciarias félsicas:**

En Geología, son rocas pertenecientes al Terciario (menos de 64 m.a.). Conforme a su composición química, las rocas pueden ser ácidas (félsicas) o básicas (máficas) e incluso ultra-básicas (ultra-máficas).

**Taludes:**

De suave pendiente, normalmente entre 2° y 5°.

**Tectonizadas:**

Que presentan deformaciones estructurales geológicas debido a sismos y erupciones volcánicas; en relación con tectonismo.

**Terraza aluvial:**

Superficie más o menos llana y horizontal que constituye parte de la primitiva llanura de inundación de un río que, una vez abandonada, queda realzada al situarse a un nivel más alto, a modo de bancal, según se encaja la corriente fluvial a causa de un rejuvenecimiento del río. Este término no se aplica sólo en función de la forma resultante, sino que también contempla los depósitos de la antigua llanura de inundación. Si se consideran como aluviales tanto los depósitos de gravas y arenas gruesas como los de grano más fino, se pueden hacer coincidir los conceptos de terraza aluvial y terraza fluvial. En amplios valles es frecuente la presencia de varias terrazas dispuestas paralelamente al cauce, que suelen indicar distintos niveles cronosedimentarios.



EVALUACIÓN, Y PROPUESTA DE REMEDIACIÓN PARA SUELOS CONTAMINADOS CON METALES  
PESADOS HIDROCARBUROS DE PROCEDENCIA INDUSTRIAL  
GLOSARIO

**Terrenos alóctonos acrecionados:**

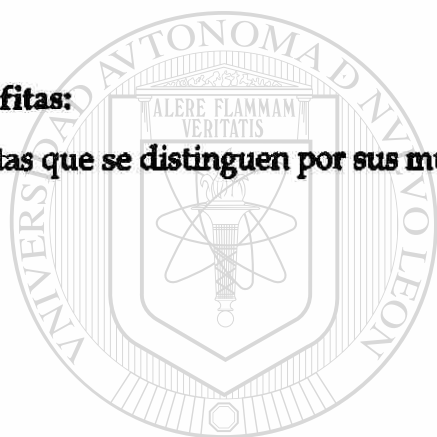
Fragmentos microcontinentales que se añadieron paulatinamente a un cratón durante su desplazamiento

**Topoformas:**

Propiedades de las figuras geométricas. La topología estudia aquellas propiedades de las figuras geométricas del espacio que no varían cuando el espacio se dobla, da la vuelta, estira o deforma de alguna manera. La topología sólo se ocupa de propiedades como la posición relativa y la forma general.

**Xerófitas:**

Plantas que se distinguen por sus muy bajos requerimientos de agua. Plantas de desierto.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

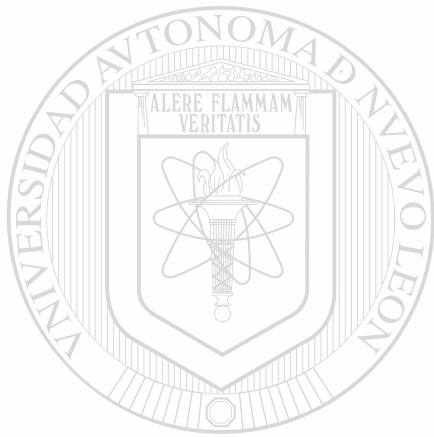
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

**ABREVIATURAS**

AFS	Ácido fluorosilícico
ASTM	<i>American Standard for Testing and Materials</i>
BFA	Bifluoruro de amonio
BTEX	Benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos
DPE	<i>Double-Phase Extraction</i> o extracción en dos fases
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i> o agencia de protección ambiental de estados unidos de américa
HF	Ácido fluorhídrico
HFA	Ácido fluorhídrico anhidro
ITS	<i>Intertek Testing Service</i> , laboratorio ambiental
LGEEPA	Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente
LTTD	<i>Low Temperature Thermal Desorption</i> o desorción térmica a baja temperatura
MFA	Monofluoruro de amonio
MSDS	<i>Material Standard Data Sheets</i> u hojas de seguridad de productos químicos
msnm	Metros sobre el nivel del mar
OD	Oxígeno disuelto
OSHA	<i>Occupational Safety and Health Administration</i> o administración de salud y seguridad ocupacional de Estados Unidos de América
PAH	<i>Petroleum Aromatic Hydrocarbons</i> o Indicador de hidrocarburos aromáticos
PCBs	<i>Polychlorinated Biphenyls</i> o bifenilos policlorados
pH	Potencial hidrógeno
PID	<i>Photo-ionization Detector</i> o detector de fotoionización
PROFEPA	Procuraduría Federal de Protección al Ambiente de México
RBC	<i>Risk Based Concentrations</i> o concentraciones basadas en riesgos
RCRA	<i>Resources Conservation and Recovery Act</i> o acta de recuperación y conservación de recursos de Estados Unidos
RI	Radio de influencia
SINALP	Sistema Nacional de Acreditamiento de Laboratorios de Prueba
SVE	<i>Soil Vapour Extraction</i> o extracción de vapor del suelo

EVALUACIÓN Y PROPUESTA DE REMEDIACIÓN PARA SUELOS CONTAMINADOS POR METALES  
PES HIDROCARBUROS DE PROCEDENCIA INDUSTRIAL  
A REVIATURAS

<b>SVOCs</b>	<i>Semi-Volatile Organic Compounds</i> o compuestos orgánicos semi-volátiles
<b>TEA</b>	<i>Terminal Electron Acceptor</i>
<b>TPH</b>	<i>Total Petroleum Hydrocarbons</i> o hidrocarburos totales de petróleo
<b>VOCs</b>	<i>Volatile Organic Compounds</i> o compuestos orgánicos volátiles



UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



## CITAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1- Center for Biological Processes in Contaminated Soil and Sediment de Dinamarca, 1998. Background.
- 2- Occupational Safety and Health Administration. U.S. Department of Labor, 1999. Hazardous and Toxic Substances.
- 3- Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente. Art. 3
- 4- California Occupational Health Branch , 1996. Understanding Toxic Substances. Hazard Evaluation System & Information Service, 3-7.
- 5- Johnson, B.L., 1995. Impact of Lead-Contaminated Soil in Public Health, 2- 3.
- 6 - Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 1996. Cuaderno Estadístico Municipal. Juárez, Estado de Chihuahua, 3-27.
- 7- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 1998. Anuario Estadístico del Estado de Chihuahua, 3-20
- 8- Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. Gobierno del Estado de Chihuahua, 1992. Historia General de Chihuahua - Geología, Geografía y Arqueología, 14-101
- 9- Occupational Safety & Health Administration. U.S. Department of Labour, 1999. Heavy Metals. Tabla Z-1.
- 10- EPA, Region III, 1998. Expedited Site Assessment Tools for Underground Storage Tank Sites: A Guide for Regulators. Appendix B-1: Table of U.S. EPA Test Methods for Petroleum Hydrocarbons.
- 11- EPA, Region III, 1990. Summary of Existing Methods Type and Status for Stack Sampling and Analysis of Each of 189 Air Toxics Listed in the 1990 Clean Air Act Amendments. Methods 98.
- 12- DeRosa, C.T., Johnson, B.L., Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Public Health Service, Atlanta, Georgia 1997. The Toxicology hazard of Superfund Hazardous Waste Sites, 1-20.
- 13- Smith, R. L., 1993. Selecting Exposure Routes and Contaminants of Concern by Risk-Based Screening - EPA Region III Technical Guidance Manual - Risk Assessment, 1-5.

CITAS BIBLIOGRÁFICAS

- 14- Duchaufour, P., 1975. Manual de Edafología. Anexo
- 15- Emmons, W.H., Allison, I.S., Stauffer, C.R., Thiel, G.A., 1963. Geología: Principios y procesos
- 16- EPA, Region III, Hazardous Site Cleanup Division, 1998. EPA Region III Technical Guidance Manual Risk Assessment. Assessing Dermal Exposure from Soil. RBC. Table 4/15/98.
- 17- EPA, 1997. Ecological Risk Assessment Guidance for Superfund: Process for Designing and Conducting Ecological Risk Assessment, I.1 – 8.2.
- 18- EPA, Region III, Hazardous Site Cleanup Division, 1999. Technical Background Document - EPA Region III Technical Guidance Manual - Risk Assessment, 8-63.
- 19- Gustafson, J.B., Shell Development Company, 1999. Using TPH in Risk-Based Corrective Action, 1-4.
- 20- Occupational Safety and Health Administration. U.S. Department of Labor, 1999. OSHA Record Keeping Guidelines. Appendix C. Selected Illness Which May Result From Exposure in the Work Environment, 1-22.
- 21- Occupational Safety and Health Administration. U.S. Department of Labor, 1998. Chemical Sampling Information, Barium, Soluble Compounds (as Ba), 1-2.
- 22- NIOSH, 2000. NIOSH Criteria Documents. Criteria for a Recommended Standard: Occupational Exposure to Cadmium, 1-4.
- 23- Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 1993. Toxicological Profile for Cadmium, 1-4.
- 24- Occupational Safety and Health Administration. U.S. Department of Labor, 1996. Occupational Safety and Health Guideline for Cobalt Metal, Dust, and Fume (as Co), 1-13.
- 25- Occupational Safety and Health Administration. U.S. Department of Labor, 1996. Occupational Safety and Health Guideline for Chromium (II) Compounds (as Cr), 1-13.
- 26- Occupational Safety and Health Administration. U.S. Department of Labor, 1996. Occupational Safety and Health Guideline for Chromium (III) Compounds (as Cr), 1-14.
- 27- Occupational Safety and Health Administration. U.S. Department of Labor, 1996. Occupational Safety and Health Guideline for Nickel, Soluble Compounds (as Ni), 1-14.
- 28- Occupational Safety and Health Administration. U.S. Department of Labor, 1993. OSHA Technical Links for Lead, 1-4.

CITAS BIBLIOGRAFICAS

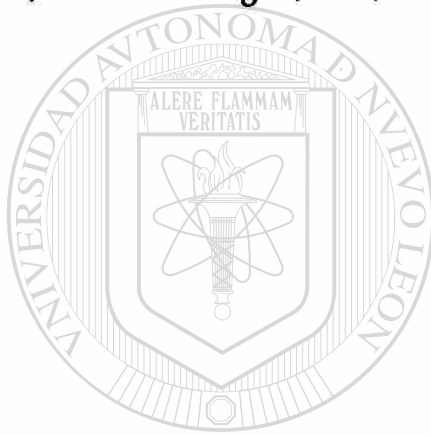
- 29- Occupational Safety and Health Administration. U.S. Department of Labor, 2000. OSHA Regulations for Metallic Lead Compounds and Organic Lead Soaps. Medical Surveillance Guidelines, 1-12.
- 30- US Department of Health and Human Services, Agency for Toxic Substances and Disease Registry, Division of Toxicology, 1993. Toxicological Profile for Arsenic, 1-4.
- 31- EPA, Office of Air Quality, 1998. Arsenic and Compounds, 1-7.
- 32- Occupational Safety and Health Administration. U.S. Department of Labor, 1998. OSHA Regulations for Arsenic. Inorganic Arsenic Substance Information Sheet, 1-2.
- 33- Occupational Safety and Health Administration. U.S. Department of Labor, 1998. OSHA Regulations for Arsenic. Medical Surveillance Guidelines, 1-3.
- 34- Occupational Safety and Health Administration. U.S. Department of Labor, 1978. OSHA Directives. Inorganic Mercury and its Compounds, 1-15.
- 35- U. S. Environmental Protection Agency, Office of Enforcement and Compliance Assurance, 1995. Profile of the Inorganic Chemical Industry, 34-43.
- 36- Occupational Safety and Health Administration. U.S. Department of Labor, 1996. Occupational Safety and Health Guideline for Chlorodiphenyl (42% chlorine), 1-13.
- 37- Occupational Safety and Health Administration. U.S. Department of Labor, 1996. Occupational Safety and Health Guideline for Benzene, 1-12.
- 38- Occupational Safety and Health Administration. U.S. Department of Labor, 1996. Occupational Safety and Health Guideline for Toluene, 1-14.
- 39- Occupational Safety and Health Administration. U.S. Department of Labor, 1996. Occupational Safety and Health Guideline for Xylene, 1-14.
- 40- Occupational Safety and Health Administration. U.S. Department of Labor, 1995. Diesel Exhaust. Hazard Description, 1-2.
- 41- Occupational Safety and Health Administration. U.S. Department of Labor, 2000. OSHA Technical Manual of Petroleum Refining Processes, Section 4, Chapter 2.
- 42- Occupational Safety and Health Administration. U.S. Department of Labor, 1992. Chemical Sampling Information, Anthracene, 1-2.
- 43- Occupational Safety and Health Administration. U.S. Department of Labor, 1992. Chemical Sampling Information, Fluorene, 1.

CITAS BIBLIOGRAFICAS

- 44- U. S. Environmental Protection Agency, 2000. Cleanup Options. Evaluation Applicable Cleanup Alternatives for the Site, 1-9.
- 45- EPA, Office of Underground Storage Tanks, 1995. How to Evaluate Alternative Cleanup Technologies for Underground Storage Tank Sites: A Guide for Corrective Action Plan Reviewers.
- 46- EPA, Office of Underground Storage Tanks, 1995. How to Evaluate Alternative Cleanup Technologies for Underground Storage Tank Sites: A Guide for Corrective Action Plan Reviewers. Chapter 3: Biopiles.
- 47- EPA, Office of Underground Storage Tanks, 1995. How to Evaluate Alternative Cleanup Technologies for Underground Storage Tank Sites: A Guide for Corrective Action Plan Reviewers. Chapter 6: Air Sparging.
- 48- EPA, Office of Underground Storage Tanks, 1995. How to Evaluate Alternative Cleanup Technologies for Underground Storage Tank Sites: A Guide for Corrective Action Plan Reviewers. Chapter 4: Landfarming.
- 49- EPA, Office of Underground Storage Tanks, 1995. How to Evaluate Alternative Cleanup Technologies for Underground Storage Tank Sites: A Guide for Corrective Action Plan Reviewers. Chapter 7: Biosparging.
- 50- EPA, Office of Underground Storage Tanks, 1995. How to Evaluate Alternative Cleanup Technologies for Underground Storage Tank Sites: A Guide for Corrective Action Plan Reviewers. Chapter 2: Bioventing.
- 51- EPA, Office of Underground Storage Tanks, 1996. Guía del ciudadano: Atenuación Natural, abril de 1996, Ficha Tecnológica, 1-4.
- 52- EPA, Office of Underground Storage Tanks, 1995. How to Evaluate Alternative Cleanup Technologies for Underground Storage Tank Sites: A Guide for Corrective Action Plan Reviewers. Chapter 8: Natural Attenuation.
- 53- EPA, Office of Underground Storage Tanks, 1995. How to Evaluate Alternative Cleanup Technologies for Underground Storage Tank Sites: A Guide for Corrective Action Plan Reviewers. Chapter 5: Low-Temperature Thermal Desorption.
- 54- How to Evaluate Alternative Cleanup Technologies for Underground Storage Tank Sites: A Guide for Corrective Action Plan Reviewers. Office of Underground Storage Tanks. EPA, 1995. Chapter 1: Soil Vapor Extraction.

CITAS BIBLIOGRÁFICAS

- 55- EPA, Office of Underground Storage Tanks, 1995. How to Evaluate Alternative Cleanup Technologies for Underground Storage Tank Sites: A Guide for Corrective Action Plan Reviewers. Chapter 10: Dual-Phase Extraction.
- 56- EPA, Office of Environmental and Policy Assistance, Office of Emergency and Remedial Response, 1999. Presumptive Remedy for Metals in Soil Sites, 1-15.
- 57- EPA, Office of Underground Storage Tanks, 1996. Guía del ciudadano: Medidas Fitocorrectivas, abril de 1996, Ficha Tecnológica, EPA, 1-5
- 58- EPA, Office of Underground Storage Tanks, 1996. Guía del ciudadano: El enjuague del suelo in situ, Ficha tecnológica, EPA, 1-6.
- 59- EPA, Office of Underground Storage Tanks, 1996. Guía del ciudadano: El Lavado del Suelo, Ficha Tecnológica, EPA, 1-5



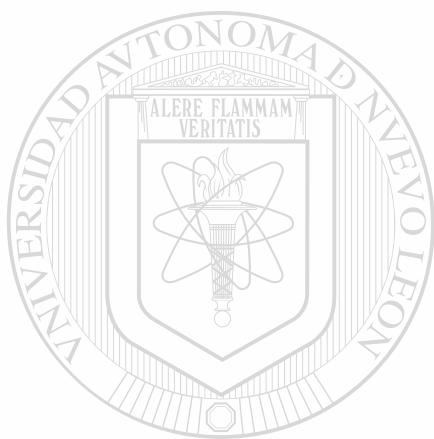
UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS





# UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



