



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

MODELO DE INFILTRACION DE SOLUTOS DESDE UNA LAGUNA DE TRATAMIENTO ANAERÓBICO HACIA EL ACUÍFERO EN EL VALLE DE GUADALUPE VICTORIA, PUEBLA, EVALUACIÓN Y SOLUCIONES.

T E S I S

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

PRESENTA

LUIS RICARDO JAIMES PALOMERA

JURADO EXAMINADOR

- 1) GUILLERMO HERNÁNDEZ GARCÍA (PRESIDENTE)
- 2) DR. RAFAÉL HUIZAR ÁLVAREZ (SECRETARIO-ASESOR DE TESIS)
- 3) DR. FRANCISCO MARTÍN ROMERO (VOCAL)
- 4) DR. ANTONIO CARDONA BENAVIDES (SUPLENTE)
- 5) DR. EDUARDO GRANIEL CASTRO (SUPLENTE)



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

A Xóchitl por toda una vida de amor y trabajo juntos y por ser la fuente de motivación más importante en mi vida.

A nuestra Hija Blossom Maryse cuyo nacimiento nos cambió la vida y nos motivó a explorar nuevos horizontes.

A mis Padres Luz María y Raúl por todo lo que me han dado e hicieron por mí y que agradezco de todo corazón.

A Odilia Soriano por su invaluable amistad y cariño.

En memoria de mi hermano Raúl.

"Abre tus brazos al cambio pero no dejes escapar tus valores"

Dalai Lama

ÍNDICE

I INTRODUCCIÓN	1
I.1 Antecedentes	1
I.2 Planteamiento del problema	1
I.3 Generalidades	2
I.4 Objetivo	2
OBJETIVOS PARTICULARES:	2
I.5 Trabajos Previos	3
I.6 Localización	4
I.7 Climatología	6
II MÉTODO DE TRABAJO	7
III RESULTADOS	13
III.1 Geología	13
III.1.1 Margo Geológico Regional	13
III.1.2 Estratigrafía	13
III.1.3 Geología Estructural y del subsuelo	17
III.2 Geofísica	19
III.2.1 Perfiles de Resistividad	23
III.2.2 Mapas de Resistividad	25
II.3. Hidrogeología	29
II.3.1 Resultados de la perforación de sondeos exploratorios y análisis hidrogeológico de los pozos de monitoreo existentes	29
III.3.2 Unidades Hidrogeológicas	33
III.3.3 Parámetros Hidráulicos	35
II.3.4 Gradiente hidráulico	36
II.3.5 Modelo Hidrogeológico Conceptual	37
III.4 Hidrogeoquímica	39
III.5 Modelo de Flujo en la zona no saturada	47
III.6 Modelo de Flujo y Transporte	51
III.6.1 Modelo de Flujo con MODFLOW y de transporte de partículas con MODPATH	51
III.6.2 Modelo de Transporte Utilizando el MT3D	57
Parámetros de Transporte	63
Simulaciones de Transporte	64
III.7. Geotecnia	67
III.7.1 Trabajos de Campo	67
III.7.2 Modelo de Flujo en la zona no saturada, simulación para predecir la infiltración considerando el diseño de plantilla propuesto	73
III.7.3 Recomendaciones para la Colocación de la Plantilla impermeable de la laguna de tratamiento	74
IV. CONCLUSIONES	76
V. RECOMENDACIONES	79
V.1 Recomendaciones Generales	79
VI. BIBLIOGRAFÍA	80

Lista de Figuras

Figura 1 Mapa de Localización.....	5
Figura 2. Temperatura, Precipitación y Evapotranspiración obtenidas con el modelo HELP.....	7
Figura 3. Mapa Geológico.....	14
Figura 4A. Columna Estratigráfica del sitio hasta los 2.32 m de profundidad.....	16
Figura 4B. Lineamientos regionales.....	18
Figura 5. Arreglo utilizado.....	17
Figura 6. Localización de los sitios de TEM.....	19
Figura 7. Perfil geoelectrico Sección No. 1.....	23
Figura 8. Perfil geoelectrico Sección No. 2.....	24
Figura 9. Perfil geoelectrico Secciones No. 3 y 4.....	25
Figura 10. Mapa de Resistividad para la profundidad de 5 m.....	26
Figura 11. Mapa de Resistividad para la profundidad de 10 m.....	27
Figura 12. Mapa de Resistividad para la profundidad de 15 m.....	27
Figura 13. Mapa de Resistividad para la profundidad de 20 m.....	28
Figura 14. Localización de sondeos exploratorios y pozos de monitoreo.....	29
Figura 15. Registro geológico del sondeo exploratorio No.1.....	30
Figura 16 Registro geológico del sondeo exploratorio No.2.....	31
Figura 17 Registro geológico del sondeo exploratorio No. 3.....	32
Figura 18 Vistas tridimensionales del acuífero en la zona de la laguna.....	34
Figura 19. Piezometría regional.....	36
Figura 20. Modelo Hidrogeológico Conceptual.....	37
Figura 21. Mapa Hidrogeoquímico.....	40
Figura 22. Diagrama de Piper.....	41
Figura 23. Diagrama de Durov.....	42
Figura 24. Distribución de fosfatos en mg/l.....	43
Figura 25. Distribución de Nitratos en mg/l.....	44
Figura 26 Ciclo del Nitrógeno.....	45
Figura 27. Resultados del modelo HELP para calcular la Recarga.....	49
Figura 28. Resultados del modelo HELP para calcular la infiltración en la laguna.....	49
Figura 29. Resultados del modelo HELP para calcular la infiltración en una alternativa de solución.....	50
Figura 30. Dominio del modelo y condiciones de frontera.....	52
Figura 31. Distribución de parámetros hidráulicos en perfil.....	53
Figura 32. Condiciones iniciales.....	54
Figura 33. Cargas calculadas.....	56
Figura 34. Partículas viajando desde la laguna hasta el pozo vecino.....	57
Figura 34 A. Resultados del modelo de transporte.....	65
Figura 35. Localización de sondeos y bancos de materiales estudiados.....	68
Figura 36. Sección Geotécnica.....	69
Figura 37. Mapa General de Bancos.....	72
Figura 38. Croquis con recomendaciones para la colocación de la plantilla.....	74

Lista de Tablas

Tabla 1. Métodos de Ensayo de Análisis Físico-químicos.....	10
Tabla 1. Unidades Geoeléctricas.....	21
Tabla 2. Resultados de las pruebas hidráulicas realizadas.....	35
Tabla 3. Resultados de los análisis físico-químicos en mg/l.....	39
Tabla 4. Balance de Agua en la Laguna de Tratamiento.....	48
Tabla 5. Comparación de resultados del Visual HELP.....	73

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento al Dr. Rafaél Huizar por sus valiosas aportaciones al presente trabajo, su amistad y apoyo continuo durante mis estudios de maestría fueron muy importantes para poder llegar hasta el final. A los miembros del jurado examinador los Doctores Guillermo Hernández, Francisco Martín Romero, Antonio Cardona Benavides y Eduardo Graniel Castro, por sus acertadas observaciones y su valioso tiempo que dedicaron a la revisión de esta tesis.

A la empresa consultora Ingeniería Geológica Computarizada, especialmente a sus directores, mis socios y colegas la Ingeniera Xóchitl Montaña Soriano y el Ing. Miguel Alarcón Santiago por su valiosa colaboración y apoyo en la realización de este trabajo, asimismo al Lic. Zayi Montaña Soriano por la elaboración de la mayor parte de las figuras.

De modo muy especial agradezco a mi amada esposa Xóchitl y a nuestra muy querida hija Blossom Maryse, por todo su apoyo durante estos últimos años para que persistiera en esta meta y por todo el tiempo de familia que tuvo que ser sacrificado para poder terminar estos estudios.

RESUMEN

Con objeto de determinar la extensión y dirección de la pluma de contaminantes orgánicos generados por una laguna de tratamiento de aguas residuales en una granja porcina, se realizó la caracterización del sistema acuífero utilizando prospección geofísica, levantamiento geológico detallado, perforación de sondeos para determinar las propiedades hidráulicas de los suelos atravesados, muestreo químico y bacteriológico de los pozos de monitoreo, medición de niveles de agua y la simulación numérica de flujo y transporte tanto en la zona no saturada como en el acuífero.

Los resultados de este trabajo indican lo siguiente: las unidades hidrogeológicas que existen debajo de la laguna son principalmente, limos arenosos y arenas, de origen piroclástico y cuyas permeabilidades que permiten la infiltración de contaminantes.

El modelo aplicado en la zona no saturada Visual HELP, en el que se consideran perfiles que toman en cuenta las capas de suelo y material compactado de la laguna, indica que existe filtración de agua por debajo la laguna. Para alimentar los datos que requiere este modelo se realizaron sondeos directos a los que se les efectuaron pruebas de permeabilidad a distintas profundidades y también se consideraron los resultados de las pruebas de campo y laboratorio previamente realizados en el fondo de la laguna así como en el material compactado y que fue colocado en el fondo de esta.

Los resultados de los análisis físico-químicos y bacteriológicos, confirman la presencia de solutos en el subsuelo cercano a la laguna de tratamiento y en dirección del flujo de aguas subterráneas que es de SW a NE.

El modelo de flujo tridimensional de aguas subterráneas, confirma que los solutos provenientes de la laguna han llegado a un pozo de extracción situado a 50 m mediante el mecanismo de transporte de tipo advectivo.

Se recomendó la construcción de una nueva laguna utilizando un diseño de revestimiento más adecuado a las condiciones hidrogeológicas del sitio, cuyo material óptimo fue detectado en un banco de material cercano al sitio de la laguna y cuya conductividad hidráulica una vez compactado, es satisfactorio para retener los contaminantes una vez instalado.

ABSTRACT

In order to determine the fate and destiny of organic contaminants generated by the residual water from a pigs farm, a characterization of the aquifer system was done using: geophysics methods, detailed geological survey, drilling of soil borings, monitoring wells sampling and Chemical and bacteria content analysis, a groundwater levels round and, flow and transport groundwater modeling in both, the vadoze zone and the aquifer.

The results show that the hydrogeologic units underlying the lagoon are mainly formed by pyroclastic deposits with silt and sand grain sizes, all of them permeable and allowed the infiltration of particles and solutes from the treatment lagoon.

The unsaturated zone model (Visual HELP), in which the soil profile and liners are considered, is indicating that there is flow from the lagoon. In order to input the data for this model a series of soil borings with hydraulic testing at different depths were made, and the available data from the lab and field test of the clay liner before and after the installation.

The analytical results for the chemical and bacteria content support the argument that the contaminants are below the lagoon and follow the groundwater flow direction.

The flow and transport groundwater model calculated heads are indicating that solutes from the lagoon reached a pumping well close to the site.

The construction of a new lagoon using a re-designed clay liner according to the hydrogeologic conditions of the site was recommended. The optimum borrow pit materials were located near the site. The hydraulic properties of the compacted material are adequate to stop the contaminants once properly installed.

I INTRODUCCIÓN

I.1 Antecedentes

El incremento en importancia de la calidad del agua en los acuíferos someros debido al incremento en el uso y re-uso de los recursos disponibles de agua subterránea ha propiciado el desarrollo de numerosos estudios para explicar la calidad de las aguas subterráneas tal y como se encuentran en la naturaleza así como también los cambios en la calidad debidos a la intervención humana. El incremento del nitrato en el agua, en particular el debido directa o indirectamente a la actividad humana, es particularmente preocupante debido a que en concentraciones superiores a los 10 mg/L N en fuentes de suministro de agua potable puede ser dañino para los niños.

1.2 Planteamiento del problema

Ante la incertidumbre de la posible contaminación del agua subterránea que capta un pozo agrícola ubicado en el municipio de Guadalupe Victoria, Puebla, la autoridad municipal solicitó elaborar un estudio hidrogeológico que indagara si la laguna de tratamiento residual perteneciente a la granja porcina situada en el Valle de Guadalupe Victoria en colindancia con dicho pozo, pudiera ser la posible fuente de esa contaminación y cuál sería la dirección y el desplazamiento del contaminante.

La investigación consiste en un análisis hidrogeológico detallado para determinar la posible infiltración de solutos de la laguna de tratamiento anaeróbico de aguas residuales de una granja tecnificada de producción de ganado porcino, también se consideró el aspecto de la hidrogeología de solutos en la laguna y sus inmediaciones que por supuesto comprende actividades de campo y gabinete incluyendo la elaboración de un modelo de flujo y transporte del acuífero subyacente y un modelo de la zona no saturada para los suelos.

De esta manera datos generados y resultados obtenidos se han considerado de interés para elaborar el texto de la presente tesis de maestría. Ya que se trata de una estructura construida para reducir y eliminar el impacto de contaminación al acuífero y cuyo diseño permitió mejorar los diseños de las lagunas de tratamiento en esa región de Puebla.

La primera parte de este trabajo, es un estudio hidrogeológico regional que parte de un levantamiento geológico empleando fotointerpretación y verificación de campo, que fue necesario realizar para poder definir las condiciones de frontera para la solución del problema y al mismo tiempo, para evaluar la existencia de

estructuras geológicas que pudieran estar afectando el sistema hidrogeológico en cuestión.

La segunda parte de la tesis, llega a la evaluación hidrogeológica de detalle y a la simulación numérica a escala local, empleando de manera óptima los recursos económicos disponibles para la realización de este trabajo. Mientras que la tercera parte, es un estudio geotécnico que evalúa los bancos de materiales localizados cerca del sitio para su utilización como plantilla impermeable que va a sustituir la ya existente en la laguna de tratamiento, simulando su comportamiento con el modelo HELP.

El interés por presentar este trabajo como tesis es la metodología y combinación de técnicas empleadas para la solución del problema y sirve como antecedente para la solución de problemas similares en esa región considerando la proliferación de este tipo de granjas que se ha dado en esa región.

1.3 Generalidades

El valle de Guadalupe Victoria, se ubica en una planicie de origen volcánico mejor conocida como planicie de oriental, es una región eminentemente agrícola con suelos permeables donde el nivel freático es somero, por su favorable localización geográfica y clima, en los últimos años se ha incrementado la instalación de granjas tecnificadas de producción porcina, lo que ha generado una preocupación de las autoridades federales y estatales en relación a que la infiltración de los residuos de dichas granjas de producción porcina, especialmente los nutrientes, puedan causar impacto en el acuífero del valle, considerando la posible existencia de pozos de abastecimiento de agua potable en el futuro.

1.4 Objetivo

Para contribuir a la solución de la problemática antes expuesta, los objetivos principales de esta tesis, son:

1. Determinar el riesgo y el posible grado de afectación al acuífero de Libres-Oriental generado por efluentes y lagunas de oxidación de una granja de ganado porcino.
2. Caracterizar el acuífero en el entorno de la granja.

Objetivos particulares:

1. Realizar el diagnóstico de impacto de contaminación al acuífero en las inmediaciones del sitio.

2.- Establecer la posible influencia de la granja en la calidad del agua a nivel regional.

3.- Recomendar las actividades requeridas para autorregular el impacto al acuífero.

I.5 Trabajos Previos

No existen estudios previos detallados de la zona en donde se encuentra la granja, ni se habían realizado investigaciones ni reportes técnicos en relación a las aguas subterráneas en la granja. Desde el punto de vista hidrogeológico, se tienen estudios enfocados a la piezometría regional realizados por la Comisión Nacional Del Agua (CNA) que cubren el acuífero de Libres-Oriental, pero no se encontraron estudios detallados del Valle de Guadalupe Victoria en particular. Los estudios geológicos existentes, todos son de carácter regional. Por esta razón es que como parte de este trabajo se hizo necesaria la elaboración de un mapa geológico mediante fotointerpretación y verificación de campo y se efectuó un inventario de aprovechamientos de la zona cercana a la granja estudiada y la medición de niveles de agua de todos los pozos cercanos.

Otros trabajos consultados fueron recopilados en bibliotecas y dependencias públicas, mismos que fueron considerados para la realización de este trabajo. Los trabajos consultados son los de el Consejo de Recursos Minerales, 1998, que trata de la geología minera del Estado de Puebla y que ha cubierto de forma regional la geología de la zona de estudio y de donde se consultaron las descripciones de algunas formaciones sedimentarias cercanas por ser parte de prospectos mineros en la región.

El trabajo del Instituto de Ingeniería, 1991, que es un estudio regional del Acuífero de Oriental y en que se incluye un modelo matemático de todo el acuífero, desafortunadamente en dicho estudio hay muy poca información del área de interés. El estudio de la Comisión Nacional del Agua, 1997, que consiste en mapas de la elevación del nivel estático para todo el acuífero. Dichos mapas fueron utilizados en campo como guía para realizar el inventario de aprovechamientos de la zona de la granja.

Las cartas de Aguas Subterráneas, Geológica y de Aguas Superficiales del INEGI, 1983, fueron consultadas pues describen en forma general aspectos hidrológicos y geológicos.

El personal de la granja en estudio, proporcionó información correspondiente a la perforación de cuatro pozos de monitoreo instalados en los extremos de la laguna, de los cuales no se recuperaron núcleos, ni muestras de canal, por lo que no hay

corte geológico. No obstante como parte de este trabajo se realizaron pruebas de permeabilidad en ellos (Tabla 2). También se tuvo información de estudios de infiltración utilizando el doble anillo y de pruebas de permeabilidad en laboratorio de los materiales con que fue revestida la laguna, asimismo de las mediciones periódicas del nivel del agua en los pozos de monitoreo, del muestreo y análisis químico del agua de los mismos.

I.6 Localización

La laguna de tratamiento anaeróbico que es objeto de este trabajo, pertenece a la granja No.8 propiedad de una empresa privada de producción de ganado porcino, la cual se ubica 3.3 km al suroeste del poblado de Quechulac, municipio de Guadalupe Victoria, Estado de Puebla. La superficie del área de interés es de 0.48 km². Sus coordenadas UTM son: 671,000, 2,139,000 y 672,400, 2,140,000 (Figura 1).

La granja 8, se encuentra en una planicie de origen lacustre constituida por materiales piroclásticos provenientes de los volcanes que rodean dicha planicie. Esta planicie, está dentro de la provincia geológica del Eje Neovolcánico que es una cadena montañosa formada por volcanes de distinta naturaleza que determinan una morfología muy variada, algunos de estos volcanes son activos, dentro de esta provincia, se encuentran las mayores elevaciones del país, entre las que destacan el Cofre de Perote y el Pico de Orizaba, ambos forman parte del parteaguas de la Cuenca de Oriental.

Localmente la morfología es de valles lacustres rodeados de volcanismo que ha estado activo durante el Cuaternario. Son notorios los maares o xalapascos que se presentan en la parte central del valle causados por erupciones freatomagmáticas, en la zona de la planicie lacustre. En la parte occidental, están los volcanes de las Derrumbadas, siendo el relieve más abrupto de la región. Al noreste se presenta una pequeña sierra escarpada que manifiesta los afloramientos de las secuencias calcáreas del Cretácico. Mientras que al este y sureste se presentan laderas montañosas que forman la base de los estratovolcanes Cofre de Perote y Pico de Orizaba respectivamente. La edad de estos relevos es desde el Oligoceno al Holoceno (Ortega, et. al, 1992).

La hidrografía de esta región está conformada por corrientes intermitentes y perennes que descienden de las sierras hacia las planicies lacustres, mismas que por su naturaleza geológica originó un sistema de cuencas cerradas, (endorreicas). Los lagos que se forman dentro de los xalapascos, son en realidad agua freática. De este tipo de lagos en esta región se encuentran las lagunas de Alchichica, La Preciosa y Totolcingo incluidas dentro de la Región Hidrológica No. 18 Río Balsas.

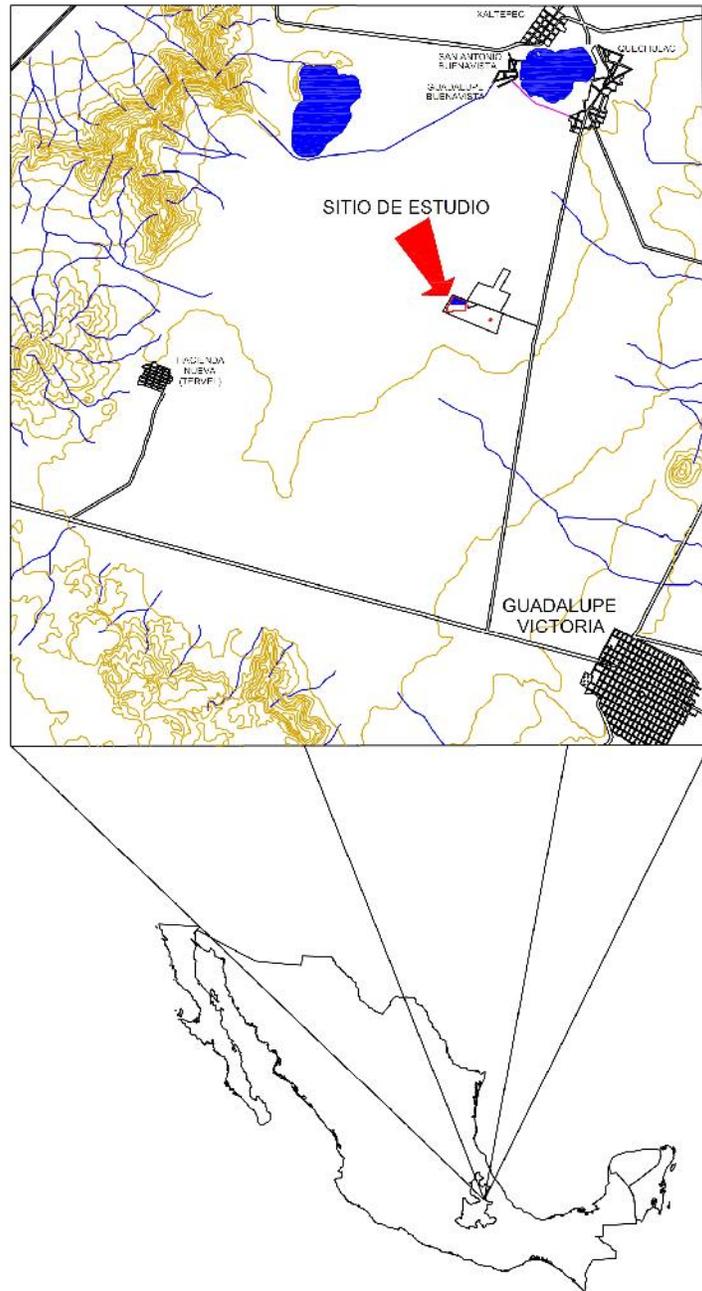


Figura 1. Mapa de Localización

I.7 Climatología

El tipo de clima de ésta región de acuerdo con la Clasificación de Köppen Modificada por García (1987), es del tipo **BS1kw(w)(e)gw**, (Clima Seco Semiárido, templado, con porcentaje de precipitación invernal menor al 5%, con poca oscilación de la temperatura).

La estación climatológica más cercana y representativa del área de estudio es la Estación Alchichica, cuyos datos meteorológicos indican que la precipitación es escasa y ocurre principalmente en verano, como puede verse en la figura 2. La precipitación media anual es de 372.1 mm/año. En cuanto a la temperatura, esta no sobrepasa los 15.4°C en la parte más calurosa del año que es el mes de Junio, como puede apreciarse en la Figura 2. La temperatura media es de 12.1°C. La evapotranspiración real anual es de 315.55 mm, obtenida del modelo HELP.

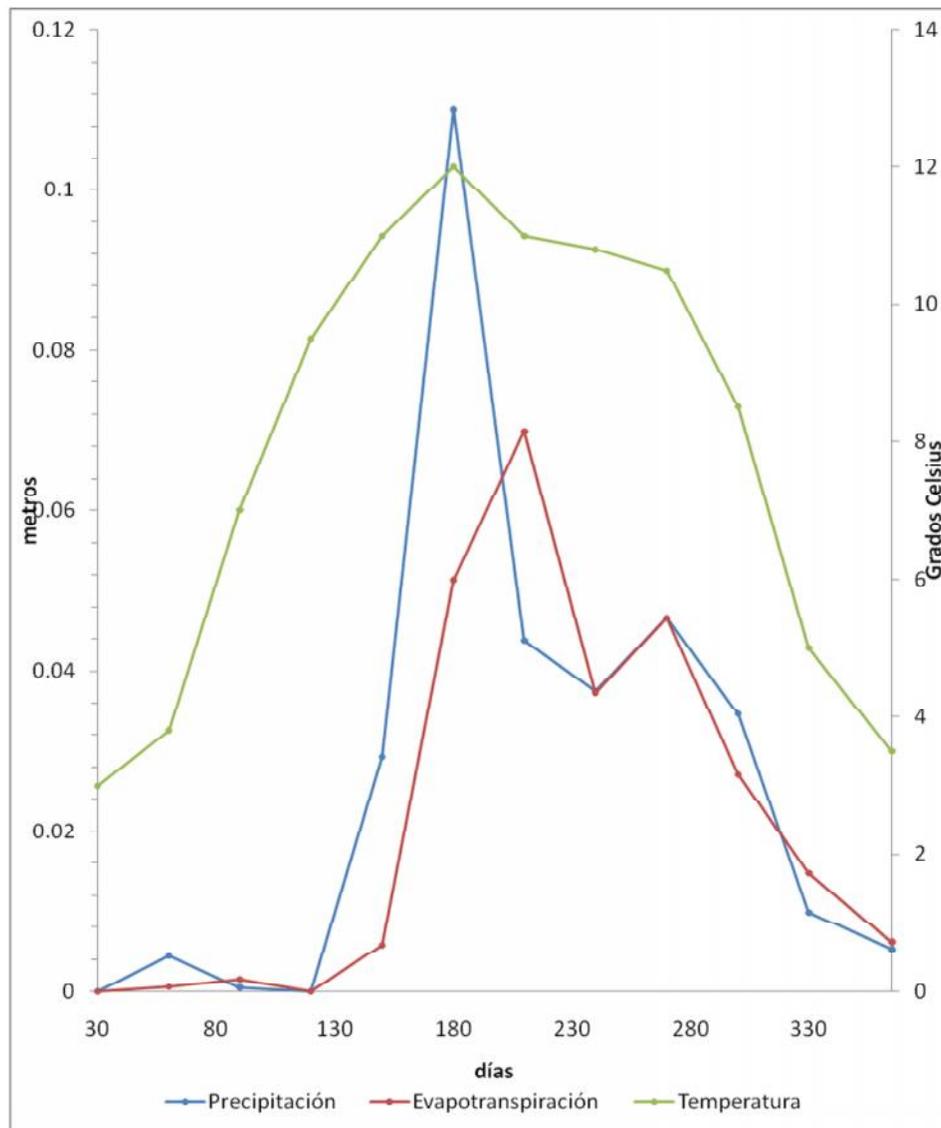


Figura 2. Temperatura, Precipitación y Evapotranspiración obtenidas con el modelo HELP

II MÉTODO DE TRABAJO

Las actividades realizadas para cumplir con los objetivos de esta tesis se enumeran a continuación:

Recopilación y análisis de la información.

Esta actividad consistió en obtener toda la información disponible de bibliotecas dependencias públicas y toda la cartografía existente de utilidad para este trabajo.

Interpretación de fotografías aéreas, imágenes de satélite y verificación de campo

Se realizó una interpretación fotogeológica a partir de fotografías aéreas verticales escala 1:30,000 y de la imagen de satélite (espaciomapa digital en 3 dimensiones escala 1:250,000 del INEGI), posteriormente se realizó una verificación de campo de las unidades litoestratigráficas de interés hidrogeológico y geotécnico, que permitieron la elaboración de un mapa geológico de la región del sitio estudiado.

Inventario de aprovechamientos hidráulicos.

Este inventario se realizó con el fin de identificar todos los aprovechamientos cercanos a la granja a fin de usarlos como pozos de medición de niveles, elegir pozos para realizar pruebas de bombeo, conocer los caudales de extracción y determinar la calidad química del acuífero, pues la información existente de la zona no cuenta con el detalle necesario para los fines de este trabajo. A cada pozo se le midió el nivel estático o dinámico, régimen de operación y profundidad entre otras características.

Hidrometría subterránea

Se realizó un recorrido para determinar la profundidad del nivel del agua en los pozos cercanos, mientras que en los pozos de monitoreo en los límites de la granja, se realizaron tres recorridos piezométricos durante la etapa de trabajo de campo; en estos últimos se nivelaron los brocales mediante el método de nivelación diferencial, para obtener con precisión la profundidad del nivel freático y con esto la dirección del flujo del agua subterránea, ya que la diferencia en los niveles de estos pozos es de unos cuantos centímetros.

De esta forma, se elaboró el mapa de la configuración potenciométrica de la granja y sus alrededores.

Exploración Geofísica

Se realizó la exploración del subsuelo mediante Sondeos Transitorios Electromagnéticos en el Dominio del Tiempo, para correlacionar la información del subsuelo y detallar la geometría del modelo de la laguna. Con objeto de ayudar a conocer la distribución espacial de posibles zonas contaminadas, que modificarían hasta en un 100% la conductividad eléctrica del agua. Se aplicó un método geofísico de alta resolución mediante la técnica del Sondeo Electromagnético (TEM).

Se realizaron 41 sondeos por TEM (sondeo transitorio electromagnético) para conocer las características litológicas a profundidades de hasta 80m; el levantamiento de estas líneas se realizó de acuerdo a los espacios libres que se tienen en el sitio, de este modo se logró una buena distribución de la resistividad en

el área de estudio, que permitió relacionar los resultados con los obtenidos de los análisis físico-químicos.

Particularmente para este trabajo de tesis, la técnica del TEM, consistió en utilizar una espira o bobina que está construida por un cable en forma de cuadro con dimensiones de 25 x 25 m (área de la bobina 625 m²), con el arreglo denominado "Loop coincidente" (Figura 5), es decir donde únicamente se utiliza una bobina, la cual actúa en ciertos instantes de tiempo como transmisora de la señal y en otros es receptora, con una resistencia de 2.6 ohms en el circuito.

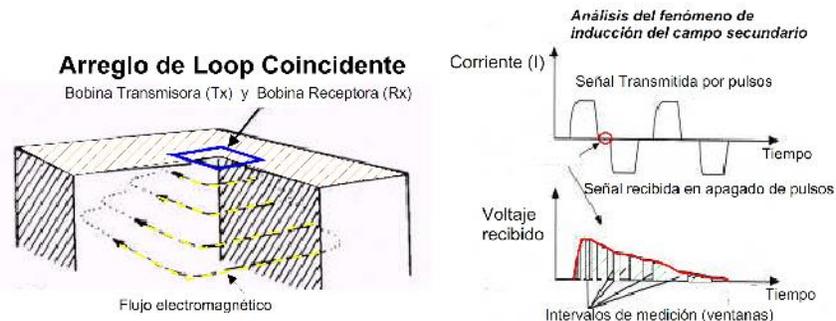


Figura 5. Arreglo utilizado

La resistividad real o verdadera definida, con la técnica de interpretación para los sondeos por transitorio electromagnético, puede diferir del valor que se obtiene con las otras técnicas existentes para su determinación. Esto se debe a múltiples factores que van desde el tipo de señal producida y forma de registro, hasta las suposiciones y simplificaciones empleadas en la formulación físico-matemática que define a la resistividad real.

Hidráulica de pozos y piezómetros

Se realizaron 4 pruebas de bombeo, y 9 pruebas de permeabilidad, 8 de ellas utilizando el método de Hvorslev y una de ellas utilizando el método de Lefranc de Carga variable. Las pruebas de bombeo se realizaron en el pozo de abastecimiento de la granja y en los pozos de monitoreo, mientras que las pruebas de permeabilidad se realizaron por unidades al ir avanzando en la perforación de los sondeos exploratorios. Los resultados fueron procesados usando el programa AquiferTEST de Waterloo Hydrogeologic y la prueba de permeabilidad Lefranc de carga constante, usando una hoja de cálculo diseñada para tal uso como parte de este trabajo.

Muestreo de agua subterránea

Se colectaron siete muestras de agua para análisis físico-químicos determinando en particular el contenido de Sodio, Potasio, Magnesio, Calcio, Bicarbonato, Sulfato, Cloruros, Nitratos, Fosfatos y Sólidos Totales Disueltos; también se realizaron análisis bacteriológicos. De igual forma se midió el pH y la C.E. Los análisis fueron realizados de acuerdo a los procedimientos que establece la norma oficial, y los contenidos referidos a la NOM. SSA. 127 1996.

En campo se registró la temperatura el pH y la conductividad eléctrica). Las muestras colectadas proceden de los cuatro pozos de monitoreo de la laguna, del pozo que abastece a la granja, de la laguna directamente y del pozo más cercano a la granja aguas abajo.

Para la obtención de muestras se usaron recipientes de polietileno de 1 litro, previamente lavadas y enjuagadas 5 veces con agua de la fuente previamente a la toma de la muestra, estas muestras por ser únicamente para analizar aniones, cationes y nutrientes, no se les agregó ningún conservador y fueron colocadas en hielo hasta ser entregadas para su análisis en el laboratorio. Para el análisis bacteriológico, las muestras se tomaron en bolsas esterilizadas especiales y colocadas en hielo y entregadas al laboratorio el mismo día que fueron tomadas.

Los métodos de ensayo de los análisis químicos se listan en la Tabla 1.

Tabla 1. Métodos de Ensayo de Análisis Físico-químicos

Ensayos realizados	Método de ensayo	Unidades
Cationes		
Calcio	NMX-AA-072-SCFI-2001	mg/l Ca ⁺⁺
Magnesio	NMX-AA-072-SCFI-2001	mg/l Mg ⁺⁺
Sodio	NMX-AA-051-SCFI-2001	mg/l Na ⁺
Aniones		
Bicarbonatos	NMX-AA-036-SCFI-2001	mg/l HCO ₃ ⁻
Sulfatos	NMX-AA-084-1982	mg/l SO ₄ ⁼
Cloruros	NMX-AA-073-SCFI-2001	mg/l Cl ⁻
Sílice	NMX-AA-075-1982	mg/l SiO ₂
Sólidos Totales Disueltos (Calculados)	NMX-AA-034-SCFI-2001	mg/l S.T.D.
Bióxido de Carbono	NMX-AA-036-SCFI-2001	mg/l CO ₂
pH	NMX-AA-008-1980	unidades pH
Conductividad Eléctrica	NMX-AA-093-SCFI-2001	micromhos/cm
Nitratos	NMX-AA-079-SCFI-2001	mg/l N
Fosfatos Totales	NMX-AA-029-SCFI-2001	mg/l PO ₄
Coliformes Totales	Filtro de Membrana	UFC/100 ml
Coliformes Fecales	Filtro de Membrana	UFC/100 ml

El laboratorio Junhanns Aquaquímica S.A. de C.V. de la Ciudad de Puebla en donde se realizaron los análisis siguió los procedimientos de aseguramiento y control de calidad de resultados analíticos que se especifican en la norma mexicana NMX-AA-115-SCFI-2001 Análisis de agua – criterios generales para el control de la calidad de los resultados analíticos.

Perforación de 3 sondeos exploratorios.

Con objeto de conocer con detalle la litoestratigrafía de los materiales en el subsuelo en el área de la laguna de tratamiento, se perforaron 3 sondeos exploratorios. En ellos se obtuvieron muestras mediante muestreador tipo cuchara partida a cada metro hasta una profundidad de 15 m. asimismo, se realizaron pruebas de permeabilidad *in situ*.

Para los trabajos de exploración, muestreo y pruebas de permeabilidad, se utilizó un equipo de perforación Longyear 34, utilizando para obtener las muestras el método de penetración estándar, mediante el cual fueron recuperadas muestras continuas con una cuchara partida de 60 cm de largo por 5 cm de diámetro. El rimado de la perforación se realizó mediante el método de circulación directa usando una barrena tricónica y como fluido de perforación, agua limpia. Para estabilizar las paredes del sondeo, y poder efectuar las pruebas de conductividad hidráulica, se utilizó ademe metálico de 3.5 pulgadas de diámetro.

A cada muestra, se le practicaron ensayos de laboratorio, para obtener el contenido natural de agua. A muestras seleccionadas, se les practicaron análisis granulométricos, y de densidad de sólidos.

En cada Sondeo se obtuvo un registro de penetración, en el que se indica la distribución de número de golpes del penetrómetro estándar para avanzar 30 cm, que da una idea de la compacidad natural de los materiales, en dicho registro se indica también la distribución del contenido de agua natural en las muestras. Adicionalmente, se indica la descripción litológica y la interpretación geológica de cada sondeo.

Modelos numéricos

Se realizaron modelos matemáticos de simulación de flujo y transporte de contaminantes en la zona no saturada utilizando el programa Visual HELP del Unsat Suite Plus® y en la zona saturada utilizando el paquete Visual MODFLOW Pro, utilizando en particular los módulos de MODFLOW, MODPATH y MT3D.

Procesamiento e interpretación de la información.

Este procesamiento se realizó utilizando los paquetes: AUTOCAD® para la elaboración de la mayor parte de las figuras y digitalización de mapas base georeferidos., Corel Draw®, para hacer figuras combinando imágenes ráster con datos vectoriales. Surfer®, se utilizó para hacer interpolaciones y mapas de isovalores. Rockworks®, para elaborar los registros de los sondeos y los modelos tridimensionales del acuífero. AquiferTEST®, para interpretar las pruebas de bombeo y de permeabilidad. AquaCHEM® para procesar los datos físico-químicos y generar diagramas triangulares y de Piper., Envirobrowser®, se utilizó para buscar valores de coeficiente de dispersión de materiales similares a los del sitio para usarse en el modelo de transporte Unsat Suite Plus®, para simular la zona no saturada usando el HELP para calcular la infiltración de la laguna hacia el nivel freático y Visual MODFLOW Pro, para simular flujo y transporte de aguas subterráneas en tres dimensiones mediante los códigos MODFLOW (flujo), MT3D99 (Transporte) y MODPATH (Trayectoria de partículas)

Estudio Geotécnico

En esta parte se incluye el proyecto de solución y simulación de prueba del diseño de la nueva laguna.

Con base en los resultados de la segunda parte de esta tesis, se realizó un estudio de geotécnico de bancos de materiales en la región para identificar el material adecuado para su uso en el revestimiento de la laguna, a dicho material, se le realizaron ensayos de laboratorio de mecánica de suelos entre los que se incluyen: contenido natural de agua, densidad de sólidos, pruebas de laboratorio y se corrió de nuevo la simulación de prueba en Visual HELP para verificar el diseño de la plantilla impermeable. Posteriormente, el revestimiento fue aplicado a la laguna en cuestión. En la que se cuenta con pozos de monitoreo que seguirán siendo analizados en el futuro.

III RESULTADOS

III.1 Geología

III.1.1 Margo Geológico Regional

Las rocas más antiguas que afloran en esta región, pertenecen al Cretácico Inferior y están representadas por una secuencia de calizas mudstone correlacionables con la Formación Tamaulipas Superior (Kts) (CRM, 1998), las cuales subyacen de manera concordante un paquete calcáreo arcilloso del Cretácico Superior representado por las formaciones Agua Nueva (Kan) y Méndez (Km); estas rocas afloran en la porción noroeste y occidental de la región estudiada reconocidas mediante fotointerpretación y verificación de campo durante el presente estudio. Están cubiertas discordantemente por rocas volcánicas del Terciario y Cuaternario, representadas por la Formación Teziutlán (Tpan), sobre las que descansan ignimbritas, basaltos escoriáceos, tobas y pumicitas. Las rocas mesozoicas están intrusionadas por un tronco granítico, al cual se le atribuye la mineralización de oro-cobre, plata, plomo, zinc y evidencias de manganeso, que se encuentra en estructuras vetiformes, como diseminada en los cuerpos intrusivos. Que de acuerdo a la información recabada del Consejo de Recursos Minerales (CRM, 2000), Estas minas que están localizadas en el área de Atexcac no se explotan actualmente.

III.1.2 Estratigrafía

La estratigrafía, está basada en las unidades descritas en el mapa del Consejo de Recursos Minerales (2000), la carta 1:250,000 del INEGI (1983) y un trabajo del Instituto de Ingeniería (1991), cuyo mapa se basa en un levantamiento de la CFE de 1991.

Desde lo más antiguo a lo más reciente, la estratigrafía del área cartografiada en la Figura 3, y en particular del sitio estudiado es la siguiente.

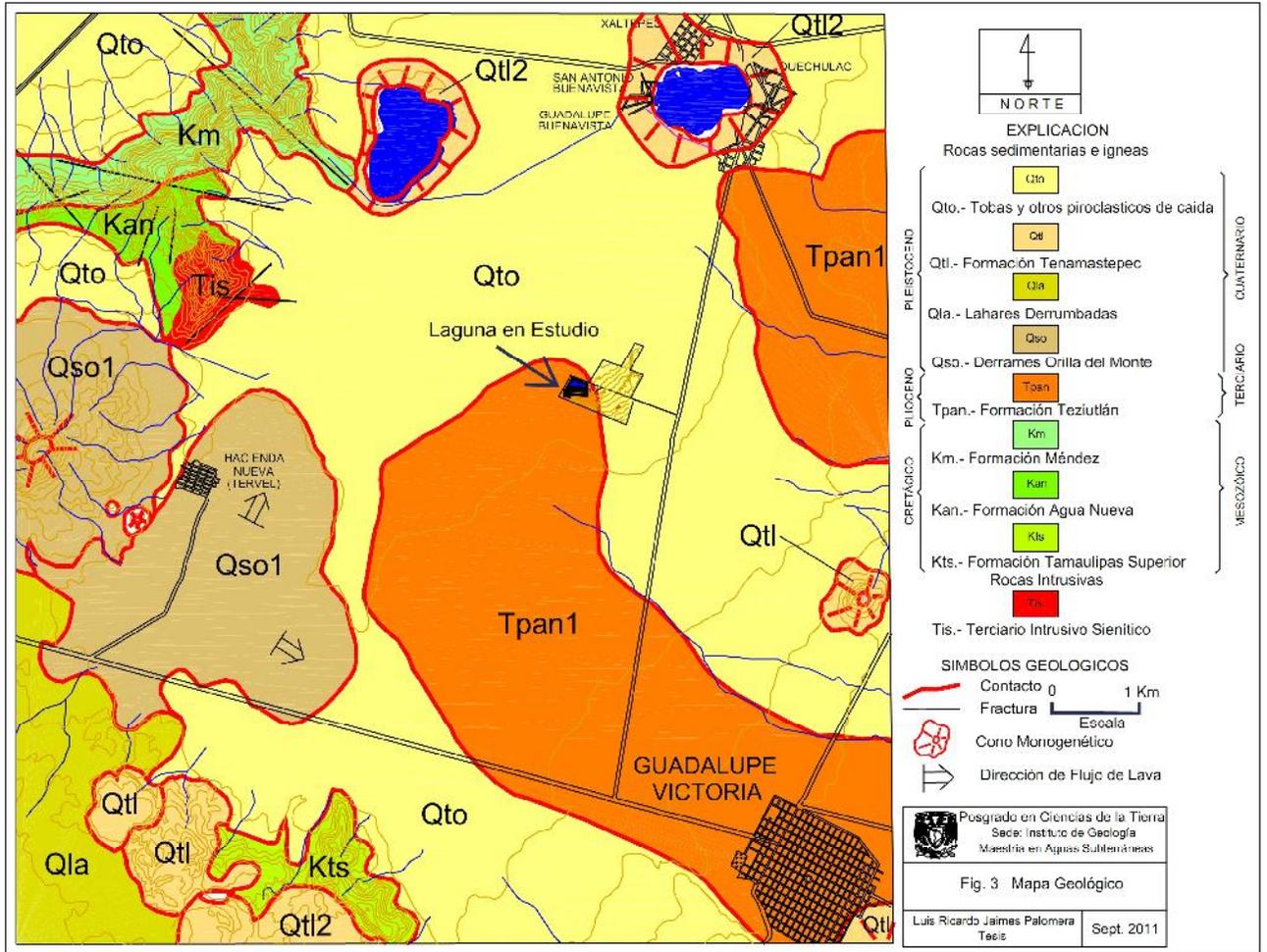


Figura 3. Mapa Geológico

Formación Tamaulipas Superior (Kts)

Está formada por calizas, color gris claro a crema y gris oscuro, con nódulos de pedernal e intercalaciones laminares de lutitas y margas, en estratos delgados a laminares, se encuentra fracturada, aunque muchas de las fracturas han sido rellenas por calcita. Se encuentra plegada aunque solo se observa uno de los flancos de un pliegue en el afloramiento.

A esta unidad, se le han reportado 150 m de espesor en los afloramientos del flanco noreste de las Derrumbadas, está subyacente por la formación Tamaulipas Inferior que no aflora en el área de estudio) y cubierta a su vez por la Formación Agua Nueva.

Formación Agua Nueva (Kan)

Definida por Stephenson y Muir en 1921 y 1934 respectivamente (Muir, 1936), como una serie de estratos de caliza gris oscuro a gris cremoso, ligeramente arcillosas en la base de la unidad, con bandas y lentes de pedernal negro y gris humo. Se encuentra en pliegues concordantes con la Formación Tamaulipas Superior. Aflora en la porción noroeste del área de estudio. Se le ha asignado un espesor de 250 m. Cubre concordantemente a la Formación Tamaulipas Superior, se correlaciona con las formaciones Maltrata y Guzmantla.

Formación Méndez (Km)

Definida por Jeffreys en 1910 (Muir, 1936), como un cuerpo de margas y lutitas gris verdoso en la base y café rojizo en la parte superior. Aflora en la sierra ubicada al noroeste en el mapa geológico. Se le ha definido un espesor de 200 m. Cubre concordantemente a la Formación Tamaulipas Superior y se correlaciona con la Formación Mezcala de la zona de Guerrero-Morelos.

Formación Teziutlán (Tpan)

Está formada por andesitas, andesitas basálticas, basaltos y dacitas, también tiene productos piroclásticos, los volcanes que forman esta unidad son parte de la cadena montañosa Pico de Orizaba y Cofre de Perote. Aunque predominan las secuencias de piroclásticos que inician con brechas volcánicas y terminan con tobas vítreas, que se repiten en función de episodios volcánicos que han ocurrido en cada volcán, en las partes altas cerca de los centros de emisión de los estratovolcanes que la conforman, se presentan lavas andesíticas y dacíticas, en algunos casos domos y conos cineríticos. En la zona de la granja, se presentan secuencias de piroclásticos de caída.

En las rocas de esta unidad se encuentra el área objeto del presente estudio, específicamente en los materiales de las secuencias superiores, conformados por cenizas con fragmentos de obsidiana, intercalados con cenizas tipo oleada de piroclásticos y toba semiconsolidada que deben pertenecer a las erupciones explosivas de los xalapascos o maares como el de Alchichica, Quechulac y Preciosa.

En la Figura 4A, se muestra la estratigrafía detallada de los primeros 2.3 metros de profundidad, observados en los cortes realizados en un banco de préstamo al interior de las instalaciones de la granja.

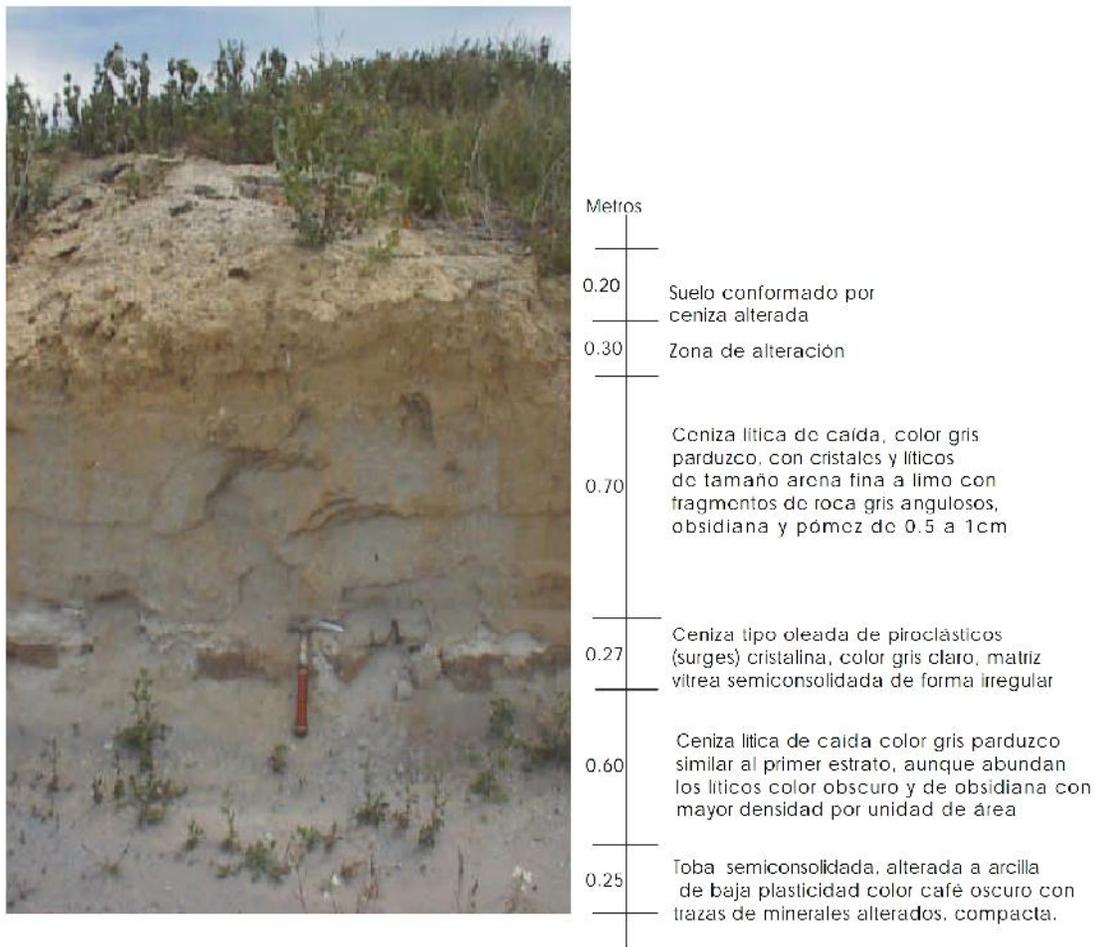


Figura 4A. Columna Estratigráfica del sitio hasta los 2.32 m de profundidad

Derrames Orilla del Monte (Qso)

En el área de estudio, se presentan en la parte occidental, representados por un volcán con cráteres adventicios y una colada de lava. Son derrames andesíticos y basálticos, con una edad de 2.1 ± 0.2 Ma (Plioceno Superior-Pleistoceno Inferior), determinada por métodos radiométricos (CRM, 1998).

Lahares Derrumbadas (Qla)

Son los flujos de piroclásticos y lahares de composición andesítica y cubren un área aproximada de 20 km^2 que forman las laderas de los volcanes Las Derrumbadas, se les ha asignado un espesor de 150 m.

Formación Tenamastepec (QtI)

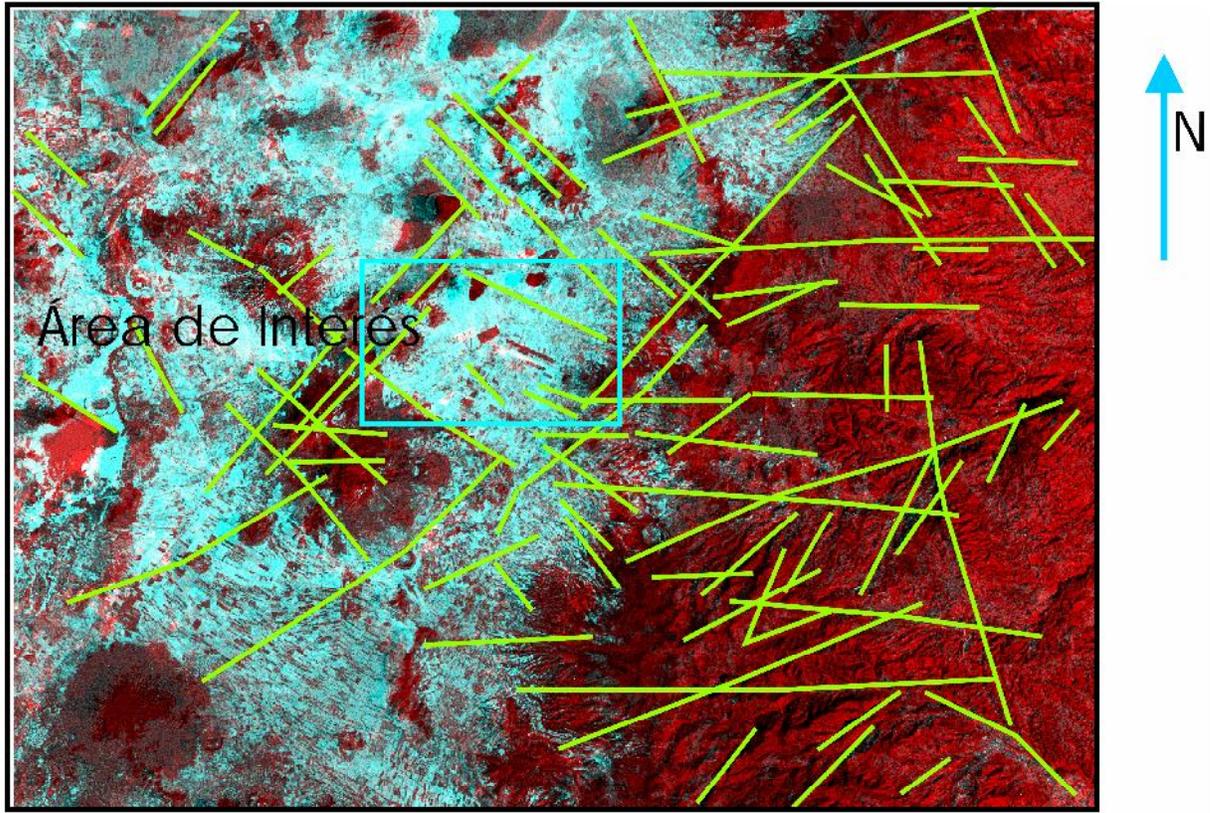
Esta unidad la forman todos los volcanes monogenéticos recientes del área de estudio, en ellos se incluyen los xalapascos y sus productos que están formados por cenizas volcánicas y lavas basálticas, es de resaltarse la presencia de hawaiitas en los derrames al suroeste del área. *Tobas y otros piroclásticos de caída (Qto)*.

Los depósitos de caída libre que se encuentran cubriendo los valles, se han agrupado en esta unidad; las dos primeras capas superiores de cenizas de caída volcánicas en el área de la Granja, probablemente pertenecen a esta unidad

III.1.3 Geología Estructural y del subsuelo

En la imagen de satélite de la Figura No. 4B, se observan los principales lineamientos tectónicos de la región, se puede observar que las direcciones dominantes en la región son la E-W y el arreglo conjugado SW-NE y SE-NW. Del análisis de estos lineamientos se concluye que ninguna estructura importante atraviesa la zona de la granja como para influir el comportamiento del agua subterránea a la escala a la que estamos trabajando, sin embargo, se puede ver que este arreglo estructural influyó en la distribución de las estructuras volcánicas de la región y muy probablemente también en el flujo regional de aguas subterráneas.

Las estructuras sedimentarias que forman pliegues orientados SW-NE, tampoco parecen influir a los niveles que se explota el acuífero en el valle, porque se interpretan como altos estructurales y de acuerdo con un informe del Instituto de Ingeniería (1991), se menciona que algunos cortes litológicos de pozos ubicados al sur de la laguna de Quechulac, indican la presencia de materiales permeables hasta los 148 m de profundidad, Materiales que están compuestos en su mayoría por aglomerados, escorias, gravas, arenas y basaltos alterados, mientras que en la zona de Atexcac, al noroeste, el acuífero está cubierto por basalto sano.



 Lineamiento

Figura 4B. Lineamientos regionales

III.2 Geofísica

Para conocer las características litológicas hasta la profundidad de 80 m, se realizaron 41 Sondeos (TEM); el levantamiento de estas líneas se realizó de acuerdo a los espacios libres que se tienen en el Sitio, de este modo se logró una buena distribución en el área de Estudio, como se muestra en la Figura 6.

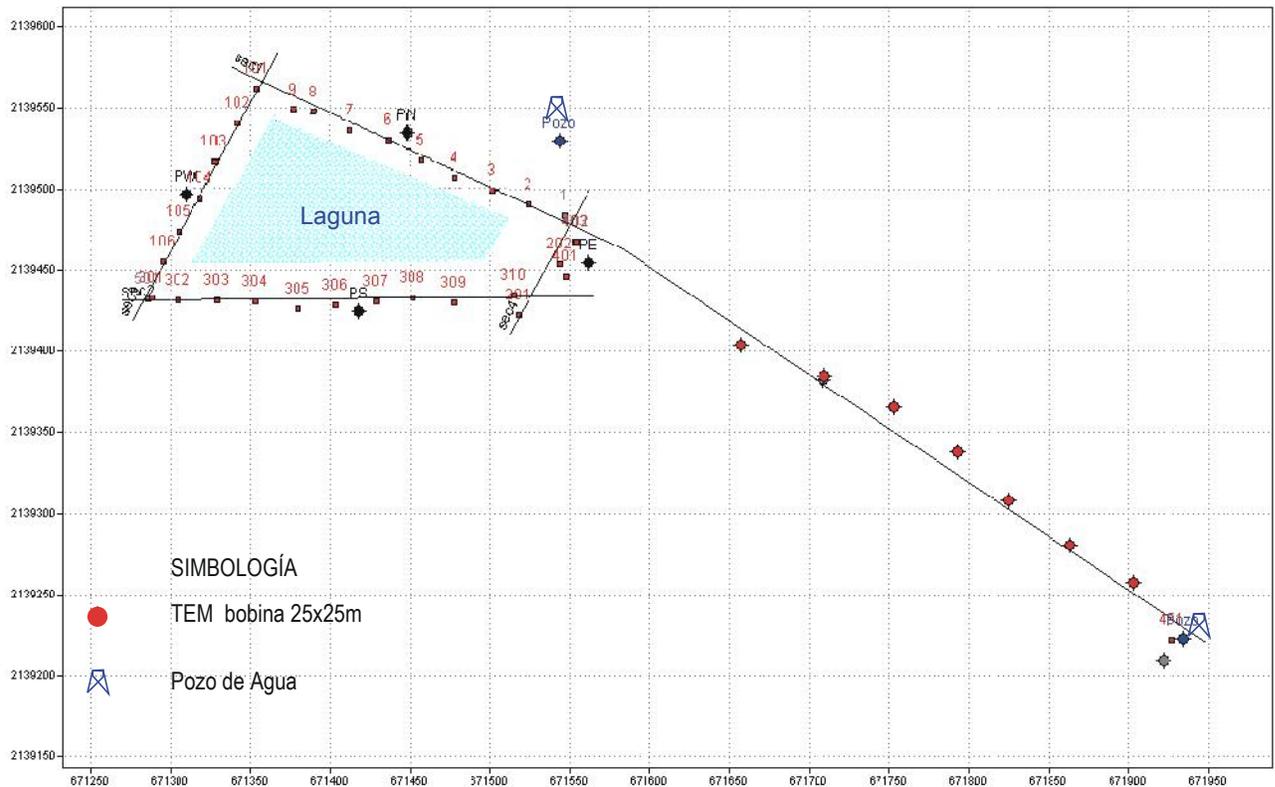


Figura 6. Localización de los sitios de TEM

La Técnica del Transitorio Electromagnético en el Dominio del Tiempo (TEM), es una de las técnicas geofísicas más modernas para la exploración del AGUA SUBTERRANEA, porque ayuda a conocer de manera indirecta algunas características fisicoquímicas del agua.

Con el método electromagnético (TEM) se pretende mostrar una distribución del subsuelo en términos de homogeneidad basados en la caracterización resistiva.

Debido a la gran resolución vertical que se obtiene con esta técnica, es posible obtener una imagen lo más real posible de las condiciones del subsuelo. En las secciones del subsuelo es posible observar las heterogeneidades (zonas anómalas) debidas a estructuras geológicas, cambios de facies y fracturamiento de la roca, donde además la presencia del agua influye en el valor medido, provocando cambios importantes en la resistividad que es el parámetro experimental de campo que se mide.

El procesado de los datos de resistividad eléctrica obtenidos en los sondeos (TEM), consiste en obtener los modelos suavizados mediante una regresión tipo Occam, en la que se propone una resistividad inicial y una final, basada en los datos de campo.

El algoritmo requiere de un número de capas inicial, un valor de ajuste al que se quiere llegar y un número máximo de iteraciones, estos tres últimos parámetros no intervienen en la obtención del modelo suavizado, por lo que este sólo depende de los valores de resistividad de campo. Para esto utiliza una regresión Ridge, para encontrar un modelo que cumpla con el error marcado en el ajuste o con el mínimo error posible.

Modelo Unidimensional: los datos también fueron procesados por el modelado de capas o unidimensional se hizo siguiendo el método clásico de prueba y error, en el que se propone un cierto número de capas, dependiendo de las inflexiones de la curva de campo, las pendientes de la curva y los tiempos a los que ocurren las inflexiones. Se aprovechó la facilidad del paquete TEMIXS que permite la interacción con la computadora en un proceso conocido como interpretación interactiva.

Las secciones de resistividad, que se obtuvieron de los modelos suavizados, son de gran utilidad pues integran las variaciones de la resistividad en el plano vertical y permite observar las diferentes características de los materiales.

Con los sondeos por transitorio electromagnético se formaron 4 perfiles (Figuras 7, 8 y 9) en ellos se observan dos unidades geoeléctricas -con algunas subdivisiones- que se agrupan en la Tabla 1 y se analizan más adelante. Dicha tabla presenta la unidad geo-resistiva, su rango de valores y los materiales con los que se asocia a la unidad geo-eléctrica.

Tabla 2. Unidades Geoeléctricas

UNIDAD GEOELECTRICA	INTERVALO RESISTIVO [ohm-m]	POSIBLE CORRELACION
U1aa	Menor de 4	Se asocia con material arcillo arenoso. Zona Anómala (Zona conductora, asociada a contaminación del agua).
U2c	3 a 10	Materiales arcillo-arenosos.
U1a	4 a 50	Capa de cobertura, constituida principalmente por limos y arenas.
U2a	20 a 35	Materiales arenosos (Acuífero libre).
U2b	35 a 115	Material arenoso y/o roca (Posiblemente saturados; menos permeable).
U1b	50 a 200	Capa de Cobertura; constituida principalmente por materiales gruesos.

La Unidad Geo-eléctrica U1 está subdividida en U1a y U1b. Agrupa principalmente al paquete de cobertura, presenta una variación resistiva producto del cambio en las litologías de estos materiales.

La Subunidad U1a, presenta resistividades de 4 a 50 ohm-m, y agrupa materiales más finos en los que predominan los limo-arenosos.

La Subunidad U1b, tiene un intervalo resistivo de 50 a 200 ohm-m, y se correlaciona con el paquete materiales gruesos, que incluye tobas.

La Unidad Geo-eléctrica 2 está subdividida en U2a y U2b. La subunidad U2a agrupa a las resistividades entre 20 y 35 ohm-m que se relacionan con materiales arenosos, y es en esta unidad en la cual se aloja el acuífero o zona saturada. Por su parte la subunidad U2b con resistividades que varían de 35 a 115 ohm-m agrupa a materiales arenosos y/o roca, posiblemente con menor capacidad para almacenar agua.

La Unidad U2c, con valores de 3 a 10 ohm-m se considera poco permeable, asociándose con materiales arcillo-arenosos y únicamente se identificó en la porción oriente, cerca del Pozo de Agua de la Granja.

La Unidad U1aa, denominada (zona anómala) registra resistividades menores de 4 ohm-m. De acuerdo con su distribución espacial, únicamente se identifica en la zona de la laguna, a profundidades variables de entre 1 y 15 m, con un espesor promedio de 20 m. De acuerdo con este comportamiento nos permite hacer inferencias de una posible contaminación por agua de mayor salinidad que se infiltra de la Laguna, hacia el subsuelo, llegando al agua subterránea, y modificando de manera importante la conductividad eléctrica, ya que de acuerdo con mediciones realizadas para el agua natural, es del orden de los 576 microS-cm, y el agua muestreada de los piezómetros es del orden de los 1300 microS-cm, la cual muestra un incremento mayor de 2 veces, y que a su vez puede sustentar esta suposición respecto a esta ZONA ANÓMALA, de corresponder con una zona contaminada por los residuos orgánicos.

Otro sustento más, es un estudio geofísico realizado utilizando la técnica del Sondeo Eléctrico Vertical (SEV) (Georegistros SA, 2001), realizado con anterioridad a la construcción de la laguna. Este estudio presenta tres sitios de medición, y los resultados generales de los modelos del subsuelo son los siguientes.

Profundidad	Resistividad	Correlación	Resistividad Actual
De 0 a 3m	2 ohm-m	Suelo	similar
De 3 a 12m	5 ohm-m	Material arcillo-arenoso	similar
De 12 a 20m	12 ohm-m	Material areno-arcilloso	similar
De 20 a 40m	20 ohm-m	Toba (alta permeabilidad)	diferente (Zona Anómala)
De 40 a 45m	30 ohm-m	Toba (Alta permeabilidad)	similar

De acuerdo con esta comparación, observamos que actualmente las zonas de mayor permeabilidad representadas por las tobas arenosas, son las que

manifiestan un cambio en la resistividad eléctrica, posiblemente asociadas por el cambio en la conductividad eléctrica, producto de la infiltración de agua residual.

III.2.1 Perfiles de Resistividad

Se construyeron cuatro perfiles de resistividad, para ilustrar el comportamiento de los materiales del subsuelo, y poder observar la distribución en sección. Estos perfiles rodean a la Laguna y se presentan en las Figuras 7, 8 y 9.

En ellos se observa que en la zona de la laguna siempre se presenta una zona de baja resistividad que no tiene continuidad hacia la zona en donde se encuentra el pozo de agua potable, al parecer por la influencia del agua infiltrada de la laguna.

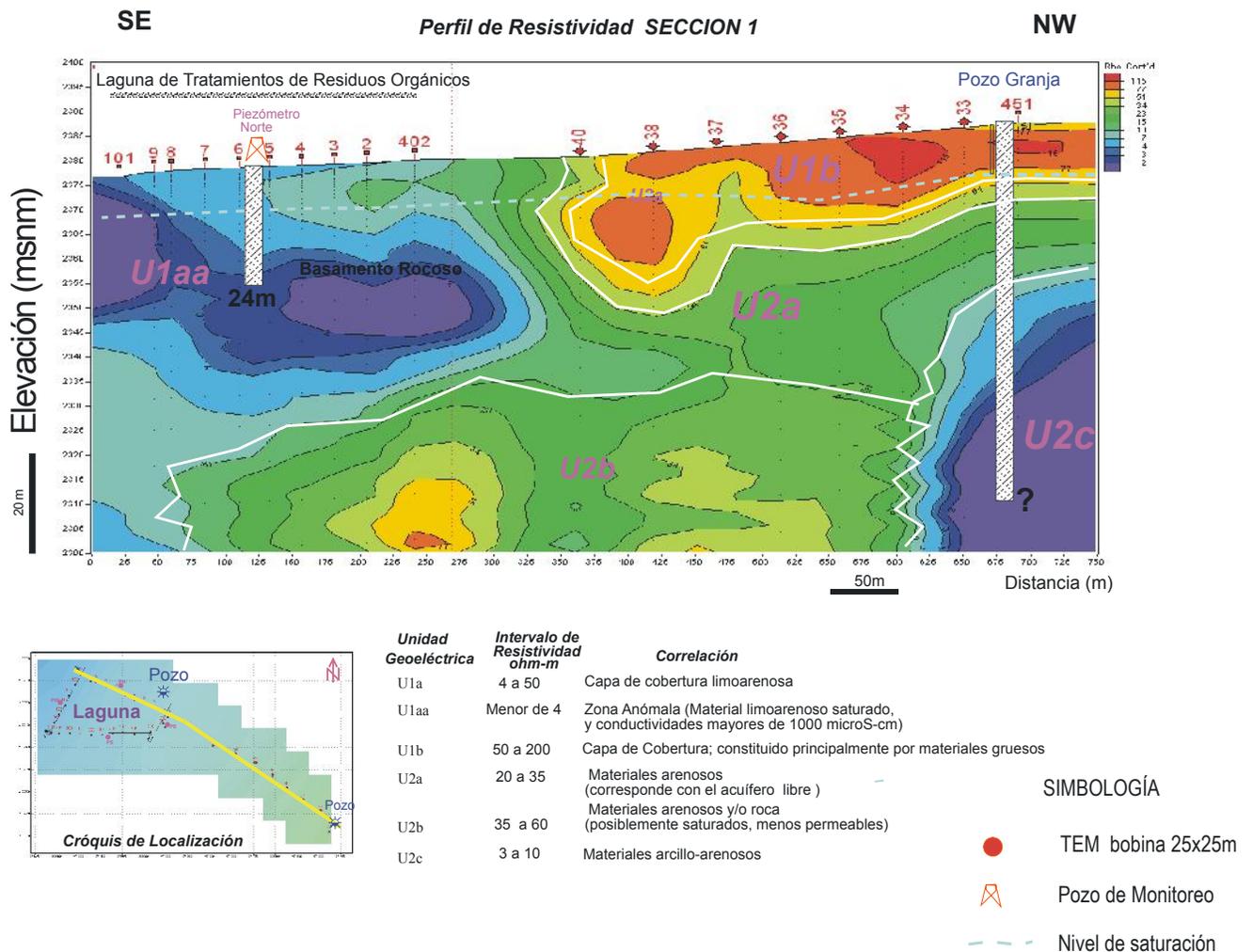


Figura 7. Perfil geoelectrico Sección No. 1

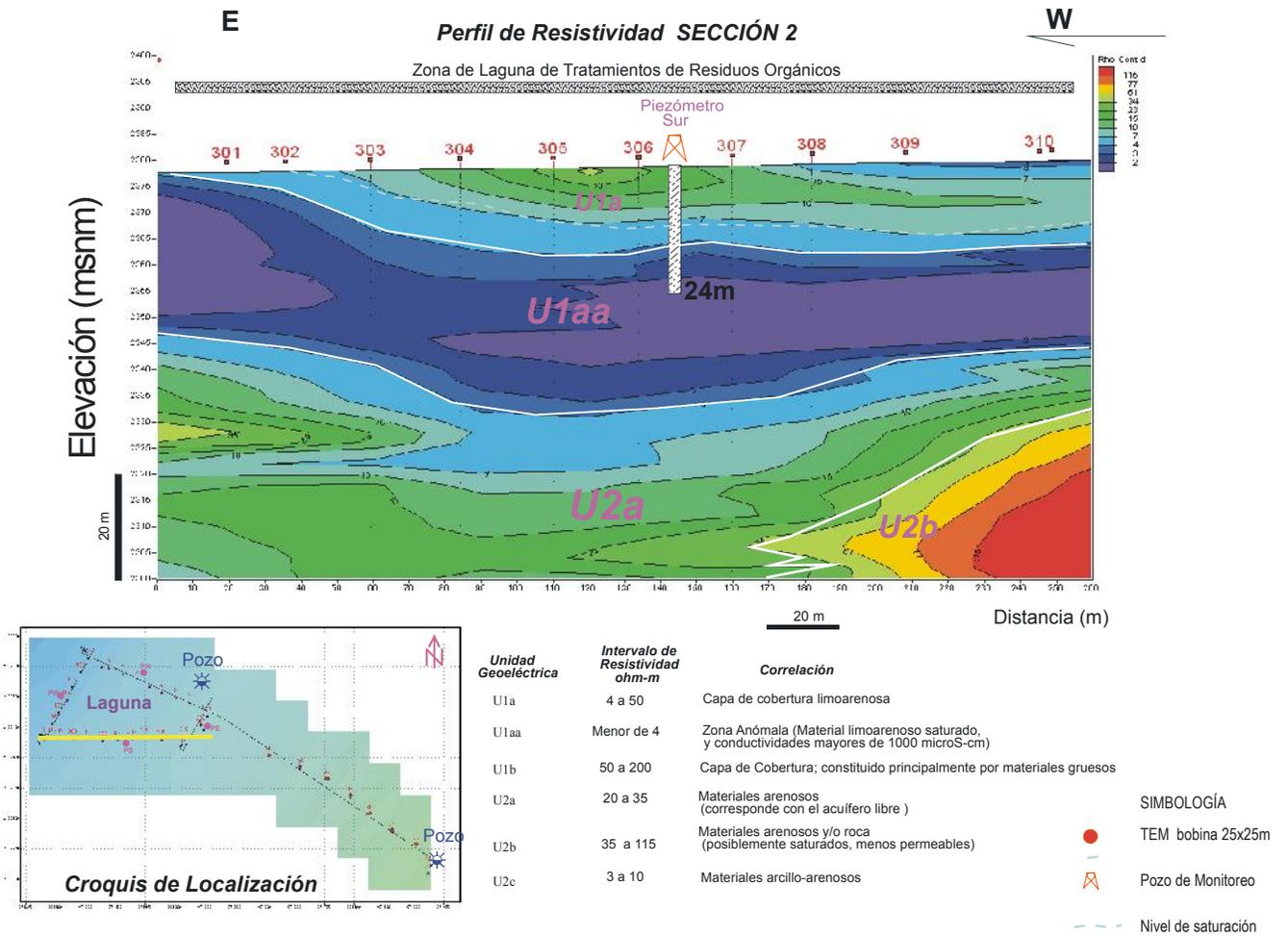


Figura 8. Perfil geoelectrico Sección No. 2

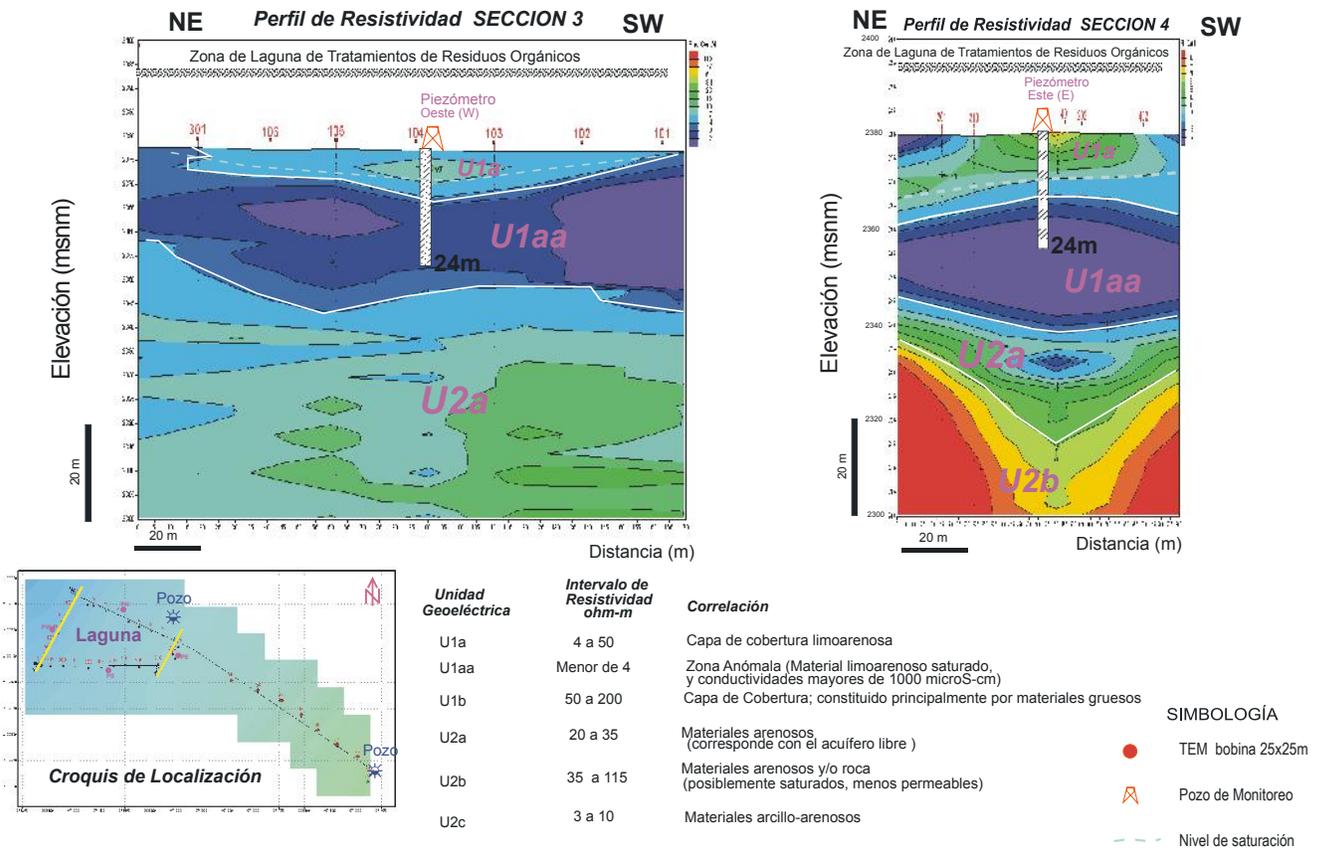


Figura 9. Perfil geoelectrico Secciones No. 3 y 4

III.2.2 Mapas de Resistividad

Para ilustrar el comportamiento integral de todos los sitios de TEM a diferentes cortes horizontales, se elaboraron 4 Mapas de Resistividad, para las Profundidades 5, 10, 15 y 20 m bajo el nivel medio del terreno, que corresponden con las Figuras 10, 11, 12 y 13 respectivamente.

En ellos se observa que las más bajas resistividades ocurren en la zona noroeste en la dirección del flujo de aguas subterráneas. A mayor profundidad mayor es el área cubierta por zonas de baja resistividad.

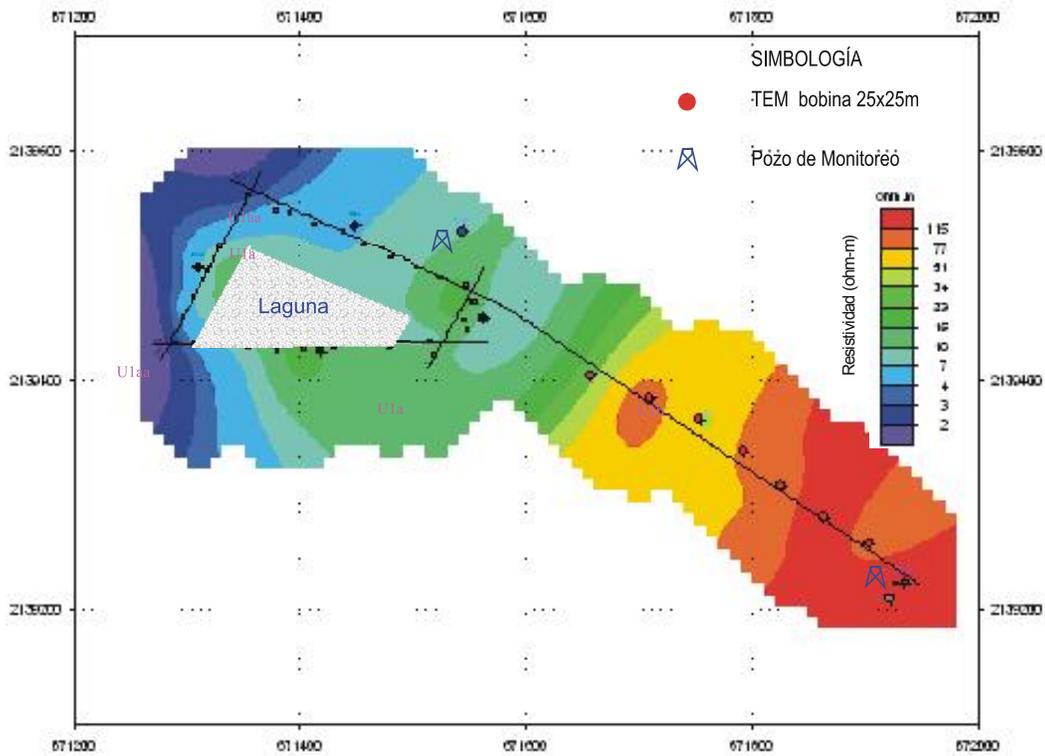


Figura 10. Mapa de resistividad para la profundidad de 5 m

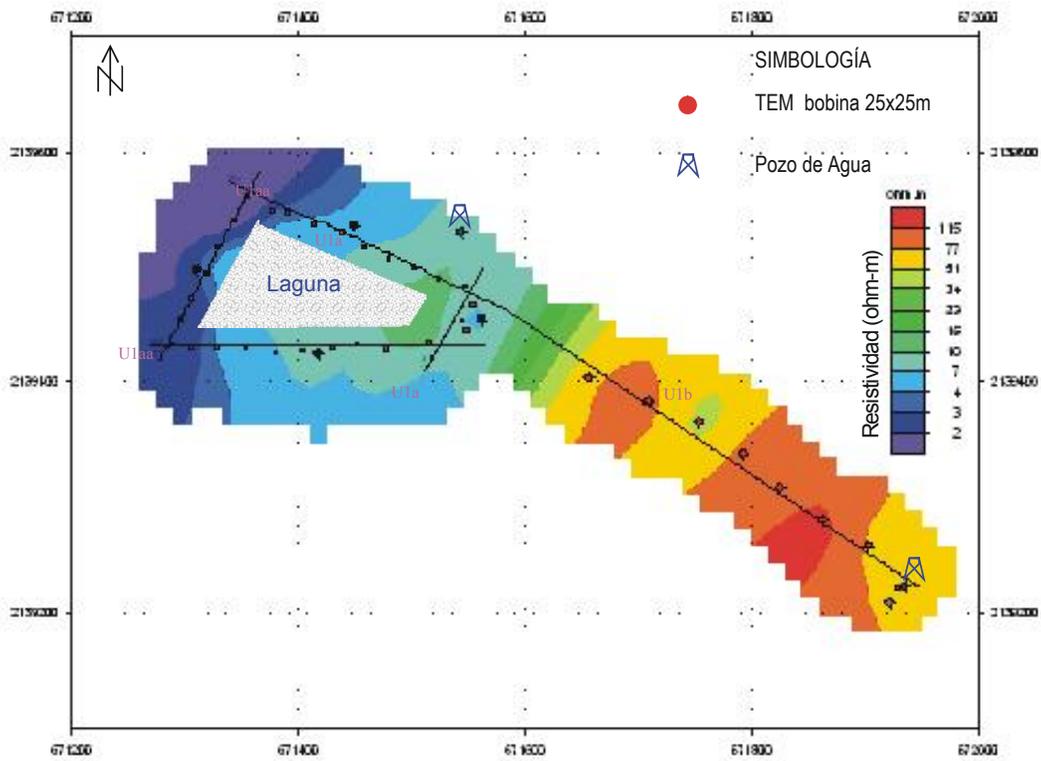


Figura 11. Mapa de resistividad para la profundidad de 10 m

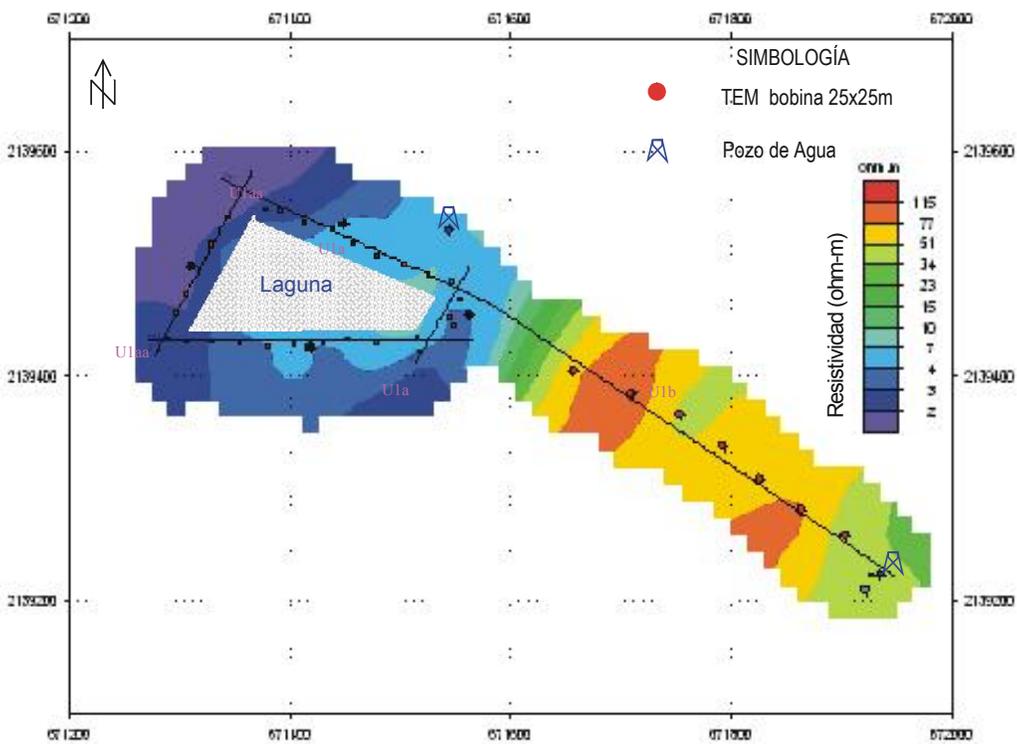


Figura 12. Mapa de resistividad para la profundidad de 15 m

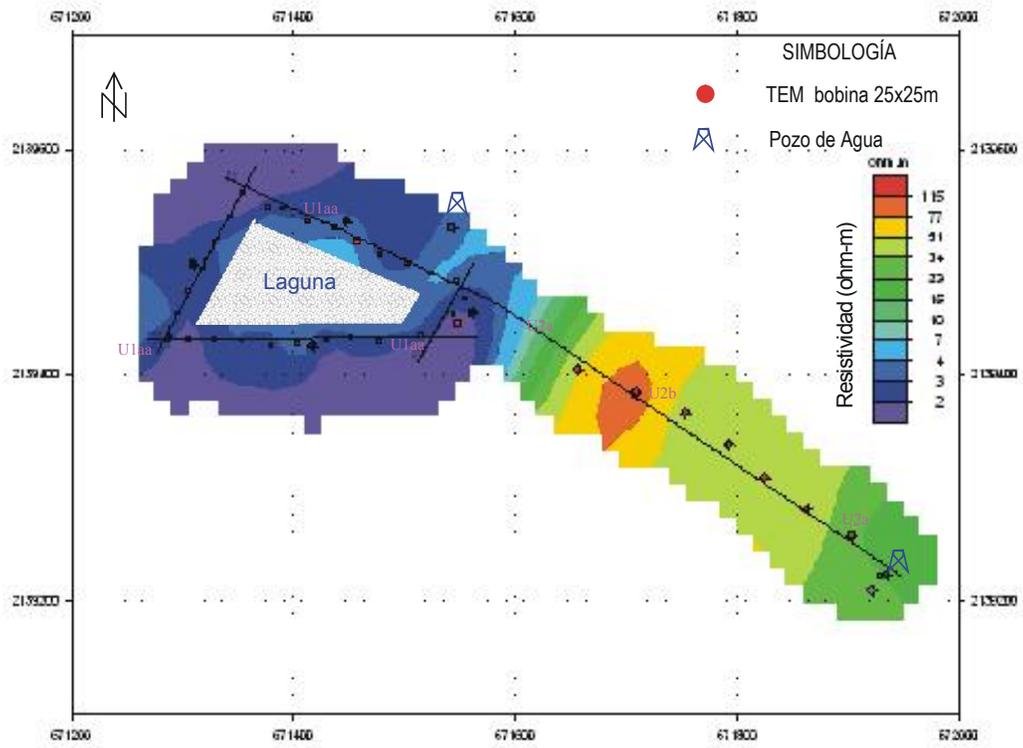


Figura 13. Mapa de resistividad para la profundidad de 20 m

II.3. Hidrogeología

II.3.1 Resultados de la perforación de sondeos exploratorios y análisis hidrogeológico de los pozos de monitoreo existentes.

Los sondeos se distribuyen como se muestra en la Figura No. 14.

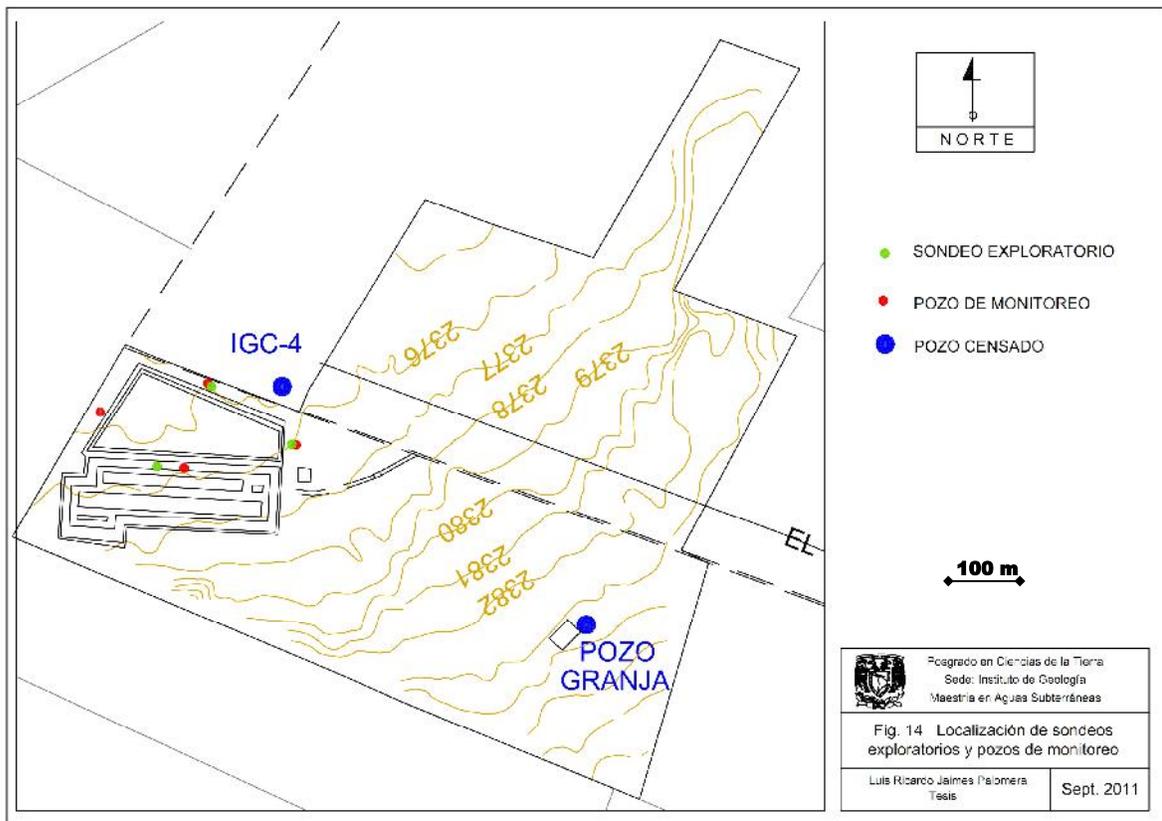


Figura 14 Localización de sondeos exploratorios y pozos de monitoreo

En las figuras 15, 16 y 17, se presentan los registros de los sondeos 1, 2 y 3 respectivamente. En la Figura 14, se indica la ubicación de los sondeos exploratorios y los pozos de monitoreo.

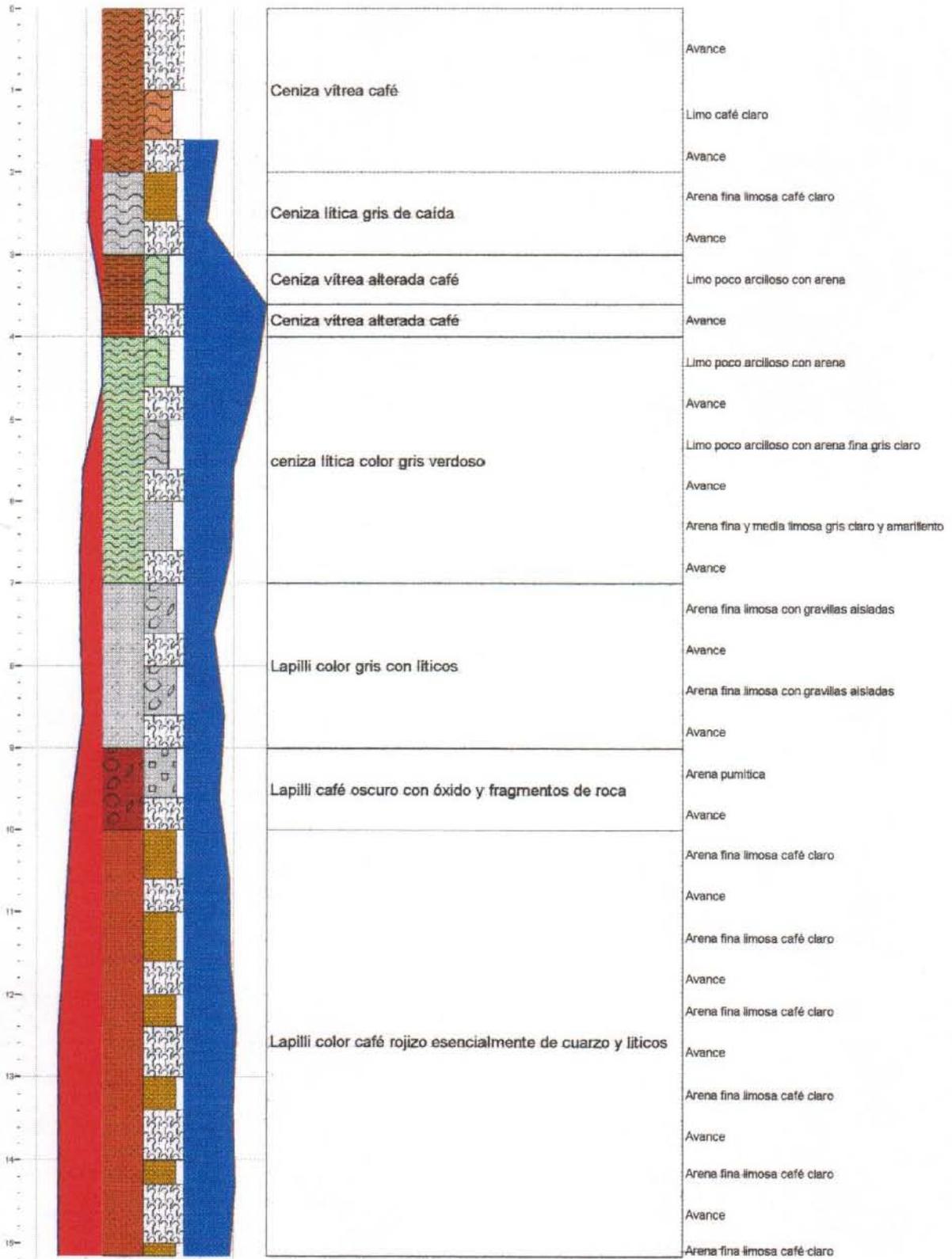


Figura 16. Registro geológico del sondeo exploratorio No.2

En cada sondeo se realizaron dos pruebas de permeabilidad, utilizando la técnica de Hvorslev, con la que es posible obtener la conductividad hidráulica in situ.

El área de La Granja, está provista de cuatro pozos de monitoreo que rodean la laguna de tratamiento, cada uno de ellos cuenta con tres piezómetros a tres diferentes profundidades, dentro de la misma perforación que son: 12 m, 18 m y 24 m. En los pozos de monitoreo sur, este y oeste, se cuenta con una bomba sumergible, para realizar muestreo químico periódicamente. No se tiene un registro de los niveles de agua de dichos pozos, pues no se realizaban estas mediciones y los pozos no estaban nivelados antes de este trabajo.

Para conocer las propiedades hidráulicas en la zona de la laguna, se realizaron pruebas de bombeo en los pozos sur, este y oeste, mientras que en el pozo norte se realizó una prueba de permeabilidad.

En estos pozos también se obtuvieron muestras para realizar análisis físico-químicos. Los resultados de los análisis físico-químicos, se presentan en la Tabla 3.

III.3.2 Unidades Hidrogeológicas

En los sondeos perforados se encontraron 10 capas de materiales piroclásticos identificados en menor número por sus propiedades geo-eléctricas en los sondeos TEM y que se agruparon en cinco unidades hidrogeológicas.

La unidad uno, comprende las primeras cuatro capas que consisten en cenizas vítreas de caída y cenizas líticas con bandas de lapilli y que corresponde con las tobas y otros productos piroclásticos de caída descritos en el capítulo de estratigrafía. Esta unidad tiene una conductividad hidráulica de 2.8×10^{-6} m/s.

La segunda unidad hidrogeológica está formada por una toba semiconsolidada alterada a arcilla de baja plasticidad con trazas de minerales alterados. Esta unidad tiene una conductividad hidráulica de 4.5×10^{-6} m/s.

La tercera unidad comprende dos capas de ceniza lítica y vítrea. Su conductividad hidráulica es de 1.4×10^{-5} m/s.

La cuarta unidad formada por cenizas vítreas tiene una conductividad hidráulica de 7.9×10^{-6} m/s.

La quinta unidad, comprende varias capas de lapilli que va incrementando su tamaño a profundidad. Esta unidad tiene una conductividad hidráulica de 1.6×10^{-4} m/s.

En la Figura 18, se presentan dos vistas tridimensionales de la distribución de las unidades hidrogeológicas debajo de la Laguna, la descripción de cada unidad se presenta en los sondeos, de las figuras 15, 16 y 17.

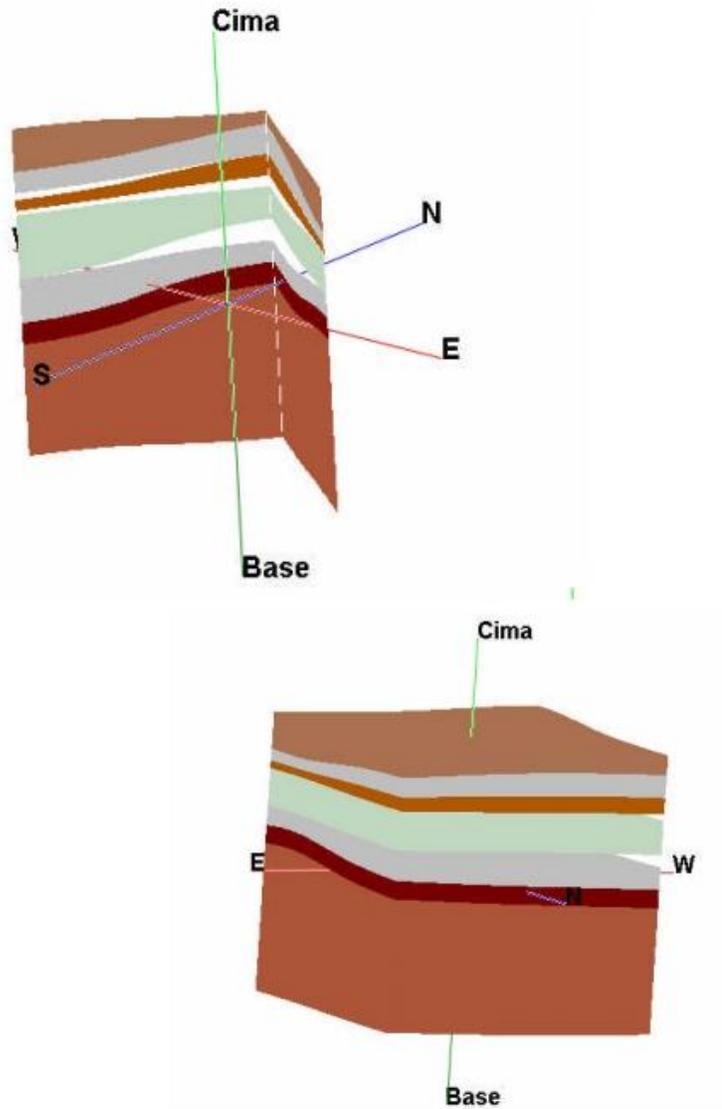


Figura 18. Vistas tridimensionales del acuífero en la zona de la laguna

III.3.3 Parámetros Hidráulicos

Para poder definir el comportamiento hidráulico del subsuelo donde se asienta la laguna de tratamiento, se realizaron 4 pruebas de bombeo, y 9 pruebas de permeabilidad, 8 de ellas utilizando el método de Hvorslev. Estos resultados, hacen posible individualizar las unidades hidrogeológicas, y permite alimentar y realizar el modelo de flujo y transporte advectivo, en la zona con datos precisos. En la Tabla 2, se presentan los resultados de las pruebas hidráulicas realizadas.

Tabla No.3 Resultados de las pruebas hidráulicas realizadas

Pozo No.	Tipo de Prueba	Método de Interpretación	K en m/s
Pozo Sur	Prueba de Bombeo	Neuman	3.98×10^{-4}
Pozo Sur	Prueba de Bombeo	Recuperación de Theis	4.18×10^{-4}
Pozo Este	Prueba de Bombeo	Neuman	6.27×10^{-4}
Pozo Este	Prueba de Bombeo	Recuperación de Theis	1.64×10^{-4}
Pozo Oeste	Prueba de Bombeo	Cooper-Jacob	1.28×10^{-4}
Pozo Oeste	Prueba de Bombeo	Recuperación de Theis	7.05×10^{-5}
Pozo Granja	Prueba de Bombeo	Neuman	7.90×10^{-6}
Pozo N 18 m	Prueba de Permeabilidad	Hvorslev	1.69×10^{-5}
Pozo N 12 m	Prueba de Permeabilidad	Hvorslev	1.16×10^{-5}
Sondeo 1 (0-2 m)	Prueba de Permeabilidad	Hvorslev	2.85×10^{-6}
Sondeo 1 (2-8 m)	Prueba de Permeabilidad	Hvorslev	1.40×10^{-5}
Sondeo 2 (0-2 m)	Prueba de Permeabilidad	Hvorslev	3.22×10^{-4}
Sondeo 2 (2-9 m)	Prueba de Permeabilidad	Hvorslev	1.05×10^{-5}
Sondeo 3 (0-2 m)	Prueba de Permeabilidad	Hvorslev	6.46×10^{-6}
Sondeo 3 (2-10 m)	Prueba de Permeabilidad	Le Franc	1.3×10^{-5}

Con la geología de detalle de subsuelo obtenida en este y trabajo los valores de parámetros hidráulicos (Tabla 2 y Figura 31), se definieron las 5 unidades hidrogeológicas locales arriba descritas, que influyen en el comportamiento hidrogeológico del subsuelo, a su vez éstas corresponden con las capas que se colocaron en el modelo de simulación.

II.3.4 Gradiente hidráulico

Las mediciones del nivel del agua se realizaron en los cuatro pozos de monitoreo que rodean la laguna de tratamiento, cada uno de ellos cuenta con tres piezómetros a tres diferentes profundidades que son: 12 m, 18 m y 24 m, así como en pozos cercanos a la granja 8; CONAGUA (1997), verificados durante este estudio; esto permitió definir la dirección de flujo subterráneo (Figura No. 19). De este mapa se observa que la dirección de flujo es de SW a NE.

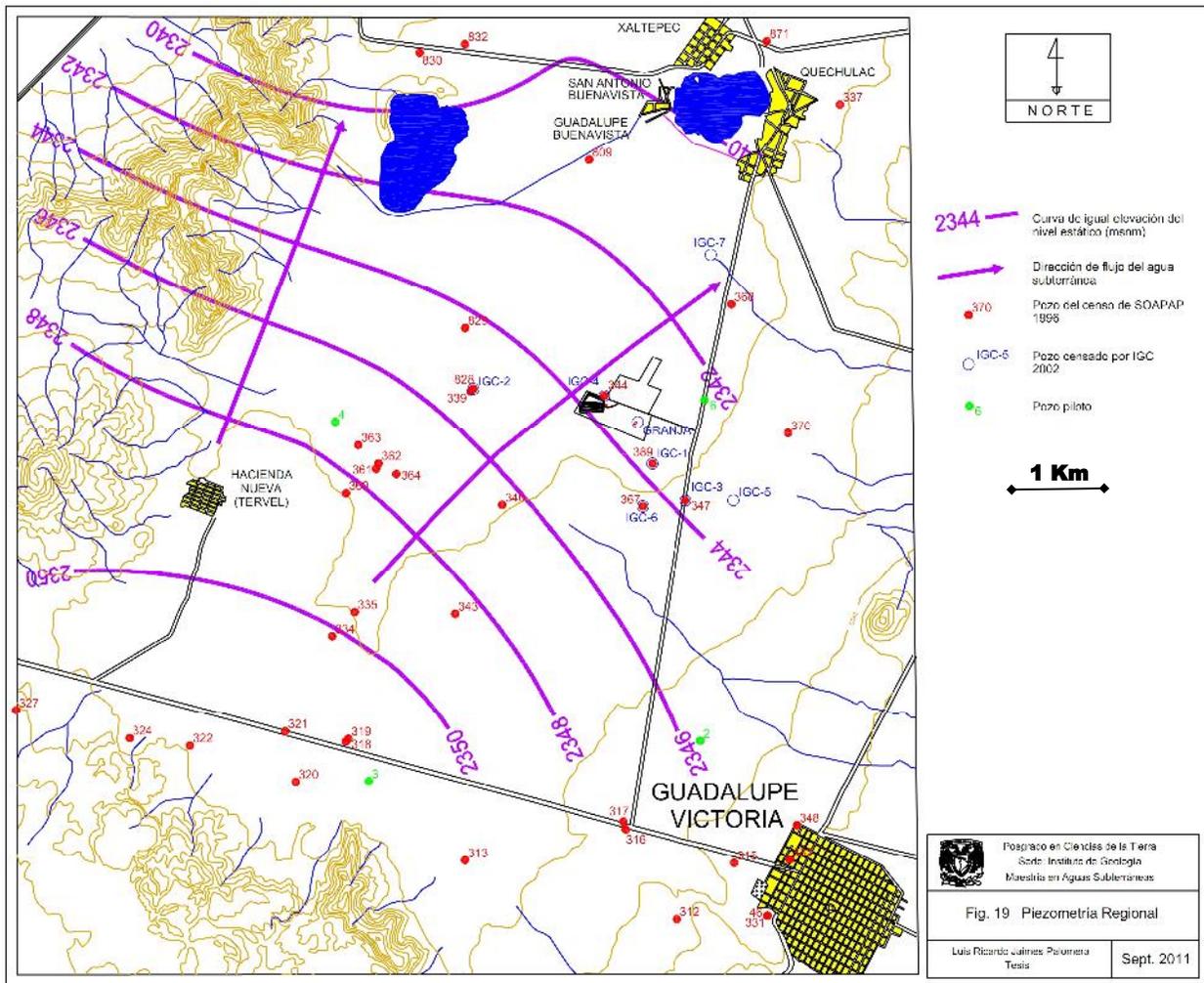


Figura 19. Piezometría regional

El gradiente hidráulico regional es de 0.002 y el gradiente local en la zona de la laguna es de 0.0016

II.3.5 Modelo Hidrogeológico Conceptual

Una de las etapas más importantes en un estudio hidrogeológico, es la elaboración de un modelo conceptual del sistema. Un modelo conceptual, es la representación pictórica del sistema del flujo de agua subterránea. Este, generalmente se presenta en forma de un diagrama de bloque o una sección geológica. Después de preparar el modelo conceptual, se pueden determinar las dimensiones del modelo numérico y diseñar la malla a emplear.

Se usa el modelo conceptual, para simplificar la situación hidrogeológica y para organizar mejor los datos de campo asociados, de tal manera que se pueda analizar el sistema con más facilidad (Anderson y Woessner, 1992).

El modelo conceptual de funcionamiento del sistema a nivel local, se presenta esquematizado en la Figura 20. En ésta, se aprecian las cinco unidades hidrogeológicas y sus características hidráulicas.

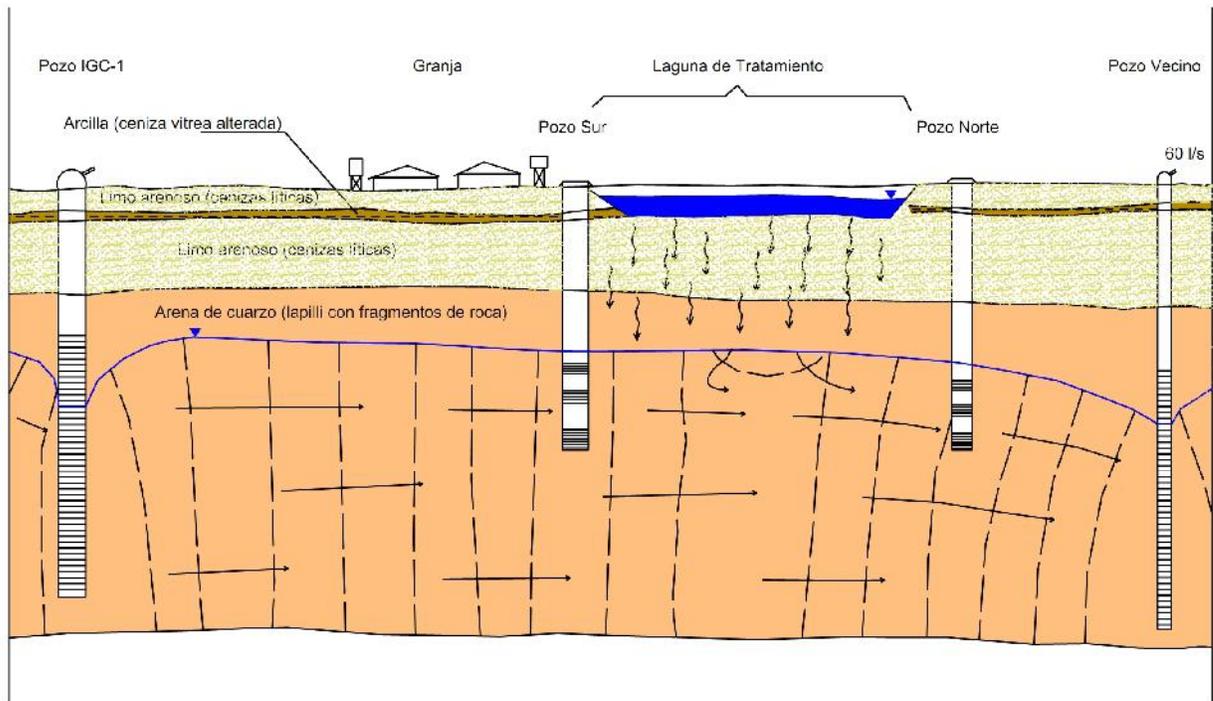


Figura 20. Modelo Hidrogeológico Conceptual

Sobre el modelo conceptual de la Laguna de Tratamiento respecto del acuífero local, se muestra la ubicación de la citada laguna en relación a la dirección de flujo

de agua subterránea y aguas arriba del pozo IGC-4, cercano a la laguna. Este pozo que extrae un caudal del orden de los 60 l/s, de este acuífero muy permeable y por lo tanto vulnerable como el que nos ocupa.

La zona de recarga del acuífero, se encuentra en las Derrumbadas, cuyo flanco se encuentra la porción suroeste del área. El flujo subterráneo como se mostró en la Figura 19 es de Suroeste a Noreste. Bajo un gradiente hidráulico de 0.004.

Las condiciones de frontera para la asignación de este modelo conceptual al modelo de flujo, son la recarga del suroeste mediante una frontera de carga remota, otra de carga constante en la frontera noreste, los bordes noroeste y sureste se consideran de no flujo por ser perpendiculares al flujo de agua subterránea. De igual forma se considera la asignación de una frontera de no flujo en la base del acuífero.

III.4 Hidrogeoquímica

Los resultados de los análisis físico-químicos se presentan en la Tabla 3.

Tabla 4. Resultados de los análisis físico-químicos en mg/L

Muestra No.	pH	Cond. E. (microS/cm)	STD	Na ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	HCO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	SiO ₂	CO ₂	Balance de Cargas
										(mg/L N)				
M-1 (IGC-1)	7.52	576	546.8	47.8	30.1	42.4	39	28	3.7	304.5	0.21	55	1	0.0605
M-2 (Piezo. S)	7.56	1378	1001.3	125.0	38.9	80	85	100	22.5	497.4	0.25	75	9	0.3651
M-3 (Piezo. E)	7.49	1254	1006	109.8	38.9	92	72.5	90	16.2	527.8	0.38	75	5	0.265
M-4(Piezo. O)	7.46	1204	779.84	62.2	58.3	72	112.5	125	5.8	324.8	0.55	25	2	0.0954
M-5(Laguna)	7.58	5270	4876	1285.4	30.1	43.2	305	240	0.7	2862.3	72.5	110	234	0.0168
M-6 (P. Granja)	7.5	875	497.4	72.6	36.0	60.8	59	72	3.7	365.4	0.22	57	1	0.0538
M-7 (IGC-4)	7.48	790	402.3	53.4	32.6	56,1	45	42	4.7	345.0	0.36	28	2	0.0719

Los resultados de los análisis físico-químicos efectuados, indican lo siguiente:

La facies hidroquímica (Back, 1961) del agua subterránea en la zona es bicarbonatada sódica, aunque en el pozo de monitoreo oeste y en el pozo M-7 es bicarbonatada cálcica. En la Figura 21, se presenta el mapa hidrogeoquímico, con la distribución de facies hidroquímicas, representadas mediante diagramas de stiff. En ese mismo mapa, se presenta la configuración de igual valor de la conductividad eléctrica, mostrando que las mayores concentraciones de sales se encuentran en la laguna y a partir de ahí va disminuyendo hacia los pozos de monitoreo y los pozos vecinos.

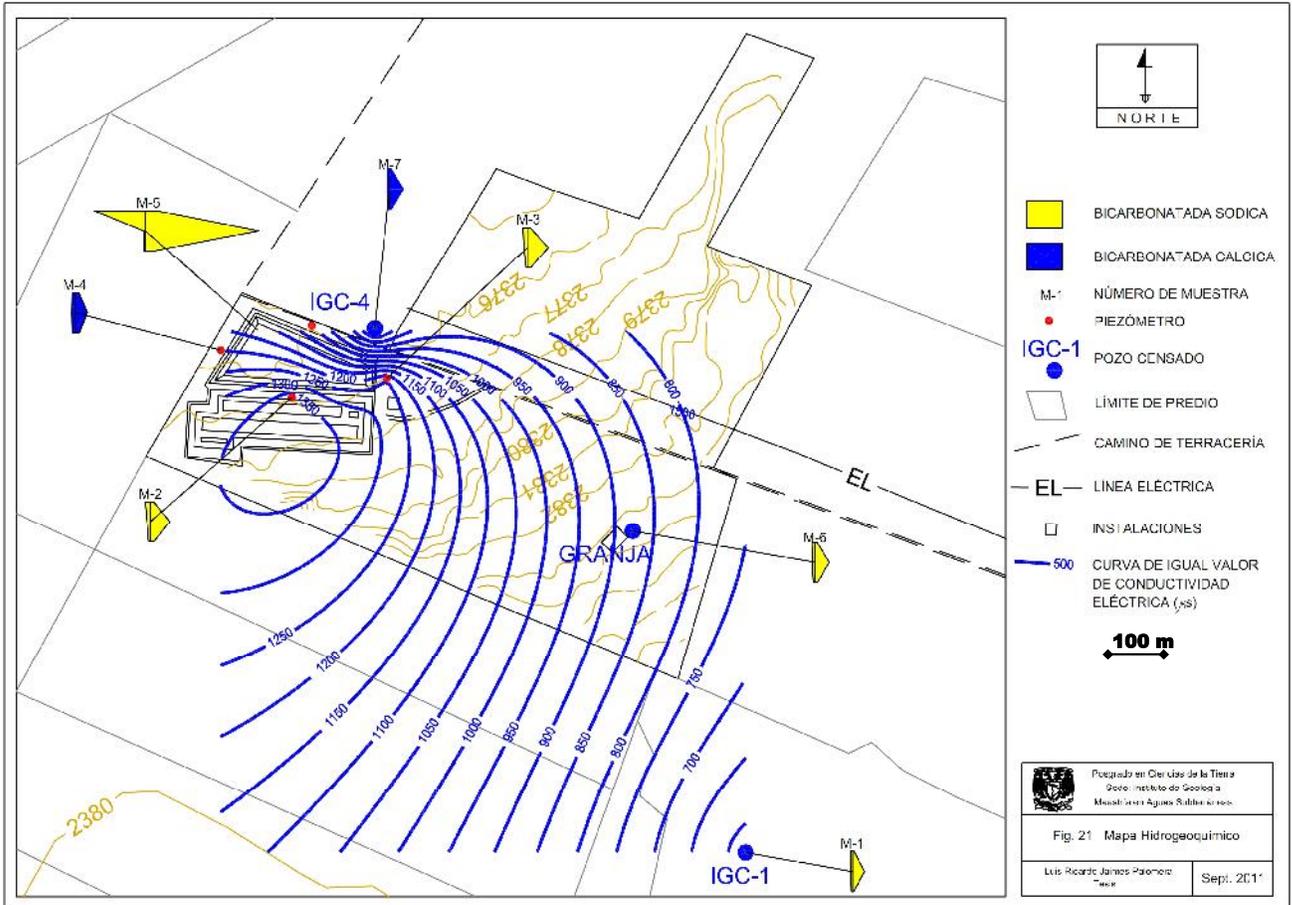


Figura 21. Mapa Hidrogeoquímico

Dado el pequeño número de muestras obtenidas fuera del área influida por la laguna, al parecer de las muestras M-1 y M-6, se aprecia un ligero incremento en la concentración los iones principales comparando la muestra 1 con la 6 podría decirse que ese ligero enriquecimiento es el que ocurre naturalmente en la dirección de flujo.

En el diagrama de Piper (1944) (Figura 22), se observa que el agua del acuífero pertenece prácticamente a la misma familia, con algunas excepciones como el caso de la muestra M-4 (pozo de monitoreo oeste). Sin embargo, en dicho diagrama se observa como las muestras presentan un patrón de evolución aparente que podría considerarse más bien como un patrón de contaminación, que nos indica que provienen de un origen común, aunque si se comparan sus valores de sólidos totales disueltos, se puede ver que las muestras cercanas a la laguna sufren un incremento en sólidos totales disueltos.

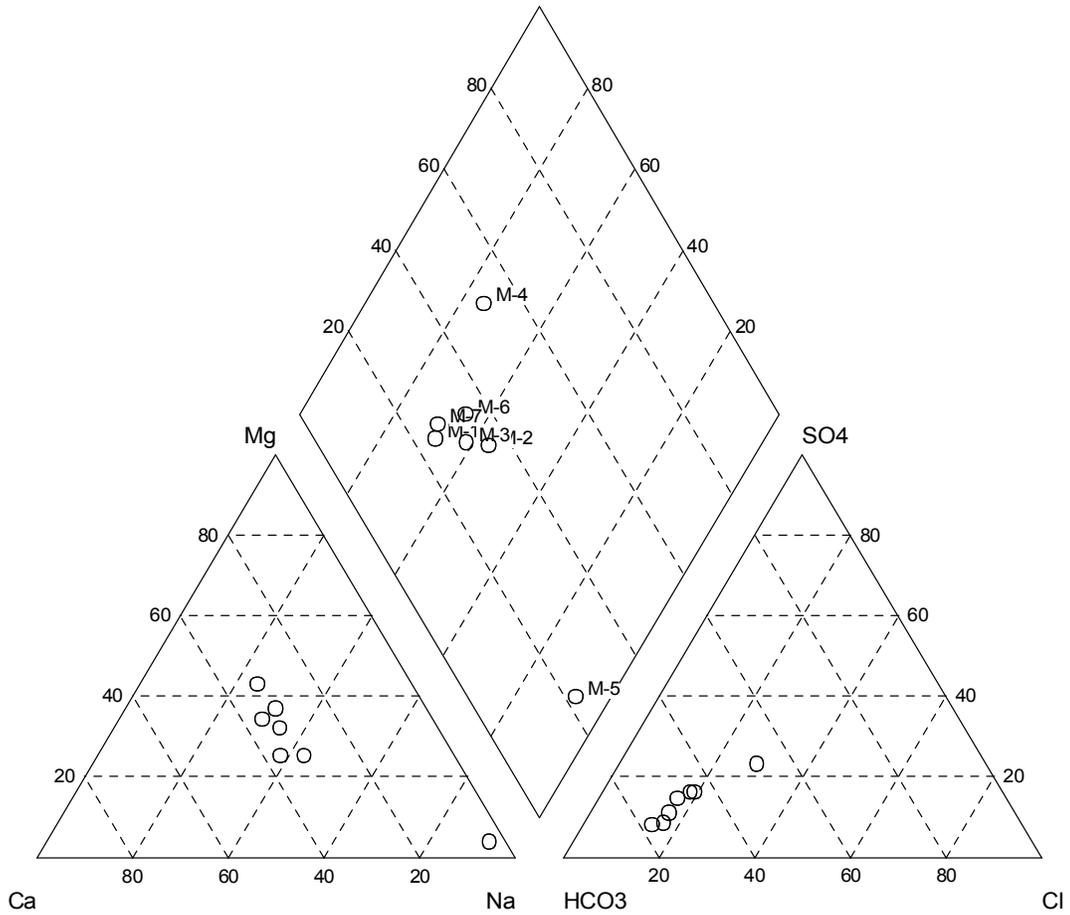


Figura 22. Diagrama de Piper

En el diagrama de Durov (en Lloyd, 1985) de la Figura 23, se presenta con más claridad este patrón de evolución inducido, ya que las distancias necesarias para que ocurra esta evolución son muchos kilómetros en condiciones naturales.

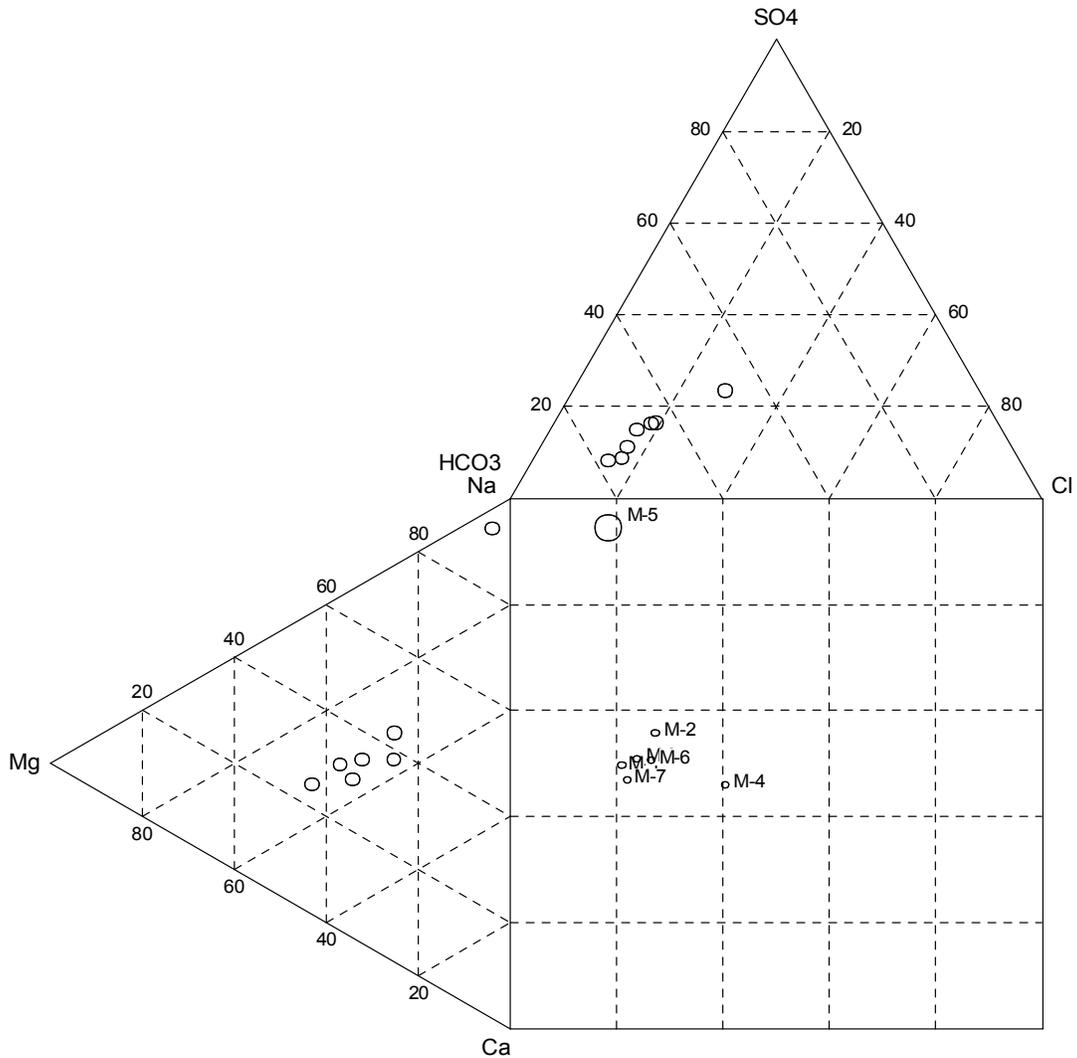


Figura 23. Diagrama de Durov

Este tipo de facies es típica de agua de reciente infiltración y que ha circulado por un acuífero en rocas volcánicas, la evolución natural de esta facies después de una larga distancia y tiempo en condiciones naturales es de esperarse que evolucione primero a Bicarbonatada Magnésica y Cálcida y posteriormente a Sulfatada cálcica o Magnésica dependiendo del tipo de minerales que encuentre en solución. Por lo antes expuesto, se piensa que este patrón del diagrama es inducido artificialmente porque el incremento en la salinidad ocurre en los alrededores de la laguna y en dirección de flujo subterráneo en muy corta distancia.

La crianza de puercos produce efluentes que incluyen uno de los contaminantes más frecuentemente reportados en agua subterránea que es el nitrógeno. Para el caso de la granja en cuestión, los desechos líquidos que genera son disueltos en agua y enviados a la laguna de oxidación, ahí se les adicionan bacterias para acelerar su biodegradación y de eso se originan nutrientes como el Nitrato y el Fosfato, mismos que se asume están deteriorando la calidad del agua subterránea en el área de interés. En efecto la cuantificación y representación gráfica (Figuras 24 y 25) del contenido de estos parámetros indica efectivamente hay un enriquecimiento de nutrientes en la zona de la laguna, al compararla con lo que aquí se consideran las condiciones naturales que están representadas por los valores más bajos en la esquina SE de las figuras

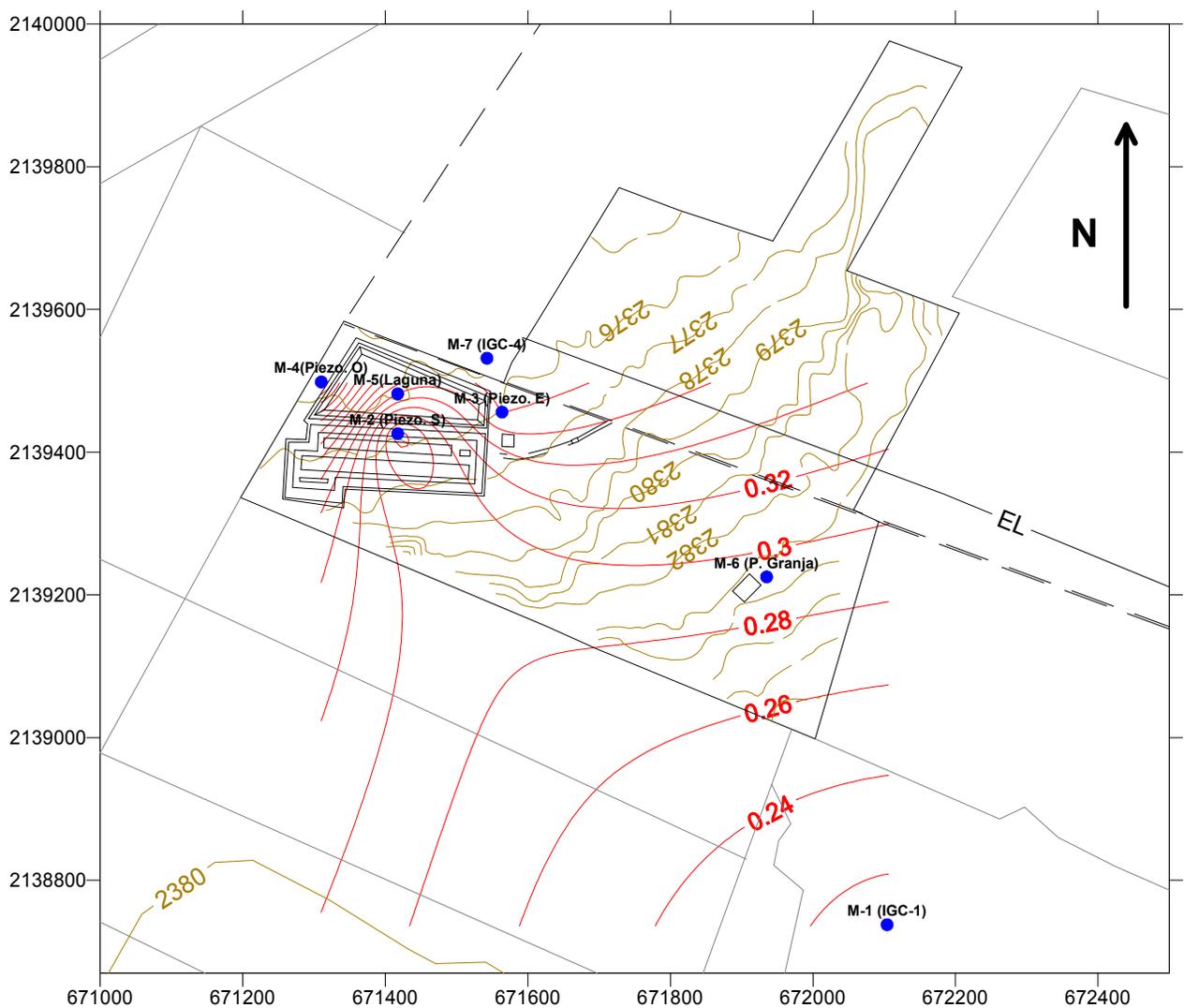


Figura 24. Distribución de fosfatos en mg/l

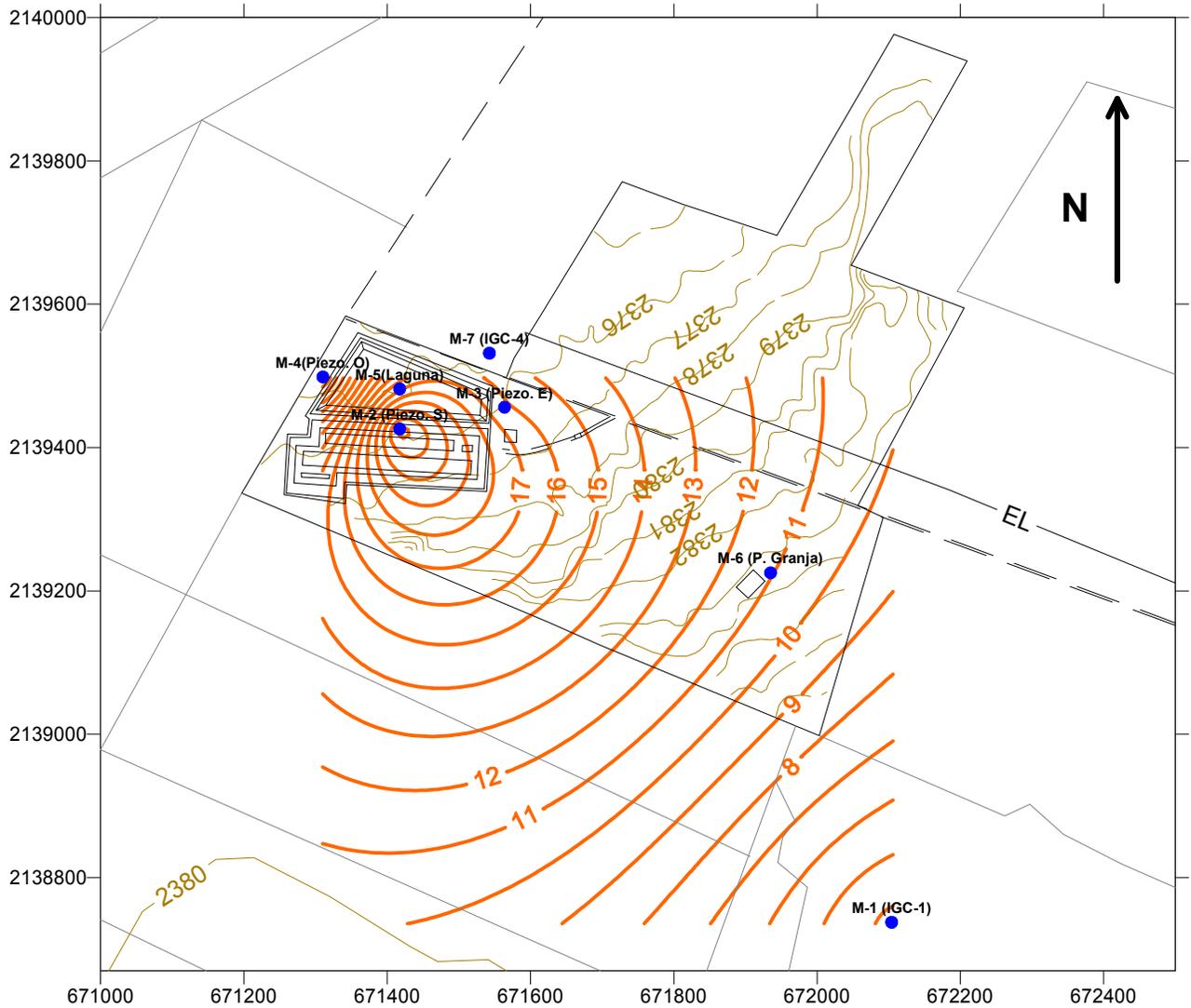


Figura 25 Distribución de Nitratos en mg/l

El nitrógeno es uno de los contaminantes más comunes y se identifica como nitrógeno disuelto en forma de nitrato (NO_3^-). Este contaminante se ha extendido mucho debido a las actividades agrícolas y a la disposición de desechos de drenajes y fosas sépticas, debajo de la superficie del terreno (Freeze and Cherry, 1979) Su presencia en concentraciones por arriba de la Norma Oficial Mexicana de la Secretaría de Salubridad y Asistencia (NOM SSA 127 1996) causa que sea necesario tratar extensos acuíferos en muchas partes del mundo. Aunque el nitrato es la forma principal en que ocurre el nitrógeno en las aguas subterráneas, el nitrógeno disuelto también puede ocurrir en forma de amoníaco (NH_4^+), amonio

(NH_3), nitrito (NO_2^-), nitrógeno (N_2), óxido nitroso (H_2O , y nitrógeno orgánico. El nitrógeno orgánico, es nitrógeno que es incorporado en las sustancias orgánicas. (Ver Figura 25 B Ciclo del Nitrógeno).

El nitrato en el agua subterránea, generalmente se origina de fuentes de nitrato como el caso que nos ocupa. En otros casos, el NO_3^- se genera por conversión de nitrógeno orgánico o NH_4^+ , que ocurren naturalmente o que son introducidos hacia el suelo por las actividades del hombre o granjas. El proceso de conversión de nitrógeno orgánico a NH_4^+ se conoce como amonificación. En el proceso de nitrificación, el NH_4^+ es convertido a NO_3^- por oxidación (Capone, et. al. 2006). La amonificación y nitrificación, son procesos que ocurren normalmente sobre el nivel freático, generalmente en la zona del suelo, donde la materia orgánica y el oxígeno son abundantes. En este caso la nitrificación podría estar ocurriendo en la base de la laguna de tratamiento, que desafortunadamente no está sobre suelo, sino directamente sobre materiales piroclásticos poco alterados.

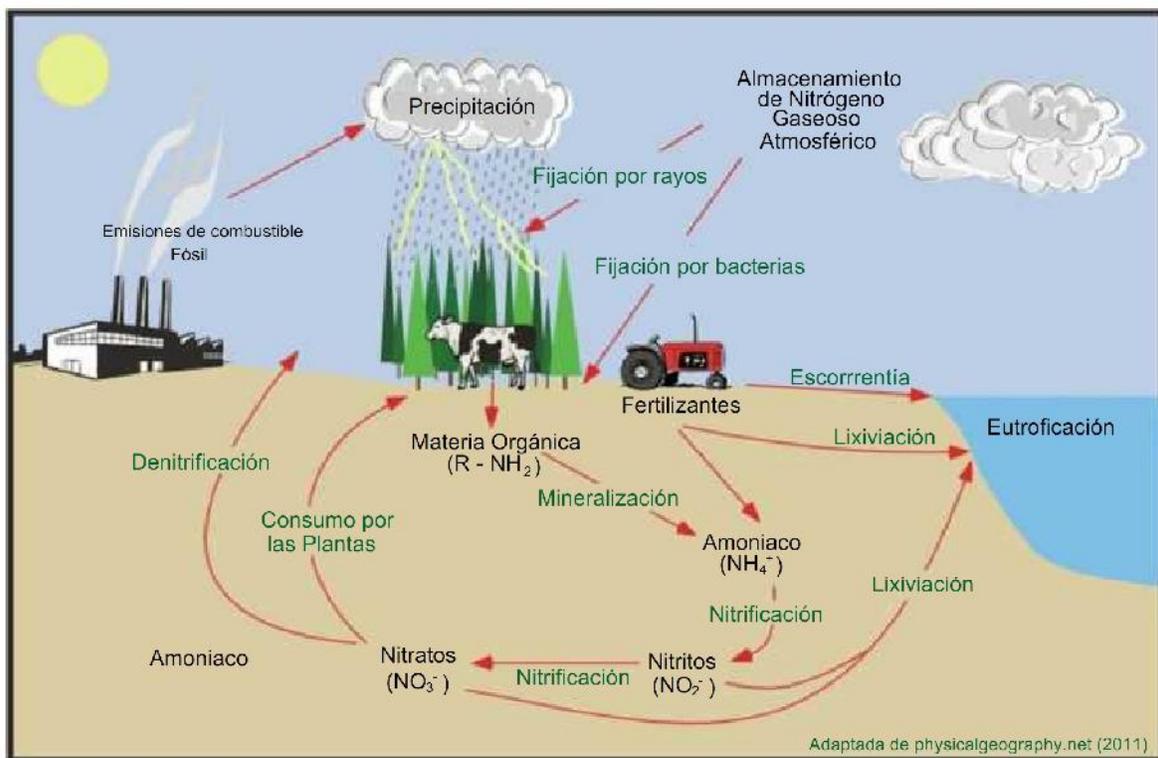


Figura 26 Ciclo del Nitrógeno

En los casos de lagunas de este tipo, la conversión de nitrógeno orgánico de estos residuos a nitrato toma lugar a través de procesos bioquímicos al interior del suelo y contribuyen con NO_3^- al acuífero, por lo tanto, gracias al proceso de biodegradación en el suelo la contaminación es raramente significativa. Sin embargo en este caso no es así, pues el suelo orgánico ha sido removido y el piso de la laguna está en contacto con materiales volcánicos permeables.

Otro indicio de deterioro de la calidad del agua subterránea son los coliformes fecales, que son el tipo de bacterias más representativas de este tipo de contaminantes.

Se han realizado numerosas investigaciones sobre el movimiento de las bacterias a través de los suelos y los medios porosos, que indican que conforme se mueven las bacterias a través del medio poroso, estas son removidas por filtración, muerte y adsorción, La migración de un frente de bacterias es retardada significativamente en relación con la velocidad de flujo de agua (Crane and Moore, 1984; Wood and Elrich, 1978). Aunque las bacterias pueden vivir en estado adsorbido o en huecos dentro del medio poroso, sus vidas son relativamente cortas en relación con las velocidades de flujo subterráneo. En medios granulares como arena o más finos, las bacterias, los patógenos y los organismos coliformes generalmente no penetran más de unos cuantos metros. Sin embargo estudios de campo han demostrado que en acuíferos en arenas o gravas heterogéneas, las bacterias pueden viajar decenas o centenas de metros a lo largo de las trayectorias de flujo subterráneo (Freeze and Cherry, 1979).

El contenido de coliformes en los pozos es como sigue.

La muestra M-7 tomada en el pozo (IGC-4) M-7, se presentan en mayor concentración con 110 UFC/100 ml de coliformes totales y 48 UFC/100 ml de coliformes fecales, mientras que en los piezómetros de monitoreo, este y oeste se encontraron los siguientes valores:

58 UFC/100 coliformes totales y 4 UFC/100 ml de coliformes fecales en el piezómetro este.

60 UFC/100 coliformes totales y 15 UFC/100 ml de coliformes fecales en el piezómetro oeste.

En el pozo que se tomó como testigo el IGC-1, no se presentan coliformes de ningún tipo.

Por lo tanto los coliformes en el pozo IGC-4 tienen una alta probabilidad de provenir de la laguna. Sin embargo, pueden no provenir de la misma, considerando el menor número de estas bacterias en los piezómetros de observación. Aspecto que puede también sugerir que la pluma de contaminación está creciendo.

III.5 Modelo de Flujo en la zona no saturada

Para obtener el balance hidrológico de la laguna, se utilizó el software Visual HELP de Waterloo Hydrogeologic, Inc. (Actualmente Schlumberger Water Services), que en este caso se empleó en dos etapas distintas de este trabajo. La primera fue para estimar la recarga que recibe la superficie de la laguna a partir del agua de lluvia y la segunda para definir el volumen de agua residual infiltrada al subsuelo a partir de la laguna de tratamiento.

El modelo HELP (Schroeder, et.al. 1994), está diseñado para predecir los procesos hidrológicos de un relleno sanitario y probar la efectividad de los diseños del mismo, por lo tanto, permite la predicción de una falla del diseño que resultará en la contaminación de las aguas subterráneas. Este modelo, puede aplicarse a lagunas de tratamiento como la que aquí se considera y como hace un balance de agua en el suelo, se ha utilizado también para la evaluación de la recarga de aguas subterráneas.

Este modelo fue seleccionado porque permite la predicción de la infiltración de los contaminantes a través de las capas de relleno artificial que normalmente se colocan en rellenos sanitarios y lagunas de tratamiento.

El modelo hidrológico cuasi-bidimensional, acepta los siguientes datos como entrada:

Climatología (parámetros de precipitación, radiación solar, temperatura, evapotranspiración).

Suelo (porosidad, capacidad de campo, punto de marchitamiento permanente y conductividad hidráulica).

Datos de diseño de ingeniería (sistemas de colecta de lixiviados y escurrimiento superficial, pendiente, plantillas impermeables, geotextiles y geomembranas).

La estructura del perfil a modelar, puede ser multicapa y estar formada por suelo natural y materiales artificiales (residuos, geomembranas u otros geosintéticos) con opción de instalar drenaje horizontal y cambiar la pendiente de los perfiles.

HELP utiliza técnicas numéricas de solución de que toman en cuenta los efectos del almacenamiento superficial, fusión de nieve, escurrimiento superficial, infiltración, evapotranspiración, crecimiento vegetal, almacenamiento de humedad en el suelo, drenaje subsuperficial lateral, recirculación de lixiviados, drenaje vertical no saturado, factor de goteo del suelo, geomembranas, y otros geosintéticos.

Este modelo, fue utilizado con objeto de obtener el balance hidrológico superficial y estimar la recarga vertical que ocurre en el área de estudio en el terreno que se encuentra aún en condiciones naturales. Se usó también para calcular el balance de la laguna, considerando el volumen que ya se encuentra almacenado en la laguna dentro de la entrada de datos.

El modelo de clima de Visual HELP, fue alimentado con los datos que se recopilaron en las estaciones climatológicas más cercanas al sitio de interés, en el caso de la recarga natural, mientras que en el modelo que se simula la recarga inducida por la Laguna (I), se incorporaron los datos del volumen medio de agua almacenado en la misma, sumándolos a la precipitación que cae en el área de la laguna. Este volumen considera las descargas periódicas y la evaporación. Los resultados de la infiltración para estos dos casos, obtenidos con este programa, se presentan en las figuras 27 y 28, mientras que en la Figura 29 se presenta los resultados de la simulación del caso en que se coloca una capa de arcilla de 1 m de una conductividad hidráulica del orden de 10^{-7} m/s. Reduciendo así la migración del lixiviado hacia el acuífero.

Con la información proporcionada por el personal de la granja sobre el volumen de residuos que se generan, en la Tabla 4, se presenta una lista de los volúmenes de agua existentes y los que se aplican cada año. En dicha tabla se presenta el volumen infiltrado obtenido de la simulación con HELP, el aporte por lluvia y la evaporación, todos ellos calculados a partir de los resultados del HELP.

Tabla 5. Volúmenes de agua que se manejan en la Laguna de Tratamiento

Concepto	m³/año
Volumen almacenado en la laguna (VA)	35,905.77
Gasto bombeado del pozo de abastecimiento hacia la laguna por año (QB)	16,812.7
Aporte de agua de lluvia por año (P)	16,502.6
Pérdidas por evaporación (E)	13,272.53
Volumen de residuos generados (QR)	14,364
Infiltración o recarga inducida(I)	1499

$$I = VA - QB - P + E - QR$$

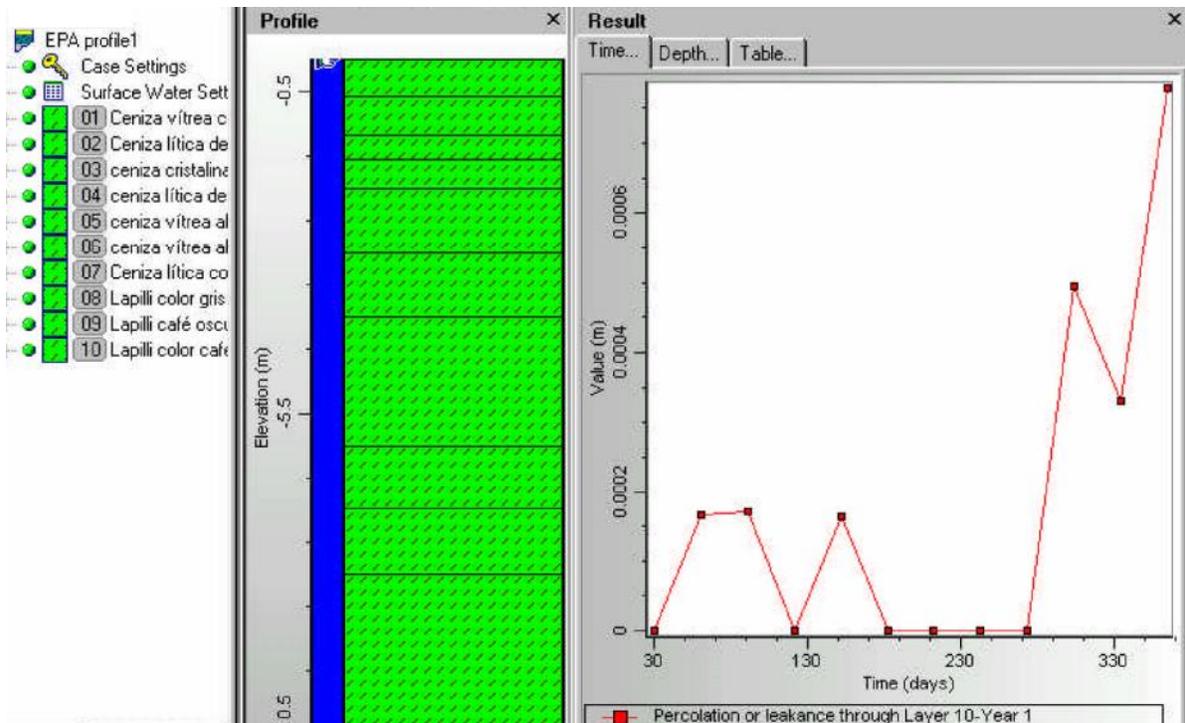


Figura 27. Resultados del Modelo HELP para calcular la Recarga

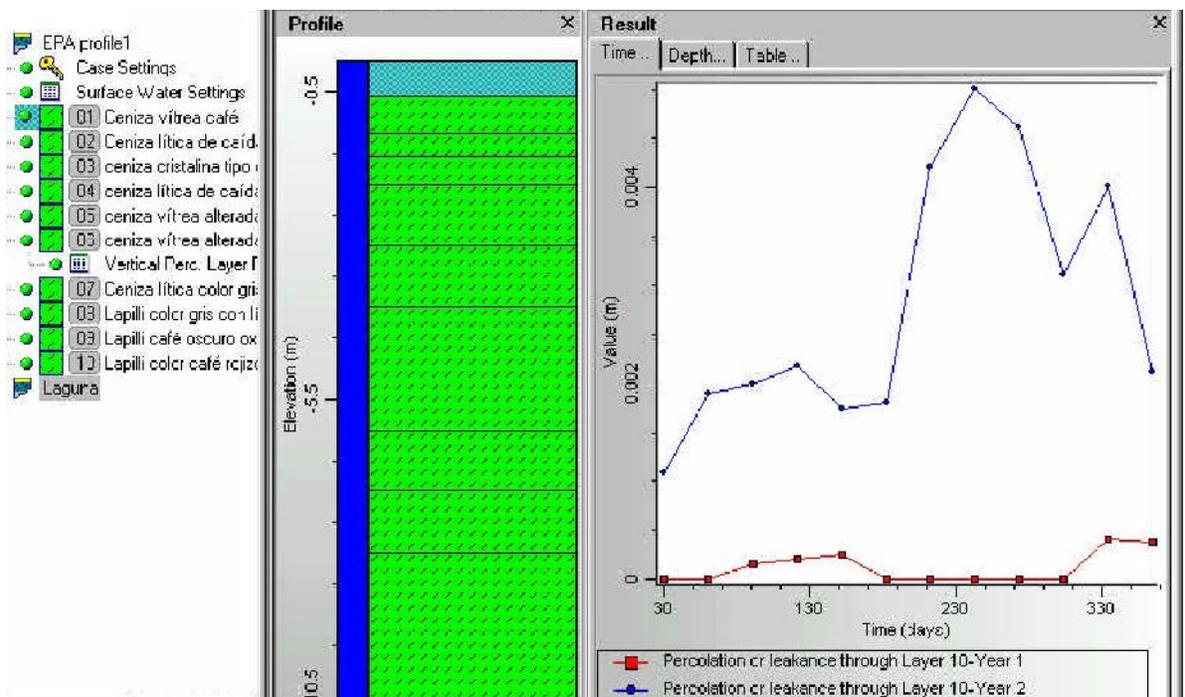


Figura 28. Resultados del modelo HELP para calcular la infiltración en la laguna

Los resultados obtenidos indican lo siguiente en la zona de la laguna de efluentes:

La infiltración por lluvia en el terreno natural es del orden de 19.36 mm/año.

La infiltración de agua de la laguna en las condiciones actuales es de 33.79 mm/año que estaría indicando que en una superficie de 44,361.82 m² se infiltran alrededor de 1499 m³/año.

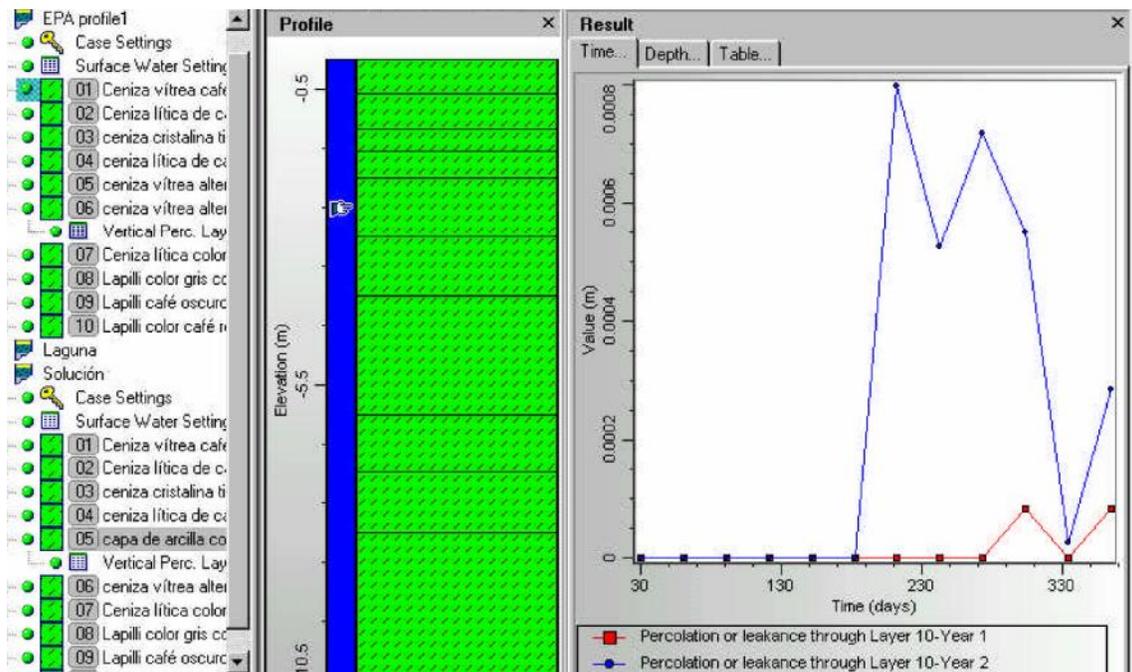


Figura 29. Resultados del modelo HELP para calcular la infiltración en una alternativa de solución

La infiltración considerando una capa de arcilla de banco compactada hasta adquirir una permeabilidad de 1×10^{-7} m/s es de 2.89 mm/año que daría una infiltración de 128 m³/año.

Estos resultados obtenidos con el HELP, fueron incorporados al Visual MODFLOW como recarga vertical mensual.

Este modelo fue utilizado también más adelante para hacer predicciones del comportamiento de los materiales de banco encontrados y propuestos para el mejoramiento de la plantilla de la laguna.

III.6 Modelo de Flujo y Transporte

III.6.1 Modelo de Flujo con MODFLOW y de transporte de partículas con MODPATH.

Considerando las inquietudes que pueden derivarse del modelo hidrogeológico conceptual, y para reforzar las afirmaciones elaboradas, se decidió realizar un modelo de simulación tridimensional preliminar utilizando el modelo Visual MODFLOW Pro® de Waterloo Hydrogeologic, el cual toma como base el modelo MODFLOW-96 del USGS de los Estados Unidos. La razón de utilizar este programa, es debido a la presencia de un sistema con distintas unidades hidrogeológicas, que influye en el comportamiento del sistema local y este programa tiene la capacidad de trabajar este tipo de problemas en tres dimensiones y en régimen transitorio, que es como en realidad funcionan los acuífero sujetos a un bombeo discontinuo y afectados por recarga artificial.

La ecuación gobernante para el sistema de flujo con la cual opera el modelo de flujo es la siguiente:

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

Esta ecuación la resuelve Visual Modflow®, mediante un método numérico desarrollado por Waterloo Hydrogeologic y que en algunos casos converge mejor que los desarrollados originalmente por el USGS.

Para poder simular el sistema acuífero del área en estudio, se consideró la información geológica descrita anteriormente en los capítulos III.1 de la presente tesis.

Considerando la magnitud del proyecto, se diseñó una malla con celdas de 20 x 20 (Figura 30). El dominio del modelo cubre cinco capas que corresponde cada una a una unidad hidrogeológica de las aquí establecidas en el modelo hidrogeológico.

Las condiciones de frontera consideradas (Figura 30), toman en cuenta el comportamiento del flujo local y la recarga vertical. Para simular la carga hidráulica, desde las partes fuera del modelo se utilizaron condiciones tipo GHB

(General Head Boundary), que representan cargas remotas, es decir, son fronteras que permiten simular las cargas hidráulicas de un entorno vecino en el que se conoce la conductancia del medio y las variaciones de la carga con respecto al tiempo. Este tipo de fronteras, se colocaron siguiendo el contorno de las curvas isopiezas obtenidas de la piezometría y la topografía del área de interés. El resto de los límites del modelo, se consideraron fronteras de no flujo. En el caso de la recarga vertical, fueron utilizados los resultados del modelo HELP descrito en el capítulo anterior, estos fueron alimentados en la condición de frontera RECHARGE. En este valor, ya se consideró la suma de agua de la laguna con respecto al tiempo. La malla del modelo y las condiciones de frontera se presentan en la Figuras 30 y 31 respectivamente.

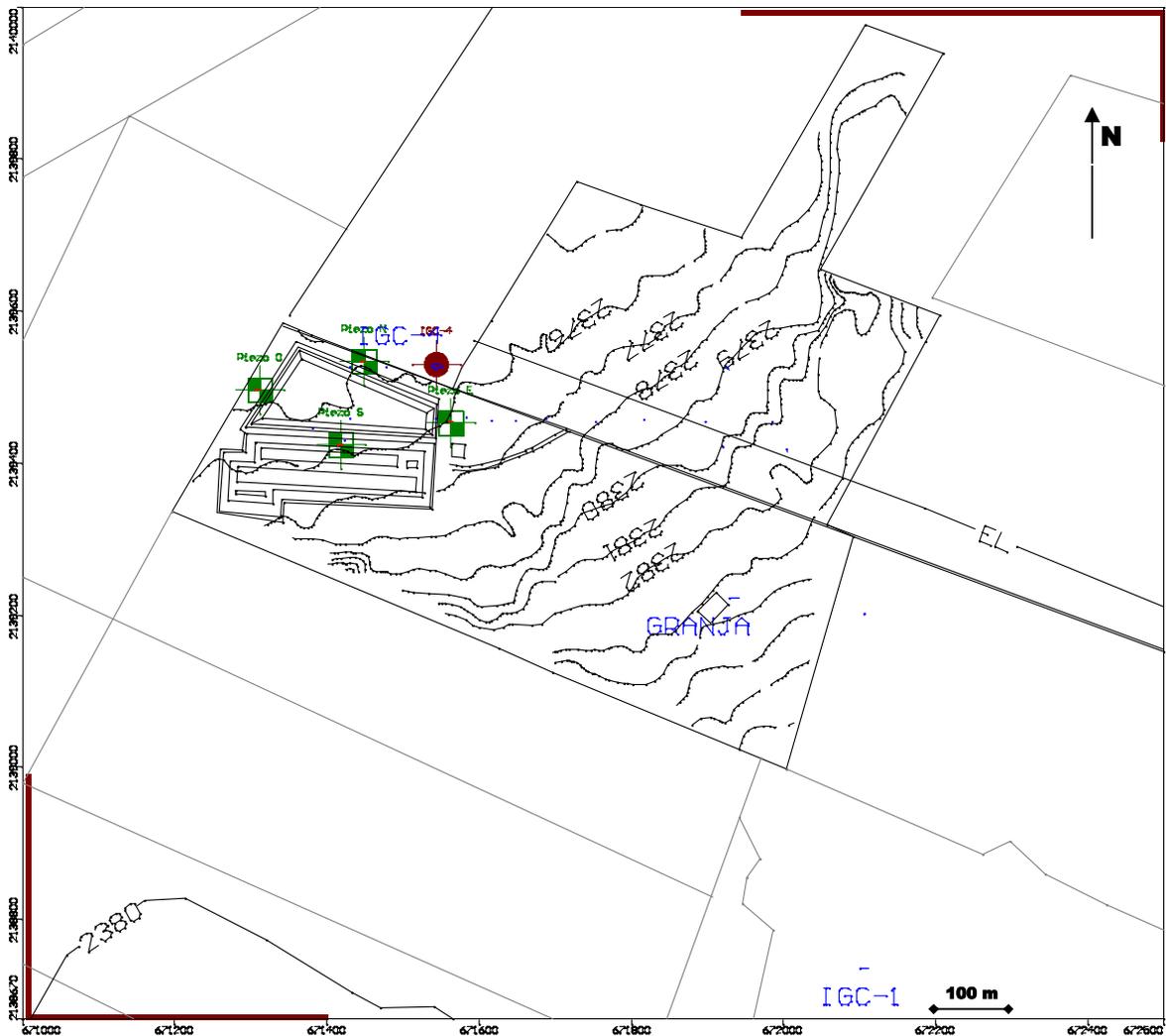


Figura 30. Dominio del modelo y condiciones de frontera

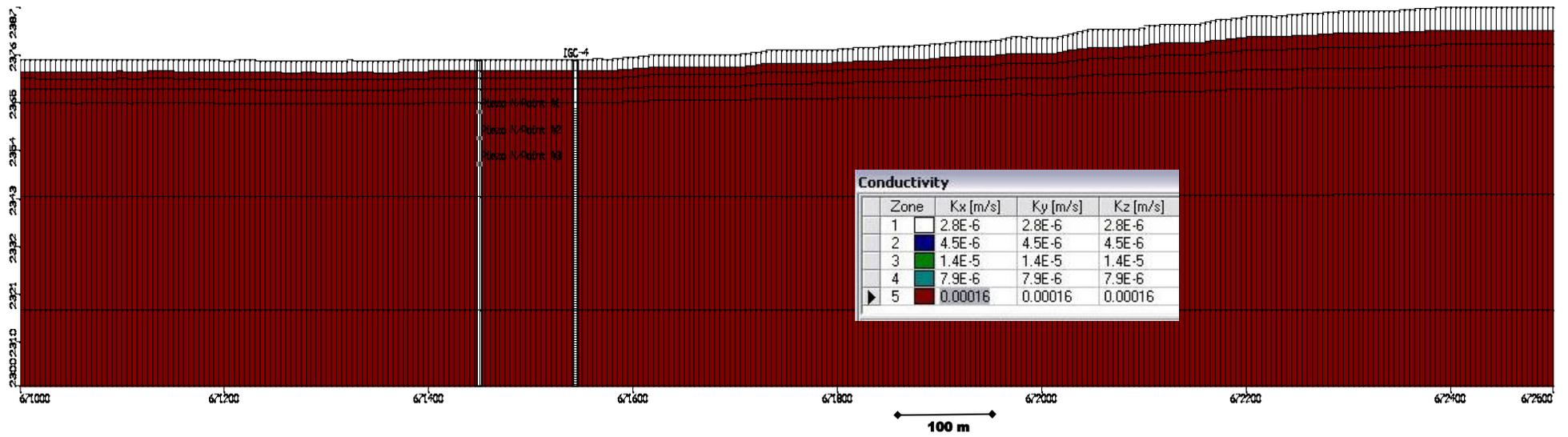


Figura 31. Distribución de parámetros hidráulicos en perfil

Los parámetros hidráulicos fueron asignados con base en los resultados de las pruebas de bombeo y de permeabilidad y de los resultados de los estudios previos, con lo que se tuvo un cubrimiento adecuado de la región modelada.

Considerando las evidencias de variaciones en el nivel freático, se simularon 18 períodos de estrés que corresponden con todo el tiempo de operación de la Laguna de Tratamiento de Abril de 2001 a Agosto de 2002, considerando los 12 meses del año, cada período de estrés considera un solo paso de tiempo, por no contar con información más detallada que la mensual.

Como condiciones iniciales, se consideraron las cargas obtenidas en la piezometría de este estudio, restándole la evolución de niveles de agua local anual (Figura 32).

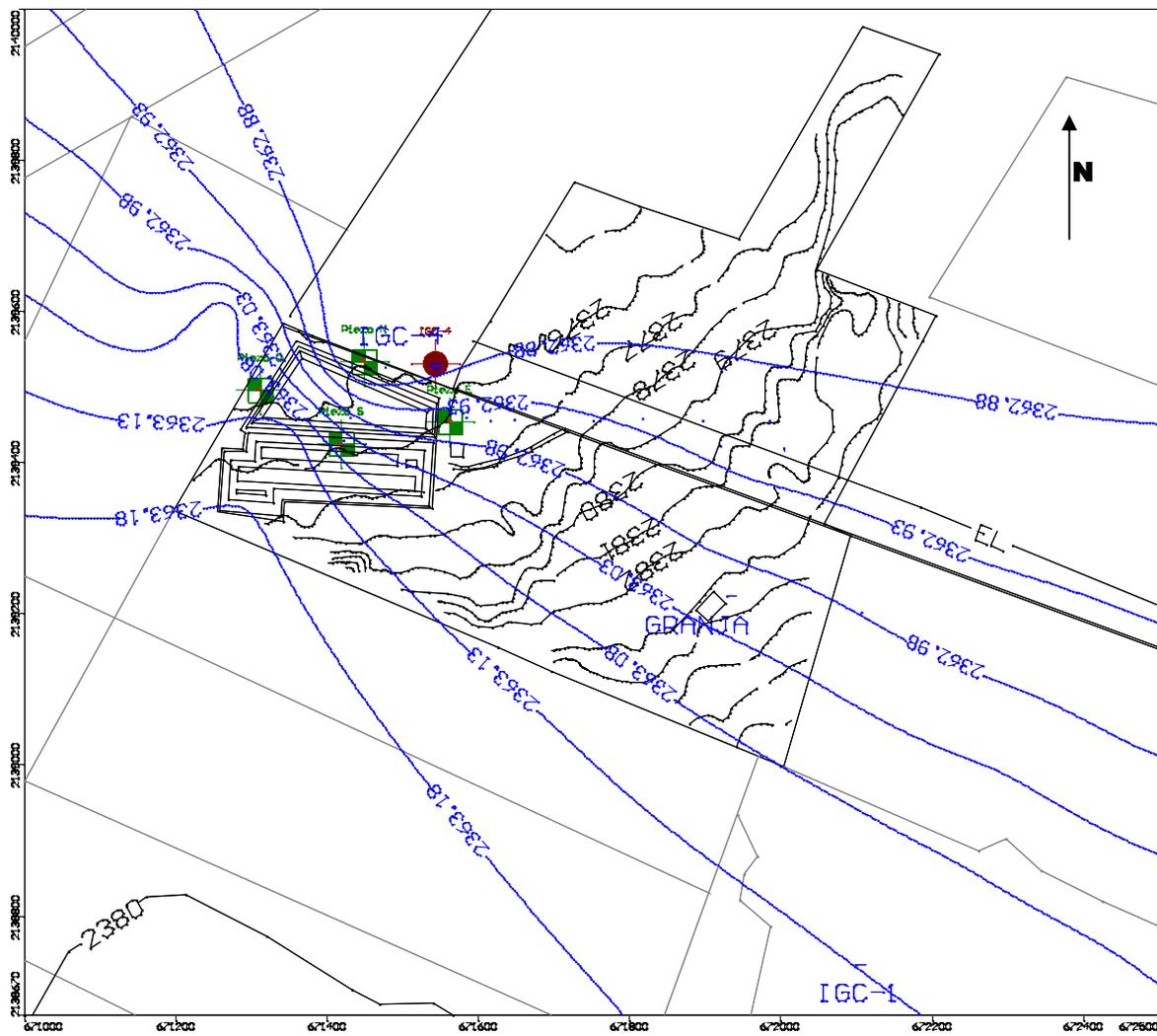


Figura 32. Condiciones iniciales

El proceso de calibración por ensayo y error, no requirió muchas corridas para obtener un buen resultado, pues al contar con una discretización tan detallada y un buen conocimiento de las características hidráulicas del sistema de flujo, el modelo converge rápidamente. Esto es de alguna manera la comprobación que el modelo conceptual es adecuado.

Para simular el transporte de solutos, se consideró el transporte de partículas por advección, para lo cual se utilizó el MODPATH (Pollock, 1994) junto con el MODFLOW en la plataforma del Visual MODFLOW.

Los resultados de este modelo, se presentan en la Figura 33, al colocar número a todas la isolíneas, como puede verse en la figura, la configuración de las equipotenciales calculadas por el modelo corresponden con las obtenidas directamente en el campo.

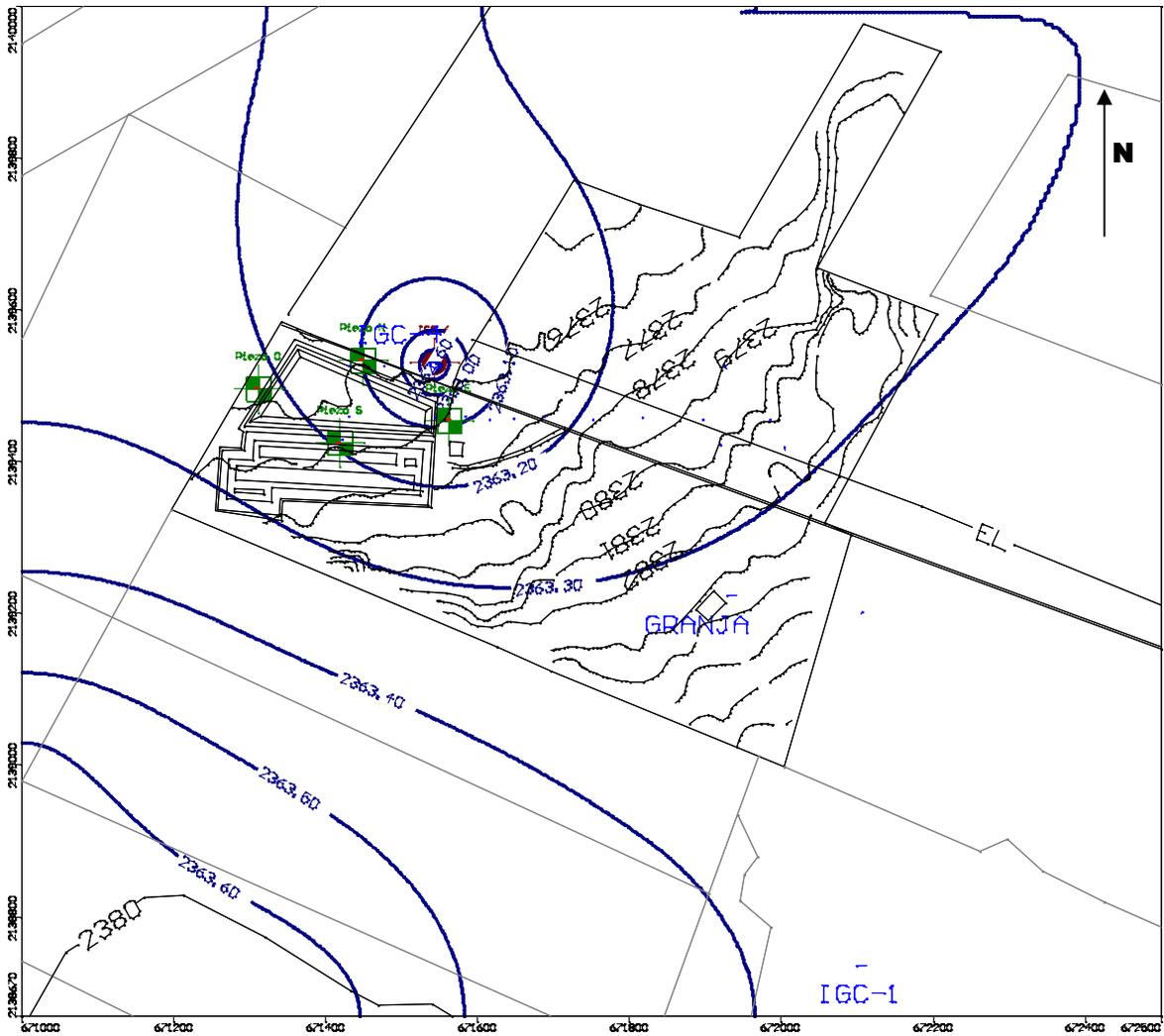


Figura 33. Cargas calculadas

El realizar un modelo tridimensional permitió definir con mayor precisión la interacción de la laguna con el acuífero. En la Figura 34, se muestra el comportamiento de solutos provenientes de la laguna transportados por advección hacia el pozo IGC-4.

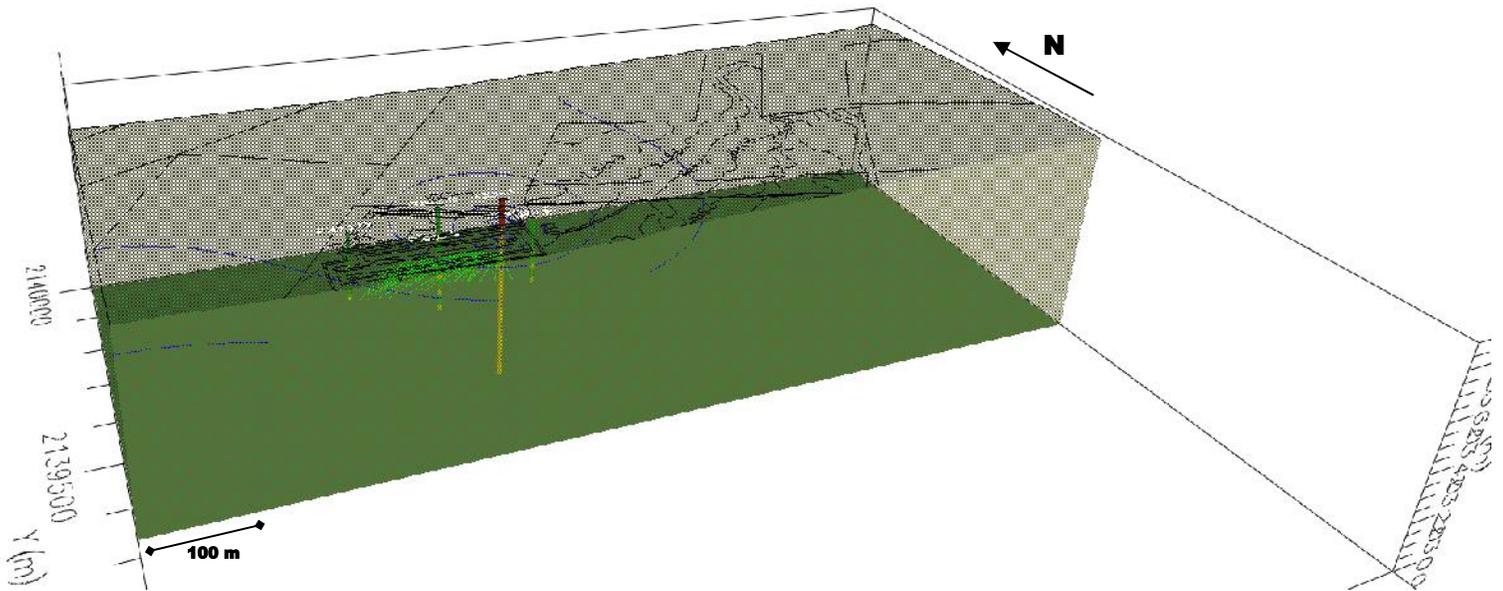


Figura 34. Partículas viajando desde la laguna hasta el pozo vecino

III.6.2 Modelo de Transporte Utilizando el MT3D

El MT3D es un modelo de simulación en tres dimensiones para advección, dispersión, y reacciones químicas de constituyentes de los sistemas de aguas subterráneas. El programa MT3D (Zheng, 1990), usa una estructura modular similar a la del MODFLOW del USGS (1988). Esta estructura modular permite simular advección, dispersión, mezcla de fuentes y sumideros y reacciones químicas de manera independiente y sin ocupar memoria en operaciones que no se están utilizando. Pueden ser adicionados otros procesos de transporte y opciones sin tener que modificar el código original.

El modelo de transporte MT3D una aproximación Euleriana-Lagrangiana que se aproxima a la solución de la ecuación dispersiva-advectiva tridimensional, en tres opciones básicas: el método de características (referido como MOC), el método modificado de características (referido como MMOC), y un híbrido de estos dos métodos (referido como HMOC). Esta aproximación combina la fortaleza del método de características para eliminar la dispersión numérica y la eficiencia computacional del método modificado de características.

Ecuaciones Gobernantes

La ecuación diferencial parcial que describe la distribución y transporte de contaminantes en tres dimensiones, en sistemas de flujo subterráneo, puede ser escrita como (Zheng, C., 1990):

$$\frac{\partial(\theta C^k)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\theta D_{ij} \frac{\partial C^k}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (\theta v_i C^k) + q_s C_s^k + \sum R_n \quad (1)$$

Donde

- θ = Porosidad del medio poroso, adimensional.
- C^k = Concentración de los contaminantes disueltos en el agua subterránea
 k , ML^{-3}
- t = Tiempo, T
- $x_{i,j}$ = Distancia a lo largo del respectivo eje de coordenadas cartesianas, L
- D_{ij} = coeficiente de dispersión hidrodinámica, L^2T^{-1}
- v_i = *Filtración o velocidad de agua de poro lineal; está relacionada con la descarga específica o flujo de Darcy a través de la relación $v_i = q_i / \theta$*
- q_s = Flujo volumétrico de agua por unidad de volumen de acuífero, representando fuentes (positivo) y sumideros (negativo)
- C_s^k = Concentración en las fuentes o sumideros, ML^3
- $\sum R_n$ = término de reacción química, $ML^{-3}T^{-1}$

El término de lado izquierdo de la ecuación se puede expandir en los dos términos resultantes de la derivación, es decir:

$$\frac{\partial(\theta C^k)}{\partial t} = \theta \frac{\partial C^k}{\partial t} + C^k \frac{\partial \theta}{\partial t} = \theta \frac{\partial C^k}{\partial t} + q'_s C^k \quad (2)$$

donde

$q_s = \partial\theta/\partial t$ Es la razón de cambio en el almacenamiento transitorio de agua subterránea, T^{-1}

El término de reacciones en la ecuación de transporte puede ser usado para incluir el efecto de las reacciones bioquímicas y geoquímicas generales en el transporte y destino de contaminantes. Considerando solo dos tipos básicos de reacciones químicas, esto es, reacciones de superficie acuosa-sólida (sorción) y razón de reacción de primer orden; el término de reacción química puede ser expresado como:

$$\sum R_n = -\rho_b \frac{\partial \bar{C}^k}{\partial t} - \lambda_1 \theta C^k - \lambda_2 \rho_b \bar{C}^k \quad (3)$$

donde

- ρ_b Es la densidad de cuerpo del medio subterráneo, ML^{-1} ;
- \bar{C}^k Es la concentración sorbida de las especies k en sólidos subterráneos, MM^{-1} ;
- λ_1 Es la razón de reacción de primer orden para la fase disuelta, T^{-1} ;
- λ_2 Es la razón de reacción de primer orden para la fase sorbida (sólida), T^{-1} .

Sustituyendo los términos de la izquierda y de reacciones en la ecuación de transporte, y prescindiendo del índice de las especies para simplicidad de su presentación, la ecuación puede ser arreglada y presentada como sigue:

$$\theta \frac{\partial C}{\partial t} + \rho_b \frac{\partial \bar{C}}{\partial t} = \frac{\partial C}{\partial x_i} \left(\theta D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\theta v_i C) + q_s C_s - q'_s C^k - \lambda_1 \theta C - \lambda_2 \rho_b \bar{C} \quad (4)$$

Esta ecuación es esencialmente una ecuación de balance de masa, es decir, que el cambio en la masa almacenada (en fase disuelta y sorbida) a cualquier tiempo dado es igual a la diferencia en la masa de entrada o de salida, debida a dispersión advección, sumideros y fuentes, y reacciones químicas.

El equilibrio local se asume a menudo para varios procesos de sorción. Con *equilibrio local asumido*, se acostumbra expresar la ecuación anterior como

$$R\theta \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial C}{\partial x_i} \left(\theta D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\theta v_i C) + q_s C_s - q'_s C^k - \lambda_1 \theta C - \lambda_2 \rho_b \bar{C} \quad (5)$$

donde: R es conocido como el factor de retardación, el cual es un factor adimensional definido como:

$$R = 1 + \frac{\rho_b}{\theta} \frac{\partial \bar{C}}{\partial C} \quad (6)$$

cuando el *equilibrio local asumido* no es apropiado, el proceso de sorción es representado a través de una ecuación de transferencia de masa cinética de primer orden.

La ecuación de transporte está relacionada con la ecuación de flujo a través de la Ley de Darcy:

$$v_i = \frac{q_i}{\theta} = -\frac{K_i}{\theta} \frac{\partial h}{\partial x_i} \quad (7)$$

donde

K_i es un componente principal del tensor de conductividad hidráulica, LT^{-1} ;

h Es la carga hidráulica, L.

La carga hidráulica es obtenida de la solución de la ecuación de flujo de agua subterránea tridimensional:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(K_i \frac{\partial h}{\partial x_i} \right) + q_s = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (8)$$

donde: S_s es el almacenamiento específico del acuífero, L^{-1} , y q_s es el término de flujo de fuente o sumidero tal como se definió en la ecuación de transporte.

En las dos ecuaciones anteriores está implícito el supuesto de que los componentes principales del tensor de conductividad hidrodinámica, K_x , K_y , y K_z , están alineados a los ejes de coordenadas, de modo que todos los otros componentes no principales (términos cruzados) se hacen cero. Este supuesto es incorporado en los modelos más comúnmente usados para flujo subterráneo por el método de diferencias finitas, incluyendo el MODFLOW (McDonald and Harbaugh, 1988, Harbaugh and McDonald, 1996).

Advección

El término de reacción de la ecuación de transporte, $\partial(\theta v_i C) / \partial x_i$, describe el transporte miscible de contaminantes a la misma velocidad del agua subterránea. Para muchas de las escalas de campo de problemas de transporte de contaminantes, el término de advección domina sobre otros términos.

Dispersión

La dispersión en medios porosos, se refiere a la distribución de los contaminantes sobre una región más amplia que la que sería predecible con solo el promedio de vectores de velocidad del agua subterránea. La dispersión es causada por dispersión mecánica, como resultado de desviaciones de la velocidad a escala microscópica de la velocidad promedio, y por difusión molecular, gobernada por gradientes de concentración.

Los coeficientes de dispersión hidrodinámica (ver ecuación no.1) están dados por las siguientes ecuaciones:

$$D_L = \alpha_L V_i + D^*$$

$$D_T = \alpha_T V_i + D^*$$

Donde D_L y D_T son los coeficientes la dispersión longitudinal y transversal respectivamente; D^* es el coeficiente efectivo de difusión (L^2T^{-1}); y α_L y α_T son las dispersividades lateral y transversal (L) respectivamente. Para estimar la dispersividad longitudinal, se puede utilizar la siguiente relación

Reacciones químicas

El modelo que se aplicó para esta tesis, el MT3DMS (Zheng, 1990), es capaz de manejar sorción lineal o no lineal de equilibrio controlado, sorción no equilibrada, y reacción de primer orden, que puede representar decaimiento radiactivo o proveer una aproximación de la biodegradación. La formulación general, que está diseñada para modelar la sorción de rango limitado, puede también ser usada para modelar transferencia cinética de masa entre los dominios móvil e inmóvil.

Sorción lineal o no lineal de equilibrio controlado

La sorción se refiere al proceso de transferencia de masa entre los contaminantes disueltos en el agua subterránea (fase acuosa) y los contaminantes sorbidos en el medio poroso (fase sólida). Generalmente se asume que existen condiciones de equilibrio entre las concentraciones de de la fase acuosa y la fase disuelta, y que la reacción de porción es suficientemente rápida respecto a la velocidad del agua

subterránea de manera que se puede tomar como instantánea. La relación funcional entre las concentraciones disueltas y sorbidas bajo temperatura constante es denominada como sorción isotérmica. Las porciones isotérmicas de equilibrio controlado son incorporadas al modelo de transporte a través del factor de retardación ya definido. Tres tipos de sorción isotérmica de equilibrio controlado son considerados en el modelo MT3DMS: lineal, Freundlich y Langmuir.

La sorción isotérmica lineal asume que la concentración sorbida (\bar{C}) es directamente proporcional a la concentración disuelta (C):

$$\bar{C} = K_d C \quad (9)$$

donde: K_d es el coeficiente de distribución, L^3M^{-1} . El factor de retardación es así dado por:

$$R = 1 + \frac{\rho_b}{\theta} \frac{\partial \bar{C}}{\partial C} = 1 + \frac{\rho_b}{\theta} K_d \quad (10)$$

La isotérmica Freundlich es una isotérmica no lineal que puede ser expresada de la siguiente forma:

$$\bar{C} = K_f C^a \quad (11)$$

donde

K_f es la constante de Freundlich, $(L^3M^{-1})^a$;

a Es el exponente de Freundlich, adimensional.

Ambos coeficientes son empíricos. Cuando el exponente a es igual a la unidad, ésta isotérmica es equivalente a la isotérmica lineal. El factor de retardación para la isotérmica Freundlich es definido como:

$$R = 1 + \frac{\rho_b}{\theta} \frac{\partial \bar{C}}{\partial C} = 1 + \frac{\rho_b}{\theta} a K_f C^{a-1} \quad (12)$$

Sorción no equilibrada

Cuando el supuesto de equilibrio local no es válido, se asume que el proceso de sorción puede ser representado a través de una reacción cinética reversible de primer orden:

$$\rho_b \frac{\partial \bar{C}}{\partial t} = \beta \left(C - \frac{\bar{C}}{K_d} \right) \quad (13)$$

donde: β es la razón de transferencia de masa de primer orden entre las fases disuelta y sorbida, T^{-1} ; y K_d es el coeficiente de distribución para la fase sorbida, como fue definida previamente, para la sorción lineal. La ecuación anterior tiene que ser resuelta simultáneamente con la ecuación gobernante de transporte para obtener las soluciones de transporte de solutos afectados por la sorción no equilibrada. Conforme la razón de transferencia de masa β , se incrementa, esto es, que el proceso de sorción se hace incrementalmente más rápido, la sorción no equilibrada se aproxima a la sorción lineal de equilibrio controlado. Para valores muy pequeños de β el intercambio entre las fases acuosas y la sólida, es tan lento que la sorción se hace esencialmente despreciable.

Decaimiento radioactivo o biodegradación

El término de la razón de reacción irreversible de primer orden, incluido en la ecuación gobernante, $-(\lambda_1 \theta C + \lambda_2 \rho_b \bar{C})$, representa la pérdida de masa tanto de la fase disuelta (C) como de la fase sorbida (\bar{C}). La constante de la razón es usualmente dada en términos de la vida media:

$$\lambda = (\ln 2) / t_{1/2} \quad (14)$$

donde $t_{1/2}$ es la vida media del material radioactivo o biodegradable, esto es, el tiempo requerido para que la concentración decrezca a un medio del valor original.

En el caso que nos ocupa se simula el flujo por advección y dispersión de los nitratos liberados por la laguna, que entran en solución en el agua subterránea, por esta razón el proceso dominante es la advección, que queda claramente demostrado con el movimiento de las partículas.

Parámetros de Transporte

La simulación de la migración y degradación de los compuestos de interés requiere que se especifiquen los distintos parámetros que controlan la tasa, movimiento, mezcla y absorción de los compuestos de interés en el subsuelo. En este caso, el transporte y destino de los compuestos de interés fue simulado usando los procesos de advección y dispersión. La advección define el proceso de migración de los contaminantes debido al movimiento del agua subterránea. La absorción se refiere a la partición de un contaminante entre las fases líquida y sólida del acuífero.

Una limitante del esquema de diferencias finitas aplicado por MT3D es que existe una dispersión numérica inherente a los resultados de la simulación. La dispersión numérica es función del tamaño de la celda de la malla y del tamaño del paso de tiempo. La dispersión numérica puede ser calculada en una base de bloque a bloque en modelos resueltos usando métodos de diferencias finitas (Zheng y Bennett, 1995). La aplicación de las ecuaciones reportadas por Zheng y Bennett (1995) indica que la dispersión numérica es de aproximadamente un medio del tamaño del espaciamiento entre celda y celda de la malla (de aproximadamente 2.5 metros para este análisis en el área de interés); por lo tanto los coeficientes de dispersión numérica fueron generalmente insignificantes en este caso.

Los valores de Dispersión considerados se obtuvieron de los publicados para aluviones derivados de tobas (Daniels, W.R., 1982) en el orden de 10 a 30 m para una distancia de 91 m, que se encuentra dentro del mismo orden de magnitud que presenta el caso en estudio. La razón de dispersividad transversal a longitudinal se tomó como 0.1 (Gelhar et al., 1992). La difusión molecular para el nitrato es igual a $5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{día}$ (Frind et al., 1990). Según algunos investigadores en el campo, la denitrificación es la reacción química dominante que afecta las concentraciones en el agua subterránea bajo condiciones anaeróbicas (Frind, op cit., 1990; Hantush and Mariño, 2001; Shamrukh et al., 2001).

La vida media del nitrato se encuentra en el rango de 1 a 2.3 años (Frind, op.cit.). No obstante estos valores no pueden ser generalizados a todos los casos porque la vida media del nitrato depende del tipo de acuífero. El nitrato es un compuesto con alta movilidad con escasa sorción en la matriz del suelo. Por lo tanto la sorción se considera despreciable y al coeficiente de retardación o de retardo se le asigna un valor de 1 (Shamrukh et al., 2001)

Considerando las evidencias de variaciones en el nivel freático, se simularon 10 períodos de estrés que corresponden con todo el tiempo de operación de la Laguna de Tratamiento de Abril de 2001 a Agosto de 2002.

Como condiciones iniciales, se consideraron las concentraciones con valor 0 al inicio de la operación de la granja. Los puntos de observación se consideran los pozos de monitoreo cercanos a la laguna.

Simulaciones de Transporte

El modelo de transporte de solutos fue usado para simular la migración de la pluma de los compuestos de interés en este caso los nutrientes, representados por el nitrato. Las concentraciones simuladas para este compuesto con respecto al tiempo fueron usadas para evaluar la efectividad del modelo.

Las concentraciones de filtración de la laguna, no se basan en las obtenidas de la muestra tomada del agua de la laguna por no ser representativa, pero si se considera la tasa de filtración obtenida de la simulación del perfil de la zona de la laguna mediante el modelo HELP.

La condición de frontera de concentración en la recarga fue asignada en el área cubierta por la laguna. Sin embargo, debido a los procesos mencionados en el capítulo II.6, la nitrificación se piensa está ocurriendo en la base de la laguna, pues la laguna está en condiciones anaeróbicas y los resultados del análisis no reflejan toda la cantidad de nitrato aportado al subsuelo.

La calibración de este modelo fue realizada con base en la comparación de concentraciones calculadas con las concentraciones de Nitratos obtenidas en los análisis para pozos de observación y en el pozo IGC-4, considerando la concentración de recarga desde la laguna uno de los parámetros a determinar.

Los resultados de este modelo, se presentan en la Figura 34 A, como puede verse en la misma, la distribución de la pluma de contaminantes disueltos en el agua presenta la configuración que se muestra.

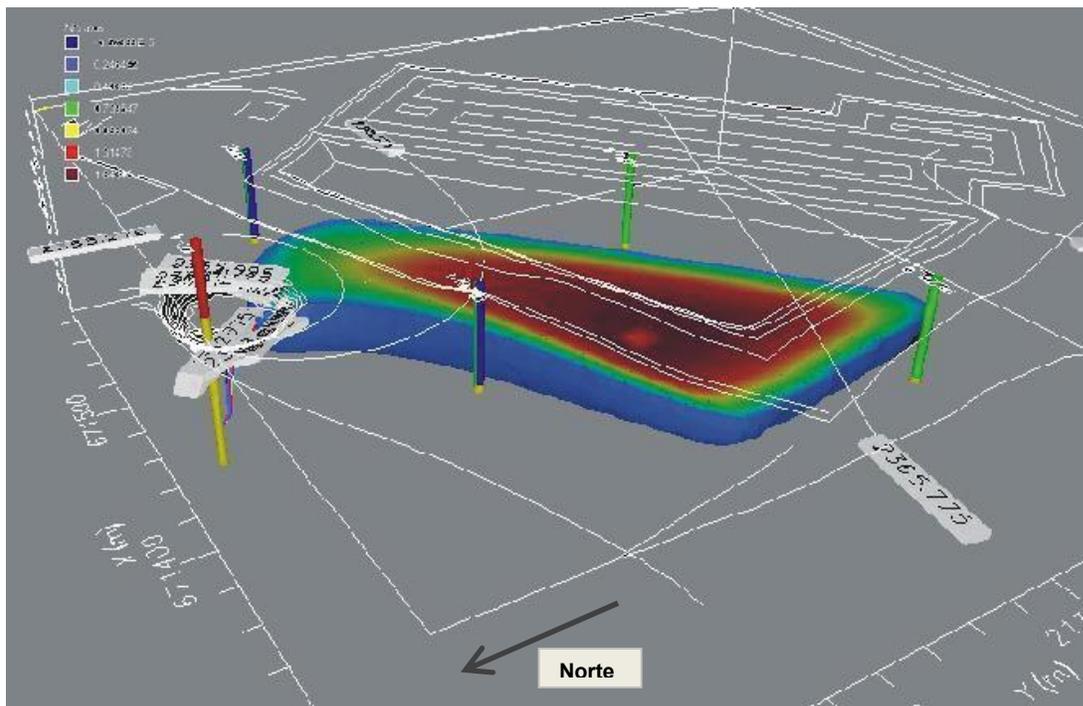


Figura 34 A. Resultados del modelo de transporte

La distribución de los solutos se encuentra definida por la dirección de flujo y las concentraciones más elevadas se encuentran en la periferia de la laguna. Como se ve en la Figura 34A, la pluma se alarga en la dirección de pozo de riego más cercano, cuya zona de captación captura parte de la pluma. Este tamaño de pluma contaminante es después de un año y medio de operación de la laguna. De alguna manera los procesos de atenuación natural no permiten que la pluma sea muy extensa, sin embargo las concentraciones que se detectan en los pozos de observación se encuentran por arriba de la norma oficial. Otro problema que no fue evaluado en este sitio es la contaminación difusa que está ocurriendo por el uso del agua tratada en la laguna para riego.

III.7. Geotecnia

Con base en los resultados obtenidos de la primera etapa de esta tesis, que indican que en efecto existe infiltración de contaminación orgánica hacia el acuífero. Se realizó una presentación de los resultados a la compañía propietaria de la granja 8, cuyos gerentes estuvieron de acuerdo en la necesidad de mejorar el revestimiento. En dicha presentación se propuso la realización de un estudio geotécnico para determinar el material apropiado para ser utilizado como plantilla en la construcción de una nueva laguna para evitar la contaminación del agua subterránea. El estudio fue realizado y con los resultados se hicieron pruebas del perfil de la plantilla propuesta. En los siguientes capítulos se presentan los resultados de dicho trabajo.

III.7.1 Trabajos de Campo

Los trabajos de exploración geotécnica se realizaron en predios propiedad de la compañía propietaria de la granja 8 y consistieron en excavar pozos a cielo abierto y zanjas realizadas con una máquina retroexcavadora. Durante la excavación en los pozos a cielo abierto, se obtuvieron muestras representativas de todos los estratos y muestras integrales de los estratos de mayor interés para el objetivo del trabajo además de elaborar la estratigrafía, y se efectuaron recorridos de verificación apoyados con fotointerpretación geológica a varios sitios ubicados en la periferia de la Granja (Figura 35) para ver las posibilidades de tener arcilla que pudiera ser utilizada como capa sello en el fondo de la laguna de tratamiento.

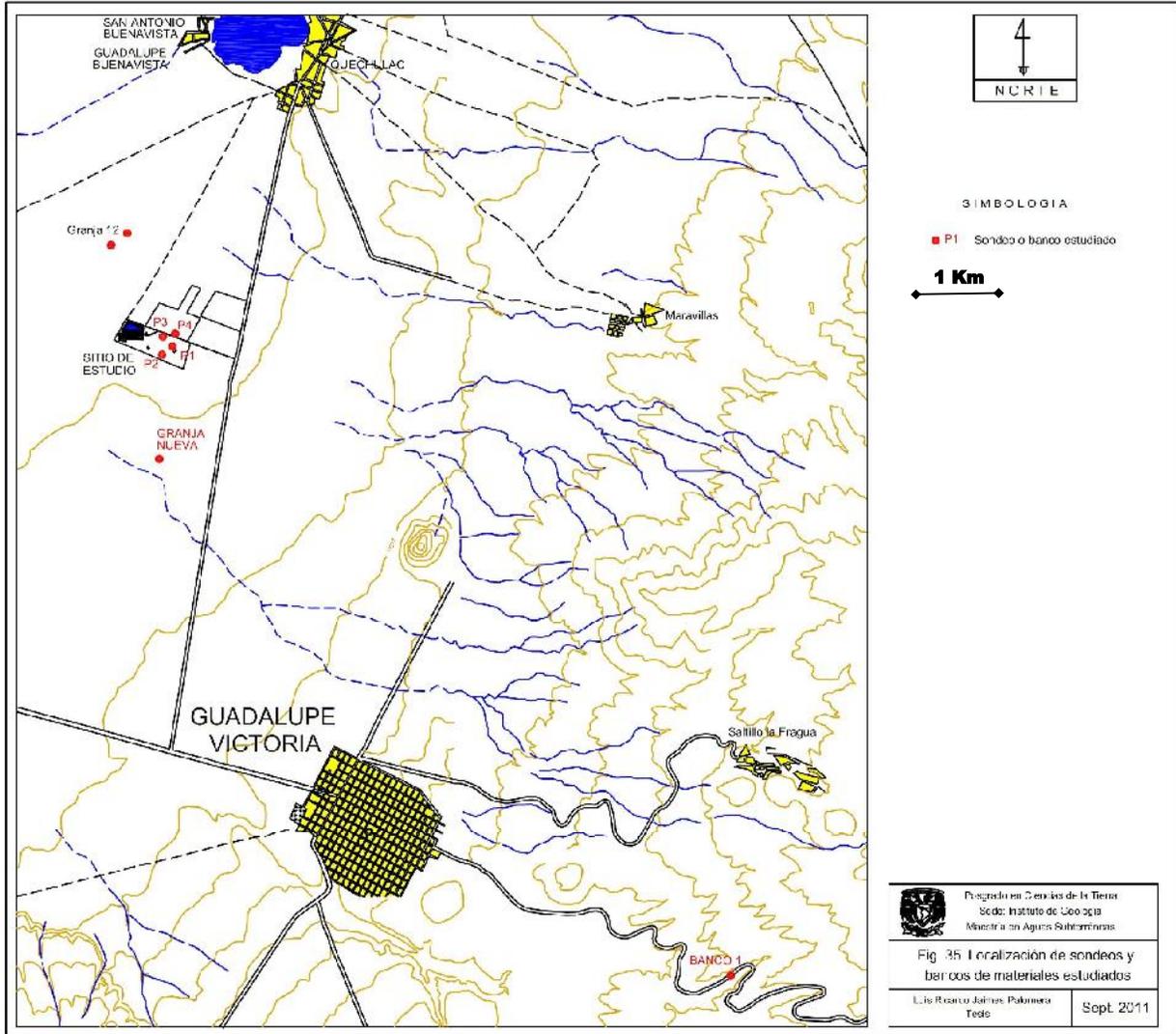


Figura 35. Localización de sondeos y bancos de materiales estudiados

Localización de Bancos de Materiales

Con el propósito de encontrar los materiales adecuados para construir revestimiento impermeable de fondo y lateral de la laguna de tratamiento, se realizó una investigación y exploración de bancos de materiales. Inicialmente y conjuntamente a la búsqueda de bancos de arcilla se obtuvieron muestras y trasladadas al Laboratorio para determinar sus propiedades mecánicas de suelo.

Como resultado de estos trabajos, se obtuvieron un total de 20 muestras, de ellas 3 son de tipo integral, en costales y las otras dos de tipo alterado representativas

de los estratos; y se localizaron tres posibles bancos de préstamo, uno de ellos ya está en operación y los otros dos en estratos se encuentran en el subsuelo de los terrenos de las Granjas. .

De los pozos a cielo abierto y los recorridos realizados, se puede concluir que el subsuelo está constituido por una secuencia esencialmente volcánica correspondiente a los depósitos piroclásticos. La secuencia presenta variaciones granulométricas de arena limosa a arcilla plástica. En la Figura 36, se presenta la sección geotécnica realizada.

Las muestras obtenidas en los trabajos de campo, fueron trasladadas al Laboratorio para realizarles los ensayos y análisis correspondientes.

De los pozos a cielo abierto y los recorridos realizados, se puede concluir que el subsuelo está constituido por una secuencia esencialmente volcánica correspondiente a los depósitos piroclásticos. La secuencia presenta variaciones granulométricas de arena limosa a arcilla plástica. En la Figura 36, se presenta la sección geotécnica realizada.

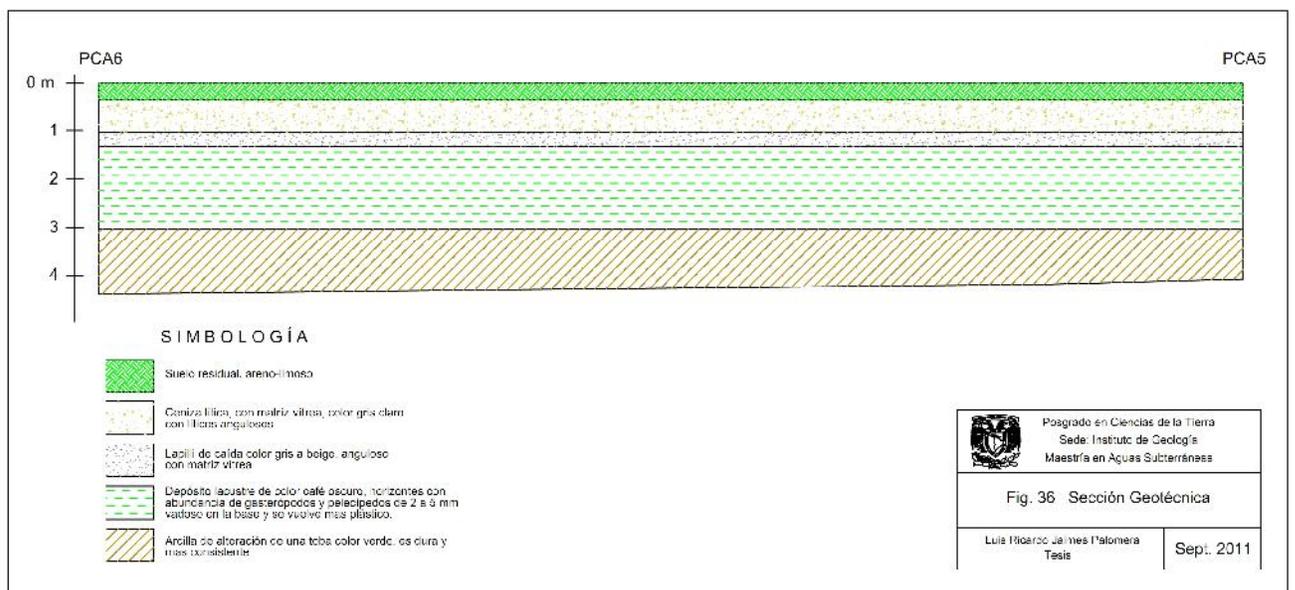


Figura 36. Sección Geotécnica

Con base en el registro de los sondeos a cielo abierto y resultados de las pruebas índice, las condiciones estratigráficas del subsuelo de la zona de los bancos 1 y 2 han quedado definidas como sigue:

Banco 1 (Área de la Granja en estudio)

1. Superficialmente el terreno muestra una topografía plana. El subsuelo en su parte superior, está constituido por una capa de suelo de origen volcánico de 0.25 a 0.6 m de espesor, con granulometría arenosa.

2. Subyaciendo al estrato superficial, se presenta un estrato grueso de materiales piroclásticos compuestos por ceniza lítica color gris claro con fragmentos de roca angulosa, que se clasifican como arena fina con tamaño de limo (SM). Esta secuencia continúa hasta los 2.10 m en donde se presenta otro estrato de piroclastos (surges), formado por arena fina mal graduada (SP), con un espesor del orden de los 0.2 a 0.3 m.

3. Subyaciendo a las capas anteriores, se presenta una toba vítrea con líticos, color café oscuro que desde el punto de vista del SUCS se clasifica como arcilla limosa con escasa arena (ML), este estrato contiene el material de interés para el objetivo propuesto, sin embargo, dicho estrato se va profundizando de este a oeste, encontrándose a una profundidad de 2.28 en el PCA-1 y a una profundidad de 2.50 en el sondeo 3, es decir su distribución es irregular lo que implica mayores trabajos para ser utilizado.

Los resultados de laboratorio indican un peso volumétrico máximo de 1.3 Ton/m³ con una humedad óptima del 34%, y presenta una permeabilidad de 3.1 x 10⁻⁶ cm/s.

Los resultados de los ensayos practicados a estos sondeos se presentan en el anexo 4.

El nivel freático se encontró a la profundidad de 10.5 m.

Banco 2 (Área de la granja 12)

1. Superficialmente el terreno muestra una topografía plana. El subsuelo en su parte superior, está constituido por una capa de suelo de origen volcánico, es una toba vítrea alterada (tepetate) de 0.25 a 0.3 m de espesor.

2. Subyaciendo al estrato superficial, se presenta un estrato grueso de materiales piroclásticos compuestos por ceniza lítica color gris claro con fragmentos de roca angulosa, clasificada como arena fina con finos tamaño limo (SM). Esta secuencia continúa hasta 1.0 m en donde también existe el estrato piroclástico (surges), de arena fina mal graduada (SP), con un espesor del orden de los 0.2 a 0.3 m.

3. debajo de los materiales anteriores, existe un estrato arcillo-limoso de origen lacustre, de color café oscuro a verde pálido, que desde el punto de vista del SUCS se clasifica como limo arcilloso (MH), que constituye el material excelente de interés para nuestro objetivo. Este estrato presenta un espesor de 1.7 m.

Debajo de este se encuentra otro estrato de limo de baja permeabilidad, aunque presenta fragmentos de roca mayores. En la Figura 36, se presenta una sección de este banco.

Este banco requiere un despalme de 1.45 m y la excavación de rampas para su extracción. Considerando un volumen de material para una laguna de 44,200 m², del orden de 27,000 m³ se requiere una superficie de 15 882 m² de terreno para obtener dicho material.

Este banco presenta las siguientes propiedades: Peso volumétrico máximo de 1.06 Ton/m³, con una humedad óptima del 47% y una permeabilidad de 2×10^{-7} cm/s.

4. El nivel freático está a 10.5 m de profundidad.

Los resultados de los ensayos practicados a estos sondeos se presentan en el anexo 4.

Banco 3 cercano en operación

Dada la naturaleza del vulcanismo que constituye la esta región, principalmente explosivo, la granulometría de los productos volcánicos presentes es principalmente de tamaño arena fina a grava con matriz vítrea. Por esta razón, los bancos con materiales de baja permeabilidad son escasos. El más cercano que reúne las características necesarias para el objetivo del trabajo, se encuentra a 9 Km de la granja en cuestión. Este material es una toba vítrea con líticos color pardo claro, conocido comúnmente como "tepetate".

Este banco 3, es un frente de explotación a orilla de carretera, en un predio ejidal y que cuenta con material en cantidad suficiente para los fines de este trabajo. Las propiedades índice y ensayos de laboratorio de este material indican que reúne las características para su uso como plantilla. Presenta un peso volumétrico máximo en la prueba próctor de 1.55 Ton/m³, con una humedad óptima de 22.8%, y una permeabilidad de 9.6×10^{-6} cm/s.

La ubicación de estos bancos de materiales se puede ver en la Figura No. 37 (Mapa general de Bancos de materiales).

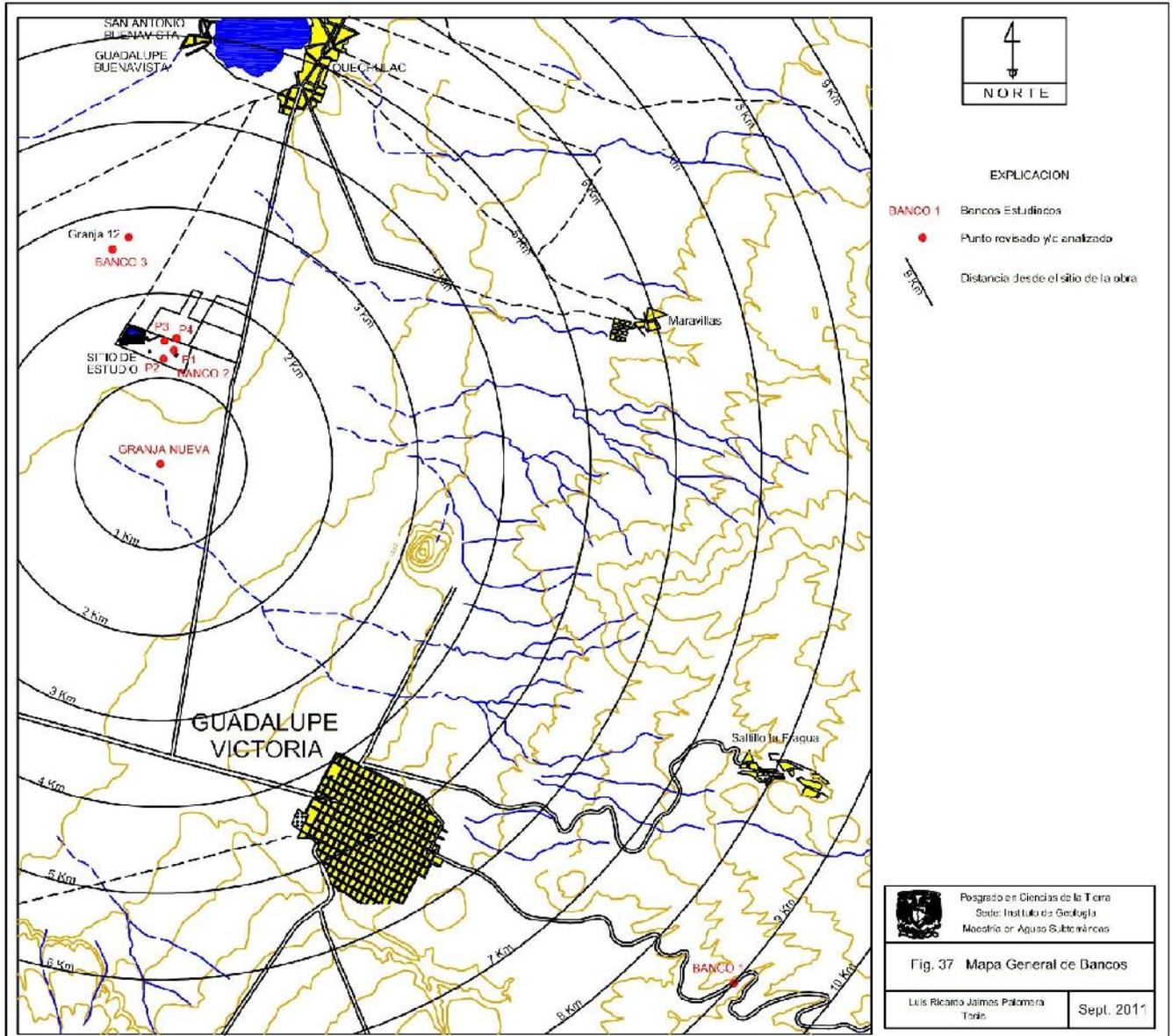


Figura 37. Mapa General de Bancos

III.7.2 Modelo de Flujo en la zona no saturada, simulación para predecir la infiltración considerando el diseño de plantilla propuesto

En esta fase del trabajo se utilizó nuevamente el modelo HELP, esta vez para probar la eficiencia de los materiales disponibles en la zona para ser utilizados en la construcción de la plantilla impermeable de la nueva laguna.

Este modelo, fue utilizado con objeto de obtener el balance hidrológico superficial y predecir la recarga vertical que ocurrirá en la laguna de tratamiento, adicionando el volumen de agua que se tendrá almacenado en la misma. Al igual que antes los datos con que fue alimentado el generador de clima del Visual HELP, son los que se recopilaron en las estaciones climatológicas más cercanas al sitio de interés, a los que se les sumaron los datos de volumen almacenado en la laguna. Los resultados de la infiltración para este caso, obtenidos con este programa, son en esencia los mismos antes presentados en la Figura 29, considerando una plantilla de 0.60 m de espesor de material del banco 3 con una permeabilidad de 2×10^{-7} cm/s, obtenida al 95% de la compactación próctor y con el grado de humedad óptimo recomendado por la prueba de compactación próctor practicada a este suelo.

Los resultados obtenidos indican lo siguiente:

La infiltración por lluvia en el terreno natural es del orden de 19.36 mm/año.

La infiltración considerando la colocación de una capa de arcilla de banco compactada hasta adquirir una permeabilidad de 1×10^{-7} cm/s es de 2.89 mm/año que daría una infiltración de 128 m³/año. Por lo tanto considerando este diseño conservador, el flujo infiltrado se reduce más de diez veces en comparación con el que fue obtenido en las condiciones en que se encontraba la laguna durante el tiempo en que fue realizada esta tesis.

Tabla 6. Comparación de resultados del Visual HELP

	Resultados para la plantilla propuesta	Resultados para la plantilla existente
Infiltración mm/año	33.79	1499
Infiltración m ³ /año	19.36	128

III.7.3 Recomendaciones para la Colocación de la Plantilla impermeable de la laguna de tratamiento

Esta recomendación se presenta gráficamente en la Figura 38. El espesor mínimo de esta plantilla deberá ser de 0.60 m.

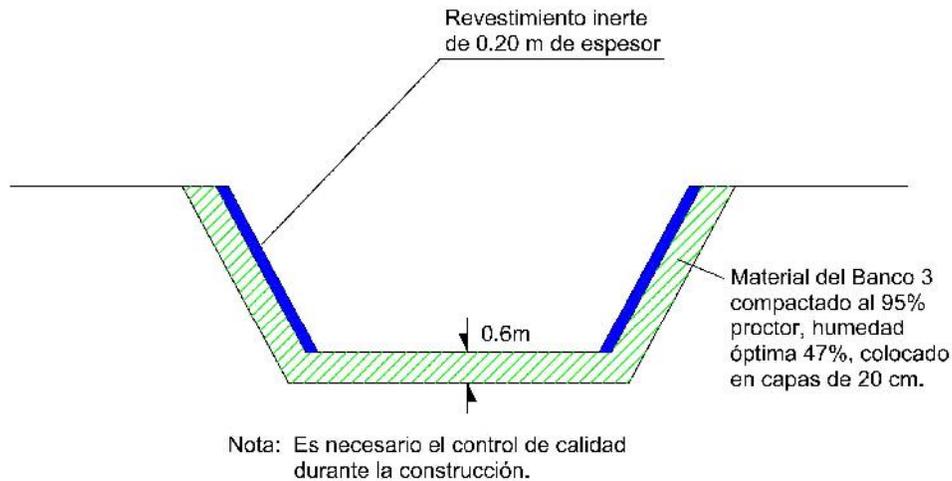


Figura 38. Croquis con recomendaciones para la colocación de la plantilla

El material de la plantilla impermeable deberá de ser del banco 3 que cuenta con un estrato de 1.7 m de espesor al que hay que despalmarle 1.45 m de material arenoso. Procurando que al extraer el material no se mezclen los materiales.

El contenido óptimo de humedad es el obtenido de la prueba próctor y corresponde al 47 %, que es menor al contenido natural de humedad, por lo que no será necesario adicionar agua, a menos que el material se haya dejado expuesto a la intemperie mucho tiempo. De cualquier manera se deberá llevar un control de calidad simultáneo a la colocación de las capas de la plantilla impermeable.

El peso volumétrico a compactar será el 95% de la prueba próctor, y será colocado en capas de 0.20 m de espesor.

Al incorporarle la siguiente capa a la plantilla se deberá humedecer la superficie lo necesario para la aplicación de la siguiente capa.

Dada la naturaleza del material es recomendable la utilización de un equipo de compactación con rodillos tipo pata de cabra.

En los taludes deberá ponerse especial cuidado en la compactación del material y en esta zona esta plantilla deberá revestirse con una capa de 0.20 m de material de banco inerte, para proteger estas zonas de posibles agrietamientos.

Finalmente como nota adicional estas recomendaciones al parecer fueron seguidas por la compañía propietaria de la granja 8 y tomadas en cuenta para los futuros diseños de otras granjas en la misma región, algunos de ellos en las mismas condiciones de vulnerabilidad del acuífero.

IV. CONCLUSIONES

Como resultado de los trabajos de exploración geotécnica realizados en los terrenos de las granjas en estudio y sus alrededores, se puede concluir que el subsuelo está constituido por una secuencia esencialmente volcánica correspondiente a los depósitos piroclásticos de caída de flujo, provenientes tanto de los domos las Derrumbadas, como de los cráteres de explosión freatomagmática conocidos comúnmente como xalapascos,

Las cinco unidades hidrogeológicas que se hallan debajo de la laguna, son principalmente, limos arenosos y arenas, todos con permeabilidades que permiten la infiltración de solutos, partículas y agua de la Laguna de Tratamiento.

En el orden de la más somera a la más profunda son las siguientes: 1) las primeras cuatro capas están formadas por cenizas vítreas de caída, tobas y otros productos piroclásticos con $K = 2.8 \times 10^{-6}$ m/s; 2) Toba semiconsolidada alterada a arcilla de baja plasticidad $K = 4.5 \times 10^{-6}$ m/s; 3) dos capas de ceniza lítica y vítrea $K = 1.4 \times 10^{-5}$ m/s; 4) capas de ceniza vítrea $K = 7.9 \times 10^{-6}$ m/s; 5) varias capas de lapilli que va incrementando su tamaño a profundidad $K = .6 \times 10^{-4}$ m/s.

Los parámetros hidráulicos de las unidades hidrogeológicas son de entre 10^{-6} a 10^{-4} m/s y esto indica que la zona es muy vulnerable por lo que se concluye que el diseño de la laguna existente es deficiente y fue necesario vaciarla para colocar una plantilla impermeable adecuada.

Se realizó un Levantamiento Geofísico mediante la técnica del Sondeo por Transitorio Electromagnético en el Dominio del Tiempo en el que se efectuaron 41 TEM, para caracterizar eléctricamente los primeros 80m de profundidad. Se construyeron 4 Mapas de resistividad para diferentes profundidades, en los cuales se observan cambios de resistividad asociados con la posible alteración en la calidad del agua, modificada posiblemente por los residuos descargados a la Laguna y también posiblemente por los cambios litológicos. Los perfiles de resistividad ilustran el comportamiento espacial de los materiales del Subsuelo, y también ilustran la distribución de una zona anómala, la cual se restringe aparentemente a la Zona de la Laguna, como se presenta en el los perfiles del capítulo III.2.2.

Las altas conductividades registradas en este levantamiento de TEM, indican condiciones anómalas agrupadas por la Unidad U1aa, de la cual no se tiene la certeza de una correspondencia franca con los contaminantes de la Laguna. Sin embargo, de acuerdo a sus características conductoras y su posición estratigráfica, se considera como la de mayor potencial para presentar contaminación por estos residuos.

El modelo de la zona no saturada Visual HELP, en el que se consideran perfiles considerando las capas de suelo y de material compactado de la laguna, indica que existe filtración de agua debajo de la laguna. Para alimentar este modelo se realizaron sondeos directos a los que se les efectuaron pruebas de permeabilidad a distintas profundidades. Para el modelo de las condiciones existentes en la laguna se consideraron los resultados de las pruebas de campo y laboratorio previamente realizadas a la plantilla existente. Se simularon escenarios considerando una plantilla óptima y luego se simuló la platilla diseñada con los materiales encontrados en los bancos de materiales. Los resultados indican que la infiltración se reduce de 1499 m³/año a 128 m³/año. Es importante mencionar que esta plantilla debe ser colocada con mucho cuidado y evitar la formación de grietas.

Los resultados de los análisis físico-químicos y bacteriológicos, confirman la presencia de solutos en el subsuelo cercano a la laguna de tratamiento y en dirección del flujo de aguas subterráneas. Que es de SW a NE, y ya se encuentra a una distancia de aproximadamente 50 m y avanza a razón de decenas de metros por año considerando que la vida de la laguna era de un año y medio cuando se realizó el trabajo de campo, por lo que se hizo necesario actuar cuanto antes para remediar esta situación.

Desde el punto de vista hidrogeoquímico, los sólidos totales disueltos, los nutrientes (nitratos y fosfatos) y las bacterias en los pozos de monitoreo, nos indican que la laguna está infiltrando agua con una mayor concentración de sales, que se debe a la concentración por evaporación. Estas concentraciones se manifiestan en los pozos de monitoreo y posteriormente en el pozo IGC-4, indicando que la influencia de la laguna se reduce actualmente a unos cuantos metros a la redonda en el sentido de flujo de aguas subterráneas, y que alcanza a manifestarse en el pozo IGC-4, aunque todo por debajo de los criterios de calidad para uso agrícola de la CNA.

El modelo de flujo tridimensional de aguas subterráneas, indica que los solutos provenientes de la Laguna fluyen y arriban al pozo IGC-4 mediante transporte advectivo.

Los aportes y beneficios que se obtienen para otros sitios con este trabajo es que en este tipo de acuíferos vulnerables siempre debe diseñarse una plantilla adecuada para este tipo de lagunas ya que se infiltra una buena cantidad de agua al acuífero.

Con base en los resultados obtenidos en esta tesis, se concluye que este tipo de contaminación sufre atenuación natural y en el caso que nos ocupa la distancia al receptor es corta.

Es importante mencionar que la contaminación difusa no fue evaluada como parte de esta tesis, pero es algo que se encuentra presente en este tipo de granjas, pues el agua tratada en la laguna es usada para regar cultivos para alimento del ganado porcino. En este sitio donde se encuentra la granja, el uso del suelo es netamente agrícola, sin embargo el número de estas granjas ha proliferado en los valles Oriental y de Perote los últimos años y muchas de ellas se encuentran adyacentes a zonas pobladas. El efecto de la contaminación difusa y posibles fallas en las lagunas es algo que debe considerarse en la evaluación de la calidad del agua de estos acuíferos, especialmente en la cercanía a los pozos de abastecimiento de plantas de producción de alimentos o de agua potable.

V. RECOMENDACIONES

V.1 Recomendaciones Generales

Dado que las filtraciones en la laguna de tratamiento, fueron corroboradas con las diferentes técnicas utilizadas en el presente estudio, se recomendó la construcción de una nueva laguna cercana a la anterior, en cuyo procedimiento constructivo, se observarán rigurosamente los controles de calidad, tanto en granulometría, límites de consistencia, peso volumétrico como en grado de compactación, para ello, fue importante contar con el estudio de bancos de préstamo de los materiales requeridos, pues como se desprende de los resultados de esta tesis, el material que fue usado en la Laguna de tratamiento, no cumplió con los requerimientos de diseño.

Por esto para la nueva laguna de tratamiento será importante verificar la eficiencia del sistema y su ubicación en el entorno de la dirección de aguas subterráneas, considerando el ambiente hidrogeológico, y la posible afectación a predios vecinos, esto como una prevención extra, ya que por sí mismo, el sistema, deberá garantizar su impermeabilidad.

Se recomienda realizar a partir de este momento, muestreo hidrogeoquímico mensual en todos los piezómetros y medición de los niveles, mismo que deberá realizarse bajo la supervisión de especialistas en hidrogeoquímica e hidrogeología, a fin de que tanto el muestreo como los análisis, correspondan con los parámetros que para este fin deben ser considerados (iones mayores principalmente). Asimismo, se recomienda realizar un muestreo bacteriológico mensual, en los pozos de monitoreo.

El agua de la laguna actual, deberá ser conducida a la nueva laguna y el residuo sólido retirado, para, como una alternativa probable, funcionar como abono en los cultivos propiedad de las Granjas, en caso de que las autoridades competentes así lo aprueben.

VI. BIBLIOGRAFÍA

- Anderson y Woessner, 1992, Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport. Academic Press Inc. San Diego California.
- Back, W., 1961, Techniques for mapping of hydrochemical facies: U.S. Geol. Surv. Prof. Paper 424-D, p. 380-382.
- Capone D., R. Popa, B. Flood and K. H. Nealson, 2006. Follow the Nitrogen, Science 5 May 2006: pp. 708-709.
- Comisión Federal de Electricidad. 1991. Geología regional del área de la caldera los Humeros, Estados de Puebla y Veracruz. Gerencia de Estudios de Ingeniería Civil.CFE. México.
- Comisión Nacional del Agua. 1997. Reactivación de las redes de monitoreo del acuífero de Oriental, Estado de Puebla.
- Consejo de Recursos Minerales. 1998. Síntesis minera del Estado de Puebla.
- Cooper, H.H. and C.E. Jacob, 1946. A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history, Am. Geophys. Union Trans., vol. 27, pp. 526-534.
- Crane S.R. and J. Moore. 1984. Bacterial pollution of groundwater: a review. Water, Air & Soil Pollution. Volume 22, Number 1, 67-83.
- Daniels,W.R. (ed.), 1982, Laboratory field studies related to the radionuclide migration project. Progress Report LA-8670-PR Los Alamos Sci. Lab., Los Alamos NM.
- Freeze, R.A. and Cherry, J.A., 1979, Groundwater, Englewood Cliffs, N.J., Prentice may, 604 p.
- García, Enriqueta. 1987. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. 5ª ed. UNAM, México D.F. 67pp.
- Gelhar, L.W., Welty, C., Rehfeldt, K., 1992. A critical review of data on field-scale dispersion in aquifers. Water Resources Research 28 (7), 1955–1974.
- Guiguer, Nilson, Franz, Thomas, 2002, Users Manual for Visual MODFLOW Pro 3.0, Waterloo hydrogeologic Inc, Waterloo, Ontario, Canada, 319 pp.

- Hantush, M., Mariño, M., 2001. Analytical modeling of the influence of denitrifying sediments on nitrate transport in aquifers with sloping beds. *Water Resources Research* 37 (12), 3177–3192.
- Hvorslev, M.J., 1951. Time Lag and Soil Permeability in Ground-Water Observations, Bull. No. 36, Waterways Exper. Sta. Corps of Engrs, U.S. Army, Vicksburg, Mississippi, pp. 1-50.
- Schroeder, P.R. Dozier T.S., Zappi P.A., McEnroe B.M., Sjostrom J.W. and Peyton R.L. 1994. The Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) Model: Engineering Documentation for Version 3. EPA/6, U.S. Environmental Protection Agency Office of Research and Development, Washington. D.C.
- Frind, E., Duynisveld, W., Strebel, O., Boettcher, J., 1990. Modeling of Multicomponent transport with microbial transformation in ground water: the Fuhrberg case. *Water Resources Research* 26 (8), 1707–1719
- INEGI. 1983. Carta Geológica 1:250,000. Instituto Nacional de Geografía e Informática. Mexico. DF.
- INEGI. 2000. Espaciomapas digitales escala 1:250,000. Instituto Nacional de Geografía e Informática. México. DF.
- Instituto de Ingeniería. 1991. Estudio Geohidrológico y Modelo Matemático de la Cuenca de Oriental, Estado de Puebla. Instituto de Ingeniería de la UNAM.
- Lefranc, E. 1936. Procédé de mesure de la perméabilité des sols dans les nappes aquiferes application au calcul du débit des puits. *Le Génie Civil*, CIX (15): 306-308.
- McDonald, Michael G., Harbaugh, Arlen W., 1988, A Modular Three Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model, U.S. Geological Survey. *Techniques of Water-Resources Investigations*, Book 6, chap. A, 586pp.
- Muir, J.M., 1936, *Geology of the Tampico Region, Mexico*: Tulsa, American association of Petroleum Geologists, 280 p., 40 figs., 15 pls.
- Lloyd, 1985, *Groundwater Hydrochemistry*, John Wiley & Sons, Chichester. U.K.
- Newman, S. P., 1972, Theory of flow in unconfined aquifers considering delayed response of the water table. *Water Resources Res.*, Vol. 8, pp. 1031-1045.

- Norma Oficial Mexicana de la Secretaría de Salubridad y Asistencia, 1994, NOM-127-SSA1-1994, "Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización".
- Ortega Gutiérrez, F., L.M. Mitre Salazar, J. Roldán Quintana, J.J. Aranda Gómez, D.Morán Centeno, S.A. Alaniz Álvarez y A.F. Nieto Samaniego, 1992, Texto explicativo de la quinta edición de la carta geológica mexicana escala 1: 2 000 000. Instituto de Geología-Consejo de Recursos Minerales, México.
- Piper, A.M. 1944, A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. Trans. AMER. Geophys. Union, 25, pp. 914-923.
- Pollock, D.W., 1994, User's Guide for MODPATH/MODPATH-PLOT, Version 3: A particle tracking post-processing package for MODFLOW, the U.S. Geological Survey finite-difference ground-water flow model: U.S. Geological Survey Open-File Report 94-464, 234 p.
- Shamrukh, M., Corapcioglu, M., Hassona, F., 2001. Modeling the effect of chemical fertilizers on ground water quality in the Nile Valley Aquifer, Egypt. Ground Water 39 (1), 59–67.
- SUCS Sistema Unificado de Clasificación de Suelos Classification of Soils for Engineering Purposes: Annual Book of ASTM Standards, D 2487-83, 04.08, American Society for Testing and Materials, 1985, pp. 395–408
- Theis, C.V., 1935, The relation between the lowering of the piezometric and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage. Trans. AMER. Geophys. Union, Vol. 16, pp.519-524.
- Waterloo Hydrogeologic, 1998, AquiferTest User's Manual, Intuitive Analysis and Reporting of Pumping Test and Slug Test Data. Ontario, Canada.
- Wood, W.W., and G.G. Ehrlich, 1978, Use of Baker's Yeast to Trace Microbial Movement in Ground Water. Vol. 16, No. 6 –GROUND WATER – November-December 1978, pp. 398-403.
- Zheng, C., 1990, MT3D, A modular three-dimensional transport model for simulation of advection, dispersion, and chemical reactions of contaminants in groundwater systems, Report to the Kerr Environmental Research Laboratory, US Environmental Protection Agency, Ada, OK.
- Zheng, C., and G.D. Bennett, 1995, *Applied Contaminant Transport Modeling, Theory and Practice*, John Wiley & Sons, New York, 433 pp

APENDICE 1 PRUEBAS DE BOMBEO

APENDICE 2 ENSAYES DE LABORATORIO GEOTÉCNICO