

**Evaluación de las condiciones ambientales de Suelo, Residuos y Agua  
Subterránea de una planta de procesos químicos en Michoacán**

**TESIS QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
Ingeniero Geólogo  
PRESENTA:  
Hugo Mujica Sánchez  
ASESOR: Ing. José Antonio Hernández Espriú**

Deseo externar mi más profundo agradecimiento a Guadalupe y Raúl, mis padres,  
por haberme brindado su cuidado y protección así como por proporcionarme todos  
los recursos a su alcance así como las herramientas necesarias para encontrar y  
seguir mi propio camino.  
Pero por sobre todas las cosas por su amor y su cariño.

# Índice (Tabla de Contenidos)

## 1 Introducción

- 1.1 Antecedentes
- 1.2 Localización del área de estudio
- 1.3 Descripción del proceso industrial
- 1.4 Objetivo

## 2 Descripción del medio natural

- 2.1 Clima
- 2.2 Fisiografía
- 2.3 Hidrografía
- 2.4 Geomorfología
- 2.5 Geología
- 2.6 Hidrogeología
  - 2.6.1 Tipo de acuífero
  - 2.6.2 Elevación del nivel estático

## 3 Exploración geofísica

- 3.1 Fundamentos de método utilizado
- 3.2 Descripción del equipo
- 3.3 Análisis de información
- 3.4 Procesamiento de datos
- 3.5 Interpretación de resultados
  - 3.5.1 Secciones de isorresistividad
  - 3.5.2 Secciones geoelectricas

## 4 Caracterización de suelo y residuos

- 4.1 Investigación de suelo y residuos
  - 4.1.1 Equipos de Perforación Ambiental
  - 4.1.2 Perforación con equipo manual (Hand Auger)
  - 4.1.3 Perforación con equipo mecánico (Barrenación Helicoidal Hueca)
  - 4.1.4 Proceso de descontaminación del equipo de perforación
  - 4.1.5 Equipo de medición de gases de suelo
  - 4.1.6 Registros de perforación ambiental
- 4.2 Muestreo de suelo
  - 4.2.1 Aseguramiento de calidad y validez del muestreo
- 4.3 Muestreo de residuos
- 4.4 Análisis de laboratorio
  - 4.4.1 Muestras de suelo
    - 4.4.1.1 Relación de muestras
    - 4.4.1.2 Métodos de análisis
    - 4.4.1.3 Resultados del análisis de laboratorio
  - 4.4.2 Muestras de residuos
    - 4.4.2.1 Relación de muestras
    - 4.4.2.2 Métodos de análisis
    - 4.4.2.3 Resultados del análisis de laboratorio

## **5 Caracterización y modelación numérica del agua subterránea**

- 5.1 Investigación de agua subterránea
- 5.2 Muestreo por el método de bajo flujo (low flow)
- 5.3 Muestreo por el método manual (bailers)
- 5.4 Aseguramiento de calidad y validez del muestreo
- 5.5 Análisis de laboratorio
  - 5.5.1 Relación de muestras
  - 5.5.2 Métodos de análisis
  - 5.5.3 Resultados de análisis de laboratorio
- 5.6 Isoconcentraciones
- 5.7 Dirección del flujo de agua subterránea somera
- 5.8 Pruebas de permeabilidad
- Estimación de parámetros hidráulicos del acuitardo somero
- Pruebas de inyección de agua para estimar la permeabilidad del sitio
- 5.9 Modelación numérica del agua subterránea
  - 5.9.1 Objetivos
  - 5.9.2 Alcances
  - 5.9.3 Marco teórico
    - 5.9.3.1 Definición de modelo
    - 5.9.3.2 Métodos numéricos
    - 5.9.3.3 Ecuación general de flujo de agua subterránea
    - 5.9.3.4 Ecuación general de transporte de solutos
    - 5.9.3.5 Técnicas de solución
    - 5.9.3.6 Aplicaciones de los modelos matemáticos de agua subterránea
  - 5.9.4 Método de trabajo
    - 5.9.4.1 Software utilizado
    - 5.9.4.2 Revisión y simplificación del modelo conceptual
    - 5.9.4.3 Parámetros de entrada
  - 5.9.5 Construcción del modelo numérico
    - 5.9.5.1 Definición de la malla de discretización del dominio
    - 5.9.5.2 Ingreso de parámetros de entrada
    - 5.9.5.3 Condiciones iniciales
    - 5.9.5.4 Condiciones de frontera
    - 5.9.5.5 Condición de transporte
  - 5.9.6 Planteamiento del problema
    - 5.9.6.1 Calibración y validación
    - 5.9.6.2 Modelo de simulación
  - 5.9.7 Obtención e interpretación de resultados
    - 5.9.7.1 Modelo de flujo de agua subterránea
    - 5.9.7.2 Modelo de transporte
    - 5.9.7.3 Modelo de simulación en estado transitorio
  - 5.9.8 Discusión
    - 5.9.8.1 Concentraciones esperadas a través del tiempo
  - 5.9.9 Conclusiones

## **6 Conclusiones y recomendaciones**

- 6.1 Conclusiones
  - 6.1.1 Investigación de suelo y residuos
    - 6.1.1.1 Suelo



- 6.1.1.2 Residuos
- 6.1.2 Investigación de agua subterránea
  - 6.1.2.1 Agua subterránea
  - 6.1.2.2 Isoconcentraciones
  - 6.1.2.3 Exploración geofísica
  - 6.1.2.4 Permeabilidad y dirección de flujo
  - 6.1.2.5 Modelación numérica del agua subterránea
- 6.2 Recomendaciones

## **7 Referencias**

### **Apéndices**

1. Registros litológicos
2. Registro fotográfico.

# **1 Introducción**

El grado de desarrollo que ha alcanzado la sociedad actual en todos los ámbitos de la vida, se debe en gran medida, a los avances y aportes de los diferentes sectores industriales a la actividad socio-económica, tecnológica y cultural de los países desarrollados así como de los países en vías de alcanzar mejores niveles de bienestar.

La industria en cualquiera de sus vertientes, es un motor económico que contribuye en muchísimos aspectos al desarrollo de las sociedades.

En un principio, dentro de las actividades industriales, se dio mayor importancia a la mecanización y sistematización de los procesos de producción; de calidad del producto, logística e incluso a las cuestiones de estructura y organización laboral, dejando de lado ó en otro orden de prioridades aspectos igual de importantes como lo es el cuidado y protección al medio ambiente.

Sin embargo, la evidente acumulación acelerada de los impactos de la actividad industrial al medio ambiente, ha obligado a los sectores empresariales, a los gobiernos y sus autoridades así como a la sociedad en su conjunto a establecer normas y criterios que generen diagnósticos confiables que permitan la detección, identificación, neutralización, mitigación y/o eliminación de los impactos potenciales y reales a las personas y comunidades así como al suelo, agua y aire.

Una de las herramientas más útiles y de mayor difusión para realizar estos diagnósticos, es la de llevar a cabo evaluaciones ambientales para conocer las condiciones prevalecientes en un sitio determinado.

Las evaluaciones ambientales son el paso inicial para determinar la existencia de pasivos ambientales que son definidos como el conjunto de daños ambientales que una empresa realiza sin compensar así como el conjunto de gastos compensatorios que dicha empresa debiera transferir para eliminar estos daños.

Muchas empresas industriales alrededor del mundo tomaron conciencia de la importancia de conocer las condiciones ambientales prevalecientes en sus instalaciones a partir de las indemnizaciones que tuvieron que pagar debido a sus problemas de contaminación no detectados a tiempo.

No obstante y más allá del evidente beneficio económico y financiero que se obtiene al cuidar y proteger el medio ambiente, la retribución real, para todos, es la poder convivir en un planeta mejor

## **1.1 Antecedentes**

Con el propósito de conocer el estado que guardan - desde el punto de vista ambiental - las instalaciones de una planta de procesos químicos ubicada dentro de un complejo industrial en la parte norte del estado de Michoacán, se llevaron a cabo una serie de actividades para la realización de una evaluación de las condiciones ambientales de suelo así como agua subterránea y de esa forma identificar la presencia de algún pasivo ambiental resultado de las actividades pasadas ó actuales en la planta.

Para el desarrollo del diagnóstico ambiental del suelo y el agua subterránea, fue indispensable el reconocimiento de los antecedentes, en donde se incluyó una revisión exhaustiva a los trabajos relacionados con la contaminación del suelo y/o agua subterránea realizados previamente.

Durante el mes de agosto de 2008, se realizó un primer diagnóstico ambiental preliminar en las instalaciones del área de estudio mediante muestreo de suelo y de agua subterránea en pozos de monitoreo y en 4 norias cercanas a las instalaciones

## Suelos

Los estudios correspondieron a investigación de suelo, en donde se detectaron algunos puntos impactados, tal es el caso de una antigua bodega localizada en la parte Este de la planta en dirección suroeste de los tanques de almacenamiento; cerca del taller de herrería y el tanque de agua, la tabla siguiente muestra únicamente el resumen de los análisis para Compuestos Orgánicos Volátiles (VOC's) que presentaron valores mayores a los límites de referencia utilizados "USEPA Preliminary Remediation Goals" (PRG's 2004), mismos que se han resaltado en negrillas para su mayor apreciación.

Analito (mg/kg)	Muestras			LDM*	PRG's
	SB3-0,9 m	SB5-0,8 m	SB5-1,8 m		
Tricloroetileno	<LDM	<LDM	<b>3,79</b>	0,03	0,1
Tetracloroetileno	<LDM	<b>3,31</b>	<LDM	0,04	1,3
1,4-Diclorobenceno	<b>14,84</b>	1,27217	0,91	0,06	7,9
1,2,4-Triclorobenceno	<LDM	<b>945,05</b>	<b>386,15</b>	0,03	220

\*LDM: Límite de Detección del Método

En los resultados de análisis por Compuestos Orgánicos Semi Volátiles (SVOC's), se presentó solamente un valor que sobrepaso los límites de referencia, dicho analito corresponde al 1, 2, 4-Triclorobenceno, con una concentración de 1 047,81 mg/kg, dicha muestra fue colectada en área del tanque de agua (Muestra SB5-0,8m).

En el caso del Vanadio, se analizaron 51 muestras, de las cuales solamente una reportó concentraciones mayores a las establecidas en los límites de referencia (1 000 mg/kg) establecidos en la norma Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (NOM-147), la muestra SCF2-0,5m, reportó 5 183,43 mg/kg.

En el caso de los Sulfatos analizados en las muestras de suelo, se obtuvo un valor promedio de 1 330,14 mg/kg y una desviación estándar de 2 637,45 mg/kg.

## Agua Subterránea

De los 7 pozos de monitoreo de agua subterránea muestreados, solamente 2 reportaron resultados para compuestos clorados, dichos resultados se resumen en la tabla inferior, mismos que se han resaltado en negrillas para su mayor apreciación.

CAS	Análisis	Muestras			Límites de referencia		
		PMZ-9A	PMZ-10	PMZ	PRG's (2004)	PRG's (2009)	LFDMA (2005)
		Resultados (µg/L)					
75-01-4	Cloruro de vinilo	<b>13,13</b>	<1,36	<1,36	0,02	0,016	0,000005
79-01-6	Tricloroetileno	<1,22	<1,22	<12,16	0,028	1,7	0,00003
127-18-4	Tetracloroetileno	<LDM	<b>279,06</b>	<b>305</b>	0,1	0,11	0,000008
541-73-1	1,3-diclorobenceno	13,74	8,00	8,56	180	NL	0,0004
106-46-7	1,4-diclorobenceno	<b>32,56</b>	<b>37,13</b>	<b>39,96</b>	0,5	0,43	0,0004
95-50-1	1,2-diclorobenceno	8,23	51,3	55,89	370	370	0,0004

120-82-1	1,2,4-triclorobenceno	<8,87	<b>3 247,00</b>	<b>4 927,50</b>	7,2	19	NL
108-90-7	Clorobenceno	45,55	<0,88	<0,88	11	91	0,00002

CAS: Número de registro del "Chemical Abstracts Service"

LFDMA: Ley Federal de Derechos en Materia de Agua

NL: No Listado

PMZ: duplicado muestra PMZ-10

A cada uno de los pozos de monitoreo existentes, se analizó una muestra por Compuestos Orgánicos Semi Volátiles (SVOC's) y de estos, solamente dos reportaron concentraciones de 1, 2, 4-Tricloroetileno, siendo el identificado como PMZ-10 y su duplicado, el resultado fue de 1 903,30 y 1 673,30 µg/L., respectivamente.

Otro análisis realizado a las muestras de agua en los pozos de monitoreo, fue el de Vanadio, el cual indicó presencia del compuesto en el pozo PMZ-10 y su duplicado, con una concentración de 668,90 y 744,63µg/L, respectivamente; cabe mencionar que los límites de referencia son de 36 y 180 µg/L.

En el caso de las norias, 2 de ellas reportaron valores mayores a los límites de referencia, estas fueron las identificadas como MC-109 y su duplicado (74,45 y 70,31 µg/L, respectivamente); y MC-112, con una concentración de 656,79 µg/L.

Por último, se realizó un análisis de sulfatos; el valor promedio obtenido en los pozos fue de 2 445,67 µg/L, con una desviación estándar de 2 866,05 µg/L y, para las norias fue de 504,62 y 315,36 µg/L..

Con base en los resultados de esta primera etapa, se decidió ampliar la investigación en cada una de las áreas evaluadas, por lo que el mes de febrero de 2009 se realizó la evaluación ambiental que se presenta en este trabajo.

## 1.2 Localización del área de estudio

El área de estudio se localiza dentro de las instalaciones de una planta de procesos químicos que forma parte de un complejo industrial ubicado en el municipio de Zacapu en el estado de Michoacán de Ocampo.



Figura 1. Localización del área de estudio

### **1.3 Descripción del proceso industrial**

El Complejo Industrial localizado en Zacapu, Michoacán, ha tenido un relevante grado de importancia en términos económicos para la región, ya que en él se realizan actividades correspondientes al subsector manufacturero de sustancias químicas, el cual ha representado los números más altos en diversos rubros del total de los subsectores del ramo industrial que existen en el municipio.

Con más de 50 años de experiencia en el ramo de las especialidades químicas, la planta industrial en donde se localiza el área de estudio, está dedicada a la producción de éteres de celulosa.

La planta se ha especializado en la producción de éteres de celulosa no-iónicos (ECNI) en diferentes grados y viscosidades que participan como insumo clave en diversas industrias tales como: construcción, pinturas, adhesivos cerámicos, cosmética, alimentaria, farmacéutica, entre otros.

El proceso de recuperación de sal en el proceso de manufactura de ECNI, inicia con la formación del álcali celulosa. El cual consiste en poner en contacto las hojas de celulosa con sosa cáustica. Este pasa al reactor donde se adiciona óxido de propileno y cloruro de metilo para formar el ECNI.

Al finalizar la reacción, el ECNI es un sólido fibroso que contiene un alto contenido de cloruro de sodio (NaCl) del cual debe purificarse. Esto se alcanza usando agua caliente, en la cual el ECNI es insoluble. El producto del reactor se descarga en un tanque agitado que contiene agua caliente a 90 °C.

El lavado consiste en un proceso semicontinuo de lixiviación a contracorriente, donde se reutilizan los licores de corriente de lavado, minimizando la cantidad de agua fresca permitiendo así obtener una solución concentrada que reduce los requerimientos de energía en la etapa de recuperación de sal.

La solución de licor concentrada generada en el sistema de lavado es acumulada en un tanque para de ahí ser alimentada en forma continua a un evaporador – cristalizador.

Una corriente de sólidos altamente concentrada es extraída continuamente del fondo del evaporador para ser enviada a un tanque sedimentador, donde los cristales precipitan. La corriente enriquecida de cristales pasa por un gusano con malla en su parte inferior donde se separa la sal con una humedad del 20% y los licores de esta junto con los de alimentación se retornan al evaporador.

Los sólidos húmedos son enviados a un secador rotatorio para eliminar el exceso de humedad de la sal al ponerla en contacto con aire caliente procedente de un quemador de gas LP, en este último se alimentan los orgánicos generados en la etapa de reacción donde se destruyen completamente a una temperatura de entre 900° y 1 100° C.

El material seco es descargado a una tolva al final del secador para de ahí cribarse, para tener un tamaño de partícula uniforme, y empaquarse en bolsas de 50 kg para su almacenamiento y posterior comercialización

### **1.4 Objetivo**

El objetivo del presente trabajo fue el de realizar una evaluación ambiental de las condiciones prevalecientes - al momento de llevar a cabo el estudio - de suelo, residuos y agua subterránea que subyacen en el área de interés.

Con el fin de cumplir con el objetivo planteado, se realizaron principalmente las siguientes actividades:

- Exploración Geofísica

- Caracterización de Suelo y Residuos
- Caracterización de Agua Subterránea
- Modelación Numérica del Agua Subterránea

En la figura 1., se muestra la ubicación de los sondeos perforados así como los pozos de monitoreo y norias muestreadas.

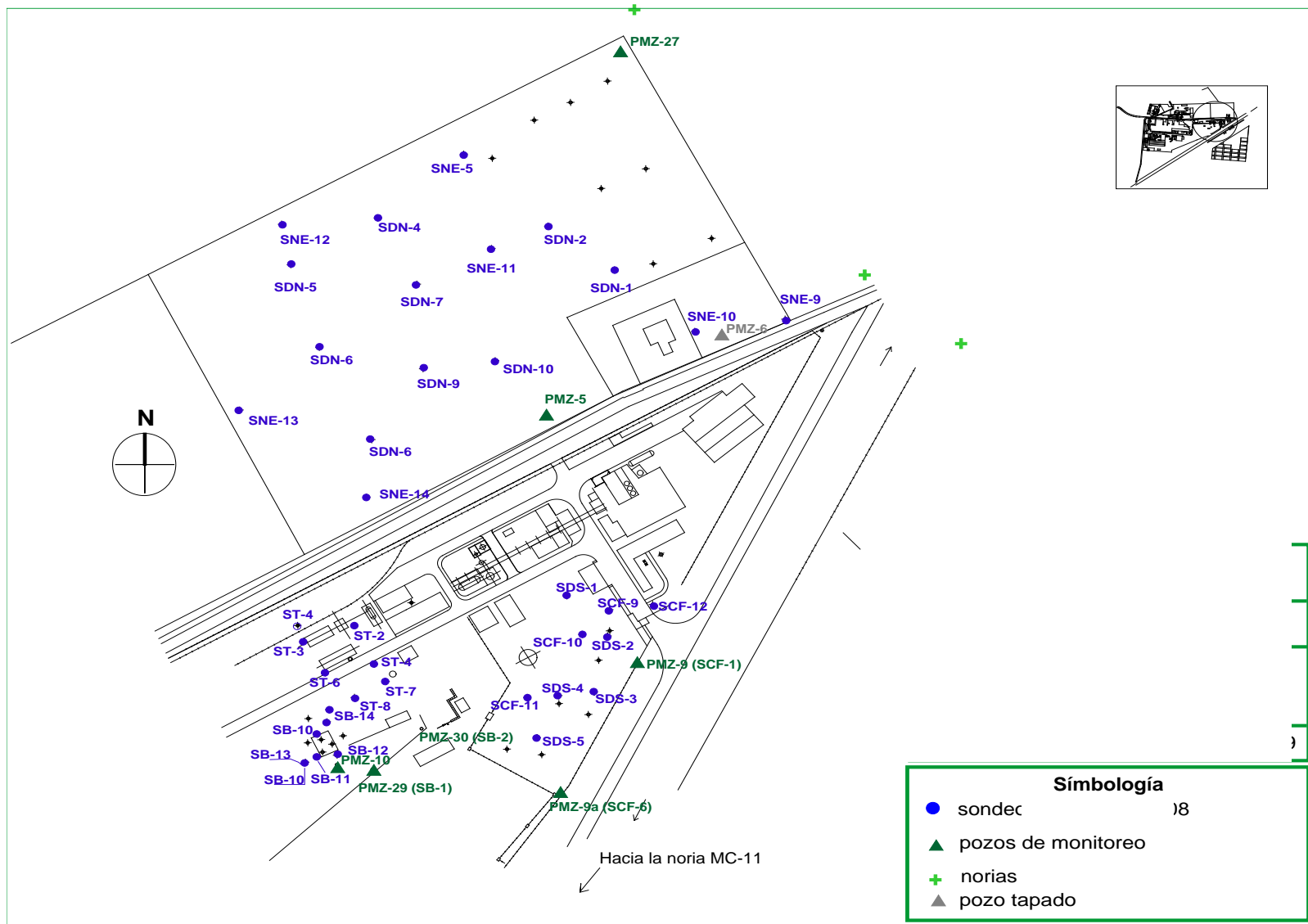


Figura 2. Ubicación de sondeos perforados y muestreados así como pozos de monitoreo y norias muestreadas

## 2 Descripción del medio natural

Con la intención de proporcionar el marco físico en el que se encuentran inmersas las instalaciones del área de estudio se incluye en el presente capítulo una breve descripción de los aspectos más importantes del medio circundante.

### 2.1 Clima

La fuente de información climatológica más cercana al área de estudio corresponde a la Estación de Zacapu, localizada dentro de la ciudad de Zacapu en las coordenadas geográficas 19° 48' 19" de latitud norte y 101° 47' 42" de longitud oeste, a una altura de 1986 m.s.n.m.

El análisis de los datos disponibles para un periodo de observación de 27 años (1991-2008) indican que en las inmediaciones de la población de Zacapu se tiene una temperatura anual de 15,7 °C, un valor de precipitación promedio anual de 882 mm y una evaporación de 1813 mm/año.

Así mismo en el climograma elaborado para la Estación, se aprecia que el periodo de lluvia se concentra en los meses de junio a septiembre y que el mes más seco se presenta en los meses de enero a marzo. Respecto a la variación de la temperatura se observa que la época más calurosa es de abril a junio y la más fría de diciembre a febrero.

Los vientos dominantes del lugar registran una dirección noreste y norte. El clima predominante es el templado-semiseco en el 80% del municipio, y el 20% restante presenta un clima templado-húmedo.

### 2.2 Fisiografía

Respecto al nivel medio del área de estudio, se encuentra a una altitud de 1989 m.s.n.m.

La mitad del área urbana que ocupa Zacapu, tiene un drenaje pluvial a través de arroyos de calles y canales hacia la Laguna, además de que son de importancia las corrientes efímeras que bajan por las cañadas de malpaís del poniente. La topografía del área en general, es casi plana.

El área de estudio, pertenece a la provincia fisiográfica del Eje Volcánico Transversal en la Subprovincia Neovolcánica Tarasca, de esta destacan los cerros del Tule con 3 100 m.s.n.m., el Cerro de la Caja con 2 900 m.s.n.m., El Cuinato y La Crucita en la zona del malpaís, con 2 100 m.s.n.m.

La mayor parte de las cordilleras que rodean el área se caracterizan por serranías y zonas lacustres que van de 2 000 a 3 200 m.s.n.m. Presentan una fase lítica, así como un lecho rocoso de entre 10 y 50 cm de profundidad

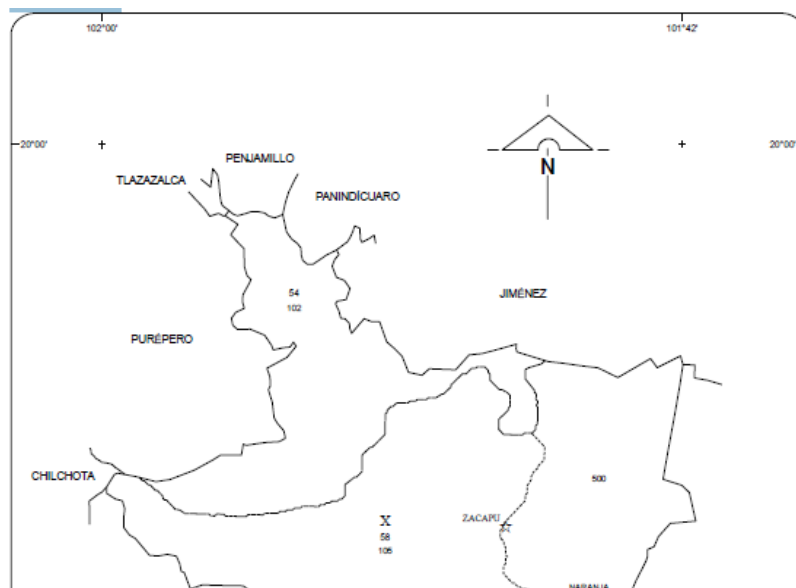




Figura 3. Provincia fisiográfica en el área de estudio (fuente INEGI 2005)

### 2.3 Hidrografía

Regionalmente, la zona de estudio se encuentra dentro de la cuenca hidrológica del río Lerma, las principales vertientes son los ríos Angulo y la Patera, los cuales se unen en Villa Jiménez y desembocan al río Lerma.

Existen dos presas que son: Copándaro, con una capacidad de almacenamiento de 6 millones de metros cúbicos, y Aristeo Mercado, con 20 millones de metros cúbicos.

Además existen manantiales que son utilizados para el riego, tales como: Tarajero, que tiene un gasto de 2,700 l/s, la Laguna de Zacapu, con 1,462 l/s, Naranja con 300 l/s y Bellas Fuentes con 350 l/s.

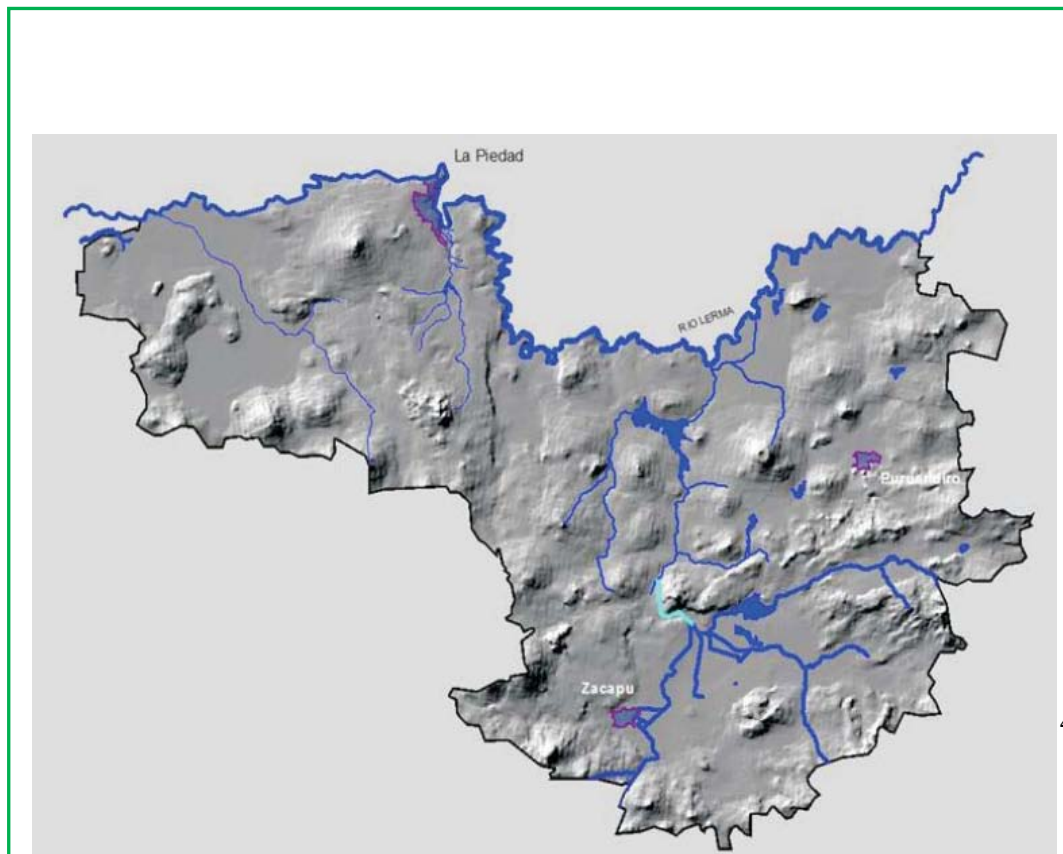


Figura 4. Hidrografía del área de estudio. (Fuente INEGI 2005)

## 2.4 Geomorfología

Geomorfológicamente esta región del Estado de Michoacán pertenece a la subprovincia Sierras y Bajíos Michoacanos, dentro de la provincia fisiográfica denominada Eje Neovolcánico (INEGI, 1990) o sistema Neovolcánico Transmexicano (Lugo-Hubp, 1990; Morán Zenteno, 1982).

En el área de Zacapu afloran rocas de origen volcánico de edad cuaternaria, observándose derrames de composición andesítica-basáltica al oriente de la zona de estudio, las cuales forman grandes aparatos volcánicos, con elevaciones promedio de 2,200 m s.n.m.m. (cerro Capáxtiro). Los derrames de este volcán presentan una topografía abrupta y accidentada, con rompimientos bruscos de sus flujos que dan un aspecto de malpaís.

La base de estos cuerpos está constituida por rocas andesíticas fracturadas, brechas y escoria volcánica, por lo que presentan una porosidad primaria alta.

La región es una planicie lacustre a 1,980 m s.n.m.m., caracterizada por tener poca pendiente y relieve sensiblemente plano, excepto las elevaciones de Tarajero y Cantabria.

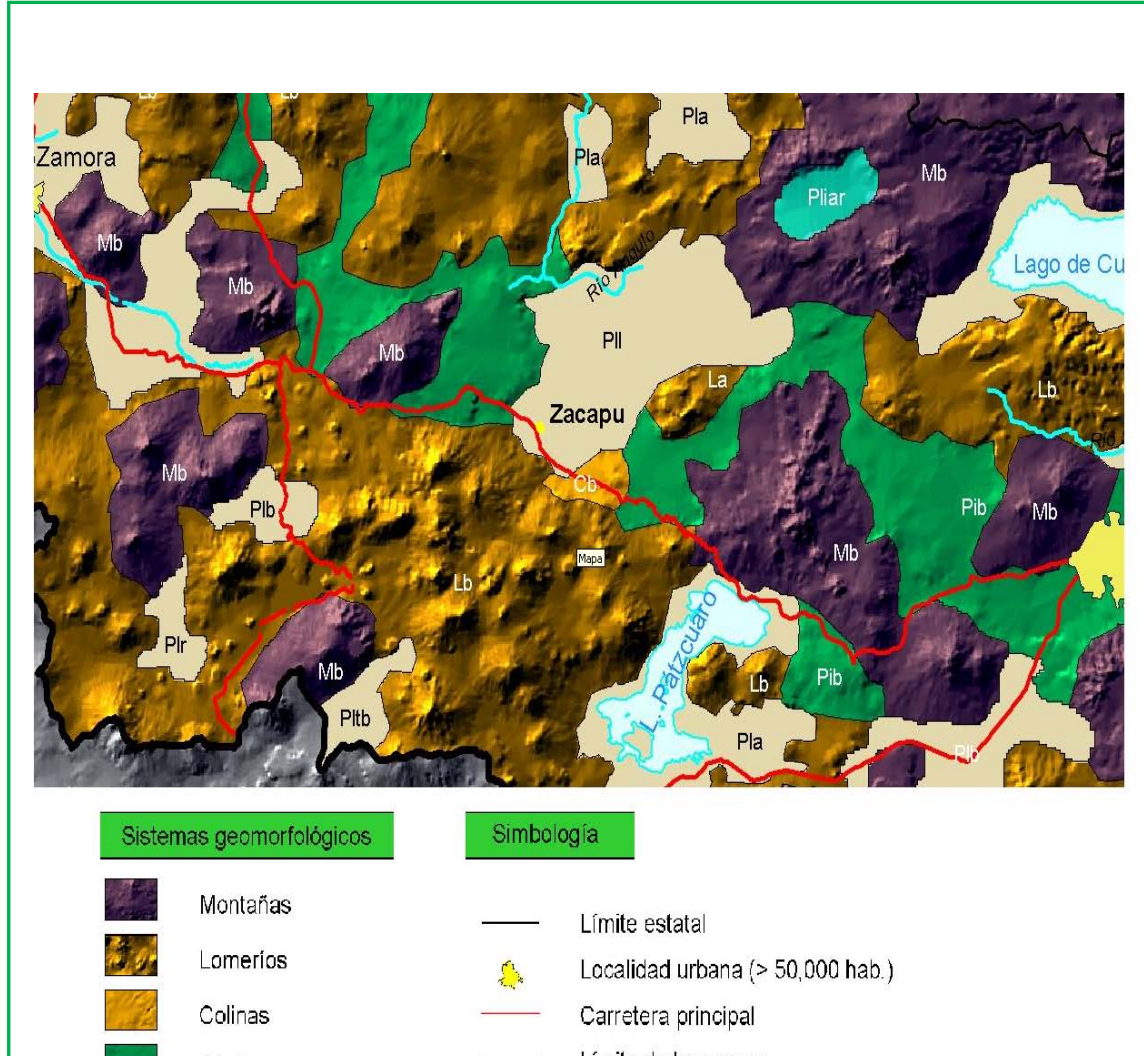


Figura 4. Geomorfología del área de estudio. (Fuente Instituto Nacional de Ecología 2008).

## 2.5 Geología

El área de estudio se ubica en el fondo de una amplia depresión con altas zonas basálticas principalmente hacia el noreste (malpaís) e inmersa en depósitos fluviolacustres y vulcanosedimentarios y éstos bordeados de vulcanitas con extensión de su ciénega hacia el este y noreste. Esta región se caracteriza por la presencia de tizales que ponen de manifiesto que existió un antiguo valle lacustre en la ciénega de Zacapu.

Los suelos que forman la ribera de la Laguna son uniformes y de clasificación lacustre, de coloración negra y de alta plasticidad, los constituyen en su mayoría depósitos de materiales arrastrados por la lluvia, procedentes de las formaciones montañosas que rodean el valle.

En las áreas adjuntas a la Riviera el tipo de suelo cambia un poco y se puede enmarcar en el tipo aluvial de formaciones masivas, formando, probablemente en el período geológico cuaternario. Por tener características de baja permeabilidad, posee humedad alta. Los constituyen limos y arcillas.

Al poniente de la laguna y a los trescientos metros, comienza una zona pedregosa formada por cuerpos basálticos en grandes masas, con origen en el período cuaternario y presentan fracturamiento e intemperismo moderado.

Las rocas que afloran en el área estudiada son de origen extrusivo, parte de ellas, principalmente las de menor cohesión y las formadas por minerales lábiles, han sido fragmentadas, transportadas y depositadas sus productos en las depresiones estructurales o en las cercanías de sus fuentes, dando lugar a la existencia de depósitos clásticos de diferentes espesores granulométría.

Las unidades que a continuación se describen de la más antigua a la más reciente, son en las que se agrupan las rocas, tanto las que se encuentran aflorando, como las que forman el subsuelo hasta una profundidad de 800 m, que es la máxima a que ha perforado la Comisión Federal de Electricidad en el área.

### **Terciario inferior andesítica-basalto (TplA-B)**

A esta unidad se le asignó una edad que va de la parte superior del Oligoceno a la base del Mioceno. Está constituida por derrames y aglomerados de composición andesítico-basáltico, con una colada basáltica en la cima.

Los afloramientos de esta unidad se presentan alargados y estrechos, con frentes casi verticales, los derrames andesíticos exhiben sistemas de fracturamiento y diaclasas muy cerrados, perpendiculares a sus frentes, los que observan direcciones E-W a E-NE.

En general, todos los afloramientos de esta unidad corresponden a los bloques altos de fallas escalonadas, que formaron y delimitaron las cuencas estructurales de él área.

### **Terciario medio basalto–andesíta (TmB–A)**

La edad asignada a esta unidad abarca del Mioceno al Plioceno. En ella se agruparon derrames, coladas, aglomerados, piroclásticos y tobas de composición basáltica y basaltoandesítica; igualmente se incluyeron 2 paquetes de sedimentos lacustres, uno en la base, que suprayace a la unidad anterior y el otro, constituyendo la parte inferior de la porción superior, que consta de aglomerados y derrames.

Los paquetes de sedimentos lacustres limitan verticalmente, al menos dentro del valle, a los derrames, brechas y piroclásticos, que se ubicaron en la porción media de este grupo.

La distribución de las rocas de esta unidades amplia, se presentan bordeando los valles de Zamora, Chavinda, norte de Tangancícuaro y Tlazazalca y forman los grandes aparatos volcánicos del área, que en la porción sur y occidente sobresalen de entre los derrames más recientes

### **Terciario medio ignimbrita-riolita (TpiIg-R)**

Los afloramientos de rocas riolíticas representados por tobas ignimbríticas, se encuentran ampliamente distribuidos en gran parte de la zona.

Según el grado de intemperismo a que estuvieron sujetas, estas rocas adquieren coloraciones que van del café claro a rosa y aún el blanco, están constituidas mineralógicamente por cristales de cuarzo, feldespato y micas empacadas en una matriz de la misma composición y vidrio volcánico, presentando ocasionalmente fragmentos irregulares de pómez.

Los depósitos de ignimbritas son el resultado de nubes ardientes y presentan una gran compactación, con una matriz vítrea de coloración rojiza.

Paralelamente a los eventos que formaron a esas rocas, se llevaron a cabo períodos de erosión y depósito de sedimentos continentales, lo cual provocó intercalaciones de depósitos lacustres y aluviales con rocas riolíticas.

Los afloramientos de tobas ignimbríticas tienen, por lo general, una cierta estratificación, formando frecuentemente mesetas.

Las rocas riolíticas aparecen extensamente en esta zona, en donde sus capas están expuestas casi horizontales, con un espesor que alcanza los 500 m. aproximadamente sin aflorar la base, su edad estimada es del Terciario Medio.

Existen además derrames de lavas y tobas, adoptando formas de mesetas, debido a la pseudoestratificación de las tobas, con presencia de ignimbritas e intercalaciones de materiales continentales de grano fino a medio, de baja permeabilidad.

### **Cuaternario basalto (QhoB-A)**

Posterior a la formación de las rocas antes referidas, a fines del Terciario, se manifestó en la región la emisión de rocas basálticas, que alternan con períodos de intensa erosión, lo que dio origen a los depósitos clásticos en alternancia ocasionalmente rítmica de arenas, grava y arcilla con material piroclástico.

Las erupciones volcánicas basálticas–brechas y escorias, continuaron hasta el Cuaternario y se encuentran ampliamente distribuidas en la zona, en forma de lomeríos y conos volcánicos que sobresalen de la llanura por su elevación. Por sus características hidráulicas se les considera de permeabilidad media.



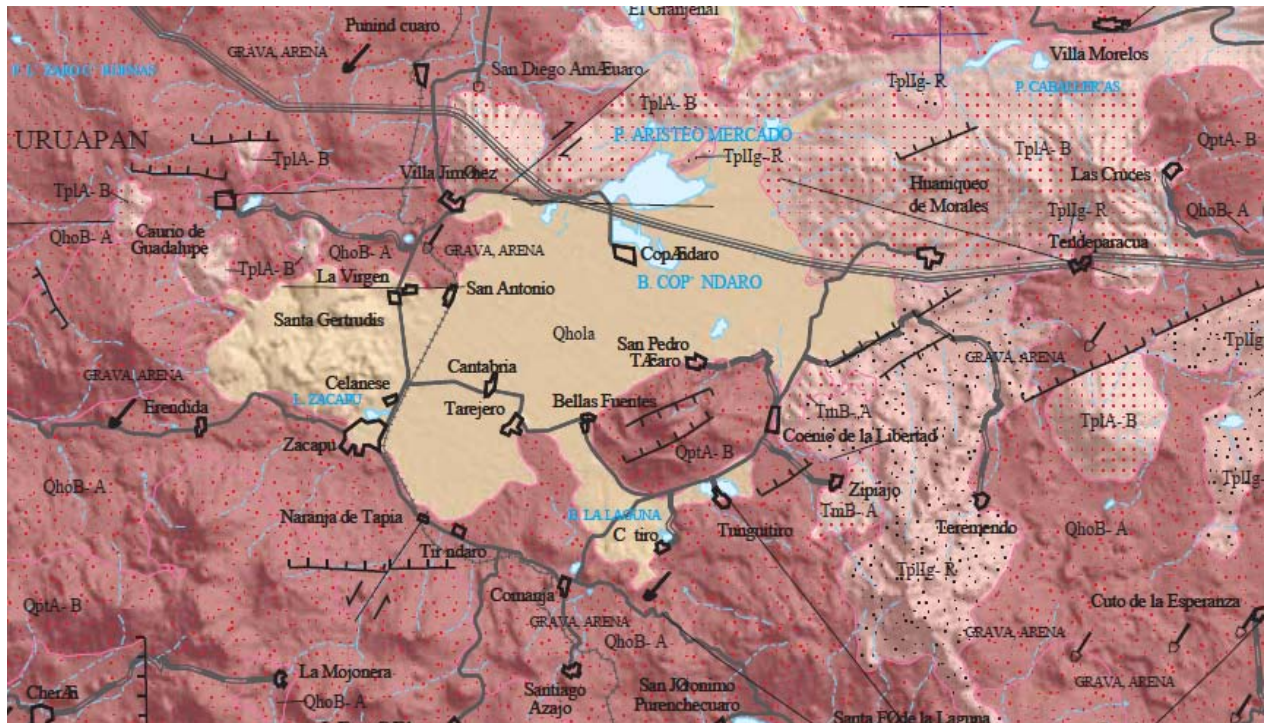
Al manifestarse un período de erosión y de emisiones de materiales piroclásticos que rellenaron los valles, con edad contemporánea a las rocas basálticas antes mencionadas. Sus afloramientos están constituidos por una alternancia de conglomerados y tobas–arenosas y limosas-interestratificados con basaltos. La permeabilidad de estos depósitos es considerada como media.

### Depósitos aluviales (Qhola)

Formado por los depósitos aluviales y fluviales –fragmentos y peñascos, de edad Reciente, se distribuyen en los bordes del valle, en contacto con las rocas más antiguas del área de interés. Su tamaño es de gravas y guijarros de 2 a 6 cm y peñascos hasta de 2 m; tienen compactación variable, en donde los vacíos están rellenos de arcillas y limos de origen tobáceo, y mediana a baja consolidación de donde los materiales finos son menores respecto a las oquedades.

Se localizan en el valle, asociados a los afloramientos andesíticos del Terciario Superior, a los frentes de la falla del cerro El Encinal, en los bordes del Cerro El Tepeguaje, el frente de la falla de Rincón del Mezquite, en toda la ladera sur del valle y el oriente de la ciudad de Zamora.

En lo que respecta a los depósitos aluviales –gravas, arenas, limos y arcillas, de edad Reciente, se localizan en las márgenes de los cauces de ríos y arroyos, así como diseminados en el área en cuestión, con espesores no mayores de 20 m. Su compactación es de mediana a baja.



### COLUMNA ESTRATIGRÁFICA

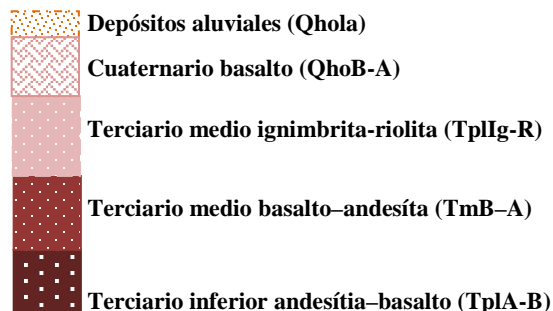


Figura 6. Geología del área de estudio. (Fuente Servicio Geológico Mexicano 2008).

## 2.6 Hidrogeología

La laguna de Zacapu es un embalse natural formado por numerosos manantiales que afloran en el extremo suroeste del Valle de Zacapu, entre los que destacan por su importancia La Angostura, La Zarcita y los de Zacapu, estos últimos ubicados en el interior del vaso lacustre.

Desde el punto de vista hidrográfico este cuerpo de agua se localiza en la Región Hidrológica No. 12, dentro de la cuenca del Río Angulo, misma que limita al norte con el cauce del Río Lerma, al sur con la cuenca cerrada del Lago de Pátzcuaro, al este con la cuenca Río Duero y al oeste con la cuenca cerrada de Lago de Cuitzeo.

Los escurrimientos provenientes de la Laguna, con un gasto estimado en estiaje de  $1,65 \text{ m}^3/\text{seg.}$ , que dan origen al propio Río Angulo que a su vez funciona como colector general de la cuenca.

Este río confluye finalmente en el margen izquierdo del río Lerma, después de un recorrido aproximado de 60 Km en los que recibe las aportaciones de una extensa red de drenajes agrícolas, ubicadas en la Ciénega de Zacapu y en los valles de Panindícuaro y parte de Angamacutiro, además de embalsarse en la Presa Melchor Ocampo (El Rosario), a la altura del Km 42 + 400 de su desarrollo.

Respecto a la hidrología subterránea, puede mencionarse que las zonas de recarga asociadas a la Laguna se localizan en la Sierra perimetral adyacente conformada por los cerros El Tule, El Tecolote y La Caja, a partir de donde se origina un flujo subterráneo radial hacia el valle.

En términos generales se considera una alta potencia del acuífero, con una recarga actual superior a las extracciones, lo cual manifiesta en el marcado artesianismo brotante detectado en algunos sitios de la planicie.

### 2.6.1 Tipo de acuífero

Las rocas más antiguas andesíticas y basálticas, se consideran como impermeables por su estructura masiva.

En las sierras que rodean al valle afloran basaltos del Cuaternario, subyaciendo a rocas volcánicas de menor permeabilidad. Por su textura vesicular y denso fracturamiento, tienen permeabilidad y capacidad de infiltración muy altas, por tanto, son excelentes receptores de recarga y constituyen acuíferos muy permeables en el subsuelo de la porción sur del valle, donde están cubiertos por depósitos aluviales del Reciente.

Por el contrario, los basaltos del Terciario son de capacidad de infiltración y permeabilidad muy baja, debido a que su estructura es masiva y poco fracturada. En el subsuelo del valle presentan una configuración escalonada, a causa del tectonismo, y constituyen el basamento hidrogeológico del acuífero.

El acuífero principal del valle, se denomina como Acuífero Zamora, el cual tiene una extensión superficial de  $2,400 \text{ km}^2$  y ocupa las porciones alta y media de la subcuenca del Río Duero.

Está formado por derrames basálticos, piroclásticos, materiales aluviales y depósitos lacustres. Los tres primeros son los elementos más permeables, y los últimos constituyen acuitardos de permeabilidad media a baja.

Su espesor aumenta de los bordes hacia el centro del valle, donde alcanza valores hasta de 350 m; está limitado inferiormente por depósitos lacustres antiguos, y en las porciones bajas del valle está semiconfinado por los depósitos lacustres recientes.



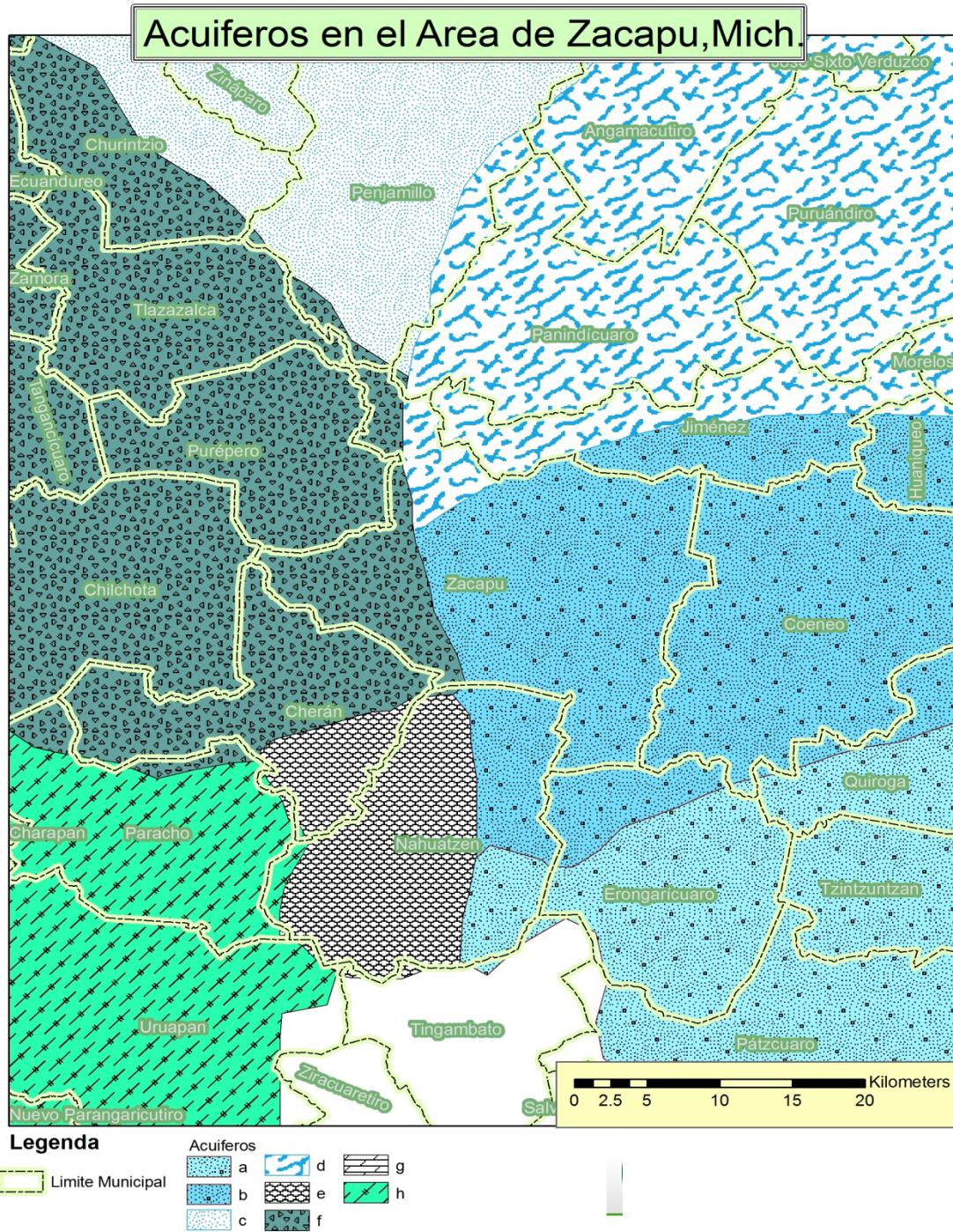


Figura 7. Acuíferos en el área de estudio. (b) Acuífero Zamora. (Fuente INEGI 2005)

### 2.6.2 Elevación del nivel estático

Para el control del nivel freático en el riego por subirrigación de la zona, existen una serie de drenes primarios como lo son: Angulo, Naranja y Carranza; los cuales se utilizan para el desalajo del exceso de agua, de tal manera que no se produzcan inundaciones en las parcelas que dañarían al cultivo del maíz.



Existen drenes secundarios como lo son: el Chorro, Pescadero, las Ratas, el Triángulo, los Cuates, las Colonias y el Santa Isabel, los cuales se encuentran conectados con drenes terciarios o parcelarios.

La profundidad al nivel estático varía entre menos de 5 m y unos 30 m. Los valores mayores de 30 m. se registran en la porción occidental de la zona, en el área de Villa Chavinda, debido al bombeo de las captaciones ahí concentradas, valores de 10 a 30 m. se encuentran en los bordes superiores del valle, y los menores que 10 m. en las partes bajas del mismo.

La circulación subterránea es muy semejante a la superficial de las partes altas del valle, donde se genera la descarga del acuífero hacia la faja fluvial del Duero y a lo largo de ésta hacia aguas abajo.

En el área de Chavinda se observa una depresión de los niveles del agua, con elevaciones mínima de 1,526 msnm, originada por la operación de los pozos ahí emplazados. En la parte baja del valle, la configuración muestra la descarga subterránea del acuífero hacia la zona de la Ciénega de Chapala

### 3 Exploración geofísica

La parte correspondiente a los estudios de geofísica, realizados en la planta donde se concentra el área de estudio, consistió en detallar y determinar la estratigrafía del subsuelo para determinar las características hidrogeológicas dentro de un panorama local para la zona de interés en el área interna y las inmediaciones de las instalaciones.

Se ejecutaron Sondeos Eléctricos Verticales (SEV's), con la finalidad de conocer de manera indirecta las características estratigráficas, espesores y condiciones del subsuelo a una profundidad de 0 a 300 m.

#### 3.1 Fundamentos de método utilizado

El Sondeo Eléctrico Vertical (SEV) permite obtener información en una dimensión del terreno mediante la aplicación de pulsos de corriente directa como estímulo y obtener al mismo tiempo el registro de la diferencia de potencial generada por el terreno a modo de respuesta.

Este método permite caracterizar el subsuelo, detectar capas subterráneas, definir el estado del basamento rocoso, conocer la distribución geológica de las rocas, determinar fallas y fracturas, etc.

Un SEV puede realizarse sobre cualquier combinación de formaciones geológicas, sin embargo para que la curva de resistividad aparente sea interpretable, el subsuelo debe estar formado por capas horizontales y homogéneas. En muchos casos la realidad se acerca lo suficiente a esta descripción teórica para que los resultados sean confiables.

La aplicación del método exige el conocimiento de las propiedades electromagnéticas de las rocas y minerales que constituyen la estructura del subsuelo.

Estas se expresan fundamentalmente en tres características físicas:

- La resistividad eléctrica ( $\rho$ ) o su inversa la conductividad ( $\sigma$ ),
- La constante dieléctrica o permitividad ( $\epsilon$ ) y
- La permeabilidad magnética ( $\mu$ ).

De éstas la más importante es la resistividad cuya distribución se estudia en el subsuelo.

El estudio del comportamiento eléctrico de los materiales se fundamenta en la ley de Ohm, que establece que la relación entre una corriente ( $I$ ) al pasar por un cuerpo, generando una caída de potencial ( $V$ ), debido a la resistencia ( $R$ ) que se opone al paso de ella. Matemáticamente se expresa por medio de la relación:

$$V = IR$$

Esta plenamente demostrado que si una corriente eléctrica uniforme fluye a través de un cilindro de composición homogénea en dirección de su eje (figura 8), la resistencia eléctrica que presenta se manifiesta directamente proporcional a su longitud  $L$  e inversamente proporcional a su sección transversal  $A$ , dando por resultado que la resistencia eléctrica medida está dada según la siguiente relación:

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

Donde:  $R$  = resistencia  
 $\rho$  = resistividad; depende de la naturaleza y estado físico del cilindro

$L$  = longitud del cilindro  
 $A$  = sección transversal perpendicular a la dirección de la corriente  
 $J$  = densidad de corriente (la flecha indica la dirección)

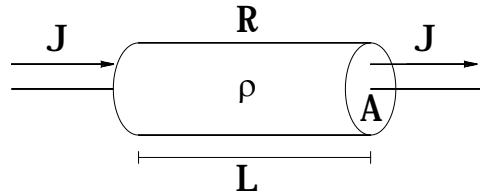


Figura 8. Flujo de corriente a través de un circuito.

Una vez que se obtiene el valor de  $I$  y  $\Delta V$ , se calcula la resistividad aparente mediante la relación:

$$\rho_a = k \frac{\Delta V}{I}$$

Donde  $K$ , es un coeficiente que depende únicamente de la geometría del dispositivo electródico y cuyas dimensiones son las de una longitud:

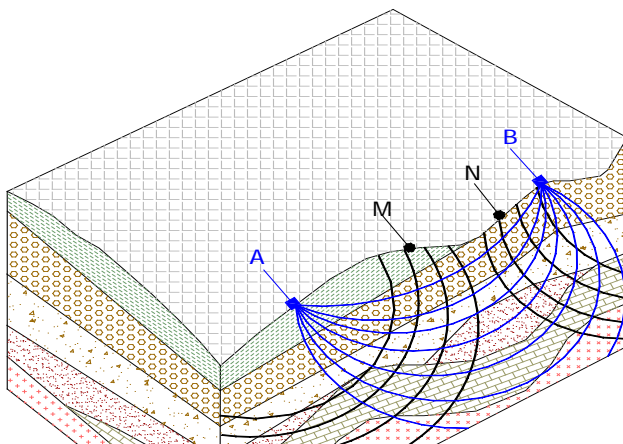
$$k = \pi \frac{AM \cdot AN}{MN}$$

En la ejecución de cada SEV, con los electrodos  $MN$  de “potencial” se obtiene en la superficie el gradiente de potencial ( $\Delta V$ ) que se produce al introducir un campo eléctrico de corriente directa por medio de los electrodos  $AB$  de “corriente” que también están en contacto con la superficie (figura 9).

En el arreglo tetrapolar Schlumberger que aquí se utilizó (figura 10), los electrodos  $A$  y  $B$  permanecen en línea con los electrodos  $M$  y  $N$  habiendo independencia entre ellos; durante el levantamiento de datos,  $A$  y  $B$  cambian simétricamente de distancia.

El espaciamiento de electrodos de corriente ( $AB$ ) depende de los objetivos que se busquen, conforme se abren  $A$  y  $B$  la profundidad de investigación es mayor, teóricamente se considera que dicha profundidad es la distancia  $AB/2$  sin embargo realmente es mucho menor, lo cual dependerá de la geología del área de estudio.

Las aberturas utilizadas de  $AB/2$  en este proyecto son: 1, 2, 3, 5, 7, 10, 13, 16, 20, 25, 32, 40, 50, 65, 80, 100, 130, 160, 200, 250, 320, 400, 500 y 650 metros; aunque puede incrementarse o decrementarse la distancia entre los electrodos  $AB$ .



Líneas de corriente

Líneas de potencial

Figura 8. Fundamentos teóricos del método.

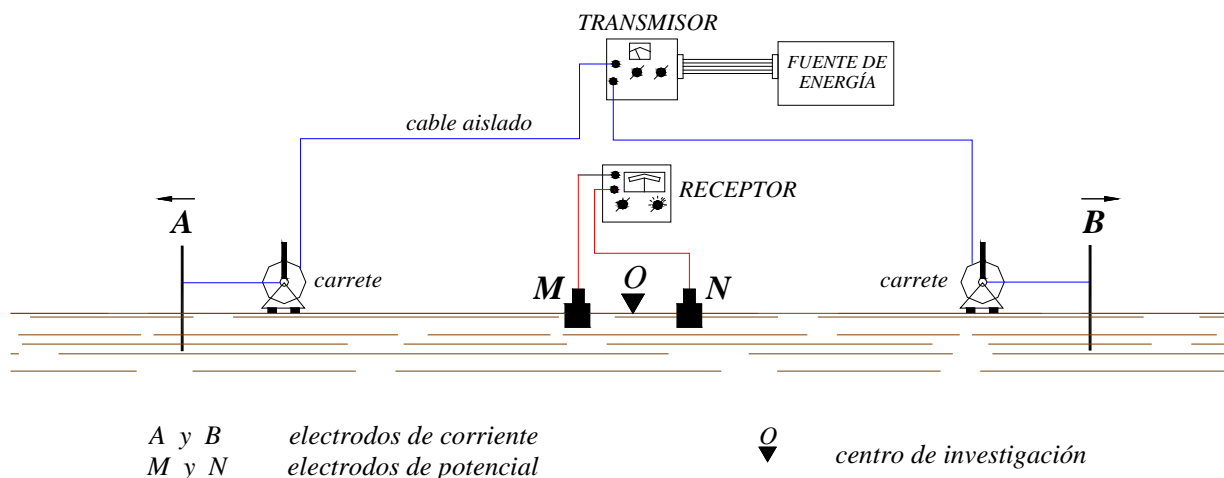


Figura 9. Arreglo tetrapolar Schlumberger.

Los valores de resistividad de una roca están determinados más que por su composición mineralógica, granulometría, cantidad y calidad del agua de formación, fundamentalmente por la porosidad y por la salinidad del agua. Todo esto hace que la resistividad de cada tipo de roca presente una gran variación.

Es importante tener en cuenta que en materiales detríticos la resistividad aumenta con el tamaño del grano; en una investigación hidrogeológica en este tipo de litología, se buscan resistividades altas que indican la presencia de materiales más gruesos, es decir de mayor permeabilidad.

En rocas se buscan las resistividades medias a bajas, que indican que la formación presenta fracturamiento y/o alteración. En este caso también puede presentarse el caso de que las zonas de menor resistividad no sean permeables si los planos de fracturamiento han sido ocupados por arcillas producto de alteración.

En una región determinada, la geología y la interpretación e integración adecuada de la geofísica aunado a la experiencia del área de estudio nos indicará que valores concretos de resistividad presenta cada una de las formaciones.

### 3.2 Descripción del equipo

El equipo utilizado para la ejecución del levantamiento de campo consistió de un transmisor marca GEOELEC, modelo Tlalli T-1500 cuyas características son: salida 10Amp. Max., 100 a 1100 VCD en 11 pasos, dominio de tiempo de 2 y 4 seg., con un moto-generador MG-1.5 de 1850 W, 120 VCA nominal, 60 Hz.; y como receptor fue empleado un multímetro digital con eliminador de potencial natural; así como también los accesorios concernientes al equipo de trabajo.



Fotografía 1. Equipo utilizado en campo

### 3.3 Análisis de información

El análisis profundo de la información geoelectrónica recolectada requiere de los siguientes dos tipos de presentación:

- Secciones de isorresistividad aparente: La finalidad de estas secciones es la de mostrar en forma objetiva el comportamiento vertical y la distribución horizontal de la resistividad a lo largo de la sección para inferir cualitativamente rasgos estructurales y variaciones litológicas de las características físicas del subsuelo a una profundidad dada.
- Secciones geoelectrónicas o electroestratigráficas: Con los parámetros reales de los modelos geoelectrónicos estratificados (resistividades-espesores), se forman secciones geoelectrónicas a manera de una sección geológica elaborada con perforaciones. En tales secciones las unidades de resistividad real reproducen cercanamente la posición, forma y otras características del subsuelo tales como fallamientos. La evaluación en este caso es cuantitativa, deduciéndose los rasgos geológicos principales con la ayuda de pozos y afloramientos de roca

### 3.4 Procesamiento de datos

Para cada sondeo eléctrico se graficaron los valores calculados de resistividad  $\rho$ , contra la distancia  $AB/2$  en papel bilogarítmico, resultando la curva de resistividad aparente  $\rho$ ; posteriormente se hace un ajuste por “empalme”, convirtiendo las curvas de cada SEV en trazos continuos.

En estas gráficas se observa que los puntos de inflexión característicos corresponden a cambios en las propiedades físicas del subsuelo y están directamente relacionados a cambios litológicos, esta información analizada adecuadamente con la información geológica, es de gran importancia, pues de ello depende una interpretación acertada de la interpretación litológica del subsuelo.

Una vez obtenidas las curvas de resistividad aparente para cada SEV, se genera un modelo con el método de punto auxiliar, empleando curvas patrón de dos capas y sus correspondientes gráficas auxiliares A, H, K y Q; realizando los cálculos correspondientes se obtienen las resistividades verdaderas.

Finalmente el modelo de SEV preliminar fue ajustado con el programa de computo O'Neill-12. Con el cual se generaron los cortes geoelectricos para cada SEV y finalmente se conformaron las secciones geoelectricas correspondientes.

La interpretación cualitativa consiste en obtener una distribución espacial de resistividades generadas por la respuesta de las anomalías y estructuras litológicas.

Esta interpretación se realizó configurando los datos de resistividad aparente en función de su profundidad, en este caso se utilizó el programa Surfer para realizar las configuraciones y así obtener las secciones de isoresistividad aparente.

La interpretación cuantitativa consiste en obtener las resistividades verdaderas y espesores, con ellos se genera un corte geoelectrico o sección geoelectrica a partir de las curvas de resistividad verdadera. Esta última puede hacerse por métodos gráficos, numéricos o mixtos, siendo este último el empleado para la interpretación de este trabajo.

### 3.5 Interpretación de resultados

Con base a la interpretación de los diez Sondeos Eléctricos Verticales, se realizaron cuatro secciones de isoresistividad aparente con su correspondiente sección geoelectrica distribuidas como se observa en el plano de la figura 10.

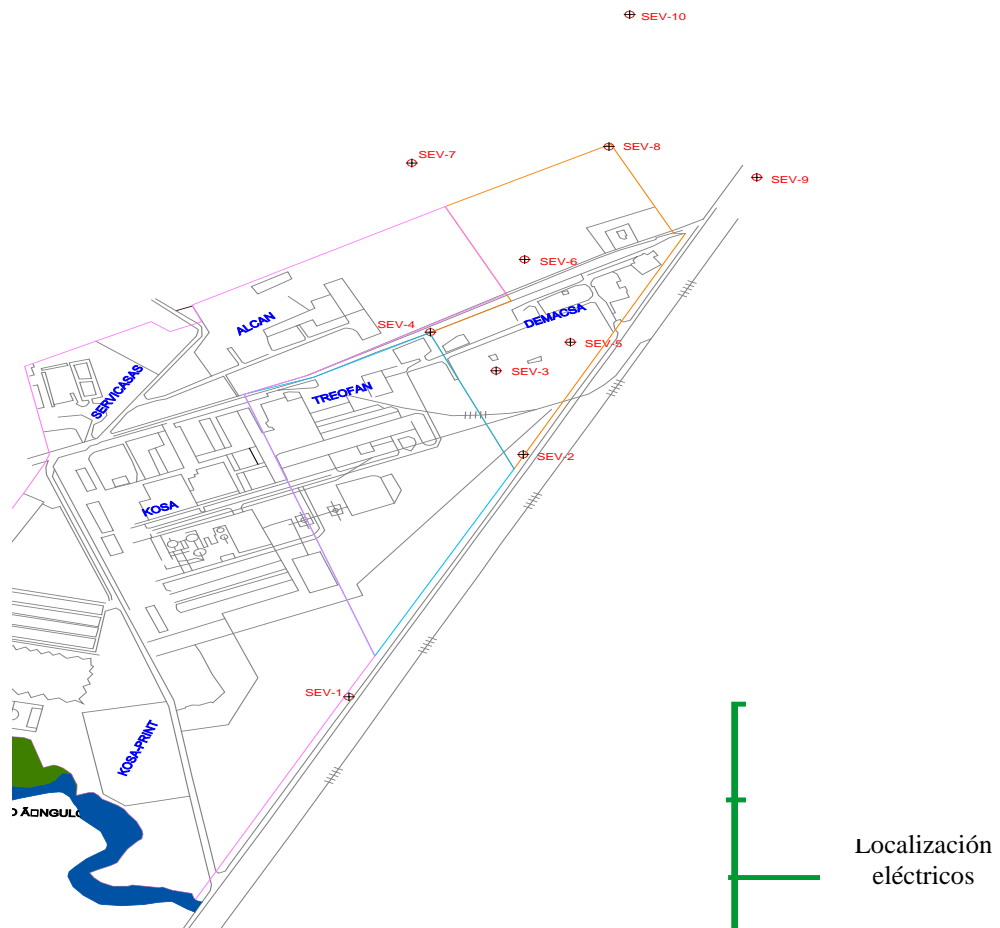


Figura 10.  
de los sondes  
verticales

#### 3.5.1 Secciones de isoresistividad

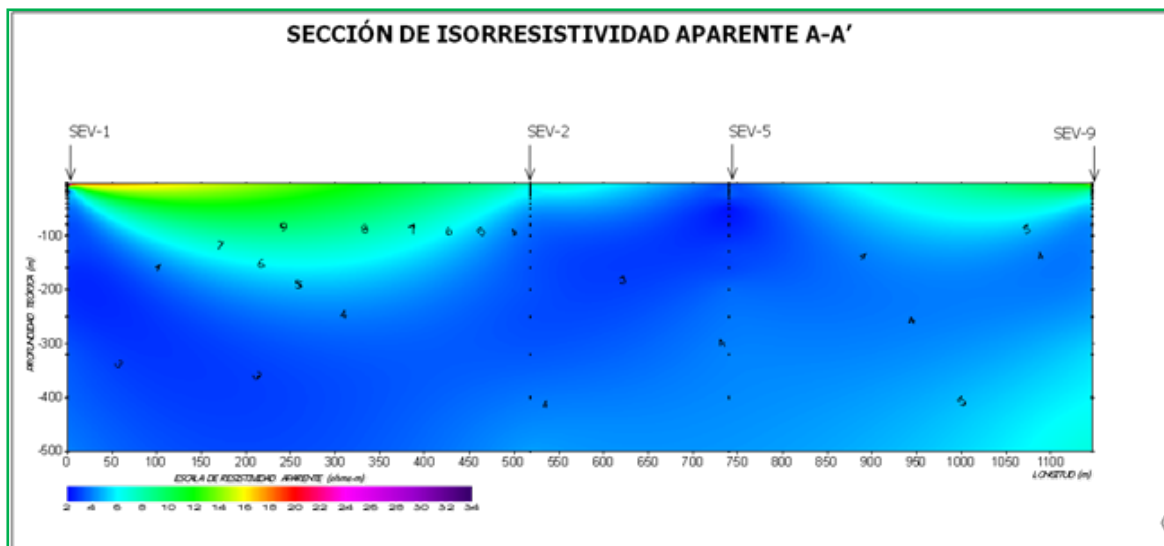
Las resistividades mostradas en las secciones son aparentes así como la posición y profundidad de los estratos, debido a que la interpretación es del todo cualitativa.

Sin embargo nos da una idea de la estructura geológica la cual sirve de apoyo para la integración de las secciones geoeléctricas.

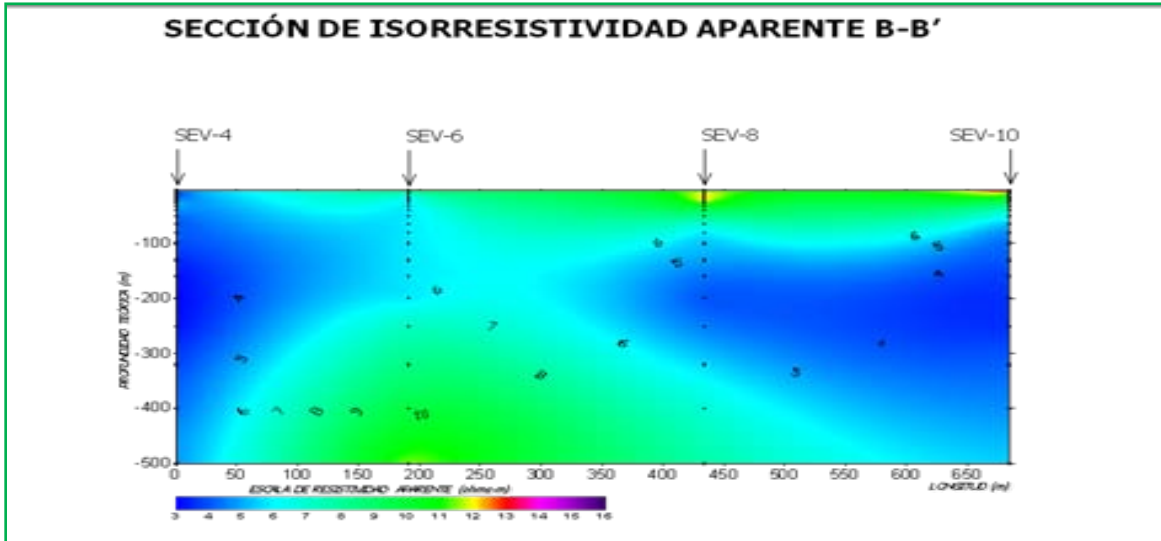
### **Sección de isorresistividad aparente A-A'**

Esta sección está integrada por cuatro sondeos realizados en el área de estudio (SEV-1, SEV-2, SEV-5 y SEV-9), con longitud total de 1146 m; la cual muestra en tonos rojos, naranjas y amarillos resistividades altas asociadas con arenas como puede observarse superficialmente en el SEV-1; los tonos verdes indican resistividades medias relacionadas en superficie con arcillas con bajo contenido de arenas; a profundidad se relaciona con un paquete volcanoclástico constituido por arenas, arcillas y fragmentos de roca y/o basalto fracturado saturado con agua de buena calidad; los tonos azules predominan en la sección se relacionan con arenas y arcillas de origen lacustre saturadas con agua de mala calidad. Superficialmente, la estratigrafía localizada en los cuatro sondeos se infiere impermeable.

### **Sección de isorresistividad aparente B-B'**

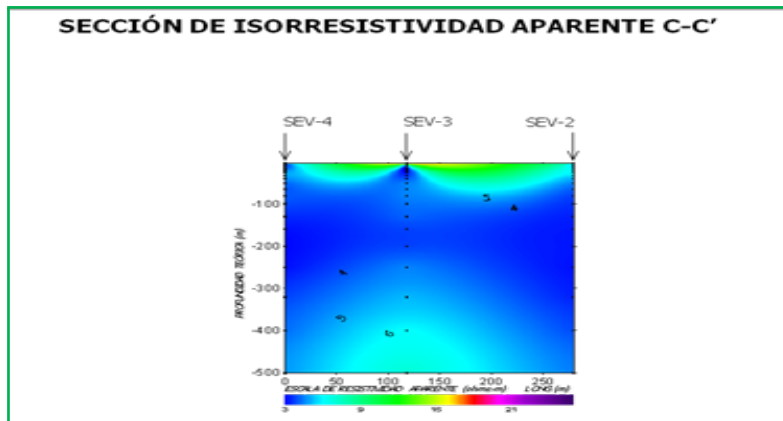


Esta sección está integrada por cuatro sondeos realizados en el área de estudio (SEV-4, SEV-6, SEV-8 y SEV-10), con longitud total de 685 m; la cual muestra los tonos verdes en superficie resistividades medias relacionadas con arcillas con bajo contenido de arenas; a profundidad se asocia con el paquete volcanoclástico constituido arenas, arcillas y fragmentos de roca y/o basalto fracturado con agua de buena calidad; los tonos azules corresponden a resistividades bajas y se asocian con arenas y arcillas de origen lacustre saturadas con agua de mala calidad. La estratigrafía superior se considera impermeable debido a las resistividades bajas que presenta la sección, atañidas a materiales de textura fina.



### Sección de isorresistividad aparente C-C'

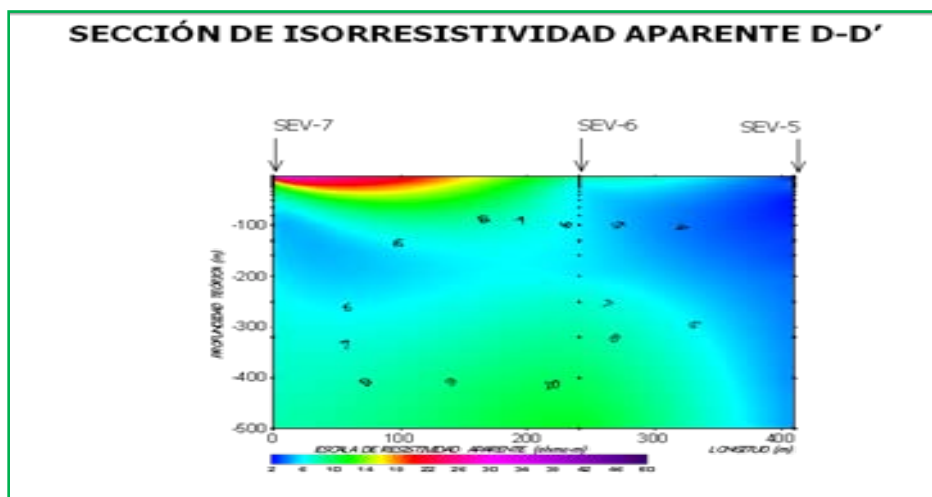
Esta sección está integrada por los sondeos realizados en el área de estudio (SEV-2, SEV-3 y SEV-4), con longitud total de 280 m; la cual muestra en tonos amarillo, naranja y rojo resistividades altas concernidas con arenas como se observa superficialmente en el SEV-3; los tonos verdes pertenecientes a resistividades medias, superficialmente pueden asociarse con arcillas con bajo contenido de arenas y con arcillas, a profundidad con el paquete volcanoclástico constituido por arenas y arcillas con fragmentos de roca y/o basalto fracturado saturado con agua de buena calidad; los tonos azules a resistividades bajas relacionadas con arenas y arcillas lacustres saturadas con agua de mala calidad. La estratigrafía de esta sección también puede presumir impermeable debido al alto contenido de materiales finos.



### Sección de isorresistividad aparente D-D'

Esta sección está integrada por tres sondeos realizados en el área de estudio (SEV-5, SEV-6 y SEV-7), con longitud total de 410 m; la cual muestra en tonos amarillo, naranja, rojo y violeta resistividades altas asociada con arenas, localizadas en superficie del SEV-7; los tonos verdes se asocian con resistividades medias, superficialmente se asocia con arcillas con bajo contenido de arenas y con arcillas, a profundidad se relacionan con el paquete volcanoclástico constituido por arenas, arcillas y fragmentos de roca y/o basalto fracturado saturado con agua de buena calidad; los tonos azules corresponden a resistividades bajas relacionadas con arenas y arcillas lacustres saturadas con agua de mala calidad. La cobertura superior constituida por materiales finos hace que ésta sea impermeable.





### 3.5.2 Secciones geoelectricas

En esta se aprecian cinco unidades geoelectricas, las cuales se presentan en los apéndices 3-2 a 3-5. cuyas características cuantitativas se describen a continuación.

#### UNIDAD A1

Se detectó con resistividad de 7 a 20 ohms–metro, se asocia con un depósito superficial arcilloso con bajo contenido de arenas, de baja permeabilidad. Se registró en los diez sondeos realizados en el área de estudio, con espesores variables. No presenta importancia geohidrológica debido a su pequeño espesor y también se deduce que no puede ocurrir infiltración de aguas pluviales mediante ésta estratigrafía hacia el subsuelo debido al mayor porcentaje de finos.

#### UNIDAD A2

Se registró con resistividad de 45-55 ohms–metro, se relaciona con la cubierta superficial conformada por arenas de buena permeabilidad. Se detectó en los SEV's 1, 3 y 7, con espesor de 2.1, 1.7 y 2.2 m respectivamente, no presenta importancia geohidrológica debido a su pequeño espesor, el agua pluvial que pudiera infiltrarse por ésta unidad tiende a retenerse en la unidad inferior.

#### UNIDAD A3

Se determinó con resistividad de 2 a 4 ohms–metro, se relaciona con un paquete arcilloso impermeable. Se localizó en los SEV's 1, 2, 3, 4 y 5, con espesor de 11.9, 5.5, 18.8, 4.1 y 3.8 m respectivamente, no presenta importancia geohidrológica debido a su pequeño espesor. Se considera una unidad impermeable así que el agua pluvial tiene bajas posibilidades de infiltrarse por ésta unidad e ir al subsuelo.

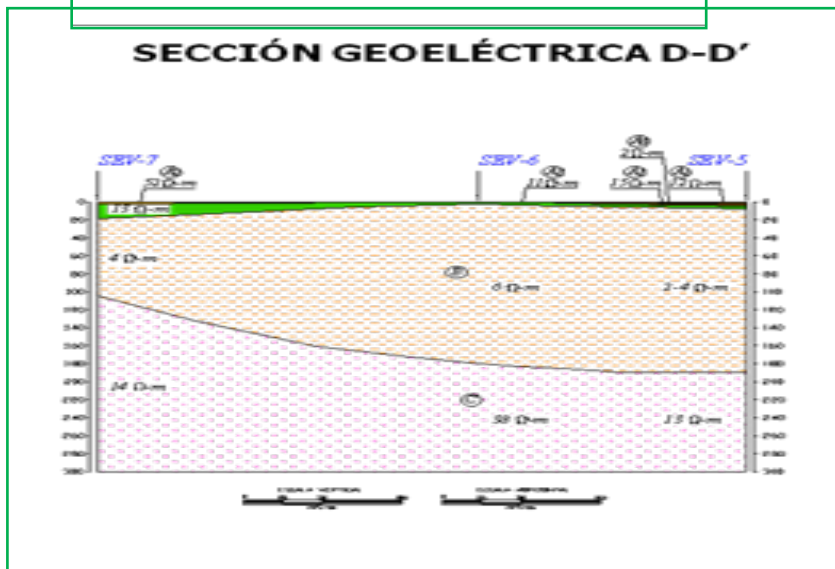
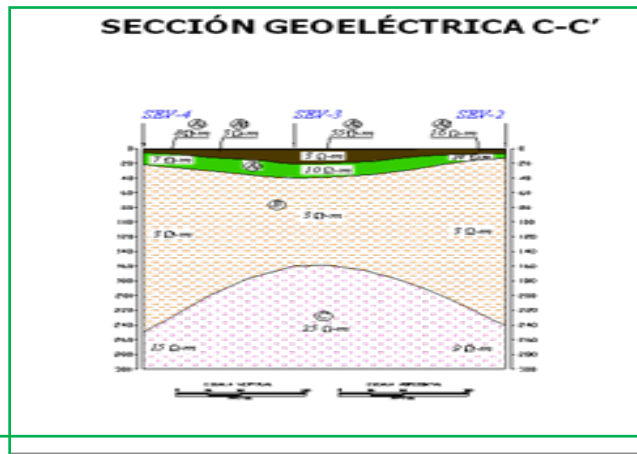
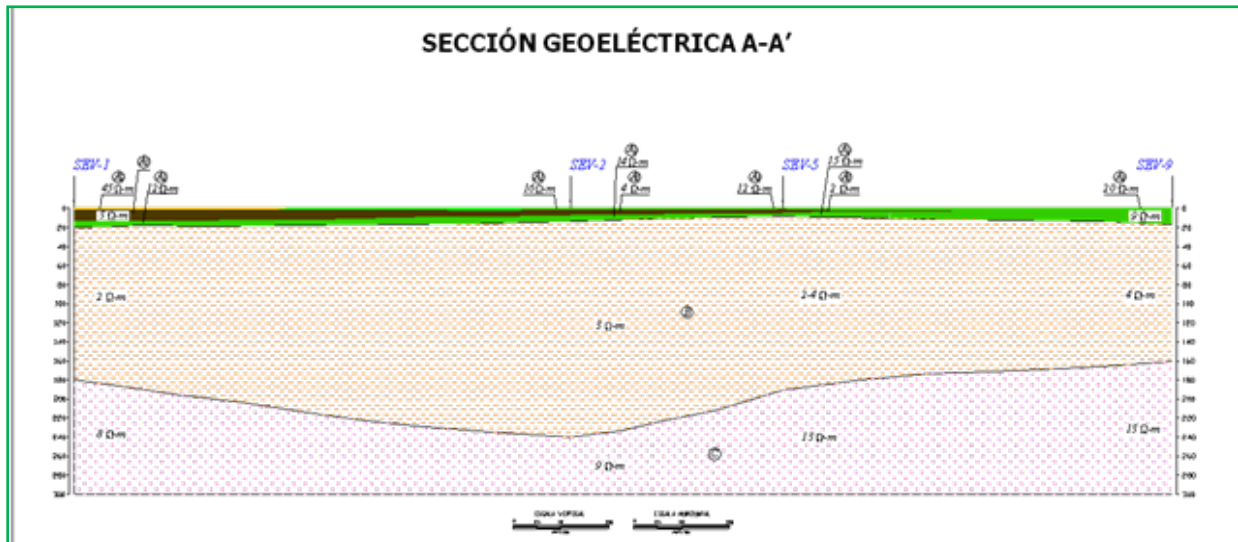
La estratigrafía impermeable del área la conforman las unidades A1 y A3 con lo que ambas hacen un espesor para los 10 sondeos de 17.4, 13, 38.3, 23, 7.7, 2.7, 16.8, 25.5, 16.5 y 22 m, en orden del SEV-1 al SEV-10.

#### UNIDAD B

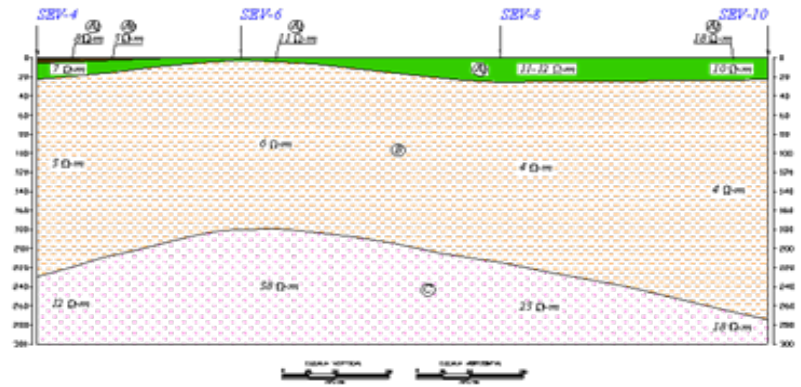
Se registró con resistividad de 2-9 ohms–metro, se relaciona con un paquete de arenas y arcillas de origen lacustre saturado con agua de mala calidad. Se presenta en los diez sondeos realizados con espesores potentes de 160.5, 227, 120, 207, 182.3, 177.3, 86, 189.5, 143.5 y 253 m respectivamente del SEV-1 al SEV-10. No presenta importancia geohidrológica debido a la presencia de agua de mala calidad.

#### UNIDAD C

Esta unidad geoelectrica presenta resistividad de 8-46 ohms-metro, se asocia con un paquete piroclástico constituido por arenas, arcillas y fragmentos de roca y/o basalto fracturado; saturado con agua de buena calidad. Se presenta en los diez sondeos realizados para el área de estudio a la profundidad de 180, 227, 160, 230, 190, 180, 105, 215, 160 y 275 m respectivamente. Esta unidad se encuentra saturada con agua de buena calidad y es la unidad de interés para los fines que se persiguen en el presente estudio.



### SECCIÓN GEOELÉCTRICA B-B'



## 4 Caracterización de suelo y residuos

### 4.1 Investigación de suelo y residuos

Para llevar a cabo las actividades de investigación de suelo y residuos en las instalaciones de la planta en donde se encuentra el área de estudio, localizadas en la zona industrial de Zacapu, Michoacán., se emplearon los equipos y técnicas que se describen en los siguientes puntos.

#### 4.1.1 Equipos de Perforación Ambiental

El concepto de perforación, como se usa en este documento, significa avanzar sobre un orificio hecho en el terreno usando técnicas y equipo de poder apropiados.

Para ello, se emplearon tanto técnicas manuales (Hand Auger-AMS Environmental Soil Sampling Kit), como un equipo de Barrenación Helicoidal Hueca (CME-55).

#### 4.1.2 Perforación con equipo manual (Hand Auger)

Con respecto a la realización de sondeos manuales, el equipo empleado fue el AMS Environmental Soil Sampling Kit (Hand Auger), que cuenta con una serie de ademes de acero inoxidable, un martillo, un recolector de núcleos y accesorios complementarios para poder obtener la muestra representativa a la profundidad determinada.

El mecanismo de barrenación está conformado por un barreno hueco de cuchillas helicoidales; las cuales van cortando e impulsando el recorte por dentro del barreno, hasta llegar a la profundidad deseada.



Figura 11. Equipo de perforación ambiental (AMS Environmental Soil Sampling Kit (Hand Auger)).

El hand Auger sólo se utiliza en suelos blandos y granulares dentro de la clasificación C ó D según la EPA/OSHA, compuestos por materiales arcillosos, limosos y arenosos, con una capacidad de prospección de hasta 2 m de profundidad.



Fotografía 2. Perforación manual usando Hand Auger

Para realizar estas actividades de perforación, en los sitios en los que se cuenta con losa de concreto, es necesario realizar primeramente una perforación sobre el concreto, esta actividad se realiza con una nucleadora, la cual va cortando el punto seleccionado para perforar y extraer el núcleo de concreto.



Fotografía 3. Perforación previa con nucleadora antes de la perforación manual.

#### **4.1.3 Perforación con equipo mecánico (Barrenación Helicoidal Hueca)**

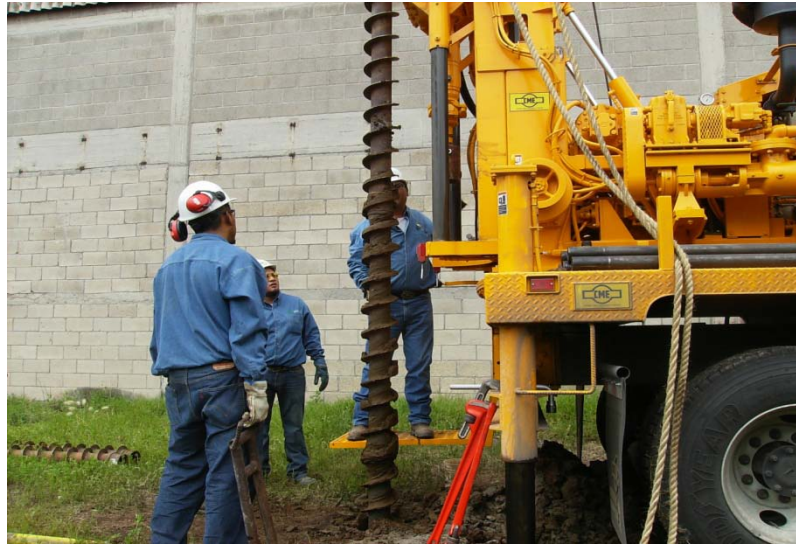
El Equipo de perforación helicoidal hueca CME-55, consiste de una máquina perforadora con motor industrial conformada por una torre de 8,0 m., malacates, bombas y plataforma de perforación; los cuales están montados en un camión.

La perforación de los sondeos ambientales con este equipo, se lleva a cabo mediante barrenos helicoidales Huecos (Hollow STEM auger) de 1,52 m de longitud. La operación de la perforadora es mediante palancas que se encuentran en el panel de control, esto permite al perforista colocar el barreno con su cabeza dentada en el punto exacto a perforar y/o muestrear.

La capacidad de este equipo es de 40 m. de profundidad con barrenos de 6"5/8; de 19,5 m. de profundidad con barrenos de 8" y de 24 m de profundidad con barrenos de 10".



Fotografía 4.  
mecánica usando



Perforación  
Barrenación

Helicoidal Hueca

Ninguno de los equipos utilizados requiere de fluidos de perforación para barrenar, lo cual garantiza la inalterabilidad del muestreo.

Los procedimientos de perforación que se realizan fueron llevados a cabo durante la ejecución de este proyecto con base a los siguientes protocolos:

- **ASTM D 5784** Guide for Use of Hollow- Stem Augers for Geo-environmental Exploitation and Instalation of Subsurface Water-Quality Monitoring Devices.
- **ASTM D 6151** Standard Practice for Using Hollow-Stem Augers for Geotechnical Exploration and Soil Sampling.

#### 4.1.4 Proceso de descontaminación del equipo de perforación

Con la finalidad de disminuir las fuentes de error en el muestreo, se procedió al lavado del equipo y herramientas de exploración, antes y después de cada sondeo realizado.

Dicha operación fue efectuada de conformidad con el procedimiento:

- **ASTM D 5088**, Standard Practice for Decontamination of Field Equipment Used at Nonradioactive Waste Sites.

#### 4.1.5 Equipo de medición de gases de suelo

Las lecturas de gases de suelo se llevaron a cabo por medio de un equipo de medición portátil que genera señales de alarma cuando las condiciones son peligrosas para la salud humana. Este equipo detecta e indica concentraciones de vapores orgánicos en el modo sensitivo de ppm y en el modo de límite inferior de explosividad (LIE).

Los datos que proporciona este instrumento tienen dos funciones principales

- La primera consiste en evaluar el contenido de gases y explosividad en el ambiente de trabajo, para evitar poner en riesgo la salud de las personas en el sitio
- La segunda, consiste en evaluar el contenido de gases y explosividad en las muestras de suelo y/o en el interior de la perforación, para indicar la posible presencia de contaminantes orgánicos.



Fotografía 5.  
suelo

Medición de gases en

#### 4.1.6 Registros de perforación ambiental

Todas las perforaciones de carácter ambiental realizadas durante este proyecto, fueron descritas en su registro de perforación, el cual contiene la información necesaria para reconstruir los eventos y observaciones del sitio de trabajo.

En la figura 11, se representa un corte litológico realizado a partir de la información observada en campo.

Los registros de perforación ambiental contienen la localización, fecha, tipo de perforadora, tipo de sondeo, observaciones, tipo de muestreo, profundidad de perforación, registro gráfico, profundidad de muestreo, clasificación del suelo, clasificación visual del suelo y notas.

Una vez concluida cada perforación se registra la profundidad total y la profundidad del último muestreo. Todos los registros de perforación en las áreas evaluadas se incluyen como apéndice al final de este documento.

La información técnica contenida en el registro de perforación se reporta, tomando como referencia el siguiente protocolo:

- **ASTM D 2488-90**; Standard Practice for Description and Identification of Soils (Visual-Manual Procedure).

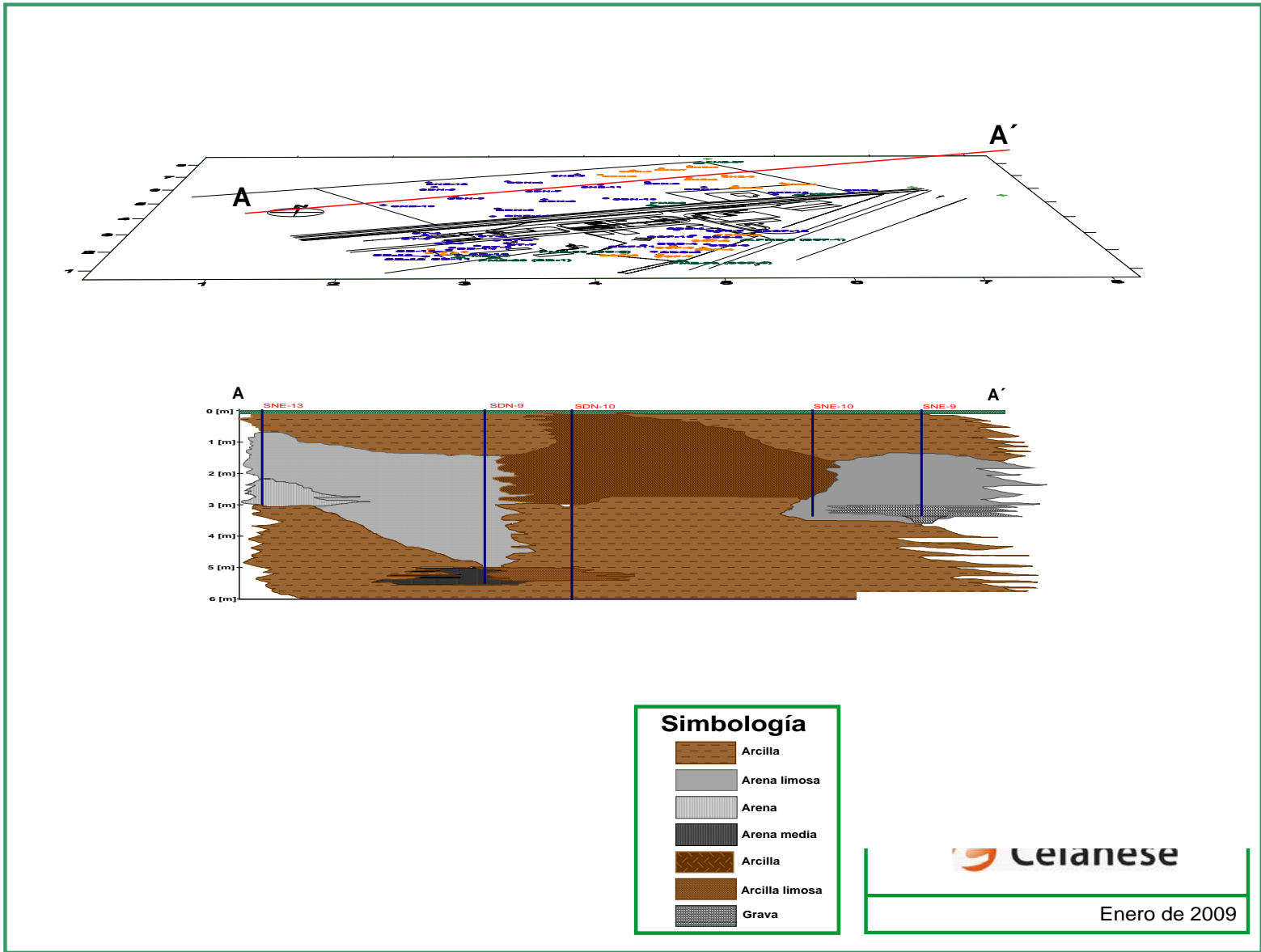


Figura 11. Perfil litológico en el área de estudio

estudio



## 4.2 Muestreo de suelo

El muestreo de suelo se realizó de acuerdo a los requerimientos especificados en la Norma Oficial Mexicana **NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004** que establece los “Criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plomo, selenio, talio y Vanadio”.

Para el caso de las muestras que no se encontraron listadas en esta norma, se utilizó el **Regional Screening Levels for Chemical Contaminants at Superfund Sites (RSLChC)**, versión 2008, que sustituyen a los PRGs-2004 (Preliminary Remediation Goals).

Las actividades de perforación y muestreo de suelo que se desarrollaron en las instalaciones de la planta de procesos químicos, fueron de manera general las siguientes

- Perforación de 6 sondeos ambientales a una profundidad máxima de 2 metros mediante la técnica de muestreo manual (hand auger) en la zona de la antigua bodega localizada en la parte Este de la planta en dirección suroeste de los tanques de almacenamiento. Se tomaron 2 muestras de suelo por cada sondeo mismas que fueron identificadas con las iniciales SB, seguidas del número consecutivo de sondeo, tomado a partir de las perforaciones realizadas en los estudios previos, continuando con la profundidad a la que se colecto la muestra.
- Perforación de 8 sondeos ambientales a una profundidad promedio de 2 metros mediante la técnica de muestreo manual (hand auger) en el área de tanques cloruro de metilo y oxido de propileno Se tomaron 2 muestras de suelo por cada sondeo mismas que fueron identificadas con las iniciales STD, seguidas del número consecutivo del sondeo, continuando con la profundidad a la que se colecto la muestra..
- Perforación de 6 sondeos ambientales a una profundidad promedio de 3.5 metros mediante la técnica de muestreo mecánico (barrenación helicoidal hueca) en el área de pruebas contraincendios ubicada en la parte Noreste de la planta. Se tomó 1 muestra de suelo por cada sondeo mismas que fueron identificadas con las iniciales SNE, seguidas del número consecutivo de sondeo, tomado a partir de las perforaciones realizadas en los estudios previos, continuando con la profundidad a la que se colecto la muestra.
- Perforación de 4 sondeos ambientales a una profundidad promedio de 3.5 metros mediante la técnica de muestreo mecánico (barrenación helicoidal hueca) en el área de un campo de futbol ubicado en la parte Norte de la planta. Se tomó 1 muestra de suelo por cada sondeo mismas que fueron identificadas con las iniciales SCF, seguidas del número consecutivo de sondeo, tomado a partir de las perforaciones realizadas en los estudios previos, continuando con la profundidad a la que se colecto la muestra.

### 4.2.1 Aseguramiento de calidad y validez del muestreo

Las muestras de suelo colectadas en esta investigación, fueron introducidas en frascos de vidrio de boca ancha con capacidad de 125 ml, con tapa y sello de teflón perfectamente descontaminados, los cuales a su vez se colocaron en contenedores térmicos con hielo para su conservación a una temperatura aproximada de 4° C, misma que se mantiene hasta su recepción en el laboratorio.

Cada uno de estos recipientes fue etiquetado con la siguiente información: Identificación de la muestra, número de frasco, tipo de muestra, fecha de muestreo, hora de muestreo, tipo de análisis, y nombre y firma del muestreador. Asimismo, se colocó una etiqueta en forma de cincho, sellando la tapa de cada frasco.

Como parte del aseguramiento de calidad y validez del muestreo, las muestras de suelo que se enviaron al laboratorio analítico fueron debidamente registradas en una cadena de custodia, en la que se indicó el tipo de análisis a realizar, bajo las normas o protocolos correspondientes.

Propiamente, la cadena de custodia es el documento que establece la posesión y registro de cada muestra colectada, testificando las condiciones de transportación, entrega y características de conservación al ser enviadas al laboratorio para su análisis químico.

Dicho documento contiene, entre otros datos, la fecha, hora del muestreo, la matriz, el preservador y el número de recipiente de cada uno de los puntos muestreados, además de todos los datos del personal y de la empresa que envían las muestras y del laboratorio que las recibe.

La incorporación de la información requerida en la cadena de custodia, fue realizada siguiendo los procedimientos establecidos en el protocolo

- **ASTM D 4845**; Standard Guide for Sampling Chain-of-Custody Procedures.

Con la intención de contar con un indicador de la calidad del análisis, se incluyeron dos muestras para evaluar la calidad del muestreo en campo así como la recolección de duplicados de las muestras, con la finalidad de evaluar el desempeño del laboratorio analítico

#### 4.3 Muestreo de residuos

Además del muestreo de suelo, en la estrategia de investigación ambiental del área de estudio, se determinó obtener muestras de los residuos enterrados a una profundidad aproximada de 3 metros, en el área del campo de fútbol norte y sur, para verificar la posible afectación por la presencia de los mismos al el suelo o el agua subterránea.

En el caso de las muestras de residuos, se realizó de acuerdo a los requerimientos de la Norma Oficial Mexicana **NOM-052-SEMARNAT-2005**, que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos.

El muestreo de residuos básicamente consistió en seguir los mismos procedimientos de perforación que en el caso de suelo, es decir utilizando la técnica de muestreo mecánico (barrenación helicoidal hueca).

En este caso, la nomenclatura de estos sondeos, así como de las muestras colectadas, se compone por la iniciales **S** de Sondeo, **D** de Depósito de residuos, **N** de Norte (para el caso de las muestras colectadas en el campo norte), o **S** de Sur (para el caso de las muestras colectadas en el campo sur) incluyéndoles los números 1 y 2 para diferenciarlas entre sí.

Se realizaron 15 sondeos ambientales con la toma de un total de 31 muestras simples, de las cuales se realizaron solamente 8 muestras compuestas, a esta últimas de les asigno la nomenclatura MCD, **M** de muestra, **C** de compuesta y **D** de Depósito de residuos, todas las muestras colectadas para ser analizadas se obtuvieron a una profundidad de 5m.

Las actividades para obtener las muestras consistieron en la perforación y obtención de muestras para análisis. Se realizaron sondeos identificados del SDN-1 al SDN-10. Estos sondeos se perforaron hasta una profundidad de entre 5,6 a 7.0 m para verificar la profundidad de las celdas de relleno, todas las muestras se tomaron a 5 m debido a que se encontró suelo natural.

La litología observada en todos los sondeos fue generalmente material de relleno arcilloso gris claro a café claro de los 0 a los 7 m se presenta un material compacto, dureza media, plasticidad baja, humedad media a

alta, en general no presentan olor ni impregnación aparente a excepción de los sondeos SDN-4 y SDN-5 donde se hallo un espesor muy considerable de material plástico con presencia de producto fase libre.

En el sondeo SDN-6 se encontró escasa basura (tela, plástico, etc) de los 3,0 a los 4.7 m. Se determino también que en los sondeos se presento horizontes de arenas y gravas bien clasificadas gris oscuro, presentan manchas blanquizas, humedad alta a saturada, se percibió un olor a podrido en el sondeo SDN-8, este material se presenta en promedio de los 3,0 a los 5,2 m.

De acuerdo a las explosividades y las ppm, los sondeos SDN-3, SDN-4 y SDN-5 presentaron los valores más altos con 280, 400 y >1000 ppm y 11%, 12% y 47% de explosividad respectivamente, esto producto del material plástico impregnado por producto fase libre.

Una vez obtenidas las 31 muestras de la zona de residuos, se procedió a homogenizar las muestras para crear las 8 muestras compuestas.

#### 4.4 Análisis de laboratorio

Para los análisis de las muestras de suelo y residuos, se utilizaron los servicios de un laboratorio nacional reconocido y acreditado ante la Entidad Mexicana de Acreditación (EMA).

##### 4.4.1 Muestras de suelo

##### 4.4.1.1 Relación de muestras

Los parámetros analizados por el laboratorio para las muestras de suelo, fueron Compuestos Orgánicos Volátiles (VOC's), Metales (Cu, Zn, Al, Sb, Pb), Sulfatos, Vanadio y determinación de pH.

Se enviaron un total de 38 muestras al laboratorio más 2 duplicados.

La identificación de las muestras, las profundidades a las cuales fueron obtenidas y los tipos de análisis se muestran en las tablas siguientes:

ID Muestra	Prof.	VOCS	Metales*	SO4	Ph
SB-9	1m	X			
	2m	X			
SB-10	1m	X			
	2m	X			
SB-11	1m	X			
	2,10m	X			
SB-12	1m	X			
	2,10m	X			
SB-13	1m	X			
	2m	X			
SB-14	1m	X			
	2m	X			

\*RCRA

Tabla 1. Resumen de muestras colectadas en la zona de la antigua bodega.

ID Muestra	Prof	Metales*	Sulfatos	Ph
STD-7	1m	X	X	
	1.5m			X
STD-6	1m	X	X	
	1.1m			X
STD-5	1m	X	X	
	1.1m			X
STD-2	0.9m	X	X	
	1m			X
STD-3	0.5m	X	X	
	0.6m			X
STD-4	0.5m	X	X	
	0.6m			X
STD1	1,5m	X	X	
STD-A**	N/A	X	X	
STD1	1,15m			X
STD-B**	N/A			X
STD-8	1m	X	X	
	1,8m			X

\*RCRA

\*\*Duplicados

Tabla 2. Resumen de muestras colectadas en el área de tanques

ID Muestra	Prof	Vanadio
SNE-9	3.5m	X
SNE-10	3.4m	X
SNE-11	3.5m	X
SNE-12	4.40m	X
SNE-13	2.1m	X
SNE-14	3.10m	X

Tabla 3. Resumen de muestras colectadas en él área de pruebas contraincendio.

ID Muestra	Prof.	Vanadio
SCF-9	4.5m	X
SCF-10	3.6m	X

SCF-11	3.6m	X
SCF-12	2.1m	X

Tabla 4. Resumen de muestras colectadas en la parte Norte de la planta.

#### 4.4.1.2 Métodos de análisis

Los métodos por los cuales fueron analizados los parámetros mencionados, se señalan en la siguiente tabla.

Método	Objetivo de Análisis
EPA 8260	Compuestos Orgánicos Volátiles (VOC's)
EPA 375.4	Sulfatos (SO <sub>4</sub> )
EPA 6010B	Vanadio (V)
NOM-021-SEMARNAT-2000	pH

Tabla 5. Métodos analíticos empleados por el laboratorio.

#### 4.4.1.3 Resultados del análisis de laboratorio

##### Compuestos Orgánicos Volátiles (VOC's)

En la tabla 6., se resumen los resultados de las muestras de suelo analizadas por VOC's, en ella se reportan solo aquellos analitos que arrojaron resultados.

Con la finalidad de establecer un parámetro comparativo sobre el grado de afectación en el subsuelo investigado, se seleccionó en primera instancia el listado de sustancias químicas contenido en las Metas Preliminares de Remediación (Preliminary Remedial Goals, PRG's), generadas por la USEPA, Región 9, 2004 y los Regional Screening Levels for Chemical Contaminants at Superfund Sites (RSLChC), versión 2008, que sustituyen a los PRGs-2004 (Preliminary Remediation Goals)

En la tabla inferior se resume los resultados de los análisis realizados, para el caso de los VOC's se han resaltado en negritas los resultados reportados como superiores a los límites de referencia especificados en el párrafo anterior.

De un total de 12 muestras analizadas por VOC's, solamente 2 reportaron compuestos clorados, cabe destacar que estas muestras pertenecen al mismo sondeo (SB-11) a las profundidades de 1 metro (se reportó presencia de Tetracloroetileno, 8,23 mg/kg) y, a la profundidad de 2,10 m, se detectó la presencia de Tricloroetileno con una concentración de 6,24 mg/kg, Tetracloroetileno 39,51 mg/kg, 1,4-Diclorobenceno 10,99 mg/kg y 1,2,4-Triclorobenceno 3 395,20 mg/kg, siendo este valor el más alto reportado por el laboratorio.

ID Muestra	SB-9-1m	SB-9-2m	SB-10-1m	SB-10-2m	SB-11-1m	SB-11-2,10m	SB-12-1m	SB-12-2,10m	SB-13-1m	SB-13-2m	SB-14-1m	SB-14-2m	LIMITES DE		
	Profundidad	1m	2m	1m	2m	1m	2,10m	1m	2,10m	1m	2m	1m	2m	PRG's	RSLCh C
Análisis	resultado (mg/kg)												(2004) *	(2008)*	
Tricloroetileno	<0,037	<0,037	<0,037	<0,037	<0,037	<b>6,24</b>	<0,037	<0,037	<0,037	<0,037	<0,037	<0,037	<0,037	<b>0,11</b>	14
Tetracloroetileno	<0,063	<0,063	<0,063	<0,063	<b>8,23</b>	<b>39,51</b>	<0,063	<0,063	<0,063	<0,063	<0,063	<0,063	<0,063	<b>1,3</b>	<b>2,7</b>
1,2,4-Trimetilbenzeno	<0,047	<0,047	<0,047	<0,047	<0,047	1,09	<0,047	<0,047	<0,047	<0,047	<0,047	<0,047	<0,047	170	280
1,3-Diclorobenzeno	<0,045	<0,045	<0,045	<0,045	<0,045	12,16	<0,045	<0,045	<0,045	<0,045	<0,045	<0,045	<0,45	600	NL
1,4-Diclorobenzeno	<0,064	<0,064	<0,064	<0,064	<0,064	<b>10,99</b>	<0,064	<0,064	<0,064	<0,064	<0,064	<0,064	<0,064	<b>7,9</b>	13
1,2-Diclorobenzeno	<0,039	<0,039	<0,039	<0,039	<0,039	20,39	<0,039	<0,039	<0,039	<0,039	<0,039	<0,039	<0,039	600	10000
1,2,4-Triclorobenzeno	<0,031	<0,031	<0,031	<0,031	<0,031	<b>3395,20</b>	<b>&lt;6,02</b>	<0,031	<0,031	<0,031	<0,031	<0,031	<0,031	220	790
1,2,3-Triclorobenzeno	<0,061	<0,061	<0,061	<0,061	77,23	808,71	<2,24	<0,061	<0,061	<0,061	<0,061	<0,061	<0,061	NL	NL

\*Los criterios de comparación corresponden a condiciones de uso de suelo industrial.

mg/Kg= miligramos por kilogramo

VOC's= Compuestos Orgánicos Volátiles

NL= No Listado

Tabla 6. Resumen de resultados VOC's en muestras de suelo

## Vanadio, Sulfatos y Metales

En la siguiente tabla se resumen los resultados de las muestras de suelo analizadas por Vanadio.

En las tablas resumen se incorporan los valores de concentración máximos que se usan como referencia para los metales analizados en suelos industriales, en primera instancia se utilizaron los establecidos en la legislación ambiental mexicana, considerándose la norma **NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004**, que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plomo, selenio, talio y Vanadio.

De las 10 muestras analizadas por Vanadio, ninguna reportó valores superiores a los establecidos en los límites de referencia.

<b>ID Muestra</b>	<b>Vanadio (mg/kg)</b>
SNE-9-3,5m	40,75
SNE-10-3,4m	77,62
SNE-11-3,5	132,51
SNE-12-4,40m	48,21
SNE-13-2,1m	45,21
SNE-14-3,10m	63,89
SCF9-4,5m	81,51
SCF10-3,6m	103,95
SCF11-3,6m	106,91
SCF12-2,1m	147,25
Promedio	84,78
Desviación Estándar	37,08
NOM-147*	1000
PRG'S (2004)*	1000**
RSLChc (2008)*	5200**

mg/Kg= miligramos por kilogramo

\*Los criterios de comparación corresponden a condiciones de uso de suelo industrial.

\*\*Vanadio y compuestos

Tabla 7. Resumen resultados de Vanadio en muestras de suelo

En la siguiente tabla se resumen los resultados de muestras de suelos analizadas por sulfatos.

<b>ID Muestra</b>	<b>Sulfatos (mg/kg)</b>
STD1-0,9m	1396,42
STD-A	4325,61
STD-8-1m	1038,94
STD-7-1m	1402,21
STD-6-1m	1411,06
STD-5-1m	228,50
STD-2-0,9m	7585,38
STD-3-0,5m	960,74



STD-4-0,5m	1173,54
Promedio	2169,16
Desviación Estándar	2324,89
PRG'S (2004)*	NL
RSLChc (2008)*	NL

mg/Kg= miligramos por kilogramo  
NL= No Listado

Tabla 8. Resumen de resultados de Sulfatos en muestras de suelo

En la siguiente tabla se resumen los resultados de muestras de suelos analizadas por metales RCRA, en ella se aprecia que el arsénico reporta valores superiores a los límites de comparación internacional, pero son inferiores para el caso de la normatividad mexicana.

ID Muestra	Parámetro Analizado (mg/kg)							
	Arsénico	Plata	Bario	Cadmio	Cromo	Mercurio	Plomo	Selenio
STD1-0,9m	<b>13,61</b>	0,46	96,60	7,55	46,87	0,57	4,90	1,77
STD-A	<b>13,61</b>	0,46	42,01	7,07	46,92	0,57	4,02	1,77
STD-8-1m	<b>13,61</b>	0,46	117,37	4,02	16,40	0,57	17,03	1,77
STD-7-1m	<b>13,61</b>	0,46	132,41	5,27	22,28	0,57	6,63	1,77
STD-6-1m	1,36	0,46	109,19	3,82	16,71	0,57	8,44	1,77
STD-5-1m	1,36	0,46	119,40	4,68	21,52	0,57	5,95	1,77
STD-2-0,9m	<b>13,61</b>	0,46	119,65	5,84	26,96	0,57	7,86	1,77
STD-3-0,5m	<b>13,61</b>	0,46	31,95	2,67	3,57	0,57	61,14	1,77
STD-4-0,5m	<b>13,61</b>	0,46	117,50	5,07	23,07	0,57	4,12	1,77
Promedio	10,88	0,46	98,45	5,11	24,92	0,57	13,34	1,77
Desviación Estándar	5,40	0,00	36,21	1,56	14,09	0,00	18,35	0,00
NOM-147*	260	5100	67000	450	NL	310	800	5100
PRG'S (2004)*	<b>1,6</b>	5100	67000	450	450	310	800	5100
RSLChc (2008)*	<b>1,6</b>	5100	190000	812	NL	310	NL	5100

\*Los tres criterios de comparación corresponden a condiciones de uso de suelo industrial.  
mg/Kg= miligramos por kilogramo

NL= No Listado

\*\*Como cromo total (1:6 ratio CrVI:Cr III)

\*\*\*Mercurio y compuestos

Tabla 9. Resumen de resultados por metales en muestras de suelo

## pH

En 8 muestras colectadas se determinó el pH de acuerdo con el método NOM-021-SEMARNAT-2000. El pH es una de las mediciones más comunes e importantes en los análisis químicos rutinarios del suelo, ya que controla las reacciones químicas y biológicas en el suelo.

La determinación del pH es afectada por varios factores tales como: el tipo y cantidad de constituyentes orgánicos e inorgánicos que contribuyen a la acidez del suelo, la concentración de sales en la solución, la reacción suelo: solución, la presión parcial del bióxido de carbono y el efecto de la suspensión asociado con el potencial de unión, etc.

Para la clasificación del suelo en cuanto a su valor de pH se presenta el cuadro siguiente, dicha clasificación pertenece a la NOM-021-SEMARNAT-2000.

Clasificación	pH
Fuertemente ácido	<5
Moderadamente ácido	5,1 – 6,5
Neutro	6,6 – 7,3
Medianamente alcalino	7,4 – 8,5
Fuertemente alcalino	>8,5

ID Muestra	pH
STD1-1,5m	4,03
STD-B	3,98
STD-8-1,8	8,34
STD-7-1m	5,93
STD-6-1.1m	7,35
STD-5-1.1m	5,61
STD-2-1m	4,2
STD-3-0.6m	3,5
STD-4-0.6m	4,07
Promedio	5,22
Desviación Estándar	1,70

Tabla 10. Resumen de resultados de pH en muestras de suelo

#### 4.4.2 Muestras de residuos

##### 4.4.2.1 Relación de muestras

Se tomaron 31 muestras simples que conformaron un total de 8 muestras compuestas de residuos, mezclado con arcillas. Todas las muestras compuestas fueron enviadas al laboratorio para ser analizadas por el método CRETIB (NOM-052).

La identificación de las muestras, las profundidades a las cuales fueron obtenidas y como se conformaron las muestras compuestas se muestran en las tablas siguientes.

ID - Muestra Compuesta	No. de ID. de muestras simples
MCD1 – 5m	SDN4 – 5m y SDN5 – 5m
MCD2 – 5m	SDN6 – 5m SDN7 – 5m SDN8 – 5m SDN9 – 5m SDN10 – 5m
MCD3 – 5m	SDN7 – 5m SDN1 – 5m SDN2 – 5m SDN9 – 5m SDN10 – 5m
MCD4 – 5m	SDN1 – 5m SDN2 – 5m SDN3 – 5m SDN4 – 5m SDN7 – 5m
MCD5 – 5m	SDN2 – 5m SDN4 – 5m SDN6 – 5m SDN7 – 5m SDN9 – 5m

Tabla 11. Relación de muestras simples y compuestas colectadas en el campo norte.

ID - Muestra Compuesta	No. de ID. de muestras simples
MCD6 – 5m	SDS1 – 5m SDS3 – 5m SDS4 – 5m
MCD7 – 5m	SDS2 – 5m SDS4 – 5m SDS5 – 5m
MCD8 – 5m	SDS3 – 5m SDS4 – 5m SDS5 – 5m

Tabla 12. Relación de muestras simples y compuestas colectadas en el campo sur.

#### 4.4.2.2 Métodos de análisis

Los métodos por los cuales fueron analizados los parámetros mencionados, se señalan en la siguiente tabla.

Análisis	Método
CRETIB	NOM 052 SEMARNAT 2005

Tabla 13. Métodos analíticos empleados por el laboratorio para residuos

#### 4.4.2.3 Resultados del análisis de laboratorio

En la tabla siguiente se resumen los resultados de las muestras analizadas por CRETIB.

Tabla 14. Resumen de resultados CRETIB en residuos

## **5 Caracterización y modelación numérica del agua subterránea**

### **5.1 Investigación de agua subterránea**

Para llevar a cabo las actividades de investigación de agua subterránea realizadas en las instalaciones de la planta industrial en donde se encuentra el área de estudio; se utilizaron los métodos, equipos y aplicaciones así como las técnicas descritas en los siguientes puntos.

Las actividades de muestreo de agua subterránea que se desarrollaron en las instalaciones de la planta de procesos químicos, fueron de manera general las siguientes

- Muestreo de 8 pozos de monitoreo de agua subterránea mediante el método de bajo flujo. Se tomó 1 muestra de agua en cada pozo mismas que fueron identificadas con las iniciales PMZ, seguidas del número consecutivo del pozo del que fueron tomadas.
- Muestreo de 4 norias mediante el método manual usando bailers. Se tomó 1 muestra de agua en cada noria mismas que fueron identificadas con las iniciales MC, seguidas del número consecutivo de la noria de la que fueron tomadas.

### **5.2 Muestreo por el método de bajo flujo (low flow)**

El método de bajo flujo es el proceso para el muestreo de agua utilizado para investigar la carga de compuestos orgánicos e inorgánicos en un ambiente de flujo subterráneo.

La aplicación del método elimina las perturbaciones potenciales durante el muestreo mediante la estabilización y equilibrio de los parámetros físicos en campo (pH, temperatura, conductividad), lo que permite preservar, durante la extracción continua de agua del pozo, las características físico-químicas del medio estudiado.

En los últimos años, el muestreo de bajo flujo se ha convertido en un método reconocido y aprobado para obtener muestras altamente representativas del agua subterránea.

La agencia ambiental de los Estados Unidos (US EPA) emitió un procedimiento operativo estándar para el muestreo de bajo flujo de agua subterránea. Siguiendo dichos lineamientos se asegura la colecta de muestras que son representativas de las condiciones reales in situ de la formación.

El muestreo de bajo flujo contempla la extracción de muestras a rangos comparables con el flujo natural del agua subterránea, por lo que el abatimiento del nivel de agua se minimiza debido a que no se provoca un movimiento en exceso de agua dentro de la formación hacia el pozo, logrando también la disminución de la mezcla con agua estancada dentro del pozo.

Este muestreo consiste en introducir una manguera al pozo de monitoreo al nivel del tubo ranurado, esta manguera va conectada a la bomba peristáltica. La manguera que pasa por la bomba peristáltica se conecta a la celda del Multilector Horiba en donde se analizan las propiedades del agua subterránea.

Durante esta extracción de agua se realiza la medición de parámetros fisicoquímicos, los cuales nos indican en qué momento se debe tomar la muestra

Los resultados del análisis del flujo de agua son desplegados en tiempo real en la unidad de control electrónico y son monitoreados para verificar el momento de estabilización de los mismos.



Fotografía 6. Muestreo de método de bajo flujo

agua subterránea con el

El muestreo se realiza cuando se tienen 3 lecturas que coincidan en todos sus parámetros o estén dentro del rango de comparación ( $\pm 0.1$  Potencial de Hidrógeno,  $\pm 3\%$  Conductividad Eléctrica, 10 mV Potencial Oxígeno-Reducción y 10% para Turbidez y Oxígeno Disuelto). Esto garantiza la representatividad de la muestra colectada.

En la siguiente tabla se consignan las lecturas de los parámetros de campo observadas previo a la toma de muestras, en cada uno de los pozos de monitoreo.

ID	Fecha	Hora	Total de Agua purgada (L/m)	Prof. N.F.(m)	Ph	Cond ( $\mu\text{s}/\text{m}$ )	Turb (NTU)	DO (mg/L)	Temp °C	Sal	TDS %	$\delta t$	ORP Mv	Color
PMZ-5		11:21	8,8	2,62	7,82	0,391	-5	1,97	20,1	0,2	2,5	0	-132	claro
PMZ-8	03/12/2008	15:46	8,2	0,86	7,26	0,132	-5	3,14	21	0,1	0,9	0	-174	amarillento verdoso
PMZ-9	02/12/2008	13:20	9,7	2,15	7,27	0,325	-5	3,95	21,9	0,2	2,1	0	-147	—
PMZ-9A	02/12/2008	16:19	7	2,2	7,25	5,01	-5	2,89	25	3,3	30	22	-185	—
PMZ-10	02/12/2008	17:23	9	1,4	8,38	1,63	-5	3,56	19,9	1	10	6	-62	oscuro
PMZ-27	03/12/2008	12:27	12	1,71	8,2	0,528	-5	2,13	19,8	0,3	3,3	0	-294	amarillento
PMZ-29	02/12/2008	18:17	8	0,83	6,8	1,8	-5	3,81	19,9	1,1	12	7	-3	—
PMZ-30	03/12/2008	09:42	15,7	0,85	6,32	0,55	-5	1,38	20,2	0,3	3,5	1	-44	oscuro

Tabla 15. Resumen de lecturas de parámetros obtenidos en campo

Durante toda la fase del muestreo se mide periódicamente cada 3 minutos el nivel piezométrico del agua en el pozo, con la finalidad de verificar su fluctuación.

Determinar la profundidad a la cual se encuentra el nivel piezométrico del agua subterránea es un dato sumamente importante para el cálculo del volumen de la columna de agua presente en los pozos y para determinar la dirección de flujo del manto freático.

Todas las mediciones del nivel de agua se tomaron en el lado norte de la parte superior del tubo de PVC de los pozos de monitoreo.

La medición del nivel piezométrico durante la fase de lectura de parámetros y muestreo es importante ya que no se deben presentar los siguientes casos: descenso de más de 0.5 m, o extraer más de 0.5 l por minuto. Si se exceden estos datos se corre el riesgo de no extraer agua del acuífero ó provocar remoción de partículas del fondo del pozo.



Fotografía 7.  
piezométrico en

Medición de nivel  
pozos de monitoreo

Los procedimientos de muestreo de agua subterránea por el método de bajo flujo fueron llevados a cabo durante este proyecto con base a los siguientes protocolos:

- **ASTM D 5092**; Standard Practice for Design and Installation of Groundwater Monitoring Wells in Aquifers
- **ASTM D 5521**; Standard Guide for Development of Groundwater Monitoring Wells in Granular Aquifers.
- **ASTM D 6771**; Standard Practice for Low-Flow Purging and Sampling for Wells and Devices Used for Ground Water Quality Investigations
- **ASTM D 6089**; Standard Guide for Documenting a Ground Water Sampling Event

### 5.3 Muestreo por el método manual (bailers)

El muestreo de agua en las norias, se realizó de manera manual utilizando bailers.

El bailer se utiliza en columnas de agua cortas que por las características hidráulicas de la formación la recuperación del nivel estático es lenta, rebasa el alcance de la bomba, o se encuentre en una zona de materiales inflamables que restringa la utilización de una batería o generador eléctrico los cuales son necesarios para el funcionamiento de la Bomba Peristáltica utilizada en el método de bajo flujo.

En este caso por tratarse de norias en las cuales el agua es extraída regularmente por sus propietarios para el riego de jardines y alimento de animales (no consumo humano), no se hace necesario purgar un volumen de agua determinado de acuerdo a la columna de agua presente, por lo tanto la muestra se tomo directamente por medio de bailer.

Para este proyecto, se utilizo el bailer de polietileno, por ser un dispositivo desechable que se emplea una sola vez, con lo que se evita la ocurrencia de contaminación cruzada.



Fotografía 8. Norias

muestreadas por

método manual

El muestreo fue llevado a cabo con apego a los procedimientos establecidos en el protocolo siguiente:

- **ASTM D6699**; Standard Practice for Sampling Liquids Using Bailers

#### 5.4 Aseguramiento de calidad y validez del muestreo

De acuerdo a las especificaciones para la conservación de las muestras, se utilizaron recipientes apropiados en donde se introdujeron las muestras. En el caso se algunas muestras de agua, los recipientes contaban con soluciones ácidas adicionadas por el laboratorio, las cuales actúan como preservador.

Parámetro	Recipiente	Tiempo de máximo de retención	Preservador
Análisis de metales	Frasco de plástico de 500 ml boca chica, con tapa y sello.	6 meses	4 ° C
Análisis de Sulfatos (SO <sub>4</sub> )	Frasco de plástico de 500 ml boca chica, con tapa y sello.	14 días	4 ° C
Compuestos Orgánicos Volátiles (VOC's)	Frascos de vidrio de 40 ml (Viales)	14 días	pH <2 con H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 4 ° C
Compuestos Orgánicos Semivolátiles (SVOC's)	Frascos de vidrio de boca chica, color ámbar de 1 lt	7 días	4 ° C

Tabla 16. Recipientes, tiempo de retención y preservador para análisis de agua.

El tiempo máximo de retención o tiempo máximo de almacenamiento se refiere al lapso que no deberá ser excedido desde que se toma la muestra hasta que se realiza la extracción del analito de interés, por lo que durante el transcurso de la toma de muestras en campo, todos los recipientes fueron colocados en hieleras, con temperaturas cercanas a los 4 grados centígrados, para tal efecto se les adiciona hielo regularmente, y se revisan al inicio y al final de cada jornada de trabajo en campo.



Como parte del aseguramiento de calidad y validez del muestreo, las muestras de agua que se enviaron al laboratorio analítico fueron debidamente registradas en una cadena de custodia, en la que se indicó el tipo de análisis a realizar, bajo las normas o protocolos correspondientes.

La incorporación de la información requerida en la cadena de custodia, fue realizada siguiendo los procedimientos establecidos en el protocolo

- **ASTM D 4845**; Standard Guide for Sampling Chain-of-Custody Procedures.

Con la intención de contar con un indicador de la calidad del análisis, se incluyeron dos muestras para evaluar la calidad del muestreo en campo así como la recolección de duplicados de las muestras, con la finalidad de evaluar el desempeño del laboratorio analítico

## 5.5 Análisis de laboratorio

Para los análisis de las muestras de agua subterránea, se utilizaron los servicios de un laboratorio nacional reconocido y acreditado ante la Entidad Mexicana de Acreditación (EMA).

Los parámetros analizados por el laboratorio para las muestras de agua subterránea, fueron Compuestos Orgánicos Volátiles (VOC's), Compuestos Orgánicos Semi Volátiles (SVOC's), Sulfatos y Vanadio.

### 5.5.1 Relación de muestras

Se tomaron 12 muestras simples más 2 duplicados. Todas las muestras fueron enviadas al laboratorio para su análisis correspondiente. La identificación de las muestras se encuentra en la siguiente tabla.

Muestras agua subterránea	
Pozos de monitoreo	Norias
PMZ-5	MC -11
PMZ-8	MC-109
PMZ-9	MC-110
PMZ-9 A	MC-112
PMZ-10	
PMZ-27	
PMZ-29	
PMZ-30	

Tabla 17. Identificación de muestras de agua subterránea

### 5.5.2 Métodos de análisis

Los métodos por los cuales fueron analizados los parámetros mencionados, se señalan en la siguiente tabla.

Método	Objetivo de Análisis
EPA 8260B	Compuestos Orgánicos Volátiles (VOC's)
EPA 8270	Compuestos Orgánicos Semi Volátiles (SVOC's)
EPA 375.4	Sulfatos (SO <sub>4</sub> )
EPA 6010B	Vanadio (V)

Tabla 18. Métodos analíticos empleados por el laboratorio.

### 5.5.3 Resultados de análisis de laboratorio

### Compuestos Orgánicos Volátiles (VOC's)

En la tabla siguientes se presentan los resultados de Compuestos Orgánicos Volátiles (VOC's) en muestras de agua subterránea, en donde se aprecia que existen valores por arriba de los límites de comparación señalados en la normatividad, estos han sido presentados en rojo para facilitar su ubicación. Solo se han resumido los resultados que han reportado valores por el laboratorio.

En esta ocasión además de utilizar los PRG's como comparación, se han listado los analitos reportados en la Ley Federal de Derechos, en Materia de Agua, 2005 (límites de referencia son para uso urbano).

CAS	Analito	Muestras		Límites de referencia		
		PMZ-9A	PMZ-10	PGR 2004	RSLCh 2008	LFDMA 2005
75-01-4	Cloruro de vinilo	15,77	<1,359	0,02	0,016	0,000005
156-59-4	Cis-1,2-Dicloroetileno	<1,006	26,67	61	370	NL
79-01-6	Tricloroetileno	<1,216	12,79	0,028	1,7	0,00003
127-18-4	Tetracloroetileno	<0,932	303,5	0,1	0,11	0,000008
108-90-7	Clorobenceno	31,51	<0,833	11	91	0,00002
541-73-1	1,3-Diclorobenceno	14,15	12,54	180	NL	0,0004
106-46-7	1,4-Diclorobenceno	33,89	51,25	0,5	0,43	0,0004
95-50-1	1,2-Diclorobenceno	10,49	76,66	370	370	0,0004
120-82-1	1,2,4-Triclorobenceno	<0,887	5212	7,2	19	NL
87-61-6	1,2,3-Triclorobenceno	<1,286	1375	NL	NL	NL

Tabla 19. Resumen de muestras de agua analizadas por VOC's

### Compuestos Orgánicos Semi Volátiles (SVOC's)

De 14 muestras analizadas por SVOC's, solamente una reportó concentraciones superiores a los límites de referencia utilizados. Dicha muestra fue colectada del pozo PMZ-10 por el analito 1,2,4-Triclorobenceno (18 844,00 µg/L), siendo los límites de comparación de 7,2 y 19 µg/L para los PRG's y RSLChc, respectivamente

### Vanadio y Sulfatos

La siguiente tabla permite observar que de un total de 14 muestras colectadas, 5 muestras reportaron valores de concentraciones de Vanadio, por arriba de lo establecido en los límites de referencia.

ID Muestra	Vanadio (µg/L)	sulfatos (µg/L)
PMZ-5	<30,74	1 138 500
PMZ-8	<30,74	388 970
PMZ-D	<30,74	475 590
PMZ-9	<30,74	59 720
PMZ-9A	<30,74	16 550
PMZ-10	711,29	52 253 50
PMZ-27	44,42	370 190
PMZ-29	<30,74	7 835 680
PMZ-30	<30,74	1 636 150

MC-109	104,99	226 530
MC-110	<30,74	33 170
MC-112	347,44	569 480
MC-D**	620,83	374 180
MC-11	<30,74	34 670
Promedio	170,35	1 313 195,00
Desviación Estandar	249,27	2313320,92
PRG'S (2004)*	36	NL
RSLChc (2008)*	180	NL
LFDMA***	NL	250 000
NL= No Listado		
*Los criterios de comparación corresponden a condiciones de uso industrial.		
**Duplicado de MC-112		
*** Fuente de abastecimiento para uso público urbano		

Tabla 20. Resumen de resultados de Vanadio y sulfatos

En el caso de los sulfatos, 14 muestras sobrepasan los límites de comparación, *Estos límites son para fuente de abastecimiento para uso urbano.*

## 5.6 Isoconcentraciones

Utilizando mapas de iso-concentraciones así como la retícula de los pozos de monitoreo, las observaciones en campo y los resultados reportados por el laboratorios para las muestras colectadas durante este proyecto se ha podido interpretar la presencia de un área impactada.

Los resultados demuestran una posible fuente de contaminación, la cual puede ser generada en el área de la antigua bodega y con una migración hacia la parte baja (PMZ-9), de acuerdo a la dirección del flujo de agua estimada (hacia el este).

Las figuras de modelación de isoconcentraciones se presentan a continuación.

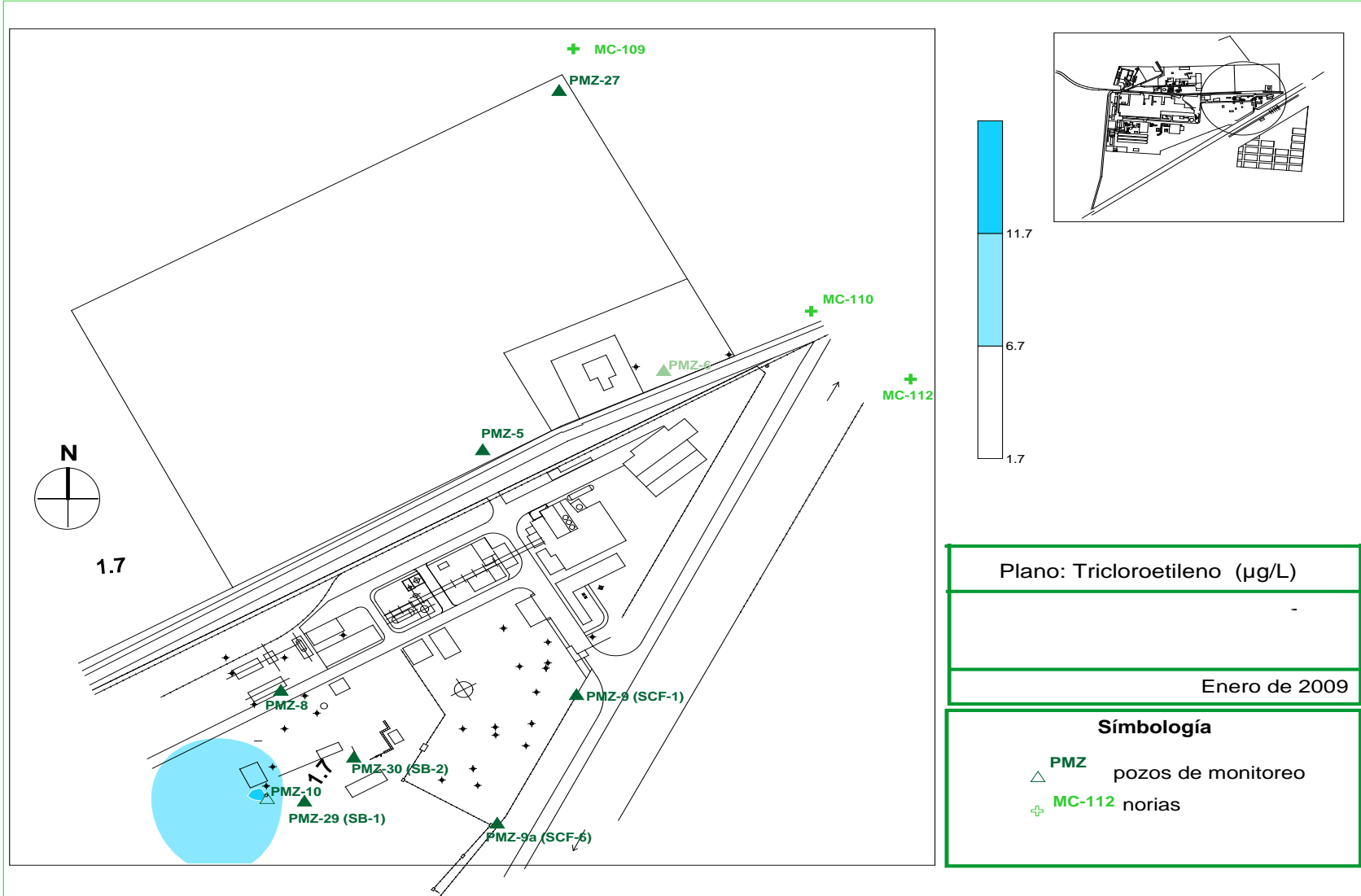


Figura 12. Isoconcentraciones de Tricloroetileno

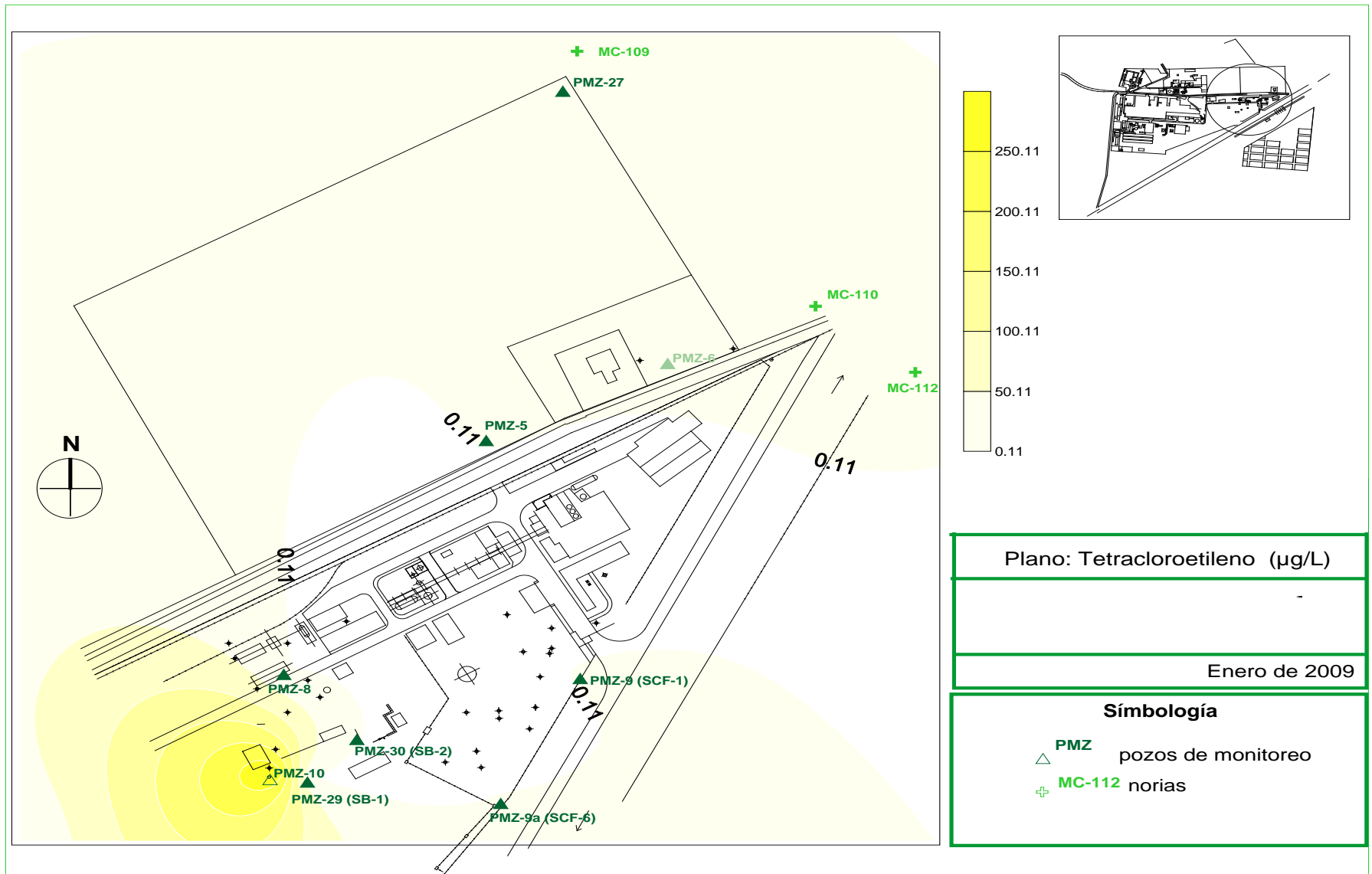


Figura 13. Isoconcentraciones de Tetracloroetileno

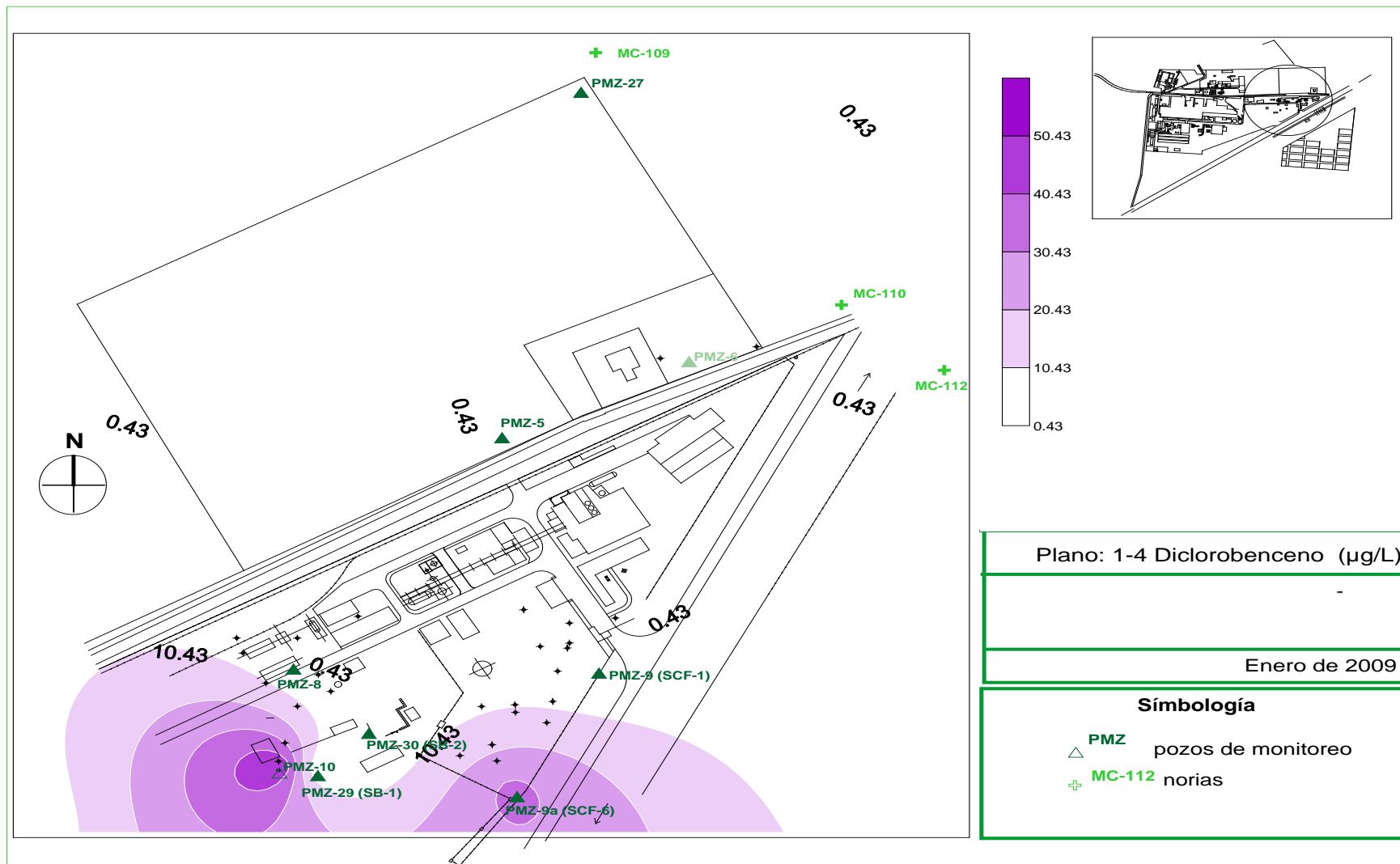


Figura 14. Isoconcentraciones de 1-4 Diclorobenceno

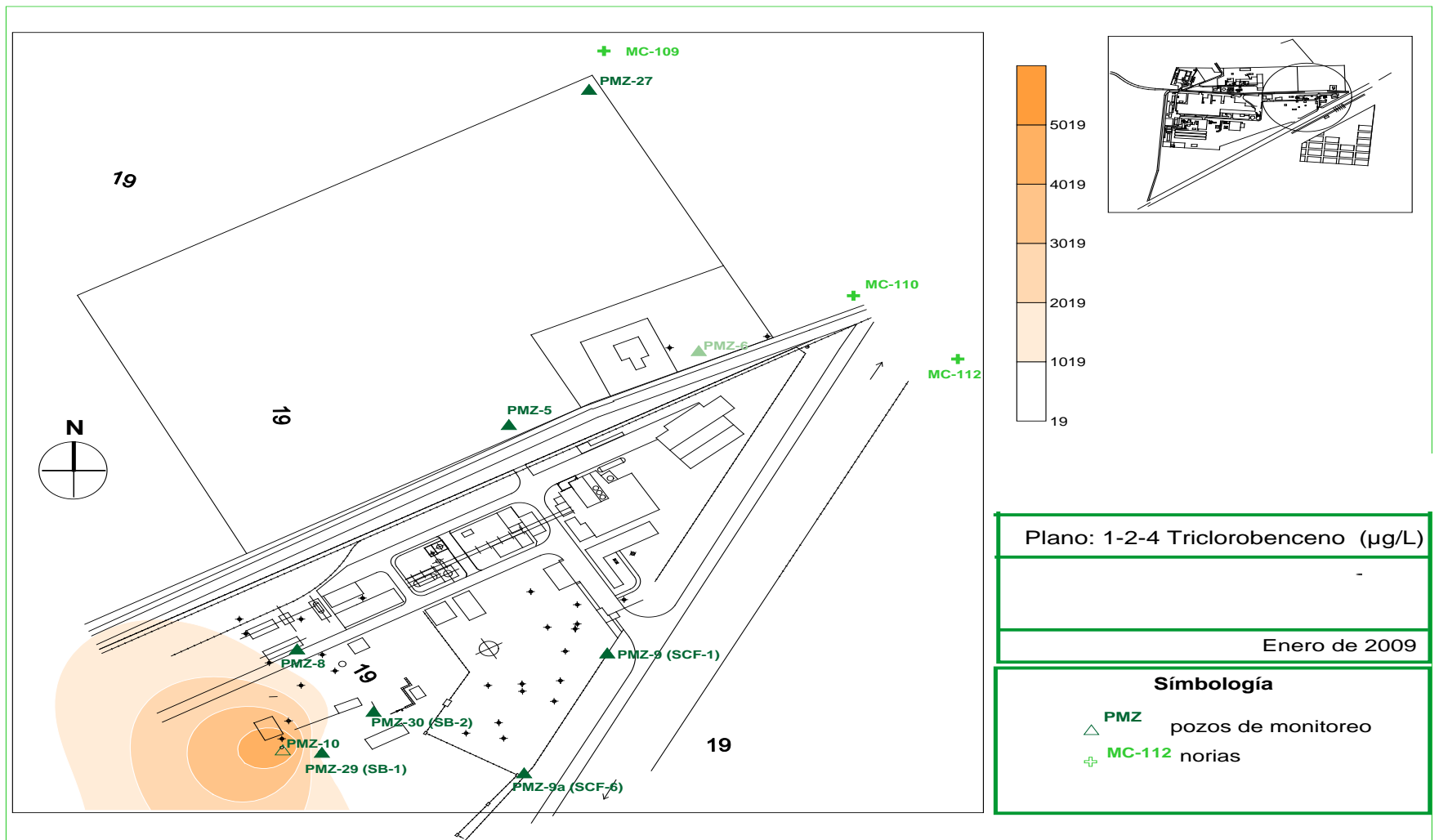


Figura 15. Isoconcentraciones de 1-2-4 Triclorobenceno

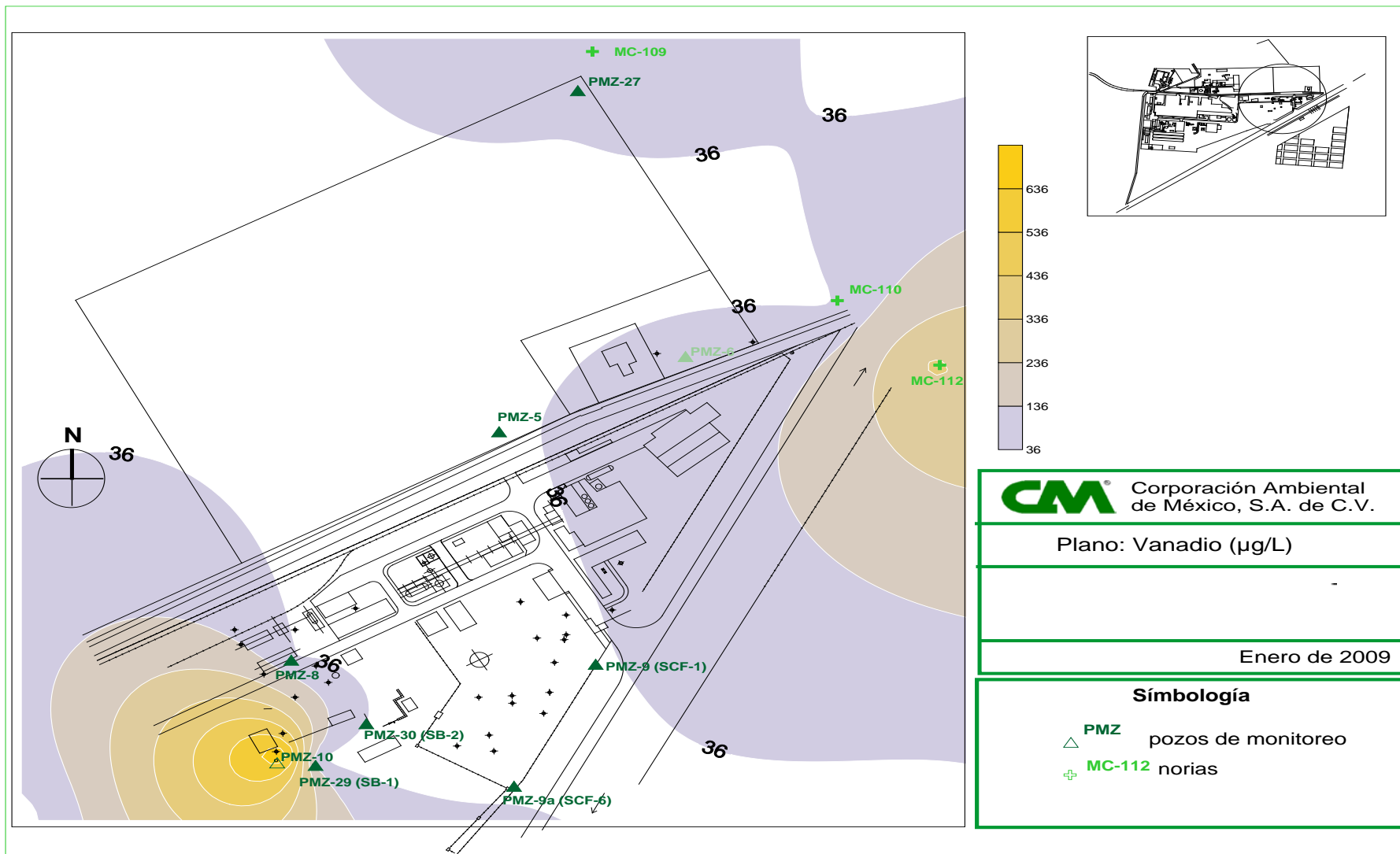


Figura 16. Isoconcentraciones de Vanadio.



## 5.7 Dirección del flujo de agua subterránea somera

De la recopilación de información piezométrica de los pozos de monitoreo existentes, se generó la figura de dirección de flujo; la cual permite observar que el flujo tiene una dirección preferente hacia el este.

La nivelación topográfica jugó en este caso un papel muy importante, ya que la nivelación de cada pozo fue considerada para conocer la dirección de flujo.

Pozo de monitoreo	Latitud N	Longitud W	Cota de la tapa del pozo (m)	Cota del PVC (m)	prof del pozo	Nivel piezométrico (m)	Nivel piez. ref. base (m)
Datos de nivelación mayo de 2008							
PMZ-9	19°50'02,94"	101°26'15,54"	99,512	99,497	6	2,15*	97,347
PMZ-9A	19°50'00,36"	101°46'16,74"	99,438	99,379	7,2	2,2*	97,179
PMZ-29	19°50'00,54"	101°46'19,62"	99,085	99,017	6	0,83*	98,187
PMZ-30	19°50'01,38"	101°46'19,00"	99,212	99,150	6	0,85*	98,300
PMZ-27	19°49'39,7"	101°46'39,9"	100,028	99,493	5,5	1,71*	97,783

\*Los datos de profundidad del agua fueron obtenidos durante los trabajos de campo en el mes de diciembre.

Tabla 21. Datos topográficos y piezométricos de los pozos de monitoreo.

La Figura de dirección de flujo, se generó con el paquete software denominado SURFER versión 8.0., de Golden Software Inc. El SURFER facilita la realización de diagramas de isovalores (superficies potenciométricas), que se generan, como en este caso, a partir de información de campo. Los datos se conjuntan en bases de datos que incluyen las coordenadas de los puntos de análisis y sus respectivas profundidades.

A partir de la generación de la base de datos, el SURFER contiene varios métodos geoestadísticos de interpolación, que pueden presentar diferentes interpretaciones dependiendo del método usado. Para el sitio de investigación se utilizó el método de Kriging con variograma lineal

La figura de dirección de flujo del agua subterránea somera se presenta a continuación.

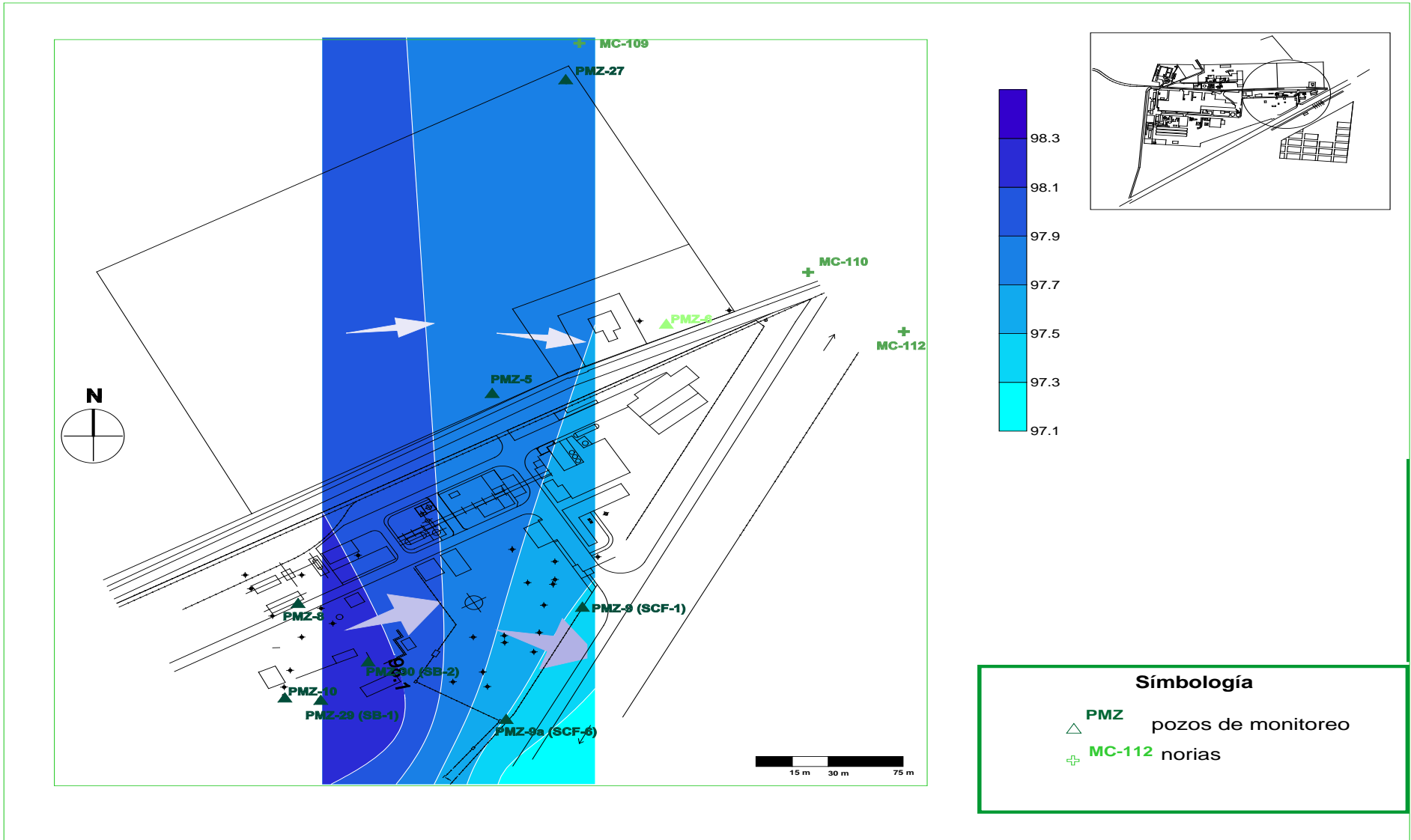


Figura 16. Dirección de flujo del agua subterránea somera

## 5.8 Pruebas de permeabilidad

Se realizaron pruebas de inyección de agua, con la finalidad de conocer la permeabilidad del terreno. Las interpretaciones efectuadas en el presente estudio, engloban los siguientes rubros:

### Estimación de parámetros hidráulicos del acuitardo somero

Una parte fundamental en la caracterización hidrogeológica, es evaluar y cuantificar los parámetros que rigen el comportamiento hidráulico del acuitardo en estudio, debido a que dichos parámetros son el punto de partida en análisis referentes a la cuantificación de extracción eficiente de agua subterránea, movilidad y migración del agua en la zona saturada, conexión entre acuíferos, entre muchas otras aplicaciones.

Para el caso concreto, la cuantificación de los parámetros hidráulicos con especial énfasis en la estimación de la conductividad hidráulica, fue un punto fundamental para realizar análisis de la velocidad real de flujo, migración y dispersividad del agua.

Para la estimación de la conductividad hidráulica (k) se llevaron actividades de ensayos de inyección. La metodología de recopilación de datos de interpretación de los ensayos, se detalla más adelante, así como las técnicas aplicadas.

A continuación se detallan los resultados obtenidos en cada una de las actividades.

### Valores de la permeabilidad de terrenos naturales

La asignación de un valor a la permeabilidad de un material es tarea más complicada que asignarle una porosidad ya que el margen de variabilidad de la permeabilidad es mucho mayor, esta está más afectada por pequeñas desviaciones de composición y puede variar con la orientación.

Para materiales granulares relativamente homogéneos y para temperaturas del orden de 20<sup>0</sup> C, Silin-Bekchurin (en Harr, 1928, pág. 8) da los siguientes valores:

Material	k en cm /s	k en m/día*
Grava limpia	>1	> 1000
Arena gruesa limpia	1 a 10 <sup>-2</sup>	1000 a 10
Mezcla de arena	10 <sup>-2</sup> a 5,10 <sup>-3</sup>	10 a 5
Arena fina	5,10 <sup>-3</sup> a 10 <sup>-3</sup>	5 a 1
Arena limosa	2,10 <sup>-4</sup> a 10 <sup>-4</sup>	2 a 0,1
Limo	5,10 <sup>-4</sup> a 10 <sup>-5</sup>	0,5 a 0,001
Arcilla	<10 <sup>-6</sup>	<0,001

Tabla 22. Datos comparativos de permeabilidad en diferentes tipos de suelo.

La tabla siguiente incluye un comparativo más completo con respecto a los tipos de acuífero y su clase de permeabilidad.

Permeabilidad Clase según Hazen cm/s	Tipo	Clase de Acuífero	Clase de Permeabilidad
1 3	A	Muy bueno	Muy alta
2 0,7	C	Muy bueno	Muy alta
3 0,1	U	Bueno	Alta
4 0,05	I	Regular	Medía
5 9 10 <sup>-3</sup>	F	Pobre	Pequeña
6 5·10 <sup>-3</sup>	E	Pobre	Pequeña



240	2,18	0,006	2,186	0,002744739
300	2,183	0,003	2,186	0,00137237
600	2,183	0,003	2,186	0,00137237
900	2,183	0,003	2,186	0,00137237
1200	2,183	0,003	2,186	0,00137237
1500	2,183	0,003	2,186	0,00137237
1800	2,185	0,001	2,186	0,000457457
2400	2,185	0,001	2,186	0,000457457
3000	2,186	0	2,186	0

NE: Nivel Estático

Tiempo (t): Tiempo que requiere el nivel del agua para alcanzar el inicial.

H(m): Variación del nivel del agua con forme transcurre el tiempo.

Ho: Nivel máximo de agua después de la inyección (nivel freático)

Tabla 24. Prueba de inyección de agua (tiempo vs abatimiento)

El método utilizado en esta ocasión (Hvorslev) sugiere el ascenso inicial ( $h_0$ ) y se miden los niveles en función del tiempo. Para ser utilizado en piezómetros que atraviesan un acuífero libre, total y parcialmente penetrantes.

La permeabilidad del terreno viene dada por la siguiente expresión:

$$k = \frac{r_w^2 \ln\left(\frac{L_e}{r_s}\right)}{(2)(L)(t_0)}$$

Donde:

$r_w$ : Radio del pozo

$L_e$ : Longitud de la tubería ranurada

$r_s$ : Radio de la tubería

$L$ : Longitud del paquete de gravas del pozo

$K$ : permeabilidad o conductividad hidráulica

DATOS	
<b>rw=</b>	<b>0,0508 m</b>
<b>rs=</b>	<b>0,01905 m</b>
<b>Le=</b>	<b>3,00 m</b>
<b>L=</b>	<b>3,00 m</b>
<b>t<sub>0</sub>=</b>	<b>0,03 d</b>
<b>k=</b>	<b>6,26699E-02 m/d</b>

Para cada uno de los pozos se realizaron los pasos anteriores, en la siguiente tabla se concentran los resultados de permeabilidad de todos los pozos.

Pozos de monitoreo	Conductividad hidráulica (k en metros/día)
	Método de Horslev
PMZ-9 <sup>a</sup>	6.26699E-02 m/d
PMZ-9	1.25340E-01 m/d
PMZ-29	1.88035E-02 m/d
PMZ-30	4.51283E-02 m/d

PMZ-8	6.44690E-02 m/d
<i>Media</i>	6.3282140E-02
<i>Valor máximo</i>	1.25340E-01
<i>Valor mínimo</i>	1.880350E-02

Tabla 25. Valores de permeabilidad obtenidos a partir de las pruebas de inyección.

La interpretación de las pruebas de inyección permite clasificar al acuitardo en estudio, como un cuerpo de agua subterránea somera de baja conductividad hidráulica con un valor promedio de 0,0633 m/día.

## 5.9 Modelación numérica del agua subterránea

Se realizó una modelación numérica de flujo de agua subterránea y transporte de Vanadio en fase disuelta, referente al acuitardo evaluado en el predio donde se localiza el área de estudio, la descripción de todo el proceso de modelación se describe a detalle en los siguientes apartados.

### 5.9.1 Objetivos

- Realizar una modelación numérica de flujo de agua subterránea y transporte del VANADIO en la zona saturada.
- Determinar la movilidad, migración, distribución y forma de la pluma contaminante en fase disuelta, para diferentes intervalos de tiempo: para 1 año, 3 años, 5 años, 10 años, 15 años y 20 años.
- Estimar la localización de las posibles fuentes en la planta que dieron origen a la contaminación en la zona no saturada y saturada.

Revisar con base a los resultados obtenidos en el proceso de calibración, el modelo conceptual hidrogeológico

### 5.9.2 Alcances

El presente modelo numérico, pretende evaluar la distribución, comportamiento, migración y concentraciones de la pluma contaminante para diferentes intervalos de tiempo, concretamente para 1 año, 3 años, 5 años, 10 años, 15 años y 20 años.

Los resultados explicados en el presente documento tienen sus limitaciones; principalmente es necesario explicar que debe haber una congruencia en cuanto al número de datos disponibles y el tiempo de simulación; por ejemplo: de manera óptima si se quisiera realizar un modelo numérico para una simulación de 10 años se debería de contar con eventos de muestreo para el 10% del tiempo de simulación, es decir, para 1 año.

En este caso y debido a que se simuló un escenario a 20 años, óptimamente se deberían de contar con 2 eventos de muestreo (1 evento por año), esto se apoyó, con una buena calibración (ajuste) tanto para el modelo de flujo como para el de transporte.

Aun con esto, cabe decir que los resultados expuestos en el presente documento responden a resoluciones matemáticas y numéricas, que pueden tener ciertas variaciones con respecto a la realidad.

### 5.9.3 Marco teórico

### 5.9.3.1 Definición de modelo

Un modelo se define como una representación de un sistema real, en este caso un modelo de aguas subterráneas es una reproducción (parcial o total) de un sistema acuífero natural.

Existen diversos tipos de modelos de aguas subterráneas, principalmente:

- Modelos conceptuales: se refieren a una representación mental del comportamiento geológico e hidrogeológico de un acuífero, tomando en cuenta todos los aspectos relacionados con el funcionamiento del mismo, es decir: tipo de acuífero (libre, confinado, semiconfinado), geometría, régimen (estacionario, transitorio, mixto), medio (poroso, fracturado, kárstico), estimación de los parámetros hidráulicos (conductividad hidráulica, coeficiente de almacenamiento), parámetros de transporte (coeficiente de retardo, coeficiente de partición, velocidad advectiva, dispersividad, etc), acciones sobre el sistema (recarga y/o descarga) y balance hídrico.
- Modelos a escala: se refieren a modelos físicos a modo de maqueta, por medio de los cuales se representa parte de un sistema natural.
- Modelos matemáticos: son modelos que simulan el comportamiento de sistema acuífero, a través de planteamientos matemáticos. Se dividen en modelos analíticos y modelos numéricos. Los analíticos son aquellos que dan la solución exacta de un sistema natural representado por medio de ecuaciones diferenciales de funciones analíticas o tabuladas. Los numéricos resuelven dichas ecuaciones diferenciales por medio de métodos numéricos, que concretamente son los que se utilizan para realizar modelos de flujo y transporte de contaminantes en acuíferos.

### 5.9.3.2 Métodos numéricos

Los principales métodos numéricos en la modelación de aguas subterráneas son: diferencias finitas, elementos finitos y volúmenes finitos. Debido a que el modelo de flujo y transporte del VANADIO, fue desarrollado por medio del método de diferencias finitas, a continuación se explicará brevemente su funcionamiento.

#### Diferencias finitas

Es el método numérico más empleado debido a que comercialmente, existen un gran número de programas de cómputo que se basan en diferencias finitas para desarrollar un modelo, como es el caso del Visual MODFLOW 4.2., desarrollado por Waterloo Hydrogeologic Inc (WHI).

En el método de diferencias finitas como en cualquiera de los métodos restantes, existen dos ecuaciones diferenciales que será necesario resolver primero en estado estacionario (tiempo = 0) y posteriormente en estado transitorio (tiempo variable); estas ecuaciones son:

- a) la ecuación general de flujo de agua subterránea (ecuación 1) y
- b) la ecuación general de transporte de solutos (ecuación 2).

### 5.9.3.3 Ecuación general de flujo de agua subterránea

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \dots (1)$$

Donde:

Kx, Ky, Kz: conductividades hidráulicas en las direcciones X (paralelo al flujo subterráneo), Y (vertical a la dirección de flujo) y Z (ortogonal a la dirección de flujo).

h: Nivel piezométrico o carga hidráulica

W: Recarga

Ss: Coeficiente de almacenamiento específico

t: tiempo

$\partial x, \partial y, \partial z$ : Discretización en tres dimensiones

La discretización consiste en dividir el espacio en el cual se va a realizar el modelo (llamado dominio) en elementos que recubren, sin traslaparse, toda la extensión modelada. En el caso de las diferencias finitas, la discretización se hace mediante segmentos (1-D), rectángulos (2-D) o paralelepípedos (3-D) formando una malla compuesta por múltiples celdas, a diferencia de los elementos o volúmenes finitos, donde la discretización se hace por medio de triángulos, prismas piramidales y configuraciones geométricas más complicadas.

#### 5.9.3.4 Ecuación general de transporte de solutos

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - V_x \frac{\partial C}{\partial x} \dots (2), \text{ donde:}$$

C: Concentración del soluto o contaminante

D: Coeficiente de dispersión

V: Velocidad real de flujo subterráneo

La ecuación (2), también conocida como la ecuación de Advección-Dispersión, puede re-escribirse para incluir la sorción y el decaimiento de la siguiente manera, según trabajos de Miller & Weber (1984):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v_x \frac{\partial C}{\partial x} - \frac{B_d}{\theta} \cdot \frac{\partial C^*}{\partial t} + \left( \frac{\partial C}{\partial t} \right)_{rxn} \dots (2.1), \text{ donde:}$$

(I)            (II)            (III)            (IV)

Término (I): Dispersión hidrodinámica.

Término (II): Advección.

Término (III): Sorción.

Término (IV): Reacción.

La solución de la ecuación de transporte, permite cuantificar la concentración final de cualquier contaminante en un punto dado, para cualquier intervalo de tiempo, a partir de una concentración inicial de un punto conocido por su posición en x (flujo unidimensional), en (x,y) –campo bidimensional-, o en (x,y,z) – campo tridimensional-.

De este modo el método de diferencias finitas consiste en resolver las ecuaciones diferenciales (1) y (2 ó 2.1) para obtener el nivel piezométrico o carga hidráulica (resolución de la ecuación general de flujo) y



la concentración final del contaminante (resolución de la ecuación de transporte) para un par de puntos (x,y) del dominio, y que concretamente MODFLOW resuelve para cada centro de los rectángulos de la malla discretizada del dominio.

Además una vez que MODFLOW obtuvo la solución de las incógnitas h (nivel piezométrico) y C (concentración del contaminante) en estado estacionario, dichos valores se pueden estimar en estado transitorio, es decir, para diferentes intervalos de tiempo (simulación).

### 5.9.3.5 Técnicas de solución

Las técnicas de solución por diferencias finitas consisten básicamente en transformar las ecuaciones diferenciales (o en derivadas parciales) por ecuaciones en forma algebraica con operadores matemáticos sencillos (suma, resta, multiplicación, división) que pueden ser resueltas para los elementos discretizados del dominio, es decir, para cada celda de la malla.

Para ello y en el caso de un modelo de flujo de aguas subterráneas, la ecuación (1) se transforma en una ecuación algebraica para cada celda, de manera que la diferencia infinitesimal  $dh$ , es reemplazada por una diferencia finita medible  $\Delta h$ , por lo tanto la ecuación (1) y el flujo de Darcy a través de la interfase de celda a celda es:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( Kx \frac{\partial h}{\partial x} \right) = \frac{1}{\Delta x} \left( K \frac{h_3 - h_2}{\Delta x} - k \frac{h_2 - h_1}{\Delta x} \right) \dots (3)$$

Dicha ecuación es aplicable para celdas de bloque rectangulares y no deformadas.

De esta manera, se obtiene una ecuación algebraica matricial para un determinado nodo “i” (entendiendo por nodo el centro de cada celda de la malla) en el tiempo “n”, que generalmente corresponde con el estado actual en el tiempo. Aplicando la misma ecuación a todos los nodos de la malla y tras añadir las condiciones de contorno y las condiciones iniciales del sistema, se obtiene un sistema de ecuaciones que de forma matricial se escribe como sigue:

$$T_i = Ah^{n+1} + D \left( \frac{h^{n+1} - h^n}{\Delta t} \right) \dots (4), \text{ donde:}$$

D: Matriz de almacenamiento del acuífero

TI : Término independiente = entradas y salidas del sistema acuífero

h: Carga hidráulica

n: tiempo actual

n+1: tiempo actual + intervalo de tiempo (simulación en estado transitorio)

A: Matriz de conductancias, entendiendo por conductancia (Co):

$$Co = \frac{A \cdot k}{b} \dots (5), \text{ donde:}$$

A: Sección de paso del flujo subterráneo

K: Conductividad hidráulica

b: Espesor saturado del acuífero

Análogamente este proceso se repite en un modelo de transporte de contaminantes, cuya resolución arroja las concentraciones finales para el tiempo “n” y posteriormente para “n+1”. De manera conjunta,

un modelo de flujo y transporte de contaminantes (tal como es el caso) formula y resuelve la carga hidráulica (h) y la concentración final (C) para un tiempo “n” (estado actual), para un tiempo “n+1” y así sucesivamente para generar un modelo de simulación del comportamiento del sistema acuífero

#### **5.9.3.6 Aplicaciones de los modelos matemáticos de agua subterránea**

- Evaluación de rendimiento de pozos de extracción
- Análisis de interferencia en un campo de pozos
- Diseño de sistemas de drenaje en minas.
- Determinación de zonas de captura de captaciones de agua subterránea
- Delineamiento de perímetros de protección de acuíferos
- Evaluación y simulación del impacto de contaminantes en la zona saturada y su relación con la zona no saturada
- Evaluación y diseño de sistemas de remediación de acuíferos
- Gestión integral de sistemas aguas superficiales – agua subterráneas

#### **5.9.4 Método de trabajo**

El método de trabajo consistió de manera resumida de los siguientes pasos: (1) Software utilizado, (2) Revisión y simplificación del modelo hidrogeológico conceptual, (3) Parámetros de entrada necesarios para alimentar el modelo numérico, (4) Construcción del modelo numérico. (5) Calibración y validación, y (6) Aplicación del modelo de simulación o predicción. A continuación se explicarán brevemente los anteriores puntos.

##### **5.9.4.1 Software utilizado**

El modelo de flujo y transporte se realizó mediante el software Visual MODFLOW Versión 4.2, desarrollado inicialmente como un código de programación en la década de los 80s por el U.S. Geological Survey, y adaptado a ambiente Windows en 1989 por el Waterloo Hydrogeologic Inc., (WHI). Es un programa que resuelve la ecuación de flujo y transporte por medio del método de diferencias finitas con múltiples aplicaciones en el campo de la modelación numérica de acuíferos. El funcionamiento primordial del MODFLOW es por medio de módulos, es decir, subprogramas o subrutinas entrelazadas entre sí; concretamente para este caso se utilizaron los siguientes módulos:

- MODFLOW: Módulo utilizado para construir el modelo de flujo
- MT3D: Módulo utilizado para construir el modelo de transporte del VANADIO

##### **5.9.4.2 Revisión y simplificación del modelo conceptual**

El punto de partida para la construcción del modelo numérico consistió en revisar los información generada en campo, con objeto de elaborar un resumen del modelo conceptual de funcionamiento, que ejemplificara de manera sintetizada los resultados obtenidos en las diferentes evaluaciones, y que resaltara aspectos necesarios a utilizar en la construcción del modelo numérico, primordialmente:

- Características de la zona saturada (ZS): tipo de acuífero, litología y granulometría, distribución, dirección y magnitud de flujo, parámetros hidráulicos.
- Características de la zona no saturada (ZNS): litología y granulometría, distribución en el subsuelo, relación ZNS-ZS.
- Distribución de los valores de concentración de VANADIO a diferentes profundidades y su relación con los posibles puntos de fuga (zonas fuente).

- Concentraciones de VANADIO en la ZNS y su relación con las zonas fuente.
- Concentraciones de VANADIO en la ZS y su relación con las zonas fuente.
- Hidrogeología de contaminantes.

Una vez revisado el modelo conceptual fue necesario llevar a cabo algunas simplificaciones para que el modelo numérico se apegara a los alcances del proyecto establecidos. Las principales simplificaciones que se realizaron, fueron los siguientes:

- El subsuelo de la planta está conformado por múltiples lentes irregulares de diferente litología y granulometría, de manera que dichas formaciones lenticulares, se agruparon en función de similitudes granulométricas, litológicas y texturales.
- Se omitieron procesos de recarga al acuífero por agua de lluvia (infiltración), debido a que un área tan pequeña (en comparación con el entorno regional del acuífero), agregar un valor de recarga al modelo, podría generar aumentos excesivos del nivel piezométrico, no coherentes con la realidad.
- Se supuso un medio homogéneo e isotrópico; en lenguaje hidrogeológico esto significa que la permeabilidad o conductividad hidráulica en dirección paralela al flujo subterráneo ( $K_X$ ), es igual a la permeabilidad en dirección perpendicular al flujo ( $K_Y$ ). A su vez la conductividad hidráulica ortogonal (en un medio 3-D) a la dirección de flujo ( $K_Z$ ), se supuso del orden de 3 m/d, es decir:

$$K = K_X = K_Y \Rightarrow K_Z = \frac{1}{10} K \dots (6)$$

#### 5.9.4.3 Parámetros de entrada

El código MODFLOW necesita para desarrollar el modelo una serie de parámetros de entrada (input values), que se dividen en parámetros hidráulicos y parámetros de transporte.

##### Parámetros hidráulicos

##### *Conductividad hidráulica*

Se estimó primordialmente en función de las pruebas hidráulicas realizadas en el proyecto.

Cabe mencionar que en una prueba hidráulica se determina un valor de permeabilidad que representa el valor promedio de las permeabilidades de las unidades hidrogeológicas en el entorno del cono de bombeo que se genera con la perturbación en el pozo. MODFLOW necesita un valor de permeabilidad por unidad hidrogeológica, por lo tanto y tomando como base las mediciones de permeabilidad, se estimó los valores a utilizar en el desarrollo del modelo.

Los valores resultantes de las pruebas se expresan en la siguiente tabla.

Tabla Resumen de Parametros de Mecanica de Suelos										
ID muestra	Tipo de suelo	Profundidad (m)		Densidad (Ss)	Humedad (%)	Densidad de Sólidos (r, gr/cm3)	Granulometría (mm)			Cond. Hidraulica (k, cm/s/eg)
							Gravas	Arenas	Finos	
SB-11	Arcilla limosa con arena fina, color café oscuro	1.00	2.00	2.514	40.61262763	2.528	2.68	27.18	70.13	3.249E-07
STD-7	Arcilla limosa con arena y gravillas aisladas, color verdoso	0.50	1.50	2.572	37.09483794	2.546	4.79	24.08	71.12	2.440E-07
SNE-9	Arcilla de alta plasticidad y materia organica, color café oscuro	2.00	3.00	2.387	81.18837571	2.398	0.00	15.09	84.91	6.495E-08
SDN-1	Arcilla arenosa poco limo, color verde oscuro	1.00	3.60	2.475	55.56555566	2.473	0.24	45.72	54.04	2.800E-07
SDN-7	Arcilla de alta plasticidad con materia organica, color verde obscuro	6.00	7.00	2.374	81.94174757	2.368	0.00	6.78	93.22	8.603E-08
SNE-12	Arcilla de alta plasticidad con materia organica, color café oscuro	2.00	3.00	2.456	75.52638098	2.438	0.00	10.33	89.67	7.544E-08
SNE-13	Arcilla limosa con arena fina, color verde claro	2.00	3.00	2.591	33.15396887	2.593	0.00	19.55	80.45	1.260E-06
SCF-9	Arcilla arenosa poco limo, color verde obscuro	2.00	3.00	2.552	52.41408391	2.553	0.00	7.83	92.17	9.093E-07
SDS-3	Arcilla de alta plasticidad con materia organica, color café oscuro	5.00	6.00	2.403	84.60287341	2.389	0.00	10.86	89.14	9.732E-07
SCF-11	Arcilla limosa con arena fina, color café oscuro	2.00	3.00	2.55	44.14225941	2.547	0.00	14.88	85.12	1.535E-07
Promedio				2.4874	58.6233	2.4833	0.7710	18.2300	80.9970	4.371465E-07

Tabla 26. Valores de permeabilidad obtenidos a partir de las pruebas de inyección.

### Coefficiente de almacenamiento

En este apartado MODFLOW necesita como parámetros de entrada el rendimiento específico ( $S_y$ ), el coeficiente de almacenamiento específico ( $S_s$ ), la porosidad total ( $\Phi_{TOTAL}$ ) y la porosidad eficaz ( $\Phi_{ef}$ ) por unidad hidrogeológica. Dichos parámetros se obtuvieron de las pruebas de mecánica de suelos realizados y validados con una base de datos electrónica llamada *Enviro-Base*, desarrollada por WHI, y que a su vez está basada en una gran cantidad de valores publicados en libros de texto y artículos de revistas especializadas.

PARÁMETROS HIDRÁULICOS							
Unidad hidrogeológica	K (m/d)			$\Phi_{TOTAL}$	$\Phi_{ef}$	$S_y$	Ss
	$k_x$	$k_y$	$k_z$				
A	0.063	0.063	0.0063	0,5	0,37	0,2	$1 \times 10^{-5}$
Fuente	Pruebas hidráulicas CAM			Davis, S.N. (1969) Custodio-Illamas (1981) Desauliers, D.E., J.A. Cherry and P. Fritz (1981)			

Tabla 27. Resumen de los parámetros hidráulicos de entrada al modelo numérico

### Parámetros de transporte.

El transporte de masa (de solutos, o bien de contaminantes) en medios saturados, está condicionado por diferentes mecanismos, conocidos como **procesos de transporte**, por medio de los cuales, un soluto, tenderá a desplazarse, dispersarse y diluirse de un punto a otro en un medio saturado.

Aunque existen diversos procesos de transporte (que dependen del tipo de contaminante y del medio hidrogeológico), son tres (3) los procesos que siempre estarán presentes y regirán el transporte y por ende, la migración de todo soluto en un medio acuoso saturado.

Estos son: (A) Advección. (B) Difusión molecular. (C) Dispersión hidrodinámica. Para ello, es necesario calcular los factores que intervienen en estos procesos de transporte, y que se detallan a continuación.

#### Velocidad advectiva del flujo subterráneo.

La advección un proceso por medio del cual, los sólidos disueltos en agua, son arrastrados con ella, fluyendo a una velocidad muy similar a la del agua subterránea, denominada velocidad media linear ( $V_x$ ), y cuya expresión se muestra en la ecuación (7):

$$V_x = \frac{k}{\phi_{ef}} \cdot \frac{dh}{dl} \dots (7), \text{ donde:}$$

k: Conductividad hidráulica (m/d)

$\Phi_{ef}$ : Porosidad eficaz (%)

dh/dl = i = Gradiente hidráulico (adim)

De esta manera sustituyendo k = 0.063 m/día; i = 0,0326 y  $\Phi_{ef} = 37\%$ , en la ecuación (7), se obtuvo una velocidad real de flujo subterráneo de  **$V_x = 0,0055$  m/día.**

#### *Difusión molecular*

Un soluto disuelto en agua, se moverá de zonas de mayor concentración, a zonas de menor concentración. Este proceso, es conocido como difusión molecular, o simplemente, difusión, y cuyo mecanismo ocurrirá, siempre que exista un **gradiente de concentración**, aunque el fluido permanezca en reposo (a diferencia de la advección).

La masa de fluido difundido, es proporcional al gradiente de concentración y cuya ecuación, conocida como la **Primera Ley de Fick**, se expresa de la siguiente manera:

$$F = -D \frac{dC}{dx} \dots (8), \text{ donde:}$$

F: Flujo másico del soluto por unidad de área y por unidad de tiempo.

D: Coeficiente de difusión ( $m^2/s$ ).

C: Concentración del soluto (mg/l).

dC/dx: Gradiente de concentración (mg/l/m).

En un medio poroso, la difusión es un proceso no compatible con la velocidad linear de flujo subterráneo, debido a que los iones siguen rutas de migración no lineales, alrededor de los clastos y granos de suelo y sedimentos.

Para tomar en cuenta lo anterior, se suele utilizar el coeficiente de difusión efectiva,  $D^*$ , expresado en la siguiente ecuación:

$$D^* = \omega D \dots (9), \text{ donde:}$$

$\omega$ : **Coefficiente de tortuosidad** (Bear, 1972), y que indica una medida del efecto de la forma de la ruta que siguen las moléculas de agua en un medio poroso.

Existen diversas publicaciones que estiman coeficientes de difusión molecular en función de cada tipo de producto. Concretamente, para el coeficiente de difusión molecular del VANADIO, se tomó un valor de  **$D^*_{VANADIO} = 8,8 \times 10^{-5}$**  (RSP, 1994).

#### *Coefficiente de dispersión hidrodinámica*

La dispersión hidrodinámica es un proceso donde se combina la dispersión mecánica y la difusión molecular. La combinación de ambos, definen un parámetro conocido como **coeficiente de dispersión hidrodinámico, D**, representado por las siguientes expresiones:

$$D_L = \alpha_L V_x + D^* \dots (10), \text{ donde:}$$

$$D_T = \alpha_T V_x + D^* \approx \frac{1}{10} D_L$$

$D_L$ : Coeficiente de dispersión longitudinal (paralelo a la dirección principal de flujo subterráneo).

$D_T$ : Coeficiente de dispersión transversal (ortogonal a la dirección principal de flujo subterráneo).

$\alpha_L$ : Dispersividad longitudinal.

$\alpha_T$ : Dispersividad transversal.

La dispersividad es una propiedad intrínseca del medio (acuifero) que depende de la escala de observación; de esta manera la dispersividad resulta fundamental en la hidrogeología de contaminantes, pues es la relación  $\alpha_L / \alpha_T$ , el parámetro más importante que controla la **forma de la pluma contaminante** en fase disuelta (válida solamente para medios porosos).

Existen básicamente 2 métodos para calcular la dispersividad; el primero de ellos se basa en la siguiente ecuación:

$$\alpha_L = 0,83(\text{Log}L)^{2,414} \dots (11), \text{ donde } L: \text{ longitud evaluada}$$

El siguiente método es empírico y está basado en resultados de dispersividad para múltiples sitios evaluados, donde se señala que la dispersividad es igual a una longitud equivalente del 3 al 5% de la longitud máxima de la pluma contaminante (Sara, 2003).

Tomando como referencia la extensión de la pluma de VANADIO identificada en el terreno (52 m), y aplicando la ecuación 11 se obtuvo como resultado que  $\alpha_L = 1 \text{ m}$ , y por ende  $\alpha_T = 0,1 \text{ m}$ . Estos valores se sustituyeron en la ecuación (10), para estimar los coeficientes de dispersión hidrodinámica, obteniendo:  **$D_L = 0,013 \text{ m}^2/\text{día}$  y  $D_T = 0,0013 \text{ m}^2/\text{día}$** .

#### *Coeficiente de distribución*

El coeficiente de distribución  $k_d$ , se define como la relación que existe entre la concentración de un soluto en equilibrio ( $C$  en mg/l), con respecto a la masa de soluto sorbido por unidad seca de peso ( $C^*$  en mg/kg). Concretamente la relación entre  $C$  y  $C^*$  es lineal, en lo que se denomina la “recta de isoterma de sorción”.

Particularmente  $K_d$  representa la pendiente de dicha recta. Para efectos de la entrada de parámetros necesarios para alimentar al modelo,  $K_d$  es indispensable para estimar el coeficiente de retardo, y la velocidad del VANADIO en la zona saturada (estimaciones que se detallarán adelante).

$K_d$  se estimó utilizando la siguiente ecuación:

$$K_d = f_{oc} * K_{oc} \dots (12), \text{ donde.}$$

$f_{oc}$ : Contenido de materia orgánica del suelo expresado como una fracción del peso del suelo. (adim).

$K_{oc}$ : Coeficiente de partición entre la fase adsorbida al medio poroso y a la materia orgánica del suelo. Existen múltiples métodos para estimar  $k_{oc}$ , por ejemplo:

$$K_{oc} = 0,63 * k_{ow} \text{ (Brown \& Scott, 1979).} \dots (13), \text{ donde:}$$

$K_{ow}$ : Coeficiente de partición agua-octanol, y es una medida para cuantificar un compuesto *hidrofóbico*, es decir, un compuesto orgánico que además de formar una fase disuelta en agua, puede ser adsorbido por una superficie sólida (tal como clastos y granos de suelo y sedimento).

En RSP (1994) se obtuvieron valores de  $K_{oc} = 200$  y  $K_{ow} = 380$  para VANADIO.

Con estos valores se estimó  $k_d$ , por medio de la ecuación (12), obteniendo  **$k_d = 0.21$**

*Coefficiente de retardo.*

Como su nombre lo indica, este parámetro mide el retardo (R) que sufre un contaminante con respecto al agua subterránea, en un acuífero poroso. R se obtuvo mediante la ecuación:

$$R = 1 + \rho_s \left( \frac{k_d}{\phi_{TOTAL}} \right) \dots (14), \text{ donde:}$$

$\rho_s$ : Densidad del suelo ( $\text{ton/m}^3$ ) = 2.528  $\text{ton/m}^3$ ;  $\phi_{TOTAL}$  : Porosidad total = 50%, tomado de los resultados de los estudios de mecánica de suelos).

De esta manera, sustituyendo valores en la ecuación (14) se obtuvo un coeficiente de retardo de  **$R = 1.06$**

*Velocidad de la pluma de VANADIO en fase disuelta.*

Finalmente con los parámetros antes obtenidos, se procedió a calcular la velocidad del VANADIO en el acuífero, aplicando la siguiente ecuación:

$$V_{PCE} = \frac{V_x}{R} \dots (15), \text{ donde:}$$

$V_{VANADIO}$ : Velocidad del VANADIO en el agua subterránea

$V_x$ : Velocidad real de flujo

R: Coeficiente de retardo

Sustituyendo valores en la ecuación (15), se estimó una velocidad del contaminante del orden de  **$V_{VANADIO} = 0.0052 \text{ m/día}$** .

PARÁMETROS DE TRANSPORTE		
Parámetro	Estimación	Fuente
Velocidad advectiva de flujo	$V_x = 0.0055 \text{ m/día}$	CAM
Coeficiente de difusión molecular del VANADIO	$D_{VANADIO}^* = 8,8 \times 10^{-6}$	Fetter, 2004
Dispersión hidrodinámica longitudinal	$D_L = 200 \text{ m}$	CAM
Dispersividad longitudinal	$\alpha_L = 1 \text{ m}$	CAM
Dispersividad transversal	$\alpha_T = 0.01 \text{ m}$	CAM
Coeficiente de distribución	$K_d = 0,21$	CAM; Fetter, 2004, Brown & Scott, 1979
Coeficiente de retardo	$R = 1.06$	CAM
Velocidad del VANADIO en el acuífero	$V_{VANADIO} = 0.0052 \text{ m/día}$	CAM

Tabla 27. Resumen de los parámetros de transporte obtenidos y explicados anteriormente

### 5.9.5 Construcción del modelo numérico

Una vez estimados los parámetros hidráulicos y de transporte, se procedió propiamente a construir el modelo numérico de flujo y transporte.

Para ello se empleó el software Visual MODFLOW 4.2 del Waterloo hydrogeologic Inc (WHI). La secuencia de la construcción del modelo se detalla a continuación:

#### 5.9.5.1 Definición de la malla de discretización del dominio

El primer paso en la construcción del modelo consistió en discretizar el dominio del mismo. Como se explicó anteriormente, el método por diferencias finitas discretiza el dominio en rectángulos que forman celdas uniformes de un tamaño específico ( $\Delta x$ ;  $\Delta y$ ).

Para este caso, se utilizó una malla (grid) con las siguientes características:

- Malla uniforme de  $\Delta x = 2$  m y  $\Delta y = 2$  m (escala real).
- Número de columnas: 250
- Número de filas: 250

La configuración de parte de la malla, se aprecia en la siguiente figura.

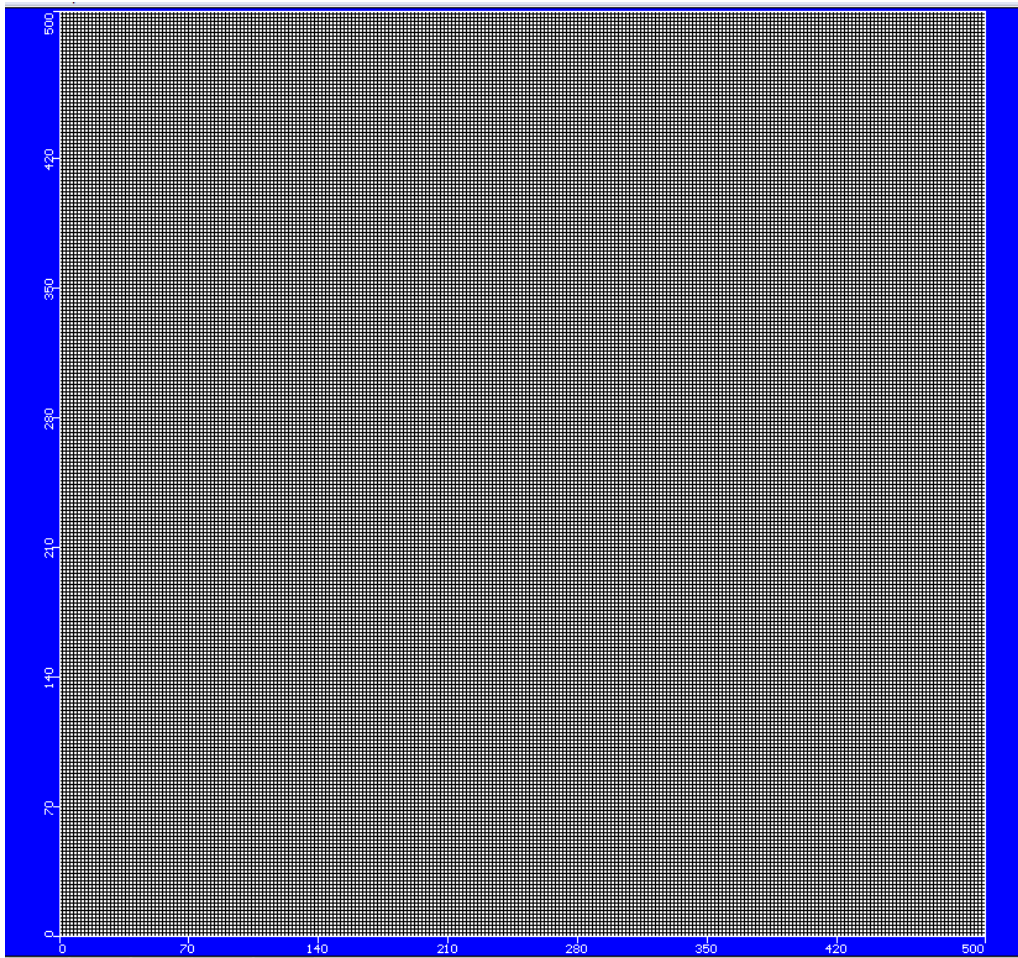


Figura 17. Discretización del dominio del modelo



### **5.9.5.2 Ingreso de parámetros de entrada**

Posterior a la definición de la malla y de la geometría, se procedió a alimentar al modelo con los parámetros de entrada de flujo y transporte calculados. La secuencia fue la siguiente:

- Conductividad hidráulica
- Almacenamiento (rendimiento específico, almacenamiento específico, porosidad total, porosidad eficaz).
- Recarga ( $W = 0$ ).
- Evaporación y evapotranspiración ( $ET = 2200$  mm/año).
- Coeficiente de distribución
- Coeficiente de retardo
- Velocidad advectiva
- Velocidad de la pluma de VANADIO en fase disuelta

### **5.9.5.3 Condiciones iniciales**

Las condiciones iniciales son fundamentales, pues el modelo intentará reproducir dichas condiciones iniciales, y la calibración (ajuste) se realiza tomando como parámetro las mismas condiciones.

Para el presente modelo se utilizaron como condiciones iniciales:

- Los niveles piezométricos o cargas hidráulicas (h) determinadas en los pozos de monitoreo
- Las concentraciones de VANADIO en agua subterránea determinadas en el muestreo realizado.

La adición de los pozos de monitoreo al modelo donde se especificaron las cargas hidráulicas y concentraciones medidas, se aprecia en la siguiente figura.

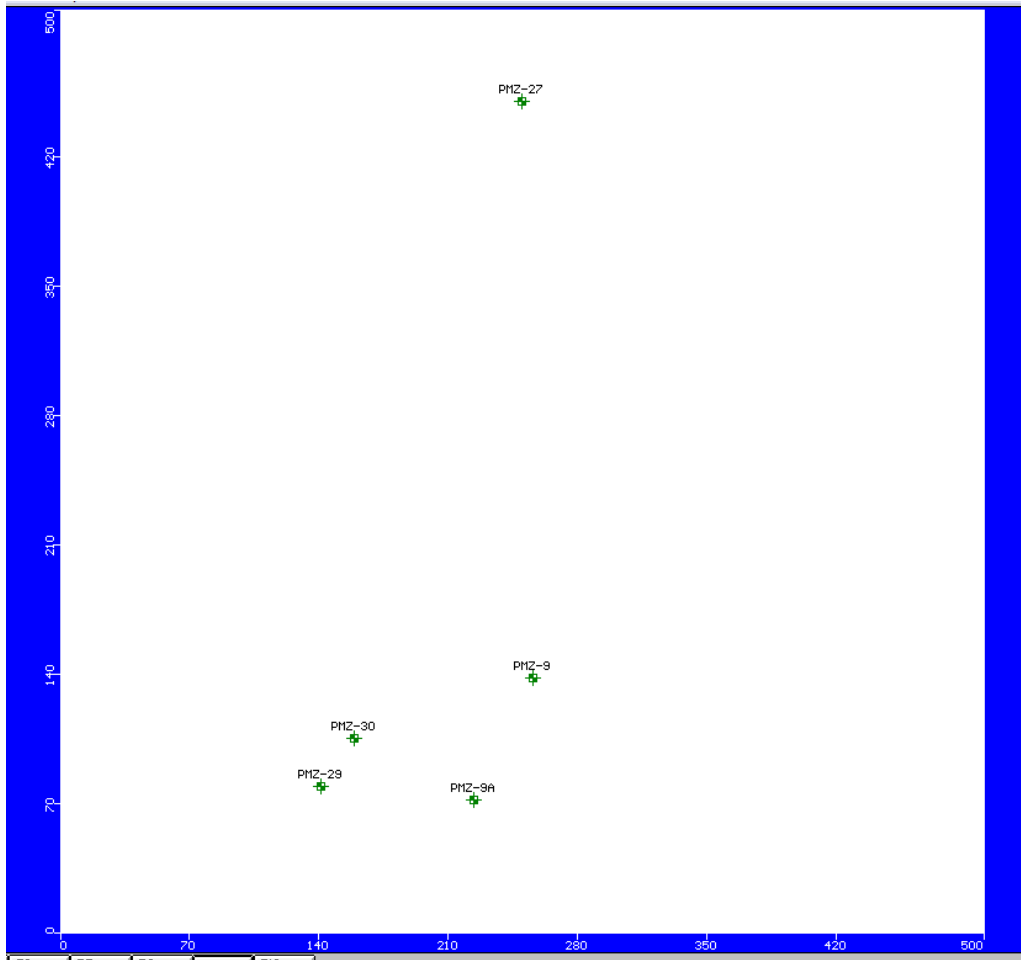


Figura 18. Adición de pozos de monitoreo y condiciones iniciales (cargas hidráulicas y concentraciones medidas).

#### 5.9.5.4 Condiciones de frontera

Todo modelo numérico requiere un conjunto de condiciones de frontera que representen la relación existente entre el sistema acuífero (o parte del sistema) con respecto a los sistemas adyacentes.

Particularmente para un modelo de flujo de agua subterránea, las condiciones de frontera deberán reproducir el intercambio de flujo entre el modelo y el sistema externo (y que a su vez se basan en la ecuación general de flujo y la Ley de Darcy).

En el caso de un modelo de transporte, las condiciones de frontera describirán matemáticamente el intercambio de soluto entre el modelo y el sistema externo.

A continuación se explicarán brevemente las condiciones que se utilizaron.

*Condición de flujo: Frontera de Carga General (GHB)*

La Frontera de Carga General (GHB, por sus siglas en inglés **General-Head Boundary**) funciona matemáticamente de la siguiente manera: el flujo de agua subterránea entrante o saliente de una celda a una fuente externa es proporcional a la diferencia entre la carga hidráulica de la celda y la carga

hidráulica de la fuente externa (y cuyo valor es asignado por el modelador). Dicha condición se utiliza cuando se quiere evitar extender el dominio del modelo innecesariamente (tal como es el caso) hasta encontrar un elemento hidráulico que influya las cargas en el modelo (tal como sucede con un río caudaloso, un cuerpo de agua superficial, etc.). La localización de la frontera tipo GHB en el dominio del modelo, se muestra en la siguiente figura.

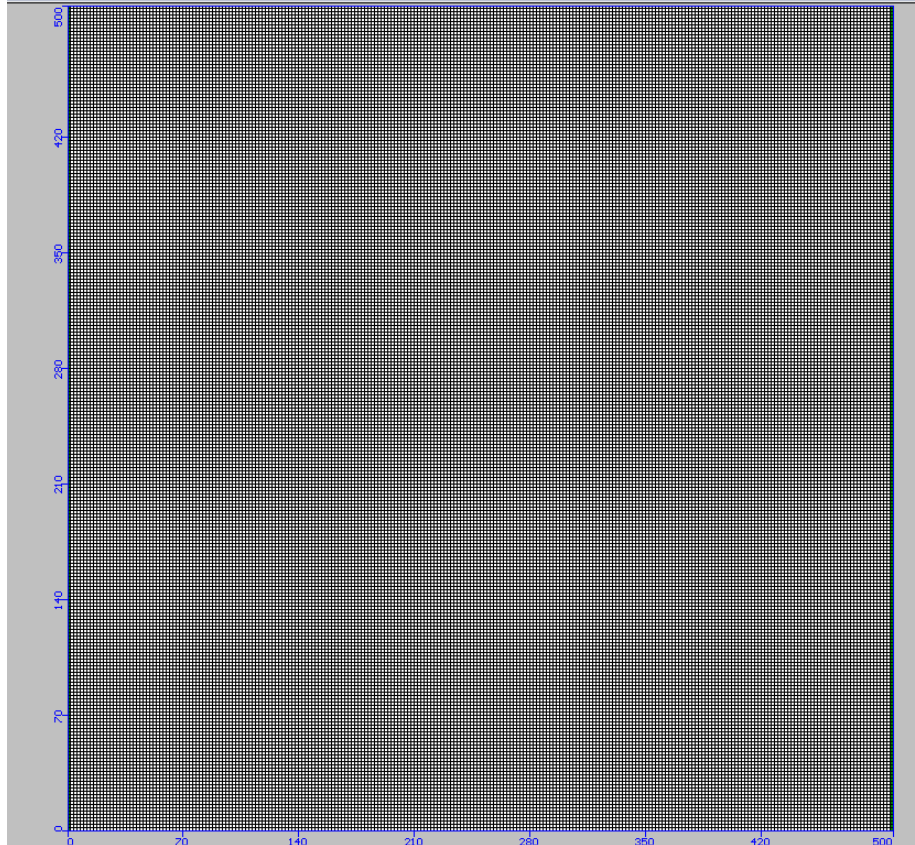


Figura 19. Condiciones de frontera de flujo.

#### 5.9.5.5 Condición de transporte

La solución de la ecuación que gobierna el transporte de masa en un medio poroso (ecuación 2 ó 2.1) requiere la especificación de condiciones de frontera. Visual MODFLOW soporta 4 tipos de condiciones de frontera; para este caso se utilizó la condición de “Recarga Constante”.

Esta condición actúa como una fuente de contaminante que se adiciona al acuífero en forma de un soluto con una concentración conocida. Este tipo de condiciones se utiliza para simular un derrame de un contaminante que abastece un soluto soluble en agua, a una concentración determinada por un período de tiempo relativamente largo. En la siguiente figura se muestra la localización de las zonas de recarga constante supuestas para el modelo.

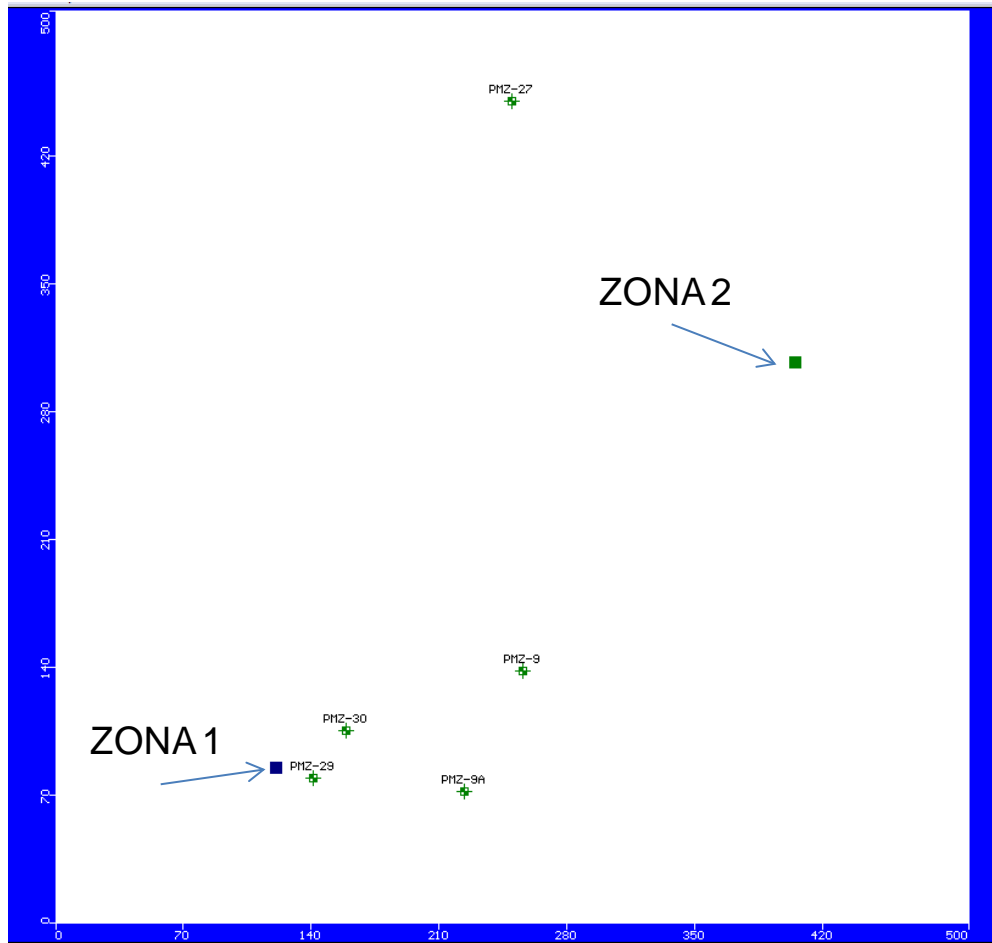


Figura 20. Condiciones de frontera de RECARGA CONSTANTE.

### 5.9.6 Planteamiento del problema

Con base en lo anterior y tomando en consideración toda la información recopilada y generada sobre las diferentes caracterizaciones de sitio, se probaron diferentes alternativas de posibles derrames o fugas de drenaje que se pudieron haber generado a lo largo de la vida de la planta.

Para ello se planteó como hipótesis principal la posibilidad de que el drenaje de la planta haya podido haber sufrido percances y averías.

**El procedimiento** consistió en generar diversas alternativas de posibles fugas con concentraciones determinadas y cuyas fugas debieron haberse activado en alguna fecha particular por un determinado intervalo de tiempo.

Posterior a este proceso se corrió el modelo; la convergencia del mismo otorgó concentraciones de VANADIO finales (calculadas) en los pozos de monitoreo, y que debían coincidir en la medida de lo posible con las condiciones iniciales, es decir, con las concentraciones medidas en los pozos de monitoreo.

#### 5.9.6.1 Calibración y validación

La diferencia entre las concentraciones calculadas y medidas (u observadas) puede cuantificarse bajo el concepto de “error medio cuadrático normalizado”, o NRMSE por sus siglas en inglés Normalized Root Mean Squared Error.

Para la calibración de la parte de flujo se recomienda tener un NRMSE  $\leq$  0%, mientras que para la parte de transporte, el error no debe sobrepasar el 7%. Bajo esta limitante se corrió el modelo de flujo y transporte para obtener las concentraciones calculadas. Cuando el NRMSE era superior al 7% se procedía a calibrar el modelo; esto se hacía variando cuestiones relacionadas con las posibles fugas, principalmente lo relacionado con: (a) localización puntual de la(s) posible(s) fuga(s). (b) tiempo de exposición. (c) concentración inicial de VANADIO que se liberó y se incorporó al acuífero.

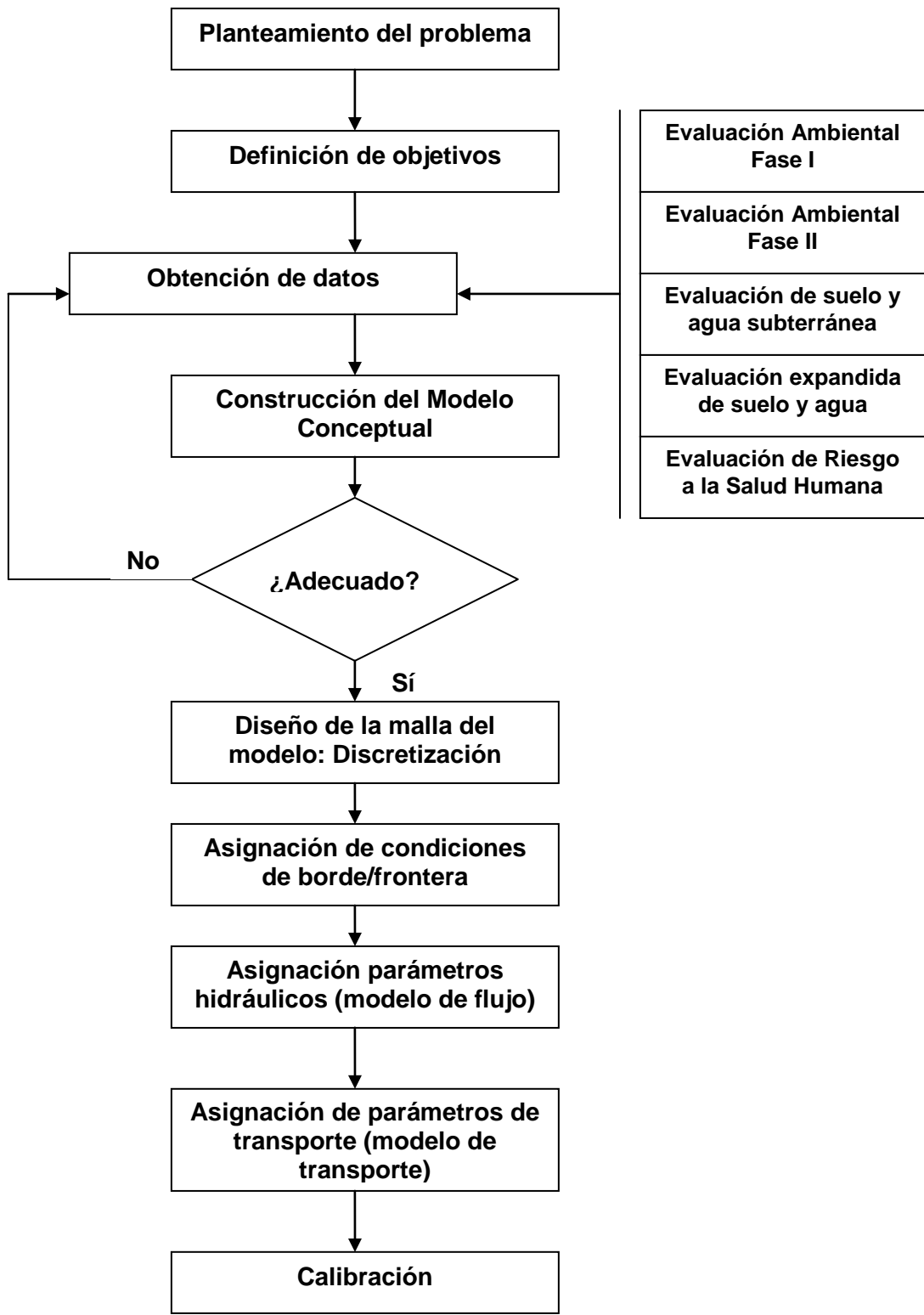
Una vez probadas las alternativas, se volvía a correr el modelo para obtener un nuevo conjunto de concentraciones calculadas que debían coincidir en la medida de lo posible con las concentraciones medidas en campo. Cuando se obtuvo un NRMSE  $\leq$  7%, se validó el modelo y se comenzó la etapa de simulación o predicción del comportamiento de la pluma contaminante de VANADIO en fase disuelta.

### **5.9.6.2 Modelo de simulación**

La corrida del modelo de flujo y transporte generó cargas hidráulicas (piezometría) y concentraciones calculadas (configuración de la pluma contaminante de VANADIO) que se calibraron para obtener un NRMSE  $\leq$  7%. Una vez calibrado, se procedió entonces a generar propiamente el modelo de simulación para diferentes intervalos de tiempo, concretamente para: 1 año, 3 años, 5 años, 10 años, 15 años, y 20 años. Para ello se representó un escenario en el cual se eliminaron las fuentes o fugas de contaminante.

Cabe mencionar que el modelo de simulación no se puede calibrar para reproducir la evolución en el tiempo de las cargas hidráulicas de las concentraciones, debido a que no existen concentraciones medidas (para los intervalos de tiempo de la simulación) que se puedan comparar con las concentraciones calculadas obtenidas en el modelo. Los resultados obtenidos del modelo de flujo y transporte se expondrán con detalle en los capítulos siguientes.

A continuación se presenta en el diagrama a modo de síntesis metodológica, la secuencia que se llevó a cabo para la construcción del modelo



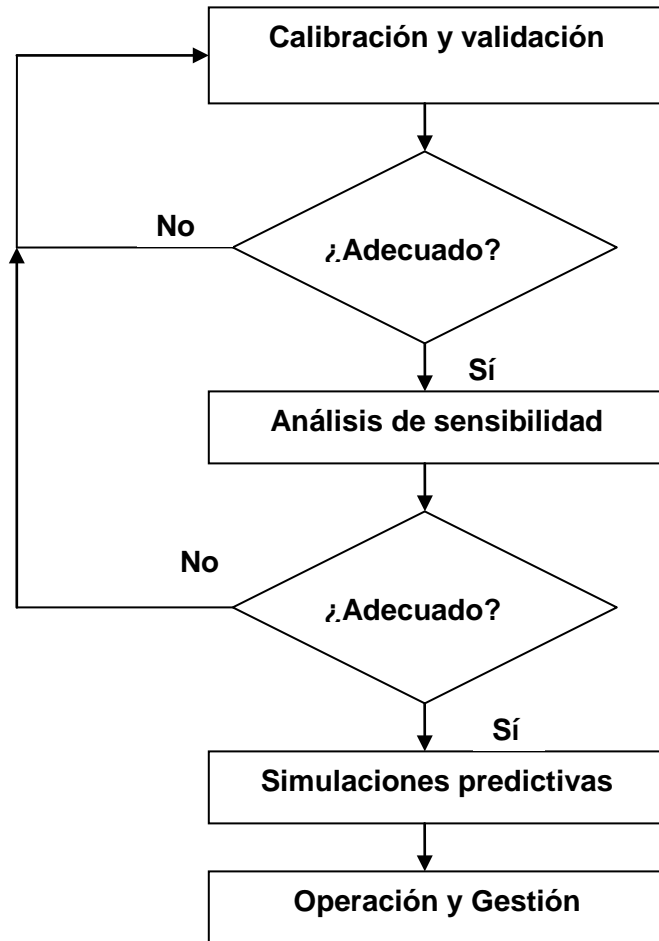


Diagrama 1. Secuencia metodológica utilizada en la construcción del modelo

## 5.9.7 Obtención e interpretación de resultados

### 5.9.7.1 Modelo de flujo de agua subterránea

La corrida del modelo numérico del flujo, arrojó como resultados cargas hidráulicas calculadas para el año más reciente (con objeto de reproducir la situación actual) con las que se definió una piezometría conformada por líneas equipolencias, cuya distribución se muestra en la siguiente figura.

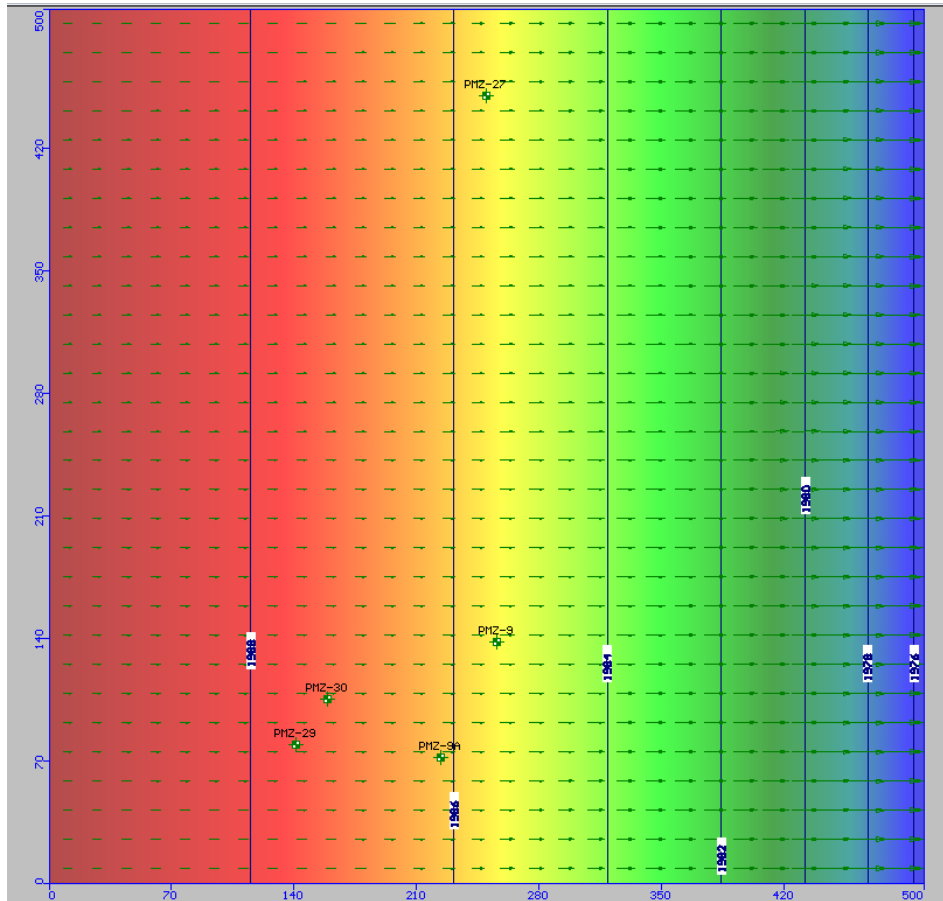


Figura 21. Piezometría calculada en el modelo de flujo.

La piezometría calculada en el modelo tiene una configuración muy similar a la real, donde se aprecian líneas equipotenciales E-W con cargas hidráulicas de 1976 msnm a 1988 msnm que ocasionan una dirección preferencial de flujo subterráneo del W al E.

Cabe mencionar que las líneas equipotenciales intencionalmente se extendieron más allá del área de la planta, con objeto de evaluar el comportamiento de la pluma contaminante fuera del predio.

### Calibración del modelo de flujo

Posterior a la obtención de las cargas hidráulicas (h) se procedió a calibrar (ajustar) el modelo de flujo, variando los valores de los parámetros de entrada hasta obtener una configuración piezométrica que no sobrepasara el 10% de error con respecto a la piezometría observada.

Tras el proceso de calibración se obtuvo un NRMSE (o bien RMS) del 5%.

### 5.9.7.2 Modelo de transporte

El modelo numérico de transporte del VANADIO en la zona saturada, arrojó como resultados 3 aspectos importantes: (1) lugar, tiempo de exposición y concentraciones iniciales de las posibles fugas de VANADIO. (2) pluma contaminante (3) simulación del proceso de transporte y la evolución del comportamiento de la pluma de VANADIO vs tiempo.



## **Posibles fugas de VANADIO**

La localización de las posibles fugas que pudieron haber generado la contaminación del acuífero se muestra en la siguiente figura. En ella se aprecian dos (2) probables fugas que se representan en color azul (fuga 1) y en color verde (fuga 2).

En este apartado se interpreta lo siguiente:

### ***Fuga 1:***

- Localización: Sitio PMZ-10.
- Año estimado de la activación de la fuga: 1987.
- Tiempo estimado de exposición: 20 años, probablemente de 1987 a 2007.
- Concentración promedio de la fuga durante el tiempo de exposición: 9,200 mg/l de VANADIO.

### ***Fuga 2:***

- Localización: sitio MC-112.
- Año estimado de la activación de la fuga: 1987.
- Tiempo estimado de exposición: 20 años, probablemente de 1987 a 2007.
- Concentración promedio de la fuga durante el tiempo de exposición: 3,700 mg/l de VANADIO.

Cabe mencionar que las fugas 1 y 2 se ajustan muy bien con los puntos de mayor concentración de la pluma contaminante de VANADIO en suelo, caracterizada en la evaluación ambiental, por lo que la interpretación, parece coherente y tiene una relación con lo observado en campo.

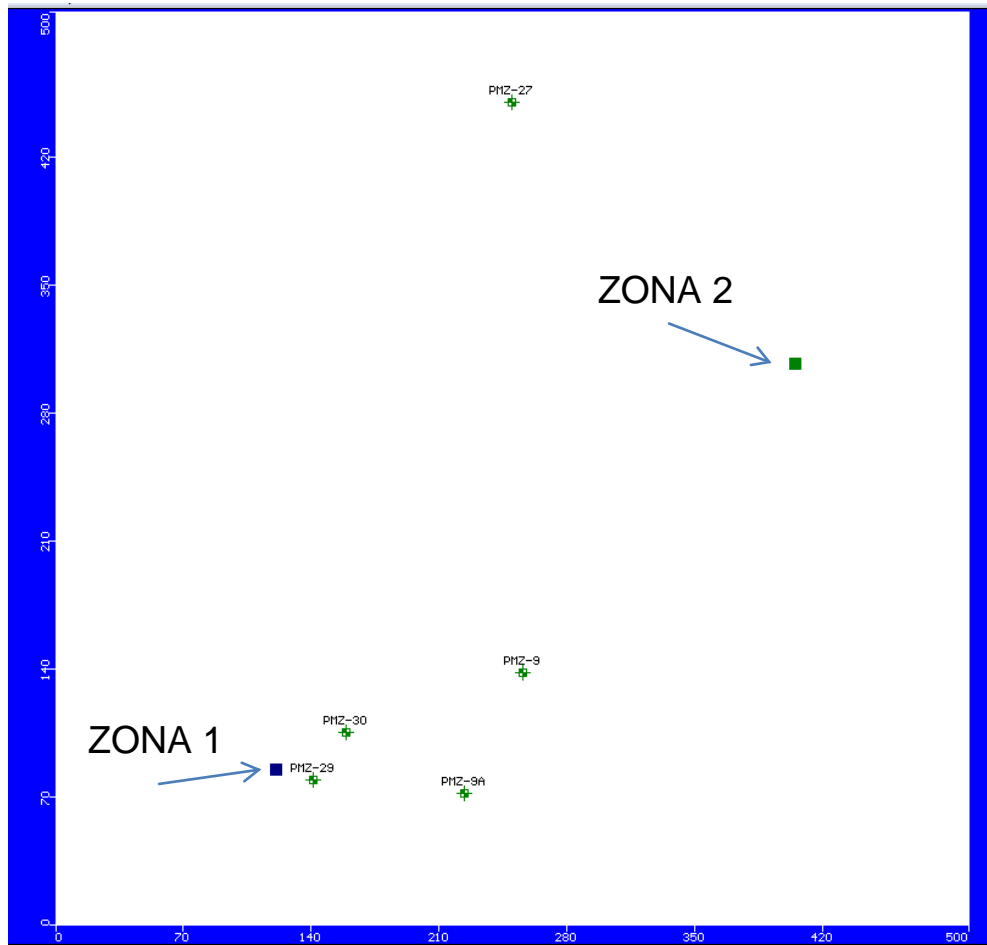


Figura 22. Localización de las posibles fugas que originaron la contaminación por VANADIO.

**NOTA ACLARATORIA:**

La interpretación anterior es solo una resolución numérica que puede tener limitaciones y puede no corresponder literalmente con la realidad.

Dicha resolución numérica significa, que la combinación de las características de las fugas (localización de las fugas, tiempo de exposición y concentraciones iniciales) dieron como resultado desde el inicio de la activación de las fugas, hasta 2008, una distribución de la pluma contaminante y unas concentraciones calculadas en los pozos de monitoreo, que se ajustan a las concentraciones medidas u observadas en campo para diciembre de 2008.

Esto no quiere decir que la distribución y características antes expuesta sea la única, puede haber múltiples interpretaciones que puedan dar como resultado un buen ajuste del modelo; y de acuerdo a diversos planteamientos probados, la interpretación anterior fue la que mejores resultados mostró.

**Configuración calculada de la pluma de VANADIO en el agua subterránea**

En este apartado se mostrará la configuración calculada en el modelo desde la activación de las posibles fugas, hasta el 2008.

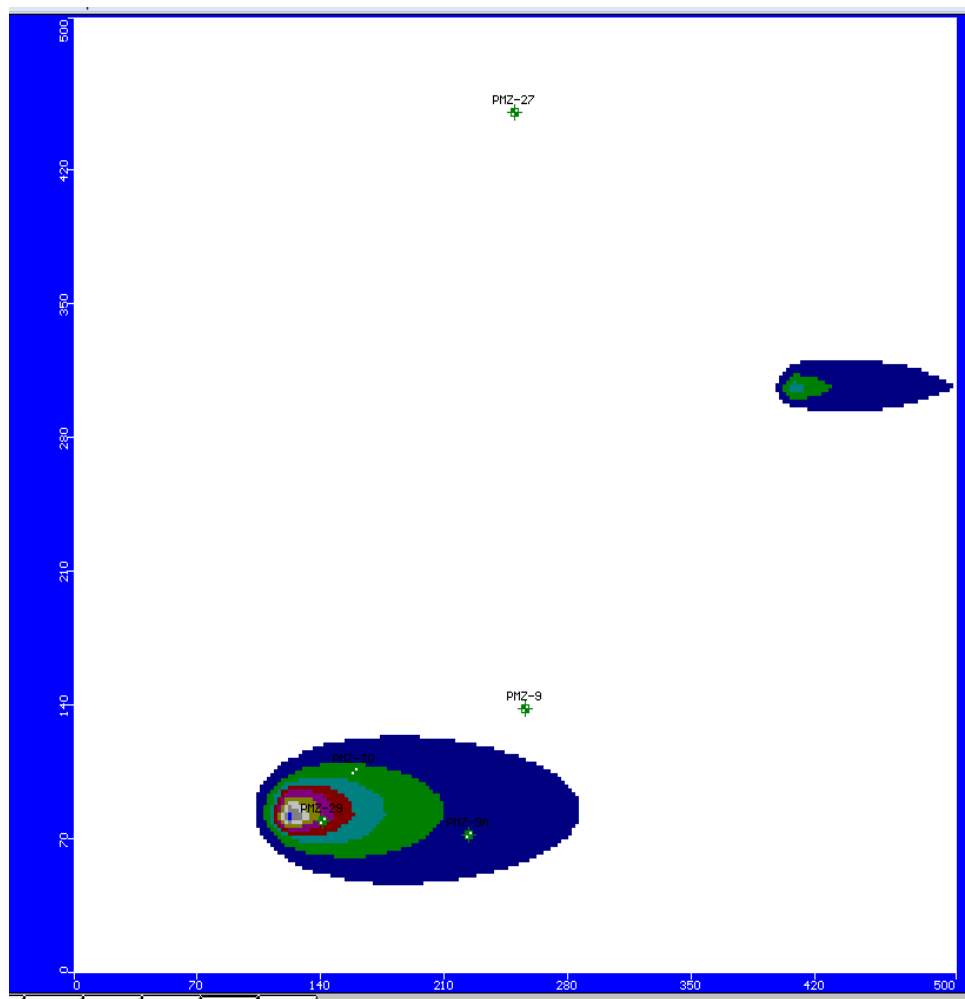


Figura 22. Configuración calculada de pluma de VANADIO en fase disuelta desarrollada entre 1987 a 2008 (concentraciones en mg/l). Isolíneas correspondientes a valores >30 mg/l

### Calibración del modelo de transporte

Posterior a la obtención de las concentraciones (C) que definieron la pluma contaminante de VANADIO, se procedió a calibrar (ajustar) el modelo de transporte, variando los valores de los parámetros de entrada hasta obtener una configuración de la pluma que no superara el 7% de error con respecto a las concentraciones observadas o medidas para diciembre de 2008.

#### NOTA ACLARATORIA:

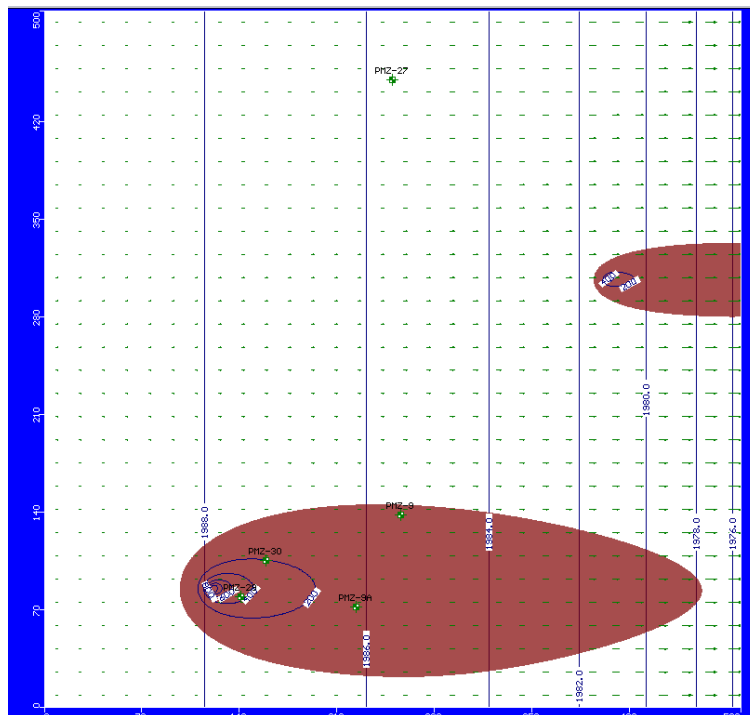
El modelo de transporte comenzó a correrse para una fecha tentativa correspondiente a 1988, por eso en la figura 22 se observa una calibración para un tiempo = 7,300 días, es decir para el 2008. ( $7,300 \text{ días} / 365 \text{ días} = 20 \text{ años} + \text{año } 1988 = \text{año } 2008$ ).

#### 5.9.7.3 Modelo de simulación en estado transitorio

Una vez que se reprodujo la condición actual del acuífero (cargas hidráulicas y concentraciones) y se aseguró una calibración con un suficiente grado de certidumbre, se procedió a generar el modelo de simulación para los siguientes intervalos de tiempo (años): 1; 3; 5; 10, 15 y 20.

Para ello se representó un escenario en el cual se eliminaron las fuentes o fugas de contaminante. Cabe mencionar que el modelo de simulación no se puede calibrar para reproducir las variaciones en el tiempo de las cargas hidráulicas y de las concentraciones, debido a que no existen concentraciones medidas (para los intervalos de tiempo de la simulación) que se puedan comparar con las concentraciones calculadas obtenidas en el modelo.

A continuación se presentan en las siguientes figuras los resultados obtenidos referentes a la extensión de la pluma de VANADIO en fase disuelta en estado transitorio.



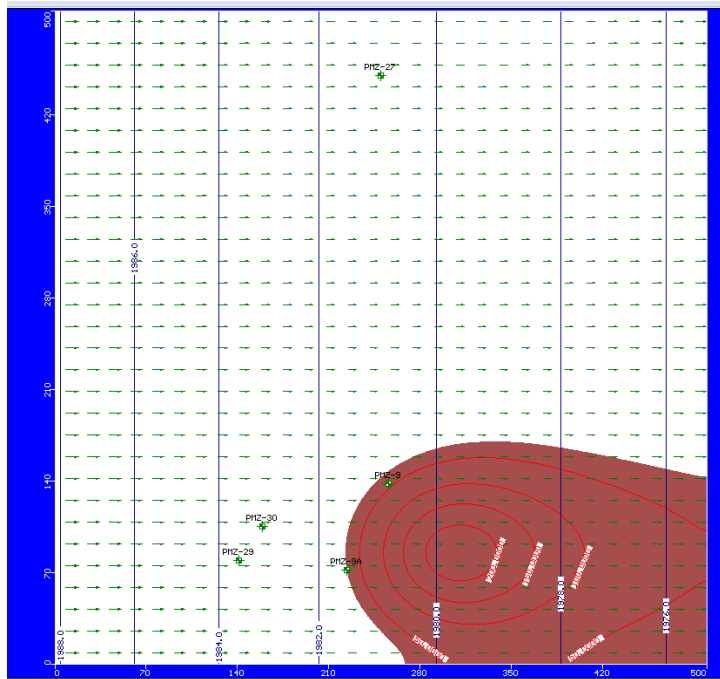


Figura 24. Distribución calculada de la pluma para 3 años.  
Concentraciones en mg/l de VANADIO.

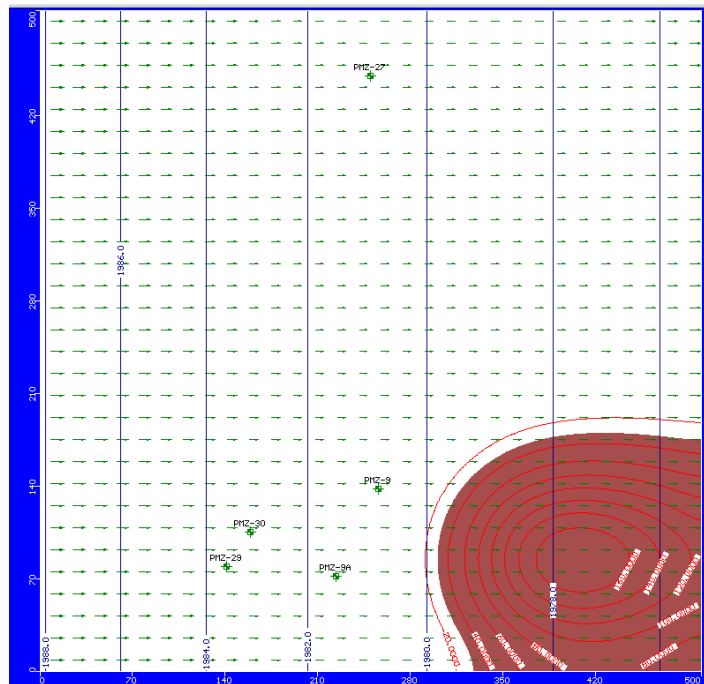


Figura 25. Distribución calculada de la pluma para 5 años.  
Concentraciones en mg/l de VANADIO.

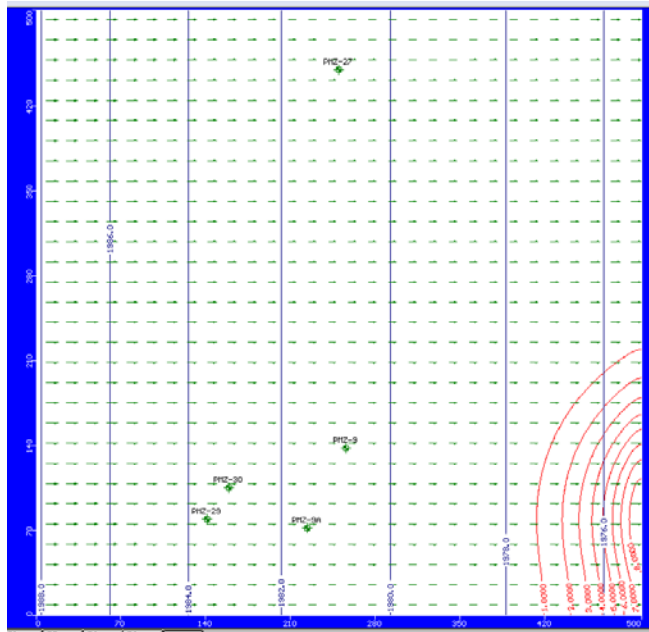


Figura 26. Distribución calculada de la pluma para 10 años.  
Concentraciones en mg/l de VANADIO.

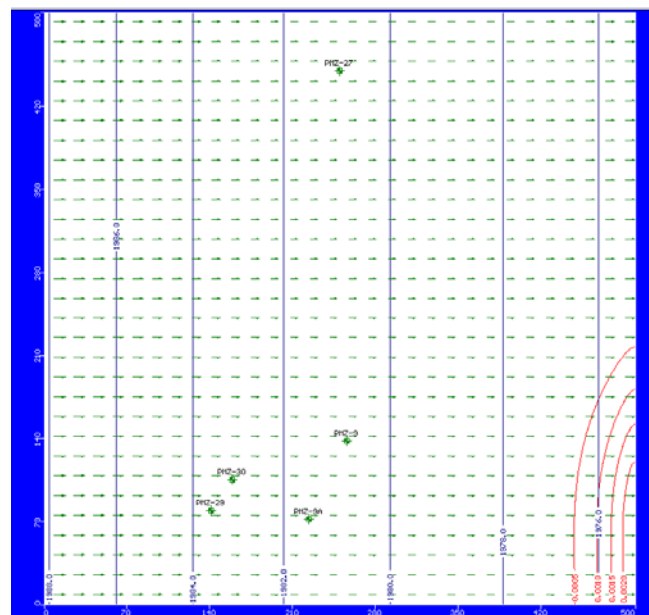


Figura 27. Distribución calculada de la pluma para 15 años.  
Concentraciones en mg/l de VANADIO.

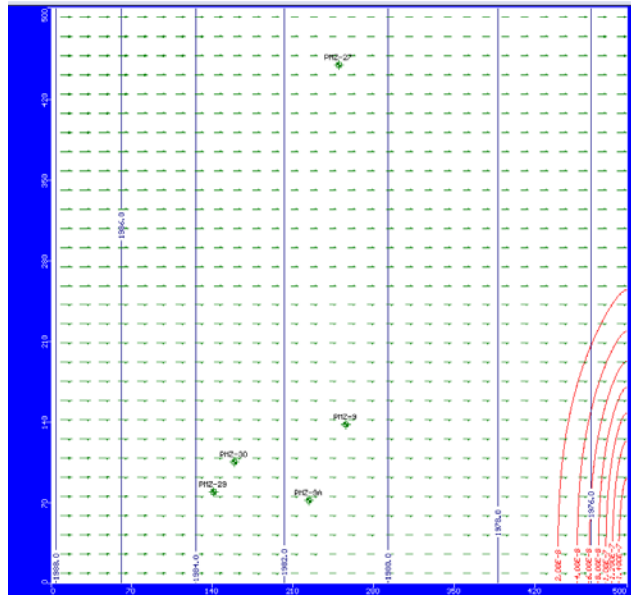


Figura 28. Distribución calculada de la pluma para 20 años.  
Concentraciones en mg/l de VANADIO.

### 5.9.8 Discusión

El modelo de simulación de flujo y transporte en estado transitorio mostró alta variabilidad de la pluma de VANADIO en fase disuelta, desde el 2008 hasta el 2028. Dicho resultado es coherente si tomamos en cuenta que la contaminación en la zona saturada se generó en un acuífero de baja conductividad hidráulica ( $< 3$  m/d), con flujo subterráneo que circula a poca velocidad, y un contaminante como el VANADIO que sufre retardo y viaja a una velocidad no mayor a 15 cm/día.

Además, hay que añadir que el acuífero en el entorno local de la planta funciona como un sistema **“semi-cerrado”**, es decir, debido a que no existen bombeos cercanos, con escasa o nula recarga a nivel local por infiltración de agua de lluvia, se puede despreciar el intercambio de flujo y/o soluto del sistema evaluado con los sistemas adyacentes.

Esto implica que la contaminación en el agua subterránea solamente migra, se desplaza por advección (que a su vez es función de la baja permeabilidad), dispersión (que a su vez es función de la baja velocidad de flujo), y difusión molecular (parámetro que incluso se puede despreciar).

Es coherente pensar en un mayor incremento en la longitud que en la anchura, debido a que la longitud está condicionada por la dirección y velocidad advectiva de flujo, mientras que la anchura está condicionada por la dispersividad y coeficiente de dispersión.

#### 5.9.8.1 Concentraciones esperadas a través del tiempo

Aun cuando la simulación de la pluma en fase disuelta mostró escasa dispersión con respecto al 2008, las concentraciones finales si mostraron variación (en su mayoría, disminución).

En la siguiente figura se muestra una gráfica de concentración calculada (mg/l) en el eje de las ordenadas vs tiempo (días) en el eje de las abscisas, donde se muestra las máximas concentraciones esperadas para los 20 años evaluados en la simulación:

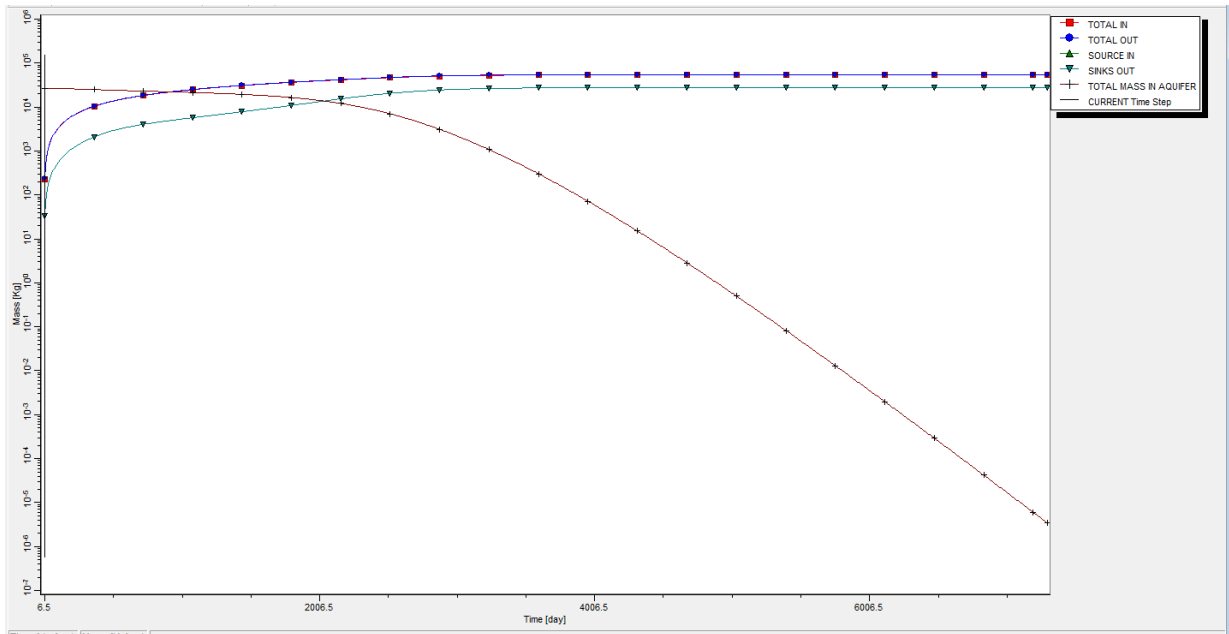


Figura 29. Concentraciones de VANADIO esperadas (mg/l) vs tiempo (días).

### 5.9.9 Conclusiones

Se interpretaron 2 posibles fugas que dieron origen a la contaminación en fase disuelta:

#### *Fuga 1:*

- Localización: Sitio PMZ-10.
- Año estimado de la activación de la fuga: 1987.
- Tiempo estimado de exposición: 20 años, probablemente de 1987 a 2007.
- Concentración promedio de la fuga durante el tiempo de exposición: 9,200 mg/l de VANADIO.

#### *Fuga 2:*

- Localización: sitio MC-112.
- Año estimado de la activación de la fuga: 1987.
- Tiempo estimado de exposición: 20 años, probablemente de 1987 a 2007.
- Concentración promedio de la fuga durante el tiempo de exposición: 3,700 mg/l de VANADIO.

Cabe mencionar que las fugas 1 y 2 se ajustan muy bien con los puntos de mayor concentración de la pluma contaminante de VANADIO en suelo, caracterizada en la evaluación ambiental, por lo que la interpretación, parece coherente y tiene una relación con lo observado en campo.



- El modelo de predicción se simuló para un intervalo de tiempo máximo de 20 años, tomando como escenario de partida la remoción de ambas fugas.
- Los resultados de la simulación para un escenario de 20 años, mostraron una importante dispersión y migración de la pluma contaminante debido a la conductividad hidráulica, baja velocidad advectiva y escaso coeficiente de dispersión longitudinal y transversal.
- Pese al poco aumento de masa de la pluma, existen variaciones de concentraciones (disminución) de VANADIO a lo largo del intervalo de tiempo evaluado.
- Aunado a la baja conductividad hidráulica, velocidad advectiva y dispersividad, la escasa migración del VANADIO en la zona, es debida a que el acuífero funciona como un sistema “semi-cerrado” (sin bombeos, sin recarga y descargas a nivel local) lo que no permite un intercambio de flujo y solutos con los sistemas adyacentes.
- La migración súbita del VANADIO podría generarse por bombeos excesivos muy cercanos a la planta y del **mismo nivel acuífero**, lo cual es muy poco factible, debido a que los bombeos de altos caudales, se llevan a cabo en acuíferos más profundos con mayor permeabilidad (o transmisividad) de los cuales se pueda maximizar el volumen de agua, minimizando el descenso en las captaciones.
- El proceso de dispersión y difusión podría ayudar a reducir drásticamente las concentraciones de VANADIO en los próximos 20 años, de mantenerse las condiciones hidrogeoquímicas que se aplicaron en el modelo de simulación.
- Con el modelo se calculó la variación del tamaño de la pluma bajo los efectos del cese de las fugas y la acción de dispersión del contaminante. Los resultados indican que a partir del décimo años el contaminante se ha dispersado en toda la zona y su concentración a disminuido muy por debajo de los niveles establecidos en las normas, y a niveles prácticamente imperceptibles por las técnicas de análisis de laboratorio.

## 6 Conclusiones y recomendaciones

### 6.1 Conclusiones

Las actividades llevadas a cabo en las instalaciones en donde se encuentra el área de estudio correspondieron a 39 perforaciones de sondeos ambientales; estas actividades se dividieron básicamente en 3 áreas, seleccionadas de acuerdo a un diagnóstico ambiental preliminar. En este estudio se colectaron de 2 a 3 muestras por sondeo para ser analizadas por algunos de los siguientes parámetros: VOC's, Metales (RCRA), Sulfatos, Vanadio, pH y/o CRETIB.

Otra de las actividades llevadas a cabo, fue el muestreo de agua de 8 pozos de monitoreo y 4 norias cercanas a la planta, a dichas muestras se les realizaron los siguientes análisis: VOC's, SVOC's, Sulfatos y Vanadio.

Así mismo este estudio fue complementado con otras investigaciones como lo fueron el estudio de exploración geofísica y modelación numérica del flujo de agua subterránea.

#### 6.1.1 Investigación de suelo y residuos

Se realizaron todas las actividades necesarias que fueron posibles llevar a cabo en sitio, para determinar las condiciones ambientales prevalecientes del suelo y residuos en las instalaciones de una planta de procesos químicos ubicada dentro de un complejo industrial en la parte norte del estado de Michoacán para confirmar la presencia de contaminación en el sitio de acuerdo con los criterios de referencia utilizados.

##### 6.1.1.1 Suelo

- Conforme a los resultados reportados por el laboratorio para **Compuestos Orgánicos Volátiles (VOC's)**, se concluye las dos muestras colectadas en el sondeo SB 11 ubicado en el área de la antigua bodega; exceden los límites contenidos en las Metas Preliminares de Remediación (Preliminary Remedial Goals, PRG's), generadas por la USEPA, Región 9, 2004 y los Regional Screening Levels for Chemical Contaminants at Superfund Sites (RSLChC), versión 2008, que sustituyen a los PRGs-2004 (Preliminary Remediation Goals).
- De acuerdo con los resultados reportados por el laboratorio para el análisis de **Vanadio** se concluye que en ninguna de las muestras analizadas por este parámetro se detectaron concentraciones superiores a los criterios de comparación establecidos en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 que establece los "Criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plomo, selenio, talio y Vanadio" así como con los contenidos en las Metas Preliminares de Remediación (Preliminary Remedial Goals, PRG's), generadas por la USEPA, Región 9, 2004 y los Regional Screening Levels for Chemical Contaminants at Superfund Sites (RSLChC), versión 2008, que sustituyen a los PRGs-2004 (Preliminary Remediation Goals).
- De conformidad con los resultados reportados por el laboratorio para el análisis de **Sulfatos** se determina que en ninguna de las muestras analizadas por este parámetro se detectaron concentraciones superiores a los criterios de comparación contenidos en las Metas Preliminares de Remediación (Preliminary Remedial Goals, PRG's), generadas por la USEPA, Región 9, 2004 y los Regional Screening Levels for Chemical Contaminants at Superfund Sites (RSLChC), versión 2008, que sustituyen a los PRGs-2004 (Preliminary Remediation Goals).
- Respecto a los resultados reportados por el laboratorio para el análisis de **Metales** se define que en ninguna de las muestras analizadas por este parámetro se detectaron concentraciones

superiores a los criterios de comparación establecidos en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 que establece los “Criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plomo, selenio, talio y Vanadio”

#### 6.1.1.2 Residuos

- Conforme a los resultados reportados por el laboratorio los valores reportados del análisis **CRETIB**, se concluye ninguna de las muestras compuestas exceden los límites establecidos en la NOM-052-SEMARNAT-2005, que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos.

#### 6.1.2 Investigación de agua subterránea

Se realizaron todas las actividades necesarias que fueron posibles llevar a cabo en sitio, para determinar las condiciones ambientales prevalecientes en el agua subterránea que subyace las instalaciones de una planta de procesos químicos ubicada dentro de un complejo industrial en la parte norte del estado de Michoacán para confirmar la presencia de contaminación en el sitio de acuerdo con los criterios de referencia utilizados.

##### 6.1.2.1 Agua subterránea

- Conforme a los resultados reportados por el laboratorio para **Compuestos Orgánicos Volátiles (VOC's)**, se concluye que las muestras colectadas en los pozos PMZ-9 A y PMZ-10, ubicados al sur de la planta; exceden los límites contenidos en las Metas Preliminares de Remediación (Preliminary Remedial Goals, PRG's), generadas por la USEPA, Región 9, 2004 y los Regional Screening Levels for Chemical Contaminants at Superfund Sites (RSLChC), versión 2008, que sustituyen a los PRGs-2004 (Preliminary Remediation Goals).
- Respecto a los resultados reportados por el laboratorio para **Compuestos Orgánicos Semi Volátiles (SVOC's)**, se concluye que la muestras colectada en el pozos PMZ-10, ubicado al sur de la planta; exceden los límites contenidos en las Metas Preliminares de Remediación (Preliminary Remedial Goals, PRG's), generadas por la USEPA, Región 9, 2004 y los Regional Screening Levels for Chemical Contaminants at Superfund Sites (RSLChC), versión 2008, que sustituyen a los PRGs-2004 (Preliminary Remediation Goals).
- De acuerdo con los resultados reportados por el laboratorio para el análisis de **Vanadio** se concluye que en 4 de las muestras analizadas por este parámetro; de las cuales 2 corresponden a los pozos PMZ-10 y PMZ-27 y 2 restantes a las norias MC-109 y MC-112; se detectaron concentraciones superiores a los criterios de referencia contenidos en las Metas Preliminares de Remediación (Preliminary Remedial Goals, PRG's), generadas por la USEPA, Región 9, 2004 y los Regional Screening Levels for Chemical Contaminants at Superfund Sites (RSLChC), versión 2008, que sustituyen a los PRGs-2004 (Preliminary Remediation Goals).
- De conformidad con los resultados reportados por el laboratorio para el análisis de **Sulfatos** se concluye que en 7 de las muestras analizadas por este parámetro; de las cuales 6 corresponden a los pozos de monitoreo y 1 a las norias; se detectaron concentraciones superiores a los criterios de referencia contenidos en las Metas Preliminares de Remediación (Preliminary Remedial Goals, PRG's), generadas por la USEPA, Región 9, 2004 y los Regional Screening Levels for Chemical Contaminants at Superfund Sites (RSLChC), versión 2008, que sustituyen a los PRGs-2004 (Preliminary Remediation Goals).

Sin embargo, con base a la investigación durante este proyecto, se ha reconocido que gran parte las concentraciones se deben a las características naturales de los suelos de la antigua ciénega de Zacapu; aunque esta consideración no elimina la posible influencia de las actividades industriales en sus colindancias.

#### **6.1.2.2 Isoconcentraciones**

- Utilizando mapas de iso-concentraciones se ha podido interpretar la presencia de una pluma contaminante en el área de estudio
- Los resultados demuestran una posible fuente de contaminación, la cual puede ser generada en el área de la antigua bodega y con una migración hacia la parte baja (PMZ-9), de acuerdo a la dirección del flujo de agua estimada (hacia el este).

#### **6.1.2.3 Exploración geofísica**

- Los resultados de la interpretación de los diez Sondeos Eléctricos Verticales arrojan cinco Unidades Geoléticas.

Las unidades A1, A2 y A3 se relacionan a depósitos o cubiertas superficiales correspondientes con arcillas y bajo contenido de arenas de baja permeabilidad, arenas de buena permeabilidad y arcillas impermeables, respectivamente. Éstas, sin interés geohidrológico

A1 y A3 en conjunto actúan como sellos impermeables; A2 por el contrario actúa permeable, sin embargo el agua pluvial que pudiera recargar el acuífero a través de ésta tiende a ser retenida por la unidad inferior

Subyaciendo a ésta se tiene la unidad B asociada con un potente paquete de arenas y arcillas de origen lacustre saturado con agua de mala calidad.

Por último la unidad C relacionada con un paquete volcanoclástico constituido de arenas, arcillas y fragmentos de roca y/o basalto fracturado, en conjunto saturado con agua de buena calidad.

- Hidrogeológicamente en el área del presente estudio, puede determinarse que no existe infiltración hacia el subsuelo debido a la constitución fina de la estratigrafía superior (arcillas), como se determinó con las secciones geofísicas. El agua pluvial se infiltra hacia el subsuelo por el lado este del área por medio de las estructuras volcánicas, el agua es de buena calidad de reciente infiltración y se localiza a profundidad en la unidad C, anteriormente mencionada. El agua de mala calidad persiste en la unidad B debido a antiguos cuerpos de agua salada que fueron desecados.

#### **6.1.2.4 Permeabilidad y dirección de flujo**

- Dentro de las actividades antes descritas y realizadas, se puede mencionar que las pruebas de permeabilidad permitieron clasificar el acuitardo, como un cuerpo de agua subterránea somera de baja conductividad hidráulica.
- Con los datos de nivelación de pozos de monitoreo existentes, y las lecturas de niveles de agua colectadas en campo, se obtuvo una dirección del flujo de agua debajo de la planta en esta época del año, tiene una dirección preferente hacia el este.

#### **6.1.2.5 Modelación numérica del agua subterránea**

- Se realizó el modelo de simulación, donde se analizó el comportamiento, distribución y concentraciones de la pluma contaminante para diferentes intervalos de tiempo: 1 año, 3 años, 5 años, 10 años, 15 años y 20 años. Para ello se simuló el escenario referente al cese de aporte de VANADIO al sistema debido a las fugas. Con el modelo se calculó la variación del tamaño de la pluma bajo los efectos del cese de las fugas y la acción de dispersión del contaminante.
- Los resultados obtenidos en el modelos de simulación indican que a partir del décimo año el contaminante se ha dispersado en toda la zona y su concentración a disminuido muy por debajo de los niveles establecidos en las normas, y a niveles prácticamente imperceptibles por las técnicas de análisis de laboratorio.
- Los resultados de la modelación se ajustan muy bien con los puntos de mayor concentración de la pluma contaminante de VANADIO en suelo, caracterizada en la evaluación ambiental, por lo que la interpretación, parece coherente y tiene una relación con lo observado en campo.

## 6.2 Recomendaciones

De acuerdo a las conclusiones emitidas, podemos mencionar que existe básicamente impacto en el suelo y agua por compuestos clorados y la presencia de Vanadio en altas concentraciones en 2 pozos de monitoreo y 2 norias, por consiguiente se recomienda lo siguiente:

- Se deberá proceder con la Evaluación de Riesgo de acuerdo con la Guía técnica para orientar la elaboración de estudios de evaluación de riesgo ambiental de sitios contaminados.

Debido a que las norias reportan concentraciones elevadas de Vanadio aunado al hecho de que el agua analizada es utilizada para realizar actividades tales como la fabricación de tabiques y que la segunda noria se utiliza para actividades domesticas y consumo de animales; se recomienda cancelar el suministro de agua procedente de dichas norias.

Apéndice 1  
Registros Litológicos

REGISTRO LITOLÓGICO

Proyecto: Demacsa  
 No. Proyecto: 08038M Fecha: 04-dic-08

Sondeo: SB-9  
 Página: 1 de 1

Profundidad en metros	Número de identificación de la muestra	Registro gráfico	Muestra	Tipo de muestra	Golpes por pie, caída libre 140 lb, 30"	Lectura de gases a través del barreno (LIE, O <sub>2</sub> , ppm)	Prueba de gases en suelo (LIE, ppm)	Clasificación de Suelo
0				H				
0.5								CL
1	SB-9-1m							SP
1.5								CL
2	SB-9-2m							OL
2.5						1, 50	0, 30	SW
3								
3.5								
4								
4.5								
5								

Tipo de perforadora: Hand auger  
 Tipo de sondeo: Manual  
 Ubicación:  
 Coordenada UTM X: 14Q 0209638  
 Coordenada UTM Y: 2195263

NOTAS	CLASIFICACION VISUAL
	Concreto armado
Media Alta	Material de relleno arcilloso pardo claro con gravas mal clasificadas, arenas, sin olor ni impregnación, deleznable plasticidad nula
Media	Arenas gravaceas pardo oscura a negra, mal clasificadas, deleznales, sin olor ni impregnación
Media	Arcilla pardo ocre, compacta plasticidad media con escasos frag. de grava mal clasificadas color impreg, rojizo, escaso a moderado olor a pastilla de baño, escasas manchas de oxidación amarillentas
Media	Arcilla limosa gris verdosa con tintes amarillentos, deleznable escasa plasticidad escaso olor a sulfuro
Media Alta	Arenas color gris verdoso, deleznales, poco compacta, olor escaso o nulo
Saturada	Arena media bien clasificada, deleznable color negro, escasas manchas cafes sin olor ni impregnación
	Se termino el sondeo debido a la presencia de agua  muestra : 2 [m] Sondeo: 2. 30 [m]

AGUA SUBTERRÁNEA

PROF.	FECHA	HORA

TIPO DE MUESTRA  
 A - Cortes de barreno  
 S- 2" D. E. 1.38" D. I. Muestra de tubo partido  
 U- 3" D. E. 2.42" D. I. Muestra de tubo partido  
 T - 3" D. E. Tubo Shelby de pared delgada

L - Liner  
 H - Hand Auger

REGISTRO LITOLOGICO

Proyecto: Demacsa  
 No. Proyecto: 08038M Fecha: 04-dic-08

Sondeo: SB-10  
 Página: 1 de 1

Profundidad en metros	Número de identificación de la muestra	Registro gráfico	Muestra	Tipo de muestra	Golpes por pie; caída libre 140 lb, 30"	Lectura de gases a través del barreno (LIE, O <sub>2</sub> , ppm)	Prueba de gases en suelo (LIE, ppm)	Clasificación de Suelo	NOTAS	CLASIFICACION VISUAL
0				H				GC	Escasa a Baja	Material de relleno, gravilla arcillosa pardo claro, mal clasificado, deleznable sin olor ni impregnación
0,5										Fragmentos de ladrillos rojos, hay tornillos
1	SB-10-1m							CL	Baja Media	Arcilla parda, arenas, compacta plasticidad media, escasos fragmentos de grava mal clasificada sin olor ni impregnación aparente
1,5	SB-10-2m							CL	Media Alta	Arcilla parda verdosa con manchas negras, compacta, plasticidad media, olor medio a alto pastilla de baño
2						0, 10	0, 10	CL	Alta	Presenta alteración por agua (color gris blanquiso) se comienza a observar película de contaminación en la humedad.  Arcilla, gris verdosa a blanquisa, olor media pastilla de baño, compacta, baja plasticidad, manchas verdes
2,5										
3										
3,5										
4										
4,5										
5										Fin del muestreo, sondeo 2 [m], debido a la saturación de agua

AGUA SUBTERRÁNEA

PROF.	FECHA	HORA

TIPO DE MUESTRA  
 A - Cortes de barreno  
 S- 2" D. E. 1.38" D. I. Muestra de tubo partido  
 U- 3" D. E. 2.42" D. I. Muestra de tubo partido  
 T - 3" D. E. Tubo Shelby de pared delgada

L - Liner  
 H - Hand Auger



REGISTRO LITOLÓGICO

Proyecto: Demacsa  
 No. Proyecto: 08038M Fecha: 04-dic-08

Sondeo: SB-11  
 Página: 1 de 1

Profundidad en metros	Número de identificación de la muestra	Registro gráfico	Muestra	Tipo de muestra	Golpes por pie, caída libre 140 lb, 30"	Lectura de gases a través del barreno (LIE, O <sub>2</sub> , ppm)	Prueba de gases en suelo (LIE, ppm)	Clasificación de Suelo	NOTAS	CLASIFICACION VISUAL
0				H						Cubierta vegetal
0,5								MH		Escaso a Bajo Limos pardo ocre, semi compacto, deleznable, sin plasticidad, sin olor ni impregnación, con gravas de 0.5 [mm] mal clasificadas, deleznales
1	SB-11-1m									Baja a Media Arcilla pardo claro, compacta, plasticidad media escaso olor a pastilla de baño sin impregnación
1,5										Baja a Media Arcilla parda grisácea, manchas oscuras y blancas, compactas plasticidad media, manchas pardas verduscas, presenta alteración por agua, sin olor
2	SB-11-2.10m									Media Alta Arcilla arenosa gris claro, mal clasificada, compacta y escasa plasticidad, escaso olor a pastilla de baño, manchas blancas
2,5						1, 20	0, 20			meda Alta Limo arenoso pardo, compacto presencia de gravas mal clasificada, escasa plasticidad, olor fuerte a pastilla de baño, muestra manchas negras
3										Alta Arena gris, negra, deleznable, compacta olor fuerte a pastilla de baño presenta alteración por agua
3,5										Fin del muestreo 2. 10 [m] debido a la presencia de agua
4										
4,5										
5										

AGUA SUBTERRÁNEA

PROF.	FECHA	HORA

TIPO DE MUESTRA  
 A - Cortes de barreno  
 S- 2" D. E. 1.38" D. I. Muestra de tubo partido  
 U- 3" D. E. 2.42" D. I. Muestra de tubo partido  
 T - 3" D. E. Tubo Shelby de pared delgada  
 L - Liner  
 H - Hand Auger

REGISTRO LITOLÓGICO

Proyecto: Demacsa  
 No. Proyecto: 08038M Fecha: 04-dic-08

Sondeo: SB-12  
 Página: 1 de 1

Profundidad en metros	Número de identificación de la muestra	Registro gráfico	Muestra	Tipo de muestra	Golpes por pie, caída libre 140 lb, 30"	Lectura de gases a través del barrenado (LIE, O <sub>2</sub> , ppm)	Prueba de gases en suelo (LIE, ppm)	Clasificación de Suelo
0								
0,5								OL
1	SB-12-1m							CL
1,5								CL
2	SB-12-2.10m							CL
2,5						0,30	0,30	
3								
3,5								
4								
4,5								
5								

Tipo de perforadora: Hand auger  
 Tipo de sondeo: Manual  
 Ubicación:  
 Coordenada UTM X: 14Q 0209643  
 Coordenada UTM Y: 2195244

NOTAS	CLASIFICACION VISUAL
	Cubierta vegetal
Nula	Arcilla limosa pardo claro deleznable con presencia de gravas mal clasificadas sin olor ni impregnación
Media a Baja	Arcilla pardo claro, compacta, plasticidad media sin olor ni impregnación
Media	Arcilla pardo oscuro, compacta, plasticidad media sin olor ni impregnación
	Arcilla pardo oscuro, presenta alta alteracion por agua, blancuzca, compacta, escasa plasticidad sin olor ni impregnación
	Fin del sondeo y muestreo 2. 10 [m]

AGUA SUBTERRÁNEA

PROF.	FECHA	HORA

TIPO DE MUESTRA

- A - Cortes de barrenado
- S- 2" D. E. 1.38" D. I. Muestra de tubo partido
- U- 3" D. E. 2.42" D. I. Muestra de tubo partido
- T - 3" D. E. Tubo Shelby de pared delgada

- L - Liner
- H - Hand Auger

REGISTRO LITOLÓGICO

Proyecto: Demacsa  
 No. Proyecto: 08038M Fecha: 04-dic-08

Sondeo: SB-13  
 Página: 1 de 1

Profundidad en metros	Número de identificación de la muestra	Registro gráfico	Muestra	Tipo de muestra	Golpes por pie, caída libre 140 lb, 30"	Lectura de gases a través del barreno (LIE, O <sub>2</sub> , ppm)	Prueba de gases en suelo (LIE, ppm)	Clasificación de Suelo
0				H				
0,5								CL
1	SB-13-1m							CL
1,5								CL
2	SB-13-2m							SW
2,5						0, 30	0, 40	
3								
3,5								
4								
4,5								
5								

Tipo de perforadora: Hand auger  
 Tipo de sondeo: Manual  
 Ubicación: 14Q 0209643  
 Coordenada UTM X: 2195244  
 Coordenada UTM Y:

NOTAS	CLASIFICACION VISUAL
	Cubierta vegetal
Escasa Nula	Arcilla gravosa con arenas pardo claro mal clasificada deleznable, sin olor ni ni impregnación, sin plasticidad
Media Alta	Arcilla pardo oscuro, con franjas negras, mal clasificadas, compacta, plasticidad media sin olor ni impregnación
Media	Arcilla pardo claro, compacta poca plasticidad, dura, sin olor ni impregnación
Alta	Arena negra, deleznable, bien clasificada sin olor ni impregnación
	Fin del sondeo 2.0 [m]

AGUA SUBTERRÁNEA

PROF.	FECHA	HORA

TIPO DE MUESTRA  
 A - Cortes de barreno  
 S - 2" D. E. 1.38" D. I. Muestra de tubo partido  
 U - 3" D. E. 2.42" D. I. Muestra de tubo partido  
 T - 3" D. E. Tubo Shelby de pared delgada

L - Liner  
 H - Hand Auger

REGISTRO LITOLOGICO

Proyecto: Demacsa  
 No. Proyecto: 08038M Fecha: 04-dic-08

Sondeo: SB-14  
 Página: 1 de 1

Profundidad en metros	Número de identificación de la muestra	Registro gráfico	Muestra	Tipo de muestra	Golpes por pie, caída libre 140 lb, 30"	Lectura de gases a través del barreno (LIE, O <sub>2</sub> , ppm)	Prueba de gases en suelo (LIE, ppm)	Clasificación de Suelo
0								
0,5				H				CL
1	SB-14-1M							CL
1,5								CL
2	SB-14-2m							SW
2,5						2,60	1,5	
3								
3,5								
4								
4,5								
5								

Tipo de perforadora: Hand auger  
 Tipo de sondeo: Manual  
 Ubicación:  
 Coordenada UTM X: 14Q 0209639  
 Coordenada UTM Y: 2195278

NOTAS	CLASIFICACION VISUAL
	Concreto
Escaso	Material de relleno pardo claro, arcilla con gravas y arenas, mal clasificadas deleznales sin olor ni impregnación
Media	Arena gravosa mal clasificada, pardo oscuro, deleznable, sin olor ni impregnación, escasa presencia de arcilla
Media	Arcilla gris oscura con gran presencia de manchas negras, compacta, plasticidad media, olor escaso o nulo
Media	Arcilla pardo claro, compacta deleznable sin plasticidad, escasa manchas negras y blancas, escaso a moderado olor a pastilla de baño
Alta	Arena negra, bien clasificada, medio deleznable sin olor ni impregnación
	Fin del sondeo y muestreo 2.0 [m]

AGUA SUBTERRÁNEA

PROF.	FECHA	HORA

TIPO DE MUESTRA  
 A - Cortes de barreno  
 S - 2" D. E. 1.38" D. I. Muestra de tubo partido  
 U - 3" D. E. 2.42" D. I. Muestra de tubo partido  
 T - 3" D. E. Tubo Shelby de pared delgada  
 L - Liner  
 H - Hand Auger

REGISTRO LITOLÓGICO

Proyecto: Demacsa  
 No. Proyecto: 08038M Fecha: 04-dic-08

Sondeo: STD-1  
 Página: 1 de 1

Profundidad en metros	Número de identificación de la muestra	Registro gráfico	Muestra	Tipo de muestra	Golpes por pie, calda libre 140 lb, 30"	Lectura de gases a través del barreno (LIE, O <sub>2</sub> , ppm)	Prueba de gases en suelo (LIE, ppm)	Clasificación de Suelo
0								
								CL
0.5								CL
	STD-1-0.9m							
1	STD-A							CL
1.5	STD-1-1.5m							CH
	STD-B							
						1, 30	1, 40	
2								
2.5								
3								
3.5								
4								
4.5								
5								

Tipo de perforadora: Hand auger  
 Tipo de sondeo: Manual  
 Ubicación: 14Q0209681  
 Coordenada UTM X: 2195331  
 Coordenada UTM Y:

NOTAS	CLASIFICACION VISUAL
	Relleno
	Chapopote
Media	Arcilla pardo claro a verde, deleznable, olor a azufre, medio impregnable
Media	Arcilla gris oscura, plasticidad media, compacta, escaso olor a azufre, sin impregnación
Media Alta	Arcilla gris claro, compacta, plasticidad media, sin olor, con manchas blancas
Alta	Arcilla gris oscuro, plasticidad alta, compacta, sin olor ni impregnación
	Fin del sondeo y muestreo 1.5 [m], debido a la presencia de agua

AGUA SUBTERRÁNEA

PROF.	FECHA	HORA

TIPO DE MUESTRA

- A - Cortes de barreno
- S- 2" D. E. 1.38" D. I. Muestra de tubo partido
- U- 3" D. E. 2.42" D. I. Muestra de tubo partido
- T - 3" D. E. Tubo Shelby de pared delgada

L - Liner  
 H - Hand Auger

REGISTRO LITOLÓGICO

Proyecto: Demacsa  
 No. Proyecto: 08038M Fecha: 05-dic-08

Sondeo: STD-2  
 Página: 1 de 1

Profundidad en metros	Número de identificación de la muestra	Registro gráfico	Muestra	Tipo de muestra	Golpes por pie, caída libre 140 lb., 30"	Lectura de gases a través del barreno (LIE, O <sub>2</sub> , ppm)	Prueba de gases en suelo (LIE, ppm)	Clasificación de Suelo
0		[Red pattern]		H				
0.5		[Dark grey pattern]						GP
1	STD-2-0.9m STD-2-1m	[Red pattern]	[Blue pattern]					CL
1.5						1, 30	2, 50	
2								
2.5								
3								
3.5								
4								
4.5								
5								

Tipo de perforadora: Hand auger  
 Tipo de sondeo: Manual  
 Ubicación: 14Q0209652  
 Coordenada UTM X: 2T95318  
 Coordenada UTM Y:

NOTAS	CLASIFICACION VISUAL
	Astalto 3 cm
Baja	Material de relleno, rocas de 26 [cm], gravas, arenas mal clasificadas, color rojizo a gris, escaso olor a azufre, fuerte impregnación a azufre color amarillo
Media Alta	Arcilla gris oscura, plasticidad media, compacta, escaso olor a azufre, sin impregnación
Alta	Arcilla parda, compacta, plasticidad media alta, olor moderado a azufre claro, impregnabilidad baja
	fin del sondeo 1 [m] debido a la presencia de agua.  Superficialmente se aprecian manchas blancas y oxidaciones amarillentas por azufre

AGUA SUBTERRÁNEA

PROF.	FECHA	HORA

TIPO DE MUESTRA  
 A - Cortes de barreno  
 S- 2" D. E. 1.38" D. I. Muestra de tubo partido  
 U- 3" D. E. 2.42" D. I. Muestra de tubo partido  
 T - 3" D. E. Tubo Shelby de pared delgada

L - Liner  
 H - Hand Auger

REGISTRO LITOLOGICO

Proyecto: Demacsa  
 No. Proyecto: 08038M Fecha: 05-dic-08

Sondeo: STD-3  
 Página: 1 de 1

Profundidad en metros	Número de identificación de la muestra	Registro gráfico	Muestra	Tipo de muestra	Golpes por pie, caída libre 140 lb., 30"	Lectura de gases a través del barreno (LIE, O <sub>2</sub> , ppm)	Prueba de gases en suelo (LIE, ppm)	Clasificación de Suelo
0								
0.5	STD-3-0.5M							
	STD-3-0.6m					2, 70	2, 70	
1								
1.5								
2								
2.5								
3								
3.5								
4								
4.5								
5								

Tipo de perforadora: \_\_\_\_\_  
 Tipo de sondeo: \_\_\_\_\_  
 Ubicación: \_\_\_\_\_  
 Coordenada UTM X: 14Q0209626  
 Coordenada UTM Y: 2195309

NOTAS	CLASIFICACION VISUAL
Media Alta	Material de relleno, grava rojiza, mal clasificada, deleznable, olor muy a solvente, azufre fuerte impregnación
Alta	Arcilla pardo oscuro, compacta, plasticidad media, dureza media, olor muy fuerte a podrido, a solvente, azufre
	Se deja el sondeo a 0.5[m] debido a la presencia de agua.
	En la zona se aprecia oxidación por azufre y grandes manchas de color blanco
	Olor a gas
	Cloruro de metilo Oxido de propileo Methyl chloride propylenexido

AGUA SUBTERRÁNEA		
PROF.	FECHA	HORA

TIPO DE MUESTRA  
 A - Cortes de barreno  
 S- 2" D. E. 1.38" D. I. Muestra de tubo partido  
 U- 3" D. E. 2.42" D. I. Muestra de tubo partido  
 T - 3" D. E. Tubo Shelby de pared delgada  
 L - Liner  
 H - Hand Auger

REGISTRO LITOLÓGICO

Proyecto: Demacsa  
 No. Proyecto: 08038M Fecha: 05-dic-08

Sondeo: STD-4  
 Página: 1 de 1

Profundidad en metros	Número de identificación de la muestra	Registro gráfico	Muestra	Tipo de muestra	Golpes por pie, caída libre 140 lb., 30"	Lectura de gases a través del barreno (LIE, O <sub>2</sub> , ppm)	Prueba de gases en suelo (LIE, ppm)	Clasificación de Suelo
0				H				Gp
0.5	STD-5-0.5m							CL
	STD-5-0.6m					1, 40	1, 40	
1								
1.5								
2								
2.5								
3								
3.5								
4								
4.5								
5								

Tipo de perforadora: Hand auger  
 Tipo de sondeo: Manual  
 Ubicación:  
 Coordenada UTM X: 14Q0209623  
 Coordenada UTM Y: 2195318

NOTAS	CLASIFICACION VISUAL
	Grava gris relleno 5 cm
Alta	Relleno de grava negra y rojiza mal clasificada, deleznable, escaso a moderado olor a azufre
Alta	Arcilla gris oscura, compacta, plasticidad media, dureza media, olor escaso, a solventes manchas rojizas de oxidación y blanquizas
	Se termino sondeo a 0.5 [m] debido a la presencia de agua

AGUA SUBTERRÁNEA

PROF.	FECHA	HORA

TIPO DE MUESTRA  
 A - Cortes de barreno  
 S- 2" D. E. 1.38" D. I. Muestra de tubo partido  
 U- 3" D. E. 2.42" D. I. Muestra de tubo partido  
 T - 3" D. E. Tubo Shelby de pared delgada

L - Liner  
 H - Hand Auger



REGISTRO LITOLÓGICO

Proyecto: Demacsa  
 No. Proyecto: 08038M Fecha: 05-dic-08

Sondeo: STD-5  
 Página: 1 de 1

Profundidad en metros	Número de identificación de la muestra	Registro gráfico	Muestra	Tipo de muestra	Golpes por pie, caída libre 140 lb, 30"	Lectura de gases a través del barreno (LIE, O <sub>2</sub> , ppm)	Prueba de gases en suelo (LIE, ppm)	Clasificación de Suelo	NOTAS	CLASIFICACION VISUAL
0				H					Concreto	
0,5									Baja	Arcilla pardo con blanco, deleznable, poco dura, sin plasticidad, sin olor ni impregnación
1	STD-5-1m STD-5-1.1m								Media	Arcilla pardo claro, dureza media, plasticidad media, compacta sin olor ni impregnación escasa oxidación rojiza
1,5						2,70	2,70		Alta Saturada	Arcilla pardo claro, dureza baja, plasticidad media a baja, compacta deleznable
2										Se termino el sondeo a 1.20[m] debido a la presencia de agua
2,5										
3										
3,5										
4										
4,5										
5										

AGUA SUBTERRÁNEA

PROF.	FECHA	HORA

TIPO DE MUESTRA  
 A - Cortes de barreno  
 S- 2" D. E. 1.38" D. I. Muestra de tubo partido  
 U- 3" D. E. 2.42" D. I. Muestra de tubo partido  
 T - 3" D. E. Tubo Shelby de pared delgada

L - Liner  
 H - Hand Auger

REGISTRO LITOLÓGICO

Proyecto: Demacsa  
 No. Proyecto: 08038M Fecha: 05-dic-08

Sondeo: STD-6  
 Página: 1 de 1

Profundidad en metros	Número de identificación de la muestra	Registro gráfico	Muestra	Tipo de muestra	Golpes por pie, caída libre 140 lb, 30"	Lectura de gases a través del barreno (LIE, O <sub>2</sub> , ppm)	Prueba de gases en suelo (LIE, ppm)	Clasificación de Suelo
0								
0.5				H				GP
1	STD-6-1m							CH
1.1	STD-6-1.1m					0	0	
1.5								
2								
2.5								
3								
3.5								
4								
4.5								
5								

Tipo de perforadora: Hand auger  
 Tipo de sondeo: Manual  
 Ubicación: 14Q0209637  
 Coordenada UTM X: 2195291  
 Coordenada UTM Y:

NOTAS	CLASIFICACIÓN VISUAL
	Cubierta vegetal
Alta	Grava pardo oscuro, con escasa arena mal clasificada, deleznable, dura, sin olor ni impregnación
Alta Saturada	Arcilla pardo claro, compacta, plasticidad alta sin olor ni impregnación, escasa gravas bien clasificadas
	Se termino el sondeo a 1.0[m] debido a la presencia de agua

AGUA SUBTERRÁNEA

PROF.	FECHA	HORA

TIPO DE MUESTRA  
 A - Cortes de barreno  
 S- 2" D. E. 1.38" D. I. Muestra de tubo partido  
 U- 3" D. E. 2.42" D. I. Muestra de tubo partido  
 T - 3" D. E. Tubo Shelby de pared delgada

L - Liner  
 H - Hand Auger

REGISTRO LITOLÓGICO

Proyecto: Demacsa  
 No. Proyecto: 08038M Fecha: 05-dic-08

Sondeo: STD-7  
 Página: 1 de 1

Profundidad en metros	Número de identificación de la muestra	Registro gráfico	Muestra	Tipo de muestra	Golpes por pie, caída libre 140 lb, 30"	Lectura de gases a través del barreno (LIE, O <sub>2</sub> , ppm)	Prueba de gases en suelo (LIE, ppm)	Clasificación de Suelo	NOTAS	CLASIFICACION VISUAL
0.5				H						Baja Relleno arcilloso con presencia de gravas y arenas, mal clasificada, pardo claro, deleznable, duro, sin olor, manchas de oxidación amarillentas
1	STD-7-1m							CL		Media Arcilla pardo oscuro, compacta, deleznable, plasticidad media, sin olor, sin impregnación, oxidación, escasa gravas
								CL		Alta Arcilla pardo oscuro, compacta, plasticidad media, olor a azufre, alta impregnación
1.5	STD-7-1.5m							CL		Alta Alta Idéntica
						2, 70	1, 50			Arcilla pardo oscuro, compacta, plasticidad alta deleznable, bajo a escaso olor a azufre, manchas neg
2										
2.5										
3										
3.5										
4										
4.5										
5										

AGUA SUBTERRÁNEA

PROF.	FECHA	HORA

TIPO DE MUESTRA  
 A - Cortes de barreno  
 S - 2" D. E. 1.38" D. I. Muestra de tubo partido  
 U - 3" D. E. 2.42" D. I. Muestra de tubo partido  
 T - 3" D. E. Tubo Shelby de pared delgada

L - Liner  
 H - Hand Auger

REGISTRO LITOLÓGICO

Proyecto: Demacsa  
 No. Proyecto: 08038M Fecha: 05-dic-08

Sondeo: STD-8  
 Página: 1 de 1

Profundidad en metros	Número de identificación de la muestra	Registro gráfico	Muestra	Tipo de muestra	Golpes por pie, caída libre 140 lb, 30"	Lectura de gases a través del barreno (LIE, O <sub>2</sub> , ppm)	Prueba de gases en suelo (LIE, ppm)	Clasificación de Suelo	NOTAS	CLASIFICACION VISUAL
0				H						Cemento
0,5								CL	Escasa	Material de relleno, arcillas gris claro, mal clasificadas deleznales, sin olor ni impregnación, superficie, manchas amarillas por azufre
								CL	Media	Arcilla pardo oscuro, deleznable, plasticidad escasa, dureza baja, presencia de gravas mal clasificadas, manchas amarillentas por el azufre, sin olor
1	STD-8-1m							GC	Media Alta	Arcilla parda, compacta, plasticidad media, olor fuerte a azufre, gran impregnación, color negro
1,5								CL	Media	Presencia de gravas, presencia de alteración por agua zonas blancas Idéntica
	STD-8-1.8m							CL	Meda Alta	Arcilla pardo claro, compacta, plasticidad media, dura, olor moderado a azufre, moderadas a bajas manchas negras
2						2, 90	1, 50			Arcilla pardo claro, compacta, deleznable, escasa plasticidad, olor moderado a azufre, escasa manchas negras, moderada alteración por agua
2,5										Fin del sondeo por presencia de agua 1. 8 [m]
3										
3,5										
4										
4,5										
5										

AGUA SUBTERRÁNEA

PROF.	FECHA	HORA

TIPO DE MUESTRA  
 A - Cortes de barreno  
 S- 2" D. E. 1.38" D. I. Muestra de tubo partido  
 U- 3" D. E. 2.42" D. I. Muestra de tubo partido  
 T - 3" D. E. Tubo Shelby de pared delgada

L - Liner  
 H - Hand Auger

REGISTRO LITOLÓGICO

Proyecto: Demacsa  
 No. Proyecto: 08038M Fecha: 06-dic-08

Sondeo: SDN-1  
 Página: 1 de 1

Profundidad en metros	Número de identificación de la muestra	Registro gráfico	Muestra	Tipo de muestra Golpes por pie, caída libre 140 lb, 30"	Lectura de gases a través del barreno (LIE, O <sub>2</sub> , ppm)	Prueba de gases en suelo (LIE, ppm)	Clasificación de Suelo
0							
0.5	1			2,2,2			
				4,4,9,9			
1							CL
				8,9,8,9			
1.5							ML
2							CL
2.5							CL
3							CL
3.5							SM
4							SW
4.5							SW
5							ML
5.5							CL

Tipo de perforadora: CME-55  
 Tipo de sondeo: BH  
 Ubicación:  
 Coordenada UTM X  
 Coordenada UTM Y

NOTAS	CLASIFICACION VISUAL
	Cubierta vegetal
Baja Media	Suelo, material vegetal, dureza baja, compacta, arcilla pardo claro, con manchas blancas, sin olor ni impregnación
Baja Media	Arcilla pardo claro, compacta, dura, tiene gravas, manchas de oxidación amarillentas y rojizas, minerales alterados por agua, material vegetal
Media	Limo con arena gris claro, compacta, deleznable, mal clasificado, presenta materia vegetal
Media	Arcilla gris claro con tonos pardos compacto, sin plasticidad, deleznable, manchas negras y rojizas sin olor
Media	Arcilla gris claro compacta sin plasticidad, manchas amarillentas y rojizas por oxidación, sin olor, manchas oscuras
Media	Idéntica
Media Alta	Arena fina gris claro, bien clasificada, deleznable, presencia de alteración por agua sin olor ni impregnación, manchas de oxidación rojiza
Alta a Saturada	Arena fina a media, gris oscuro, deleznable, bien clasificada, escasa manchas rojas, sin olor
Saturada	Idéntica Concreto blanquizo, manchas por agua sin olor
Alta	Limos con arenas, gris oscuro, compacta, plasticidad media, sin olor, manchas amarillentas
Alta Saturada	Arenas gris oscuras, bien clasificadas, deleznales manchas blancas y negras, sin olor, bien clasificadas
Meda Alta	Arcilla parda con intercalaciones de arcilla blanca con alteraciones por agua, manchas negras, compacta, sin olor

AGUA SUBTERRÁNEA		
PROF.	FECHA	HORA

TIPO DE MUESTRA  
 A - Cortes de barreno  
 S- 2" D. E. 1.38" D. I. Muestra de tubo partido  
 U- 3" D. E. 2.42" D. I. Muestra de tubo partido  
 T - 3" D. E. Tubo Shelby de pared delgada  
 L - Liner  
 H - Hand Auger

REGISTRO LITOLÓGICO

Proyecto: Demacsa  
 No. Proyecto: 08038M Fecha: 06-dic-08

Sondeo: SDN-3  
 Página: 1 de 1

Profundidad en metros	Número de identificación de la muestra	Registro gráfico	Muestra	Tipo de muestra	Golpes por pie, cada 140 lb, 30"	Lectura de gases a través del barreno (LIE, O <sub>2</sub> , ppm)	Prueba de gases en suelo (LIE, ppm)	Clasificación de Suelo
0								
0.5								CL
1								CL
1.5								CL
2								CL
2.5								CL
3								CL
3.5								CL
4								CL
4.5								CL
5								CL
5.5								CL

Tipo de perforadora: CME-55  
 Tipo de sondeo: BH  
 Ubicación:  
 Coordenada UTM X: 209682  
 Coordenada UTM Y: 2195788

NOTAS	CLASIFICACION VISUAL
	Cubierta vegetal
Nula	Arcilla parda deleznable, sin olor ni impregnación
Baja	Arcilla pardo claro, compacta, deleznable, fuertes manchas rojas con manchas blancas
Baja	Arcilla pardo claro, compacta, deleznable, presencia de plástico fundido sin olor
Media	Arcilla pardo oscuro, deleznable, dureza alta, sin plasticidad, olor a quemado, solventes y plástico fundido, fuertes manchas negras
Media	Arcilla gris, compacta, plasticidad baja, deleznable, olor a podrido, fuertes manchas negras en toda la muestra, presencia de plástico
Media Alta	Arcilla parda a gris, compacta, plasticidad media a baja, dureza baja, fuertes manchas negras, amarilla a rojizas y blancas por agua
Alta	Idéntica fuertes manchas negras, olor fétido, arcilla blanca por alteración de agua, presencia de fragmentos de plástico
Alta	Arcilla gris, compacta, dureza media, plasticidad escasa, olor fuerte a fétido, fuertes manchas negras, arcilla blanca por alteración del agua, presencia de fragmentos de plástico
Alta	Idéntica
Alta	Arcilla gris claro, compacta, plasticidad alta, alteración por agua manchas negras, dureza baja, escaso olor a podrido

AGUA SUBTERRANEA

PROF.	FECHA	HORA

TIPO DE MUESTRA

A - Cortes de barreno  
 S- 2" D. E. 1.38" D. I. Muestra de tubo partido  
 U- 3" D. E. 2.42" D. I. Muestra de tubo partido  
 T - 3" D. E. Tubo Shelby de pared delgada

L - Liner  
 H - Hand Auger

REGISTRO LITOLÓGICO

Proyecto: Demacsa  
 No. Proyecto: 08038M Fecha: 06-dic-08

Sondeo: SDN-4  
 Página: 1 1 de 1

Profundidad en metros	Número de identificación de la muestra	Registro gráfico	Muestra	Tipo de muestra	Golpes por pie, caída libre 140 lb, 30"	Lectura de gases a través del barreno (LIE, O <sub>2</sub> , ppm)	Prueba de gases en suelo (LIE, ppm)	Clasificación de Suelo
0								
0.5								CL
1								CL
1.5								
2								GP
2.5								CL
3								CL
3.5								CL
4								CL
4.5								CL
5								CL

Tipo de perforadora: CME-55  
 Tipo de sondeo: BH  
 Ubicación:  
 Coordenada UTM X  
 Coordenada UTM Y

NOTAS	CLASIFICACION VISUAL
	Cubierta vegetal
Nula	Arcilla pardo claro, compacta, dura, deleznable, sin olor ni impregnación, sin olor ni impregnación
Escasa	Arcilla pardo claro, compacta, dura, deleznable, sin olor ni impregnación, presencia de fragmentos de ladrillo rojo y papel, escasos pedazos de plástico
	Sin recuperación de muestra por fragmentos de basura acumulados en la punta
Escasa	Material de relleno, gravas, arena pardo claro, deleznable, duro, presencia de plásticos (pedazos de tiras de bolsas)
Media	Arcilla gris claro, compacta, plasticidad media, presencia de material de relleno y plástico (tiras), clavos de acero de 3 pulg, grava, cemento, fragmentos de ladrillo rojo y arcillas color pardo, sin olor
Media	Arcilla pardo claro, compacta, plasticidad baja, deleznable, dureza media, pedazos de bolsas, sin olor
Media	Idéntico solo que la arcilla es de color gris claro, manchas rojizas a amarillentas, lentes de limo
Media	Arcilla gris claro, Idéntico poco plástico

**REGISTRO LITOLÓGICO**

Proyecto: Demacsa  
 No. Proyecto: 08038M Fecha: 06-dic-08

Sondeo: SDN-4  
 Página: 1 1 de 1

Profundidad en metros	Número de identificación de la muestra	Registro gráfico	Muestra	Tipo de muestra	Golpes por pie, cada libra 140 lb, 30"	Lectura de gases a través del barreno (LIE, O <sub>2</sub> , ppm)	Prueba de gases en suelo (LIE, ppm)	Clasificación de Suelo	NOTAS	CLASIFICACION VISUAL
5,5										Arcillas gris claro, compacta, plasticidad media, presencia de lentes de arcilla pardo, fracturas rellenas, sin olor ni impregnación
										Sin muestra
6										Arcilla gris claro, plasticidad baja, sin olor ni impregnación deleznable

Tipo de perforadora: CME-55  
 Tipo de sondeo: BF  
 Ubicación: \_\_\_\_\_  
 Coordenada UTM X \_\_\_\_\_  
 Coordenada UTM Y \_\_\_\_\_

**AGUA SUBTERRÁNEA**

PROF.	FECHA	ORA

**TIPO DE MUESTRA**

A - Cortes de barreno  
 S- 2" D. E. 1.38" D. I. Muestra de tubo partido  
 U- 3" D. E. 2.42" D. I. Muestra de tubo partido  
 T - 3" D. E. Tubo Shelby de pared delgada

L - Liner  
 H - Hand Auger



REGISTRO LITOLOGICO

Proyecto: Demacsa  
 No. Proyecto: 08038M Fecha: 06-dic-08

Sondeo: SDN-5  
 Página: 1 de 1

Profundidad en metros	Número de identificación de la muestra	Registro gráfico	Muestra	Tipo de muestra	Golpes por pie, caída libre 140 lb, 30"	Lectura de gases a través del barrenado (LIE, O <sub>2</sub> , ppm)	Prueba de gases en suelo (LIE, ppm)	Clasificación de Suelo
0								
0.5								CL
1								CL
1.5								CL
2								CL
2.5								CL
3								
3.5								
4								
4.5								CL
5								

Tipo de perforadora: CME-55  
 Tipo de sondeo: BF  
 Ubicación:  
 Coordenada UTM X: 209586  
 Coordenada UTM Y: 2195726

NOTAS	CLASIFICACION VISUAL
	Cubierta vegetal
Escasa	Arcilla pardo claro, compacta, deleznable, dura media, escasa gravas y arenas, mal clasificadas, manchas blancas por agua, materia vegetal, sin olor ni impregnación
Baja	Arcilla pardo claro, compacta, deleznable, materia vegetal, sin olor, presencia moderada de plástico
Baja Media	Idéntico, presencia muy fuerte de plásticos y grasas
Baja Media	Arcilla pardo oscuro, compacta, deleznable, plasticidad escasa, manchas rojas y blancas, presencia de plástico y fibra de vidrio
Media	Idéntico Arcilla plasticidad baja, compacta, plasticidad alta, impregnación de solventes, olor a podrido, alambres de plástico color negro
	Sin muestra
	Sin muestra
Alta Saturada	Arcilla parda compacta, plasticidad media, dureza baja, olor muy fuerte a solvente, pedazos de plástico, manchas muy fuertes de color negro

**REGISTRO LITOLÓGICO**

Proyecto: Demacsa  
 No. Proyecto: 08038M Fecha: 06-dic-08

Sondeo: SDN-5  
 Página: 1 1 de 1

Profundidad en metros	Número de identificación de la muestra	Registro gráfico	Muestra	Tipo de muestra	Golpes por pie, caída libre 140 lb, 30"	Lectura de gases a través del barreno (LIE, O <sub>2</sub> , ppm)	Prueba de gases en suelo (LIE, ppm)	Clasificación de Suelo
5, 5								CL
6								CL
6, 5								CL
7								

Tipo de perforadora: CME-55  
 Tipo de sondeo: BH  
 Ubicación:  
 Coordenada UTM X 209586  
 Coordenada UTM Y 2195726

NOTAS	CLASIFICACION VISUAL
Alta Saturada	Arcilla parda compacta, plasticidad media, dureza baja, producto fase libre, color negro muy fuerte, olor muy fuerte a solvente, pedazos de plástico
Alta	Arcilla compacta parda, plasticidad nula, dureza baja, producto de fase libre, deleznable
Alta	Idéntico
Alta	Arcilla con arena pardo oscuro, plasticidad baja deleznable sin olor, impregnación moderada sin plástico

AGUA SUBTERRANEA

PROF.	FECHA	HORA

TIPO DE MUESTRA

A - Cortes de barreno  
 S- 2" D. E. 1.38" D. I. Muestra de tubo partido  
 U- 3" D. E. 2.42" D. I. Muestra de tubo partido  
 T - 3" D. E. Tubo Shelby de pared delgada

L - Liner  
 H - Hand Auger

REGISTRO LITOLOGICO

Proyecto: Demacsa  
 No. Proyecto: 08038M Fecha: 07-dic-08

Sondeo: SDN-6  
 Página: 1 de 1

Profundidad en metros	Número de identificación de la muestra	Registro gráfico	Muestra	Tipo de muestra	Golpes por pie, caída libre 140 lb, 30"	Lectura de gases a través del barrero (LIE, O <sub>2</sub> , ppm)	Prueba de gases en suelo (LIE, ppm)	Clasificación de Suelo
0								
0.5								CL
1								
1.5								CL
2								
2.5								
3								
3.5								CL
4								
4.5								
5								

Tipo de perforadora: CME-55  
 Tipo de sondeo: BH  
 Ubicación:  
 Coordenada UTM X: 209593  
 Coordenada UTM Y: 2195687

NOTAS	CLASIFICACION VISUAL
	Cubierta vegetal
Escasa	Material de relleno, arcilloso, compacta, mal clasificada, pardo claro, deleznable sin olor ni impregnación
Media	Arcilla parda, compacta, deleznable, plasticidad baja, dureza baja, sin impregnación ni olor
Media Alta	Arcilla parda, plasticidad media, dureza baja, sin olor ni impregnación, escasa basura, plástico moderado

**REGISTRO LITOLOGICO**

Proyecto: Demacsa  
 No. Proyecto: 08038M Fecha: 07-dic-08

Sondeo: SDN-6  
 Página: 1 1 de 1

Profundidad en metros	Número de identificación de la muestra	Registro gráfico	Muestra	Tipo de muestra	Golpes por pie, caída libre 140 lb, 30"	Lectura de gases a través del barreno (LIE, O <sub>2</sub> , ppm)	Prueba de gases en suelo (LIE, ppm)	Clasificación de Suelo	NOTAS	CLASIFICACION VISUAL
5, 5		[Gráfico de muestra]							Alta Saturada	Arcilla parda compacta, plasticidad media, dureza baja, producto fase libre, color negro muy fuerte, olor muy fuerte a solvente, pedazos de plástico
6		[Gráfico de muestra]							Saturado	Arcilla pardo claro, compacta, plasticidad media, con lente de arcilla blanda, alteración por agua, sin olor ni impregnación
6, 5		[Gráfico de muestra]							Alta	Material arcilloso lacustre, pardo claro, compacta, plasticidad baja, dureza baja, mucha materia lacustre, sin olor ni impregnación
7										

Tipo de perforadora: CME-55  
 Tipo de sondeo: BH  
 Ubicación: \_\_\_\_\_  
 Coordenada UTM X: 209593  
 Coordenada UTM Y: 2195687

AGUA SUBTERRANEA		
PROF.	FECHA	HORA

**TIPO DE MUESTRA**



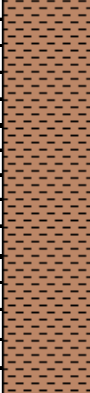








A - Cortes de barreno  
 S- 2" D. E. 1.38" D. I. Muestra de tubo partido  
 U- 3" D. E. 2.42" D. I. Muestra de tubo partido  
 T - 3" D. E. Tubo Shelby de pared delgada

L - Liner  
 H - Hand Auger

**REGISTRO LITOLOGICO**

Proyecto: Demacsa  
 No. Proyecto: 08038M Fecha: 07-dic-08

Sondeo: SDN-7  
 Página: 1 1 de 1

Profundidad en metros	Número de identificación de la muestra	Registro gráfico	Muestra	Tipo de muestra Golpes por pie, caída libre 140 lb, 30"	Lectura de gases a través del barreno (LIE, O <sub>2</sub> , ppm)	Prueba de gases en suelo (LIE, ppm)	Clasificación de Suelo
0							
0.5							CL
1							
1.5							
2							CL
2.5							
3							
3.5							
4							
4.5							CL
5							

Tipo de perforadora: CME-55  
 Tipo de sondeo: BH  
 Ubicación: \_\_\_\_\_  
 Coordenada UTM X: 209638  
 Coordenada UTM Y: 2195717

NOTAS	CLASIFICACION VISUAL
	Cubierta vegetal
Baja	Material de relleno, limos blancos a pardo claro, deleznales, dureza baja, sin olor ni impregnación
Media Alta	Arcilla parda, compacta, plasticidad media, dureza media, sin color ni impregnación.  Presenta lente de arcilla, gris claro a blanco por alteración de agua.  Presenta de bajas a moderadas manchas negras
Alta	Arcilla pardo claro, compacta, plasticidad baja dureza baja sin olor ni impregnación, lentes de arena negra, bien clasificada

**REGISTRO LITOLOGICO**

Proyecto: Demacsa  
 No. Proyecto: 08038M Fecha: 07-dic-08

Sondeo: SDN-7  
 Página: 1 1 de 1

Profundidad en metros	Número de identificación de la muestra	Registro gráfico	Muestra	Tipo de muestra	Golpes por pie, cada libra 140 lb, 30"	Lectura de gases a través del barreno (LIE, O <sub>2</sub> , ppm)	Prueba de gases en suelo (LIE, ppm)	Clasificación de Suelo
5,5								
6								
6,5								CL
7								

Tipo de perforadora: CME-55  
 Tipo de sondeo: BH  
 Ubicación:   
 Coordenada UTM X: 209638  
 Coordenada UTM Y: 2195717

NOTAS	CLASIFICACION VISUAL
Alta	Arcillas gris claro con manchas gris y blancas, compactas plasticidad baja, sin olor ni impregnación

AGUA SUBTERRÁNEA

PROF.	FECHA	HORA

TIPO DE MUESTRA

A - Cortes de barreno  
 S- 2" D. E. 1.38" D. I. Muestra de tubo partido  
 U- 3" D. E. 2.42" D. I. Muestra de tubo partido  
 T - 3" D. E. Tubo Shelby de pared delgada

L - Liner  
 H - Hand Auger

REGISTRO LITOLÓGICO

Proyecto: Demacsa  
 No. Proyecto: 08038M Fecha: 07-dic-08

Sondeo: SDN-8  
 Página: 1 de 1

Profundidad en metros	Número de identificación de la muestra	Registro gráfico	Muestra	Tipo de muestra	Golpes por pie, caída libre 140 lb, 30"	Lectura de gases a través del barreno (LIE, O <sub>2</sub> , ppm)	Prueba de gases en suelo (LIE, ppm)	Clasificación de Suelo
0								
0.5								
1								
1.5								
2								CL
2.5								
3								
3.5								
4								
4.5								CL
5								

Tipo de perforadora: CME-55  
 Tipo de sondeo: BH  
 Ubicación: 209622  
 Coordenada UTM X: 2195621  
 Coordenada UTM Y: 2195621

NOTAS	CLASIFICACION VISUAL
	Cubierta vegetal
Baja	Arcilla parda, deleznable, poco compacta, dureza baja, sin olor ni impregnación
Media	Limo gris claro, compacto, plasticidad baja, dureza baja, sin olor ni impregnación
Saturada	Arenas medias, pardas, compacta, plasticidad baja, bien clasificado, olor a podrido fétido

**REGISTRO LITOLÓGICO**

Proyecto: Demacsa  
 No. Proyecto: 08038M Fecha: 07-dic-08

Sondeo: SDN-8  
 Página: 1 1 de 1

Profundidad en metros	Número de identificación de la muestra	Registro gráfico	Muestra	Tipo de muestra	Golpes por pie, caída libre 140 lb, 30"	Lectura de gases a través del barreno (LIE, O <sub>2</sub> , ppm)	Prueba de gases en suelo (LIE, ppm)	Clasificación de Suelo
5, 5								
6								
6, 5								
7								

Tipo de perforadora: CME-55  
 Tipo de sondeo: BH  
 Ubicación: \_\_\_\_\_  
 Coordenada UTM X: 209622  
 Coordenada UTM Y: 2195621

NOTAS	CLASIFICACION VISUAL
Saturada	Arcilla pardo claro , compacta, sin plasticidad, dureza baja olor a podrido fétido muy fuerte, lentes de arcilla blancos a grises por agua, manchas pardos a rojizas por oxidación

**AGUA SUBTERRANEA**

PROF.	FECHA	HORA

**TIPO DE MUESTRA**

- A - Cortes de barreno
- S- 2" D. E. 1.38" D. I. Muestra de tubo partido
- U- 3" D. E. 2.42" D. I. Muestra de tubo partido
- T - 3" D. E. Tubo Shelby de pared delgada
- L - Liner
- H - Hand Auger



REGISTRO LITOLÓGICO

Proyecto: Demacsa  
 No. Proyecto: 08038M Fecha: 07-dic-08

Sondeo: SDN-9  
 Página: 1 de 1

Profundidad en metros	Número de identificación de la muestra	Registro gráfico	Muestra	Tipo de muestra	Golpes por pie, cada libra 140 lb, 30"	Lectura de gases a través del barreno (LIE, O <sub>2</sub> , ppm)	Prueba de gases en suelo (LIE, ppm)	Clasificación de Suelo
0								
0,5								CL
1								
1,5								
2								SM
2,5								
3								
3,5								
4								
4,5								
5								SP
5,5								

NOTAS	CLASIFICACION VISUAL
	Cubierta vegetal
Baja	Arcilla pardo claro, deleznable, de poca dureza, sin olor ni impregnación, con presencia de gravas mal clasificadas
Media	Arena limosa, gris claro, bien clasificada compacta, poco deleznable, presencia de escasa gravas, dureza baja, sin olor ni impregnación  Con lentes de arena negra, bien clasificada  escaso olor fétido
	Arena media, gris oscuro, compacta, deleznable, bien clasificada, sin olor ni impregnación












AGUA SUBTERRÁNEA		
PROF.	FECHA	HORA

TIPO DE MUESTRA	
A - Cortes de barreno	L - Liner
S- 2" D. E. 1.38" D. I. Muestra de tubo partido	H - Hand Auger
U- 3" D. E. 2.42" D. I. Muestra de tubo partido	
T - 3" D. E. Tubo Shelby de pared delgada	

REGISTRO LITOLOGICO

Proyecto: Demacsa  
 No. Proyecto: 08038M Fecha: 07-dic-08

Sondeo: SDN-10  
 Página: 1 de 1

Profundidad en metros	Número de identificación de la muestra	Registro gráfico	Muestra	Tipo de muestra Golpes por pie, caída libre 140 lb, 30"	Lectura de gases a través del barreno (LIE, O <sub>2</sub> , ppm)	Prueba de gases en suelo (LIE, ppm)	Clasificación de Suelo
0							
0.5							
1							
1.5							CL
2							
2.5							
3							
3.5							CL
4							
4.5							CL
5							

Tipo de perforadora: CME-55  
 Tipo de sondeo: BH  
 Ubicación:  
 Coordenada UTM X: 209675  
 Coordenada UTM Y: 2195667

NOTAS	CLASIFICACION VISUAL
	Cubierta vegetal
	Arcilla pardo oscuro, compacta, plasticidad media, dureza media, sin olor
	Arcilla pardo claro compacta, plasticidad media, dureza baja, sin olor ni impregnación
	Arcilla pardo claro compacta, plasticidad media, dureza baja, sin olor ni impregnación

**REGISTRO LITOLOGICO**

Proyecto: Demacsa  
 No. Proyecto: 08038M Fecha: 07-dic-08

Sondeo: SDN-10  
 Página: 1 1 de 1

Profundidad en metros	Número de identificación de la muestra	Registro gráfico	Muestra	Tipo de muestra	Golpes por pie, caída libre 140 lb, 30"	Lectura de gases a través del barreno (LIE, O <sub>2</sub> , ppm)	Prueba de gases en suelo (LIE, ppm)	Clasificación de Suelo	NOTAS	CLASIFICACION VISUAL
5,5		[Gráfico de registro]								Arcilla limosa, parda, compacta, dureza media, plasticidad baja sin olor, gran oxidación roja, presenta fracturamiento, minerales alterados por agua
6		[Gráfico de registro]								Arcilla parda, compacta, deleznable, plasticidad media, olor fuerte a podrido, sin impregnación
6,5										
7										

Tipo de perforadora: CME-55  
 Tipo de sondeo: BH  
 Ubicación:   
 Coordenada UTM X: 209675  
 Coordenada UTM Y: 2195667

AGUA SUBTERRANEA

PROF.	FECHA	HORA

TIPO DE MUESTRA


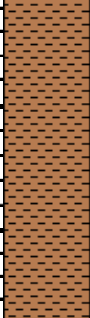
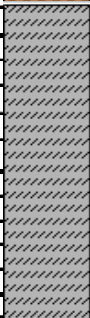
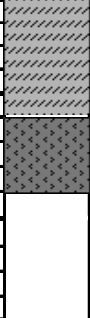
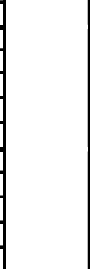
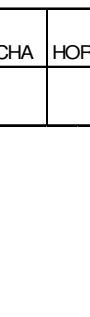

A - Cortes de barreno  
 S- 2" D. E. 1.38" D. I. Muestra de tubo partido  
 U- 3" D. E. 2.42" D. I. Muestra de tubo partido  
 T - 3" D. E. Tubo Shelby de pared delgada

L - Liner  
 H - Hand Auger

REGISTRO LITOLÓGICO

Proyecto: Demacsa  
 No. Proyecto: 08038M Fecha: 08-dic-08

Sondeo: SNE-9  
 Página: 1 1 de 1

Profundidad en metros	Número de identificación de la muestra	Registro gráfico	Muestra	Tipo de muestra	Golpes por pie, caída libre 140 lb, 30"	Lectura de gases a través del barreno (LIE, O <sub>2</sub> , ppm)	Prueba de gases en suelo (LIE, ppm)	Clasificación de Suelo
0								
0.5								CL
1								
1.5								OL
2								
2.5								
3								GC
3.5	SNE-0-3.5m				0	0		
4								
4.5								
5								

Tipo de perforadora: CME-55  
 Tipo de sondeo: BH  
 Ubicación: 14Q0209839  
 Coordenada UTM X: 2195787  
 Coordenada UTM Y: 2195787

NOTAS	CLASIFICACION VISUAL
	Cubierta vegetal
Media	Arcilla pardo claro, deleznable, poca plasticidad, compacta, sin olor ni impregnación, dureza baja
Media Alta	Limo gris claro, compacta, plasticidad media, bien clasificada, sin olor ni impregnación Con lentes de arcilla parda
Media Alta	Grava mal clasificada, deleznable, dureza media, compacta, presencia de arcilla gris claro
	Fin del sondeo 3.4[m] por presencia

AGUA SUBTERRÁNEA			TIPO DE MUESTRA	
PROF.	FECHA	HORA	A - Cortes de barreno	L - Liner
			S- 2" D. E. 1.38" D. I. Muestra de tubo partido	H - Hand Auger
			U- 3" D. E. 2.42" D. I. Muestra de tubo partido	
			T - 3" D. E. Tubo Shelby de pared delgada	

REGISTRO LITOLÓGICO

Proyecto: Demacsa  
 No. Proyecto: 08038M Fecha: 08-dic-08

Sondeo: SNE-10  
 Página: 1 de 1

Profundidad en metros	Número de identificación de la muestra	Registro gráfico	Muestra	Tipo de muestra	Golpes por pie, caída libre 140 lb, 30"	Lectura de gases a través del barreno (LIE, O <sub>2</sub> , ppm)	Prueba de gases en suelo (LIE, ppm)	Clasificación de Suelo
0								
0.5								CL
1								
1.5								
2								OL
2.5								
3								MH
3.5	SNE-10-3.4m							
4								
4.5								
5								

Tipo de perforadora: CME-55  
 Tipo de sondeo: BH  
 Ubicación:  
 Coordenada UTM X: 209780  
 Coordenada UTM Y: 2195685

NOTAS	CLASIFICACION VISUAL
	Cubierta vegetal
Media	Arcilla pardo claro, semicompacta, plasticidad escasa, deleznable, dureza baja, sin olor ni impregnación
Media Alta	Arcilla limosa pardo oscuro, compacta, plasticidad baja, presencia de lentes de arcilla parda claro gruesas, presenta fracturas y oquedades rojas, sin olor, escasa manchas negras
Media	Limo arenoso, gris claro, compacto, plasticidad baja, sin olor, presencia de manchas oscuras, 70% presenta oxidación rojiza y lentes de amarillo a blanco por agua
	Fin del sondeo a 3.3 por agua

AGUA SUBTERRÁNEA			TIPO DE MUESTRA	
PROF.	FECHA	HORA	A - Cortes de barreno	L - Liner
			S- 2" D. E. 138" D. I. Muestra de tubo partido	H - Hand Auger
			U- 3" D. E. 2.42" D. I. Muestra de tubo partido	
			T - 3" D. E. Tubo Shelby de pared delgada	

REGISTRO LITOLOGICO

Proyecto: Demacsa  
 No. Proyecto: 08038M Fecha: 08-dic-08

Sondeo: SNE-11  
 Página: 1 1 de 1

Profundidad en metros	Número de identificación de la muestra	Registro gráfico	Muestra	Tipo de muestra	Golpes por pie, caída libre 140 lb, 30"	Lectura de gases a través del barreno (LIE, O <sub>2</sub> , ppm)	Prueba de gases en suelo (LIE, ppm)	Clasificación de Suelo	NOTAS	CLASIFICACION VISUAL
									0	
0.5									Media Baja	Arcilla pardo claro, deleznable, compacta sin plasticidad, sin olor ni impregnación
1										
1.5									Media	Arcilla pardo claro, compacta, plasticidad baja a nula, semi deleznable, sin olor ni impregnación
2										
2.5									Meda Alta	Arena gris oscuro a negra, compacta, deleznable, bien clasificada sin olor ni impregnación
3										Idéntico manchas amarillentas por oxidación
3.5									Media Alta	Arcilla gris oscuro, compacta, dura, plasticidad baja, presenta manchas amarillentas, lentes de arena gris oscuro, lentes de arcilla oxidada de color rojizo y lentes de arena, sin olor
4										
4.5						0, 30	2, 90			
5										

AGUA SUBTERRÁNEA			TIPO DE MUESTRA	
PROF.	FECHA	HORA	A - Cortes de barreno	L - Liner
			S- 2" D. E. 138" D. I. Muestra de tubo partido	H - Hand Auger
			U- 3" D. E. 2.42" D. I. Muestra de tubo partido	
			T - 3" D. E. Tubo Shelby de pared delgada	

REGISTRO LITOLÓGICO

Proyecto: Demacsa  
 No. Proyecto: 08038M Fecha: 08-dic-08

Sondeo: SNE-12  
 Página: 1 1 de 1

Profundidad en metros	Número de identificación de la muestra	Registro gráfico	Muestra	Tipo de muestra	Golpes por pie, caída libre 140 lb, 30"	Lectura de gases a través del barreno (LIE, O <sub>2</sub> , ppm)	Prueba de gases en suelo (LIE, ppm)	Clasificación de Suelo	NOTAS	CLASIFICACION VISUAL
										Cubierta vegetal
0										Cubierta vegetal
0.5								CL	Media	Arcilla pardo claro, compacta, plasticidad media, dureza media, sin olor ni impregnación, deleznable
1										
1.5								CL	Media Alta	Arcilla pardo claro, compacta, plasticidad media alta, dureza baja sin olor ni impregnación
2										
2.5										
3										
3.5								CL	Media	Arcilla gris claro, compacta, sin plasticidad, dureza baja, presenta minerales alterados por agua sin olor ni impregnación, escaso fracturamiento
4										
4.5						0, 10	2, 80			
5										

AGUA SUBTERRÁNEA			TIPO DE MUESTRA	
PROF.	FECHA	HORA	A - Cortes de barreno	L - Liner
			S- 2" D. E. 138" D. I. M muestra de tubo partido	H - Hand Auger
			U- 3" D. E. 2.42" D. I. M muestra de tubo partido	
			T - 3" D. E. Tubo Shelby de pared delgada	

REGISTRO LITOLOGICO

Proyecto: Demacsa  
 No. Proyecto: 08038M Fecha: 08-dic-08

Sondeo: SNE-13  
 Página: 1 1 de 1

Profundidad en metros	Número de identificación de la muestra	Registro gráfico	Muestra	Tipo de muestra	Goques por pie, caída libre 140 lb, 30"	Lectura de gases a través del barreno (LIE, O <sub>2</sub> , ppm)	Prueba de gases en suelo (LIE, ppm)	Clasificación de Suelo
0								
0.5								CL
1								MH
1.5								
2	SNE-13-2.1m							
2.5								SW
3								
3.5						0, 0	0, 20	
4								
4.5								
5								

Tipo de perforadora: CME-55  
 Tipo de sondeo: BH  
 Ubicación: 209551  
 Coordenada UTM X: 2195653  
 Coordenada UTM Y: 2195653

NOTAS	CLASIFICACION VISUAL
	Cubierta vegetal
Baja Media	Arcilla pardo claro, deleznable, dureza baja, sin plasticidad sin olor ni impregnación
Media Alta	Limo con arena gris claro, compacta, plasticidad baja, bien clasificadas
	Arena gris claro, compacta, dureza muy baja, bien clasificada sin olor ni impregnación, manchas amarillentas por alteración
	Fin del sondeo 3 [m] por presencia de agua

AGUA SUBTERRÁNEA			TIPO DE MUESTRA	
PROF.	FECHA	HORA		
			A - Cortes de barreno	L - Liner
			S- 2" D. E. 1.38" D. I. Muestra de tubo partido	H - Hand Auger
			U- 3" D. E. 2.42" D. I. Muestra de tubo partido	
			T - 3" D. E. Tubo Shelby de pared delgada	



REGISTRO LITOLOGICO

Proyecto: Demacsa  
 No. Proyecto: 08038M Fecha: 09-dic-08

Sondeo: SDS-1  
 Página: 1 de 1

Profundidad en metros	Número de identificación de la muestra	Registro gráfico	Muestra	Tipo de muestra	Golpes por pie, caída libre 140 lb, 30"	Lectura de gases a través del barreno (LIE, O <sub>2</sub> , ppm)	Prueba de gases en suelo (LIE, ppm)	Clasificación de Suelo
0								
0.5								CL
1								OL
1.5								
2								
2.5								
3								ML
3	SNE-14-3.1m					1, 50	0, 30	
3.5								
4								
4.5								
5								

Tipo de perforadora: CME-55  
 Tipo de sondeo: BH  
 Ubicación:  
 Coordenada UTM X: 14Q0209722  
 Coordenada UTM Y: 2T95535

NOTAS	CLASIFICACION VISUAL
	Cubierta vegetal
Media	Arcilla parda, compacta, plasticidad baja, dureza muy baja, sin olor ni impregnación
Media Alta	Limo con arena gris oscuro, compacto, plasticidad baja, dureza baja, mal clasificado, presenta relleno ladrillo rojo a 1 [m], grava mal clasificada
	Arcillas, con limos, pardo oscuro, dureza media, manchas oscuras, presenta oxidación sin olor
	Fin del sondeo 2. 5 [m] Muestra a 3. 10 [m]

AGUA SUBTERRÁNEA			TIPO DE MUESTRA	
PROF.	FECHA	HORA	A - Cortes de barreno	L - Liner
			S- 2" D. E. 1.38" D. I. Muestra de tubo partido	H - Hand Auger
			U- 3" D. E. 2.42" D. I. Muestra de tubo partido	
			T - 3" D. E. Tubo Shelby de pared delgada	

REGISTRO LITOLÓGICO

Proyecto: Demacsa  
 No. Proyecto: 08038M Fecha: 09-dic-08

Sondeo: SDS-1  
 Página: 1 de 1

Profundidad en metros	Número de identificación de la muestra	Registro gráfico	Muestra	Tipo de muestra	Golpes por pie, caída libre 140 lb, 30"	Lectura de gases a través del barreno (LIE, O <sub>2</sub> , ppm)	Prueba de gases en suelo (LIE, ppm)	Clasificación de Suelo	NOTAS	CLASIFICACION VISUAL
0									Cubierta vegetal	
0.5								CL	Media Baja	Arcilla pardo claro, material de relleno, deleznable, arcilla, grava y arena, sin olor ni impregnación
1									Media	Relleno de plástico, hule, arcilla y material de desecho, olor fétido bajo
1.5									Media Alta	Arcilla compacta, plasticidad media, limos gris claro, gravas y presencia de arenas, manchas rojizas, manchas oscuras
2								CL	Media	Arcilla gris oscura bien clasificada, compacta, sin plasticidad, dura a los 3. 70 [m], olor fétido, presencia de alteración por agua
2.5									Media	Idéntico
3								CL		
3.5										
4								CL		
4.5										
5										

**REGISTRO LITOLOGICO**

Proyecto: Demacsa  
 No. Proyecto: 08038M Fecha: 09-dic-08

Sondeo: SDS-1  
 Página: 1 1 de 1

Profundidad en metros	Número de identificación de la muestra	Registro gráfico	Muestra	Tipo de muestra	Golpes por pie, caída libre 140 lb, 30"	Lectura de gases a través del barreno (LIE, O <sub>2</sub> , ppm)	Prueba de gases en suelo (LIE, ppm)	Clasificación de Suelo	NOTAS	CLASIFICACION VISUAL
5,5									Media	Limo gris oscuro, compacto, duro, plasticidad media, olor fétido, fuertes manchas negras
6										Fin del muestreo a 5.6 [m]
6,5										
7										

**AGUA SUBTERRANEA**

PROF.	FECHA	HORA

- TIPO DE MUESTRA**
- A - Cortes de barreno
  - S- 2" D. E. 1.38" D. I. Muestra de tubo partido
  - U- 3" D. E. 2.42" D. I. Muestra de tubo partido
  - T - 3" D. E. Tubo Shelby de pared delgada
  - L - Liner
  - H - Hand Auger

REGISTRO LITOLÓGICO

Proyecto: Demacsa  
 No. Proyecto: 08038M Fecha: 09-dic-08

Sondeo: SDS-2  
 Página: 1 de 1

Profundidad en metros	Número de identificación de la muestra	Registro gráfico	Muestra	Tipo de muestra Golpes por pie, caída libre 140 lb, 30"	Lectura de gases a través del barreno (LIE, O <sub>2</sub> , ppm)	Prueba de gases en suelo (LIE, ppm)	Clasificación de Suelo
0							
0.5							
1							
1.5							CL
2							
2.5							
3							
3.5							ML
4							
4.5							
5							ML

NOTAS	CLASIFICACION VISUAL
	Cubierta vegetal
Media	Arcilla pardo claro, semi compacta, plasticidad nula, deleznable, dureza baja, sin olor ni impregnación
Media	Arcilla limosa, gris claro, compacta, plasticidad alta, media sin olor dureza baja
Alta	Presencia de escasa gravas mal clasificadas
Alta	Arcilla limosa, pardo oscuro, plasticidad alta, sin olor ni impregnación, mal clasificada, dureza baja

**REGISTRO LITOLOGICO**

Proyecto: Demacsa  
 No. Proyecto: 08038M Fecha: 09-dic-08

Sondeo: SDS-2  
 Página: 1 de 1

Profundidad en metros	Número de identificación de la muestra	Registro gráfico	Muestra	Tipo de muestra	Golpes por pie, caída libre 140 lb, 30"	Lectura de gases a través del barreno (LIE, O <sub>2</sub> , ppm)	Prueba de gases en suelo (LIE, ppm)	Clasificación de Suelo
5,5								ML
6							0,0	
6,5								

Tipo de perforadora: CME-55  
 Tipo de sondeo: BH  
 Ubicación: 14Q0209743  
 Coordenada UTM X: 2195512  
 Coordenada UTM Y:

NOTAS	CLASIFICACION VISUAL
Media Alta	Arcilla limosa gris claro, semicompacta, dureza media fétido, fuertes manchas negras, plasticidad nula, deleznable, olor fétido, manchas oscuras verdosas
	Fin del muestreo a 5.6 [m]

AGUA SUBTERRÁNEA			TIPO DE MUESTRA	
PROF.	FECHA	HORA		
			A - Cortes de barreno	L - Liner
			S- 2" D. E. 138" D. I. Muestra de tubo partido	H - Hand Auger
			U- 3" D. E. 2.42" D. I. Muestra de tubo partido	
			T - 3" D. E. Tubo Shelby de pared delgada	

REGISTRO LITOLÓGICO

Proyecto: Demacsa  
 No. Proyecto: 08038M Fecha: 09-dic-08

Sondeo: SDS-3  
 Página: 1 de 1

Profundidad en metros	Número de identificación de la muestra	Registro gráfico	Muestra	Tipo de muestra	Golpes por pie, calda libre 140 lb, 30"	Lectura de gases a través del barreno (LIE, O <sub>2</sub> , ppm)	Prueba de gases en suelo (LIE, ppm)	Clasificación de Suelo
0								
0.5								CL
1								CL
1.5								CL
2								CL
2.5								CL
3								CL
3.5								CL
4								CL
4.5								CL
5								CL

Tipo de perforadora: CME-55  
 Tipo de sondeo: BH  
 Ubicación: 14Q0209736  
 Coordenada UTM X: 2195480  
 Coordenada UTM Y:

NOTAS	CLASIFICACION VISUAL
	Cubierta vegetal
Baja Media	Material de relleno, deleznable, pardo claro, dureza baja, arcillas, sin olor ni impregnación
Baja Media	Arcilla pardo claro, deleznable, dureza baja, presencia de basura, plástico
Media	Arcilla pardo claro, semi compacta, plasticidad baja, dureza baja, sin olor ni impregnación, deleznable
Alta Saturada	Arcilla arenosa pardo claro, semicompacta, plasticidad baja, presencia de gravas, deleznable, poco olor fétido, sin impregnación, manchas verdes, presencia de plástico

**REGISTRO LITOLÓGICO**

Proyecto: Demacsa  
 No. Proyecto: 08038M Fecha: 09-dic-08

Sondeo: SDS-3  
 Página: 1 1 de 1 1

Profundidad en metros	Número de identificación de la muestra	Registro gráfico	Muestra	Tipo de muestra	Golpes por pie, caída libre 140 lb, 30"	Lectura de gases a través del barreno (LIE, O <sub>2</sub> , ppm)	Prueba de gases en suelo (LIE, ppm)	Clasificación de Suelo
5,5								CL
6							2,60	
6,5								
7								

Tipo de perforadora: CME-55  
 Tipo de sondeo: BH  
 Ubicación:   
 Coordenada UTM X: 14Q0209736  
 Coordenada UTM Y: 2195480

NOTAS	CLASIFICACION VISUAL
Alta Saturada	Arcilla pardo claro, compacta, plasticidad media, sin olor ni impregnación, arcilla de color blanco alterada por la presencia de agua

**AGUA SUBTERRÁNEA**

PROF.	FECHA	HORA

**TIPO DE MUESTRA**

- A - Cortes de barreno
- S- 2" D. E. 1.38" D. I. Muestra de tubo partido
- U- 3" D. E. 2.42" D. I. Muestra de tubo partido
- T - 3" D. E. Tubo Shelby de pared delgada
- L - Liner
- H - Hand Auger

**REGISTRO LITOLOGICO**

Proyecto: Demacsa  
 No. Proyecto: 08038M Fecha: 09-dic-08

Sondeo: SDS-4  
 Página: 1 1 de 1

Profundidad en metros	Número de identificación de la muestra	Registro gráfico	Muestra	Tipo de muestra	Golpes por pie, caída libre 140 lb, 30"	Lectura de gases a través del barreno (LIE, O <sub>2</sub> , ppm)	Prueba de gases en suelo (LIE, ppm)	Clasificación de Suelo
0								
0.5								
1								CL
1.5								
2								
2.5								CL
3								
3.5								
4								CL
4.5								
5								

Tipo de perforadora: GME-55  
 Tipo de sondeo: BH  
 Ubicación: 14Q0209718  
 Coordenada UTM X: 2195478  
 Coordenada UTM Y: 2195478

NOTAS	CLASIFICACION VISUAL
	Cubierta vegetal
Baja Media	Arcilla pardo claro, semicompacta, deleznable, dureza baja, presencia de gravas mal clasificadas
Baja Media	Idéntico, sin olor ni impregnación
Alta Saturada	Arcilla gris, poco compacta, deleznable dureza baja, mal clasificada, sin plasticidad, olor fuerte a fétido, sin impregnación



**REGISTRO LITOLÓGICO**

Proyecto: Demacsa  
 No. Proyecto: 08038M Fecha: 09-dic-08

Sondeo: SDS-4  
 Página: 1 1 de 1 1

Profundidad en metros	Número de identificación de la muestra	Registro gráfico	Muestra	Tipo de muestra Golpes por pie, caída libre 140 lb, 30"	Lectura de gases a través del barreno (LIE, O <sub>2</sub> , ppm)	Prueba de gases en suelo (LIE, ppm)	Clasificación de Suelo
5, 5							CL
6						3, 120	
6, 5							
7							

Tipo de perforadora: CME-55  
 Tipo de sondeo: BH  
 Ubicación: 14Q0209/18  
 Coordenada UTM X: 2195478  
 Coordenada UTM Y: 2195478

NOTAS	CLASIFICACION VISUAL
Alta Saturada	Arcilla parda, con intercalaciones de arenas finas, negras, amarillas, blancas por alteración de agua, compacta, olor fétido, dureza baja

**AGUA SUBTERRÁNEA**

PROF.	FECHA	HORA


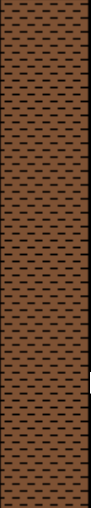
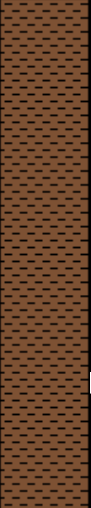
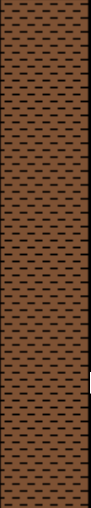
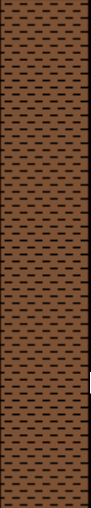
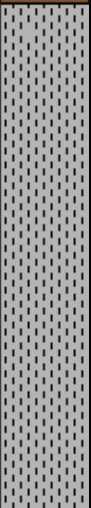
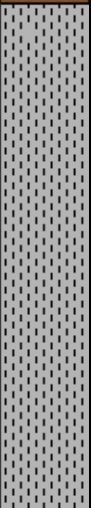
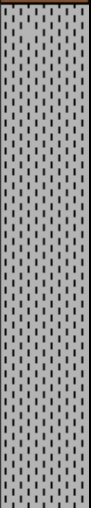
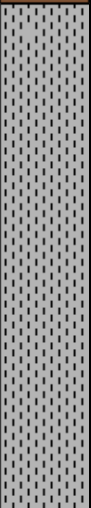
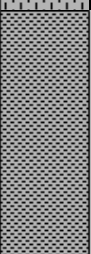
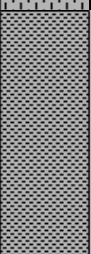
**TIPO DE MUESTRA**

- A - Cortes de barreno
- S- 2" D. E. 1.38" D. I. Muestra de tubo partido
- U- 3" D. E. 2.42" D. I. Muestra de tubo partido
- T - 3" D. E. Tubo Shelby de pared delgada
- L - Liner
- H - Hand Auger

REGISTRO LITOLÓGICO

Proyecto: Demacsa  
 No. Proyecto: 08038M Fecha: 09-dic-08

Sondeo: SDS-5  
 Página: 1 de 1

Profundidad en metros	Número de identificación de la muestra	Registro gráfico	Muestra	Tipo de muestra	Golpes por pie, caída libre 140 lb, 30"	Lectura de gases a través del barreno (LIE, O <sub>2</sub> , ppm)	Prueba de gases en suelo (LIE, ppm)	Clasificación de Suelo
0								
0.5								CL
1								
1.5								
2								
2.5								CL
3								
3.5								
4								
4.5								CL
5								

Tipo de perforadora: CME-55  
 Tipo de sondeo: BH  
 Ubicación: 14Q0209707  
 Coordenada UTM X: 2195454  
 Coordenada UTM Y: 2195454

NOTAS	CLASIFICACION VISUAL
	Cubierta vegetal
Nula	Arcilla parda, deleznable, dureza baja, sin plasticidad, sin olor ni impregnación
Media Alta	Arcilla limosa gris claro, compacta, plasticidad baja, dureza baja, sin olor ni impregnación
Saturada	Arcilla arenosa gris claro, mal clasificada, poco dura, sin olor ni impregnación

**REGISTRO LITOLOGICO**

Proyecto: Demacsa  
 No. Proyecto: 08038M Fecha: 09-dic-08

Sondeo: SDS-5  
 Página: 1 1 de 1 1

Profundidad en metros	Número de identificación de la muestra	Registro gráfico	Muestra	Tipo de muestra	Golpes por pie, caída libre 140 lb, 30"	Lectura de gases a través del barreno (LIE, O <sub>2</sub> , ppm)	Prueba de gases en suelo (LIE, ppm)	Clasificación de Suelo	NOTAS	CLASIFICACION VISUAL
5,5									Saturada	Arcilla gris claro, compacta, plasticidad nula, dureza baja, manchas verdes, lentes de arcilla de color blanco por alteración de agua, lentes de arena fina negra, bien clasificada, sin olor
6							0,30			
6,5										
7										

Tipo de perforadora: CME-55  
 Tipo de sondeo: BH  
 Ubicación: 14Q0209707  
 Coordenada UTM X: 2195454  
 Coordenada UTM Y: 2195454

AGUA SUBTERRANEA

PROF.	FECHA	HORA

TIPO DE MUESTRA

A - Cortes de barreno  
 S- 2" D. E. 1.38" D. I. Muestra de tubo partido  
 U- 3" D. E. 2.42" D. I. Muestra de tubo partido  
 T - 3" D. E. Tubo Shelby de pared delgada

L - Liner  
 H - Hand Auger

REGISTRO LITOLÓGICO

Proyecto: Demacsa  
 No. Proyecto: 08038M Fecha: 09-dic-08

Sondeo: SCF-9  
 Página: 1 1 de 1

Profundidad en metros	Número de identificación de la muestra	Registro gráfico	Muestra	Tipo de muestra	Golpes por pie, caída libre 140 lb, 30"	Lectura de gases a través del barreno (LIE, O <sub>2</sub> , ppm)	Prueba de gases en suelo (LIE, ppm)	Clasificación de Suelo
0								
0.5								CL
1								
1.5								
2								OL
2.5								
3								
3.5								
4								CL
4.5								CL
5							1, 50	

Tipo de perforadora: CME-55  
 Tipo de sondeo: BH  
 Ubicación: 14Q0209744  
 Coordenada UTM X: 2195527  
 Coordenada UTM Y: 2195527

NOTAS	CLASIFICACION VISUAL
	Cubierta vegetal
Media Baja	Arcilla pardo claro, deleznable, poco compacta, plasticidad baja, sin olor ni impregnación
Media	Arcilla limosa pardo oscuro, compacta, plasticidad media alta, presencia de lentes de arcilla de color pardo claro sin olor ni impregnación
Alta	Arcilla pardo oscuro, semi compacta, plasticidad baja, deleznable, olor fétido
Alta	Arcilla blanca con intercalaciones de arena negra, bien clasificada, compacta sin plasticidad, olor fétido, manchas verdes
	Fin del sondeo por presencia de agua

AGUA SUBTERRÁNEA			TIPO DE MUESTRA	
PROF.	FECHA	HORA	A - Cortes de barreno	L - Liner
			S- 2" D. E. 1.38" D. I. Muestra de tubo partido	H - Hand Auger
			U- 3" D. E. 2.42" D. I. Muestra de tubo partido	
			T - 3" D. E. Tubo Shelby de pared delgada	

REGISTRO LITOLÓGICO

Proyecto: Demacsa  
 No. Proyecto: 08038M Fecha: 09-dic-08

Sondeo: SCF-10  
 Página: 1 de 1

Profundidad en metros	Número de identificación de la muestra	Registro gráfico	Muestra	Tipo de muestra Golpes por pie, caída libre 140 lb, 30"	Lectura de gases a través del barreno (LIE, O <sub>2</sub> , ppm)	Prueba de gases en suelo (LIE, ppm)	Clasificación de Suelo
0							
0.5							OL
1							
1.5							OL
2							
2.5							
3							OL
3.5							ML
4					0,0		
4.5							
5							

Tipo de perforadora: CME-55  
 Tipo de sondeo: BH  
 Ubicación: 14Q0209/30  
 Coordenada UTM X: 2195513  
 Coordenada UTM Y:

NOTAS	CLASIFICACION VISUAL
	Cubierta vegetal
Media Baja	Arcilla limosa de color pardo claro, deleznable, escasa plasticidad, dureza baja, presencia de agua y arena mal clasificada sin olor ni impregnación
Medio	Arcilla limosa pardo oscuro, deleznable, plasticidad baja, dureza baja sin olor ni impregnación
	Idéntico
Media Alta	Arcilla limosa gris oscuro, compacta, plasticidad baja a media, mal clasificada escasa manchas negras, son olor
Media Alta	Limo arenoso gris claro semi compacta, deleznable, plasticidad escasa, mal clasificada, presencia de gravas mal clasificadas
	Fin del sondeo por presencia de agua

AGUA SUBTERRÁNEA			TIPO DE MUESTRA	
PROF.	FECHA	HORA	A - Cortes de barreno	L - Liner
			S- 2" D. E. 138" D. I. Muestra de tubo partido	H - Hand Auger
			U- 3" D. E. 2.42" D. I. Muestra de tubo partido	
			T - 3" D. E. Tubo Shelby de pared delgada	

REGISTRO LITOLOGICO

Proyecto: Demacsa  
 No. Proyecto: 08038M Fecha: 09-dic-08

Sondeo: SCF-12  
 Página: 1 1 de 1

Profundidad en metros	Número de identificación de la muestra	Registro gráfico	Muestra	Tipo de muestra	Golpes por pie, caída libre 140 lb, 30"	Lectura de gases a través del barreno (LIE, O <sub>2</sub> , ppm)	Prueba de gases en suelo (LIE, ppm)	Clasificación de Suelo
0								
0.5								CL
1								CL
1.5								CL
2								
2.5								
3								
3.5								
4								
4.5								
5								

Tipo de perforadora: CME-55  
 Tipo de sondeo: BH  
 Ubicación: 14Q0209766  
 Coordenada UTM X: 2195530  
 Coordenada UTM Y: 2195530

NOTAS	CLASIFICACION VISUAL
	Cubierta vegetal
Baja	Arcilla, semi compacta, deleznable, pardo claro, plasticidad nula sin olor ni impregnación
Baja	Arcilla pardo claro, compacta, plasticidad media, dureza media a baja, lentes de arcilla blanca por alteración sin olor ni impregnación
Alta	Arcilla pardo oscuro, compacta, plasticidad nula, dureza media, sin olor ni impregnación
	Fin del sondeo por presencia de agua

AGUA SUBTERRÁNEA			TIPO DE MUESTRA	
PROF.	FECHA	HORA		
			A - Cortes de barreno	L - Liner
			S- 2" D. E. 1.38" D. I. Muestra de tubo partido	H - Hand Auger
			U- 3" D. E. 2.42" D. I. Muestra de tubo partido	
			T - 3" D. E. Tubo Shelby de pared delgada	

## Apéndice 2

### Registro Fotográfico



Fotografía 1. Emplazamiento del SEV-1.



Fotografía 2. Ubicación del SEV-2.



Fotografía 3. Ubicación del SEV-3.



Fotografía 4. Panorámica del SEV-4.



Fotografía 5. Zona de realización del SEV-5.



Fotografía 6. Ubicación del SEV-6.





Fotografía 7. Localización del SEV-7.



Fotografía 8. Ubicación del SEV-8.



Fotografía 9. Localización del SEV-9.



Fotografía 10. Localización del SEV-10.



Fotografía 11. Muestreo de suelo en el sondeo SB-10



Fotografía 12. Muestreo de suelo en el sondeo SB-11





Fotografía 13. Muestreo de suelo en el sondeo SB-14



Fotografía 14. Muestreo de suelo en el sondeo STD-1.  
Evidencia de derrames



Fotografía 15. Evidencia de derrames en el sondeo  
STD-3.



Fotografía 16. Manchas blanquizas (derrames) en suelo  
del área de tanques.



Fotografía 17. Muestreo de suelo en el sondeo STD-4



Fotografía 18. Manchas blanquizas (derrames) en suelo  
en el área del sondeo STD-5





Fotografía 19. Muestreo de suelo en el sondeo STD-8



Fotografía 20. Medición de vapores orgánicos (ppm) y explosividad



Fotografía 21. Muestreo de suelo en el sondeo SDN-2



Fotografía 22. Muestreo de suelo en el sondeo SDN-3, se observa residuos plásticos.



Fotografía 23. Muestreo de suelo en el sondeo SDN-4, se observa residuos plásticos.



Fotografía 24. Muestreo de suelo en el sondeo SDN-5, se observa residuos plásticos





Fotografía 25. Vista del tubo con residuos plásticos en el sondeo SDN-5.



Fotografía 26. Detección de vapores orgánicos y explosividad



Fotografía 27. Muestreo de suelo en el sondeo SDN-7



Fotografía 28. Muestreo de suelo en sondeo SDN-8, se observa fracturamiento con oxidación



Fotografía 29. Muestreo de suelo en el sondeo SNE-1.



Fotografía 30. Muestreo de suelo en el sondeo SNE-3.





Fotografía 31. Muestreo de suelo en el sondeo SNE-6.



Fotografía 32. Muestreo de suelo en el sondeo SDS-1



Fotografía 33. Muestreo de suelo en el sondeo SDS-2.



Fotografía 34. Muestreo de suelo en el sondeo SDS-3.



Fotografía 35. Fibra de plástico recuperado del material de recorte del sondeo SDS-3



Fotografía 36. Muestreo de suelo en el sondeo SCF-11.



Fotografía 37. Verificación del nivel de agua en el pozo PMZ-9



Fotografía 38. Muestreo de agua en el pozo PMZ-10



Fotografía 39. Muestreo de agua en el pozo PMZ-5



Fotografía 40. Toma del nivel de piezométrico en el pozo pmz-27

## 7 Referencias

- Astier Jean Louis., 1984., Geofísica Aplicada a la Hidrogeología. Paraninfo; Madrid, España.
- ASTM D 2488: Standard Practice for Description and Identification of Soils (Visual- Manual Procedure).
- ASTM D 4845; Standard Guide for Sampling Chain-of-Custody Procedures.
- ASTM D 5088: Standard Practice for Decontamination of Field Equipment Used at Nonradioactive Waste Sites.
- ASTM D 5092; Standard Practice for Design and Installation of Groundwater Monitoring Wells in Aquifers
- ASTM D 5521; Standard Guide for Development of Groundwater Monitoring Wells in Granular Aquifers.
- ASTM D 5784 Guide for Use of Hollow- Stem Augers for Geo-environmental Exploitation and Instalation of Subsurface Water-Quality Monitoring Devices.
- ASTM D 5956: Standard Guide for Sampling Strategies for Heterogeneous Wastes.
- ASTM D 6051: Standard Guide for Composite Sampling and Field Subsampling for Environmental Waste Management Activities
- ASTM D 6089; Standard Guide for Documenting a Ground Water Sampling Event
- ASTM D 6151 Standard Practice for Using Hollow-Stem Augers for Geotechnical Exploration and Soil Sampling.
- ASTM D 6699; Standard Practice for Sampling Liquids Using Bailers
- ASTM D 6771; Standard Practice for Low-Flow Purging and Sampling for Wells and Devices Used for Ground Water Quality Investigations
- Bear, J., Arnold, V. (1987). Modeling groundwater of flow and pollution. Dordrecht, Netherlands: D. Reidel Publishing Company, 414 p.p.
- Custodio-Llamas (1983). Hidrología Subterránea. 2 Tomos. Editorial Omega, Barcelona.
- Davis, S.N (1969). Porosity and permeability of natural materials. Flow through porous media, ed. R.J.M. De Wiest, Academic Press, New York, 54-89.
- Desauliers, D.E., J.A. Cherry and P. Fritz. (1981). Origin, age and movement of pore water in argillaceous quaternary deposits at four sites in southwestern Ontario, J. Hydrol., 50, 231-257.
- Fetter, C.W. (2004). Contaminant Hydrogeology. Second Edition. Prentice Hall. New Jersey.
- Instituto Nacional de Geografía e Informática, S. P. P., Carta Topográfica, y Geológica., Escala: 1:50,000., Hoja: Zacapu., Clave: E14-A11.

- Llamas José., 1989., Hidrología General, Principios y Aplicaciones., Edit. Universidad Autónoma del Estado de México., Toluca, Estado de México.
- Mijares F., 1989., Fundamentos de Hidrología de Superficie., Edit. Limusa. México.
- Niedzielki, P., Henryk M., 1985., “Geohidrología I” Edit. Universidad Autónoma Metropolitana, México., D. F.
- Norma Mexicana NMX-AA-132-SCFI-2006. Muestreo de suelos para la identificación y cuantificación de metales y metaloides y manejo de la muestra
- Ogata, Akio (1970). Theory of dispersion in granular medium. US. Geological Survey Professional Paper. 411-A.
- Orellana E., y Mooney H. 1982., Tablas y Curvas Patrón para Sondeos Eléctricos Verticales sobre Terrenos Estratificados. Interciencia. Madrid, España.
- Orellana E., 1982., Prospección Geoeléctrica por Corriente Continua. Paraninfo. Madrid, España.
- .Regional Screening Levels for Chemical Contaminants at Superfund Sites (RSLChC), versión 2008, que sustituyen a los PRGs-2004 (Preliminary Remediation Goals), compatibilizando los criterios 3, 6 y 9 de la EPA. (Website developed with DOE's Oak Ridge National Laboratory (ORNL) under an Interagency Agreement as an update of the EPA Region 3 RBC Table, Region 6 HHMSSL Table and the Region 9 PRG Table. <http://epaprgsornl.gov:8085/chemicals/index.shtml> [consulta: 13 de junio de 2008].)
- Risk Science Program (RSP). 1994. Intermedia Transfer Factors for Contaminated Founs of Hazardous Waste Sites: . Department of Environmental Toxicology. University of California. Davis, California. 44 p.
- Sara, N.M. (2003). Site Assessment and Remediation Handbook. Second Edition. Lewis Publishers, EUA.
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente.
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Reglamento de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2004. Norma Oficial Mexicana, NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y Vanadio. Diario Oficial de la Federación (Segunda Sección), publicado el 02 de marzo de 2007. México, D.F.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2005. Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005, Que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2000. Norma Oficial Mexicana NOM-021-SERMANAT-2000, Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y caseificación de suelos, estudio, muestreo y análisis.



- Suthersan, S.S. (2002). Natural and Enhanced Remediation Systems. ARCADIS. Lewis Publishers.