

**Tabla 4.4 Información hidrológica requerida en la evaluación de la calidad del agua.**

Nivel <sup>1</sup>	Ríos	Lagos / Presas	Aguas Subterráneas
<i>Información Básica</i>			
A	Mapa de la cuenca	Régimen térmico	Tipo principal del acuífero
B	Régimen estacional	Mapa del fondo o Batimetría	Mapa del acuífero
C	Estadísticas de flujo	Balance de agua y Patrones de flujo	Características hidrodinámicas
<i>Monitoreo Hidrológico</i>			
A	Nivel al muestreo	Nivel al muestreo	Nivel piezométrico
B	Descarga del río al muestreo	Nivel entre muestras	Nivel entre muestras
C	Descarga continua	Descarga de tributarios	Conocimiento completo de la hidrodinámica

La evaluación combinada de la calidad del agua y de los datos de calidad deben tomar en cuenta las variaciones espaciales y temporales. Los cuerpos de agua tienen rasgos hidrológicos que siguen sus propios patrones de variación, los que pueden ser algo diferentes o en sentidos opuestos a las fluctuaciones de calidad de origen natural o antropogénicas. Afortunadamente, y conforme a la experiencia que así lo demuestra, ellos tienden a ser muy estrechamente vinculados.

Para concluir con este punto, vale la pena remarcar que el criterio o evaluación del nivel de calidad de un acuífero dependerá del uso al que sea

destinada esa agua, así como también de los valores que sean establecidos como limitante en los parámetros utilizados para medir y juzgar dicha calidad.

#### **4.8 Parámetros de evaluación de la calidad del agua**

En las secciones anteriores han sido tratadas las principales variables o parámetros que sirven cuantitativamente en el proceso de evaluación de la calidad del agua. Es obvio que no todas esas variables serán relevantes para todas las situaciones o para todos los usos potenciales del agua. Como una consecuencia lógica, este capítulo se concentrará en el tratamiento de dos temas íntimamente relacionados; usos del agua y selección de sus variables de calidad.

En general, la selección de las variables que han de ser incluidas en una evaluación de calidad del agua debe tomar en cuenta a los objetivos del programa. También por lo general, las evaluaciones pueden ser ubicadas dentro de dos grandes categorías de igual importancia o jerarquía; a) orientadas a los usos del agua o, b) orientadas a medir el impacto sobre su calidad.

##### **4.8.1 Variables Generales**

En esta denominación se hallan todas aquellas variables o parámetros físicos, químicos y bacteriológicos de las aguas. La descripción individual que sigue se hará manteniendo un enfoque generalizado, señalando allí mismo,

para cada variable, las particularidades que tengan aplicación a cada uno de los principales tipos de cuerpos de agua.

Por fines prácticos, las variables generales se dividen en los siguientes grupos: a) Variables Fisicoquímicas, b) Nutrientes, c) Materia Orgánica, d) Iones Mayoritarios, e) Variables Inorgánicas Adicionales, f) Metales g) Contaminantes Orgánicos y h) Indicadores Microbiológicos

#### **4.8.1.1 Contaminantes Orgánicos**

Miles de compuestos orgánicos individuales entran a los cuerpos de agua como resultado de las actividades humanas. Estos compuestos tienen diferentes propiedades físicas, químicas y toxicológicas, lo que hace prácticamente imposible el control de cada compuesto individual, aunque puede seleccionarse a un grupo prioritario de contaminantes sobre la base de su mayor importancia, toxicidad, predominancia, etc. Como ejemplos de tales clases de contaminantes se tienen a los bifenilos policlorinados (PCB's), plaguicidas, fenoles, petróleo y sus productos, etc. Estos compuestos, por cierto, no son controlados universalmente porque se requiere instrumentación sofisticada y personal entrenado a fin de detectarlos y cuantificarlos.

En las determinaciones relacionadas con los contaminantes orgánicos en el agua, deberán incluirse en la lista de variables a los parámetros COT, DQO y DBO. En inspecciones preliminares y de emergencia deberá identificarse el

rango completo de los compuestos orgánicos individuales, lo que requiere de métodos instrumentales sofisticados como cromatografía de gases (CG), cromatografía en fase líquida (CL) y cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (CG / EM). En inspecciones intensivas, las siguientes clases de contaminantes orgánicos deberán ser identificadas: hidrocarburos (incluyendo aromáticos y poliaromáticos), halocarbonos, hidrocarburos clorinados, grupos de plaguicidas, policlorovinilos PCV's, fenoles, ésteres de ftalato, nitrosaminas, nitroaromáticos, haloéteres, derivados de bencidina y dioxinas. El análisis del agua para estos contaminantes orgánicos se hace en muestras no filtradas, excepto para el caso de los plaguicidas organoclorados que se determina en el material participado.

#### **4.8.1.2 Petróleo y sus productos**

El petróleo y sus derivados son responsables de contaminación mayor y daño ecológico en cuerpos de agua dulce. Más de 800 compuestos individuales han sido identificados en el petróleo, entre los que se encuentran los alifáticos de alto y bajo peso molecular, hidrocarburos aromáticos y nafténicos, heterociclos insaturados de alto peso molecular (resinas y asfaltenos) y numerosos compuestos de oxígeno, nitrógeno y azufre.

El petróleo se distribuye en el agua en diferentes formas: disuelto, en película, por emulsión y también en la forma de fracciones absorbidas, con interacciones entre ellas muy diversas y complicadas en naturaleza. Para

complicar más las cosas, simultáneamente ocurren las transformaciones de estos compuestos por procesos bioquímicos, microbiológicos, químicos y fotoquímicos. Debido al alto riesgo ecológico con todas las actividades que acompañan al petróleo, a él se le considera un contaminante de alta prioridad. Para el agua potable la concentración máxima recomendada de este tipo de compuestos oscila de **0.01 a 0.1 mg L<sup>-1</sup>**. Concentraciones de 0.3 mg L<sup>-1</sup> o más, de petróleo crudo, causan efectos tóxicos a los peces. Cuando se utilice el término "productos del petróleo", éste deberá aplicarse solo a la fracción de los hidrocarburos.

El petróleo es oxidado bioquímicamente con facilidad y por ello debe extraérsele desde la muestra de agua inmediatamente después de recolectarla, utilizando para ello tetracloruro de carbono o triclorotrifluoroetano. El extracto puede durar por meses si se guarda en un lugar fresco y oscuro. Los métodos gravimétricos para la determinación de petróleo son los más sencillos, pero no son muy sensibles y dan además resultados erróneos cuando hay pérdidas por evaporación. Los análisis serios para la identificación y determinación de compuestos individuales se realizan utilizando cromatografía de gases acoplado a espectrometría de masas.

#### **4.9 Resumen y Tablas de Consulta**

Para algunas de las variables los límites definidos son diferentes de país a país, dejando un criterio abierto y hasta cierto punto flexible como se muestra en

la tabla 4.5, mientras que el criterio que rige para los lineamientos es el de que ellos establecen el número mínimo de variables que deben ser incluidas en un programa de evaluación. La tabla 4.6 sugiere las variables más apropiadas para ser tomadas en cuenta en el caso de que no existan lineamientos establecidos o existan dudas sobre la aplicación o interpretación de ellos, aunque se deberá ejercer el criterio y sentido común para incluir a otras variables de acuerdo a las condiciones especiales que se relacionen con el uso planeado para el agua. La calidad aceptable del agua también se halla relacionada con la disponibilidad de ella, por lo que sí el agua es escasa, se tendrá que aceptar un nivel menor de calidad y mantener en un mínimo el número de variables que deban ser medida.

**Tabla 4.5 Concentraciones máximas permitidas para algunas variables de calidad del agua para dos usos seleccionados: consumo humano y producción piscícola.**

Uso	Abastecimiento de Agua Potable					Producción Piscícola		
	Variable	OMS <sup>1</sup>	CE	Canadá	EUA	México <sup>2</sup>	CE	Canadá <sup>1</sup>
<i>Variables Generales</i>								
Color (UCV)	15	20*	15	15	15			
SDT (mgL <sup>-1</sup> )	1 000		500	500	1 000			
SST (mgL <sup>-1</sup> )						25	inc. 10 <sup>‡</sup>	
Turbidez (UTN)	5	4 UTJ	5	1 - 5	5			
PH	6.5 - 8.5	6.5 - 8.5	6.5 - 8.5	6.5 - 8.5	6.5 - 8.5	6 - 9	6.5 - 9	
OD (mgL <sup>-1</sup> )						5 - 9	5 - 9.5	
Dureza (mgL <sup>-1</sup> ) <sup>3</sup>	500				500			
N Amoniacal (mgL <sup>-1</sup> )					0.5	0.005-0.025	1.37-2.2 <sup>4</sup>	
NH <sub>3</sub> (mgL <sup>-1</sup> )		0.5				0.04-1.0		
NO <sub>3</sub> -N (mgL <sup>-1</sup> )	10		10	10	10			
Nitratos (mgL <sup>-1</sup> )	10	50						
NO <sub>2</sub> -N (mgL <sup>-1</sup> )			1.0		0.05			

Tabla 4.5 Continuación...

Uso Variable	Abastecimiento de Agua Potable					Producción Piscícola	
	OMS <sup>1</sup>	CE	Canadá	EUA	México <sup>2</sup>	CE	Canadá <sup>1</sup>
Nitritos (mgL <sup>-1</sup> )		0.1				0.01- 0.03	0.06
Fósforo (mgL <sup>-1</sup> )		5.0			0.1 <sup>#</sup>		
DBO (mgL <sup>-1</sup> , O <sub>2</sub> )						3.0-6.0	
Sodio (mgL <sup>-1</sup> )	200	150-175			200		
Cloruro (mgL <sup>-1</sup> )	250	25	250	250	250		
Sulfatos (mgL <sup>-1</sup> )	400	25	500	250	400		
Sulfuro (mgL <sup>-1</sup> )			0.05				
Fluoruro (mgL <sup>-1</sup> )	1.5	1.5 - 0.7 <sup>5</sup>	1.5	2.0	1.5		
Boro (mgL <sup>-1</sup> )		1.0	5.0				
Cianuro (mgL <sup>-1</sup> )	0.1		0.2		0.07		0.005
<i>Elementos Trazas</i>							
Aluminio (mgL <sup>-1</sup> )	0.2	0.2			0.2		0.005-0.1 <sup>6</sup>
Arsénico (mgL <sup>-1</sup> )	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05		0.05
Bario (mgL <sup>-1</sup> )		0.1	1.0	1.0	0.7		
Cadmio (mgL <sup>-1</sup> )	0.005	0.005	0.005	0.01	0.005		0.0002-0.0018 <sup>7</sup>
Cromo <sup>8</sup> (mgL <sup>-1</sup> )	0.05	0.005	0.05	0.05	0.05		0.02-0.002
Cobalto (mgL <sup>-1</sup> )							
Cobre (mgL <sup>-1</sup> )	1.0	0.1	1.0	1.0	2.0	0.005-0.112 <sup>7,9</sup>	0.002-0.004 <sup>7</sup>
Hierro (mgL <sup>-1</sup> )	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3		0.3
Plomo (mgL <sup>-1</sup> )	0.05	0.05	0.05	0.05	0.025		0.001-0.007 <sup>7</sup>
Manganeso (mgL <sup>-1</sup> )	0.1	0.05	0.05	0.05	0.1		
Mercurio (mgL <sup>-1</sup> )	0.001	0.001	0.001	0.002	0.001		0.0001
Níquel (mgL <sup>-1</sup> )		0.05					0.025-0.15 <sup>7</sup>
Selenio (mgL <sup>-1</sup> )	0.01	0.01	0.01	0.01			0.001
Zinc (mgL <sup>-1</sup> )	5.0	0.1-3.0	5.0	5.0	5.0	0.03- 2.0 <sup>7,10</sup>	0.03
<i>Contaminantes Orgánicos</i>							
Petróleo y sus Deriva- dos (mgL <sup>-1</sup> )		0.01					
Plaguicidas Totales (mgL <sup>-1</sup> )		0.5	0.1				
Plaguicidas Indi- viduales <sup>11</sup> (µgL <sup>-1</sup> )		0.1					
Aldrin y Dieldrin (µgL <sup>-1</sup> )	0.03		0.7		0.03		4 ngL <sup>-1</sup> dieldrin
DDT (µgL <sup>-1</sup> )	1.0		3.0		1.0		1 ngL <sup>-1</sup>

Lindano ( $\mu\text{gL}^{-1}$ )	3.0	4.0	0.4	2.0		
Metoxicloro ( $\mu\text{gL}^{-1}$ )	30	100	100	20		
Benceno ( $\mu\text{gL}^{-1}$ )	10		5.0			300
Hexaclorobenceno ( $\mu\text{gL}^{-1}$ )	0.01			0.01		
Pentaclorofenol ( $\mu\text{gL}^{-1}$ )	10					
Fenoles ( $\mu\text{gL}^{-1}$ )		0.5	2.0		0.001	1.0
Detergentes ( $\mu\text{gL}^{-1}$ )		0.2		0.5 <sup>12</sup>		1.0

### Variables Microbiológicas

Coliform. Fecales						
NMP por 100 mL	0	0	0		0	
Coliformes	0 - 3 <sup>13</sup>		10	1	2	
NMP por 100 mL						

---

OMS Organización Mundial de la Salud	NMP Número Mas Probable	7	Dependiendo de la dureza
CE Comunidad Europea	* mg Pt-Co L <sup>-1</sup>	8	Cromo(III) / Cromo(VI)
EUA Estados Unidos de América	‡ Incremento sobre valor fondo	9	Disuelto
UCV Unidades de Color Verdadero	# Fosfatos como PO <sub>4</sub>	10	Zinc total
SDT Sólidos Disueltos Totales	1 Valores recomendados	11	Límite máximo
SST Sólidos Suspendidos Totales	2 Proyecto de Norma, México'94	12	Agentes espumantes
UTN Unidades de Turbidez Nefelométricas	3 Como CaCO <sub>3</sub>	13	Número máximo en muestras de aguas ocasionalmente entubadas
UTJ Unidades de Turbidez de Jackson	4 Amoniaco total		
OD Oxígeno Disuelto	5 Dependiendo de la temperatura		
DBO Demanda Bioquímica de Oxígeno	6 Dependiendo de las especies		

---



**Tabla 4.6 Concentraciones máximas permitidas para algunas variables de calidad del agua en dos usos agrícolas seleccionados: a) riego mediante descargas residuales de origen urbano y b) pecuario o de abrevadero.**

Variable	Usos	
	Riego	Pecuario
<i>Variables generales</i>		
SDT (mgL <sup>-1</sup> )	500	1000
SST (mgL <sup>-1</sup> )	50	
PH	4.5 - 9	
NO <sub>3</sub> -N (mgL <sup>-1</sup> )		90
NO <sub>2</sub> -N (mgL <sup>-1</sup> )		10
Cloruros (mgL <sup>-1</sup> )	147.5	
Sulfatos (mgL <sup>-1</sup> )	130	
Fluoruro (mgL <sup>-1</sup> )	1.0	2.0
Boro (mgL <sup>-1</sup> )	0.7	5.0
Cianuro (mgL <sup>-1</sup> )	0.02	
<i>Elementos trazas</i>		
Aluminio (mgL <sup>-1</sup> )	5.0	5.0
Arsénico (mgL <sup>-1</sup> )	0.1	0.2
Antimonio (mgL <sup>-1</sup> )	0.1	
Cadnio (mgL <sup>-1</sup> )	0.01	0.02
Cromo (mgL <sup>-1</sup> )	1.0	1.0
Berilio (mgL <sup>-1</sup> )		0.1
Cobre (mgL <sup>-1</sup> )	0.20	0.50
Hierro (mgL <sup>-1</sup> )	.5.0	
Plomo (mgL <sup>-1</sup> )	5.0	0.1
Mercurio (mgL <sup>-1</sup> )		0.003
Níquel (mgL <sup>-1</sup> )	0.2	1.0
Selenio (mgL <sup>-1</sup> )	0.02	0.05
Zinc (mgL <sup>-1</sup> )	2.0	50.0
<i>Contaminantes Orgánicos</i>		
Aldrin y Dieldrin (mgL <sup>-1</sup> )	0.02	
DDE (mgL <sup>-1</sup> )	0.04	
Clordano (mgL <sup>-1</sup> )	0.003	
Toxafeno (mgL <sup>-1</sup> )	0.005	
Heptacloro (mgL <sup>-1</sup> )	0.02	
<i>Variables Microbiológicas</i>		
Coliformes fecales		
NMP por 100 mL	1 000	

## CAPITULO 5

### MÉTODOS EXPERIMENTALES

Este capítulo se enfoca a la descripción de los métodos experimentales que se siguieron para todas las determinaciones de campo y de laboratorio, tanto en muestras de agua como de sedimentos. Para fines descriptivos, se divide el capítulo en tres grandes secciones: la primera dedicada a los aspectos geológicos e hidrogeológicos, la segunda a los análisis fisico-químicos y la tercera a los análisis especiales para determinar la presencia de compuestos orgánicos relacionados con el petróleo o sus derivados.

Debe recordarse que el área de estudio se halla bien definida y es el sitio en el que funcionaron las presas de captación de las aguas de desecho provenientes de diversos procesos de la actividad petrolera, las que además se juntaban con las aguas de yacimiento de los pozos productores. Ambos tipos de agua contenían cantidades fluctuantes de una amplia variedad de compuestos orgánicos relacionados con el petróleo. Las aguas recibían tratamientos que permitían la remoción de la mayor parte de esos compuestos orgánicos y luego eran inyectadas a pozos petroleros no productivos, con lo que esas aguas eran puestas lejos de la posibilidad de contaminar al acuífero subterráneo somero de la región.

El servicio prolongado de esas presas de captación, y el posterior descubrimiento de una fractura en el piso de una de ellas, activó este proyecto de investigación con el objetivo de indagar el alcance que tuvieron los compuestos orgánicos en su infiltración hacia el subsuelo. Para esto último se planearon los estudios de análisis (físicoquímicos y de compuestos orgánicos) de las aguas de los 4 pozos testigos, localizados en el área de las presas de captación, de los residuos y sedimentos de las presas, y de tantos pozos de abastecimiento como fuese posible, aprovechando las extracciones hechas por los ganaderos y rancheros cercanos al área.

Los análisis que se consideró como pertinentes de efectuar en las aguas son:

- Análisis físico - químicos de la calidad del agua
- Análisis BTEX
- Análisis de compuestos poliaromáticos
- Análisis de compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles
- Análisis para la determinación de hidrocarburos.

### **5.1 Métodos de los estudios geológicos e hidrogeológicos**

La geología de la región es bien conocida y existen fuentes de información confiables, tanto en México como en los USA. Para este proyecto, debió estudiarse mucha de la información disponible (ya descrita a detalle en el capítulo 3) y luego se procedió a la verificación en el campo.

Los métodos en este renglón fueron:

- Visitas de campo en el área de trabajo, para reconocer e identificar las formaciones rocosas expuestas,
- Excursiones a la región de la Sierra Madre Oriental, a fin de identificar allí las capas rocosas más antiguas (Jurásico Superior a Cretácico) y apreciar su fábrica y plegamientos, afallamientos y grietas conductoras de agua,
- Identificación, en el campo, de las estructuras rocosas que forman potenciales acuíferos subterráneos, para lo cual se aprovecharon los sitios de afloramiento, los cortes hechos para el trazado de caminos y carreteras y los cañones y taludes en la sierra,
- Trabajo de campo, acompañando a un grupo de Geofísicos durante la ejecución de pruebas de resistividad eléctrica del subsuelo, a fin de conocer de primera mano los métodos eléctricos utilizados en la prospección de aguas, y como un auxilio en el entendimiento de la manera en que los estratos del subsuelo se hallan acomodados, así como de su factibilidad para almacenar y conducir agua.

## **5.2 Métodos para los estudios fisicoquímicos de aguas**

### **5.2.1 Medición del pH**

Método: Potenciométrico. Para la medición del pH se puede utilizar el potenciómetro y la prueba de titulación. La ventaja del potenciómetro es que puede utilizarse en el campo, siempre que se encuentre bien calibrado el aparato, a diferencia del método de titulación, en el cual hay que utilizar un indicador y una solución titulante. Todo debe realizarse despacio, para no pasar el punto final de titulación. De todas maneras se recomienda efectuar la medición lo más pronto posible, al tomar la muestra.

Uso del pH: Su valor significa el grado de acidez o alcalinidad del agua.

Significado Sanitario: La acidez del agua es su capacidad cuantitativa para reaccionar con una base fuerte, hasta un pH designado. El pH es la concentración de iones hidrógeno en una solución y para que el agua sea utilizada para consumo humano debe tener un valor entre 6.5 y 8.5.

### **5.2.2 Conductividad eléctrica**

Método: Potenciométrico, se utilizó un conductivímetro Hach. No se hace referencia a ningún otro método para medir la conductividad en el libro de *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (1985).

**Significado Sanitario:** El agua pura es muy pobremente conductora de la electricidad; sin embargo, los iones disueltos en ella pueden conducir mejor la electricidad, pues son partículas cargadas de signo negativo (aniones) y positivo (cationes). Así, la conductividad depende de la presencia de iones y de su concentración total en la solución, por lo que no es conveniente que la medida de conductividad sea alta, ya que esto implica que el agua tiene una mayor cantidad de sales disueltas.

### **5.2.3 Determinación de Turbidez**

**Método:** Turbidimétrico. El método para la determinación de la turbidez se basa en el turbidímetro de Jackson; sin embargo, el valor más bajo de turbidez que puede medirse directamente con este instrumento es de 25 unidades. Como la turbidez del agua tratada suele situarse en un intervalo de 0 a 1 unidades, también se desarrollaron métodos indirectos; por desgracia, ningún aparato puede duplicar los resultados obtenidos para todas las muestras con el turbidímetro de Jackson. Debido a las diferencias fundamentales en el sistema óptico, los resultados obtenidos con distintos tipos de instrumentos secundarios a menudo no concuerdan exactamente, aún cuando los aparatos están previamente calibrados frente al turbidímetro de bujía. Otro método se basa en el turbidímetro Hellige, que consiste en un nefelómetro en una fuente de luz para iluminar la muestra, y uno o más detectores fotoeléctricos con dispositivo

de lectura exterior, para indicar la intensidad de luz dispersada a 90°C de la vía de luz incidente.

Significado Sanitario: La turbidez del agua es producida por materiales en suspensión; como arcilla, cieno o materia orgánica e inorgánica finamente dividida, compuestos orgánicos solubles coloreados, plancton y otros microorganismos.

#### **5.2.4 Determinación de la alcalinidad**

NOM-AA-36-1980 Agua.- Determinación de Acidez Total y Alcalinidad Total. (Esta norma cancela la NOM-AA-36-1976). La presente norma establece los métodos potenciométricos y volumétrico para la determinación de la acidez total y alcalinidad del agua.

Esta norma es aplicable al agua natural, residual y superficial, que tenga una concentración de 0-500 (mg/dm<sup>3</sup>) de acidez o alcalinidad, expresada como carbonatos de calcio. Para mayores concentraciones deben emplearse soluciones valoradas de mayor concentración.

La aplicación de cualquiera de los métodos que se describen en seguida depende del color y turbiedad de la muestra.

**Método:** Valoración (titulación) volumétrica. La acidez o alcalinidad presente en el agua se mide de acuerdo con el potencial de hidrógeno que contenga. La acidez o alcalinidad presente en el agua se mide por titulación, con una solución valorada de un álcali o un ácido, según el caso, y éstas dependen de la concentración de los iones hidróxidos ( $\text{OH}^-$ ), carbonatos ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) y bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ).

- **Método Potenciométrico.** Transferir  $100 \text{ cm}^3$  de muestra a un vaso de precipitados. Introducir los electrodos y la barra magnética en la muestra. Iniciar la agitación y titular con una solución valorada de ácido sulfúrico  $0.02\text{N}$ , tomar lectura hasta obtener un pH de 4.5.

**Nota.** Este método se recomienda para concentraciones de alcalinidad menores de  $10 \text{ mg/dm}^3$ . Una vez que se ha obtenido el pH de 4.5 y anotar ambas lecturas. Debido a que las cantidades de solución titulada son muy pequeñas, se debe usar una microbureta.

**Significado Sanitario.** La alcalinidad de muchos tipos de agua depende principalmente de su contenido en carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos, por lo que suele tomarse como una indicación de la concentración de estos componentes. Los valores determinados pueden incluir la contribución de boratos, fosfatos, silicatos y otras bases, cuando se hallen presentes. La alcalinidad por exceso de concentración de metales alcalinos – térreos tiene importancia para la determinación de la aceptabilidad de un agua para la



irrigación. El agua residual doméstica tiene una alcalinidad menor (o sólo ligeramente mayor) que la del suministro.

### **5.2.5 Determinación de sólidos totales**

Norma oficial mexicana NOM-AA-34-1981. Análisis de agua –Determinación de sólidos (Esta norma cancela a la NOM-AA-34-1976). La presente norma establece los métodos para la determinación del contenido de sólido totales, sólidos totales volátiles, sólidos suspendidos totales, sólidos suspendidos volátiles, sólidos disueltos totales y sólidos disueltos volátiles, en agua natural y residual.

**Método.** Gravimétrico. Los métodos se basan en la evaporación y calcinación de la muestra, en donde los residuos de una y otra operación sirven de base para el cálculo del contenido de sólidos.

**Significado sanitario.** Sólidos son los iones y las partículas disueltos o suspendidos en el agua limpia y en el agua residual. El agua con abundantes sólidos disueltos suele ser de inferior potabilidad y puede inducir una reacción fisiológica desfavorable en el consumidor ocasional. Por esta razón, para el agua potable es deseable un límite de 500 mg/L de sólidos disueltos. Los análisis de sólidos son importantes en el control de procesos de tratamiento biológico y físico de agua residual y para evaluar el cumplimiento de las limitaciones que regulan su vertido.

### 5.2.6 Cloruros

Norma Oficial Mexicana NOM-AA-73-1981, Análisis de agua.- Determinación de cloruros por un método argentométrico, así como el aviso de la declaración de vigencia. Esta Norma Oficial establece el método argentométrico para la determinación de cloruros en el agua, lo cual es aplicable en el agua natural y residual, para un intervalo de valores de concentración de cloruro de 1.5 a 100 mg/L para 100 cm<sup>3</sup> de muestra; un alcance mayor puede lograrse mediante diluciones de la muestra original.

Método: Argentométrico (Valoración volumétrica basada en solución de plata). La determinación argentométrica de los cloruros se basa en la formación de cromato de plata de color rojizo; esto ocurre cuando se adicionan al agua iones cromato como indicador, y iones de plata como reactivo precipitante. Titulando con una solución valorada de nitrato de plata se determina la cantidad necesaria para precipitar todos los cloruros como cloruros de plata, e inmediatamente se observa la formación de cromatos de plata de color rojizo y en ese momento se anota el volumen de solución de nitrato de plata utilizado y se calcula la concentración de cloruros existentes en el agua.

Significado Sanitario. Una concentración elevada de cloruro puede dañar las conducciones y estructuras metálicas y perjudicar el crecimiento vegetal. Causa trastornos en el sistema digestivo.

### 5.2.7 Sulfatos

Norma Oficial Mexicana NOM-AA-74-1981, análisis de agua para la determinación del ion sulfato, así como el aviso de la declaratoria de vigencia. Aplicable para la determinación del ion sulfato en agua natural y residual, con un ámbito de aplicabilidad de 10 a 100 mg/L para el método gravimétrico; en este método puede ampliarse el ámbito ajustando la cantidad de la muestra, y en el caso de concentraciones de 10 a 60 mg/L puede utilizarse el método turbidimétrico que se aplica cuando se requiere una determinación rápida de rutina o control de agua para la industria. (Ambos métodos expresados como  $(\text{SO}_4^{2-})$ ).

#### Métodos:

- Método Gravimétrico

El ion sulfato se precipita y se pesa como sulfato de bario después de eliminar la sílice y materia insoluble.

- Método Turbidimétrico.

El ion sulfato precipita con cloruro de bario en un medio ácido (HCl), formando cristales de sulfato de bario de tamaño uniforme. La absorción espectral de la suspensión del sulfato de bario se mide con un nefelómetro, o fotómetro de transmisión, y la concentración de ion sulfato se determina por comparación de la lectura con una curva patrón.

Significado Sanitario. La concentración de sulfatos en el agua puede indicar indirectamente la concentración o presencia de sales de algún metal no deseado, lo cual ocasionaría trastornos en el sistema digestivo de la población.

### **5.3 Determinación de metales por espectrometría**

Los requisitos para determinar la presencia de metales, por espectrometría de absorción atómica, varían con el metal y/o con la concentración que se determina, por lo que el método se presenta en dos principales modalidades; absorción y emisión de llama.

#### **5.3.1 Determinación de metales por espectrometría de absorción atómica**

Este método analítico abarca las siguientes determinaciones:

- Determinación de antimonio, bismuto, cadmio, calcio, cesio, cromo, cobalto, cobre, oro, iridio, hierro, plomo, litio, manganeso, níquel, paladio, platino, potasio, rodio, rutenio, plata, sodio, estroncio, talio, estaño y zinc, por aspiración directa en una llama de aire-acetileno.
- Determinación de bajas concentraciones de cadmio, cromo, cobalto, cobre, hierro, plomo, manganeso, níquel, plata y zinc por quelación con pirrolidin-ditiocarbamato de amonio (PDCA), extracción con metil isobutil cetona (MIBC) y aspiración en llama de aire-acetileno.

- Determinación de aluminio, bario, berilio, molibdeno, osmio, renio, silicio, torio, titanio y vanadio por aspiración directa en llama de óxido nitroso-acetileno, y
- Determinación de bajas concentraciones de aluminio y berilio por quelación con 8-hidroxiquinoleína, extracción con MIBC y aspiración en una llama de óxido nitroso-acetileno.

### **5.3.1.1 Principios de la determinación de metales por espectrometría de absorción atómica de llama**

Principios. La espectrometría de absorción atómica se parece a la fotometría de llama de emisión, en que la muestra es aspirada en una llama y atomizada. La principal diferencia consiste en que en la fotometría de llama se mide la cantidad de luz emitida, mientras que en la espectrometría de absorción atómica se dirige un rayo luminoso a través de una llama a un monocromador y sobre un detector que mide la cantidad de luz absorbida por el elemento atomizado en la llama. Para determinados metales, la absorción atómica presenta una sensibilidad superior a la emisión de llama. Como cada metal tiene su propia longitud de onda de absorción característica, se utiliza como fuente luminosa una lámpara compuesta de dicho elemento; esto proporciona un método relativamente libre de interferencias espectrales o de radiación. La cantidad de energía absorbida en la llama a una longitud de onda característica es proporcional a la concentración del elemento en la muestra en un intervalo

de concentraciones limitado. La mayor parte de los instrumentos de absorción atómica están equipados para funcionar también en la forma de emisión.

**Tabla 5.1 Intervalos de concentración para óptima aplicabilidad de la absorción atómica con aspiración directa.**

Elemento	Longitud de Onda <i>nm</i>	Gases de la llama	Limite de detección del instrumento mg/L	Sensibilidad mg/L	Intervalo óptimo de concentraciones mg/L
Ag	328.1	A-Ac	0.01	0.06	0.1-4
Al	309.3	N-Ac	0.1	1	5-100
Au	242.8	A-Ac	0.01	0.25	0.5-20
Ba	553.6	N-Ac	0.03	0.4	1-20
Be	234.9	N-Ac	0.005		0.05-2
Bi	223.1	A-Ac	0.06	0.03	1-50
Ca	422.7	A-Ac	0.003	0.4	0.2-20
Cd	228.8	A-Ac	0.002	0.08	0.05-2
Co	240.7	A-Ac	0.03	0.025	0.5-10
Cr	357.9	A-Ac	0.02	0.2	0.2-10
Cs	852.1	A-Ac	0.02	0.1	0.5-15
Cu	324.7	A-Ac	0.01	0.3	0.2-10
Fe	248.3	A-Ac	0.02	0.1	0.3-10
Ir	264.0	A-Ac	0.6	0.12	—
K	766.5	A-Ac	0.005	8	0.1-2
Li	670.8	A-Ac	0.002	0.04	0.1-2
Mg	285.2	A-Ac	0.0005	0.04	0.02-2
Mn	279.5	A-Ac	0.01	0.007	0.1-10
Mo	313.3	N-Ac	0.1	0.05	1-20
Na	589.0	A-Ac	0.002	0.5	0.03-1

Ni	232.0	A-Ac	0.02	0.015	0.3-10
Os	290.9	N-Ac	0.08	1	---
Pb	283.3	A-Ac	0.05	0.5	1-20
Pt	265.9	A-Ac	0.1	2	5-75
Rh	343.5	A-Ac	0.5	0.3	---
Ru	349.9	A-Ac	0.07	0.5	---
Sb	217.6	A-Ac	0.07	0.5	1-40
Si	251.6	N-Ac	0.3	2	5-150
Sn	224.6	A-Ac	0.8	4	10-200
Sr	460.7	A-Ac	0.03	0.15	0.3-5
Ti	365.3	N-Ac	0.3	2	5-100
V	318.4	N-Ac	0.2	1.5	2-100
Zn	213.9	A-Ac	0.005	0.02	0.05-2

\* A-Ac = aire –acetileno, N-Ac = óxido nitroso – acetileno.

+ La longitud de onda de 217.0 nm más sensible se recomienda para instrumentos con capacidades de corrección de fondo

**Tabla 5.2 Datos de precisión y sesgo interlaboratorio para métodos de absorción atómica. aspiración directa y metales extraídos**

Metal	Conc. Mg/L	$\sigma_{std}$ mg/L	$\sigma_{std}$ relativa %	No. De Laboratorios participantes	Test CC mg/L	Nivel aceptabl e mg/L
<i>Determinación directa:</i>						
Aluminio <sup>1</sup>	4.50	0.23	5.1	15	5.00	4.3-5.7
Berilio <sup>1</sup>	0.46	0.012	2.6	10	0.50	0.46- 0.54
Calcio <sup>1</sup>	5.00	0.05	1.0	8	5.00	4.8-5.2
Cobalto <sup>1</sup>	4.00	0.21	5.3	14	4.00	3.4-4.6

Cobre <sup>1</sup>	4.00	0.115	2.9	15	4.00	3.7-4.3
Cromo <sup>1</sup>	7.00	0.69	9.9	9	5.00	3.3-6.7
Estaño <sup>4</sup>	20.0	0.5	2.5	—	20.0	18.5- 21.5
Estroncio <sup>1</sup>	1.00	0.04	4.0	12	1.00	0.87- 1.13
Hierro <sup>1</sup>	5.00	0.19	3.8	16	5.00	4.4-5.6
Magnesio <sup>1</sup>	1.00	0.009	0.9	8	1.00	0.97- 1.03
Molibdeno <sup>4</sup>	7.5	0.07	0.9	—	10.0	9.7-10.3
Níquel <sup>4</sup>	5.00	0.04	0.8	—	5.00	4.9-5.1
Plata <sup>1</sup>	2.00	0.25	12.5	10	2.00	1.2-2.8
Potasio <sup>4</sup>	1.6	0.2	12.5	—	1.6	1.0-2.2
Titanio <sup>4</sup>	50.0	0.4	0.8	—	50.0	48.8- 51.2
Vanadio	50.0	0.2	0.4	—	50.0	49.4- 50.6

*Determinación del*

*extracto:*

Aluminio <sup>1</sup>	300	12	4.0	15	300	264-336
Cobalto <sup>1</sup>	300	20	6.7	6	300	220-380
Cobre <sup>1</sup>	100	21	21	8	100	22-178
Hierro <sup>1</sup>	250	12	4.8	4	250	180-320



Manganeso <sup>1</sup>	21.5	202	10.2	8	25	17-23
Molibdeno <sup>1</sup>	9.5	1.0	10.5	5	10	5.5-14.5
Níquel <sup>1</sup>	56.8	9.2	16.2	14	50	22-78
Plata <sup>1</sup>	5.2	1.2	23.1	7	5.0	0.5-9.5

---

Fuente: American Society for testing and materials 1986. Volumen anual de Estandares ASTM. Volumen 11.01. Agua y tecnología ambiental. American Soc. Testing & Materials. Filadelfia, Pennsylvania. Copyright ASTM.

### **5.3.2 Determinación de Metales por Espectroscopía de Emisión de Plasma.**

Solo algunas palabras acerca de esta versión analítica de la espectrometría. La Espectroscopía de emisión, que utiliza plasma de acoplamiento inductivo (PAI), se desarrolló a mediados de los años sesenta (Greenfield, S. I. L. Jones & C. T. Berry, 1964; Wendt, R. H. & V. A. Fassel, 1965) como un método rápido, sensible y conveniente para la determinación de metales en muestras de aguas limpias y residuales (U.S. Environment Protection Agency, 1983; Gabarino, J. R. & H. E. Taylor, 1985) Los metales disueltos se determinan en muestras filtradas y aciduladas. Los metales totales se determinan tras una apropiada digestión. Debe tenerse cuidado en eliminar las interferencias potenciales, especialmente cuando los sólidos disueltos sobrepasan los 1.500 mg/L.

### **5.4 Métodos de análisis para los compuestos orgánicos**

Previo al análisis propiamente dicho, las muestras de agua y de sedimentos deben primero ser sometidas a una extracción líquido-líquido (en un aparato Soxhlet) utilizando como solvente diclorodifluorometano, de tal manera que los hidrocarburos sean extraídos hacia la fase orgánica del diclorodifluorometano.

Para una determinación cuantitativa del contenido global de aceites, grasas y otras sustancias orgánicas en el agua, el solvente orgánico es dejado evaporar y el residuo es entonces pesado. El reporte del contenido de estas sustancias es dado en masa por unidad de masa o de volumen de agua en que estaban contenidos.

Para el análisis que incluye la identificación y cuantificación de cada especie orgánica contenida en el agua (por ejemplo benceno, xilenos, tolueno, etilbenceno, etc.), el residuo de la extracción es re-disuelto en diclorodifluorometano y luego es inyectado a un cromatógrafo de gases acoplado a un espectrómetro de masas.

El método de cuantificación e identificación de BTEX, volátiles e hidrocarburos presentes en las aguas y residuos de las presas de captación, fue el mismo que se explicó en el párrafo anterior. La ejecución requiere que previamente se preparen estándares de cada especie a determinar.

## CAPITULO 6

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El posible desarrollo de una pluma de contaminación en un acuífero subterráneo, por infiltración desde pilas que contienen aguas de yacimiento, solo puede determinarse a partir de los resultados de muchos análisis fisicoquímicos hechos a las aguas subterráneas. El objetivo central de este estudio es precisamente determinar si en efecto se desarrolló una pluma de contaminación y explicar los posibles mecanismos que apoyaron su desarrollo. Vale la pena recordar que las pilas de captación almacenaron aguas de yacimiento a menudo mezcladas con aguas de desecho de diversos procesos y operaciones de la industria del petróleo. En su conjunto, esas aguas son de una naturaleza salina y además es común que contengan una variedad de compuestos orgánicos en suspensión.

Las especies indicadoras de contaminación del acuífero subterráneo pueden ser especies iónicas y compuestos orgánicos, resultando obvio que para el caso de la actividad petrolera la atención se enfoca sobre los compuestos orgánicos. En este capítulo se reportan los resultados de todas las mediciones experimentales de campo y de laboratorio efectuadas para esta investigación, en las que se incluyen los análisis hechos al agua subterránea de un pozo testigo y a los sedimentos de las seis diferentes presas de captación. Para todos los casos se ha

tratado en lo posible de acompañar con una discusión en la que se haga referencia al material presentado en los capítulos anteriores.

## **6.1 Resultados de todos los análisis efectuados a las aguas del pozo testigo No. 3**

### **6.1.1 Parámetros físicos y especies iónicas de las aguas del pozo testigo**

Es necesario tener un marco de referencia, aparte de cualquier normatividad, cuando se efectúa un estudio fisicoquímico de aguas, sobre todo si se desea evaluar un posible impacto por infiltración de sustancias ajenas (como sería el caso de hidrocarburos relacionados con el petróleo) o, en el mejor de los casos, especies iónicas adicionales a las que existen en la localidad (como sería el caso de un aumento en la salinidad). Para este proyecto se investigaron los antecedentes sobre estudios de calidad de aguas que se hubiesen efectuado en el área de interés de este proyecto, o en su cercanía, y esos datos sirvieron como referencia para fines de comparación en el caso de los parámetros físicos y de especies iónicas.

Al respecto, se encontraron los datos reportados por la SARH para 7 pozos distribuidos en varios ranchos aledaños al área de estudio y apenas a unos cientos de metros de distancia. La tabla 3.2, ya discutida antes, reporta los datos principales sobre localización, tipo de acuífero, algunos rasgos geológicos e hidrométricos y dos parámetros de calidad, junto con una escueta indicación

acerca del factible uso para las aguas estudiadas. Desde esos datos es posible deducir que las aguas subterráneas de la región tienen un alto contenido de sólidos disueltos (1,728 a 3,392 mg/L), es decir, son salinas y ello explica los valores altos de conductividad (2,900 a 5,300  $\mu$ mhos/cm).

Para este proyecto se utilizó el pozo testigo No. 3, por cierto el único operable en el sitio de la batería de pilas de captación, pues los otros se hallaron ya obstruidos y requieren de reparación. Aprovechando la disponibilidad del apoyo de laboratorios de PEMEX, el 3 de Marzo de 1999 se efectuaron los análisis fisicoquímicos de esas aguas subterráneas. La tabla 6.1 resume los resultados de campo y laboratorio.

**Tabla 6.1 Resultados de los análisis fisicoquímicos efectuados a las aguas del pozo testigo No. 3.**

Parámetro	Método	Unidades	Resultado
PH	NMX-AA-08	Unidades de pH	7.01
Conductividad	NMX-AA-93	mmhos/cm	1923.5
Turbidez	NMX-AA-38	NTU	270.0
Sólidos dis. Totales	NMX-AA-34	mg/L	1434.0
Sodio	Std. Methods 3111	mg/L	184.0
Potasio	Std. Methods 3120	mg/L	18.4
Calcio	Std. Methods 3111	mg/L	192.0
Magnesio	Std. Methods 3111	mg/L	33.5
Alcalinidad (CO <sub>3</sub> )	NMX-AA-36	mg/L	0.0
Alcalinidad (HCO <sub>3</sub> )	NMX-AA-36	mg/L	140.0
Cloruros	NMX-AA-73	mg/L	629.6
Sulfatos	NMX-AA-74	mg/L	141.1
RAS	NMX-AA-89/2-1992	Adimensional	3.22
Boro	Std. Methods 3120	mg/L	0.86

Los valores de conductividad y de concentración de sólidos disueltos totales indican que la infiltración de agua desde las presas de captación no tuvo un efecto cuantificable sobre el acuífero subterráneo, al menos desde el punto de vista de las especies iónicas, sólidos disueltos y conductividad. Las aguas subterráneas son de una calidad semejante a las ya reportadas en la tabla 3.2 e incluso se encontró que la de este trabajo es ligeramente menos salina que las otras.

Desafortunadamente se dificultó (hasta hacerse imposible) el acceso a los pozos de los ranchos aledaños al área de estudio, por ello no fue posible obtener valores actuales sobre la calidad de sus aguas. Vale la pena señalar que los reportes de la SARH datan de hace más de 20 años y, aunque las características del agua subterránea cambian muy lentamente con el tiempo, desde el punto de vista de los parámetros físicos y especies iónicas los resultados de este trabajo son la mejor y más reciente información que se tiene acerca de la calidad de las aguas subterráneas de la región.

### **6.1.2 Compuestos BTEX en las aguas del pozo testigo**

Considerada ésta como una prueba indicativa de contaminación con compuestos orgánicos relacionados con la actividad petrolera, la muestra compuesta de agua subterránea del pozo testigo fue tratada a partir del 4 de Marzo de 1999, aprovechando la disponibilidad de laboratorios apropiados en PEMEX. La determinación de compuestos BTEX incluye al benceno, tolueno,

etilbenceno y xilenos, como se vio en el capítulo 1. La tabla 6.2 muestra los resultados arrojados por esta prueba.

**Tabla 6.2 Resultados del análisis de compuestos BTEX en las aguas del pozo testigo.**

	Análisis BTEX, Método: EPA-8260			
	Benceno mg/L	Tolueno mg/L	Etilbenceno mg/L	Xilenos mg/L
Resultados	0.11	< 0.02	< 0.02	0.24
Curva de estandarización:	0.02 0.30	- 0.02 0.30	- 0.02 - 0.30	0.02 - 0.8
Máximo permisible (tomado como "petróleo o sus derivados" según la Unión Europea):	0.01	0.01	0.01	0.01

Para el caso de tolueno y etilbenceno la prueba fue negativa, como lo muestran las columnas centrales de la tabla 6.2, señalando que ellos no están presentes en el agua o, en el peor de los casos, que sus concentraciones se hallan por debajo de la concentración más baja del estándar de calibración. Sin embargo, la concentración de benceno y de los isómeros de xileno, reportadas como 0.11 y 0.24 mg/L respectivamente, viene a ser la primera prueba fehaciente de que la infiltración desde las pilas de captación ha alcanzado la zona saturada del acuífero subterráneo. Otras pruebas debieron ser efectuadas a fin de conocer la extensión total de las variables orgánicas en el agua del pozo testigo y ellas son descritas en las subsecciones siguientes.

### 6.1.3 Compuestos hidrocarburos poliaromáticos (PAH) en las aguas del pozo testigo

Un total de 16 (dieciséis) compuestos forman parte del grupo de los poliaromáticos. La tabla 6.3 muestra los resultados de los análisis. En todos los casos la concentración presente es menor a la del estándar de más baja concentración (0.01 mg/L), pudiéndose así interpretar que todos ellos no fueron detectados o no se hallan presentes en las aguas del pozo testigo.

**Tabla 6.3 Resultados de la determinación de hidrocarburos poliaromáticos (PAH) en las aguas del pozo testigo.**

Compuesto	Método	Unidades	Valores de los estándares	Resultados*
Naftaleno	EPA 8270	mg/L	0.01 - 0.05	< 0.01
Acenaftileno	EPA 8270	mg/L	0.01 - 0.05	< 0.01
Acenafteno	EPA 8270	mg/L	0.01 - 0.05	< 0.01
Fluoreno	EPA 8270	mg/L	0.01 - 0.05	< 0.01
Fenantreno	EPA 8270	mg/L	0.01 - 0.05	< 0.01
Antraceno	EPA 8270	mg/L	0.01 - 0.05	< 0.01
Fluoranteno	EPA 8270	mg/L	0.01 - 0.05	< 0.01
Pireno	EPA 8270	mg/L	0.01 - 0.05	< 0.01
Criseno	EPA 8270	mg/L	0.01 - 0.05	< 0.01
Benzo (a) Antraceno	EPA 8270	mg/L	0.01 - 0.05	< 0.01
Benzo(a) Fluoranteno	EPA 8270	mg/L	0.01 - 0.05	< 0.01
Benzo(b) Fluoranteno	EPA 8270	mg/L	0.01 - 0.05	< 0.01
Benzo(k) Fluoranteno	EPA 8270	mg/L	0.01 - 0.05	< 0.01
Indeno (1,2,3,-cd) Pireno	EPA 8270	mg/L	0.01 - 0.05	< 0.01
Dibenzo (a,h) Antraceno	EPA 8270	mg/L	0.01 - 0.05	< 0.01
Benzo (g,h,i) Pireno	EPA 8270	mg/L	0.01 - 0.05	< 0.01

\* El máximo permisible es 0.01 mg/L, para petróleo y sus derivados, según la Unión Europea



#### 6.1.4 Compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles en las aguas del pozo testigo.

Existen 44 (cuarenticuatro) compuestos orgánicos derivados del petróleo o de la industria petrolera dentro de la categoría de volátiles y semivolátiles cuya determinación es inevitable. La tabla 6.4, Parte 1 y Parte 2, muestra los resultados de este análisis cuantitativo en donde llama la atención que solo el benceno produjo un valor superior al límite inferior del estándar con 0.11 mg/L. De nuevo debe interpretarse que las concentraciones de los restantes 43 compuestos reportados no fueron detectables o no se hallan presentes.

**Tabla 6.4 Resultados de la determinación de compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles en las aguas del pozo testigo.**

Compuesto	Método	Concentración máxima del estándar de calibración, mg/L	Resultado mg/L
Acrilonitrilo	EPA-8260	5.0	< 0.300
Clordano	EPA-8270	0.03	< 0.030
o-Cresol	EPA-8270	200.0	< 0.020
m-Cresol	EPA-8270	200.0	< 0.020
p-Cresol	EPA-8270	200.0	< 0.020
Ácido 2,4-dicloro-Fenoxiacético	EPA-8270	10.0	< 0.200
2,4-dinitrotolueno	EPA-8270	0.13	< 0.020
Endrin	EPA-8270	0.02	< 0.020
Heptacloro (y su epóxido)	EPA-8270	0.008	< 0.008
Hexacloroetano	EPA-8270	3.0	< 0.020
Lindano	EPA-8270	0.4	< 0.020

... Continuación de la Tabla 6.4

Compuesto	Método	Concentración máxima del estándar de calibración, mg/L	Resultado mg/L
Metoxicloro	EPA-8270	10.0	< 0.020
Nitrobenceno	EPA-8270	2.0	< 0.020
Pentaclorofenol	EPA-8270	100.0	< 0.020
2,3,4,6-tetracloro- fenol	EPA-8270	1.5	< 0.020
Toxafeno	EPA-8270	0.5	< 0.500
2,4,5-triclorofenol	EPA-8270	400.0	< 0.020
2,4,6-triclorofenol	EPA-8270	2.0	< 0.020
Ácido 2,4,5-tricloro Fenoxipropiónico	EPA-8270	1.0	< 0.200
Benceno	EPA-8260	0.5	0.11
Eter 2-cloroetílico	EPA-8270	0.05	< 0.040
Clorobenceno	EPA-8260	100.0	< 0.040
Cloroformo	EPA-8260	6.0	< 0.040
Cloruro de metileno	EPA-8260	8.6	< 0.040
Cloruro de vinilo	EPA-8260	0.2	< 0.040
1,2-diclorobenceno	EPA-8260	4.3	< 0.040
1,4-diclorobenceno	EPA-8260	7.5	< 0.040
1,2-dicloroetano	EPA-8260	0.5	< 0.040
1,1-dicloroetileno	EPA-8260	0.7	< 0.040
Disulfuro de carbono	EPA-8260	14.4	< 1.000
Fenol	EPA-8260	14.4	< 0.020
Hexaclorobenceno	EPA-8260	0.13	< 0.020
Hexacloro			< 0.040
1,3-butadieno	EPA-8260	0.5	
Isobutanol	EPA-8260	36.0	< 0.040
Etilmetilcetona	EPA-8260	200.0	< 0.020
Piridina	EPA-8260	5.0	< 0.020
1,1,1,2- tetracloroetano	EPA-8260	10.0	< 0.040
1,1,2,2- tetracloroetano	EPA-8260	1.3	< 0.040
Tetracloruro de carbono	EPA-8260	0.5	< 0.040
Tetracloroetileno	EPA-8260	0.7	< 0.040
Tolueno	EPA-8260	14.4	< 0.040
1,1,1-tricloroetano	EPA-8260	30.0	< 0.040
1,1,2-tricloroetano	EPA-8260	1.2	< 0.040
Tricloroetileno	EPA-8260	0.5	< 0.040

### 6.1.5 Determinación cualitativa de compuestos hidrocarburos parafínicos en las aguas del pozo testigo.

Ésta es la última de las pruebas analíticas efectuadas sobre las aguas del pozo testigo. Un total de 13 compuestos, partiendo del undecano (11 átomos de carbono) hasta el tricosano, fueron determinados cualitativamente. Los resultados son presuntivos y confiables en el sentido de que se identifican compuestos parafínicos en las aguas subterráneas. Todos esos compuestos son directamente relacionados al petróleo. La tabla 6.5 muestra los resultados de esta prueba cualitativa.

**Tabla 6.5 sobre la identificación, por análisis cualitativo, de compuestos presentes de hidrocarburos en el agua del pozo testigo No. 3.**

Compuestos hidrocarburos presentes en la muestra de agua del pozo		
Undecano	Hexadecano	Eicosano
Dodecano	Heptadecano	Docosano
Tridecano	Octadecano	Tricosano
Tetradecano	Nonadecano	Ácido bis(1,2-bencedicarboxílico)
Pentadecano		

### 6.2 Resultados de todos los análisis efectuados a los sedimentos de las presas

La posible infiltración de material, desde las presas de captación hasta el acuífero subterráneo, involucra forzosamente una amplia variedad de substancias

y de mecanismos de emigración. En esta sección se revisan los resultados de los análisis hechos a los sedimentos del fondo de las presas. Durante la primera revisión de estos resultados debió tenerse en mente que la columna de agua en las pilas, o mejor aún la presión piezométrica, pudo servir como fuerza de empuje para la infiltración en el caso de que las condiciones de infiltración se presentasen.

Este razonamiento trajo inevitablemente a la consideración la relativa cercanía del nivel dinámico del acuífero subterráneo, el cual se halla a solo entre 7 y 37 m debajo del suelo, con lo que la distancia vertical que debieron recorrer los contaminantes vino a ser corto en un medio relativamente facilitador.

Las presas funcionaron por unos diez años en forma continua y fue la presa No. 6 la que presentó una grieta o fractura en su fondo. Por ello esta sección se enfoca al análisis de los resultados hechos a los sedimentos de las presas.

### **6.2.1 Metales pesados y otros constituyentes inorgánicos**

A este grupo de especies pertenecen los iones relativamente inocuos de bario, plata y níquel, acompañados por los metales pesados plomo, mercurio y cromo. Especial mención tienen las especies consideradas tóxicas como el arsénico, el mercurio ya mencionado, el cadmio y el cromo hexavalente. La tabla 6.6 muestra los resultados de estos análisis efectuados del 9 de Septiembre al 25 de Noviembre de 1998, aprovechando la disponibilidad de laboratorios de PEMEX.

**Tabla 6.6 Metales pesados y otras especies inorgánicas en los sedimentos de las seis presas de captación.**

Especie	Todos los valores de concentración en mg/L						
	Presa 1	Presa 2	Presa 3	Presa 4	Presa 5	Presa 6	Max. conc.
Arsénico	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	5.0
Bario	5.17	6.82	1.11	< 1.00	4.5	< 1.00	100.0
Cadmio	< 0.20	< 0.20	< 0.20	< 0.20	< 0.20	< 0.20	1.0
Cromo 6+	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	5.0
Níquel	0.31	0.26	0.30	0.27	0.30	0.38	5.0
Mercurio	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	0.2
Plata	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	5.0
Plomo	< 0.30	< 0.30	0.44	0.33	0.4	0.66	5.0
Selenio	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	1.0

Los resultados llaman la atención en la línea correspondiente al bario para las presas 1, 2 y 5, con valores de 5.17, 6.82 y 4.5 mg/L, lo cual está de acuerdo con la evidencia experimental de que a las primeras dos de esas presas llegaban en forma directa las descargas de aguas de desecho provenientes de diversos procesos y del lavado de equipo de perforación.

Con referencia al plomo, sus valores mayores se localizaron en las presas 3, 5 y 6 con concentraciones de 0.44, 0.40 y 0.66 mg/L. En realidad estos valores son muy cercanos al límite mínimo impuesto por el estándar y solo así es posible entender cómo la presa 6, la que recibía al agua al final del tratamiento, presente una concentración relativamente más alta de plomo. Esta serie de pruebas analíticas son vistas como un fotografía instantánea, pues en sistemas con la dinámica de las presas de captación hubiese sido mejor una serie de pruebas frente al tiempo.





La única manera factible de explicar las bajas concentraciones de estas especies es a partir de la naturaleza física de ellas. Estas sustancias tienden a separarse de la fase acuosa y forman un sobrenadante de forma natural. La volatilidad de estas especies es comparativamente alta y dado el tiempo y la oportunidad, todas ellas tenderán a escapar a la fase vapor en un medio abierto con suficiente ventilación natural, como el que se encuentra en la superficie llana del área de trabajo.

En el Apéndice se reporta la totalidad de las tablas con los análisis.



## CAPITULO 7

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las seis presas de captación tuvieron un tiempo de servicio de unos 10 años sin interrupción. La distancia vertical entre las aguas de las presas y el agua subterránea es de unos 26 a 33 m. Las presas fueron finalmente clausuradas en el verano de 1998 y substituidas por tanques de almacenamiento a prueba de fugas. El sitio de las presas fue saneado al inicio de 1999 y grandes cantidades de suelo fueron levantados y llevados a un confinamiento autorizado (Mina, N.L.).

Este estudio ha podido determinar que efectivamente se desarrolló y se halla presente una pluma (o penacho) de contaminación con hidrocarburos y compuestos aromáticos en el acuífero subterráneo, la cual se formó a partir de infiltraciones de aguas de desecho desde al menos una de las presas de captación. Ello se concluye gracias a la identificación de las especies presentes en el agua del pozo testigo y que son comunes al petróleo o sus derivados.

Acerca del mecanismo de emigración o transporte de los contaminantes, los estudios de geología e hidrogeología del área cubierta por este proyecto permiten elaborar algunas ideas:

a) La matriz del acuífero local es del tipo aluvial, no-consolidado, constituido de arenas y arcillas en su porción de material fino y es caracterizado como de permeabilidad media. Todo ello permite suponer que el material del acuífero no representó un obstáculo serio a las infiltraciones

desde la superficie, lo cual está de acuerdo con la evidencia experimental de que el acuífero se recarga de infiltraciones del río Bravo, lluvias, canales de riego y estanques.

b) El acuífero es somero, solo 7 a 37 m de nivel dinámico para una amplia porción de esta región, lo cual acorta la distancia vertical que las infiltraciones deben recorrer, posibilitando la presencia en el subsuelo de especies comunes a las presas de captación.

Los análisis cuantitativos permitieron conocer que el benceno y los xilenos son las especies aromáticas presentes en las aguas subterráneas tomadas del pozo testigo. Su presencia hace pensar que otras especies del grupo BTEX podrán también estar presentes en éste pozo o en otros si son estudiados en otra oportunidad. Este trabajo permitió conocer las concentraciones de las especies en un momento dado, pero la transferencia de material o el flujo en el subsuelo es un proceso muy lento aún para el agua, razón por la cual se recomienda extender este estudio e incluir los siguientes puntos:

a) Analizar muestras de agua extraídas desde la zona saturada de los restantes pozos testigos actualmente obstruidos.

b) Incluir en los estudios los pozos de agua localizados en la región cercana (ranchos y particulares), principalmente aquellos orientados hacia el Este del área de estudio, en consideración al sentido del flujo de las aguas subterráneas que ha sido mostrado por la evidencia experimental (página 104).

c) Incluir estudios sistemáticos en muestras de agua extraídas de la zona vadosa o insaturada, con el fin de conocer la diferenciación que seguramente se está dando entre las diferentes especies orgánicas, las cuales emigran con diferente rapidez unas de las otras a través del material del subsuelo, de la misma manera que ocurre con las sustancias en una columna de cromatografía.

Al desarrollar las sugerencias dadas en el párrafo anterior se podrá determinar la extensión de la pluma, es decir, se podrá determinar su largo y su ancho, junto con su tendencia frente al tiempo. El estudio que se recomienda permitirá también evaluar cuales componentes de la pluma se transfieren o viajan más rápidamente, con lo cual podrán predecirse las zonas de mayor riesgo para la salud.

Finalmente, los resultados obtenidos no indican una situación insalvable para el acuífero, sino que por lo contrario, los valores de concentración de los dos componentes BTEX, benceno y xilenos, se hallan en un nivel en el que es factible la oxidación aeróbica como recurso de bioremediación en el caso de que este acuífero sea la única fuente de agua disponible, como se muestra en la sección 1.7 (página 35), ya que los valores de 0.11 y 0.24 mg/L se hallan muy por debajo de los 20 mg/L que se reportan como fácilmente biodegradables.