



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLAS DE HIDALGO**



**INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN METALURGIA Y MATERIALES
MAESTRIA EN GEOCIENCIAS Y PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO**

**ANÁLISIS HIDROQUÍMICO, MODELACIÓN DE
FLUJO E INTERPRETACIÓN DEL
COMPORTAMIENTO DEL AGUA
SUBTERRÁNEA QUE ABASTECE A LA ZONA
DE MORELIA, MICHOACÁN MÉXICO.**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRA EN CIENCIAS

CON ESPECIALIDAD EN:

GEOCIENCIAS Y PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO

PRESENTA:

I.Q. AURORA MARÍA ESTRADA MURILLO

ASESORES:

DR. VICTOR HUGO GARDUÑO MONROY

COASESOR:

DR. VICTOR MANUEL HERNÁNDEZ MADRIGAL

FEBRERO 2015

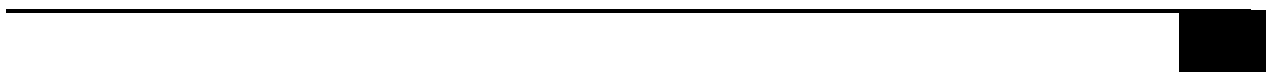
MORELIA, MICHOACÁN



ÍNDICE

<i>Resumen</i>	1
<i>Abstract</i>	2
I. INTRODUCCIÓN.....	3
I.I. DELIMITACIÓN	4
I.II. HIPÓTESIS	4
I.III. JUSTIFICACIÓN	4
I.IV. OBJETIVO GENERAL	5
I.V. OBJETIVOS PARTICULARES	5
II. ZONA DE ESTUDIO	6
<i>II.1. Morelia</i>	6
<i>II.1.1 Demografía de Morelia</i>	9
<i>II.1.2 Geomorfología y geología de Morelia</i>	11
<i>II.1.3. Geología Estructural</i>	20
<i>II.1.4. Hidrología</i>	25
<i>II.1.5. Geohidrología</i>	26
<i>II.1.6. Clima</i>	27
<i>II.1.7. Uso de suelo</i>	29
III. MARCO CONCEPTUAL	32
<i>III.1. Geohidrología</i>	32
<i>III.2. Geoquímica</i>	36
<i>III.3. Modelado en MODFLOW</i>	41
IV. ANTECEDENTES	42
<i>IV.1. Antecedentes Generales</i>	42
<i>IV.1.1 Antecedentes Cuenca del Lago de Cuitzeo y el Valle Morelia-Queréndaro</i>	46
<i>IV.1.2. Antecedentes Morelia</i>	48
V. MATERIALES Y MÉTODOS	54
<i>V.1. Selección e información de los sitios de muestreo</i>	55
<i>V.2. Colecta de muestras</i>	60
<i>V.3. Procedimiento de análisis de muestras</i>	61
<i>V.4. Método para la determinación del tipo de agua</i>	63

V.5. Procedimiento de modelación en MODFLOW	64
VI. RESULTADOS	65
VI.1. Parámetros Físicoquímicos medidos in situ	65
VI.2. Parámetros Físicoquímicos en laboratorio	70
VI.3. Elementos mayoritarios	72
VI.4. Tipo de agua analizada en la zona de estudio	76
VI.5. Balance iónico	77
VI.6. Coliformes totales y fecales	78
VI.7. Arsénico y metales pesados	79
VI.7.1 Mapas de iso-valores de arsénico y metales pesados.	80
VI.8. MODFLOW.	87
VII. ANÁLISIS DE RESULTADOS	90
VIII. CONCLUSIONES	91
Recomendaciones para trabajo futuro	93
Bibliografía.....	94
Índice de Figuras.....	100
ANEXO A	101
ANEXO B	109
ANEXO C	111
ANEXO D	114



Resumen

La ciudad de Morelia se localiza al noreste del estado de Michoacán y al suroeste de la cuenca endorreica de Cuitzeo. La ciudad de Morelia presenta una extensión aproximada de 98.04 km² y es flanqueada por estructuras volcánicas como el cerro del Quinceo-Las Tetillas al oeste, el Phuhuato al este, la Sierra de Mil Cumbres (SMC) al sur y el cerro del Águila al suroeste. Presenta una elevación aproximada de 1990 msnm y su principal efluente es el río Grande cuyo flujo es hacia el E-NE. Las principales unidades geológicas que presenta son en la base andesitas de SMC, seguido por flujos piroclásticos ignimbríticos (Cantera de Morelia), flujos de lava andesítica y dacítica del Punhuato, secuencia fluviolacustre y en la cima una secuencia volcánica correspondiente a los productos de lavas andesítico-basálticas del Quinceo, las Tetillas y el cerro del Águila.

La ciudad ha crecido de manera descontrolada, así mismo de su población y estos factores influyen en la demanda de recursos naturales para el bienestar social. A través de esta problemática de demanda es indispensable comprender el funcionamiento de los medios naturales para la obtención de recursos de manera sustentable. Por tanto mediante el estudio del acuífero de Morelia a partir de una pequeña red de monitoreo se inició en este trabajo el reconocimiento de general del acuífero que abastece la ciudad y su relación con las estructuras geológicas de la ciudad. Obteniendo mediante modelación de flujo en MODFLOW, una dirección de agua subterránea predominantemente de SO-NE, favorecida por cargas hidráulicas menores al N de la ciudad. Además, mediante análisis químico se obtuvo la determinación del comportamiento entre las estructuras geológicas (fallas y bloques) y el agua del acuífero, encontrándose que las fallas geológicas funcionan como de recarga pluvial hacia el acuífero de la ciudad de Morelia, ya que en sectores con mayor densidad de fallas se observan menores concentraciones de parámetros fisicoquímicos, lo que sugiere una dilución de concentraciones especialmente en pozos situados próximos a fallas. También se determinó que debido a esa facilidad de recarga al acuífero, es susceptible a ser fácilmente contaminado y distribuir rápidamente los contaminantes sobre todo en dirección favorable al flujo, ya que las conductividades hidráulicas documentadas utilizadas para la modelación de unidades geológicas de la zona, favorecen cortos tiempos de residencia de líquido, así como también los valores analizados para iones mayoritarios, siendo principalmente Na⁺ y HCO₃⁻, este anión es un indicador de que el agua de la zona es de fácil acceso como de fácil remisión.

Trabajos futuros de este tipo se recomienda que sean abordados de manera multidisciplinaria debido a la complejidad del fenómeno. También es importante considerar que los estudios realizados para esta rama, requieren de continuidad presentando así valores significativos, mínimo periodos de 10 años, de esta manera poder identificar patrones que ayuden a su comprensión. Es imperativo recopilar información actualizada y amplia de geología, topografía, hidrología,

hidrogeología, geomorfología y geoquímica de la zona de estudio para poder concluir premisas con mayor claridad.

Abstract

The Morelia city is located at northeast of the state of Michoacán, in Cuitzeo southwest. Morelia has an urban area which covers a territory of 98.04 km² nearly and is flanked by volcanic structures out, like the hill of Quinceo-Las Tetillas at the west, the Phuhuato in the east, at south Sierra of Milcumbres (SMC) and the Aguila hill in the southwest. Has an elevation of about 1990 msnm, the main effluent is the Rio Grande draining to E-NE. The leading geological units are SMC, followed by ignimbrite pyroclastic flows (Morelia's Quarry), andesitic lava flows and dacitic the Punhuato, fluviolacustrine sequence and on top a volcanic sequence corresponding to the products of Quinceo's andesitic-basaltic lavas, the Tetillas and the Aguila volcanic hill.

The city has shown an uncontrollable increase in its urban area, also of its population and these factors influence the demand for natural resources for social welfare. Through this grave demand is essential to understand how natural means work to obtain resources sustainably. Therefore by studying the Morelia's aquifer from a small monitoring network was planted start recognition generally aquifer that supplies the city and structural geological relationship to geological structure of the city. Getting by modeling flow in MODFLOW, a groundwater direction predominantly SO-NE, favored by lower hydraulic loads to N in the city. Also through chemical analysis determining the behavior between the geological structures (faults and blocks) and water from the aquifer, where it was found that the faults act as rainwater recharge to the aquifer Morelia, since in areas with higher density of faults lower concentrations of physicochemical parameters are observed, suggesting a dilution of concentrations especially in wells located near faults. It was also found that because of this ease of recharging the aquifer, is susceptible to be easily contaminated and speedily distribute contaminants especially favorable direction to the flow, as documented hydraulic conductivities used for modeling geologic units of the zone, favoring short residence times liquid, as well as the values analyzed for major ions, being mainly Na⁺ and HCO₃⁻, this anion is an indicator that the water in the area is easily accessible and easy reference.

Future work of this type are recommended to be approached in a multidisciplinary manner due to the complexity of the phenomenon. It is also important to consider that studies for this branch, require continuity thus presenting significant values, minimum period of 10 years, so you can identify patterns that help your understanding. It is imperative to collect updated and extensive information about geology, topography, hydrology, hydrogeology, geomorphology and geochemistry of the study area to conclude to the appropriate conclude clearly.

I. INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso necesario para los seres vivos, con mitos contruidos alrededor de ella y siempre fundamentados en el argumento de que el agua se acabará, a simple vista la sequía de manantiales superficiales es un factor detonante para estos mitos. Sin embargo, se sabe científicamente que esto no puede suceder ya que el agua es el elemento fundamental de un proceso natural denominado ciclo hidrológico, en donde este vital líquido no se crea ni se destruye, simplemente se transforma. Lo que realmente afecta a los seres vivos no es la ausencia de este líquido, sino su calidad y disponibilidad.

La cantidad total del agua sobre la Tierra se distribuye entre los océanos que conforman el 97.13%, los casquetes polares y los glaciares con el 2.4%, el agua subterránea con un 0.61%, y los ríos, lagos y corrientes con tan sólo el 0.02% del total (Henry y Heinke, 1999). El agua es un recurso natural con capacidad de regenerarse, pero muy susceptible a la contaminación por agentes externos. Su regeneración natural es lenta lo que provoca un agua con menor calidad con el paso del tiempo.

El agua para consumo humano debe tener un aspecto agradable, no debe contener sustancias perjudiciales a la salud y es necesario que se capte en zonas no contaminadas, ya que no debe tener sabor, color, olor ni bacterias. Lo anterior es fundamental para prevenir y evitar enfermedades, por lo que las características físicas, químicas y bacteriológicas del agua deben estar dentro de los límites permisibles establecidos por la normatividad vigente (DOF, 12-01-1994; EPA, 2002). Para conocer la calidad del agua y poder caracterizarla es necesario llevar a cabo una evaluación que comprenda la determinación de los parámetros fisicoquímicos. Pero para ello se requiere comprender el comportamiento del agua tanto en la superficie (hidrología) como en el substrato (hidrogeología). El agua subterránea de la ciudad de Morelia es el tema esencial de este trabajo y dado que es un recurso esencial para la vida es de gran importancia conocer su calidad y su comportamiento.

El agua subterránea generalmente tiene concentraciones superiores de sólidos disueltos, sulfatos y cloruros en comparación con las aguas superficiales, debido al contacto que existe entre el agua cargada de CO₂, las rocas y la tierra en el suelo, así como por el tiempo de disolución (Fetter, 1999, Páez-Sánchez A. 2008).

En este trabajo se caracterizó la composición hidroquímica de una red de monitoreo de pozos que abastecen de agua a la ciudad de Morelia, se hizo énfasis en su relación con respecto a las litologías existentes, su comportamiento dinámico y distribución espacio-temporal.

Se analizó principalmente la influencia de las fallas geológicas las cuales delimitan la formación de bloques en la zona y estos a su vez poseen el domino sobre la dirección de flujo del acuífero sin olvidar que las fallas son las predecesoras a dichos comportamientos. Mediante el acopio de

información de estudios previos en la zona así como datos actuales como profundidad, nivel dinámico y estático, y el gasto de los pozos monitoreados se realizó una modelización.

Es también de suma importancia considerar que el aumento poblacional y su concentración en las grandes urbes provocan una continua demanda de agua subterránea. El abastecimiento acelerando también provoca la sobreexplotación de pozos e induce a una mayor concentración de metales tóxicos e incremento de desechos sólidos. Por lo anterior se requiere de la comprensión del comportamiento de los sistemas hidrogeológico o geohidrológico de una región, identificando las modificaciones que puedan tener lugar en dicho sistema. Se resalta en el modelo geológico tridimensional de la ciudad de Morelia la presencia de fallas y fracturas por lo tanto es imperativo conocer sus orientaciones y litologías ya que el agua circulará por este medio dependiendo de la posición y propiedades hidráulicas de las formaciones y estructuras geológicas.

I.I. DELIMITACIÓN

El trabajo de investigación de esta tesis consistió en estudiar el acuífero de la ciudad de Morelia, a través de análisis geoquímicos para determinar la calidad del agua y su relación con la geomorfología del área. Todo ello soportado con una revisión bibliográfica amplia así como recopilación cartográfica. Esta última importante para la implementación del modelo numérico del comportamiento teórico del acuífero establecido en MODFLOW.

I.II. HIPÓTESIS

Las fallas geológicas que atraviesan a la zona de Morelia, son factores que alteran el flujo del agua subterránea y la calidad de la misma, al funcionar como barreras o conductos del flujo y de los contaminantes posibles.

I.III. JUSTIFICACIÓN

El agua subterránea de Morelia constituye la principal fuente de abastecimiento de agua potable para la ciudad. De acuerdo a un artículo reportado por la CNA (2009) en el valle Morelia-Querendaro se han extraído 162.2 hm³/año (hectómetros por año) en el 2007, donde considera que el 53.69 % es destinado para consumo agrícola, el 40.21% es usado en el área urbana y otros usos conforman el 6.1%, estima una salida de flujo en 60.3 hm³/año por manantiales y a través de evapotranspiración considera un valor de 64.2 hm³/año dando un total de 286.7hm³/año en el

balance de salida. En cambio para la recarga se considera una recarga vertical por lluvia con un valor de 160.2 hm³/año y un flujo horizontal de 88 hm³/año para la recarga por inducción se toma un valor de 38.5 hm³/año, todo esto para un área de 2030 km². Lamentablemente son datos generales de un área extensa, la cual en estas condiciones para este trabajo de tesis requiere ser acotada en un área más específica. A través de un modelo digital de INEGI, se realizó un recorte de un área de estudio más limitada de aproximadamente 340 km², permitiendo de esta manera reducir la zona para conocer mejor las características físicoquímicas y el comportamiento del acuífero y la influencia que tienen las fallas geológicas de la ciudad sobre este. Cabe mencionar que el incremento de la zona urbana presenta una proporción directa con respecto a la producción de contaminantes y una posible infiltración de lixiviados al acuífero, así como una disminución en áreas de recarga del acuífero.

I.IV. OBJETIVO GENERAL

Realizar análisis hidroquímico, modelación e interpretación del comportamiento del agua subterránea que abastece a la zona de Morelia Michoacán, México y su relación con las fallas geológicas, durante un año.

I.V. OBJETIVOS PARTICULARES

- Diseñar un modelo geohidrológico del comportamiento de los acuíferos que abastecen a la ciudad de Morelia, a través de la herramientas bibliográficas como: revisión de datos geológicos, estudios geofísicos, parámetros físicos, piezométricos y meteorológicos, útiles para la adecuada interpretación del comportamiento del acuífero así como la comparación de datos hidrogeoquímicos y análisis de resultados obtenidos.
- Evaluar la influencia de las fallas que atraviesan a la ciudad de Morelia con una dirección NE-SO y E-O sobre los acuíferos.
- Simular el comportamiento del acuífero en el programa computacional Modflow.
- Caracterizar los problemas actuales de contaminación en los acuíferos que abastecen la ciudad de Morelia.

II. ZONA DE ESTUDIO

II.1. Morelia

Morelia es la capital del estado de Michoacán de Ocampo, en el centro de México. Está ubicada entre las coordenadas 260 000m E 2190 000m N y 280 000m E 2190 000m N (Fig. 2.1). En la figura 2.1 también se localiza el valle Morelia-Queréndaro en la porción noreste del estado de Michoacán y queda comprendido dentro de la cuenca del Lago de Cuitzeo. El municipio de Morelia varía su altura de entre 1920 a 2200 metros sobre el nivel del mar (msnm) teniendo una superficie de 1,199.02 km². Limita al norte con Tarímbaro y el estado de Guanajuato, al sur con las localidades de Villa Madero, Acuitzio, Lagunillas y Tzitzio, al este con Charo y al oeste con Chucandiro, Huaniqueo, Coeneo y Quiroga presentes en la figura 2.2 (INEGI, 2005).

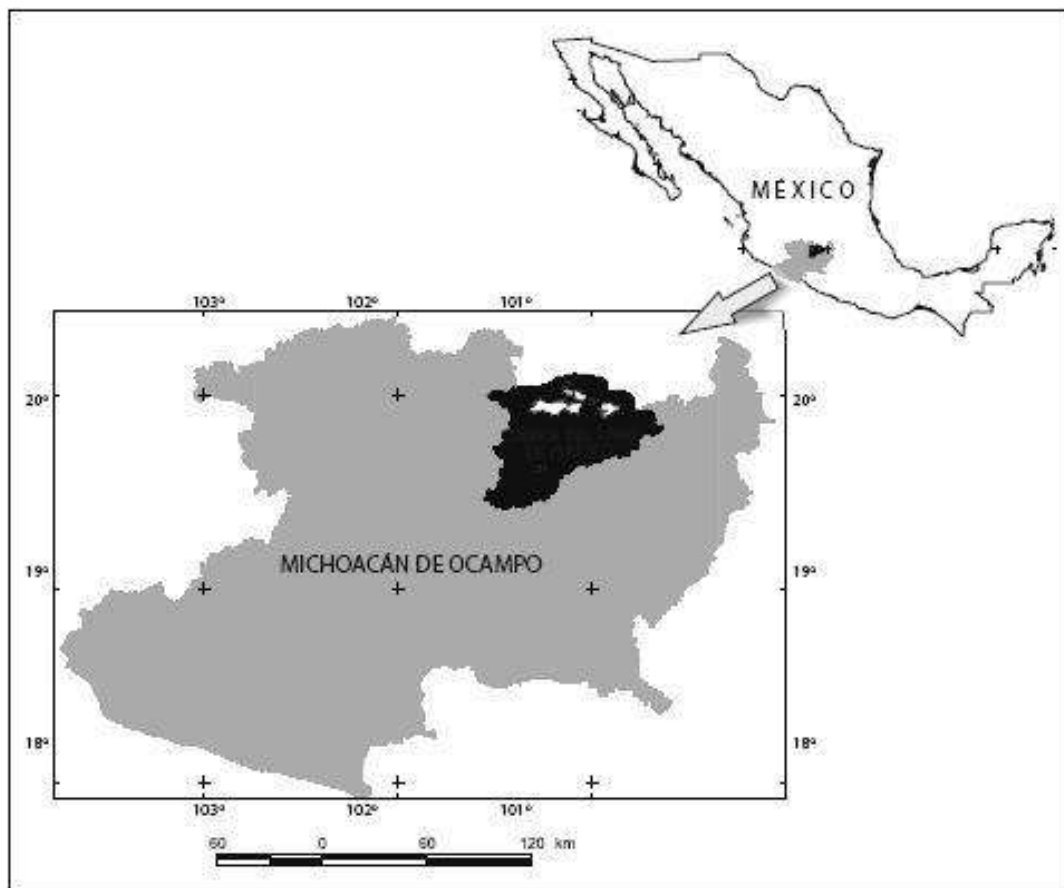


Figura 2.1. Ubicación del estado de Michoacán en la República Mexicana. Fuente Amador-García et al., 2011.

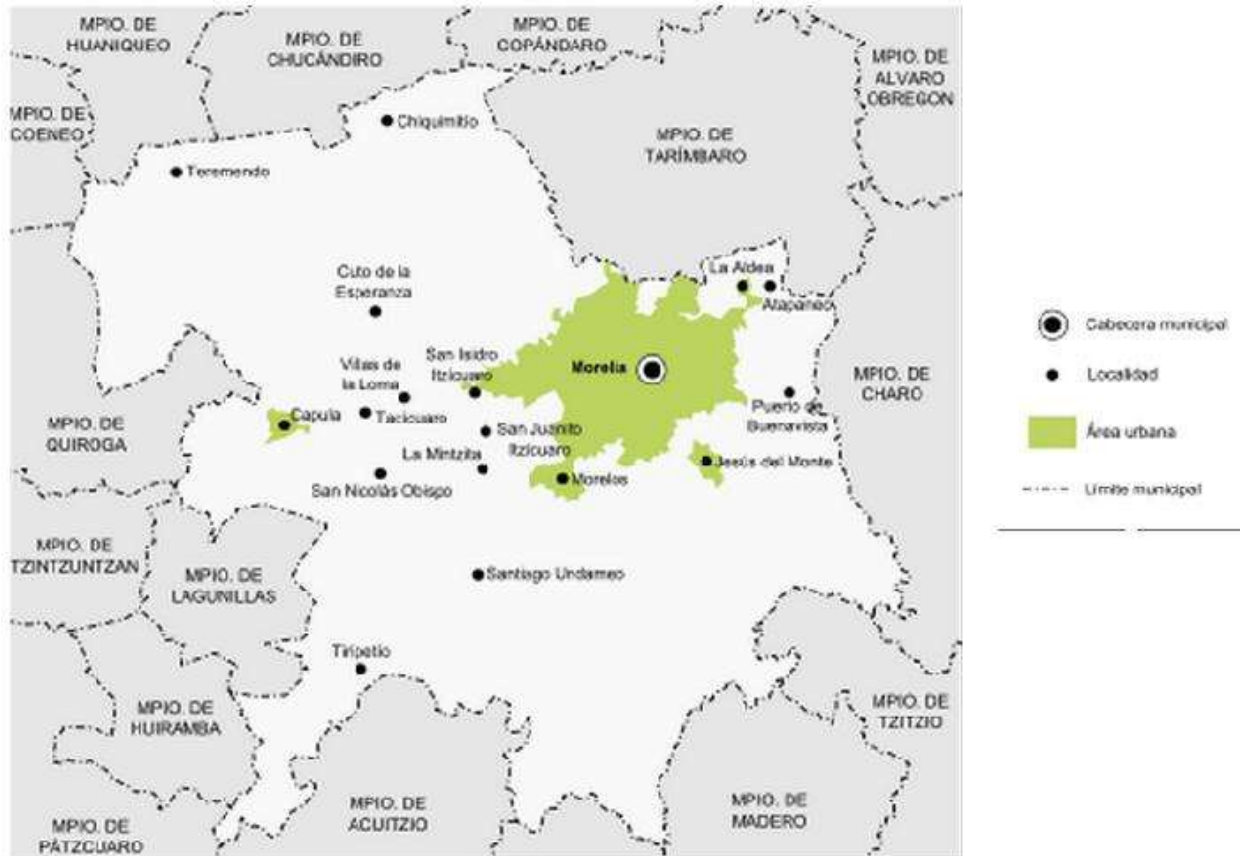


Figura 2.2 Municipios que colindan con el municipio de Morelia. Fuente INEGI 2005.

En la figura 2.3, se presenta la carta topográfica de la ciudad de Morelia (INEGI 2013), donde se pueden observar los relieves, la ciudad de Morelia se localiza dentro de un valle presentando un tipo de drenaje dendrítico y en el caso de los volcanes el tipo de drenaje es radial divergente. Existe también presencia de micro cuencas, lagos, manantiales, ríos y la presa de Cointzio.

Garduño-Monroy et al. (2011), presentan un mapa donde se distinguen, los pozos y fallas dentro de la ciudad de Morelia, la mayoría de los pozos se localizán en la parte norte de la ciudad. A través de este mapa se realizó la elección de pozos de monitoreo adecuado a este trabajo. Ya que este estudio pretende entender la influencia de las fallas y los bloques formados por ellas en el acuífero de la ciudad de Morelia (Fig. 2.4).



Figura 2.3. Carta topográfica de Morelia, obtenida de INEGI, 2013.

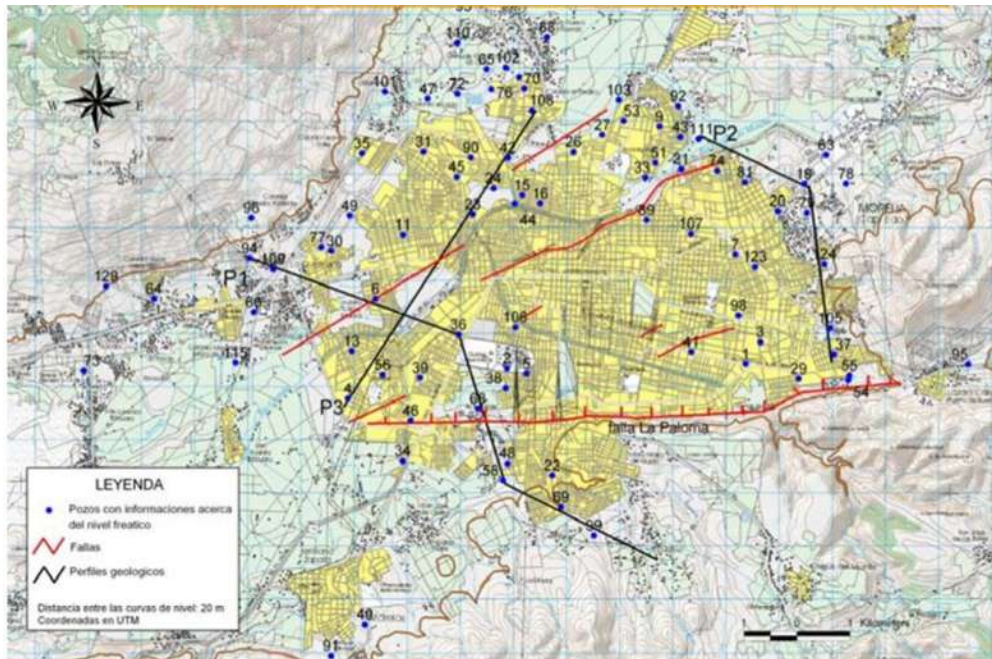


Figura 2.4. Mapa de pozos y fallas. Fuente Garduño-Monroy et. al., 2011.

II.1.1 Demografía de Morelia

Hernández-Guerrero (2011) argumenta en un recuento de información del INEGI (2000) que para el año 2000 la ciudad de Morelia comprendía 9134 hectáreas y 549,996 habitantes y para el 2005 (INEGI, 2005) presenta una superficie que incremento a 9804 hectáreas y 608,409 habitantes. Para el 2010 el INEGI maneja las cifras de 729,279 habitantes y 11784 hectáreas. En la figura 2.5 se presenta el crecimiento de la ciudad de Morelia a través de un mapa de INEGI (2010).

Es importante mencionar que la dirección de crecimiento de la ciudad de Morelia, predomina en dirección norte hacia el municipio de Tarímbaro. Tarímbaro y Morelia conforman la Zona Metropolitana de Morelia (ZMM), en la misma dirección se encuentran localizadas importantes vías de comunicación que favorecen a la expansión metropolitana y la actividad económica nacional con la cuenca, como serían la ciudad de México y la de Guadalajara, así como de la zona metropolitana Moroleón-Uriangato (ZMMU), aunque de menor jerarquía, ha influenciado en la expansión física y funcional de la ciudad de Morelia (Escamilla-Herrera et al., 2010).

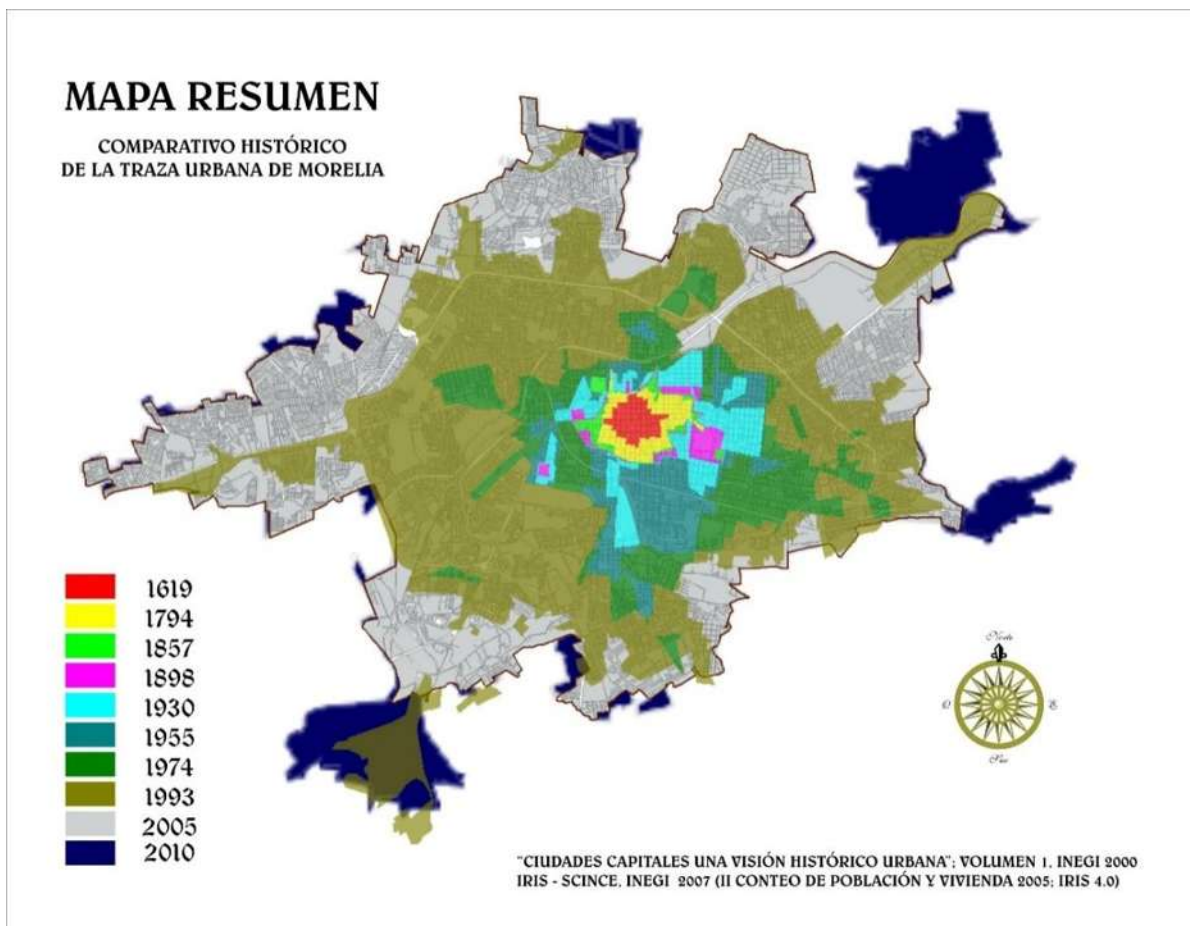


Figura 2.5. Crecimiento de la ciudad de Morelia. Fuente INEGI 2013.

En lo que se refiere a la demografía Hernández-Guerrero (2011) realizó una estimación del crecimiento de la ciudad de Morelia considerando que la población para el año 2010 (684,557 habitantes) no concuerda (Fig. 2.6) en comparación con el valor presentado por INEGI para el 2010 (729,279 habitantes). Por tanto y considerando el análisis de Hernández-Guerrero (2011) se demuestra que la ciudad tiene un crecimiento excesivamente rápido y descontrolado, lo que eleva la demanda de recurso y propicia la sobreexplotación desmesurada de estos.

Año	Población total	Población estimada		
		Método Aritmético*	Método Geométrico*	Promedio
1990	428,486	-	-	-
2000	549,996	-	-	-
2005	608,049	-	-	-
2010	-	686,183	682,932	684,557
2015	-	774,357	767,037	770,697
2020	-	873,862	861,500	867,681
2030	-	1,098,444	1,086,760	1,092,602

Figura 2.6. Estimación de crecimiento demográfico de Morelia. Fuente Hernández-Guerrero, 2011.

Hernández-Guerrero (2011), también plantea que la superficie urbanizable en la ciudad durante los años setenta era del 73.8%, mientras que para el año 2001 se incrementó a 91.5%. Lo que generó un contraste en las cifras con el plan de desarrollo urbano municipal de 1983.

II.1.2 Geomorfología y geología de Morelia

López et al., (2010), reporte que en la cuenca del lago de Cuitzeo se pueden distinguir una serie de lomeríos alargados, limitados por fallas este-oeste que corresponden a bloques de rocas volcánicas (andesitas) muy fracturadas que limitan la porción norte y sur del lago de Cuitzeo (Fig. 2.7, simbologías 16 a 25) y flujos piroclásticos de color rosa (ignimbritas, cantera de Morelia). Estas unidades se cubren por secuencias de materiales terrígenos de origen lacustre o fluviolacustre formados durante el Mio-Pleistoceno (Fig. 2.7). El conjunto de estas fallas produjeron un hundimiento hacia el norte, ya que tanto los depósitos volcánicos y secuencias lacustres se observan inclinadas hacia el sur. La falla geológica más meridional que está representada en la ciudad de Morelia, denominada La Paloma, es una estructura que corre desde el sur del lago de Pátzcuaro hasta la región de Acambay en el Estado de México. Es una falla de tipo normal con un hundimiento hacia el norte de hasta 200 m de dirección E-O. Este proceso generó la formación de las depresiones lacustres en Maravatío y Cuitzeo y está relacionada con el vulcanismo tipo Parícutín de la zona sur de Cuitzeo (Queréndaro) (Garduño-Monroy e Israde-Alcántara, 2010).

Esta gran estructura es el límite de dos dominios geológicos bien definidos en la región:

1. *Sierra de Mil cumbres*; al sur de la cuenca del lago de Cuitzeo (Figura 2.7, del 16 al 25), representado por una secuencia de rocas volcánicas donde se observan grandes estructuras estrato volcánicas formadas de andesitas, dacitas y riolitas que dieron origen a estructuras caldéricas, que a su vez conforman las mesas de flujo piroclásticos riolíticos de la "Cantera de Morelia". La edad de esta secuencia va del Oligoceno al Mioceno. Por su morfología actual y las fallas que lo enmarcan, forman una elevación (horts) que al sur está delimitada por la falla de la Escalera, que permite una vista hacia la Tierra Caliente; y en dirección al norte, la falla de la Paloma produce la depresión de Morelia.

Ambas forman parte del sistema este-oeste Morelia-Acambay. Secuencias de este tipo se aprecian en los bloques basculados (inclinados) hacia el sur, de Tarímbaro-Copándaro, Álvaro Obregón y el norte de Morelia. También se observan en Iramuco y Santa Ana Maya, pero en estos últimos sectores las rocas volcánicas antiguas están cubiertas por vulcanismo andesítico más joven (Plioceno).

2. *Cinturón Volcánico Mexicano*; al norte de la falla la Paloma distingue diferentes morfologías asociadas a la geodinámica del CVTM y las han separado en:

- Lomeríos bajos y valles.
- Valles y planicies
- Vulcanismo del CVTM (Cinturón Volcánico Trasmexicano)
- Productos volcánicos de la Caldera de Los Azufres

Como se ha mencionado la ciudad de Morelia se encuentra al noreste del estado de Michoacán ubicada en el antiguo valle de Guayangareo con las siguientes características:

- Una extensión de 25 km de oriente a poniente y 15 km de norte a sur.
 - La ciudad se encuentra en un valle donde las principales elevaciones geomorfológicas son de los volcanes de: 1. Quinceo-Las Tetillas; el Quinceo presenta una altura de 2740 msnm ubicado específicamente al norponiente de la ciudad de Morelia. Las Tetillas se encuentran en la misma ubicación que el Quinceo pero con una elevación de 2300 msnm aproximadamente. 2. El Cerro del Águila, localizado entre dos municipios como son: Morelia y Lagunillas, entre los 19°32'30"- 19°40'30" N y los 101°16'39"- 101°26'16" O al suroeste de la ciudad de Morelia, con una extensión aproximada de 163.2 km² y un intervalo altitudinal de 1 900 a 3 080 msnm (INEGI, 2007; Zacarias-Eslava et al., 2011).
3. La caldera de Atécuaro se encuentra localizada al sur de la ciudad de Morelia, con aproximadamente 386 km² de diámetro.
4. El Punhuato; localizado en las siguientes coordenadas geográficas, 19°42' y 19°41' N; 101°08' y 101°07' O, situado al oriente de la ciudad de Morelia, presentando una variación altitudinal entre los 1850 msnm y 2300 msnm (Madrigal-Sánchez y Guridi-Gómez, 2002; Silva-Martínez et al, 2005; Corona-Mora et al., 2014).

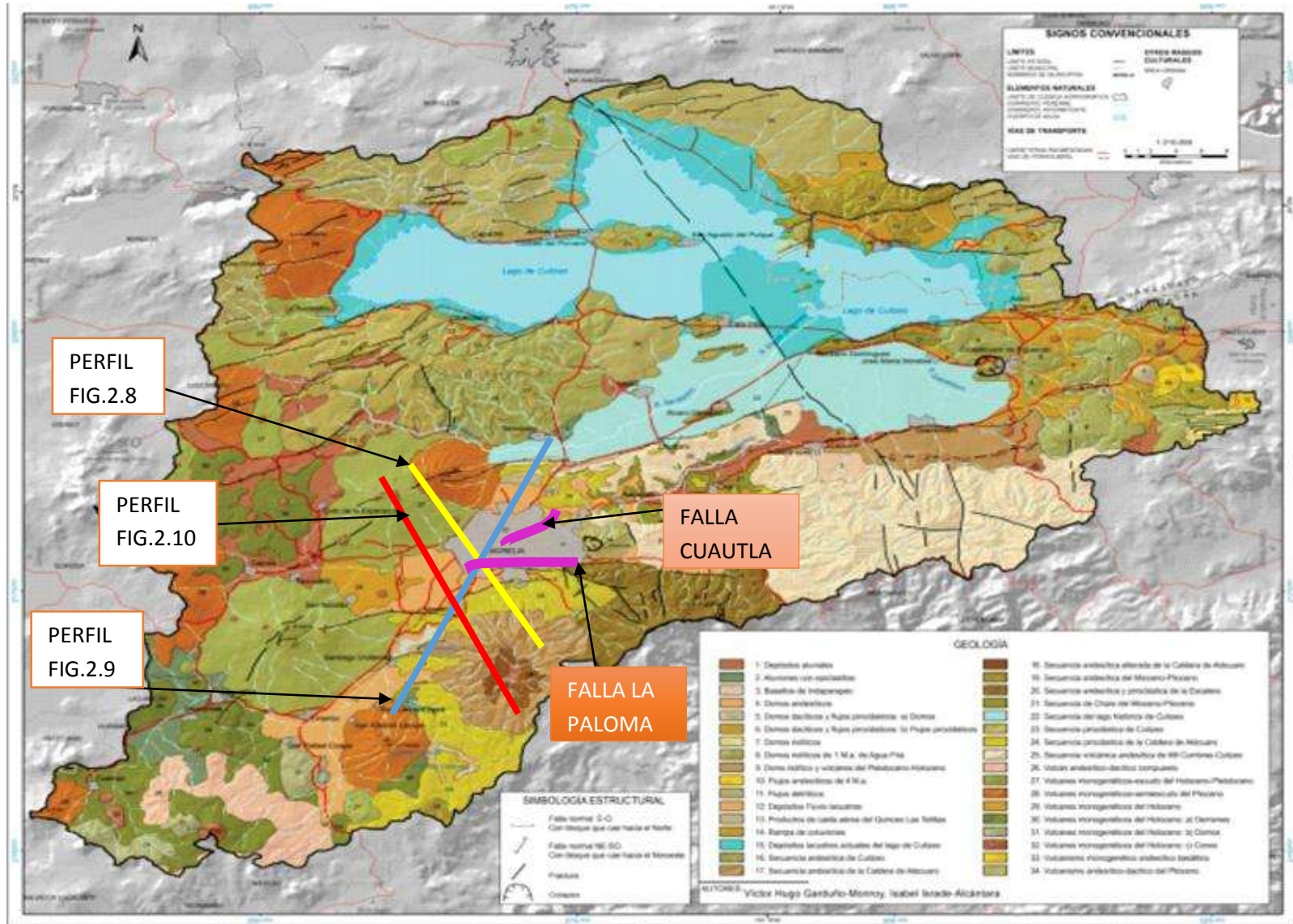


Figura 2.7 Mapa geológico cuenca de Cuitzeo. Fuente López et al., 2010

Las elevaciones presentes en el valle de Morelia se observan en las siguientes imágenes en distintos perfiles generados en Global mapper.

Un perfil de este a oeste que corta a la mitad la ciudad de Morelia, en el cual se puede observar una altura máxima de 2550 m aproximadamente, una media de 2250 m y una mínima de 1875 m aproximadamente (Fig. 2.8).



Figura 2.8. Perfil este-oeste, por todo el centro de la ciudad

En un perfil SO-NE, se observa la dirección de la cuenca (Fig. 2.9), ya que va disminuyendo su elevación en esta dirección.



Figura 2.9. Perfil SO-NE de la ciudad de Morelia en Global mapper

Y por último un perfil NO-SE, el cual presenta una altura mayor al de la figura 2.8 (Fig. 2.10).



Figura 2.10. Perfil NO-SE de la ciudad de Morelia, obtenida de Global mapper

En estos perfiles se puede observar la geomorfología de la zona, se aprecia que la ciudad de Morelia se encuentra en un valle rodeada por volcanes y sierras, donde al NE de la ciudad se

aprecia la menor elevación y en el perfil de la figura 2.9 se logran ver distintos escalones o bloques hacia NE, siendo la misma dirección de la cuenca del Valle Morelia-Queréndaro.

La zona de estudio forma parte de una serie de sistemas lacustres localizados en el Cinturón Volcánico Trans-Mexicano (CVTM) que son producto de la evolución tectónica y magmática intra-arco relacionada a la subducción de la Placa del Pacífico en la de Norteamérica. La región se encuentra afectada por sistemas de fallas con dirección E-W y NE-SW que dieron origen al valle donde se aloja el sistema acuífero.

En la figura 2.11, se presenta la carta geológica realizada por el INEGI desde 1979, la cual presenta modificaciones en los puntos que se presentan a continuación, con base en estudios y fechamientos recientes. Es de hacer notar que en esta carta geológica solo aparecen tres fallas geológicas de las 13 que han sido sucesivamente descritas, estas últimas son las que se manejan para este estudio.

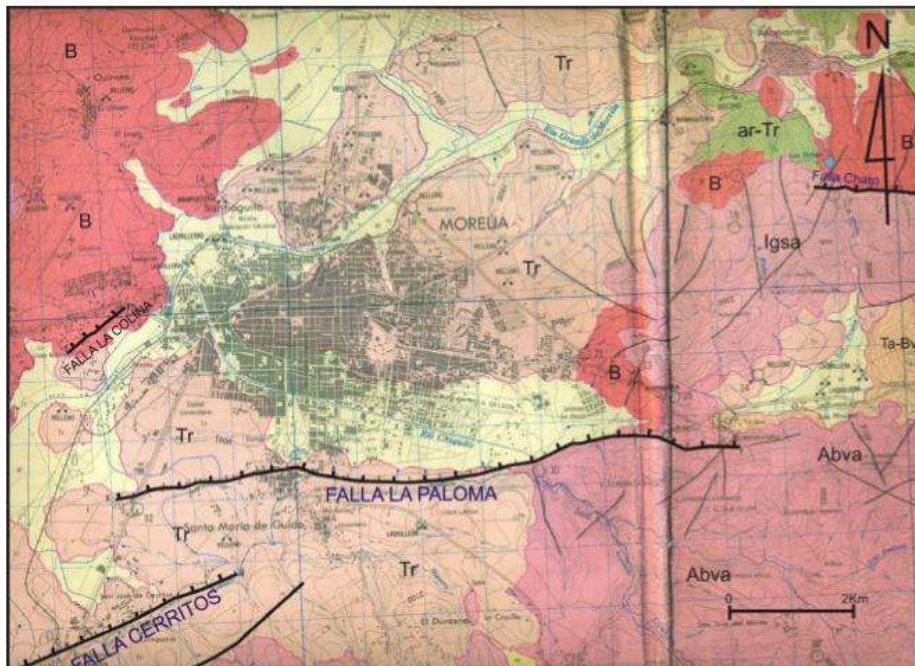


Figura 2.11. Segmento de la carta geológica de la región de Morelia donde se aprecian las fallas geológicas cartografiadas desde 1979. Fuente INEGI, 1979; Garduño-Monroy et. al., 2011

Al norte de la ciudad de Morelia, se encuentran ignimbritas de Cuitzeo y sobre ellas hay depósitos de sedimentos fluvio-lacustres, compuestos de grava, limo y arcilla de color café y afloran en los alrededores de los ríos Grande y Chiquito (Gómez-Vasconcelos, 2012). Y al sur como ya se ha mencionado se encuentra la SMC y al occidente de está la Caldera de Atécuaro (CA). Pero al oriente de la CA, existen afloramientos de andesítica-basálticas específicamente en el Río Chiquito de Morelia. Gómez-Vasconcelos (2012) realizó un mapa geológico de la zona (Fig 2.12).

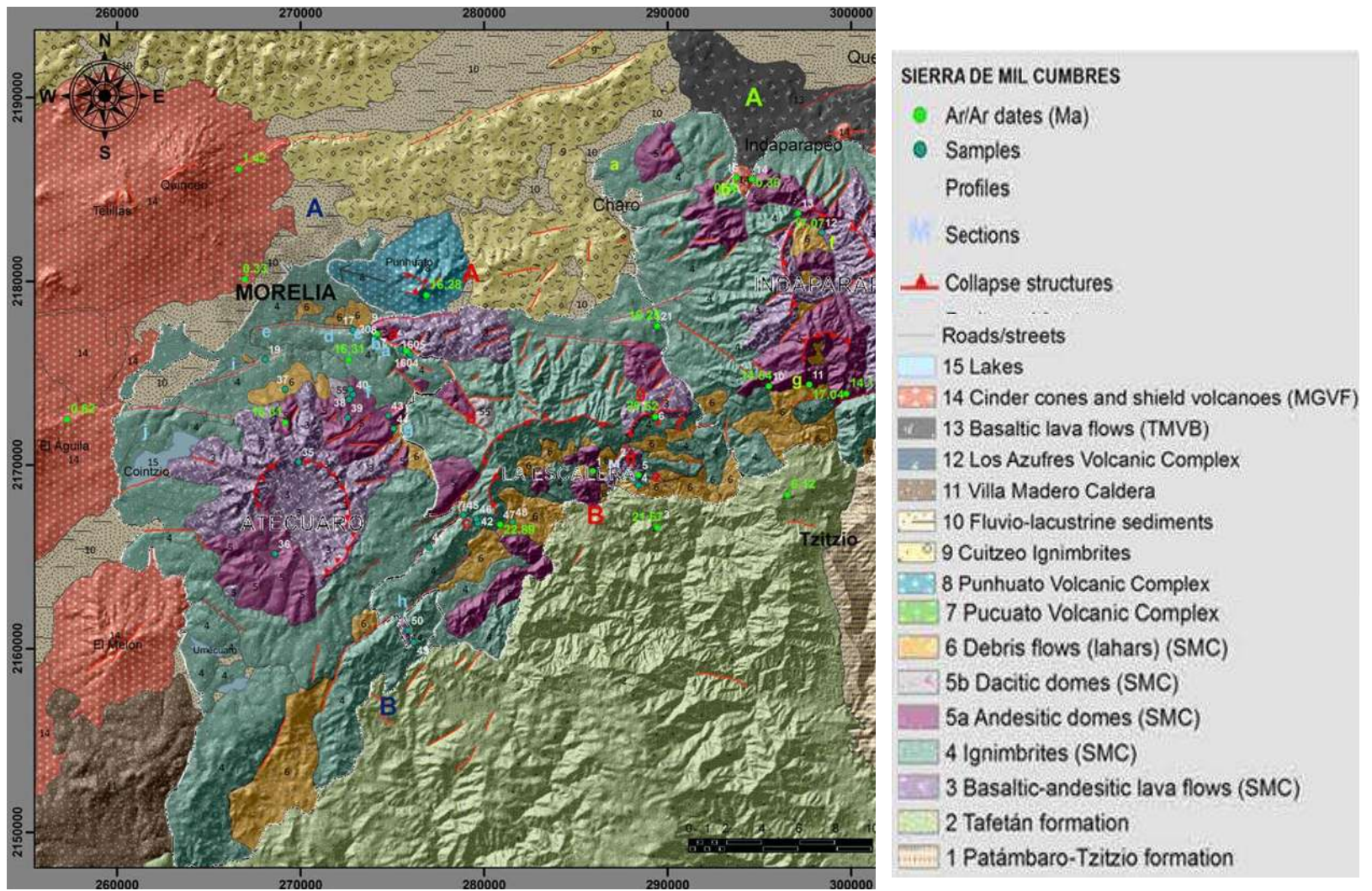


Figura 2.12. Mapa geológico de la zona de estudio. Fuente Gómez-Vasconcelos, 2012.

Garduño-Monroy et al. (2011), aporta información de los pozos perforados en la ciudad de Morelia, del mapa geológico y de trabajo de campo, identificando la estratigrafía en las siguientes unidades (Fig.2.13):

1. Andesitas de Mil-Cumbres.

La SMC contempla una edad de 19.5 ± 0.4 Ma; con pendientes entre 0° y 79° , caracterizadas por lavas de composición intermedia a básica (Garduño-Monroy et al., 2009; Gómez-Vasconcelos, 2012; Villaseñor-Reyes, 2014). También es caracterizada por lavas andesíticas gris-verdosas intensamente alteradas y fracturadas con presencia de vetillas de calcita o bien de calcedonia (Israde-Alcantara y Garduño-Monroy, 2004). Su principal afloramiento se encuentra en el Río Chiquito, con textura afanítica. La roca presenta microfenocristales y microlitos de plagioclasa, olivino y ortopiroxeno (Gómez-Vasconcelos, 2012). El espesor estratigráfico de las andesitas es desconocida al nunca haber sido atravesada por los pozos perforados en la zona. A pesar de esto varios investigadores han asignado un valor superior a los 200 m, con un espesor mínimo de 800 m (Israde-Alcantara y Garduño-Monroy, 2004; Villaseñor-Reyes, 2014).

2. Flujos piroclásticos ignimbríticos (Cantera de Morelia).

Se le denomina Cantera de Morelia a los productos piroclásticos de composición riolítica generalmente de color rosa, ricos en líticos de andesitas y pómez. Varios estudios han considerado que tiene un espesor de 200 m. (Israde-Alcántara y Garduño-Monroy, 2004). Gómez-Vasconcelos (2012) fechó con el método de $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ obteniendo una edad de 16.4 ± 0.3 Ma.

En la parte superior coronando la secuencia, hay presencia de una ignimbrita color blanco con micas, líticos y fragmentos de pómez en la parte alta de la loma de Santa María (Israde-Alcantara y Garduño-Moroy, 2004). Le sigue a este nivel un estrato continuo y fracturado de ignimbrita soldada color rosa con fiammes y líticos más oscuros y un espesor de 15 a 30 m (Villaseñor-Reyes, 2014). Continúa un nivel de 20 a 40 m de flujos de escombros muy deleznable con grandes fragmentos de ignimbrita, líticos de distinta composición y matriz de pómez. Y por último Israde-Alcantara y Garduño-Monroy (2004) plantean un paquete de ignimbritas bien soldada color vino que presenta fiammes más oscuros y líticos, siendo este el horizonte más abundante y aflora a todo lo largo del escarpe de la falla La Paloma, siendo la base de esta estratigrafía.

3. Complejo volcánico del Cerro Punhuato.

El Punhuato, sobreyace en la SMC es representado por domos y flujos de lava andesítica y dacítica y una avalancha de escombros que forman un abanico hacia el occidente, asociada con una estructura de colapso en forma de herradura de 15.9 ± 0.6 Ma (Garduño-Monroy et al., 2001; Gómez-Vasconcelos, 2012; Villaseñor-Reyes, 2014).

4. Secuencia fluviolacustre del Mioceno-Plioceno.

Aflora en la parte sur y oriente de Morelia, donde está caracterizada por limos y arcillas con un espesor de hasta 60 m con un basculamiento de 5° hacia el Sur. Hacia el SO de la ciudad de Morelia en la colonia la Huerta la secuencia se compone de cenizas volcánicas con matriz arcillosa alternada con niveles arcillo-limosos (Israde-Alcántara, 1995). Hacia el libramiento norte de la ciudad y a la altura del Río Grande se observan conglomerados y niveles de arenas y limos, afectados por uno de los más importantes fallamientos de Morelia, la falla Central Camionera.

5. Secuencia volcánica pleistocénica-holocénica del Corredor Tarasco.

Es la unidad más reciente y corresponde a los productos del volcanismo monogenético del CVTM. Con lavas andesíticas y eventualmente andesítico-basálticas que provienen de los volcanes Quinceo, Las Tetillas o del Cerro El Águila. El Quinceo fue fechado de 1.42 ± 0.12 Ma, 0.33 ± 0.04 Ma Las Tetillas y 0.62 ± 0.02 Ma para el cerro del Águila. (Gómez-Vasconcelos, 2012; Villaseñor-Reyes, 2014), estos depósitos se encuentran coronados por un depósito de piroclastos de caída de ceniza y pómez, denominado Pómez Alegría con un espesor de 1 a 5 m. Asociados a una etapa explosiva del volcán Quinceo (Israde-Alcantara y Garduño-Monroy, 1999; Arreygue-Rocha et al., 2002; Gómez-Vasconcelos, 2012; Villaseñor-Reyes, 2014) (Fig. 2.13).

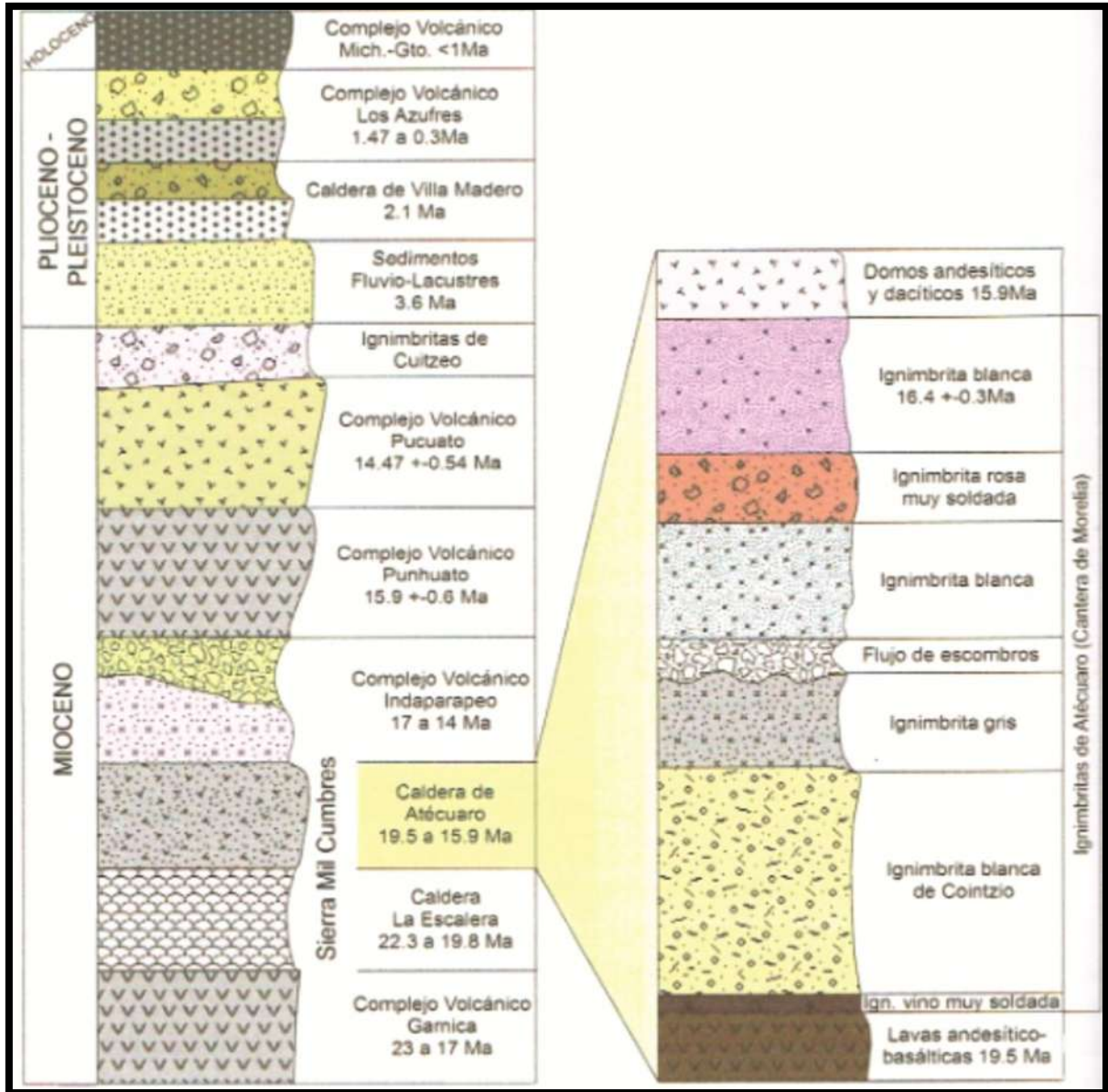


Figura 2.13. A la izquierda se presenta la columna estratigráfica esquemática que muestra la relación de la litología de la zona de Morelia con otros depósitos de la región. A la derecha se presenta la columna estratigráfica compuesta de los depósitos de la Caldera de Atzacuar. Modificado de Gómez-Vasconcelos, 2012. Fuente Villaseñor-Reyes, 2014.

II.1.3. Geología Estructural

Regionalmente desde el punto de vista de geología estructural existe presencia de un semigraben en la parte occidental y un graben en la parte poniente, separados estructuralmente por la falla de Tzitzio-Valle de Santiago. La zona del semigraben se caracteriza por escalones formados por fallas normales E-O y descendentes de sur a norte. Los basculados al sur presentan inclinaciones de 5° y 10° en Morelia y de hasta 30° en Cuitzeo. La región oriental donde se forma el graben se caracteriza por fallas normales E-O también que delimitan una zona más baja.

La falla de Tzitzio-Valle de Santiago interrumpe los dos sistemas de fallas antes mencionados, tiene una dirección N-NO. En la cuenca produce el alargamiento del lago de Cuitzeo siendo un importante límite estructural. Las estructuras que forman ambos sistemas de fallas se le denomina Morelia-Acambay y produce desniveles en rocas tanto del Mio-Pliocuaternario como del Holoceno; estos desplazamientos van desde unos centímetros hasta 200 m de desnivel; el más evidente es el de la falla La Paloma en la ciudad de Morelia. Sus desplazamientos normales reales alcanzan hasta 250 m y son potencialmente sísmicas (Garduño-Monroy e Israde-Alcántara, 2010).

El área de estudio de esta investigación se ubica en la región del semigraben en los bloques basculados que se encuentran en la porción sur.

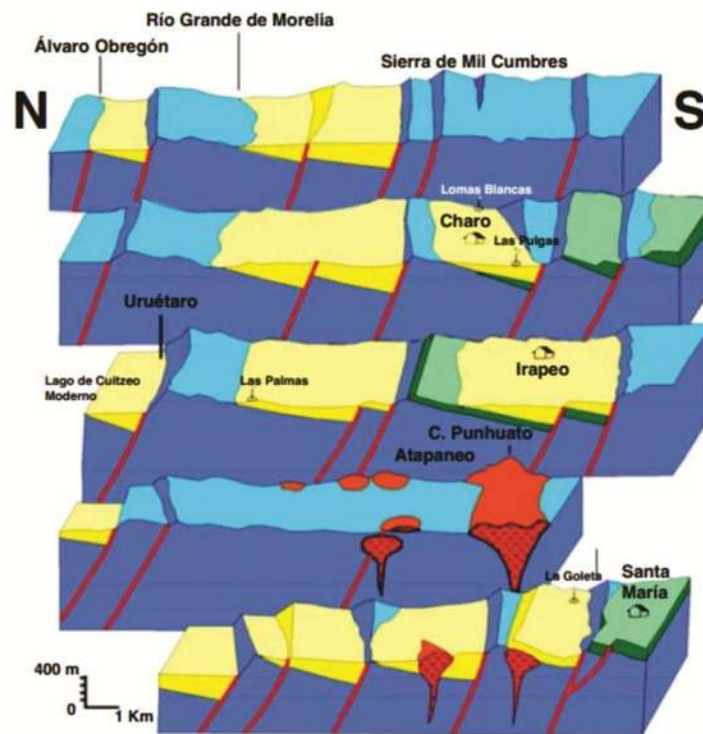


Figura 2.14 Esquemas de la geometría en semigraben del subsuelo del lago de Cuitzeo. Fuente Garduño-Monroy e Israde-Alcántara, 2010

El CVM, se encuentra afectado por fallas orientadas NE-SO con una componente normal que en conjunto forman una elevación tectónica que podría ser la prolongación hacia el SO de la SMC. En su porción sur en la región de Morelia se aloja a la caldera de Atécuaro (Garduño-Monroy et al, 2009). Israde-Alcántara et al, (2009) considera como límite norte de la zona de estudio (Morelia) que existen varios segmentos del sistema de fallas Morelia-Acambay. Como consecuencia de los eventos tectónicos que generaron los sistemas de estructuras antes mencionados de la zona de estudio, se observa un intenso fracturamiento y fallamiento que facilitó el emplazamiento de una gran cantidad de diques, con orientaciones NE-SO (Gómez-Tuena et al, 2005) (Gómez-Vasconcelos, 2010).

En la figura 2.15, se pueden apreciar las fallas pertenecientes al CVM, los depósitos fluviolacustres y los de flujos piroclásticos, así como el vulcanismo monogenético de la zona de estudio.

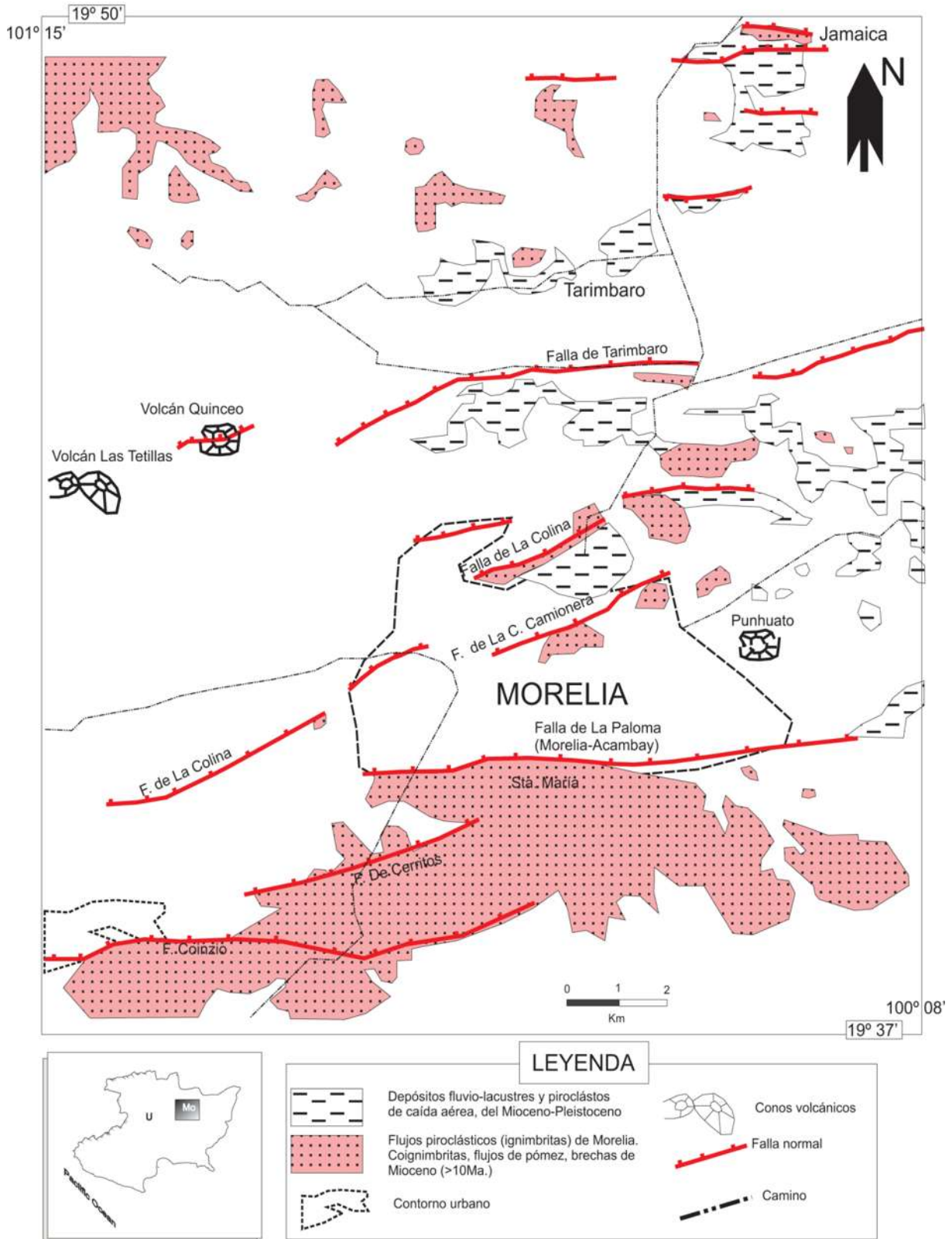


Figura 2.15. Mapa geológico de la zona de estudio. Fuente Garduño-Monroy et al, 2009.

Garduño-Monroy et al., (2011), caracteriza la litología del subsuelo que fue obtenida por medio de los pozos profundos para la extracción del agua administrados por el OOAPAS (Organismo Operador de Agua Potable y Alcantarillado Sanitarios). En la zona centro del área de estudio principalmente se observa presencia de fluviolacustres que están delimitados por las estructuras volcánicas como el Quinceo, el Punhuato con aportación de basaltos y SMC principalmente formada por basaltos andesíticos; debajo de los depósitos fluviolacustres se puede encontrar en casi toda la zona presencia de una toba riolítica fracturada que es el principal estrato en donde se presentan los grandes desniveles generados por las fallas de Morelia, destacando la falla La Paloma con un desplazamiento real de más de 200 m. Esta falla es el límite sur de las cuencas lacustres que se pueden dividir en zonas lacustres y fluviolacustres, separadas por bloques basculados que conformaron la loma donde se asentó la ciudad antigua de Morelia y en cuya base se encuentra nuevamente andesita basáltica del SMC (Fig. 2.16).



Figura. 2.16. Foto satelital de la ciudad de Morelia (Google Earth). Se observan las dos fallas principales, al sur La Paloma y al norte la falla Tarimbaro, ambas E-O y afectando al vulcanismo monogenético de El Quinceo y El Águila. Dentro de la Ciudad de Morelia las fallas tienen direcciones NE-SO, como las fallas de La Colina y la Central Camionera. Fuente Garduño-Monroy et. al., 2011.

II.1.4. Hidrología

En el Valle Morelia-Queréndaro se encuentra comprendida una de las regiones agrícolas más importantes del Estado de Michoacán. Dentro de la Región Hidrológica número 12, se trata de una cuenca endorreica, que incluye los municipios de Álvaro Obregón, Copándaro, Charo, Chucándiro, Indaparapeo, Queréndaro, Morelia, Tarímbaro, y Zinapécuaro (Fig. 2.17). El valle presenta algunos pequeños lomeríos esparcidos irregularmente por toda su extensión. Entre los más sobresalientes se encuentran el que se localiza entre Tarímbaro y Morelia, el cual sirve como parteaguas entre la cuenca del Río Grande de Morelia este lomerío bordea casi totalmente al lago de Cuitzeo. El resto de la cuenca presenta una topografía muy cambiante con elevaciones que van de 1830 msnm (promedio) en la planicie, hasta los 3340 msnm en el Pico del Tzirate. Según datos proporcionados por la Comisión Nacional del Agua (CNA). Tres corrientes principales atraviesan el Valle Morelia-Queréndaro: el Río Grande de Morelia, el Río Queréndaro y el Río San Marcos, conocido también con el nombre de Arroyo Guadalupe. Existen además, otros ríos o arroyos que transportan caudales, de menor magnitud, los cuales confluyen en alguna de las corrientes principales, o bien lo hacen directamente al Lago de Cuitzeo. Dentro del Valle se ubican tres grandes cuerpos de agua superficiales: las Presas de almacenamiento Cointzio y el Lago de Cuitzeo. Además, existe la presa de la Mintzita; pero esta almacena un volumen más pequeño que el de las otras dos (Bravo-Espinosa et al., 2012).

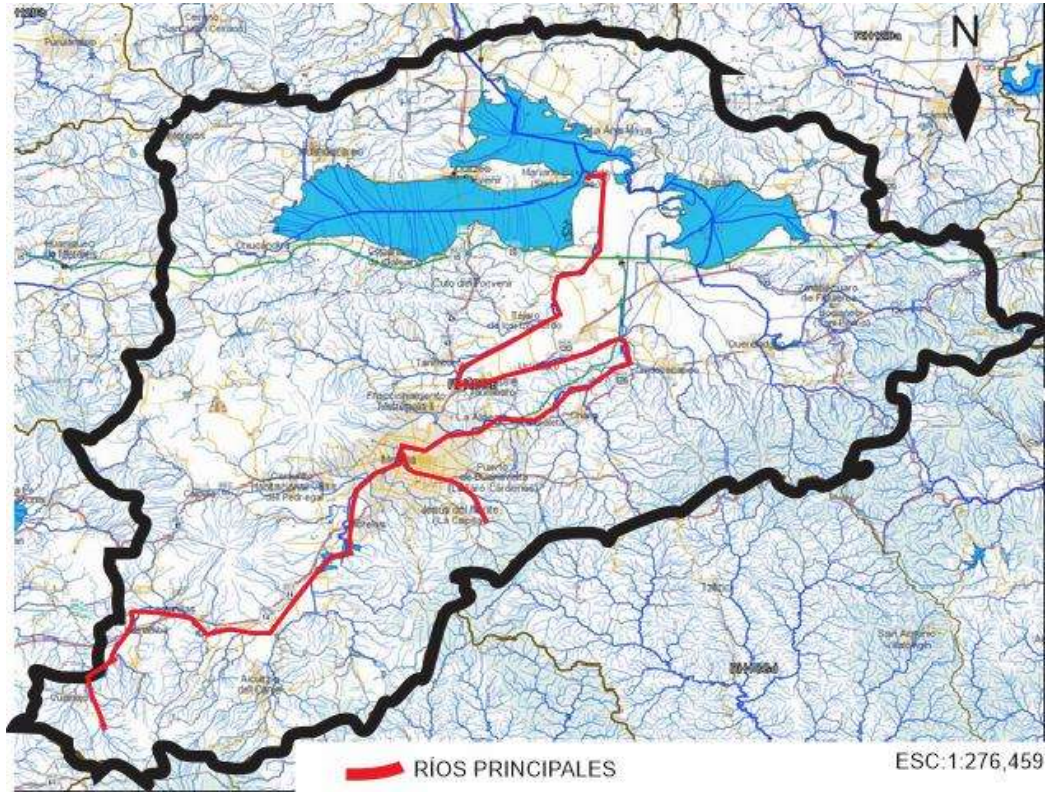


Figura 2.17. Ubicación del Valle Morelia-Queréndaro. Fuente INEGI 2015.

II.1.5. Geohidrología

En la figura 2.3, se muestra la carta topográfica de la zona (INEGI, 2010) la cual permite observar el sistema de flujo del terreno, ya que a partir de la topografía se puede inferir a través de la gravedad, la dirección del agua subterránea donde se consideran las partes topográficamente altas como recargas y las bajas como descargas (Freeze y Cherry, 1979).

Garduño-Monroy et al. (2011), reporta que sobre la geología de la ciudad de Morelia existen muchas referencias bibliográficas (Israde-Alcantara, 1995; Israde y Garduño, 1999, 2004; Garduño y Arreygue, 1998; Silvia-Mora, 1995), desafortunadamente no existe aún suficiente información sobre las características del acuífero de la subcuenca. El trabajo más significativo fue llevado a cabo por Ávila-Olivera y Garduño Monroy (2007). Estos autores analizaron el abatimiento actual del nivel freático haciendo una proyección para el año 2010 (Ávila-Olivera y Garduño-Monroy, 2007). Según estos autores en el subsuelo de la ciudad de Morelia se pueden identificar tres acuíferos.

- Acuífero profundo, flujo intermedio
- Acuífero superficial (fluvio-lacustres), flujo local
- Por otro lado existe un acuífero que se localiza en las lavas del vulcanismo tipo semiescudo y que da lugar a los manantiales más importantes de la ciudad de Morelia. Este podría ser el acuífero más vulnerable debido a la estructura de sus rocas que lo almacenan, siendo un acuífero somero.

Ávila-Olivera y Garduño-Monroy (2007), consideran que en la parte norte de la ciudad, los tres acuíferos están siendo explotados, mientras que hacia el sur los acuíferos aprovechados serían los de la secuencia lacustre (flujo local) y el acuífero profundo en las ignimbritas (flujo intermedio) y andesitas. En bloques que se hunden (que se basculan) en los límites de fallas localizados en la parte NE de la ciudad, el agua es extraída del acuífero de las secuencias lacustres, mientras que en los bloques que permanecen en el alto, el agua se extrae del acuífero profundo, es decir de las andesitas (Ávila-Olivera y Garduño-Monroy, 2007).

En la siguiente imagen se presenta un perfil de los bloques delimitados verticalmente por las fallas geológicas y las diferentes litologías del substrato, se observa también que la mayoría de los pozos penetran principalmente la toba riolítica, siendo el estrato principal de extracción de agua en el acuífero, para la ciudad de Morelia (Fig.2.18).

Garduño-Monroy et al., (2011) simplifica que la SMC es la principal zona de recarga hacia el acuífero más importante de Morelia, "el acuífero profundo" y la asigna como una recarga regional. En cambio considera una recarga local a la proveniente del Quinceo-Tetillas y del C. El Águila y divide el acuífero profundo en ignimbritas y andesitas.

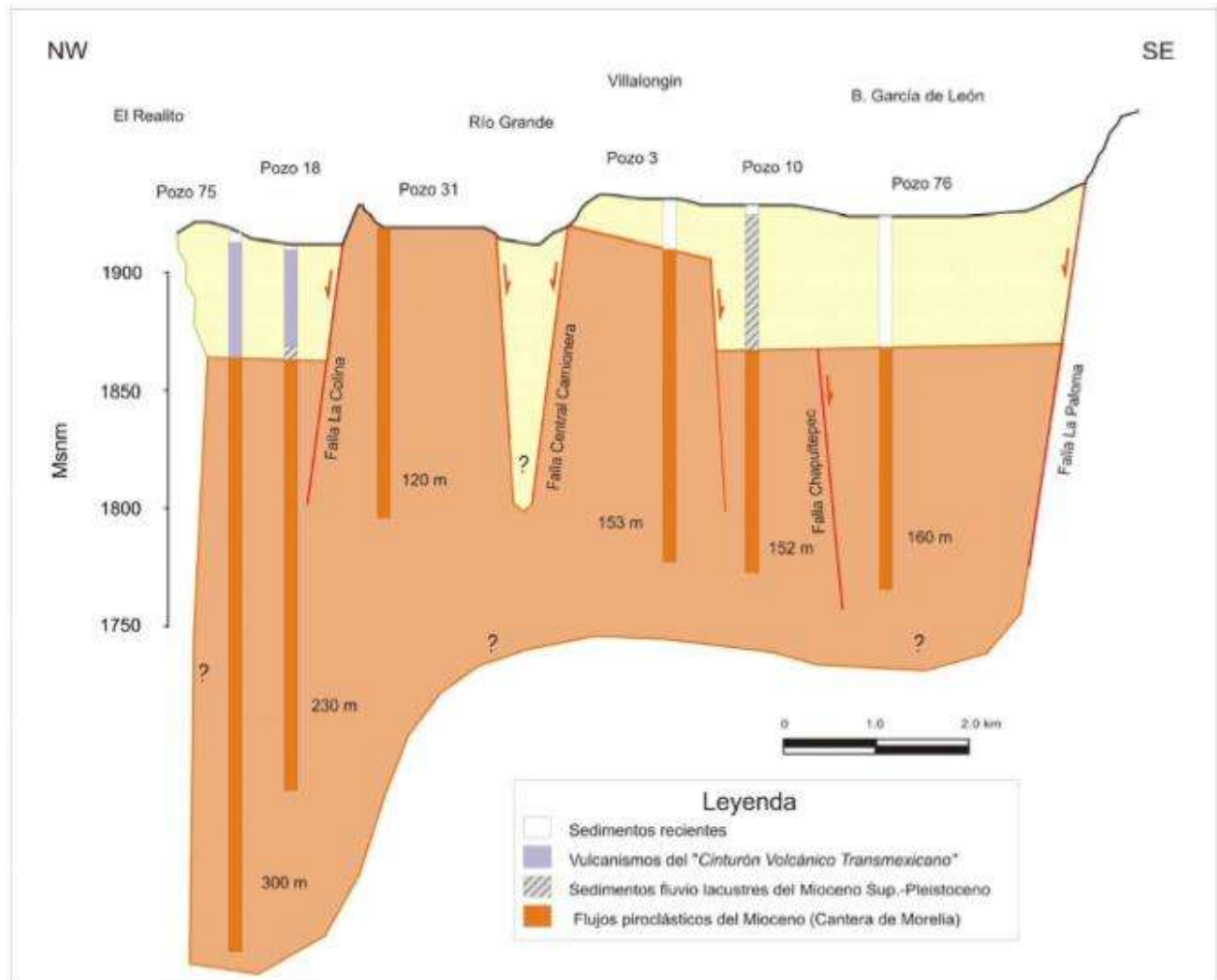


Figura 2.18. Sección geológica de la ciudad de Morelia. Apreciable el salto real de la falla La Paloma que es de más de 200 m. Fuente Garduño-Monroy et al., 2011.

II.1.6. Clima

La ciudad de Morelia, presenta clima templado seco, con lluvias en verano y una precipitación media anual de 843.5 mm, con una máxima registrada en 24 h de 83.6 mm en julio del 2005, y lluvia máxima en 1 h de 70 mm, el 19 de julio del mismo año. La temperatura (Fig. 2.19) media anual es de 19°C, con una máxima de 27.7°C en el mes de mayo y una mínima de 2.0°C en los meses de diciembre a enero (Reyes-Jaramillo, 2009). La temporada de lluvias abarca el verano y parte del otoño (periodo de mayo a octubre), en el resto del año la condición es de sequía (noviembre a abril), febrero y marzo los meses más secos. Ampliando un poco más la información, el clima (Fig.2.20) es lluvioso, semicálido subhúmedo (A)Cw1(w)b(e)g, con escasa lluvia invernal con un verano fresco y largo como indica la letra b y la marcha de su temperatura es de tipo ganges, es decir, que el mes más cálido del año es mayo (Vidal-Zepeda, 2010).

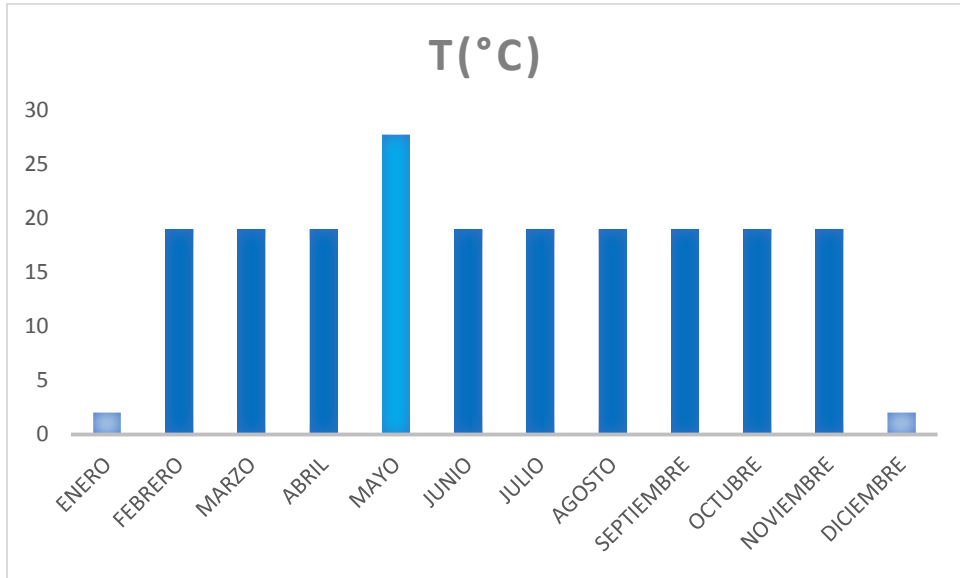


Figura 2.19. Gráfico de temperaturas para la ciudad de Morelia. Fuente Reyes-Jaramillo, 2009.

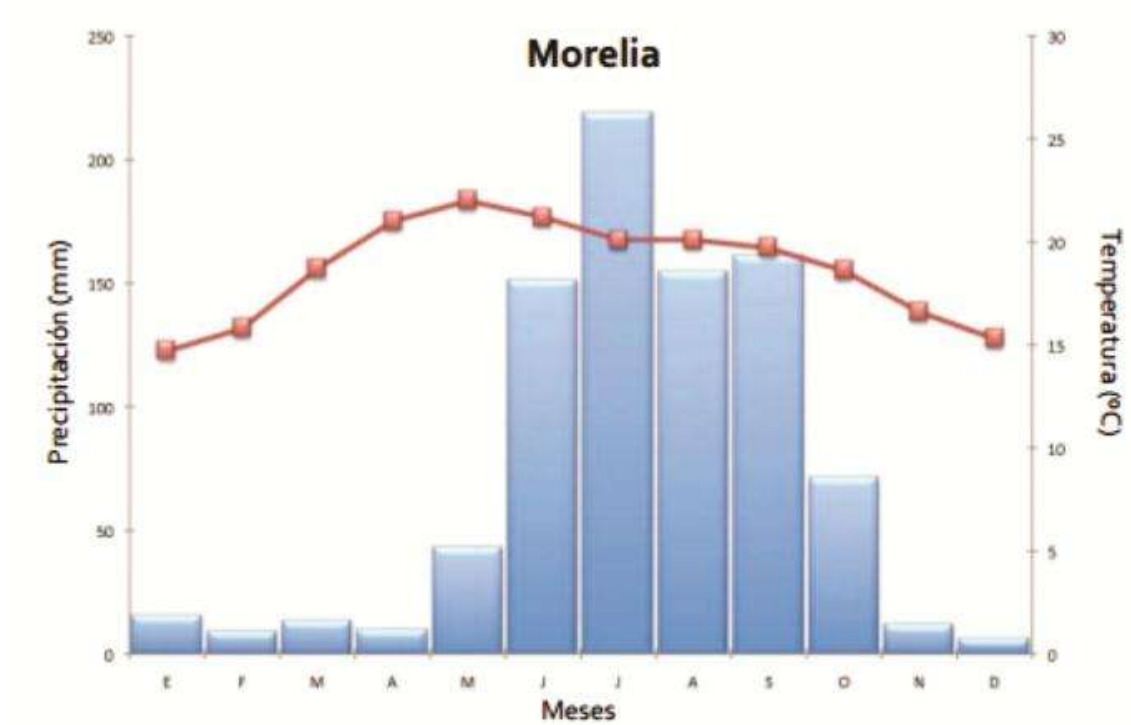


Figura 2.20. Histograma de precipitación mensual de Morelia, para el año 2010. Fuente Vidal-Zepeda, 2010.

II.1.7. Uso de suelo

Para la información de vegetación y uso de suelo, López et al.,(2010) plantea diversos mapas con la variable tiempo, en los cuales se aprecia la cobertura de bosques templados localizados en la porción sur de la cuenca, mientras que la de matorrales se presenta principalmente en la porción centro y norte de la misma. Proporcionalmente, considera que el área ocupada por los asentamientos humanos creció al doble, considerando así una tasa alta de transformación para otras coberturas. El asentamiento más importante dentro de la cuenca es la ciudad de Morelia (Fig. 2.21).

Rzedowski (1978) y Madrigal-Sánchez et al. (2004) consideran el siguiente listado de diversos tipos de vegetación en el municipio, como:

- Bosque Mesófilo de Montaña: tipo de vegetación localizado en las cañadas, donde se mantiene la humedad durante todo el año y presenta la mayor riqueza de especies arbóreas, por lo que con frecuencia se encuentran dos o más condominantes de 20-30 m de altura.
- Bosque de Pino: esta vegetación la constituyen diferentes especies de pinos, de 15-20 m de altura.
- Bosque de Encino: en la región de Morelia, se encuentran varias comunidades constituidas por diferentes especies de encinos, en altitudes intermedias, aunque en ocasiones no es fácil determinar si se trata de vegetación primaria o secundaria, debido al grado de alteración que se presenta por la tala y los incendios.
- Bosque Tropical Caducifolio: se encuentra escasamente representada en la parte sur del municipio de Morelia, en altitudes aproximadas de 1600 msnm. Los árboles dominantes son más o menos de 15 m de altura y la mayoría tiran el follaje en la época seca del año.
- Matorral Subtropical: en forma similar a la vegetación anterior, se encuentra en superficies restringidas en las cañadas de la parte sur del municipio de Morelia. La altura aproximada de los árboles es de 15-20 m.
- Pastizal: se encuentra en los márgenes del lago de Cuitzeo, con cierto grado de inundación en la época de lluvias, donde se registran altas concentraciones de sales.
- Bosque de Galería: se localiza a lo largo de las corrientes de agua y su composición es relativamente simple, con árboles de aproximadamente 10-20 m de altura. En Morelia se encuentra muy perturbado por la tala y las superficies contiguas agrícolas.
- Vegetación Acuática y Subacuática: se encuentra en terrenos inundados o en la parte somera de los cuerpos de agua. Constituida por dos especies de monocotiledóneas de aproximadamente 2-3 m de altura.

- Bosque Cultivado.

Es importante mencionar las conclusiones de Madrigal-Sánchez et al. (2004), ya que indican que el severo deterioro que registró en la cubierta vegetal se debe a causas muy diversas, registrando entre los efectos más notorios el cambio de uso de suelo, lo que implica la sustitución de la vegetación primaria para desarrollar las actividades agropecuarias, la expansión urbana o de otra índole (ver el apartado de demografía), así como los aprovechamientos ilegales (clandestinaje) de la madera y resina entre los más importantes. Otros factores que consideran que intervienen en el disturbio son los incendios, el sobrepastoreo, las plagas de insectos, etc.

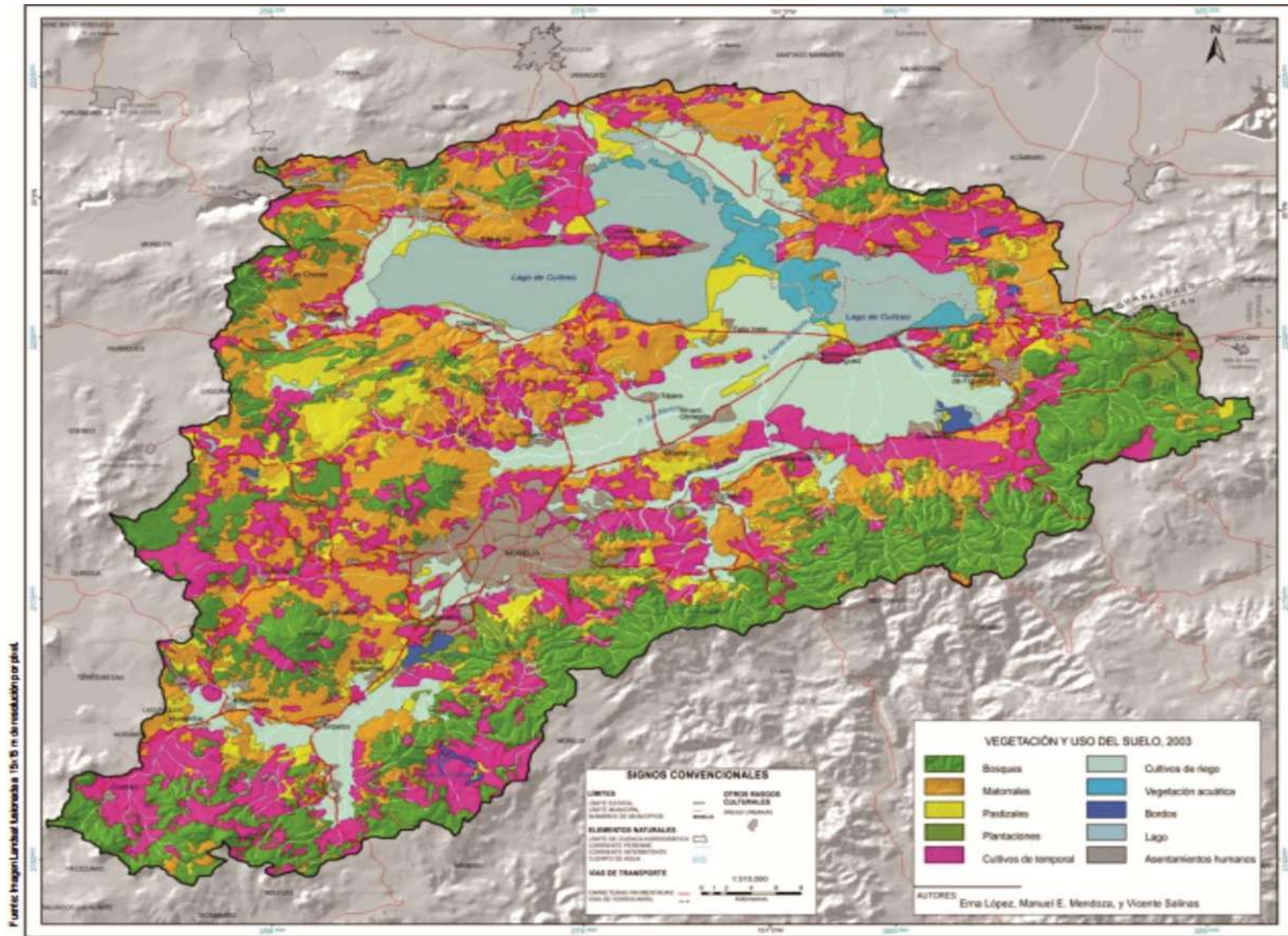


Figura 2.21. Uso del terreno Valle Morelia-Queréndaro. Fuente López et al., (2010) .

III. MARCO CONCEPTUAL

III.1. Geohidrología

Es importante remarcar que en el estudio del agua subterráneas existe una diferencia entre la geohidrología e hidrogeología, cuando se habla de la primera se considera el estudio primordial de la geología del subsuelo y su interacción con la hidrología; mientras que la segunda evoca el estudio primordialmente a la hidrología del subsuelo y su interacción con la geología. Ambas dan mayor peso a un área en específico, pero son esenciales ambas para el conocimiento de los acuíferos.

Entender como es la dinámica del agua subterránea es esencial para las investigaciones hidrológicas y geohidrológicas. Poner en peligro la disponibilidad de agua como fuente de abastecimiento, tanto en cantidad como en calidad y los efectos hacia la superficie constituyen limitantes para la integridad tanto de ambientes naturales, ecosistemas así como obras civiles (Carrillo-Rivera et al., 1996).

Previamente se consideraba que la topografía del terreno era un indicador infalible de los sistemas de flujo, al permitir suponer la dirección de las partes topográficamente altas como zonas de recarga y las topográficamente bajas como zonas de descarga (Frezze y Cherry, 1979), facilitando de esta manera un dato inicial para el estudio de acuíferos. Sin embargo la experiencia indica que no deja de ser necesario medir las condiciones piezométricas de las zonas ya que permite medir de una manera más certera el sistema de flujo del que se trata, pero ya que estas mediciones resultan muy costosas es necesario recurrir a mediciones a través de pozos situados en zonas de estudio (Carrillo-Rivera et al., 1996).

Es importante definir que en las zonas de recarga el volumen de agua aumenta con la profundidad y en las zonas de descarga es donde se mueve el agua subterránea hacia la superficie del terreno, caracterizada por manantiales, niveles estáticos someros, flujo base de ríos y en cambio en recargas existe deficiencia de humedad y niveles freáticos profundos (Tóth, 1972).

A medida que el agua subterránea se mueve en la zona saturada, de acuerdo con el patrón de flujo, generalmente aumenta su contenido de salinidad, pero esto se explica más adelante. La posición del nivel estático también está en función de la topografía y el clima de la región (Tóth, 1963,1966).

Tóth (1963) definió tres principales tipos de sistemas de flujo: local, intermedio y regional, dónde un **sistema de flujo local** presenta áreas de recarga y descarga situadas en colinas y depresiones adyacentes y las distancias entre entradas y salidas son pequeñas, y con respecto a su calidad fisicoquímica, presentan baja salinidad, su temperatura es similar a la media ambiental y cambian conforme a las estaciones del año. En los **sistemas de flujos intermedios** las zonas de recarga y

descarga están separadas por uno o más sistemas locales de flujo, las aguas presentan mayor contenido de sólidos disueltos totales (STD) en la descarga, la temperatura es afectada por el gradiente geotérmico y el control geológico es mucho más importante. Los **sistemas de flujo regional** poseen áreas de recarga y descarga posicionadas en los principales parteaguas y fondo de valles, respectivamente. Se inicia en los terrenos de mayor altitud y termina en las zonas más bajas, se puede considerar la existencia de varios sistemas de flujo locales. El agua tiene un mayor contenido de sales debido a que recorre mayor distancia y profundidad, presenta una temperatura mayor que la obtenida por los otros sistemas y su valor será básicamente constante en la descarga.

Tóth (1962) considera que si la topografía es abrupta producirá varios sistemas locales entrando y saliendo en el mismo valle.

Carrillo-Rivera y Cardona (2007) concluyen que las actividades humanas cambian la recarga natural, lo que altera los volúmenes de agua que escurren hacia pantanos, humedales, ríos y cuerpos de agua en áreas costeras o en el continente. Indican también que los lixiviados se infiltran en el agua subterránea desde sitios mal ubicados donde se depositaron residuos sólidos y líquidos de cualquier tipo. Aguas con alta salinidad y/o elementos traza y mayores se están induciendo a zonas de explotación de agua subterránea. El ambiente resulta alterado como resultado de cambios en el régimen del agua subterránea, destacando la remoción de cubierta vegetal que incrementa la erosión.

Continuando con la definición de parámetros importantes para el conocimiento de un acuífero es necesario considerar y definir conceptos fundamentales que rigen el comportamiento de los acuíferos que están alojados en substratos rocosos que permiten su clasificación en:

Acuíferos: rocas que almacenan y transmiten agua en cantidades significativas.

Acuitardos: rocas que almacenan agua y la transmiten lentamente.

Acuicludos: rocas con una capacidad de almacenamiento apreciable pero con capacidad de transmisión prácticamente nula.

Acuífugos: rocas que ni almacenan ni transmiten agua.

El límite entre unos y otros tipos de roca no está claramente definido, y en la práctica la consideración de una unidad geológica como acuífero suele establecerse en función de la naturaleza del resto de las unidades geológicas de la región (Fig. 3.1).

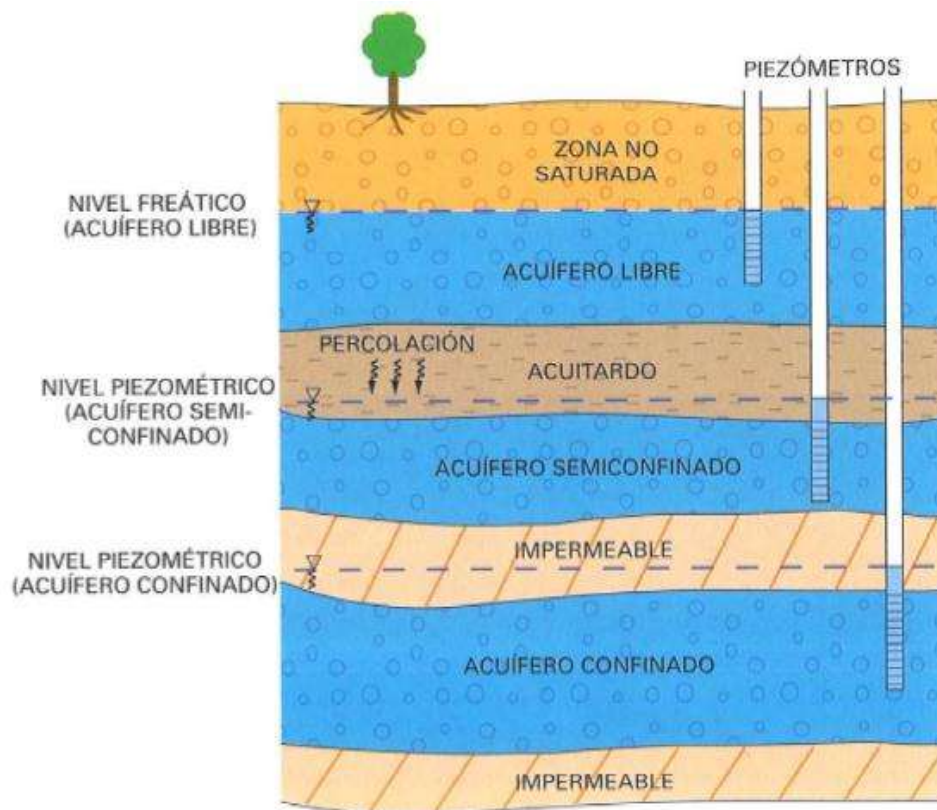


Figura 3.1. Distintos tipos de unidades acuíferas según su disposición. Fuente Martínez-Alfaro et al., 2005.

Cuando el agua almacenada se encuentra en un acuífero, y está en contacto directo con la atmósfera a través de los poros y fisuras de la roca a este se le denomina *acuífero libre* y se dice que se encuentra en la zona semisaturada ya que existe una común relación en los intersticios de agua y aire. Al límite superior de la zona saturada se conoce como *superficie freática*, es considerada de esta manera por la presencia de la presión atmosférica. En cualquier otro punto debajo de esta superficie, el agua está a una presión mayor que la atmosférica y se supone que la roca no ejerce ninguna presión sobre el agua que en ella se almacena, es decir que es una estructura independiente y estable. En cambio cuando un acuífero está aislado de la atmósfera por unidades geológicas impermeables se conoce como *acuífero confinado*, el cual siempre se encuentra saturado de agua y por tanto el agua se encuentra a una presión mayor que la atmosférica en todos sus puntos. Así que si se perfora un pozo hasta un acuífero confinado, el agua ascenderá en el interior de él, hasta alcanzar un equilibrio entre la presión atmosférica y la del líquido, a este comportamiento se le denomina *artesianismo*. Y si la presión fuera suficiente el agua podría ascender por encima de la superficie del terreno recibiendo el nombre de *surgencia*. A la cota que alcanzaría el agua en el interior de la perforación en el acuífero confinado se denomina *como nivel piezométrico* y al lugar geométrico del nivel piezométrico de todos los puntos del acuífero confinado se le denomina *superficie piezométrica*. Puesto que la presión del agua en todos los puntos de un acuífero confinado es mayor a la atmosférica, la superficie piezométrica

estará siempre por encima del techo del acuífero; si las unidades confinantes permiten cierto flujo de agua se le denominara *acuífero semiconfinado* (Vallisnieri, 1615) (Figura 3.2).

Cuando en un acuífero confinado o semiconfinado desciende su nivel piezométrico por debajo de su techo adquiere la condición de acuífero libre.

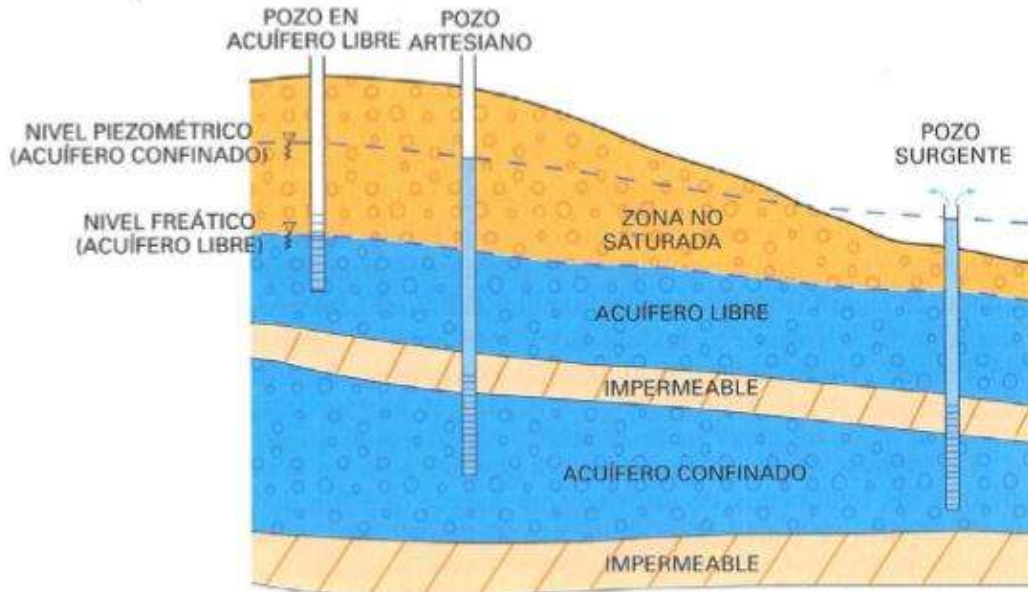


Figura 3.2. Esquema del comportamiento de los distintos tipos de pozos según el potencial hidráulico. Fuente Martínez-Alfaro et al., 2005.

Cuando un medio tiene las mismas características de conductividad hidráulica en todos sus puntos se dice que es *homogéneo* y si la conductividad hidráulica es la misma en cualquier dirección se dice que es *isótropo*. Así que el acuífero puede ser **homogéneo e isótropo**, esto quiere decir que tiene las mismas características hidráulicas en todos los puntos y no varía con la dirección. Por tanto si un acuífero es **homogéneo anisótropo**, conservará la característica de la misma conductividad hidráulica en todos los puntos, pero al ser anisótropo será distinta según la dirección a considerar. En caso de un **heterogéneo e isótropo** se debe considerar que la conductividad hidráulica será distinta para cada punto, pero no variará con la dirección. Y por último un heterogéneo y anisótropo implicará una variación de conductividad hidráulica en todos los puntos y en todas las direcciones.

A escala regional de una zona de estudio es recomendable manejar homogeneidad e isotropía con el objeto de poder aplicar al acuífero la formulación necesaria para su caracterización.

III.2. Geoquímica

“La geoquímica es la ciencia que estudia la composición química de la Tierra, los procesos y reacciones químicas que rigen la composición de las rocas y los suelos, el transporte de productos químicos en el tiempo y el espacio, y las interacciones de estos productos con la hidrósfera y la atmósfera” (Oyarzun et al., 2010).

Cuando un compuesto químico, de acuerdo a su naturaleza y origen es considerado como contaminante este se aloja en la parte superior del suelo y para llegar al acuífero debe seguir el mismo procedimiento del agua en la recarga, es decir, es influenciado por la gravedad y se desplazan en diferentes medios geológicos (porosos, fracturados, doble porosidad o poros que no están interconectados) o por aberturas producidas por actividades humanas (Carrillo-Rivera, 2011).

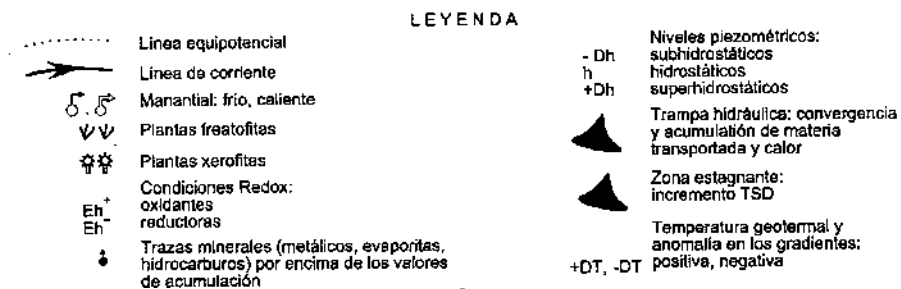
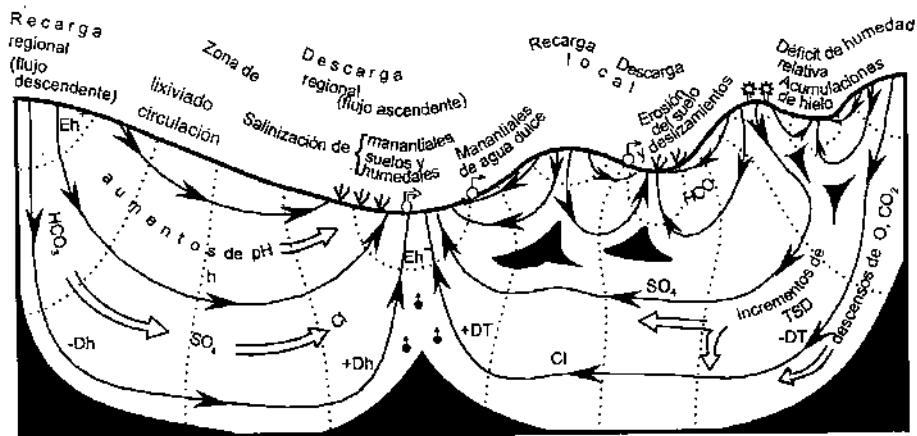
“Los materiales geológicos ejercen ciertos mecanismos de atenuación sobre los contaminantes, lo que disminuye el peligro potencial de la afectación en el agua subterránea. La efectividad de estos mecanismos depende del tiempo de contacto entre los contaminantes y el material que compone el subsuelo y de los tamaños de las partículas, además de sus características físicas y químicas y de la distancia que han viajado los contaminantes desde su fuente de origen (Carrillo-Rivera, 2011).

“**Las interacciones del agua subterránea y el medio circundante**, está condicionada por el intento de ambos sistemas de alcanzar un estado de equilibrio. Clasificados en tres grandes grupos según su naturaleza química, física o cinética. Interpretando que el proceso de búsqueda de un estado de equilibrio, definido como aquel que presenta un estado de mínima energía, el agua que circula por el subsuelo puede: 1) movilizar y depositar materia y energía, 2) transportar esta materia o energía, 3) lubricar las superficies de discontinuidad en el caso de rocas, y 4) generar y modificar las presiones intersticiales. En zonas con alta energía química o termal, el agua aumenta su contenido en sales debido a disolución, oxidación y ataque de ácidos. Una alta energía mecánica produce un flujo subterráneo, que transporta solutos y calor, por lo que esta zona se convierte en una fuente local de materia y calor. Las zonas donde la energía es baja el agua tiende a converger, y en muchos casos a salir a la superficie liberando materia y calor”. A este conjunto de manifestaciones debidas a la interacción agua-medio ambiente se conoce como efectos ambientales “in situ” del agua subterránea, **siendo el flujo el mecanismo sistemático de transporte y distribución**, los procesos “in situ” mencionados están limitados en el tiempo y reducidos en pocos puntos en el espacio. Y para poder dar lugar a fenómenos geológicos como depósitos minerales, anomalías geotérmicas o humedales, se necesita que los desequilibrios se acumulen a lo largo de un periodo de tiempo y se concentren en volúmenes no muy grandes de terreno. Del cual el único mecanismo capaz de producir y mantener estas condiciones de

desequilibrio concentradas y prolongadas es un flujo subterráneo regional (escala de cuenca), dónde las áreas de movilización de solutos serían las zonas de carga y las terminales las de descarga siendo ésta la salida o deposición del soluto y la zona central la zona de transporte de masa o energía (Tóth, 2000).

En la figura 3.3 presenta Tóth (2000), los fenómenos asociados en una sección a escala regional y suponiendo condiciones de flujo gravífico. A la izquierda una cuenca ideal simplificada, con un sistema único de flujo, sin flujos locales. En la derecha aparece una jerarquía de flujos a diferentes escalas: local, intermedia y regional; cada uno con sus áreas de recarga, circulación y descarga. En ambas descargas se invierten los niveles piezométricos, crecen con la profundidad y el flujo vertical asciende y converge, en la circulación la altura piezométrica apenas varía y el flujo es predominantemente horizontal.

El esquema en ambos casos tiene consecuencias importantes como mecanismo ambiental, como: 1) niveles piezométricos por debajo o por encima de los valores hidrostáticos según zonas de carga y descarga. 2) contenidos de humedad bajos en zonas de recarga y altos en las de descarga, considerando precipitación y evapotranspiración. 3) cambios en la concentración aniónica a lo largo del esquema de flujo y en profundidad, pasando de aguas bicarbonatadas a sulfatadas y finalmente cloruradas. 4) lixiviación de materiales superficiales en recargas con aumento de sales a lo largo de la circulación. 5) Salinización de marismas en zonas pantanosas con aportación intensa de sales. 6) anomalías geotérmicas en zonas de flujo vertical. 7) condiciones oxidantes en recarga y reductoras en descarga. 8) cubierta vegetal según el aporte nutritivo del flujo. 9) tendencia a problemas de inestabilidad en áreas de descarga. 10) acumulación



de solutos transportados por el agua, como iones metálicos, hidrocarburos y contaminantes antrópicos.

Figura 3.3.Efectos y manifestación de flujo subterráneo. Fuente Toth 2000.

Tóth (2000) maneja que el elemento clave para esta gran diversidad es que el agua subterránea es activa sobre una gran variedad de escalas espaciales y temporales, circula en la sección porosa de la corteza terrestre hasta profundidades de 15-20 km de modo continuo variando su velocidad desde 1,000 m/día hasta 1 mm/siglo. Además los sistemas de flujos individuales están en función de la profundidad, si están cerca de la superficie o son acuíferos libres, el flujo sufre modificaciones relativamente rápidas en respuesta a variaciones producidas en superficie, lo cual no sucede en profundidades o acuíferos confinados. Por tanto cambios geológicos a condiciones estables en largo plazo difícilmente se producen en superficie. Y las causas para generar el desequilibrio se clasifican en: químicas, físicas y cinéticas.

Químicos

- 1) Disolución: depende de la solubilidad de minerales, la concentración previa en el agua subterránea, la presión y la temperatura circundante. Entre las rocas más solubles esta la calcita, dolomita, yeso, halita y silvita sirven como fuente de Ca, Mg, Na, K, CO₃, SO₄ y Cl. Los silicatos y el resto de las rocas “insolubles” proporcionan iones minoritarios o elementos traza.
- 2) Hidratación: incorporación de agua a la matriz cristalina o la adsorción de ésta en iones disueltos.
- 3) Hidrólisis: reacción de una sustancia al agua, es decir un ión con una molécula de agua forman su especie asociada y liberan H⁺ o OH⁻. Si la hidrolisis se lleva acabo con cationes (A⁺ + H₂O AOH + H⁺), se produce una solución ligeramente ácida y básica si es con aniones (X⁻ + H₂O HX + OH⁻), es efectiva la reacción si los iones producidos son inmediatamente transportados.
- 4) Reacciones de oxidación-reducción: reacciones químicas que producen una transferencia de electrones, donde el proceso de oxidación representa la pérdida de electrones libres y la reducción incorpora electrones. La oxidación tiene su mayor importancia en la zona vadosa donde el agua presenta gran cantidad de O₂ disuelto que disminuye una vez alcanzada la zona saturada. La solubilidad en agua del O₂ es de 6.6 cm³/l a 20°C menor que en el aire de 200 cm³/l, en consecuencia el proceso de oxidación decrece con la profundidad.
- 5) Ataque directo por ácidos al macizo rocoso: comúnmente HCO₃, HNO₃ y H₂SO₄.
- 6) Precipitación de solutos: *reacción con iones de la matriz sólida para formar precipitados no solubles como, CaF₂, formado por el flúor del agua y el calcio en la matriz rocosa. Cabe resaltar que los cambios que se producen en la presión y temperatura afectan a la

solubilidad de algunos componentes químicos, como la precipitación de CaCO_3 alrededor de los puntos de descarga por una agua con alto contenido de CO_2 y que es sometida a una reducción de presión; *oxidación de la materia disuelta por exposición al aire.

- 7) Intercambio iónico: las sustancias con mayor potencial de intercambio iónico son los minerales arcillosos (caolinita, montmorillonita, illita, clorita, vermiculita y zeolita), el óxido férrico y la materia orgánica, fundamentalmente porque forman coloides con gran superficie específica, como intercambio de Na por Ca y/o Mg produciendo un reblandecimiento del agua por enriquecimiento de Na y un aumento en la porosidad y permeabilidad del nuevo mineral arcilloso enriquecido en Ca o Mg, a través de las fuerzas físicas de Van der Waals o enlaces químicos.
- 8) Reducción de sulfatos: presencia de bacterias sulfato-reductoras en contacto con materia orgánica.
- 9) Concentración de solutos: la concentración de sólidos disueltos (TSD) en aguas subterráneas está afectada por la evaporación y la dilución de minerales. 1) Por evaporación, tiene lugar en la zona no saturada y entre eventos de lluvia, cuando llueve se transportan al subsuelo y cuanto mayores sean las temperaturas y más separadas estén de los eventos lluviosos mayor será la concentración de sales. 2) En zonas de descarga de flujo subterráneo, la concentración por evaporación puede producir salinización del suelo y/o la formación de depósitos salinos continentales por precipitación. (Jankowski y Jacobson, 1989; Macumber, 1991; Tóth, 1971; Wallick, 1981; Williams, 1970).
“El equilibrio químico agua-roca limita la concentración máxima que se puede obtener por disolución. Si el agua tiene suficiente tiempo para disolver minerales, se pueden alcanzar salinidades relativamente altas aunque la roca presente pocos minerales solubles.”
- 10) **Ultrafiltración por membranas arcillosas:** mecanismo potencial para incrementar la concentración iónica en las aguas subterráneas (Berry, 1969). Arcillas y pizarras poco compactadas pueden actuar como barreras semipermeables a través de las cuales se impide el flujo de agua por diferentes alturas piezométricas. Los iones en cambio quedan retenidos, aumentando la concentración de las sales en las zonas de los cuerpos arcillosos que presentan altas presiones.

Físicos

- 1) Lubricación: puede tener lugar en las superficies de los granos en suelos y sedimentos no consolidados, o en los planos de fracturas en rocas consolidadas. Reduce la fricción y aumenta los efectos de las de corte sobre las discontinuidades, se pueden inducir así deformaciones tangenciales en los materiales, que pueden ir desde pequeños reajustes de los granos, por compactación, hasta grandes deslizamientos o terremotos. El efecto se magnifica por el incremento de las presiones intersticiales, que supone una reducción en las tensiones efectivas por tanto en la resistencia friccional a las deformaciones

tangenciales. Presiones intersticiales altas aparecen de manera natural en las zonas de descarga de flujo subterráneo.

- 2) Variaciones de presiones intersticiales: Los cambios espaciales y temporales de las presiones intersticiales afectan los tipos y la cinética de las reacciones químicas, la solubilidad de los gases, los valores de saturación de gases e incluso la propia integridad de las rocas (Domenico y Schwartz, 1997; Freeze y Cherry, 1979; Gretener, 1981; Hubbert y Rubey, 1959; Tóth y Millar, 1983).

La modificación de las presiones intersticiales por flujo gravífico es un efecto dinámico, con valores negativos en la zona de recarga, valores nulos en la circulación y valores positivos en la descarga.

Cinética

- 1) Transporte del agua subterránea: en condiciones de flujo gravífico, las masas de agua están regularmente distribuidas, y aparece un efecto regional de contraste de humedades entre las zonas de recarga y descarga.
- 2) Transporte de materia: el agua subterránea transporta materia muy diversa y en formas muy variadas, la importancia de este proceso se debe a la acumulación de minerales resultante del lixiviado de suelos y rocas, arrastre de los nutrientes y acumulación en forma de depósitos de minerales metálicos o no metálicos e hidrocarburos.
- 3) Transporte de calor: el agua puede transportar calor debido a su alta capacidad específica que viene dada por $\rho_w C_w$, ρ_w es la densidad del agua y C_w su calor específico. Si existe un desequilibrio térmico entre el agua y el medio circundante, el agua fluye tendiendo a compensar las temperaturas. El flujo de intercambio térmico entre el agua circulante y el medio es el resultado de la competencia entre la disipación de calor por conducción y el arrastre del calor por advección o movimiento del agua subterránea.

Tóth (2000), considera que los seis atributos principales que definen un régimen del agua subterránea son: el contenido de agua en rocas, la geometría del sistema de flujo, la descarga específica, la composición química del agua, la temperatura y la variación temporal de todos los anteriores y estos parámetros a su vez están controlados por tres componentes del ambiente hidrogeológico: topografía, geología y clima, y estos a su vez por varios parámetros. La topografía: el tamaño y la forma de los relieves; geología: contenido de material soluble, la configuración de heterogeneidades (estratificación, lenticularidad, fallamiento, fracturación, karstificación y grado de anisotropía); clima: la temperatura y la variación estacional de la precipitación y la evapotranspiración potencial.

III.3. Modelado en MODFLOW

Para realizar un modelo de un acuífero es necesario hacer énfasis en conceptos fundamentales como la naturaleza tridimensional del flujo del agua subterránea, estimando parámetros necesarios para comprender el comportamiento del acuífero como T (trasmisividad), K (conductividad hidráulica), b (espesor), S (almacenamiento) y n (porosidad).

Para la conductividad hidráulica de un medio fracturado es importante conocer el espesor de la unidad geológica de interés, también entender cómo funciona matemáticamente el sistema que permitirá realizar el modelo. Es preciso no olvidar que un modelo pretende interpretar el comportamiento de la realidad, pero que no podrá ser lo mismo.

La capacidad de MODFLOW para desarrollar modelos hidrogeológicos es limitada, por ejemplo, considera que el flujo hacia el pozo de bombeo es radial, pero esto en la realidad no siempre funciona. Otras limitaciones son las zonas no saturadas, no es fácilmente distinguir entre acuíferos confinados y no confinados y MODFLOW tampoco lo hace por sí mismo. El modelo también discretiza los dominios de espacio y tiempo para realizar sus cálculos, todo mediante retículas y celdas.

MODFLOW, es uno de los entornos más utilizados para modelado y aplicaciones prácticas en el flujo de aguas subterráneas tridimensionales. La SWS (Schlumberger Water Services) lo desarrolló a partir de 1989, para resolver un problema de infiltración y difusión de contaminantes en Waterloo, y continuamente es actualizado. Siendo el esquema de diferencias finitas es la resolución numérica que emplea a través de un método iterativo, logrando trabajar mejor con acuíferos rectangulares o prismáticos y de composición uniforme, por lo que la modelación de acuíferos irregulares o curvos, con características de anisotropía y heterogeneidad son difíciles de resolver (Visual MODFLOW Pro, 2010; Vázquez-Heredia, 2013).

IV. ANTECEDENTES

IV.1. Antecedentes Generales

En 1996 la Comisión Nacional del Agua (CNA) estableció a la cuenca hidrológica como la unidad básica de gestión, identificándose en el país 13 regiones administrativas independientes de los límites políticos estatales, constituidas por una o más cuencas (Fig. 4.1).



Figura 4.1 Mapa Regiones hidrológicas administrativas. Fuente CNA 2003a.

La CNA para el año 2001 estimó que se extrajeron de ríos, lagos y acuíferos del país 72.56 km³ de agua para los principales usos consuntivos, lo cual representa 15% de la disponibilidad natural media nacional (escurrimiento natural virgen y recarga de acuíferos) (CNA 2001, 2003a). A nivel nacional, la extracción de agua subterránea equivale a cerca de 37% de la recarga o volumen renovable, pero existen regiones donde la situación es crítica (como ocurre en las zonas áridas) pues el balance hídrico es negativo y se está agotando el recurso. Esto se ve agravado en el caso de los volúmenes de infiltración que se han reducido como resultado de la pérdida de zonas de recarga (bosques de agua), por la deforestación y los cambios de uso del suelo. En México el recurso hídrico está sujeto a una presión moderada, si se emplean los criterios de la Comisión para el Desarrollo Sustentable de la Organización de las Naciones Unidas. Sin embargo, en las zonas del centro, norte y noroeste, este indicador alcanza un valor superior al 40%, que es considerado como una muestra de la alta presión que se ejerce sobre el recurso. Esto constituye una amenaza para el desarrollo de las entidades correspondientes, ya que precisamente en estas zonas es donde se concentra la mayor parte de la población, así como la actividad industrial más importante (CNA 2001). En la figura 4.2 se observa que la parte occidental del país está sometida a una

presión media fuerte, una fracción de la nororiental a presión moderada y solamente en la zona sur hay una escasa presión sobre este recurso.

* Estimaciones realizadas por la Gerencia de Planeación Hidráulica (GPH), con base en la disponibilidad y extracciones de agua, considerando el procedimiento de evaluación que marca la Comisión para el Desarrollo Sustentable de la ONU en su publicación: Evaluación General de los Recursos de Agua Dulce del Mundo 1997.
Fuente: CNA 2003a.

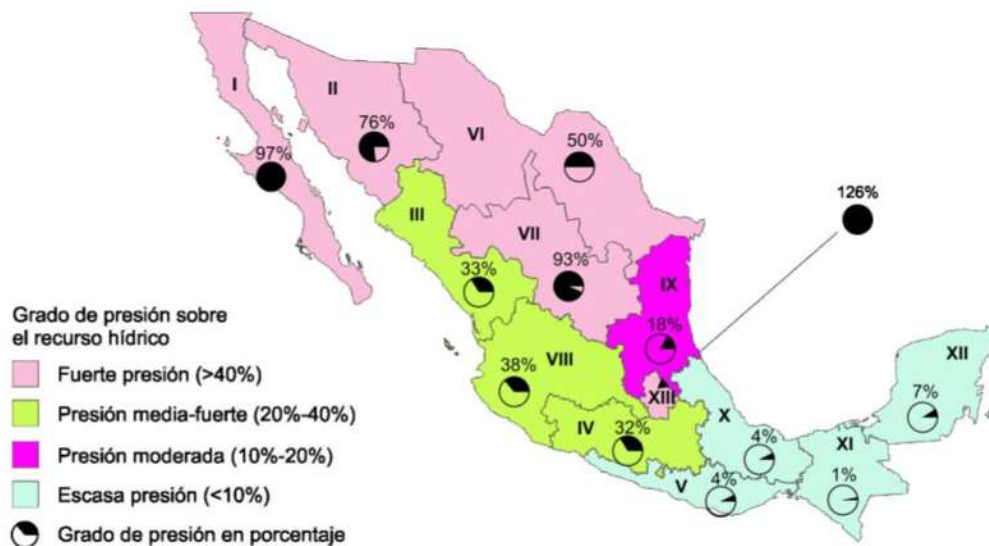


Figura 4.2. Mapa grado de presión sobre el recurso hídrico por región hidrológico-administrativa. Fuente CNA 2003a.

Cabe resaltar que entre 1998 y 2000 se incrementó el agua subterránea utilizada en la agricultura en cerca de 3,000 km³/año (SEMARNAT 2003d). En segundo lugar en el consumo de agua está el uso público. Las dotaciones per cápita reportadas para este uso oscilan entre 100 y 240 L/habitante/día, dependiendo del tamaño y el clima de la localidad; sin embargo, la dotación que reciben grandes ciudades como el Distrito Federal es significativamente mayor, alcanzando hasta 360 L/habitante/día (Gobierno del Estado de México 2003). Junto con la presión que ejerce la demanda, se presentan las pérdidas por fugas en las redes de distribución de agua potable, que oscilan entre 30% y 50%, a lo cual se agregan las deficientes tarifas para el cobro del servicio (CNA 2001).

Con respecto a la calidad del agua, la CNA empleó un índice de calidad del agua para su evaluación (ICA) realizada en el año 2001 en cuerpos de agua superficiales receptores, se encontró que el 6% presentó excelente calidad, 20% una calidad satisfactoria que posibilita todo tipo de usos, 51% tuvo poca contaminación, lo cual restringe sus usos directos en ciertas actividades, y el 23% restante estuvo contaminado, altamente contaminado o con presencia de tóxicos, dificultando su uso directo prácticamente en cualquier actividad. Entre los principales contaminantes se encontraron coliformes fecales, grasas y aceites, ortofosfatos, sólidos disueltos y detergentes (Tabla 4.1). En el caso del agua subterránea, más del 80% de los acuíferos contienen

agua de buena calidad natural, con concentraciones menores o iguales a 1,000 mg/L de sólidos totales disueltos, pero se estima que alrededor de 40 acuíferos en el país presentan cierto grado de deterioro de la calidad del agua subterránea por actividades antropogénicas (CNA 2001).

Región Administrativa	Cuenca	Cuerpo de agua altamente contaminados
I Península de Baja California III Pacífico Norte	Río Tijuana-Mandadero Río San Pedro	Río Tijuana, Río Tecate, Río Nuevo Arroyo Acequia Grande, Río Durango, Río Tunal, Río Súchil
IV Balsas VI Río Bravo VIII Lerma Santiago Pacífico	Río Atoyac Laguna de Bustillos y de los Mexicanos Río Lerma-Toluca Río Lerma-Salamanca Río Laja Río Santiago-Guadalajara Río Verde-Grande	Río Zahuapan, Río Atoyac, Río Alseseca Laguna de Bustillos Río Lerma Río Lerma, Río Turbio Río Querétaro Río Santiago Río Lagos
IX Golfo Norte X Golfo Centro XIII Valle de México	Río Moctezuma Río Papaloapan Río Moctezuma	Río San Juan, Río Tulancingo Río Blanco Río de los Remedios, Río Churubusco, Río San Buenaventura, Río de la Compañía, Río Teotihuacan, Presa Heñido, Río de las Avenidas

Fuente: CNA 2003a.

Tabla 4.1. Cuencas que incluyen los cuerpos de agua más contaminados. Fuente CNA 2003a.

También existe la información sobre acuíferos sobreexplotados a nivel nacional, la recarga de los acuíferos es del orden de 75 km³/año; sin embargo, la extracción excesiva se estima entre 5 y 6 km³/año, debido a que el número de acuíferos sobreexplotados ha aumentado de forma alarmante. Se pasó de 32 acuíferos en 1975, a 97 para fines de 2001, es decir, 17% de los 600 acuíferos principales que suministran alrededor del 50% del agua de consumo para todos los usos (Figura 4.3), y existen casos en los cuales dicha sobreexplotación ha provocado hundimientos severos como ha ocurrido en las ciudades de México, Aguascalientes y Zacatecas. En las zonas áridas se observa salinidad alta en los acuíferos por la escasez de lluvias y la elevada evaporación; por el contrario, en las zonas tropicales y de mayor precipitación la salinidad es menor (CNA 2001). Además, en México existen regiones donde la composición geológica determina la presencia en el agua subterránea de varios elementos y compuestos inorgánicos potencialmente nocivos para el ser humano, que se han disuelto en el agua de forma natural a través de procesos geoquímicos. Tal es el caso del arsénico en Coahuila, Chihuahua, Durango e Hidalgo y los fluoruros en los acuíferos de Aguascalientes, Chihuahua, Durango, Estado de México, Guanajuato, Jalisco, San Luis Potosí, Sonora y Zacatecas (Vega-Gleason, 2002). En la Comarca Lagunera, por ejemplo, en 1998 se encontraron concentraciones de arsénico en un rango de 0.008 a 0.624 mg/L; el 50% de las muestras analizadas tuvieron niveles superiores a 0.50 mg/L, cuando el límite máximo permisible en México es de 0.05 mg/L (valor no actualizado), de acuerdo con la norma de salud ambiental que implanta la calidad del agua potable, NOM-127-SSAI-1994, Salud ambiental. Agua

para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización (Vega-Gleason, 2002).

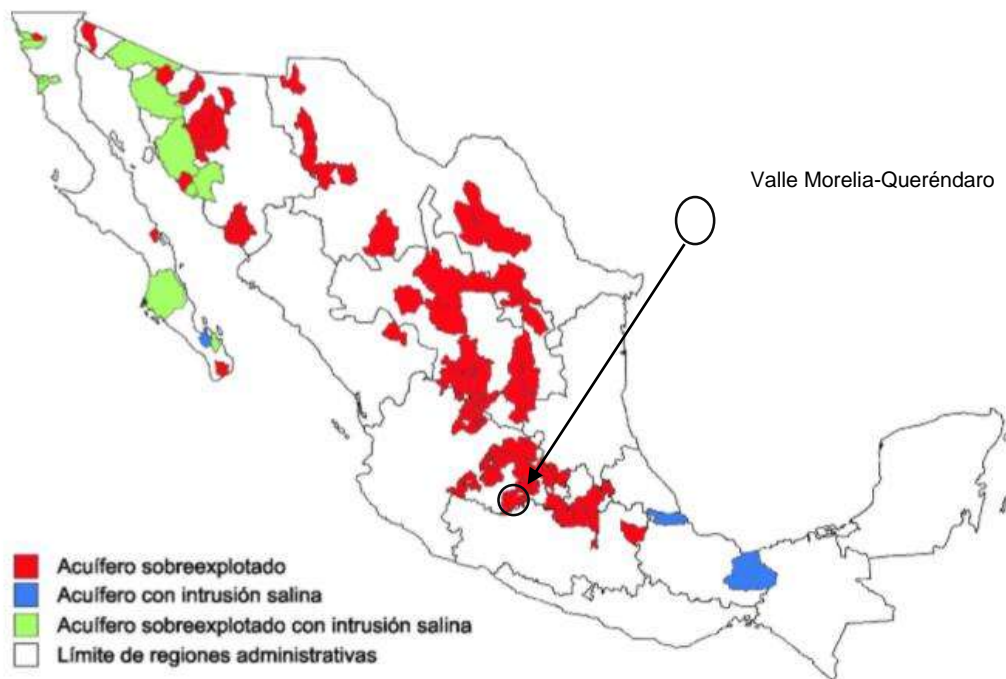


Figura 4.3. Acuíferos sobreexplotados y con intrusión salina, 2001. Fuente CNA 2003a.

En el periodo comprendido entre 1990 y 2000, la cobertura de agua potable en zonas urbanas se incrementó de 88.4% a 94.6%, en tanto que en el medio rural este indicador pasó de 51% a 68.0% (SEMARNAT 2003d). A nivel nacional, de los 95.3 millones de personas que habitan en viviendas particulares, el 87.8% cuenta con el servicio (Fig. 4.4). Entre los estados con mayor cobertura se encuentran el Distrito Federal, Aguascalientes, Colima y Coahuila (más del 90%) mientras que Chiapas, Tabasco, Oaxaca, Veracruz y Guerrero sólo cuentan con agua potable en el 75% de las viviendas (SEMARNAT 2003d).



Figura 4.4. Cobertura de agua potable. Fuente CNA 2003a.

CNA presenta en 2011, “El Plan Nacional de Desarrollo 2007-2012 el cual asume como premisa básica la búsqueda del Desarrollo Humano Sustentable, es decir, que todos los mexicanos tengamos una vida digna sin comprometer el patrimonio de las generaciones futuras. En este contexto, el adecuado manejo y preservación del agua cobra un papel fundamental, dada su importancia en el bienestar social, el desarrollo económico y la preservación de la riqueza ecológica de nuestro país.

IV.1.1 Antecedentes Cuenca del Lago de Cuitzeo y el Valle Morelia-Queréndaro

Anteriormente se mencionó que el organismo administrador de agua en la República Mexicana (CNA) acordó una división en zonas administrativas independientes a los límites políticos de los estados, en el cual, el Valle Morelia-Queréndaro pertenece a la cuenca del lago de Cuitzeo.

Algunos de los estudios realizados en el acuífero (Bravo-Espinosa et al., 2012) del cual “se sabe que las actividades de mayor demanda son la agricultura y el uso doméstico y que CNA en junio de 1997 reportó en un resumen del Balance Hidrológico de los Acuíferos de Michoacán, con una extracción de 202.852 Mm³/año y una recarga (basada en un balance de 1995) de 221.280 Mm³/año, con cual se tiene una disponibilidad de tan solo 18.428 Mm³/ año. Con esto, CNA declara

que el acuífero Morelia-Queréndaro se encuentra en una condición de semiequilibrio, ya que dicha relación está entre 0.90 y 0.94.”

Las conclusiones presentadas por Bravo-Espinosa et al., en 2012 establecen que: “los acuíferos del Valle Morelia-Queréndaro aun presentan una buena opción de fuente de abastecimiento para los habitantes de la región. En general, los niveles estáticos y dinámicos todavía no presentan abatimientos excesivos, por lo que la extracción aun es económicamente factible. Además, la calidad del agua en la mayor parte del valle es aceptable y el balance de extracción y recargas todavía no supera la unidad, lo cual significa que se extrae menos de lo que se recarga. Por otro lado, el crecimiento de la población en la región que continuamente requiere de un mayor abastecimiento de agua, representa una seria amenaza para el equilibrio hidrológico de los acuíferos, por lo que se debe tener cuidado en su uso y elaborar políticas de operación que permitan proteger y conservar este recurso natural. Finalmente, es necesario llevar a cabo más estudios sobre estos recursos y establecer una red continua de monitoreo de la calidad del agua y medición de niveles en la zona, con el objeto de mantener un sistema de información actualizado de este importante recurso.”

Cuitzeo posee un comportamiento de unidad acuífera regional de tipo libre, donde la litología existente produce una continuidad hidráulica subterránea entre las diversas hidrografías (superficiales) presentes. Por tal razón se considera al agua subterránea desde una perspectiva regional y de sistema, requiere de la incorporación de todas las variables posibles que interactúan en su dinámica y es importante evitar limitarse al análisis de pequeñas porciones por aspectos administrativos, políticos y socioeconómicos, lo cual evita conocer el funcionamiento físico real del sistema. Sin embargo, las consideraciones que también plantea López et al.,(2010) es tomar en cuenta lo limitada en cantidad, calidad y asequibilidad de información hidrogeológica en la cuenca y enfatiza la importancia de realizar estudios hidrogeoquímicos identificando así la interacción del líquido con las rocas a lo largo de todo el trayecto, desde su recarga hasta su descarga, analizando la temperatura y profundidad que logre alcanzar durante su recorrido por el subsuelo y substrato así como posibles contaminantes las cuales son variables importantes que afectan su calidad. A partir de la calidad química de manantiales y pozos, junto con el conocimiento del perfil estratigráfico, considera que se puede definir edad, dirección, velocidad de flujo, procesos y reacciones químicas que se presentan en el agua subterránea durante su recorrido.

En el trabajo que presentó Medina-Vega (2008), establece que una de las direcciones de flujo del agua subterránea ocurre hacia el noroeste, planteando que esta recibe principalmente la aportación de recarga proveniente de la parte sur de la cuenca, específicamente de la Sierra de Mil Cumbres con el sentido del flujo hacia el vaso del lago de Cuitzeo.

IV.1.2. Antecedentes Morelia

La ciudad de Morelia se localiza en la región SO de una cuenca endorreica, presenta un área urbana de aproximadamente 98.04 km², que se sextuplicó en 37 años, drena sus aguas negras directamente al río Grande de Morelia (actualmente existe una planta tratadora), una vez tratada el agua es reintegrada al río para finalmente desembocar al lago de Cuitzeo.

Las actividades que consumen mayor volumen de agua son las agrícolas y las realizadas en los centros urbanos. El análisis del balance hídrico a nivel de formas de relieve confirmó que las condiciones hidrológicas regionales se encuentran en equilibrio. CNA (2009) registra la existencia de 986 pozos y 23 manantiales en todo el valle Morelia-Queréndaro un área de 2030 km² donde asigna el 53.69% a uso agrícola, 40.21% a uso público urbano y el 6.1% restante a otros usos. Se considera que se extraen 162 hm³/año y la salida por manantiales es de 60.3 hm³/año y 64.2 hm³/año por evapotranspiración, en la recarga vertical se le ha asignado un valor de 160.2 hm³/año, por retorno de riego 34.5 hm³/año y por retorno de fugas 4 hm³/año. La entrada por flujo horizontal 88 hm³/año, la recarga total media anual al acuífero es de 286.7 hm³/año.

Existen investigaciones en la zona de Morelia en las que definen la problemática que afecta al comportamiento del acuífero y la vida potable útil que le podríamos dar. Ávila-Olivera et al (2007) plantean que la subsidencia debida a la sobre explotación de acuíferos ha ocasionado hundimientos, generando los procesos de subsidencia-creep-falla (PSCF).

También plantean que en la parte NE-SO de la ciudad, el sistema acuífero está conformado por dos acuíferos y a través de sus estudios realizados con las fallas presentes en la ciudad, consideran que el promedio del nivel freático en bloques que se hunden en fallas es menor que aquellos bloques que permanecen relativamente fijos, a causa de los diferentes espesores de sedimentos lacustres y fluviolacustres y la configuración geométrica de las fallas y estratos que afectan.

Otra característica más que mencionan es que, en los bloques que se hunden con el fallamiento, localizado en la parte NE de la ciudad, el agua es tomada del acuífero superficial, mientras que en los bloques que permanecen en el alto esta se extrae del acuífero profundo. Los autores interpretan que el acuífero superficial está localizado en sedimentos lacustres y fluviolacustres y el profundo en otros tipos de litologías que se mencionarán más adelante (andesitas e ignimbritas).

Posteriormente Hernández- Madrigal y Ávila-Olivera (2010) especifican de una manera más amplia, también por información proporcionada por CNA y OOAPAS e información de diversos investigadores, la existencia de 4 unidades geohidrológicas, las cuales se encuentran afectadas por el intenso fracturamiento y fallamiento. En la figura 4.5 se muestran los acuíferos presentes en la ciudad de Morelia;

- a) **el primero** y más profundo corresponde a una secuencia volcánica de carácter andesítico, compuesta de derrames de lava muy fracturadas. “Las andesitas se alternan con flujos piroclásticos, brechas, escorias y depósitos de caída; esta característica le confiere a la roca una excelente permeabilidad secundaria. El paquete volcánico tiene su mayor representatividad en la sierra de Mil Cumbres, en el campo Geotérmico de Los Azufres y en la región de Cuitzeo-Morelia, las cuales conforman el acuífero más importante de la zona. De hecho, la producción geotérmica de los Azufres se genera en esta unidad. Su principal zona de recarga se localiza en la zona de Mil Cumbres y las calderas de Atécuaro y La Escalera. Por el grado de fracturamiento su morfología y la configuración de la red hidrológica, las rocas son excelentes zonas de recarga del acuífero de la región” (Pasquare et al., 1991; Hernández- Madrigal y Ávila-Olivera 2010). Garduño et al (2001) observa que el avance de la mancha urbana invade zonas de recarga y afectan la calidad y la cantidad de agua subterránea y superficial y considera que es de vital importancia que esta zona no sea urbanizada.
- b) **El segundo** está conformado por una secuencia de flujos piroclásticos provenientes de las calderas localizadas en la sierra de Mil Cumbres (Calderas de Atécuaro, La Escalera). La secuencia de flujos piroclásticos está compuesta de pómez y ceniza, ceniza y líticos, y los denominados flujos soldados (una roca vítrea muy dura con líticos). Toda la unidad es de composición riolítica, contando con una baja permeabilidad, se considera que el fracturamiento es menor que la secuencia anterior; sin embargo, reconoce los mismos sistemas de fracturas mencionadas en las andesitas del Mioceno. Considera que **la permeabilidad disminuye debido a que en los flujos piroclásticos no soldados y de pómez se produce la alteración de las plagioclasas, generando la formación de arcillas que impiden la libre circulación de fluidos**. Estas rocas componen un acuífero de tránsito y no tiene características de un buen acuífero, además de ser portador de muchos sólidos en suspensión (arcillas) en el agua subterránea.
- c) **Tercero**, esta unidad geohidrológica terrígena se compone en el subsuelo de 60 m de alternancias de conglomerados, arenas, limos y arcillas; con eventuales interdigitaciones de lavas y productos volcánicos explosivos, por lo tanto, es donde se localizan los acuitardos. Dentro de ella se observan fallas noroeste-sureste, este-oeste y noreste-suroeste, las dos últimas presentan una geometría de fallas sin sedimentarias, que en correspondencia con la extracción de agua del subsuelo detonan los Procesos de Subsistencia Creep Falla (PSCF) de Morelia, cuyas tasas de hundimiento van de 4 a 6 cm/año (Garduño-Monroy et al., 2001). La permeabilidad depende de la litología, siendo obviamente los niveles más granulares los más idóneos para el aprovechamiento del acuífero.
- d) **Cuarto**, hacia el poniente del lago de Cuitzeo y en la región de Morelia se presenta una serie de aparatos monogenéticos y de tipo escudo (Águila, Quinceo, Las Tetillas, etc.) que

se encuentran descansando sobre las secuencias lacustres terrígenas. Este vulcanismo está compuesto por lavas en bloque, brechas, piroclastos y derrames de escoria. Los volcanes escudo ocupan grandes superficies, por lo que son zonas de captación para las aguas subterráneas que van abastecer preferencialmente a los acuíferos de las secuencias terrígenas. También a ellos se asocian los manantiales que surgen en el contacto entre los depósitos volcánicos y las arcillas de las secuencias terrígenas. Dentro de la cuenca del lago de Cuitzeo, hacia el suroeste prevalentemente, las rocas volcánicas están conformadas por arenas y gravas, además de lavas muy fracturadas. En esta litología se instaló el tiradero municipal de Morelia hace más de 15 años. Cabe resaltar que no presenta un control de lixiviados, por lo que migran directamente al subsuelo a través de las fracturas cuya permeabilidad es alta (Israde-Alcántara et al., 2005). La zona suroeste de la cuenca se ha elegido para el desarrollo de Morelia, lo que ha requerido que se perforen un gran número de pozos de agua potable (Hernández-Madrigal y Ávila-Olivera 2010).

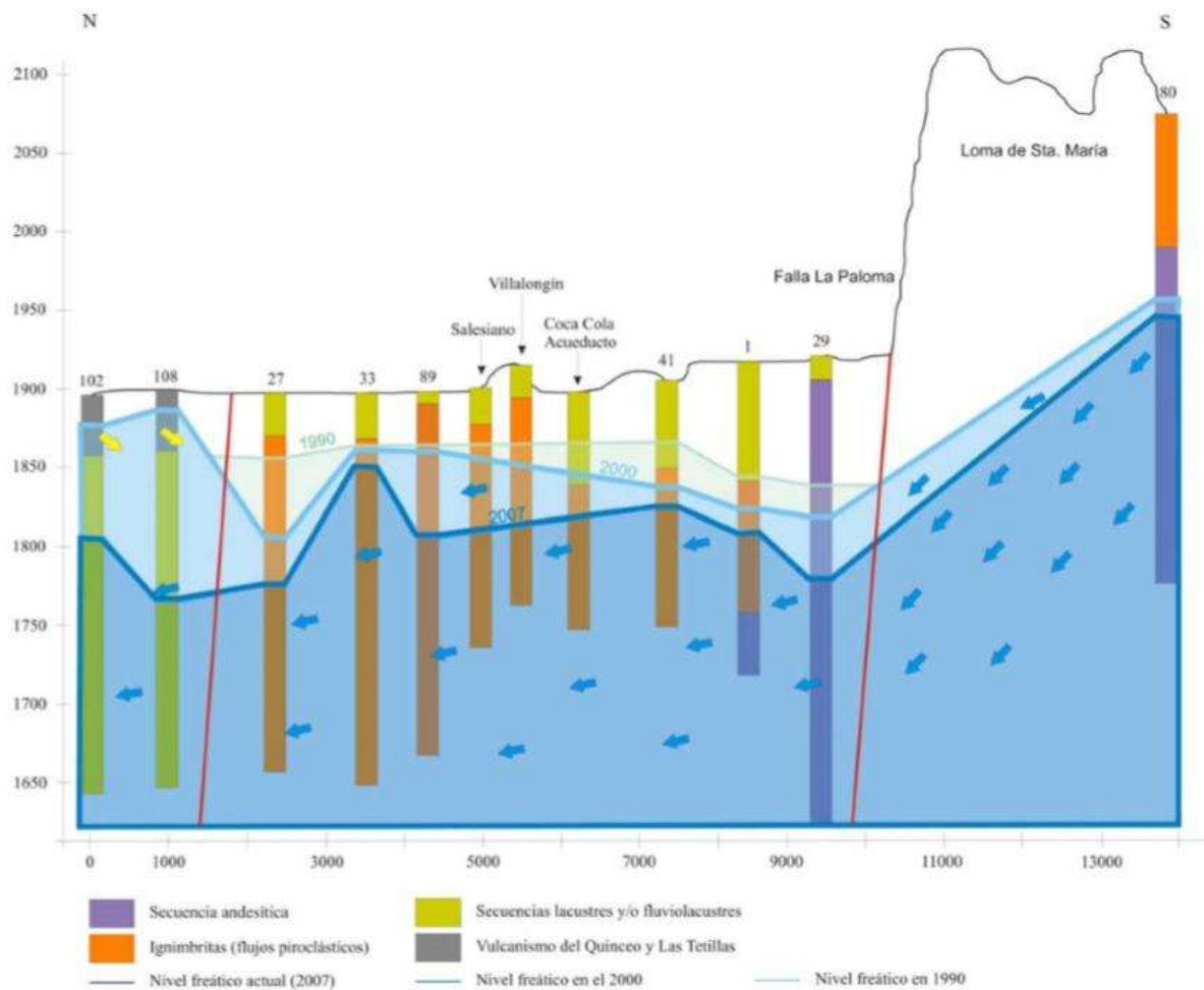


Figura 4.5. Distribución de acuíferos y litologías, con una trayectoria S-N. Fuente Garduño-Monroy et al., 2011.

La figura 4.5, presenta esquemáticamente la existencia de las diversas unidades geohidrológicas sin considerar bloques, ni fallas ni conductividades hidráulicas.

Como dato importante actualmente la extracción del agua subterránea se lleva a cabo sin tener en cuenta una evaluación del recurso y sin ningún control de explotación (Garduño-Monroy et al., 2011), superando las extracciones a la recarga, generando un déficit y un abatimiento del nivel freático; a diferencia de Bravo-Espinosa et al., (2012) y CNA (2009) que consideran un balance hídrico en equilibrio donde la recarga es igual a la descarga.

La sobreexplotación del agua del substrato y la infiltración de contaminantes a través de los estratos de cobertura y de las fracturas neoformadas por la subsidencia, se ha incrementado en las últimas dos décadas (Garduño-Monroy et al., 2011). Es necesario conocer mejor un modelo del sistema acuífero para de esta manera llegar a una verdadera planificación territorial, utilizando el estudio de los sistemas de flujo y delimitando las zonas de recarga, tránsito y descarga (Carrillo-Rivera et al., 1996).

Israde-Alcantara et al., (2005) y Cedeño-Verduzco (2010), en base a un monitoreo quinquenal establecen que la influencia del relleno sanitario (ubicado al poniente de la ciudad de Morelia) sobre las fuentes de aprovechamientos de recurso hídrico afecta al acuífero en menor o mayor medida según las condiciones de protección, mitigación y control en la disposición de residuos sólidos. En particular definen que la generación de lixiviados, los cuales se infiltran al substrato si no son captados adecuadamente, los convertirá en un foco puntual de contaminantes dependiendo de la temporalidad, tipo y origen de los desechos, así como las condiciones climatológicas. También plantea que la geología del substrato es un factor que condiciona la migración de agua y los contaminantes. La zona que analiza presenta materiales de naturaleza volcánica integrados por lavas altamente fracturadas que se intercalan con depósitos de caída con granulometría mayor a 3 mm sin matriz por lo que la porosidad y permeabilidad del subsuelo de la zona es alta. Cedeño-Verduzco (2010) además plantea que los coliformes fecales son también un contaminante presente en los pozos monitoreados y representan un indicador directo de contaminación reciente en el ambiente, lo que se deriva a malas medidas de protección en los pozos favoreciendo la incorporación de elementos diferentes al suelo así como a los mantos acuíferos acarreado problemas de calidad en los mismos.

Por tanto, indirectamente el acuífero se ha visto influenciado por la dinámica urbana, siendo la velocidad de respuesta superficial motivada por el incremento de la superficie cementada (vialidades y casa habitación), ya que los recorridos naturales de los escurrimientos han sido modificados teniendo puntos de desfogue direccionados, reduciendo también las áreas de recarga para el acuífero.

Medina-Vega (2008), menciona que el acuífero de la cuenca del lago de Cuitzeo se encuentra delimitado por un sistema de fallas este-oeste, noreste-suroeste y nornoroeste-sursureste, que no parecen actuar como barreras impermeables determinantes en el comportamiento de los acuíferos

superficiales. Ya que como plantea Hernández-Madrigal y Ávila-Olivera (2010) “las fallas pueden jugar el papel de planos permeables o planos impermeables; es decir, si desarrollan espesores importantes de milonitas con minerales arcillosos serán fronteras impermeables, pero si en el movimiento de bloque se generan brechas con matriz granular, entonces serán fronteras permeables. Asimismo, el movimiento de bloques podría ocasionar que las estructuras cambien la trayectoria de los fluidos; por ejemplo, poniendo en contacto dos unidades permeables (andesitas, depósitos lacustres y otros terrígenos) o bien, jugar el papel de límite sello (flujos piroclásticos de matriz arcillosa con arcillas sedimentarias)”.

Como se ha mencionado anteriormente La Sierra de Mil Cumbres y el cerro del Quinceo forman el valle de Morelia principalmente. La dirección principal del flujo subterráneo es, desde el SO de la ciudad hacia el NE (Garduño-Monroy et. al., 2011). Ubicada al sur de la ciudad de Morelia, se encuentra la Caldera de Atécuaro la cual contienen las subcuencas de los ríos Grande y Chiquito.

Siendo la recarga principal de los acuíferos alojados en las secuencias lacustres y fluvio lacustres y en las Ignimbritas y andesitas fracturadas (Fig. 4.6). En esta figura se puede observar a través de las flechas azules que se considera al flujo que se recarga en la región de la caldera de Atécuaro, es un flujo regional o intermedio lo que delimita una recarga principal, las flechas amarillas determinan una recarga local haciendo de esta manera lógico el abastecimiento del acuífero profundo en la región sur de Morelia mientras que el flujo somero se localiza en las diferentes estructuras volcánicas que rodean a la ciudad. Se observa también con líneas punteadas rojas las diferentes estructuras geológicas, como el escarpe de la Paloma, la caldera de Atécuaro y diversas fallas generadas por el sistema de fallas Morelia-Acambay. Se distinguen los diferentes estratos de la zona presentando de color gris las unidades geohidrológicas de estructuras volcánicas, amarillo para las secuencias fluviolacustres y terrígenos mientras que el anarajando con la línea azul punteada se refiere a las unidades ignimbríticas y andesíticas.

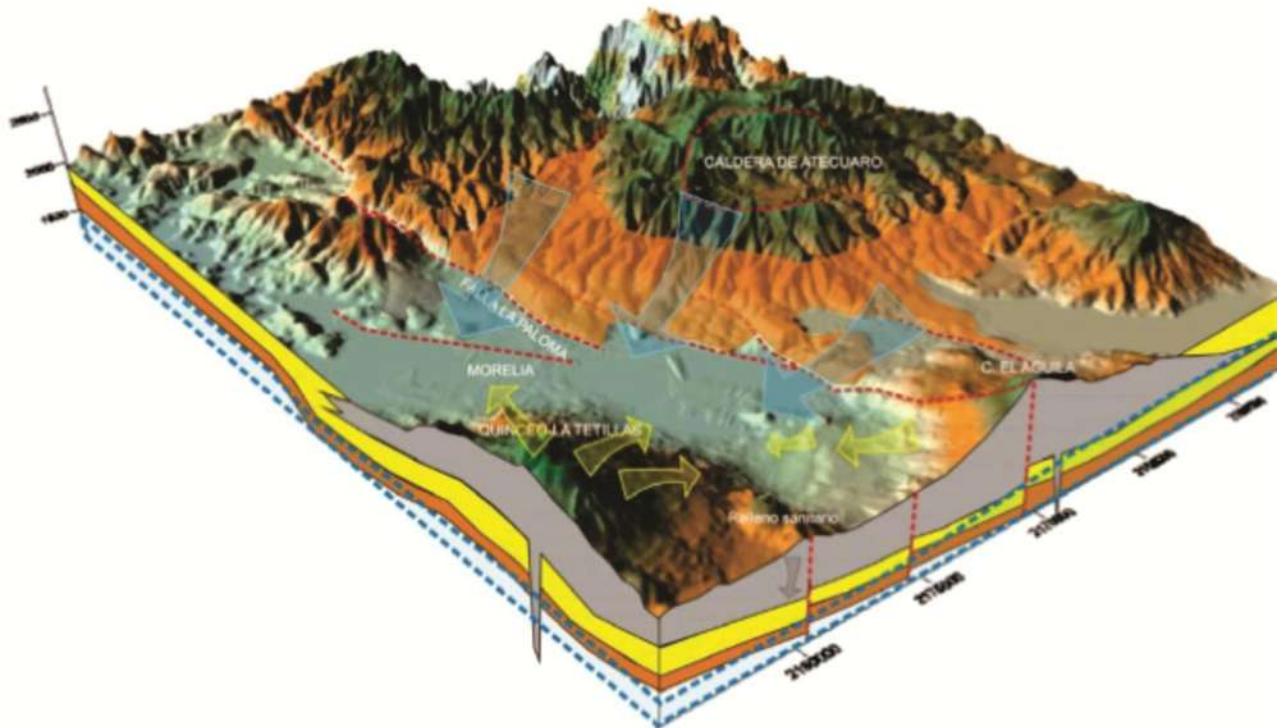


Figura 4.6. Modelo que ilustra la principal zona de recarga hacia el acuífero más importante de Morelia (flechas azules). También se observa la recarga proveniente del Quinceo-Tetillas y del C. El Águila (flechas amarillas). La línea punteada azul sería el acuífero en ignimbritas y andesitas, siendo más alto hacia la zona sur. La flecha gris ilustra la posible contaminación del acuífero por lixiviados del relleno sanitario. Fuente (Garduño-Monroy et. al., 2011).

De la información generada por los distintos autores se concluye que se cuenta con el siguiente panorama:

1. Extracción excesiva generadora de hundimientos.
2. Zona de recarga afectadas y en vías de extinción por crecimiento urbano caótico.
3. Conocimiento de unidades geohidrológicas.
4. Conocimiento de geomorfología y estructura geológica de la zona.
5. Química del agua, en la zona de estudio.
6. Dirección de flujo.

Lo que hace indispensable para complementar el conocimiento del acuífero de Morelia, entender la relación que tienen las fallas y bloques de la zona con el acuífero. Las fallas siendo superficies limitantes permiten interactuar con el agua ya sea libre de contaminantes o contaminada. En este trabajo de tesis, se pretende entender la relación química y geológica del acuífero para utilizarla como fuente de datos que puedan actualizarse y retroalimentarse a futuro, teniendo como base el conocimiento del substrato para establecer un modelo de flujo y sus interacciones.

V. MATERIALES Y MÉTODOS

El Diagrama de metodología que se presenta a continuación, resume el procedimiento utilizado en este trabajo de tesis.

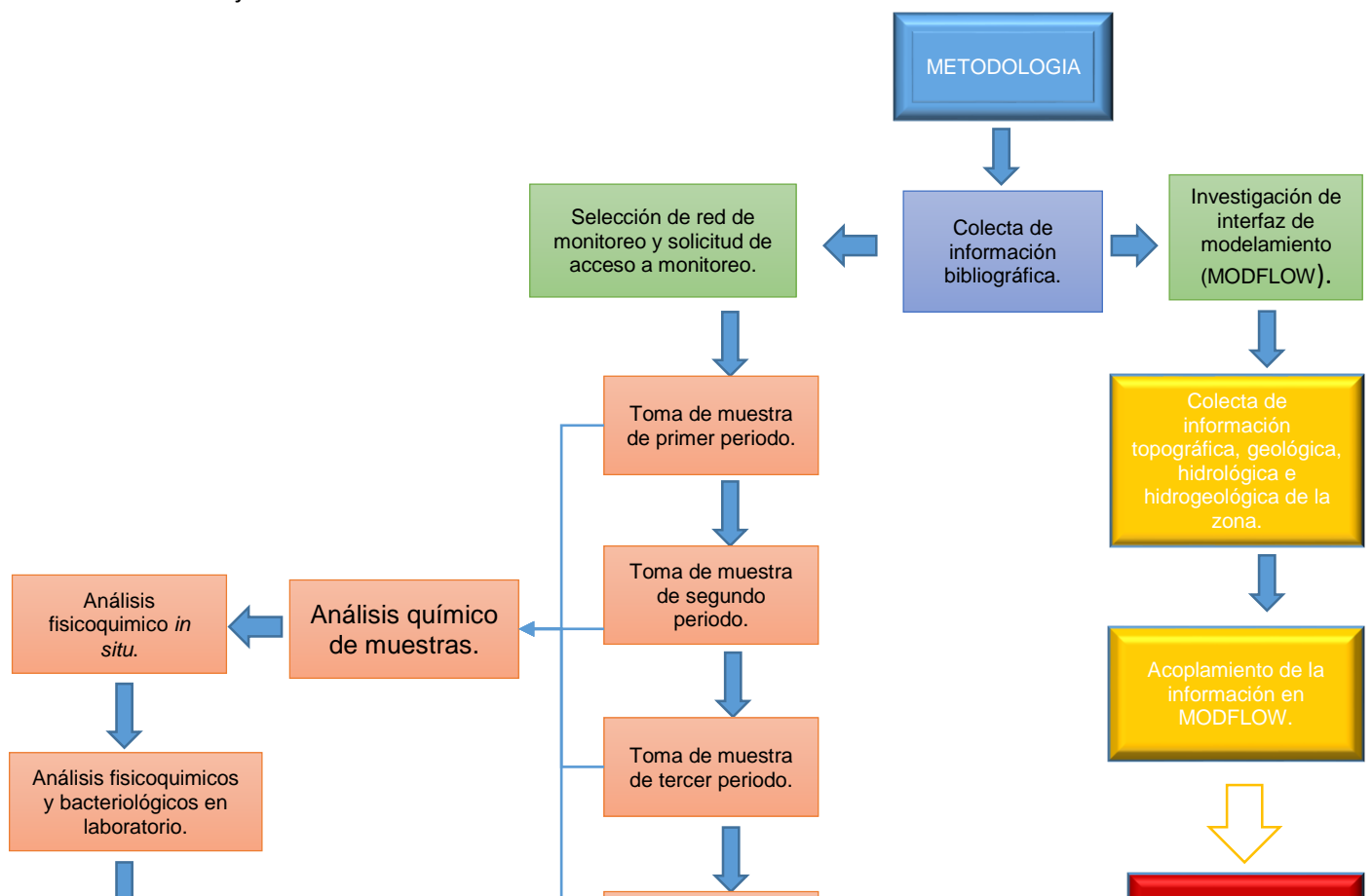


Figura 5.1. Diagrama de metodología.

V.1. Selección e información de los sitios de muestreo

Fue necesario analizar el mapa de la zona relacionando pozos, fallas y bloques optando por seleccionar 16 pozos y 3 manantiales dando un total de 19 sitios de muestreo. Los cuales se presentan en la tabla 5.1, con sus respectivas claves donde la “M”, representa manantiales; “P”, representa pozos; “S”, sitios y su número asignado para este proyecto con sus respectivas coordenadas geográficas. De la misma manera en la tabla 5.2, se presenta el listado de las fallas geológicas de la zona de estudio consideradas para este trabajo.

Tabla 5.1 Red de monitoreo

Zona de muestreo	CLAVE	COORDENADAS UTM		
		X	Y	Z(msnm)
MANANTIAL EL RELICARIO	M-S1	263263	2179125	1907
MANANTIAL COINTZIO	M-S2	261488	2173184	1908
MANANTIAL MINTZITA	M-S3	262139	2174570	1893
TOREO	P-S4	267717	2178851	1899.6
BULEVARD	P-S5	273393	2178408	1917
COSMOS II	P-S6	267255	2178165	1899.6
6 DE JULIO	P-S7	272343	2178644	1902.9
CU	P-S8	268885	2178334	1899.6
ADOLFO LOPEZ MATEOS	P-S9	266405	2179643	1900.8
RINCONADA DEL VALLE	P-S10	267063	2177348	1899.5
VILLAS DEL REAL IV	P-S11	267948	2184477	1911
SAN JUANITO ITZICUARO	P-S12	264123	2179409	1911.9
MARIANO ABASOLO	P-S13	263474	2178566	1897
MARIANO ESCOBEDO II	P-S14	269028	2181443	1897

LA SOLEDAD I	P-S15	270678	2182741	1897
AMPLIACIÓN TORREON NUEVO	P-S16	268586	2183597	1900.5
IGNACIO ZARAGOZA	P-S17	268893	2182298	1897
PRADOS VERDES GALEANA	P-S18	269495	2181447	1897
REALITO II	P-S19	269345	2183208	1899.2

También se solicitó información a OOAPAS, sobre nivel estático de los pozos, nivel dinámico, profundidad y nivel piezométrico lamentablemente este último no fue obtenido, todos estos datos están bajo su administración, exceptuando el Pozo Toreo ya que este se encuentra en un régimen privado, aun así se solicitó la información del pozo a la autoridad competente. La información recabada se presenta en la tabla 5.3, para el caso de los manantiales solo se analizó la calidad de agua que distribuyen.

Tabla 5.2 Fallas geológicas en la zona. Fuente Hernández-Madrigal, et al., (2011).

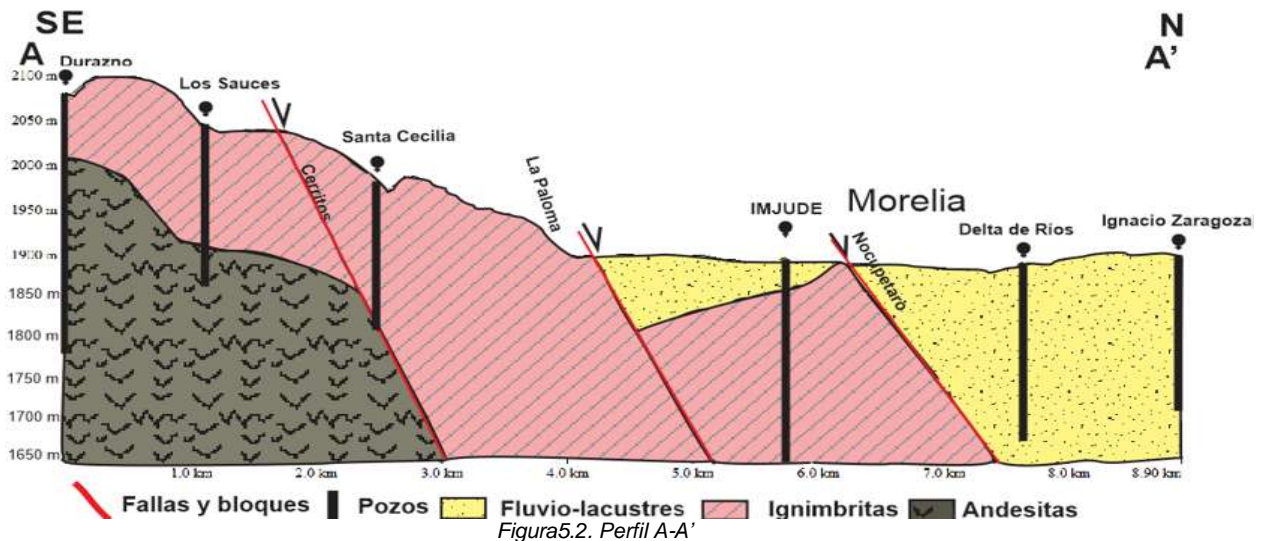
Nº	Fallas geológicas en la zona
1	LA PALOMA
2	NOCUPETARO
3	CERRITOS
4	CUAUTLA
5	TORREMOLINOS
6	MIRASOLES
7	VIVEROS
8	LA COLINA
9	LA SOLEDAD
10	PUERTAS DEL SOL
11	REALITO
12	CHAPULTEPEC
13	MANANTIALES

Tabla 5.3. Información piezométrica de sitios. Fuente OOAPAS 2013.

FUENTES DE ABASTECIMIENTO	NIVEL EST. (m)	NIVEL DIN. (m)	PROFUNDIDAD (m)
---------------------------	-------------------	-------------------	-----------------

TOREO	75	140	200
BOULEVARD GARCIA DE LEON	103	130	181
COSMOS II	20	60	180
6 DE JULIO	70	132	199
CU	78	132
ADOLFO LOPEZ MATEOS	42	170	250
RINCONADA DEL VALLE	34	118	200
VILLAS DEL REAL IV	134	250
SAN JUANITO ITZICUARO	55	70	202
MARIANO ABASOLO	14	95	200
MARIANO ESCOBEDO II	44	140	213
LA SOLEDAD I	178
AMPLIACION TORREON NUEVO	56	150	247
IGNACIO ZARAGOZA	160	180	195
PRADOS VERDES GALEANA	35	90	160
EL REALITO II	14	160	300

Fue necesario también la realización de perfiles geológicos a través de una base de datos de 40 pozos proporcionados personalmente por Ávila-Olivera (2013), para este trabajo, en esta sección solo se presenta un perfil en la figura 5.2. En la figura 5.3, se puede observar el mapa con la localización de cada uno de estos perfiles, en el Anexo A se presentan los perfiles restantes individualmente. Y en la figura 5.4, se observa el mapa de localización de los sitios (pozos y manantiales) de muestreo sin olvidar la presencia de las fallas que atraviesan la zona de estudio.



Mapa de trazo de perfiles estratigráficos en base a datos de pozos

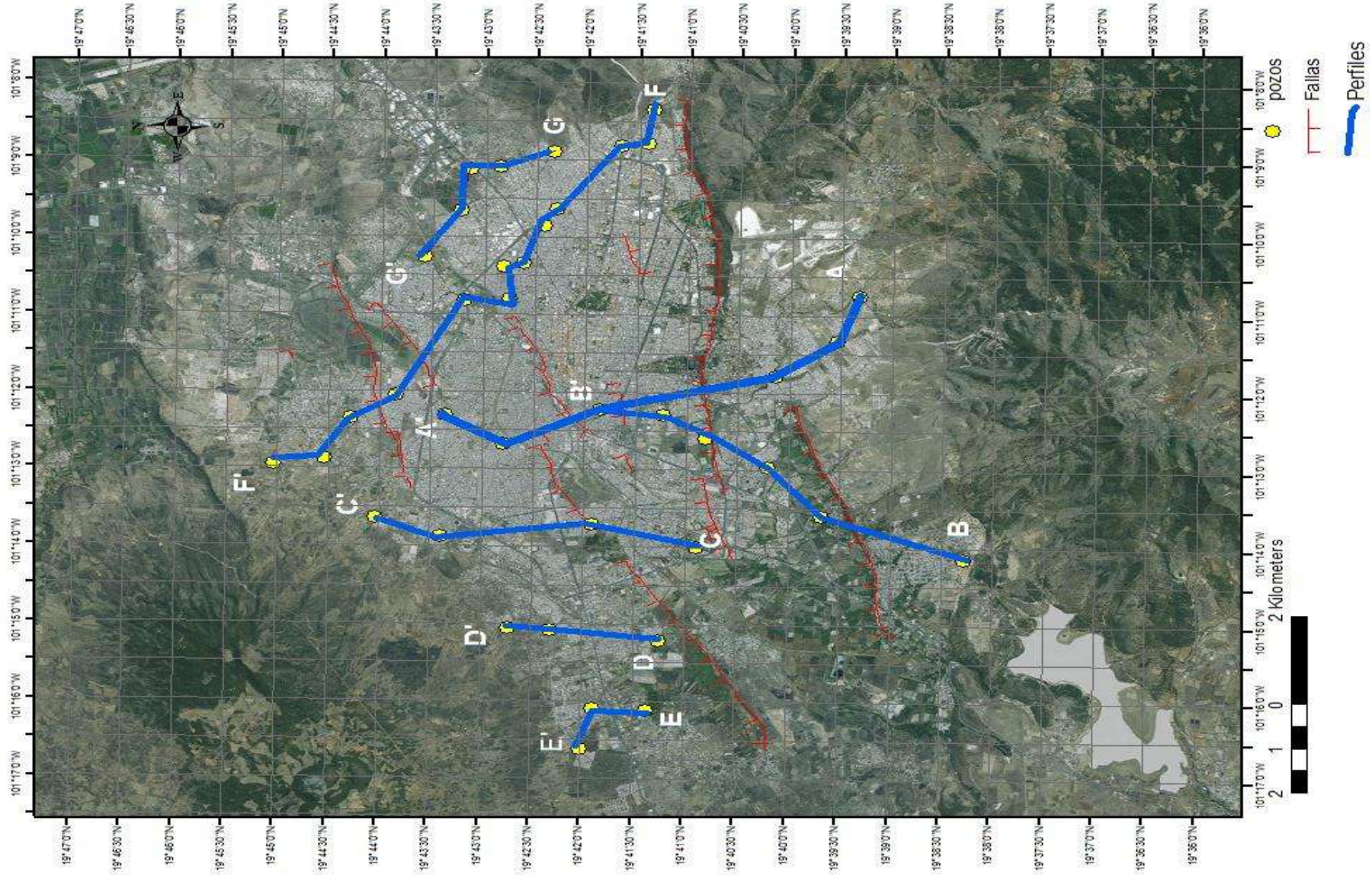
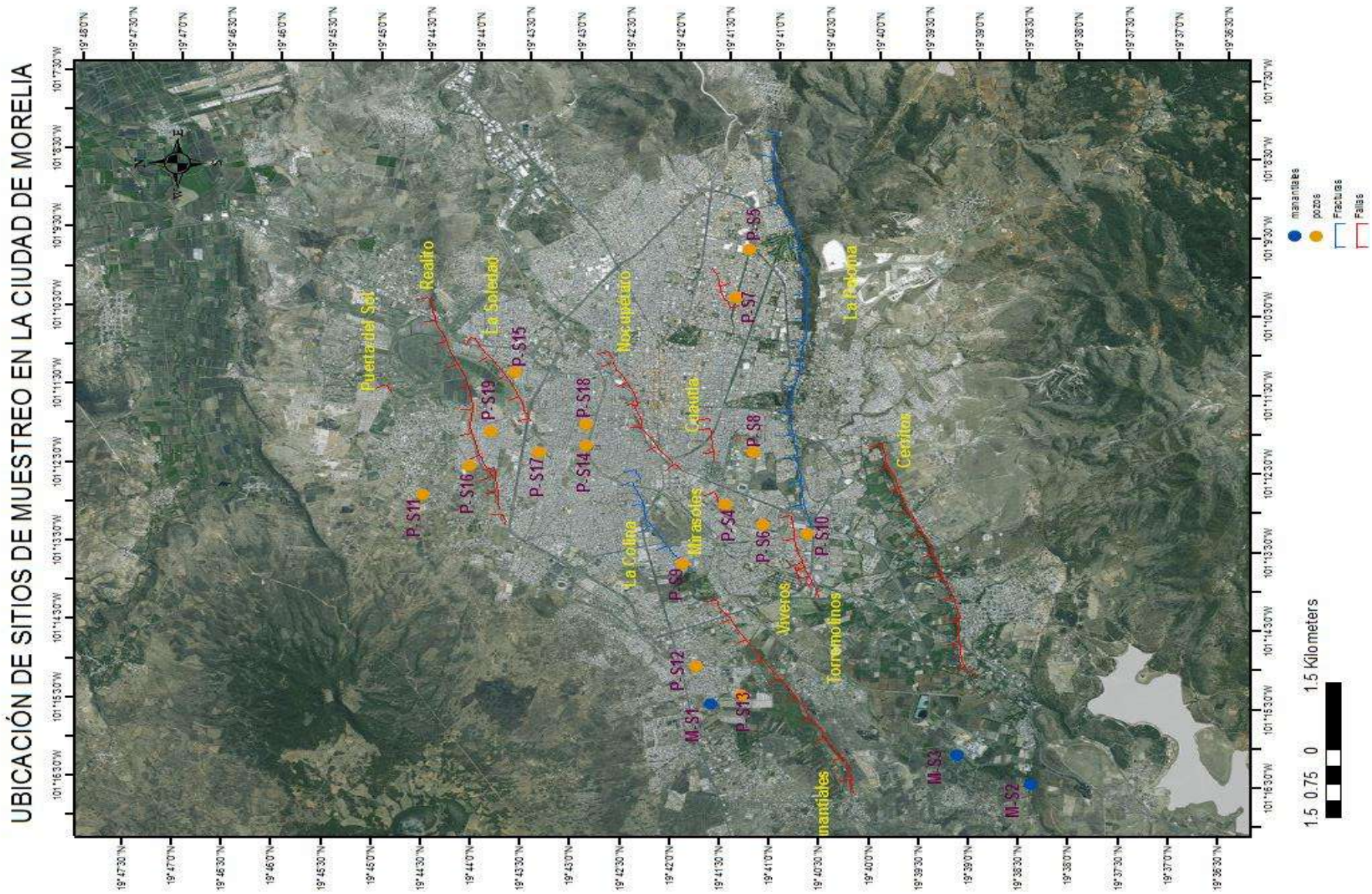


Figura 5.3. Mapa de localización de perfiles y fallas con base de datos .



. Figura 5.4. Ubicación de sitios de muestreo y fallas en la zona.

V.2. Colecta de muestras

Para este trabajo se llevaron a cabo cuatro campañas de muestreo. Entre los meses de septiembre y octubre del 2013 se realizó el primero; el segundo en los meses de enero y febrero del 2014; tercero abril y mayo del 2014; cuarto en agosto del 2014.

En la colecta, se respetaron los lineamientos marcados en la Norma Oficial Mexicana NOM-230-SSA1-2002 para cada colecta de muestra con su respectivo análisis en este proyecto y en la NOM-127-SSA1-1994 para límites permisibles, así como lo establecido en el manual APHA-AWWA-WPCF (1995). Para este trabajo se realizaron muestreos para análisis físico-químicos, arsénico y metales pesados, y bacteriológicos como coliformes totales y fecales.

- Toma de muestra para parámetros fisicoquímicos:

Se determinaron los siguientes parámetros fisicoquímicos: temperatura (°C), pH, conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$), salinidad (%), TDS (mg/L), turbidez (NTU), alcalinidad total (mg/L), dureza total (mg/L), cloruros (mg/L), OD (mg/L), DBO, dureza cálcica y magnésica, alcalinidad a la pftoaleína, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , CO_3^{2-} , HCO_3^- , SO_4^{2-} . En un recipiente de polietileno de 2L se tomó muestra sin preservar, previamente etiquetado con nombre y fecha en el sitio de colecta de acuerdo al procedimiento de la normatividad mexicana (NOM-230-SSA1-2002), posteriormente para su traslado a laboratorio fue depositado en una hielera manteniendo una temperatura de 4°C. También se tomaron muestra de 100ml para laboratorio donde se determinó Cloro residual (mg/l) y pH en recipientes estériles transportados y etiquetados respectivamente.

- Toma de muestra para arsénico y metales pesados:

Previo a las tomas de muestras los recipientes de polietileno de 120 mL utilizados para analizar estos parámetros, fueron descontaminados exactamente dos semanas antes del día que se realizó la colecta; en la primer semana los recipientes y sus tapas (2 recipientes por sitios) fueron sumergidos en una solución de HNO_3 al 10%; en la segunda semana se depositaron los mismos recipientes en otra solución HNO_3 al 1%. Por último un día antes de la toma de muestra los frascos fueron extraídos de la solución, enjuagadas en tres ocasiones con agua desionizada y en la cuarta ocasión rellenos procurando que no contuvieran burbujas de aire y posteriormente refrigerados. En el sitio de muestreo un recipiente fue utilizado para coleccionar la muestra y otro el blanco.

La finalidad del blanco es obtener información de posibles contaminantes aéreos locales o del manejo de muestreo y se obtuvo llenando nuevamente la botella con agua desionizada y preservándola con HNO_3 sin olvidar etiquetar con nombre, fecha y su característica como blanco. El recipiente de muestra fue relleno con agua del sitio (pozo o manantial) y fue preservada y etiquetada. Finalmente después de la toma de muestra, fueron trasladadas a laboratorio en hielera.

- Toma de muestras para cultivo de coliformes totales y coliformes fecales:

Para cultivo de coliformes totales, se tomó la muestra en un recipiente estéril de 100 mL y fueron transportadas y entregadas a el laboratorio CEDIMI. En el caso del cultivo de coliformes fecales se tomó la muestra en bolsas estériles con un volumen de 100 mL y $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ como inhibidor de cloro fueron transportadas y entregadas en el laboratorio de CNA. Todas las muestras con sus respectivas identificaciones.

En algunos sitios de muestreo se esterilizó la válvula de salida antes de cloración con alcohol y flama y en los sitios que no se realizó, se optó por desfogue de 3 a 5 minutos, para evitar cualquier tipo de contaminación de la muestra. En los manantiales se muestreó directamente del sitio procurando tomar en la parte central profunda evitando tomar sedimentos. Para el cultivo de bacterias es indispensable el traslado inmediato de muestras al laboratorio de manera que se pueda impedir su muerte o proliferación.

V.3. Procedimiento de análisis de muestras

Como se mencionó anteriormente los parámetros de temperatura ($^{\circ}\text{C}$), pH, conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$), salinidad (%), TDS (mg/L), turbidez (NTU) fueron medidos *in situ* a través de análisis potenciométricos, con el equipo que se observa en la figura 5.5.



Figura 5.5. Imagen de multiparamétrico sesion156, el cual se utilizó para medir pH, conductividad, salinidad, TDS y temperatura.

Para los análisis de laboratorio de los parámetros físico-químicos restantes también se utilizaron las técnicas analíticas de potencimetría y volumetría, así como espectrometría de absorción atómica (AA) (Fig. 5.5). En el análisis de arsénico y metales pesados se utilizó la técnica de espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) (Fig. 5.6), en colaboración con la UNAM ya que para el análisis de tales concentraciones fue necesario utilizar una técnica analítica que permitiera medir concentraciones muy bajas de elementos, debido a que

el tipo de agua que se estudió en este trabajo presentaba concentraciones debajo del límite de detección de AA, al no tener disponible horno de grafito para el análisis.



Figura 5.5. Equipo de Absorción Atómica utilizado. PerkinElmer AAnalyst 200



Figura 5.6 ICP-masas. Fuente Universidad de Alicante (Servicios Técnicos de investigación)

Los organismos coliformes se determinaron mediante el método de filtración en membrana (NMX-AA-102-SCFI-2006). Incubadora, autoclave, potenciómetro (Corning Checkmate II).

En la tabla 5.4 se muestra de manera resumida el procedimiento realizado para la toma de muestra y los parámetros a medir.

Tabla 5.4. METODOLOGÍA EN LA TOMA DE MUESTRAS

ORDEN	PROCEDIMIENTO	PARAMETRO A MEDIR
1	Localización de sito de toma de muestra	NO APLICA
2	Identificación de toma sin cloración	NO APLICA
3	Toma de muestra y blanco	metales (Absorción Atómica e ICP-masas)
4	Toma de muestra en un recipiente, utilizando multiparamétrico colocar los electrodos en el interior del recipiente con la muestra	pH, conductividad, %sal, TDS y T (°C)
5	Toma de muestra en bolsa y frasco esterilizado	Coliformes totales y fecales
6	Toma de muestra para físico-químicos	pH, conductividad, %sal, TDS, aniones, cationes, dureza total,

V.4. Método para la determinación del tipo de agua

“El balance iónico o condición de electroneutralidad permite comprobar la exactitud de los resultados de los análisis químicos mediante un cálculo aritmético, el cálculo se basa en la obtención del error porcentual de la neutralidad eléctrica de las muestras de agua de los principales cationes y aniones determinados. El error que resulta de dicho balance se expresa por la diferencia de iones (Anexo B, presenta ecuaciones). Si el error es negativo, hay exceso de aniones y si es positivo exceso de cationes. Se considera aceptable un error menor o igual al 10% (Alfaro 2010, Peña *et al.* 2012; Arriola-Cianca, 2014).

Posteriormente al conocimiento iónico es relevante considerar que existe una gran variedad de tipos de agua subterránea de acuerdo a su interacción con el medio y el material rocoso, lo que varía la composición química de la misma. Se han determinado técnicas para identificarlas como por ejemplo, a través de la composición de determinados iones presentes en el agua existe una clasificación basándose en la concentración de cationes y aniones mayoritarios. Representándolos de manera gráfica en diagramas de Piper o diagramas trilineales, los cuales son diagramas cualitativos, permitiendo clasificar a el agua en familias o facies hidrogeoquímicas, así como establecer la evolución hidrogeoquímica del agua subterránea (Deutsch 1997; Morán *et al.* 2013; Arriola-Cianca, 2014). La figura 5.8 muestra del trazado básico para el diagrama de Piper, con cationes y aniones mayoritarios.

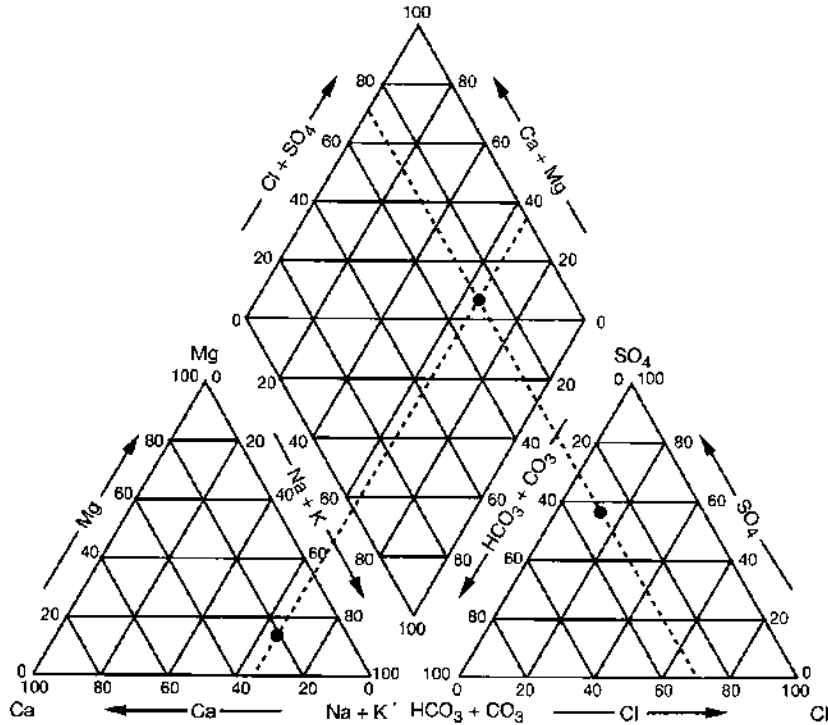


Figura 5.8. Diagrama de Piper. Fuente Santayana-Vela 2012.

V.5. Procedimiento de modelación en MODFLOW

Como se mencionó con anterioridad MODFLOW emplea diferencias finitas las cuales se basan en representar las derivadas de espacio y tiempo de las ecuaciones de flujo.

En un modelo de diferencias finitas el espacio continuo del flujo se discretiza por medio de una malla (Rodríguez-Castro, et al. 2007). En el Anexo B, se presenta ecuaciones base que son necesarias para el análisis del comportamiento del acuífero.

Para este trabajo se considera que las propiedades físicas del acuífero son homogéneas e isotrópicas, para determinar de manera general el comportamiento del acuífero.

En la zona de estudio y de acuerdo a los diferentes perfiles geológicos en la región, el acuífero de Morelia se conceptualizó en cuatro capas que interactúan entre ellas, (ver datos geológicos y perfiles, anexo A).

El primer paquete de origen volcánico que integra los basaltos del Punhuato y Quinceo; el segundo paquete fluviolacustre incluye gravas, arenas y arcillas; el tercer paquete está constituido por una toba riolítica ignimbrita denominada la cantera rosa de Morelia; el cuarto un basalto andesítico de SMC. La interacción entre los distintos paquetes que fue considerada para este trabajo se presentó en el capítulo 2.

Adicionalmente es importante señalar que son necesarios los datos de conductividad hidráulica y coeficiente de almacenamiento, algunos de ellos fueron tomados de Rodríguez-Castro, et al. (2007) que incluyen los siguientes.

Gravas, arenas y arcillas, $K = 0.0003186 \text{ m/s}$; 27.52704 m/d

Toba riolítica fracturada, $K = 0.000128 \text{ m/s}$; 11.0592 m/d

El valor de la conductividad hidráulica para basaltos fue considerado el siguiente:

$K = 0.002 \text{ m/día}$, este valor fue tomado de tablas en ANEXO C, dentro del mismo apéndice se puede observar el valor de porosidad eficaz y total que se maneja en este trabajo.

El siguiente parámetro es el coeficiente de almacenamiento que se define como la cantidad de agua que puede liberar una columna de área horizontal unitaria y altura igual al espesor saturado del acuífero, cuando la carga hidráulica decrece una unidad. Los valores que se consideraron en el modelo, varían entre 10^{-2} y 10^{-5} (Rodríguez-Castro, et al. 2007). Los niveles estáticos y dinámicos datos proporcionados por el OOAPAS, localizados en la tabla 5.3. Para la modelación no se utilizaron los manantiales. También fue necesario considerar los valores de recarga, tomando un valor unitario de recarga de CNA (2009) de aproximadamente 0.00021999 m/d para el Valle Morelia-Querendaro (recarga vertical, recarga horizontal). Así como la siguiente información del río Grande ya que es el principal efluente que atraviesa la ciudad, el uso urbano que suministra el río a través de una derivación directa de la presa de Cointzio que conduce aproximadamente 600 l/s ($18.9 \text{ hm}^3/\text{año}$) hacia la planta potabilizadora “Los Filtros”. El río Grande tiene una superficie física de 796.66 Ha (Gaytán-Tocavén, 2005. Mientras que en el oriente y poniente del acuífero se tienen fronteras de flujo constante, con una dirección de oeste a este (Rodríguez-Castro, et al. 2007).

VI. RESULTADOS

VI.1. *Parámetros Fisicoquímicos medidos in situ*

Como se mencionó en el capítulo V, se realizaron 4 campañas de muestreo en septiembre y octubre 2013; enero y febrero 2014; abril y mayo 2014 y agosto 2014, considerando dos en eventos pluviales y dos en épocas de estiaje. En cada sitio se realizó la medición de parámetros *in situ* como; temperatura, pH, conductividad eléctrica, STD, salinidad, OD (tabla 6.1 ANEXO D).

En el gráfico siguiente (Fig. 6.1) se presenta el parámetro de temperatura con sus respectivos valores medidos *in situ* para cada sitio, se presenta una variación aproximada de $\pm 4 \text{ °C}$ en 9 sitios, en 3 sitios varían con $\pm 1 \text{ °C}$ y los demás se incluyen en un intervalo de ± 5 y $\pm 6 \text{ °C}$, excepto el P-S4 y P-S17 que presentan un intervalo de $\pm 10 \text{ °C}$, todos con respecto a 25 °C . El punto máximo de temperatura de todos los sitios lo presenta el pozo P-S17 y la mínima el M-S1. Se puede observar variación en algunos sitios y su periodo de muestreo, pero en general no es significativa. La temperatura más alta medida se realizó en el tercer muestreo (abril y mayo 2014), en el cual se presentan máximos para algunos sitios. El valor de R^2 determina que no existe relación lineal entre sitios de muestreo ya que es lejano a la unidad y la línea de tendencia refleja que la temperatura incrementa en la subdivisión del “Sector Norte” y disminuye hacia el “Sector Sur”.

En el "Sector Sur", se observa un comportamiento preferentemente lineal para los pozos localizados de E-O como el P-S5, P-S7, P-S8, P-S6 y P-S10 en 25°C, los picos sobresalientes que se observan están en un intervalo de 25°C+4°C y corresponden a los sitios M-S2, P-S4 y P-S12. Los valores mínimos se encuentran en el intervalo de 25°C-5°C en los sitios M-S3, M-S1 y P-S13. En el caso del manantial M-S2 se observa un valor de temperatura que se mantiene en 30°C ± 2°C, este parámetro en un manantial representa dos situaciones de acuerdo a lo que se observa en el marco teórico de este trabajo de tesis: 1. El manantial está contaminado y 2. Es una descarga de algún acuífero y su composición geológica determina la salida del agua a la superficie por medio de sus cargas hidráulicas o por sus estructuras geológicas. En comparación con los manantiales M-S3 y M-S1 que presentan una temperatura más baja y están localizados ligeramente más al norte del M-S2, se puede indicar que los manantiales M-S1 y M-S3 los abastece un agua que no ha permanecido mucho tiempo en el substrato, probablemente sea agua por escurrimiento o también que la litología de su ubicación presenta una conductividad hidráulica baja que impida la infiltración rápida y profunda de agua al acuífero y favorezca que el agua salga a la superficie. Como se observa en la figura 5.4 (mapa de ubicación), el M-S1 es el manantial más cercano al Quinceo, lo que puede representar que la litología que lo contiene sean basaltos, que presentan una menor conductividad hidráulica, el M-S3 está alojado al sur del M-S1, pero esta aun cerca de la litología del Quinceo, en cambio el M-S2 se aleja, lo que hace probable que este influenciado por alguna otra estructura geológica (C.Águila o alguna otra falla no considerada en este trabajo de tesis). El pozo P-S4 presenta también un incremento en su temperatura con un valor de 30°C, lamentablemente no se conoce su geología lo que hace difícil su descripción, pero el P-S8 está cercano a él aproximadamente por 1.5 km presentando una estratigrafía de 50 m de profundidad en fluviolacustres y el resto de toba riolítica 80 m, con una profundidad total de 130 m. La temperatura entre estos dos pozos no es comparable pero si lo puede ser su geología, el pozo P-S4 presenta una geología similar pero su profundidad no es de 130 m, si no de 200 m perforando fluviolacustres y toba riolítica, a esta profundidad se rebasa el valor de influencia del ambiente sobre el agua subterránea, también se puede observar en la figura 5.4 que el P-S4 está localizado cerca de la falla Mirasoles, habría que seguir estudiando este pozo para obtener mayor información. En el P-S12 se tiene una temperatura máxima de 31.2°C para abril y mayo, y en el mes de agosto comienza a bajar su temperatura, para este pozo no se tiene información geológica pero se puede extrapolar su litología del perfil D-D' (ANEXO A), suponiendo que este pozo perfora únicamente la unidad de los basaltos, a través del incremento de temperatura en el periodo de eventos pluviales se podría considerar que en este pozo existe una posible aportación de un flujo regional de recarga, y que la aportación de la recarga es relativamente rápida, el P-S13 tiene un comportamiento similar al aumentar su temperatura en el mismo periodo, pero aun así es menor que el P-S12 con un valor de 22.7°C y perfora fluviolacustres y toba reolítica con una profundidad de 200 m, al observar este comportamiento se puede decir que el agua de cada uno de estos pozos podría provenir de distintos acuíferos, pero es necesario revisar más parámetros.

En el "Sector Norte", se encuentran solo 7 pozos monitoreados para este trabajo de tesis, y entre ellos no existe patrón de temperatura todos son variables. El P-S14 está localizado cerca del pozo Delta de Ríos el cual se observa en perfil A-A' y presenta una litología de únicamente fluviolacustres, el P-S14 tiene una profundidad de 213 m, y su temperatura es relativamente baja de 28.8 °C comparando con pozos anteriormente mencionados a la misma profundidad, pero es importante indicar las condiciones en las que se encuentra su ubicación ya que es un pozo cercano al río Grande de Morelia y la litología principal son fluviolacustres, por tanto es posible que el río este influenciando al acuífero aportando agua y no extrayéndola, se puede observar esto también a través del nivel estático de 44 m y dinámico de 140 m ya que al ser fluviolacustres presentan una mayor conductividad hidráulica favoreciendo la extracción de flujo, también es necesaria más información sobre los gastos de extracción de cada pozo. El P-S18 se localiza en la misma litología que el P-S14 y presenta una temperatura menor en 24.5°C, esto puede ser explicado mediante la profundidad del pozo ya que es menor con un valor de 160 m y el pozo alcanzaría a estar influenciado también por el río Grande, su nivel dinámico es más pequeño que el del P-S14 lo que permite suponer que presenta un gasto menor, pero sería necesario compararlo con datos reales. El P-S17 es el pozo que presenta los máximos de todos los sitios de muestreo y de acuerdo a su litología perfora únicamente la unidad de fluviolacustres tiene una profundidad de 195 m y un nivel estático muy bajo de 160 m, al ser su temperatura tan alta en comparación con otros sitios existe la posibilidad de que en este pozo allá una convergencia de acuíferos. El P-S15 se localiza al sur de la falla La Soledad, presenta un máximo de temperatura de 30.3°C para agosto, el pozo esta perforado hasta 178 m, y no se conoce ni su nivel estático ni dinámico, este pozo podría estar perforando un acuífero intermedio. El P-S19 presenta su temperatura más alta en abril y mayo de 24.9°C, este pozo se localiza al norte de la falla La Soledad, la cual podrían influir al ser aportadora de flujo reciente de infiltración. El P-S16 presenta la temperatura más baja de todo el sector norte en 23°C para enero y febrero, este pozo se localiza al norte de la falla el Realito siendo esta la falla más cercana, también es el pozo que presenta mayor profundidad de perforación con 300 m y perfora únicamente basaltos del Quinceo, es posible que este pozo extraiga también aguas de reciente infiltración a causa de la falla. Por último el P-S11 es el último pozo localizado al norte de la red de monitoreo utilizada en este trabajo de tesis y se observa que este pozo incrementa nuevamente la temperatura con valores de 30°C±3°C y también es el único pozo del sector norte que perfora basaltos del Quinceo, fluviolacustres y en su mayor parte toba reolítica.

En general en los valores de temperatura se puede definir una variación totalmente aleatoria. Pero si se divide la ciudad en zona SO y NE, atravesando una línea entre los pozos P-S4 y P-S6 la zona NE es donde se encuentran los pozos con valores dispersos de temperatura y en la zona SO presenta valores de temperatura más uniformes, también se puede distinguir que en esta zona SO no hay tanta presencia de fallas como en la zona NE.

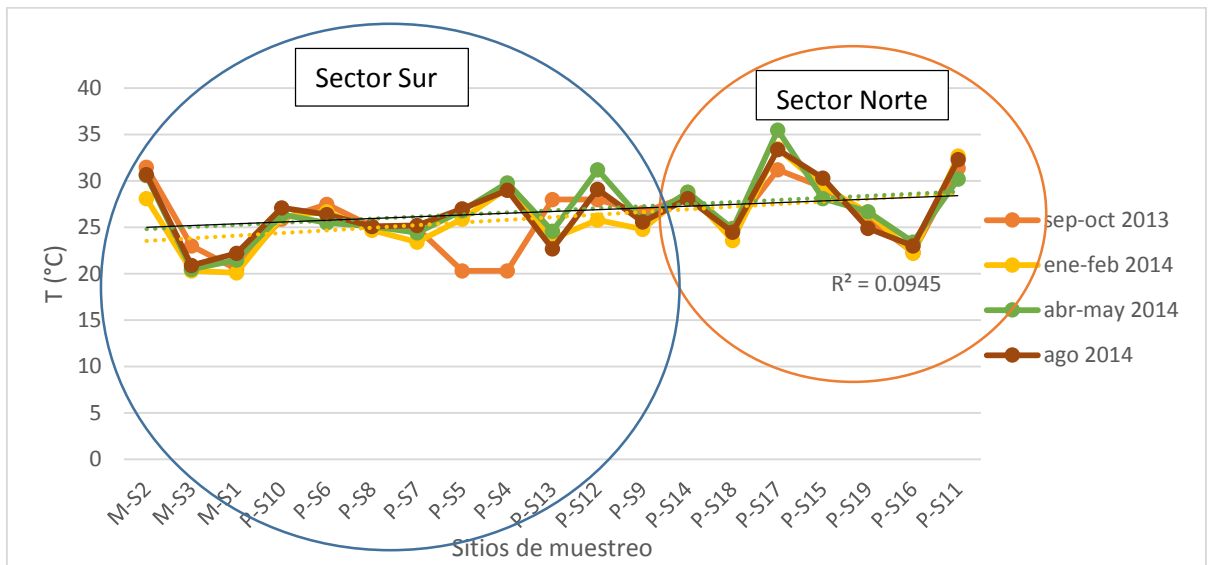


Figura 6.1. Temperatura.

La conductividad eléctrica (Fig. 6.2) obtenida en cada uno de los sitios se mantiene similar entre los periodos de muestreo presentando los valores más altos en el pozo P-S17 y los más bajos en el M-S3. El periodo enero y febrero 2014, presenta los valores mínimos de toda la campaña de muestreo sobre todo en dos manantiales y en el P-S5 (Bulevar) pozo localizado en el extremo oeste de la red de monitoreo empleada en esta investigación y el P-S11 (Villas del Real IV) localizado en el extremo norte de la red de monitoreo. El valor de R^2 , es nuevamente bajo indicando que no hay relación lineal entre los valores de cada sitio y la línea de tendencia nuevamente incrementa hacia el sector norte.

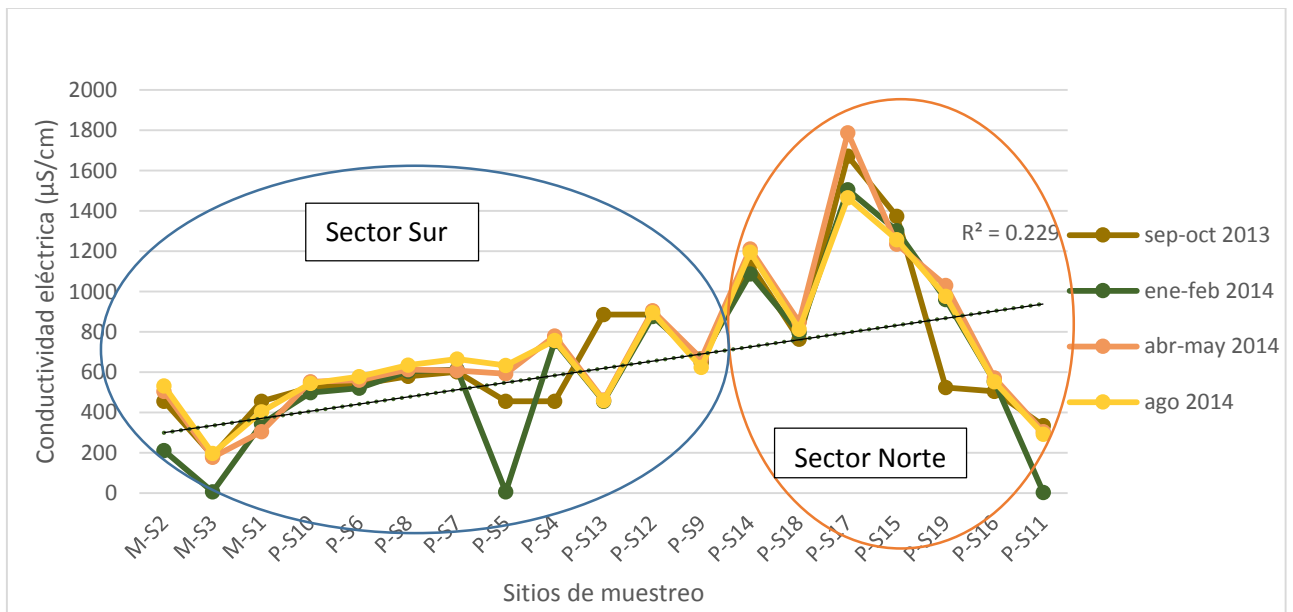


Figura 6.2. Conductividad eléctrica.

Las concentraciones de oxígeno disuelto (Fig. 6.3) medidas, se aprecian con un comportamiento similar durante los tres últimos periodos, no fue posible realizar el análisis para el

periodo septiembre y octubre 2013, porque no se contaba con instrumentación adecuada, pero en los otros periodos de muestreo se observa una relación inversa que existe entre los valores de oxígeno disuelto (Fig. 6.3) y los de temperatura (Fig. 6.1), debido a que la temperatura afecta la solubilidad de los gases en el agua, por lo tanto a menor temperatura mayor oxígeno disuelto. Su línea de tendencia igualmente incrementa hacia el sector norte.

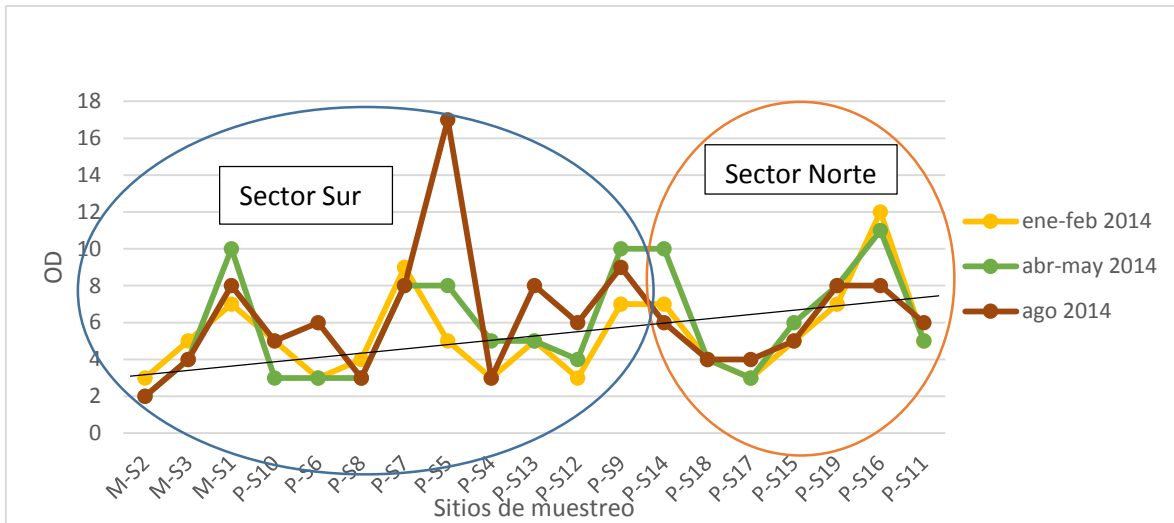


Figura 6.3. Oxígeno Disuelto. No presenta distribución homogénea.

El pH (Fig. 6.4) muestra variación entre periodos de muestreo, de acuerdo a la normatividad mexicana (NOM-230-SSA1-2002) la mayoría de los sitios se encuentran dentro del intervalo de pH, para aguas potables cercanos a la neutralidad. Pero a pesar de ser considerados dentro del intervalo, se encuentran ligeramente desplazados hacia la basicidad en el sector norte.

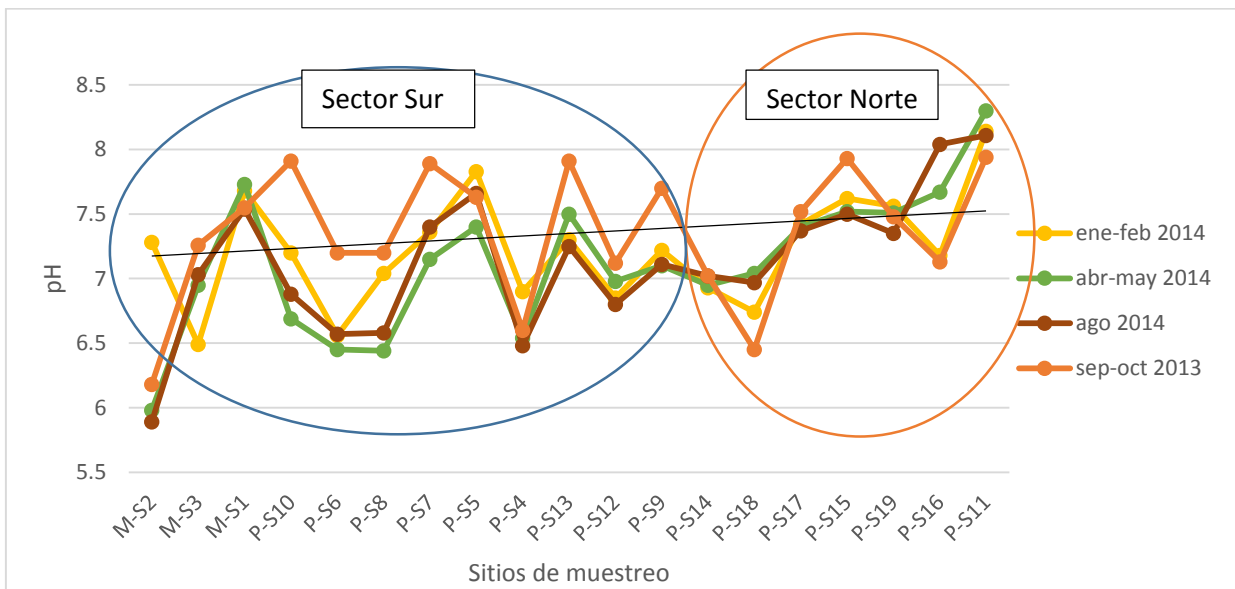


Figura 6.4. pH.

Con respecto al parámetro de sólidos disueltos totales (TDS), que se presenta en la figura 6.5, comparando con temperatura y conductividad eléctrica existe un comportamiento similar ya que el mismo sitio que presenta el máximo en temperatura y conductividad (P-S17), es el mismo sitio que presenta el máximo en TDS, lo que permite observar la estrecha relación existente entre estos tres parámetros, ya que a mayor temperatura incrementa la solubilidad y los sólidos se disuelven con mayor facilidad y a consecuencia de esto la cantidad de iones aumenta e incrementa por tanto la conductividad eléctrica. Con respecto a los periodos de muestreos, se presenta una pequeña variación solamente del periodo septiembre y octubre 2013, pero en general tienen un comportamiento semejante en todos los periodos de muestreo. De acuerdo a la normatividad (NOM-127-SSA1-1994), no se rebasa el límite de permisibilidad en contenido de TDS.

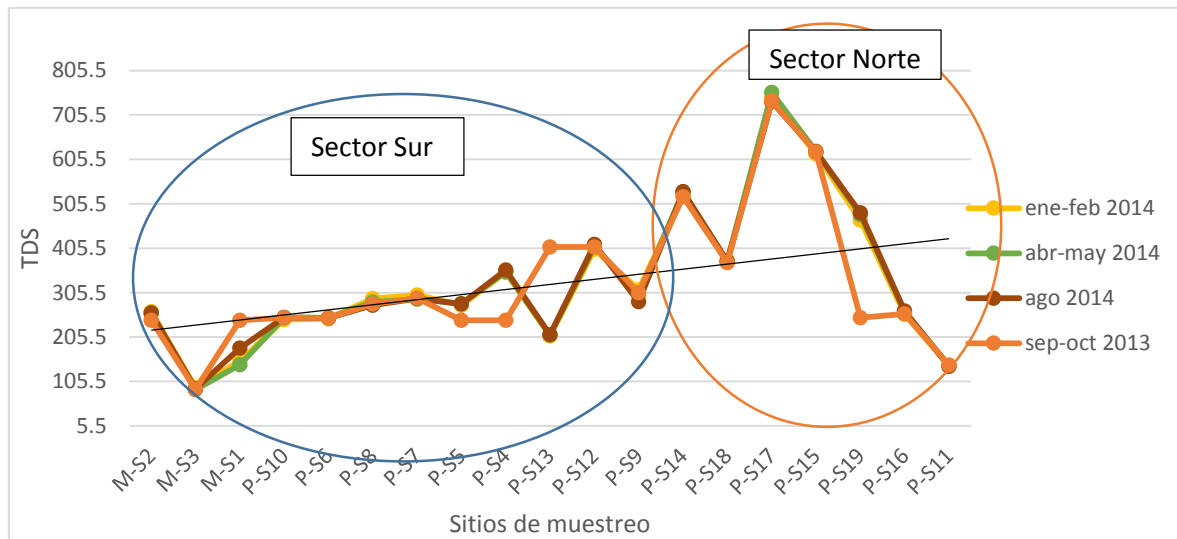


Figura. 6.5. TDS.

VI.2. Parámetros Fisicoquímicos en laboratorio

A través de los siguientes parámetros se puede obtener diversidad de información del comportamiento del agua subterránea en el acuífero, porque se puede interpretar de manera general la relación que existe entre el agua y el medio sólido que la contiene así como el o los materiales disueltos en el agua del acuífero. Los resultados de estos análisis se presentan en la tabla 6.2 (ANEXO D).

La alcalinidad total, refleja el contenido de CO_3^{2-} y HCO_3^- totales en la muestra, principalmente se presenta por disolución de medio rocoso, pero también por aportación de CO_2 a través de una recarga vertical. En la figura 6.6, se puede observar un incremento de concentración de sur a norte con un valor máximo en el P-S17, y el pozo P-S11 situado al norte siendo el que presenta las concentraciones más bajas de CO_3^{2-} y HCO_3^- para pozos.

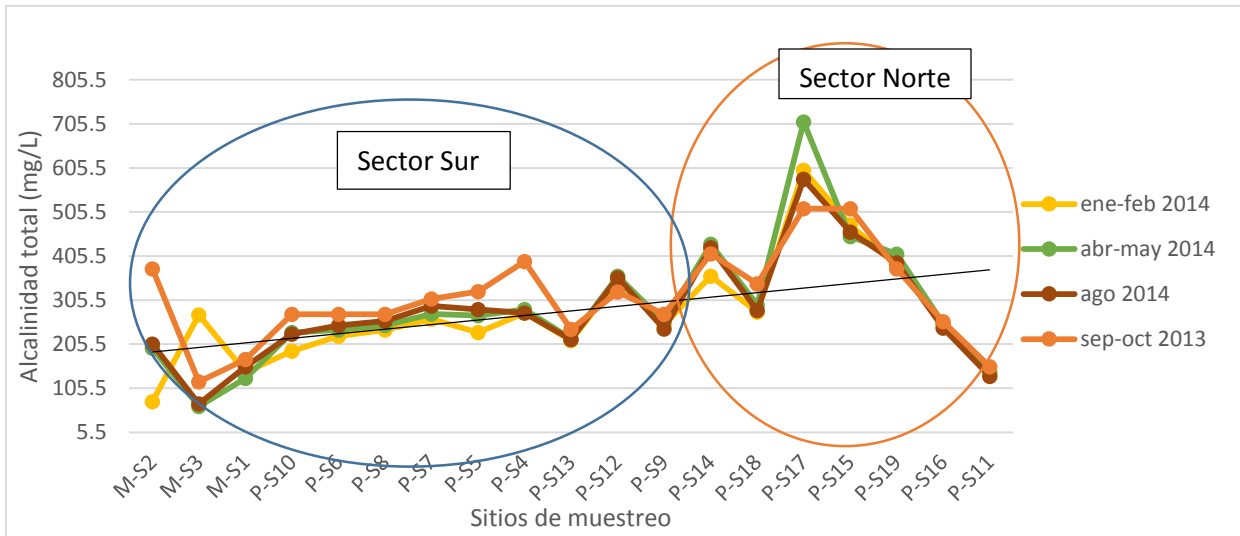


Figura 6.6. Alcalinidad total.

La dureza total determina principalmente el contenido de calcio y magnesio, la disolución de minerales es el principal proceso para su presencia y los resultados que aquí se presentan se encuentran dentro del límite permisible de la normatividad, pero a su vez se puede observar un comportamiento casi aleatorio en relación a los sitios de muestreo y su periodo. Los valores menores se encuentran en los sitios al suroeste y noroeste de la zona de estudio, aumentando sus valores hacia los sitios ubicados al norte de la zona de estudio. En los periodos de lluvia presenta un incremento de la dureza en los pozos localizados al sur y en los periodos de estiaje hay ligero incremento en los pozos situados al norte de la zona de estudio, pero realmente no es un factor que afecte químicamente al agua. También se observa un comportamiento similar entre los parámetros de conductividad, temperatura, TDS y alcalinidad donde no se ha dejado de observar que el valor máximo se encuentra el P-S17 (pozo Ignacio Zaragoza) en el periodo abril y mayo 2014.

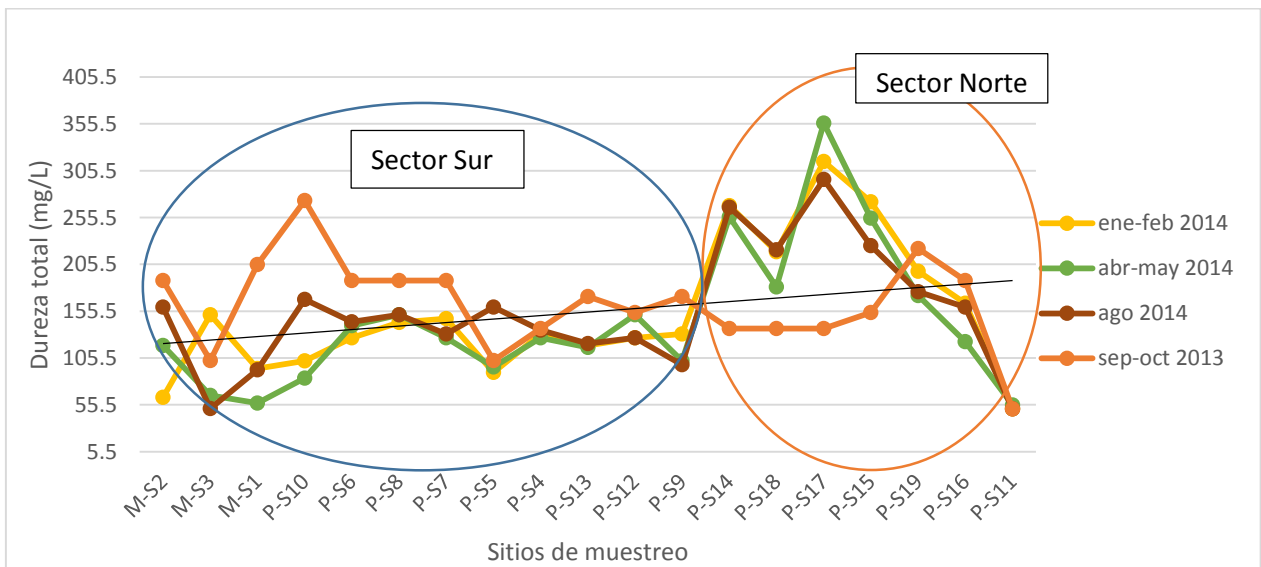


Figura 6.7. Dureza Total.

VI.3. Elementos mayoritarios

En el ANEXO D, se encuentra la tabla 6.2 que presenta las concentraciones medidas de elementos mayoritarios para este trabajo dentro de los cuatro periodos de muestreo. Se detecta la presencia de Ca^{+2} , Na^+ , Mg^{+2} y K^+ como cationes y como aniones Cl^- , HCO_3^- , CO_3^{2-} y SO_4^{2-} . La presencia de CO_3^{2-} , fue mínima ya que fue registrado en unos cuantos pozos en diferentes periodos.

En la figura 6.8, se puede observar el comportamiento de los valores medidos en los pozos para el Ca^{+2} , donde se aprecia un comportamiento dinámico que varía con respecto al tiempo ya que cada periodo muestra máximos y mínimos propios, pero mantiene el incremento en dirección S-N.

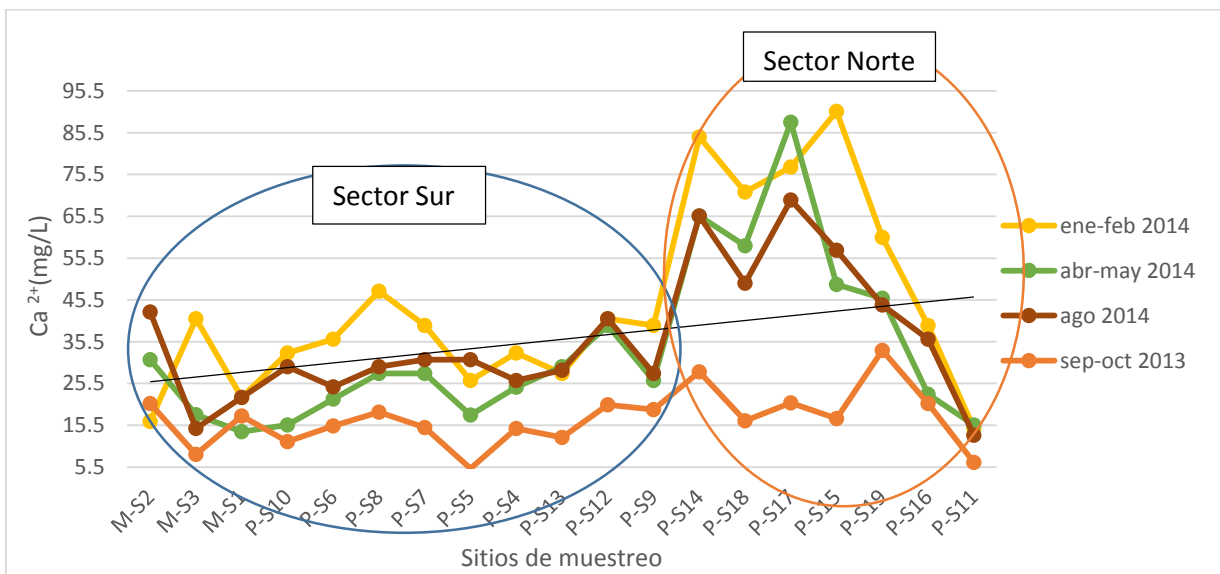


Figura 6.8 Calcio.

Para el Mg^{+2} , en la figura 6.9 se pueden observar solo dos periodos de muestreo ya que se presentó también la problemática de no contar con el equipo necesario para medirlos. Se observan concentraciones bajas no representativas para el Mg^{+2} pero al norte de la ciudad se observa el incremento de concentraciones de los sitios en comparación con el sector sur.

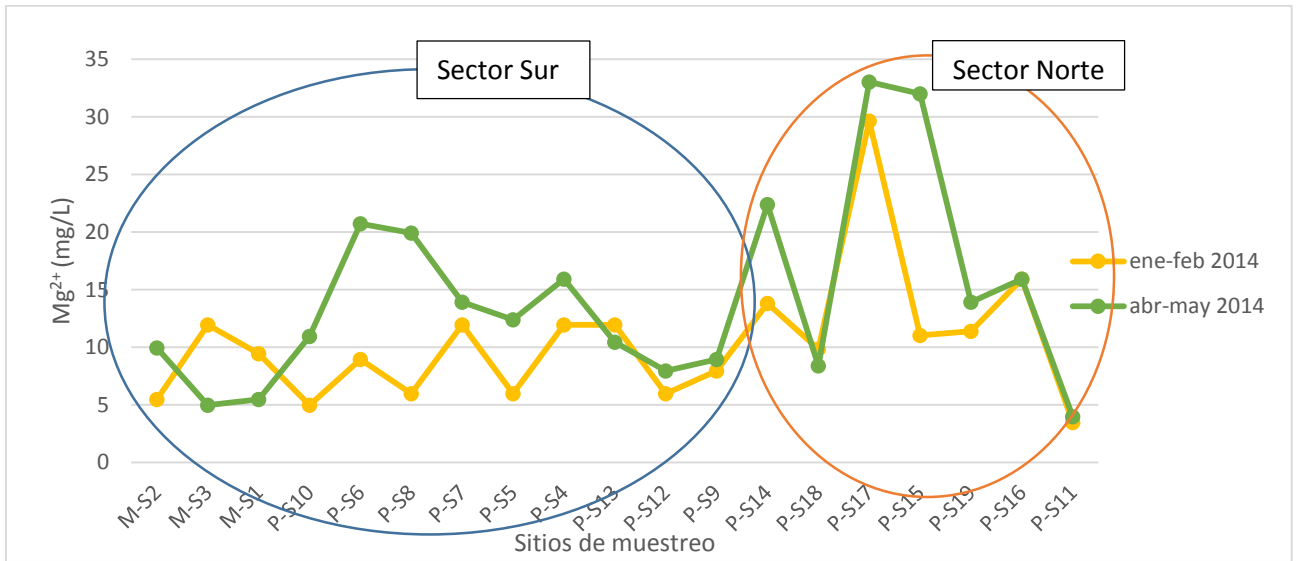


Figura 6.9. Magnesio.

En el caso del Na⁺ (Fig. 6.10) se observa que los valores máximos se encuentran en los pozos al norte de la ciudad respetando la línea de tendencia, al menos para los tres últimos periodos de muestreo, el primer periodo de septiembre y octubre 2013 presenta una variación aleatoria en comparación con los otros periodos (aunque también sigue la misma tendencia), este periodo puede presentar un error de medición, debido a que al ser el primer periodo se presentaron fallas en la estrategia de medición.

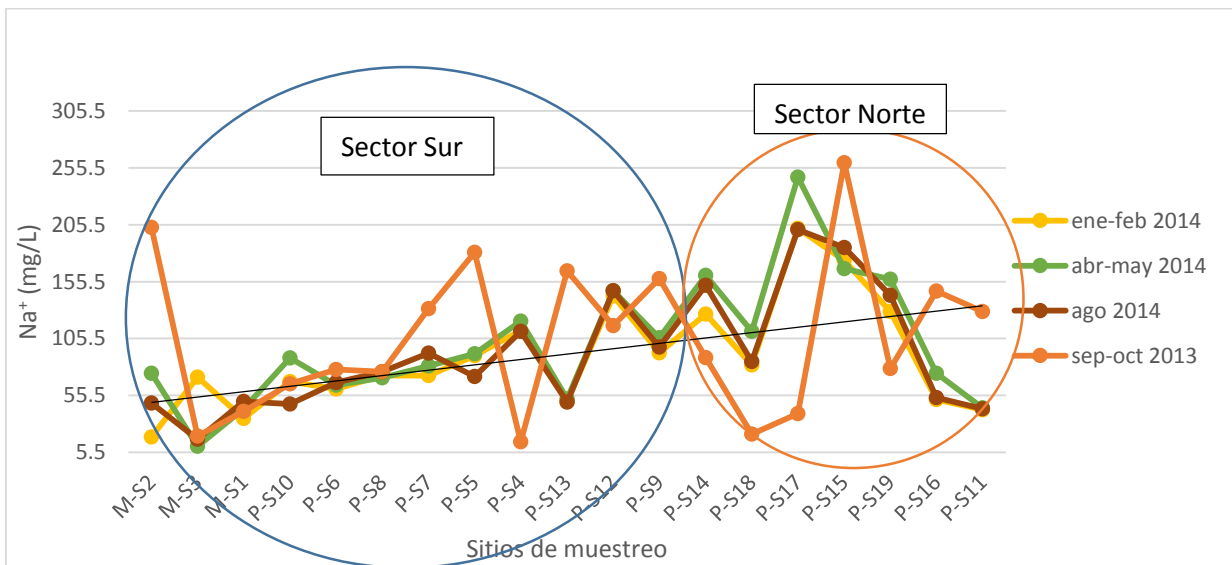


Figura 6.10. Sodio.

El K⁺ (Fig. 6.11), presenta un incremento en las concentraciones de los periodos de enero y febrero y abril y mayo, estos periodos son los periodos de estiaje en la zona, por el cual se puede observar un incremento de las concentraciones debido a la poca disolución de rocas en estos

periodos, en el septiembre y octubre así como el periodo de agosto las concentraciones disminuyen debido a la disolución por causa de los eventos pluviales.

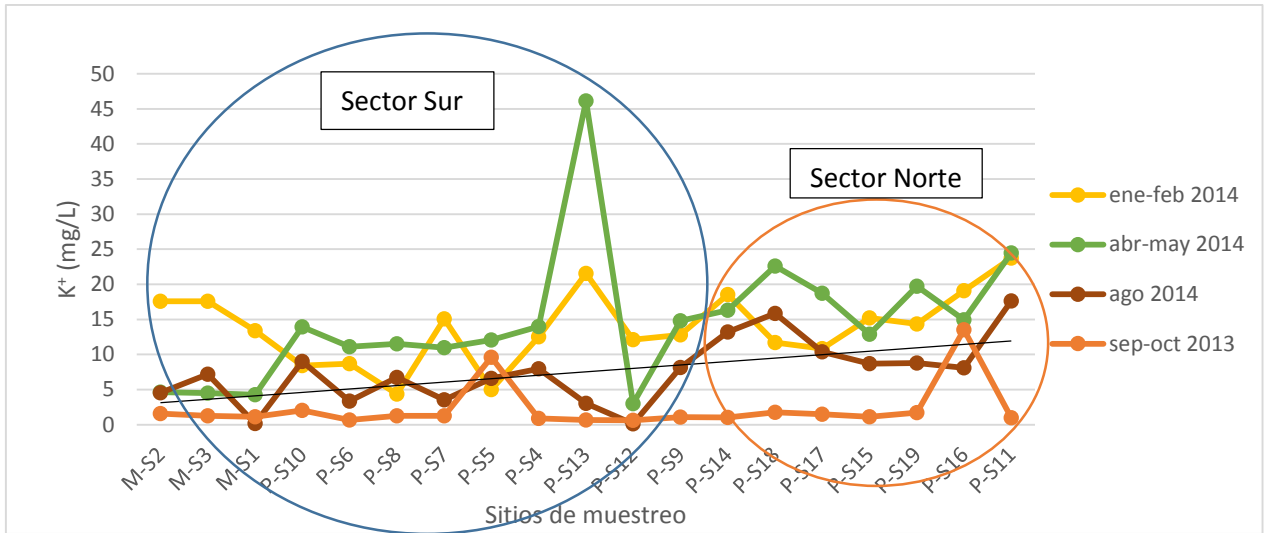


Figura 6.11. Potasio.

Los HCO_3^- (Fig. 6.12), presenta un comportamiento estable en todos los periodos de muestreo y se observa una gran relación entre los parámetros de conductividad eléctrica, alcalinidad total y TDS, también existe un incremento de las concentraciones hacia los sitios localizados al norte de la zona de estudio, los pozos P-S16 y P-S11 presenta valor bajos como en otros parámetros medidos.

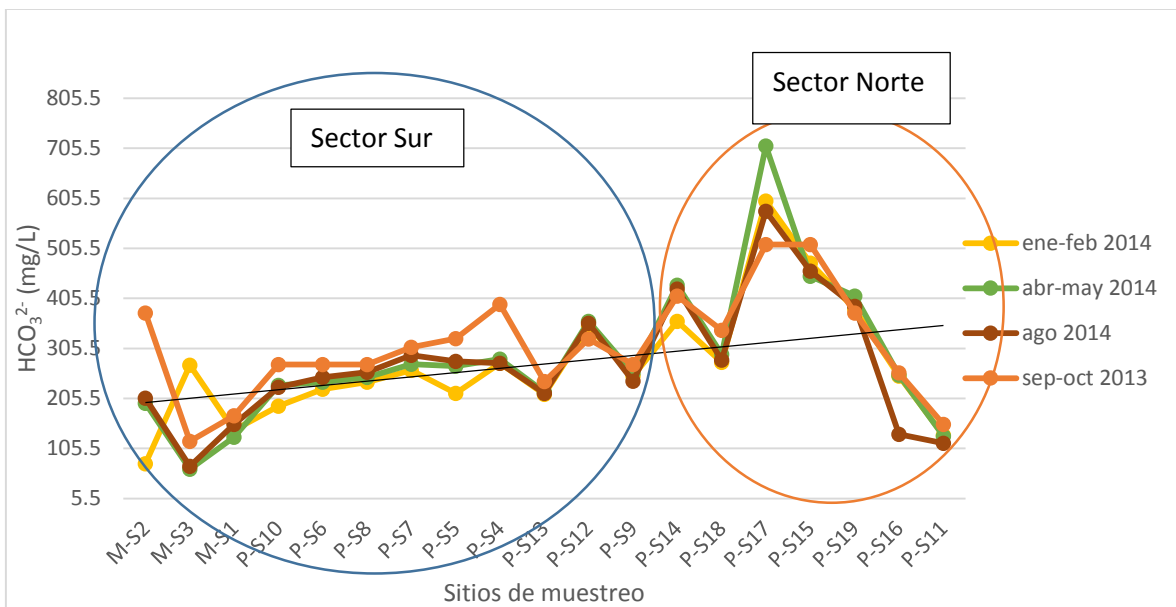


Figura 6.12. Bicarbonatos.

Respecto a los SO_4^{2-} (Fig. 6.13), estos solo se presentan en tres periodos, de igual manera que en parámetros anteriores no se contaba con el método, equipo e instrumental adecuado para llevar a

cabo su medición, se puede observar que en todos los periodos existe un comportamiento similar con un incremento de concentraciones hacia los pozos localizados al norte de la ciudad, y los valores más bajos de sulfatos se localizan en los pozos P-S11 y P-S16 en la base del cerro del Quinceo.

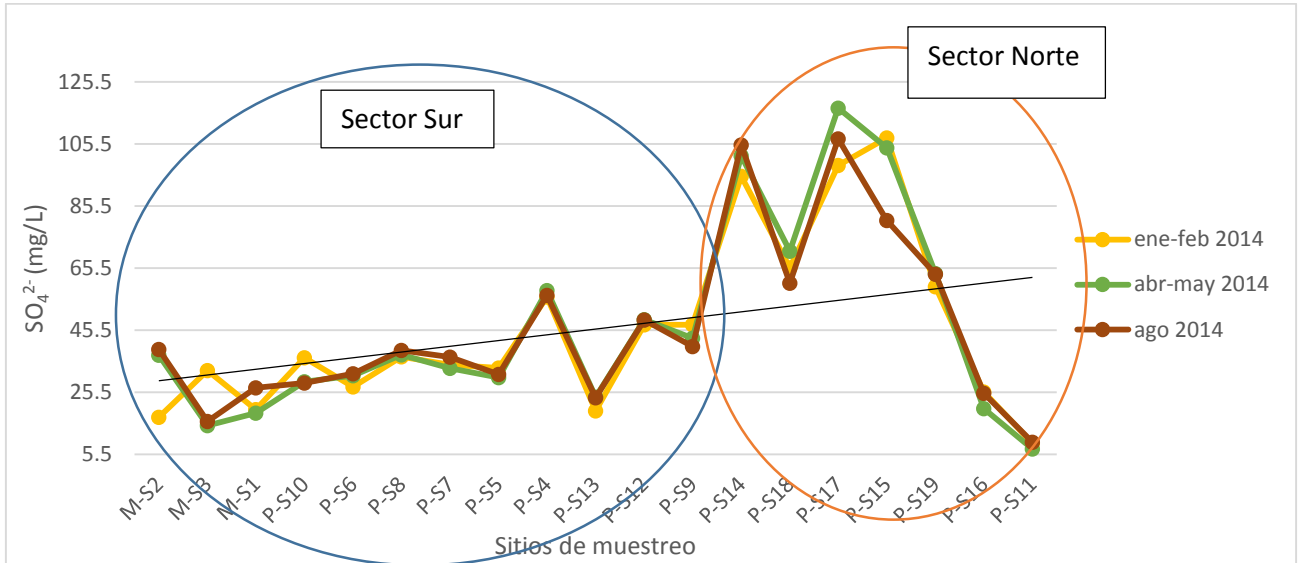


Figura 6.13. Sulfatos.

Los cloruros presentan la misma tendencia de incremento hacia el norte de la ciudad, en el periodo septiembre y octubre se midieron mayores concentraciones, todas estas variantes en iones, se podrán aclarar en el apartado de balance iónico (Fig. 6.14).

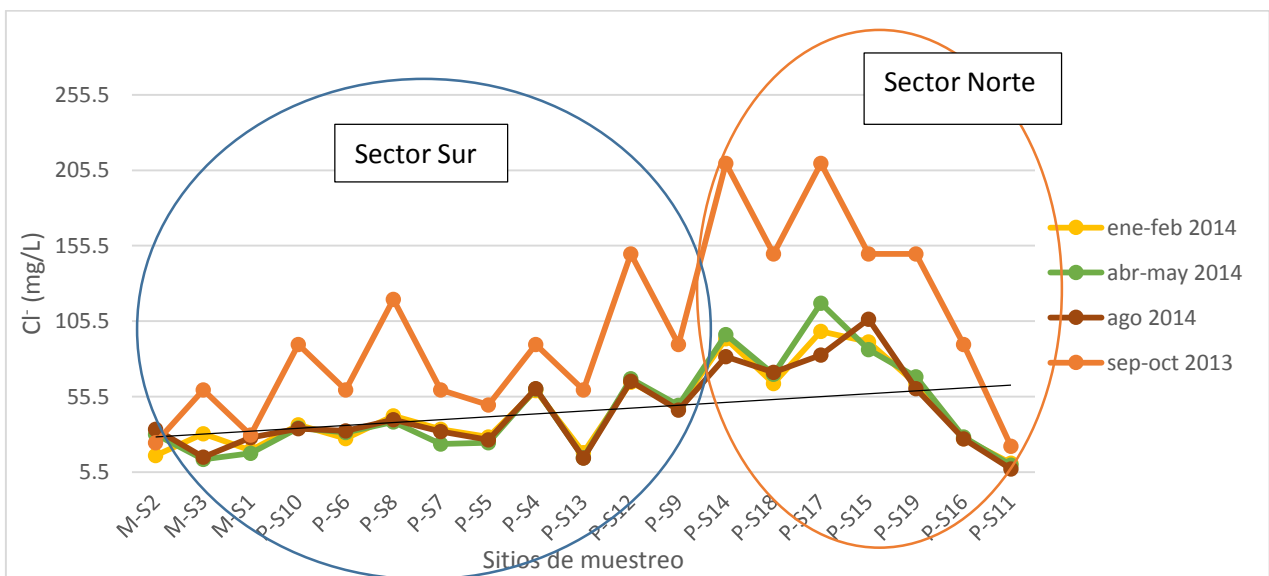


Figura 6.14. Cloruros.

Para este trabajo faltó el análisis de fosfatos (PO_4^{4-}) y fluoruros (F^-), los cuales son fundamentales en el balance iónico ya que son aniones mayoritarios.

VI.4. Tipo de agua analizada en la zona de estudio

Para determinar el tipo de agua se consideraron las concentraciones analizadas de las muestras con respecto a los iones mayoritarios en mg/L. Se utilizó el diagrama de Piper a través del software de AquaChem 3.7.

De acuerdo a los datos obtenidos en este trabajo se considera que el orden descendente para cationes determinados en la mayoría de sitios de estudio de acuerdo a concentración es $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+$ y el orden para los aniones es $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{CO}_3^{2-}$, por tanto al tener un alto contenido esta en Na^+ y HCO_3^- , se tienen aguas bicarbonatadas sódicas principalmente en el acuífero de Morelia, las cuales se muestran en el diagrama de Piper (Fig. 6.15). Como se observa en el diagrama el triángulo de la derecha presenta una mayor concentración para pozos en CO_3^{2-} (carbonatos) y HCO_3^- (bicarbonatos), el triángulo de la izquierda presenta una mayor concentración de Na^+ y K^+ y en el diamante se encuentra la mayor concentración en la zona donde se favorece este tipo de agua (bicarbonatada sódica). La presencia de estos iones indica que el agua del acuífero de Morelia, no presenta largos periodos de residencia lo que impide que se carbonatice o se sulfatice el agua. En el caso de los manantiales se observa que son ricos en carbonatos y bicarbonatos, pero presentan una mayor concentración de calcio con estas condiciones podemos decir que el agua de manantiales es rica en bicarbonatos y calcio, siendo aguas bicarbonatadas cálcicas o agua dura

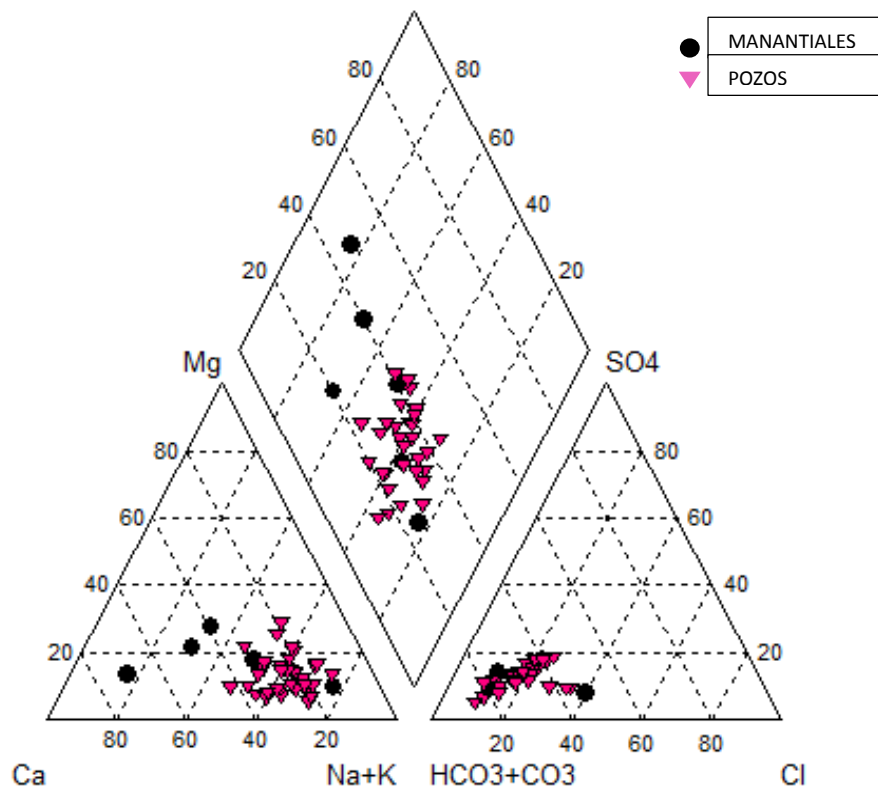


Figura 6.15. Diagrama de Piper.

La presencia de Na^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} se pueden relacionar con el paso del agua a través de las rocas de ignimbrita y andesita disolviéndolas y obteniendo los iones. Y como se mencionó anteriormente la presencia de HCO_3^- es un indicativo de que el agua del acuífero de la zona es de reciente infiltración y relacionando los valores de carga hidráulica de los estratos se puede considerar como indicativo de que el acuífero presenta sobreexplotación.

VI.5. Balance iónico

Se realizó el cálculo del balance iónico a través de procedimiento que se encuentra en el ANEXO B. En total se analizaron 76 muestras en los cuatro periodos de tiempo divididas en 19 sitios por 4 periodos de tiempo. El balance iónico de la figura 6.16 muestra resultados favorables para la mayoría de las muestras ya que se encuentran dentro del intervalo de certeza de equilibrio para los iones, pero para las muestras del primero y último periodo se observa fuera de este intervalo. En el caso del primer periodo (valores de 1 a 19) se utilizó una técnica imprecisa para la valoración de iones, lo que impidió un resultado aceptable, es recomendable apegarse a la normatividad correspondiente para obtener valores representativos. Es importante recordar que en este periodo hubo varias limitaciones que impidieron el análisis de cationes como en el caso del Mg^{+2} y en aniones como SO_4^{-2} y faltó precisar una mejor medición de Cl^- . En el caso del último periodo (valores del 62 al 73) se encuentra valores desplazados a la zona de cationes, lo que permite

considerar que sería necesario analizar fluoruros o fosfatos para que los valores se encontraran dentro del margen de error. También se puede considerar la posible existencia de otros cationes o aniones que no se tomarán en cuenta y que influyeran en el resultado.

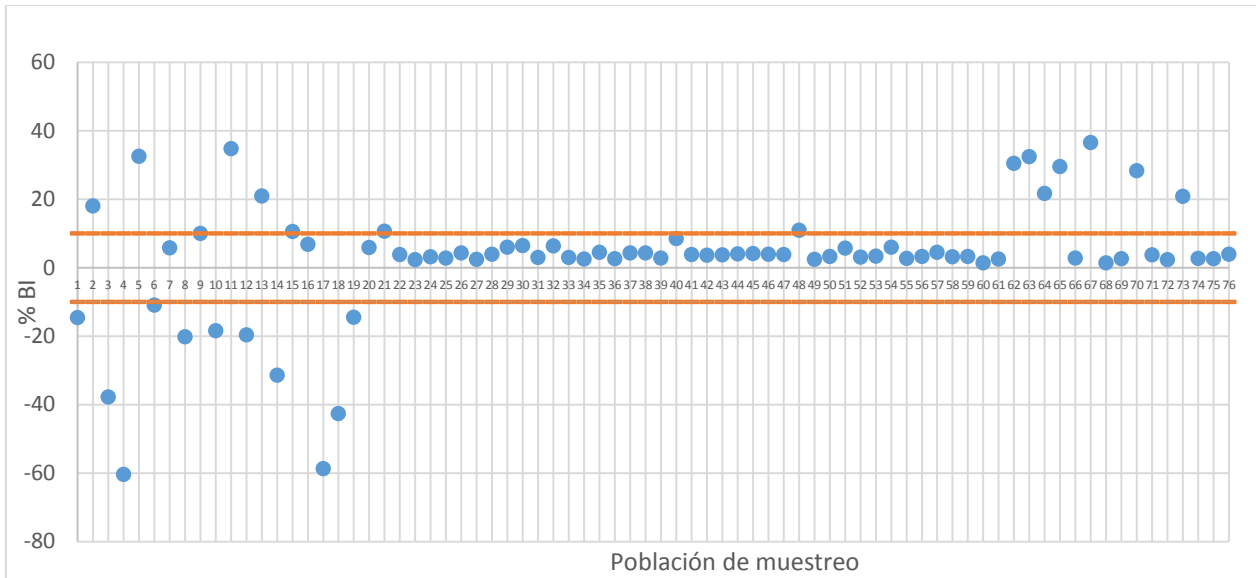


Figura 6.16. Balance iónico.

VI.6. Coliformes totales y fecales

En la tabla 6.4 (ANEXO D), se presentan los valores de coliformes totales y fecales, donde los coliformes totales se analizaron para todos los periodos de muestreo a diferencia de los coliformes fecales que solo se analizaron en los tres últimos periodos de muestreo. En la figura 6.17 se presentan los valores obtenidos de coliformes fecales y en la figura 6.18, los valores de coliformes totales.

Se reportan 13 sitios con presencia de coliformes fecales, seis de ellos en el periodo de agosto; ocho en abril y mayo; cuatro en enero y febrero. El manantial M-S1 (manantial relicario ubicado al suroeste de la ciudad) es el que presenta el mayor contenido de microorganismos (16 NMP/100 ml) en el mes de agosto, siendo que la normatividad correspondiente señala que debe ser cero en presencia de organismos coliformes. Se determinó contaminación de agua potable por los datos anteriores se infiere que sea a través de aportación inducida, suponiendo que exista influencia industrial o deterioro de drenaje urbano, lo cual en estos momentos no es posible precisar por la falta de más análisis.

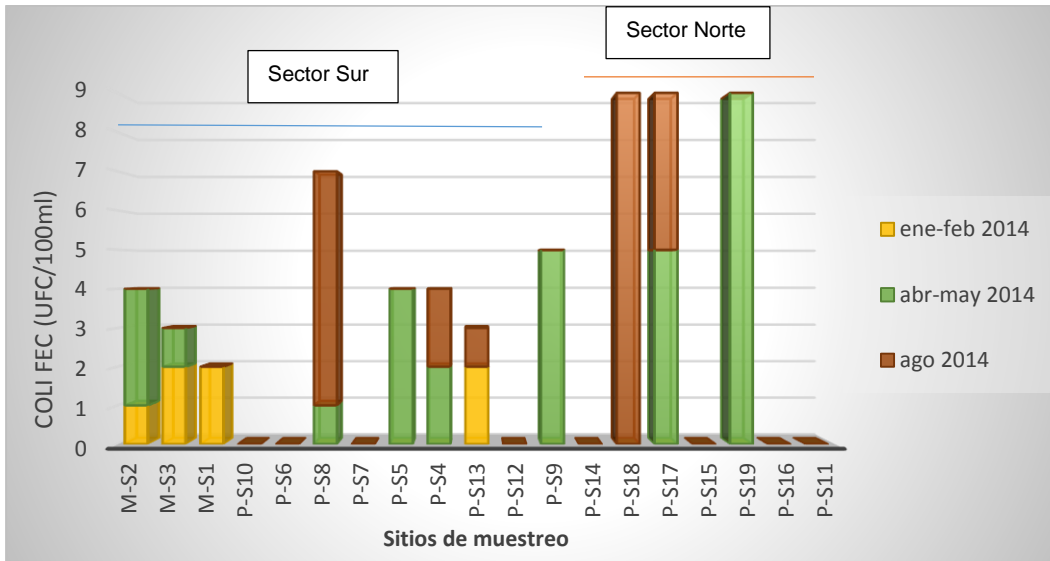


Figura 6.17 Coliformes Fecales.

Para coliformes totales se observa que en el periodo de septiembre-octubre existen 6 sitios con presencia; en enero-febrero 5 sitios; en abril-mayo 5 sitios; agosto 6 sitios. Con 4 sitios con valor mayores a 8 NMP/100ml.

La diferencia que se encuentra entre coliformes totales y fecales es que en totales se miden todas las especies de coliformes desde las menos dañinas hasta los coliformes fecales y en coliformes fecales solo se cuantifica presencia de estos.

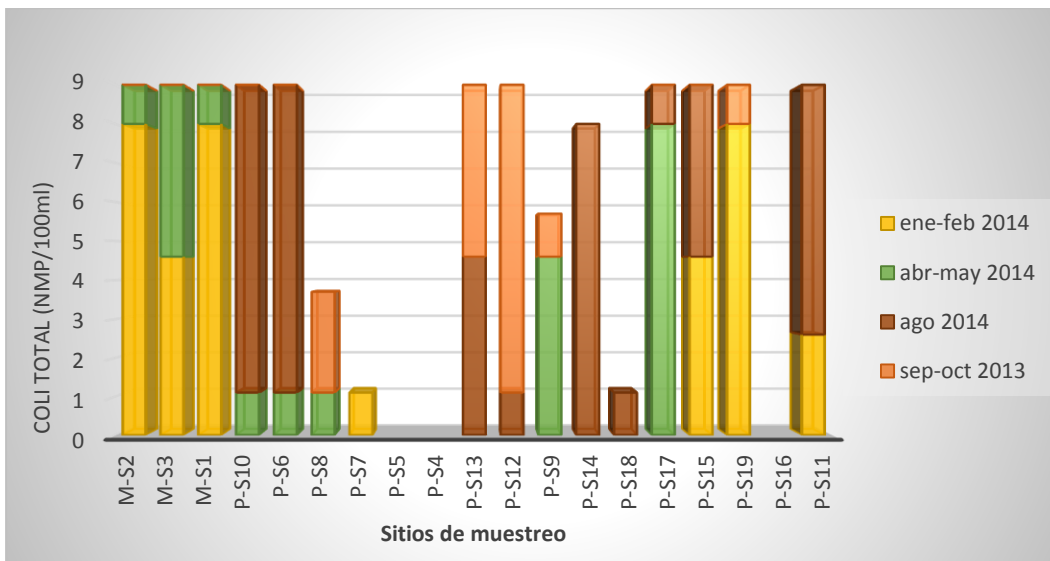


Figura 6.18. Coliformes totales.

VI.7. Arsénico y metales pesados.

Para este trabajo se determinaron los siguientes metales a través de ICP-MS (Instituto de Geofísica de la UNAM): As, Mn, Mo, Ni, Cd, Pb, Cr, Be, Al, Ti, V, Fe, Co, Cu, Zn, Se, Sb, Tl. Las concentraciones que presenta cada sitio de muestreo se encuentran sin rebasar los límites máximos establecidos en la NOM-127-SSA1-2000 a excepción del As y Fe que presentan un ligero incremento el As en 3 sitios y distintos periodos y en el Fe en dos sitios de muestreo los cuales son reportados en la tabla 6.5 del ANEXO D.

El As presenta valores altos en el pozo P-S17 con 0.0258 mg/l en enero y febrero, 0.0266mg/l en el periodo abril y mayo y con una concentración de 0.024 mg/l en el mes de agosto, son los valores más altos de todos los sitios de muestreo en tres de los cuatro periodos de muestreo, lo que lo convierte en un punto de sumo interés, la mayor concentración se presenta en la transición de periodo de estiaje y lluvias, disminuye para el mes de agosto, septiembre-octubre y vuelve a aumentar en el mes de enero, es muy probable que exista una contaminación local ya que en el sitio donde se localiza este pozo fue durante mucho tiempo una zona de basurero, que podría estar presentando lixiviados de esos residuos.

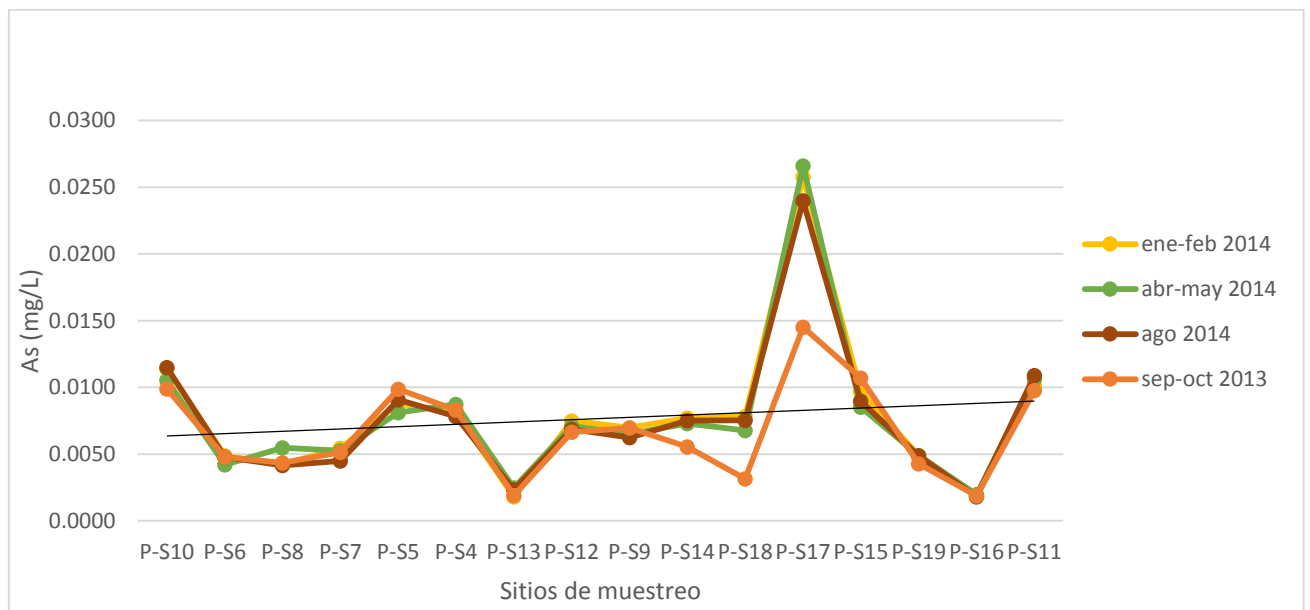


Figura 6.19. Arsénico.

VI.7.1 Mapas de iso-valores de arsénico y metales pesados.

En la figura 6.20, se presentan las concentraciones de arsénico en mg/L para el primer muestreo de septiembre y octubre 2013 está realizado el análisis con respecto a la ubicación de los pozos de muestreo las fallas y las fracturas principales (la Colina y La Paloma en color purpura) de la zona. En esta figura se observa que las concentraciones no rebasan los límites de la norma (NOM-127-SSA1-2000), pero si presenta un mayor interés en los pozos P-S17, P-S15, P-S11, P-S10 y P-S5

que son los que contienen un incremento en sus concentraciones, hay que destacar que el software realiza una interpolación de valores alrededor de los pozos P-S15, P-S11 y P-S5, ya que no tiene mayor información, a pesar de ello es notorio destacar que las concentraciones aumentan en un perfil SO-NE. En la figura 6.21 se observa que el pozo P-S17 es el que marca la diferencia rebasando ligeramente el límite de la norma y refleja una concentración local, los pozos que anteriormente presentaban concentración considerable en el periodo de toma de muestra anterior, en este de enero y febrero no presentan valores representativos comparándolos con el P-S17. En la figura 6.22, se representa el periodo de abril y mayo, en este periodo tiene lugar la concentración más alta de As, en el P-S17 y también se distingue que el software comienza a interpolar valores cercanos a las ubicaciones de los pozos P-S15, P-S11, P-S10 y P-S5. En la figura 6.23 se observa un ligero aumento de concentración del pozo P-S11 para el periodo de agosto y también se puede notar una ligera disminución de la concentración de P-S17, se puede interpretar que la concentración se mantiene mayor en la zona centro-norte de la ciudad, pero forma parte de un sistema dinámico que cambia con el tiempo.

Arsénico muestreo 1

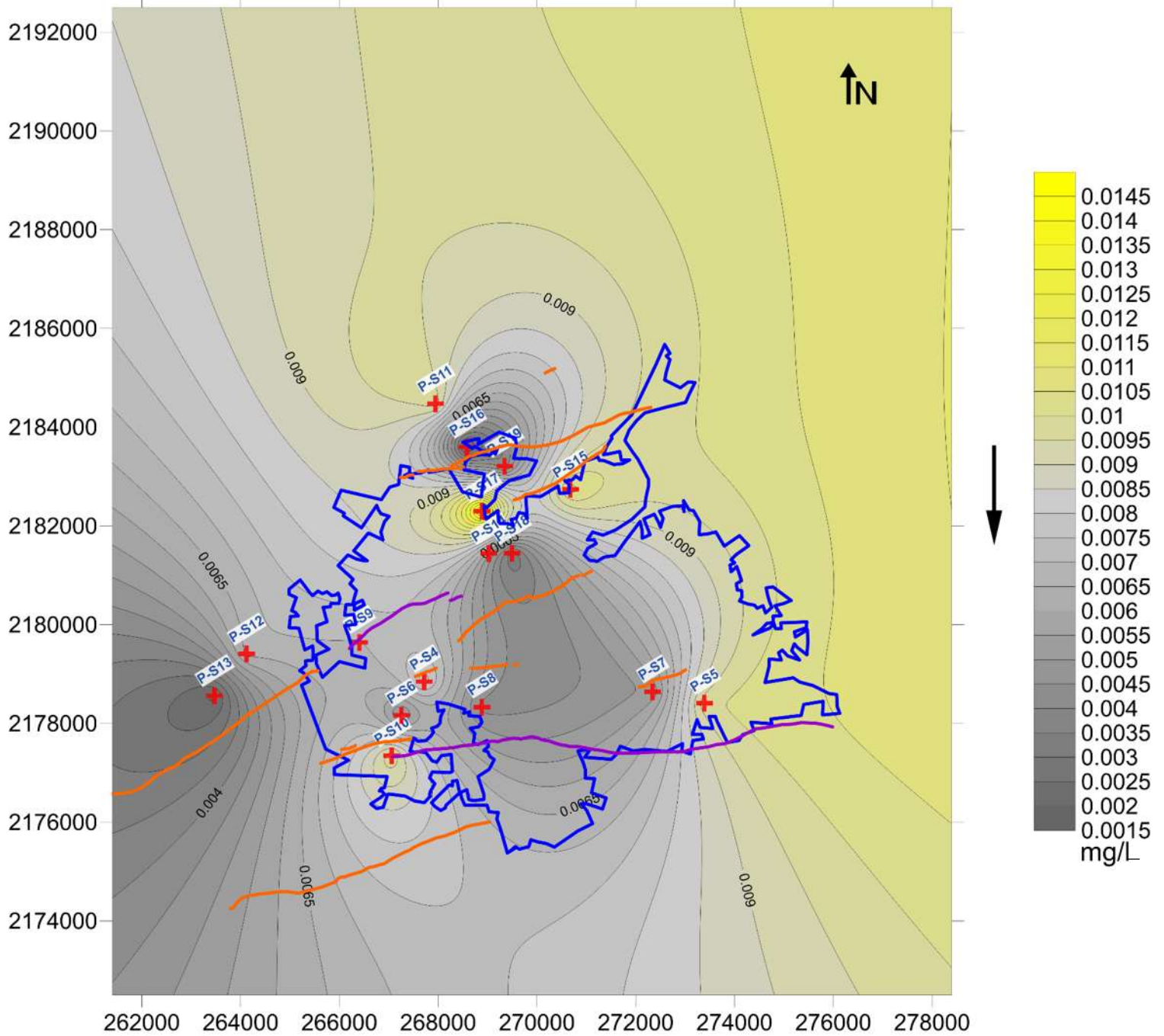


Figura 6.20. Iso-valores de arsénico muestreo sep-oct 2013.

Arsénico muestreo 2

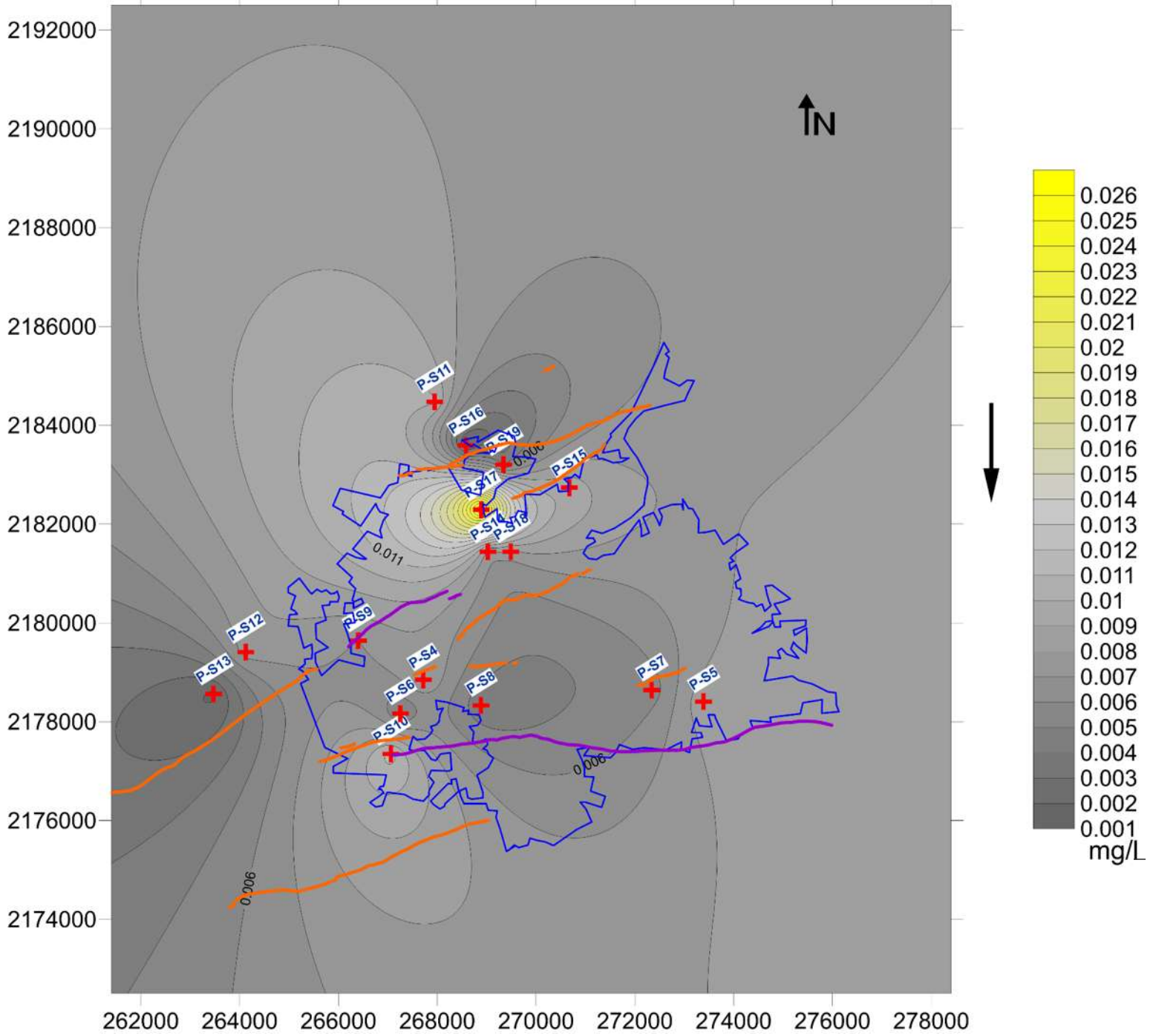


Figura 6.21. Iso-valores de arsénico muestreo ene-feb 2014.

Arsénico muestreo 3

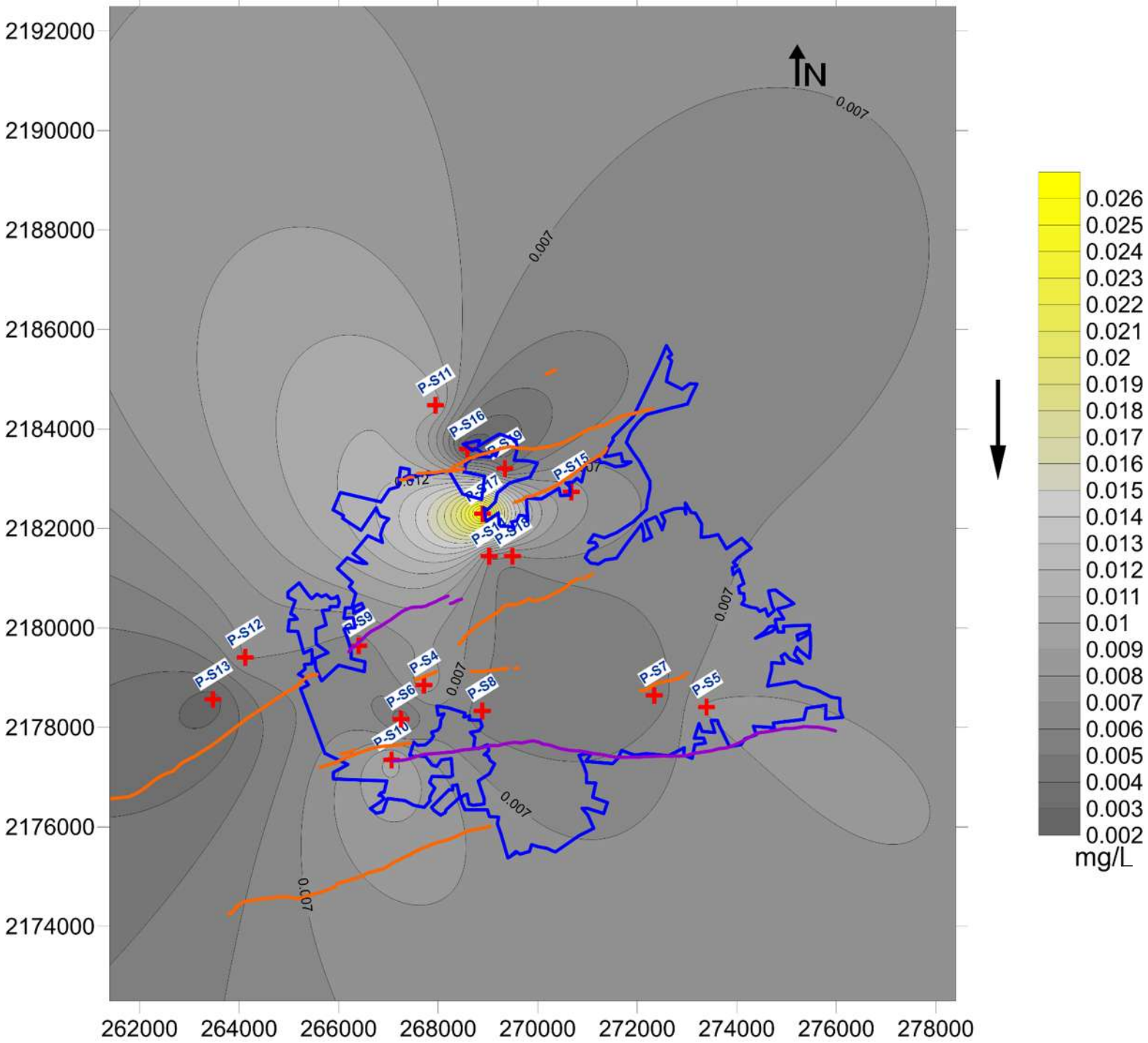


Figura 6.22. Iso-valores de arsénico muestreo abril-mayo 2014.

Arsénico muestreo 4

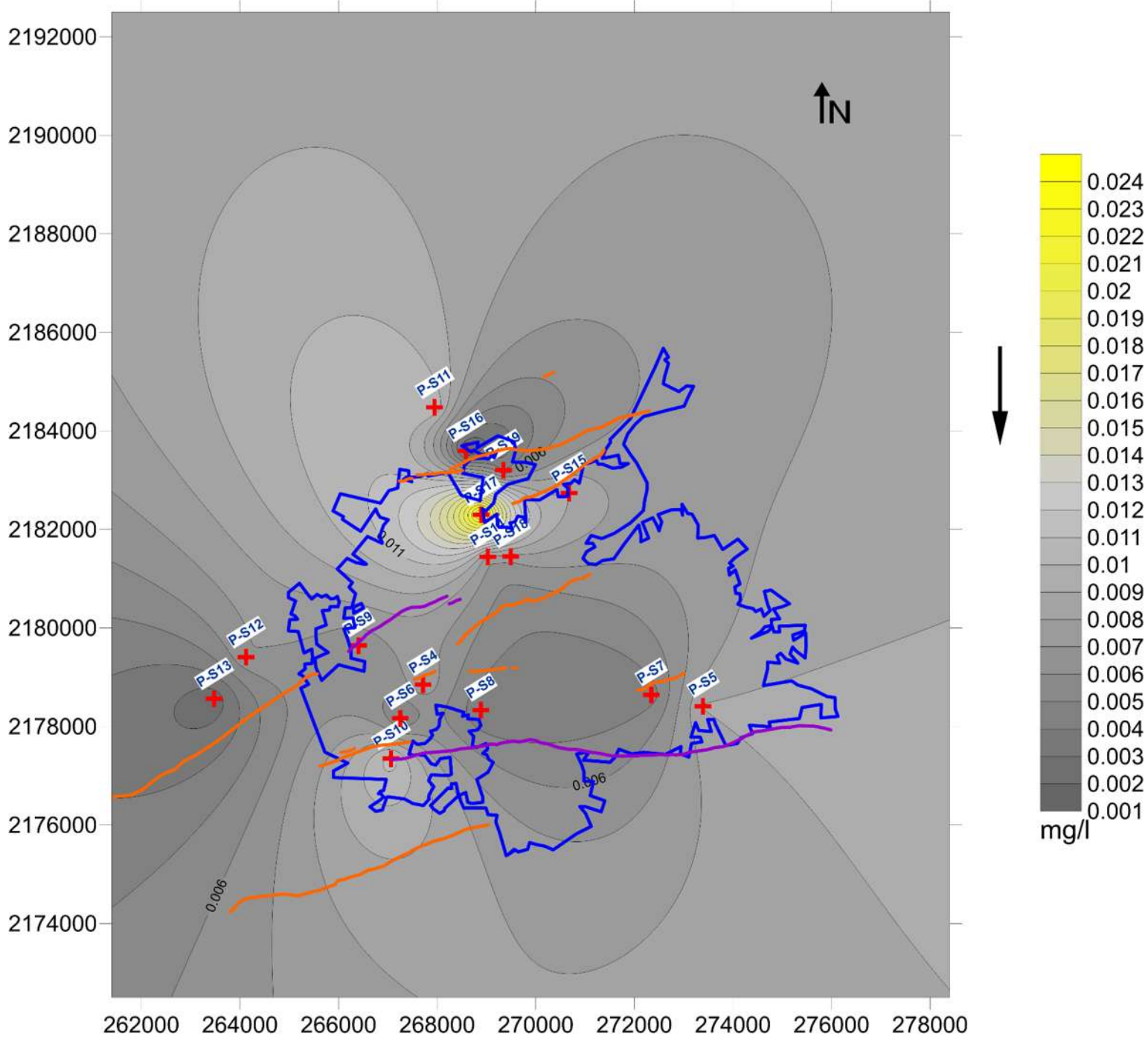


Figura 6.23. Iso-valores de arsénico muestreo agosto 2014.

INDUSTRIAS Y BASURERO

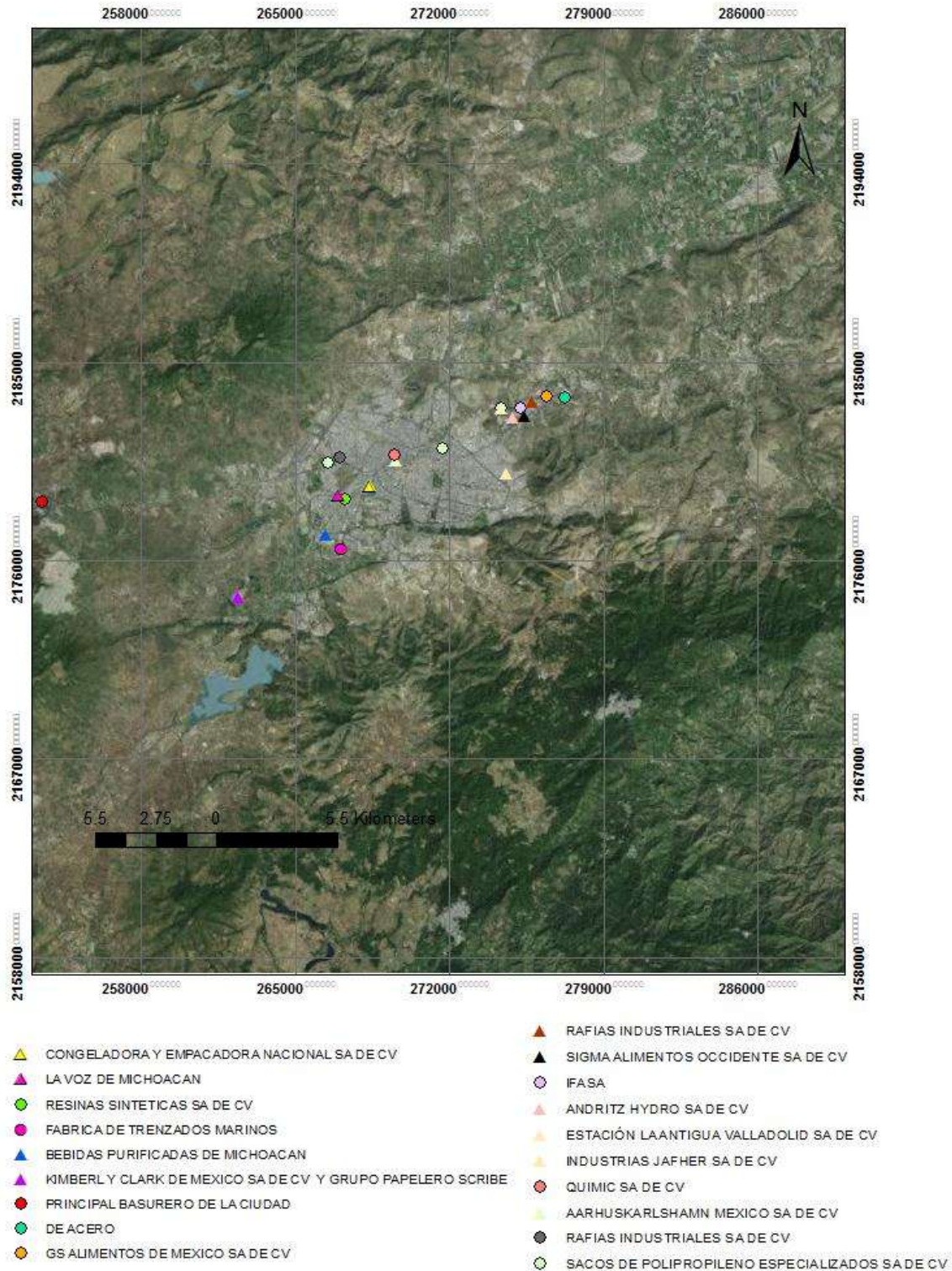


Figura 6.24. Industrias y relleno sanitario del municipio de Morelia.

En la figura 6.24 se tomó de la base de datos de INEGI, la localización de varios sitios los cuales representan las industrias localizadas en la zona así como el relleno sanitario del municipio, es muy osado suponer que son la fuente de contaminación de algunos análisis medidos, así que lo que se considera en este trabajo es visualizar una posible relación, pero esta no podrá ser determinada científicamente a menos de que se realicen análisis posteriores cercanos a estos sitios obteniendo así un mejor resultando, descartando o incorporándolo a la calidad del agua de la zona.

VI.8. MODFLOW.

El software representa un modelo de forma general, se desarrolló el modelo de esta manera ya que no se contó con la información hidrogeológica, geológica, piezométrica e hidrológica necesaria para representarlo de forma más real. Fue necesario simplificar variables para poder realizarlo, como:

forma; se empleó una geología simplificada de la zona de estudio distribuida en 3 tipos de unidades geológicas (basaltos, fluviolacustres e ignimbritas), por tanto fue empleo el uso de un valor de conductividad hidráulica (K) para cada unidad geológica, de igual manera para el coeficiente de almacenamiento (S) y el porcentaje de porosidad (n), los valores asignados se pueden , asignadas únicamente para el comportamiento de flujo general del comportamiento del acuífero a falta de información hidrogeológica real. Tampoco fue posible utilizar información de pozos ya que la red de monitoreo de pozos y manantiales empleada en este trabajo de tesis, no es representativa para generar un modelo apegado a la realidad.

a figura 6.5 a

Ya que no fue posible realizar un comportamiento adicionando las variables extracción de pozos un software que permite predecir el comportamiento de un acuífero en escalas variadas de tiempo, por ejemplo, colocando los datos iniciales en un periodo de tiempos de 30 años. Así como también puede simular un comportamiento histórico estableciendo el periodo de tiempo al pasado, de esta manera se puede observar que tan real es el resultado arrojado por este software. En este trabajo se empleó el método predictivo, en ausencia de información antigua.

Como la base de datos fue insuficiente la modelación en MODFLOW se realizó para un periodo de tiempo atrás antes de la existencia de pozos y zona urbana donde se puede considerar que la geología de lugar no se modifica con respecto al tiempo como lo hace la vida humana. Para poder realizar modelos actuales es necesario incrementar la información de pozos de extracción así como las características piezométricas del acuífero.

Suponiendo un periodo de tiempo de unos 500 años atrás sin considerar fallas en la figura 6.25 se puede observar que el agua del acuífero tiende a fluir en dirección SO-NE, por la simple geología del lugar.

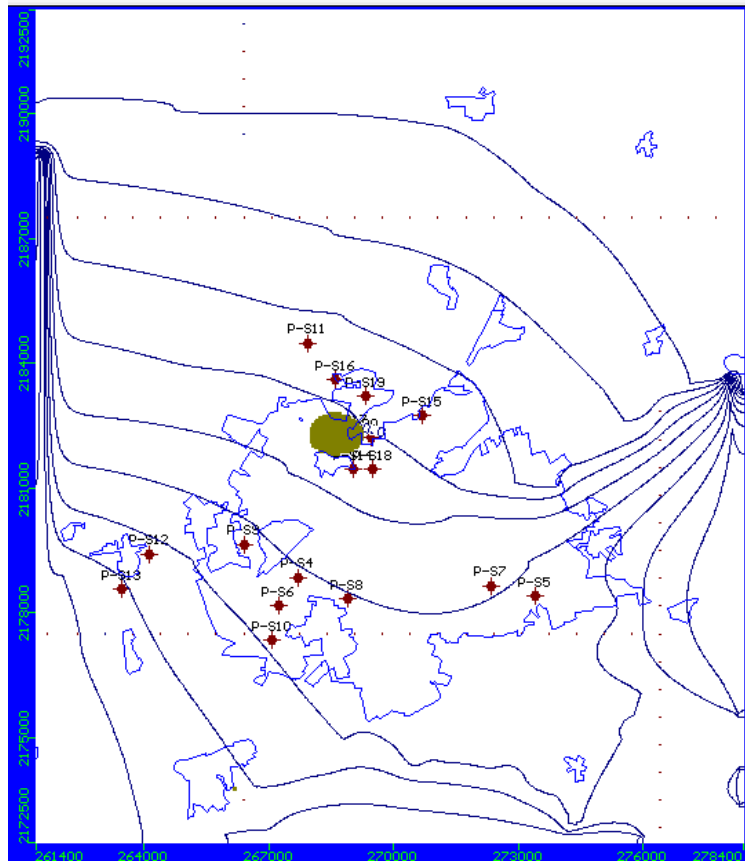
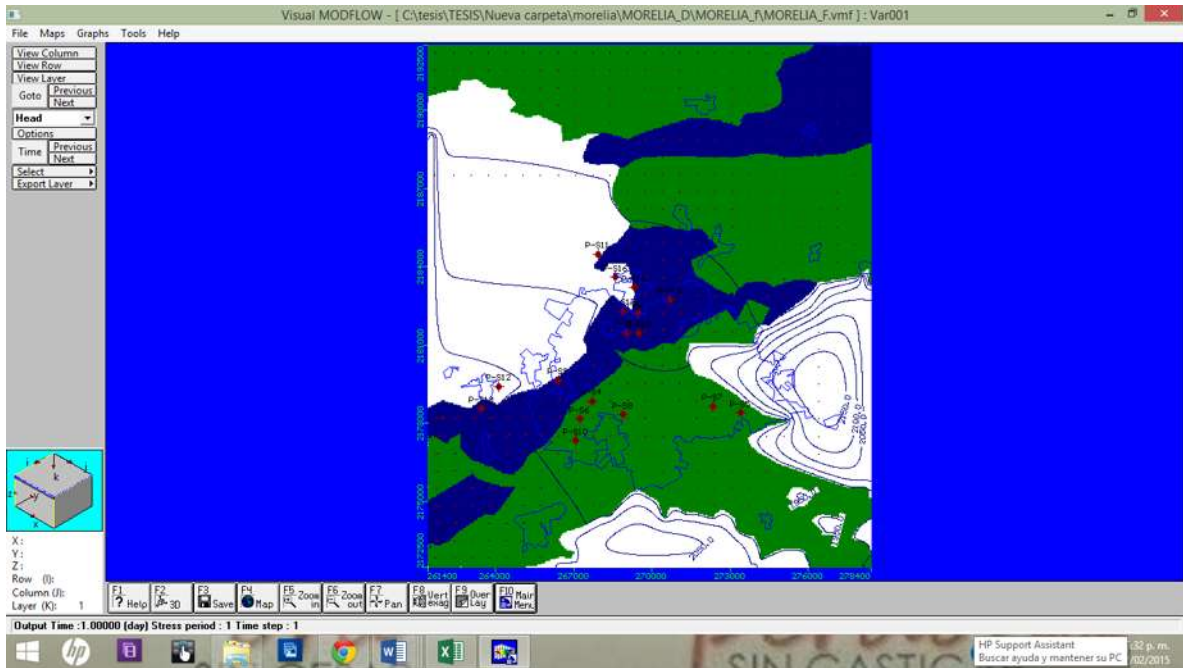


Figura 6.5 Flujo hídrico subterráneo orientado del SO al NE sin fallas ni fracturas únicamente con la litología y topografía de la zona.



VII. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Este trabajo de tesis también resalta que existe una relación entre el incremento en el contenido de sales, con el aumento de pH, de conductividad, temperatura, sólidos disueltos totales, dureza y alcalinidad hacia el norte y noreste de la zona de estudio y por ende lógicamente disminuyen los valores de oxígeno disuelto.

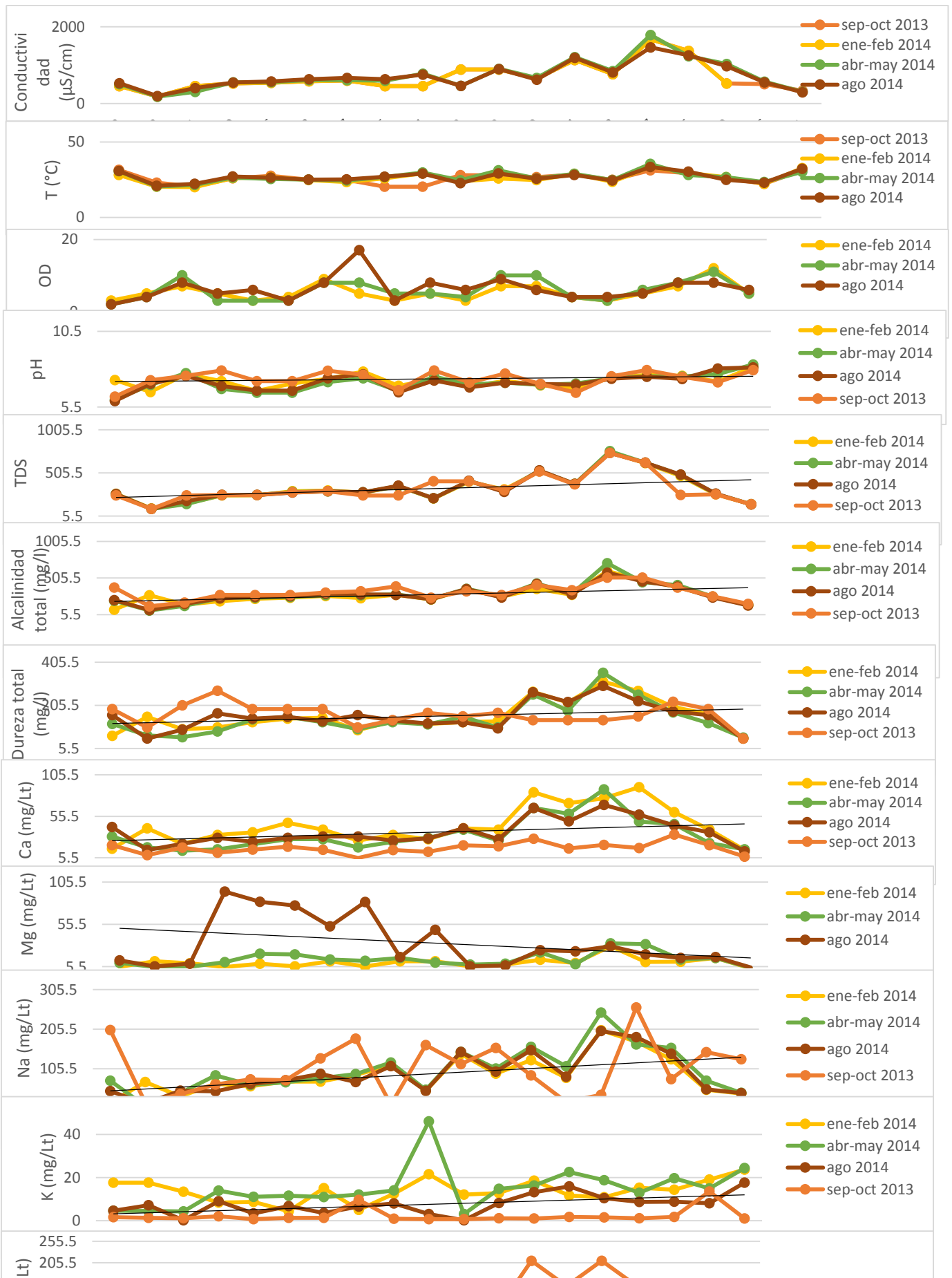
El oxígeno disuelto presenta un orden completamente inverso a los parámetros anteriormente mencionados, tiende a disminuir con la profundidad de un estrato hasta que rompe con la perturbación del medio ambiente, la cual es estimada como valiosa hasta los 100 m de profundidad.

En el ANEXO D, se pueden apreciar los valores de temperatura mayores a la temperatura ambiente de la zona en pozos, esto se atribuye a la profundidad de extracción de agua. En cambio en el caso de manantiales se atribuye a contaminación y esto es reflejado en el poco contenido que se encuentra de oxígeno disuelto.

VIII. CONCLUSIONES

La ubicación de los pozos es un referente importante para la calidad del agua, se observa que las concentraciones más altas de carbonatos se dan hacia el noreste de la zona siguiendo zonas preferenciales de fallas,.....

- ✚ El agua de la zona de estudio presenta una concentración rica en sales.
- ✚ Es importante resaltar que las características de los pozos influyen en la calidad del agua. Profundidad, nivel estatico, nivel dinamico la cantidad de gasto
A partir del análisis químico del agua en la ciudad de Morelia, los resultados indican que los pozos más contaminados para metales pesados el pozo P-S17, localizado en zonas donde todavía se observaban pantanos a 15 años también eran zonas de basureros, escombros , en bacterilógicos....., los que contienen niveles altos de carbonados....
- ✚ El acuífero de Morelia se interpreta como un flujo intermedio debido a que no se encuentra en la zona de parteaguas de la cuenca, ni en la zona de descarga y sus concentraciones no son tan altas.
- ✚ La geología de la zona, también influye en la calidad del agua, en particular en el tipo y concentraciones de sales, así como en su aportación de minerales y contaminantes.



Recomendaciones para trabajo futuro

- ✚ Incrementar la red de monitoreo y el periodo de monitoreo.
- ✚ Incrementar la base de datos de información de pozos.
- ✚ Realizar estudio sobre especiación química en una red de monitoreo con mayor representatividad.
- ✚ Realizar análisis en las zonas de recarga y descarga.
- ✚ Ampliar la determinación de iones usando métodos de análisis que se encuentran en las normas.
- ✚ Monitorear pozos cercanos a zonas industriales.
- ✚ Incremento en datos geohidrológicos.

Bibliografía

- APHA-AWWA-WPCF. (1995). "**METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER**". 19ª edición. American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA), Water Pollution Control Federation. (WPCF). Washington.
- Arreola-Cianca, 2014. "**EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN FUNCIÓN DE LA PRESENCIA DE ARSÉNICO, FLÚOR Y BORO EN CIUDAD HIDALGO, MICHOACÁN**". TESIS de MAESTRA EN CIENCIAS EN INGENIERIA AMBIENTAL. UMSNH.
- Arreygue-Rocha, E.; Garduño-Monroy, V.H.; Canuti, P.; Casaglie, N.; Iotti, A. y Chiesa, S., 2002. "**ANÁLISIS GEOMECÁNICO DE LA INESTABILIDAD DEL ESCARPE LA PALOMA, EN LA CIUDAD DE MORELIA, MICHOACAN, MÉXICO**". Pp 91-106. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas.
- AVILA-OLIVERA J.A y GARDUÑO-MONROY V.H. (2007). "**ANÁLISIS DEL ABATIMIENTO DE LOS NIVELES FREÁTICOS DEL SISTEMA ACUÍFERO DE MORELIA**", Ciencia Nicolaita, Vol. 46.
- Bravo-Espinoza, M.; Barrera-Camacho, G.; Mendoza, E.M.; Sáenz-Reyes J.T.; Bahena-Juárez, F.; Sánchez-Martínez, R. 2012. "**CONTRIBUCIONES PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE DE LA CUENCA DEL LAGO DE CUITZEO, MICHOACAN**". UNAM. INIFAP-Campo Experimental Uruapan. Uruapan, Michoacán. Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental. Morelia, Michoacán, México.
- Carrillo-Rivera 2002. J.J., Cardona, A., Angeles-Serrano, G., Hergt, T., 2002, "**IS THE SAN LUIS POTOSI BASIN A CASE OF OVEREXPLOITATION?**", en Geological Society of America, Annual Meeting, Denver, Colorado, paper 70-12.
- CARRILLO-RIVERA, J.J., CARDONA, A. y MOSS, D. (1996) "**IMPORTANCE OF THE VERTICAL COMPONENT OF GROUNDWATER FLOW: A HYDRO-GEOCHEMICAL APPROACH IN THE VALLEY OF SAN LUIS POTOSI, MEXICO**". J. Hydrol. Vol. 185, 1996, pp. 23-44.
- Carrillo-Rivera JJ, Cardona A., Huizar-Álvarez, R. Graniel-Castro, E., (2008) "**RESPONSE OF THE INTERACTION BETWEEN GROUNDWATER AND OTHER COMPONENTS OF THE ENVIRONMENT IN MEXICO**", Environmental Geology, vol. 55, pp. 303-319.
- Chow, (ed.) Handbook. "**APPLIED HYDROLOGY**". McGraw-Hill, 1964. Pp.42
- CNA-Consultores. 1990. "**ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO CUANTITATIVO DEL ACUÍFERO MORELIA- QUERÉNDARO, MICH.**" Agua, Consultores S.A. de C.V.-
- CNA. 1977. "**ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DE LA ZONA MORELIA-QUERÉNDARO**", Informe Técnico.
- CNA. 1987. "**EXPLORACIÓN GEOFÍSICA DE LA ZONA DEL VALLE MORELIA-QUERÉNDARO**", Informe Técnico.
http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/PNH_05-08.pdf
- Corona-Mora Adriana, Nahúm M. Sánchez-Vargas y Roberto Lindig-Cisneros, 2014. "**EVALUACIÓN**

DE DOS ESPECIES DE SELVA SECA EN GRADIENTES AMBIENTALES EN MICHOACÁN, MÉXICO". Rev. Madera y Bosques Vol.2, núm. 2:49-58.

- Deutsch W.J. (1997). **"GROUNDWATER GEOCHEMISTRY FUNDAMENTALS AND APPLICATIONS TO CONTAMINATION"**. International Standard Book Number 0-87371-308-7.
- DOF, 12-01-1994, **"NUEVO REGLAMENTO PUBLICADO EN EL DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACIÓN EL 12 DE ENERO DE 1994"**. TEXTO VIGENTE. Última reforma publicada DOF 24-05-2011.
- Domenico PA, Schwartz FW (1997) **"PHYSICAL AND CHEMICAL HYDROGEOLOGY"**. 2nd edn. Wiley, New York.
- EPA, 2002. **"OFFICE OF GROUND WATER AND DRINKING WATER. NATIONAL PRIMARY AND SECONDARY DRINKING WATER REGULATIONS, ESTADOS UNIDOS."** Environmental Protection Agency.
- Escamilla-Herrera, A., Hernández-Mejía, J., Eguizábal-Martínez, F.J., 1991, **"ESTUDIO INTEGRAL DEL PALEOZOICO EN CHIHUAHUA Y COAHUILA"**, Proyecto CAO-3515, Instituto Mexicano del Petróleo. pp 253.
- Freeze RA, Cherry JA (1979) **"GROUNDWATER"**. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
- Fetter, 1999, **"CONTAMINANT HYDROGEOLOGY"**. 2ª edición. Editorial Prentice Hall, Estados Unidos.
- Garduño-Monroy V. H.; Arreygue-Rocha, E.; Israde-Alcántara, I.; Rodríguez-Torres, G.M., 2001. **"EFECTOS DE LAS FALLAS ASOCIADAS A SOBREEXPLOTACIÓN DE ACUÍFEROS Y LA PRESENCIA DE FALLAS POTENCIALMENTE SISMICAS EN MORELIA, MICHOACAN"**. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas. Vol. 18 (1), pp.37-54.
- Garduño-Monroy V. H., Pérez-López R., Israde-Alcántara I., Rodríguez-Pascua M.A., Szykarruk E., Hernández-Madrigal V.M., García-Zepeda M.L., Corona-Chávez P., Ostroumov M., Medina-Vega V.H., García-Estrada G., Carranza O., López-Granados E. and Mora-Chaparro J. C., 2009. **"PALEOSEISMOLOGY OF THE SOUTHWESTERN MORELIA-ACAMBAY FAULT SYSTEM, CENTRAL MEXICO"**. Geofísica International. Vol. 48 (3), pp.319-335.
- Garduño-Monroy, Giordano N, Avila-Olivera J.A., Hernández Madrigal V.M. Samano-Nateras A y Díaz-Salmerón E, 2011. **"ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO DEL SISTEMA ACUÍFERO DE MORELIA, MICHOACÁN PARA UNA CORRECTA PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO"**
- Gómez-Tuena, A.; Orozco-Esquivel, T. y Ferrari Luca, 2005. **"PETROGENESIS IGNEA DE LA FAJA VOLCANICA TRANSMEXICANA"**. Centro de Geociencias, UNAM, campis Juriquilla, Qro. México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. Vol. LVII, (3). Pp 227-283.
- Gómez-Vasconcelos, 2012. **"GEOLOGÍA Y ESTRATIGRAFÍA VOLCÁNICA DE LA SIERRA DE MIL CUMBRES"**. Tesis de Maestría, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Gretener PE (1981) **"PORE PRESSURE: FUNDAMENTALS, GENERAL RAMIFICATIONS, AND**

IMPLICATIONS FOR STRUCTURAL GEOLOGY (REVISED)". AAPG Education Course Note Series #4, 2nd edn, AAPG Department of Education, Tulsa, Oklahoma.

Hernández-Madrigal V.M. y Ávila-Olivera J.A. (2010). **"UNIDADES GEOHIDROLOGICAS DE LA REGIÓN DE MORELIA-CUITZEO"**. Atlas de la Cuenca del lago de Cuitzeo, análisis de su geografía y entorno socioambiental. UNAM y UMSNH. P.p 66-68.

Hernández-Madrigal V.M.; Garduño-Monroy V.H.; Ávila-Olivera J.A. (2011). **"ATLAS DE PELIGROS**

GEOLOGICOS DE LA CIUDAD DE MORELIA, MICH: Estandarización del documento, actualización cartográfica de fallas geológicas de la zona urbana, y evaluación de tasas de hundimiento." Secretaria de DESARROLLO SOCIAL programa HBITAT. H.AYUNTAMIENTO DE MORELIA, MICHOACÁN. Dirección de Protección Civil y Bomberos de Morelia.

Hernández-Guerrero (2011). **"INUNDACIONES Y PRECARIEDAD: ADAPTACIÓN Y RESPUESTA**

EN LA ZONA PERI-URBANA DE LA CIUDAD DE MORELIA, MICHOACÁN". Tesis de Doctorado, CIGA. UNAM pp. 135-148.

Henry, J.G. y Heinke, G.W. 1999. **"INGENIERÍA AMBIENTAL"**. 2ª edición. Editorial Prentice Hall. México.

Hubbert MK, Rubey WW (1959) **"ROLE OF FLUID PRESSURES IN MECHANICS OF OVERTHRUST FAULTING: I. MECHANICS OF FLUID-FILLED POROUS SOLIDS AND ITS APPLICATION TO OVERTHRUST FAULTING"**. Bull Geol soc amer 70:115-166.

INEGI (2005). Instituto Nacional de Estadística y Geografía. **"GEOGRAFÍA DEL ESTADO DE MICHOACÁN"**.

INEGI (2010). Instituto Nacional de Estadística y Geografía. **"DEMOGRAFÍA DEL ESTADO DE MICHOACÁN"**.

INEGI (2013). Instituto Nacional de Estadística y Geografía. **"CARTA TOPOGRAFICA DE MORELIA"** clave E14A23 esc 1:20 000.

Israde-Alcántara, I. 1995. **"BACINI LACUSTRI DEL SETTORE CENTRALE DELL'ARCO VULCANICO MESSICANO: STRATIGRAFIA ET EVOLUZIONE SEDIMENTARIA BASATA SULLE DIATOMEE"**. Trabajo de grado Doctorado, Università degli Studi di Milano, Milán, Italia.

Israde-Alcántara, I. y Garduño-Monroy V.H. 1999. **"LACUSTRINE RECORD IN A VOLCANIC INTRA-ARC SETTING; THE EVOLUTION OF THE LATE NEOGENE CUITZEO BASIN SYSTEME (CENTRAL WESTERN MICHOACÁN, MEXICO)"**. Vol. 15. Pp 209-227. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeocology..

Israde-Alcántara, I. y Garduño-Monroy V.H. 2004. **"LA GEOLOGÍA DE LA REGIÓN DE MORELIA"**.

Vol. 1. Pp 1-13. Contribuciones a la geología e impacto ambiental de Morelia.

Israde-Alcántara, I., Garduño-Monroy V.H., Fisher C.T., Pollard H.P., Rodríguez-Pascua M.A. (2005).

"LAKE LEVEL CHANGE, CLIMATE, AND THE IMPACT OF NATURAL EVENTS: THE ROLE OF SEISMIC AND VOLCANIC EVENTS IN THE FORMATION OF THE LAKE PATZCUARO BASIN, MICHOACÁN, MEXICO". Quaternary International, 135, pp. 35-46.

- Israde-Alcántara, I.; Velázquez-Durán, R.; Lozano-García; Bischoff, J.; Domínguez-Vázquez, J. y Garduño- Monroy, V.H. 2009. **“EVOLUCIÓN PALEOLIMNOLÓGICA DEL LAGO CUITZEO, MICHOACÁN DURANTE EL PLEISTOCENO-HOLOCENO”**. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. Volumen 62, núm. 3, 2010, p. 345-357.
- Reyes-Jaramillo I. y Díaz-Pontones D.M. y (2009) **“PRODUCCIÓN Y ALMACENAMIENTO DE BELLOTAS DE QUERCUS HINTONII WARBURG (FAGACEAE) DE LA DEPRESIÓN DEL BALSAS, MÉXICO”**. Polibotánica. 27: 129-141.
- Jankowski J, Jacobson G (1989) **“HYDROCHEMICAL EVOLUTION OF REGIONAL GROUNDWATERS TO PLAYA BRINES IN CENTRAL AUSTRALIA”**. Journal of Hydrology 108:123-173.
- López Erna, Mendoza Manuel E., Bocco Gerardo, 2010. **“ATLAS DE LA CUENCA DEL LAGO DE CUITZEO: ANÁLISIS DE SU GEOGRAFÍA Y ENTORNO SCIOAMBIENTAL”**. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Pp 54-64.
- Mancuber PG (1991) **“INTERACTION BETWEEN GROUND WATER AND SURFACE SYSTEMS IN NORTHERN VICTORIA”**. Dept of Conservation and Environment, Victoria, Australia.
- Medina Vega, V. H. 2008. **“ESTUDIO GEOLOGICO, GEOFÍSICO E HIDROGEOQUÍMICO PARA GENERAR UN MODELO CONCEPTUAL DEL ACUÍFERO DE CUITZEO, MICHOACÁN, MÉXICO”**. Tesis de Maestría. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Madrigal-Sanchez, X. y L. I. Guridi-Gómez. 2002. **“LOS ÁRBOLES SILVESTRES DEL MUNICIPIO DE MORELIA, MICHOACÁN, MÉXICO”**. Ciencia Nicolaita.
- Morán R.J, Leal R.J.A., Álvarez L.B., Lozada C.S., De León S.G. (2013) **“COMPORTAMIENTO HIDROGEOQUÍMICO DE FLUJOS SUBTERRÁNEOS EN ACUÍFEROS CÁRSTICOS FRACTURADOS, APLICANDO MODELACIÓN INVERSA: CASO HUASTECA POTOSINA”**. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Vol 65, No. 1, p. 71-82.
- Oyarzun DA, Lopez-Caamal, F Kalamatianos D, Moreno J et al., (2010) **“CONTROL STRUCTURE AND LIMITATIONS OF BIOCHEMICAL NETWORKS, PROCEEDINGS OF THE AMERICAN CONTROL CONFERENCE”**, Baltimore, USA, Pages: 6668-6673
- Páez-Sánchez, 2008. **“EVALUACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE AS Y CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN FUNCIÓN DE SU MANEJO EN LA CUENCA DE CUITZEO, MICHOACÁN”** Tesis de Licenciatura, Facultad de Biología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia Michoacán México. pp 74.
- PASQUARÉ G., FERRARI L., GARDUÑO-MONROY V. H., TIBALDI A. y VEZZOLI L. (1991). **“GEOLOGY OF THE CENTRAL SECTOR OF THE MEXICAN VOLCANIC BELT, STATES OF GUANAJUATO AND MICHOACÁN: BOULDER”**, Geological Society of America, Map and Chart series, MCH072, 1 mapa con texto.
- Peña H.Y., De León S.G., Salazar C.H. (2012). **“WATER QUALITY IN WELLS OF THE NETWORK OF MONITORING OF THE AQUIFER IN THE VALLEY OF SAN LUIS POTOSÍ, MEXICO”**. Aqua-LAC-vol.4, no. 1, p 49-59.
- Rodríguez-Castro, V.A., Quiroz-Martinez, H., Solis-Rojas C y Tejeda L.O., (2006). **“MASS REARING**

- AND EGG RELEASE OF BUENOA SCIMITRA BARE ASS BICONTROÑ OF LARVAL CULEX QUINQUEFASCIATUS**". Journal of the American Mosquito Control Association 22, 123-125.
- Schurch, M., y Vuataz, F. 2000. **"GROUNDWATER COMPONENTS IN THE ALLUVIAL AQUIFER OF THE ALPINE PHONE RIVER VALLEY, BOIS DE FINGES AREA, WALLIS CANTON, SWITZERLAND"**. Hydrogeology Journal, 8(5), 549-563.
- Silva Martínez Claudia y Arreygue Rocha Eleazar, 2005. **"ESTUDIO PRELIMINAR DE LOS PELIGROS HIDROLÓGICOS E HIDRÁULICOS DE LA CIUDAD DE MORELIA, MICHOACÁN"**. UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO. GEOS, Vol. 25, No. 1, Noviembre, 2005. GGA-8.
- Tóth J (1962) **"A THEORY OF GROUNDWATER MOTION IS SMALL DRAINAGE BASINS IN CENTRAL ALBERTA, CANADA"**. J Geoph Res 67(11): 4375-4387.
- Tóth J (1963) **"A THEORETICAL ANALYSIS OF GROUNDWATER FLOW IN SMALL DRAINAGE BASINS"**. J Geoph Res 68(16): 4795-4812.
- Tóth J (1966) **"MAPPING AND INTERPRETATION OF FIELD PHENOMENA FOR GROUNDWATER RECONNAISSANCE IN A PRAIRIE ENVIRONMENT, ALBERTA, CANADA"**. International Association of Scientific Hydrology Bulletin 16(2):20-68.
- Tóth J (1971) **"GROUNDWATER DISCHARGE: A COMMON GENERATOR OF DICERSE GEOLOGIC AND MORPHOLOGIC PHENOMENA"**. International Association of Scientific Hydrology Bulletin 16(1-3):7-24.
- Tóth J (1972) **"PROPERTIES AND MANIFESTATIONS OF REGIONAL GROUNDWATER MOVEMENT"**. Proc 24th Int Geol Congress Section 11, Montreal. Pp. 153-163.
- Tóth J, Millar RF (1983) **"POSSIBLE EFFECTS OF EROSIONAL CHANGES OF THE TOPOGRAPHIC RELIEF ON PORE PRESSURES AT DEPTH"**. Water Resources Res 19 (6): 1585-1597.
- Vega-Gleason, 2002. Toda su información se puede consultar en <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/448/7.pdf>
- Vázquez-Heredia A.B., (2013) **"MODELADO TRIDIMENSIONAL DE TRANSPORTE DE SOLUTOS EN ACUIFEROS Y SISTEMAS GEOTERMICOS"**. Tesis de licenciatura. UMSNH.
- Verduzco Cedeño L.A., (2010). **"EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN AL ACUÍFERO EN LA REGIÓN MORELIA-CAPULA, CAUSADA POR EL IMPACTO DE LA INFLTRACIÓN DE LIXIVIADOS GENERADOS POR EL BASURERO MUNICIPAL DE LA CIUDAD DE MORELIA"**. 20 sept. Tesis de maestría.
- Villaseñor-Reyes, C. I., 2014. **"CARACTERIZACIÓN GEOMECANICA Y ESTUDIO DEL DESLIZAMIENTO EL CAMPESTRE, MORELIA, MICH."**. Tesis de Maestría. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Williams RE., (1970). **"GROUNDWATER FLOWS SYSTEMS AND ACCUMULATION OF EVAPORATE MINERALS"**. AAPG Bulletin 54 (7):1290-1295.
- Wallick E I., (1981). **"CHEMICAL EVOLUTION OF GROUNDWATER IN A DRAINAGE BASIN OF HOLOCENE AGE, EAST CENTRAL ALBERTA, CANADA"**. Journal of Hydrology 54:245-283.

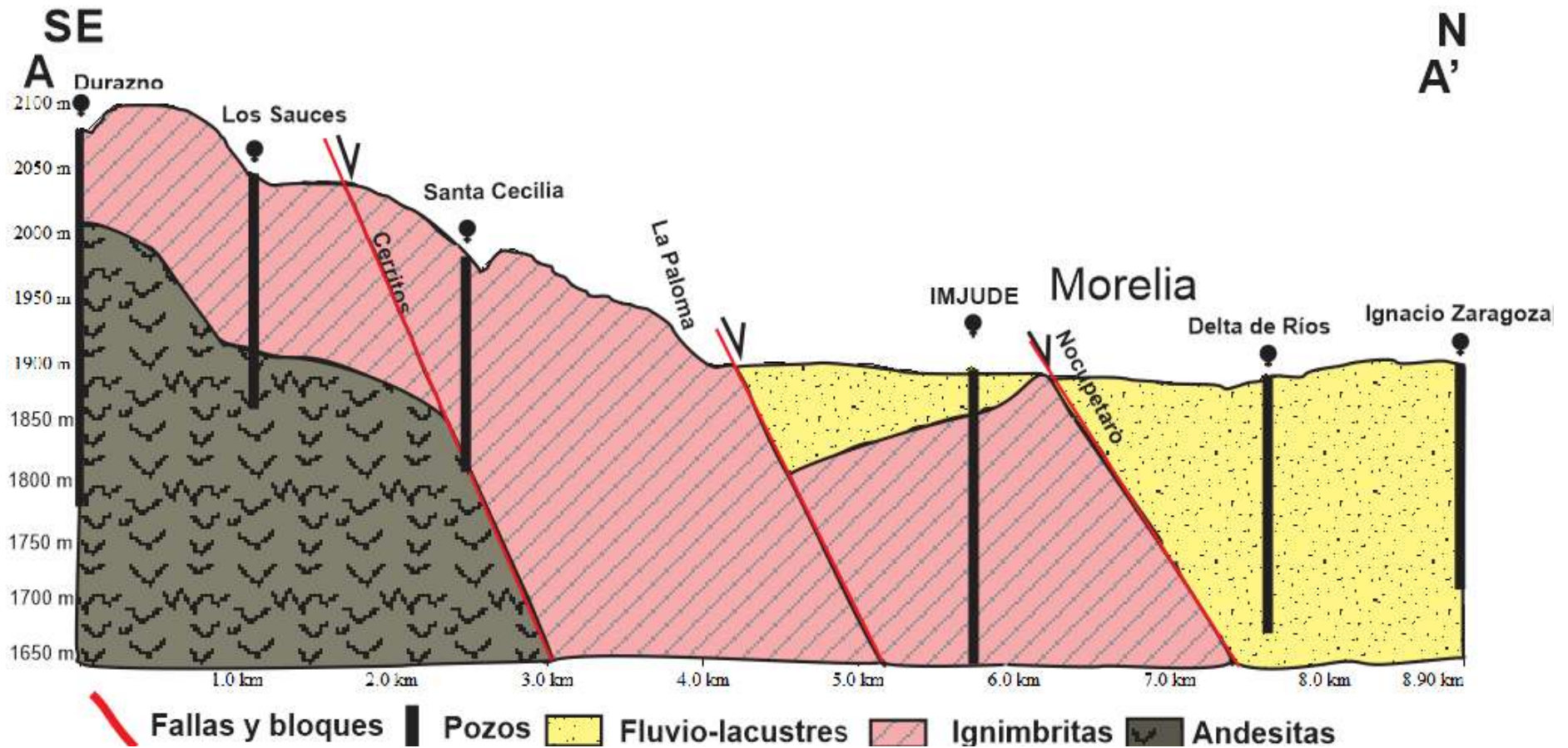
Zacarías-Eslava LE, Cornejo-Tenorio G, Cortés-Flores J, González Castañeda N, Ibarra-Manríquez G (2011) "**COMPOSICIÓN, ESTRUCTURA Y DIVERSIDAD DEL CERRO EL ÁGUILA, MICHOACÁN, MÉXICO**". Rev. Mex. Biodivers. 82

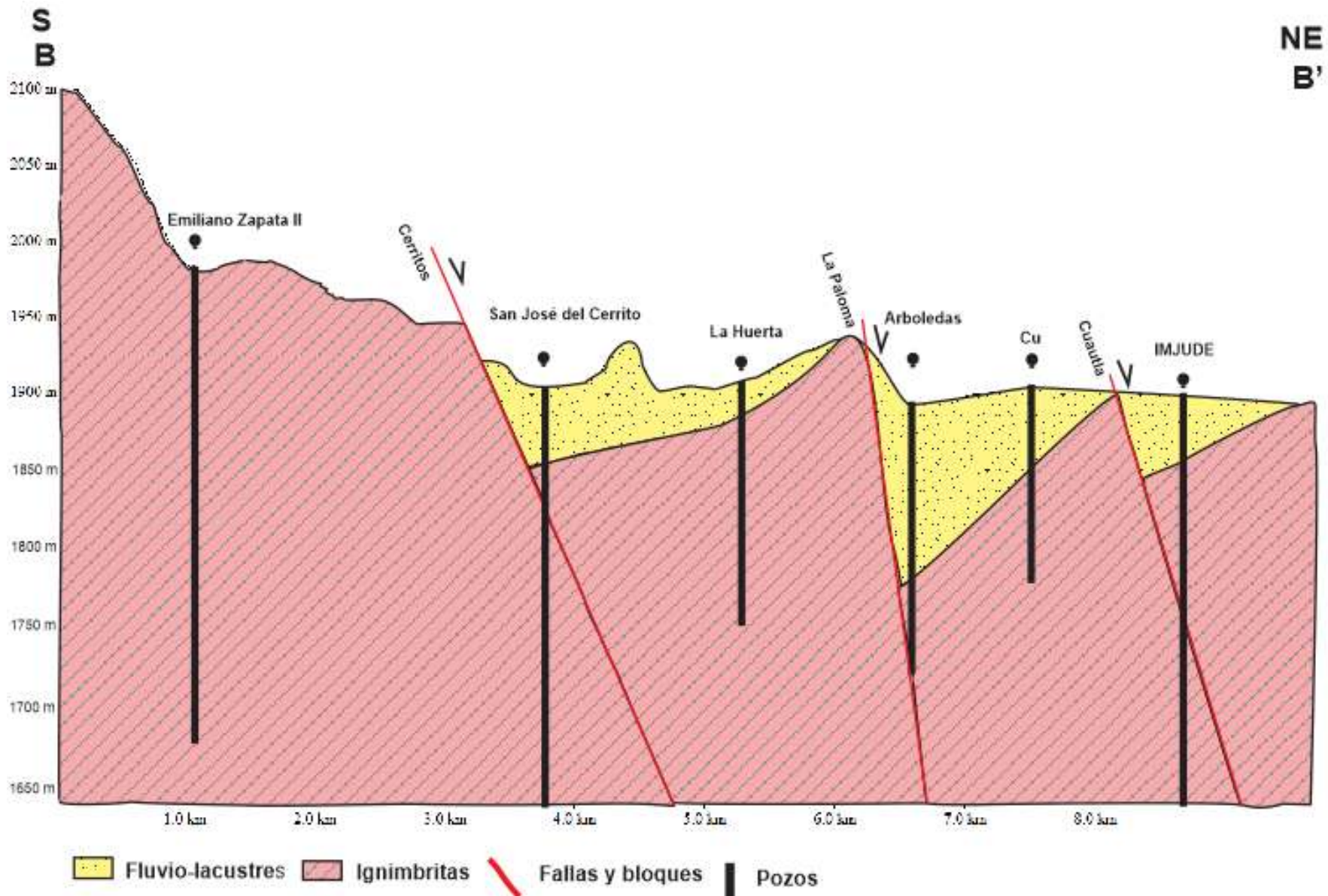
Índice de Figuras

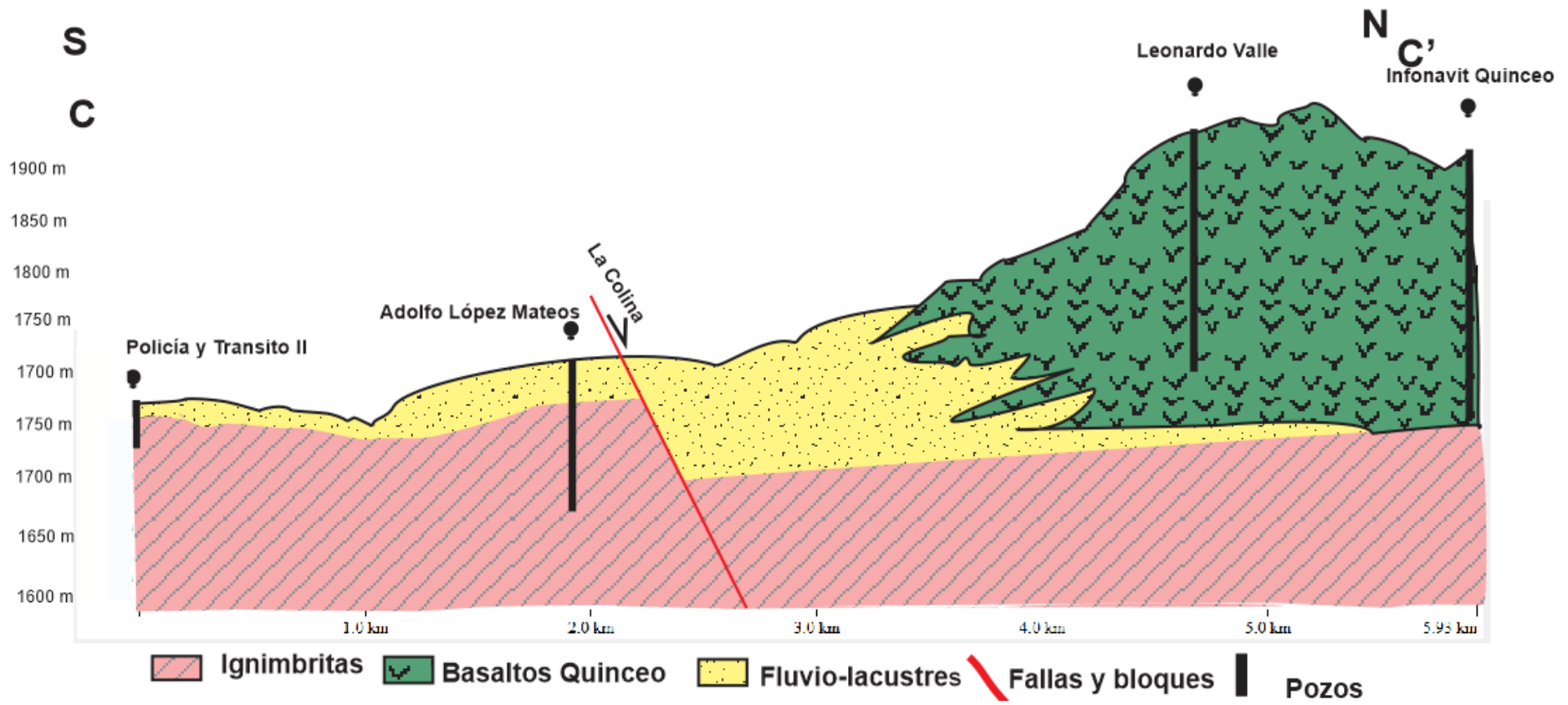
<u>II.1. Morelia</u>	¡Error! Marcador no definido.
<u>Figura 2.1. Ubicación del estado de Michoacán en la República Mexicana. Fuente Amador-García et al., 2011.</u>	6
<u>Figura 2.2 Municipios que colindan con el municipio de Morelia. Fuente INEGI 2005.</u>	7
<u>Figura 2.3. Carta topográfica de Morelia, obtenida de INEGI, 2013.</u>	8
<u>Figura 2.4. Mapa de pozos y fallas. Fuente Garduño-Monroy et. al., 2011.</u>	9
<u>II.1.1 Demografía de Morelia</u>	¡Error! Marcador no definido.
<u>Figura 2.5. Crecimiento de la ciudad de Morelia. Fuente INEGI 2013.</u>	10
<u>Figura 2.6. Estimación de crecimiento demográfico de Morelia. Fuente Hernández-Guerrero, 2011.</u>	10
<u>II.1.2 Geomorfología y geología de Morelia</u>	¡Error! Marcador no definido.
<u>Figura 2.7 Mapa geológico cuenca de Cuitzeo. Fuente López et al., 2010.</u>	13
<u>Figura 2.8. Perfil este-oeste, por todo el centro de la ciudad</u>	14
<u>Figura 2.9. Perfil SO-NE de la ciudad de Morelia en Global mapper.</u>	14
<u>Figura 2.10. Perfil NO-SE de la ciudad de Morelia, obtenida de Global mapper.</u>	14
<u>Figura 2.11. Segmento de la carta geológica de la región de Morelia donde se aprecian las fallas geológicas cartografiadas desde 1979. Fuente INEGI, 1979; Garduño-Monroy et. al., 2011</u>	15
<u>Figura 2.12. Mapa geológico de la zona de estudio. Fuente Gómez-Vasconcelos, 2012.</u>	17
<u>Figura 2.13. A la izquierda se presenta la columna estratigráfica esquemática que muestra la relación de la litología de la zona de Morelia con otros depósitos de la región. A la derecha se presenta la columna estratigráfica compuesta de los depósitos de la Caldera de Atécuaro. Modificado de Gómez-Vasconcelos, 2012. Fuente Villaseñor-Reyes, 2014.</u>	20
<u>II.1.3. Geología Estructural</u>	¡Error! Marcador no definido.
<u>Figura 2.14 Esquemas de la geometría en semigraben del subsuelo del lago de Cuitzeo. Fuente Garduño-Monroy e Israde-Alcántara, 2010.</u> ..	¡Error! Marcador no definido.
<u>Figura. 2.16. Foto satelital de la ciudad de Morelia (Google Earth). Se observan las dos fallas principales, al sur La Paloma y al norte la falla Tarimbaro, ambas E-O y afectando al vulcanismo monogenético de El Quinceo y El Aguila. Dentro de la Ciudad de Morelia las fallas tienen direcciones NE-SO, como las fallas de La Colina y la Central Camionera. Fuente Garduño-Monroy et. al., 2011.</u>	20

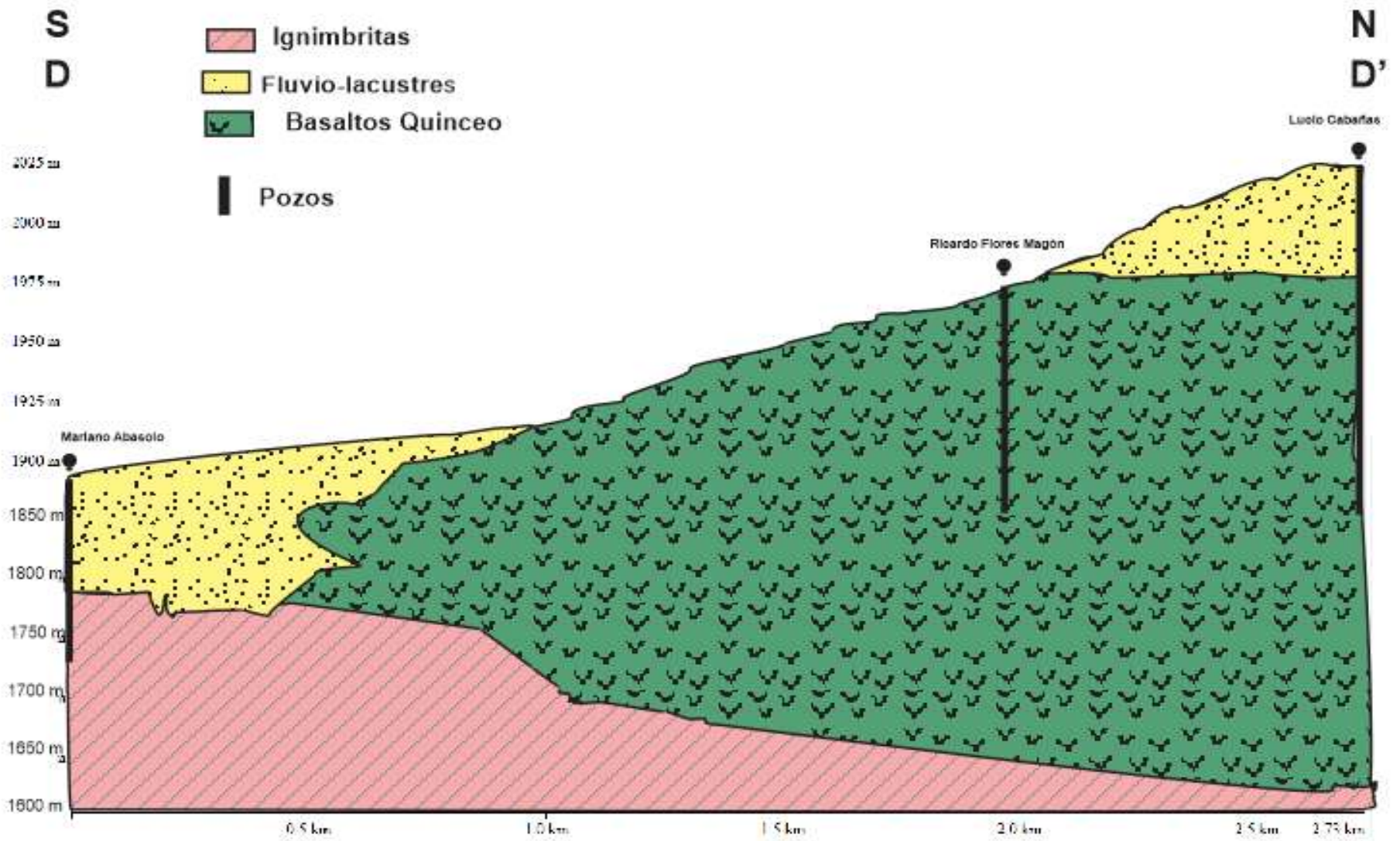
ANEXO A

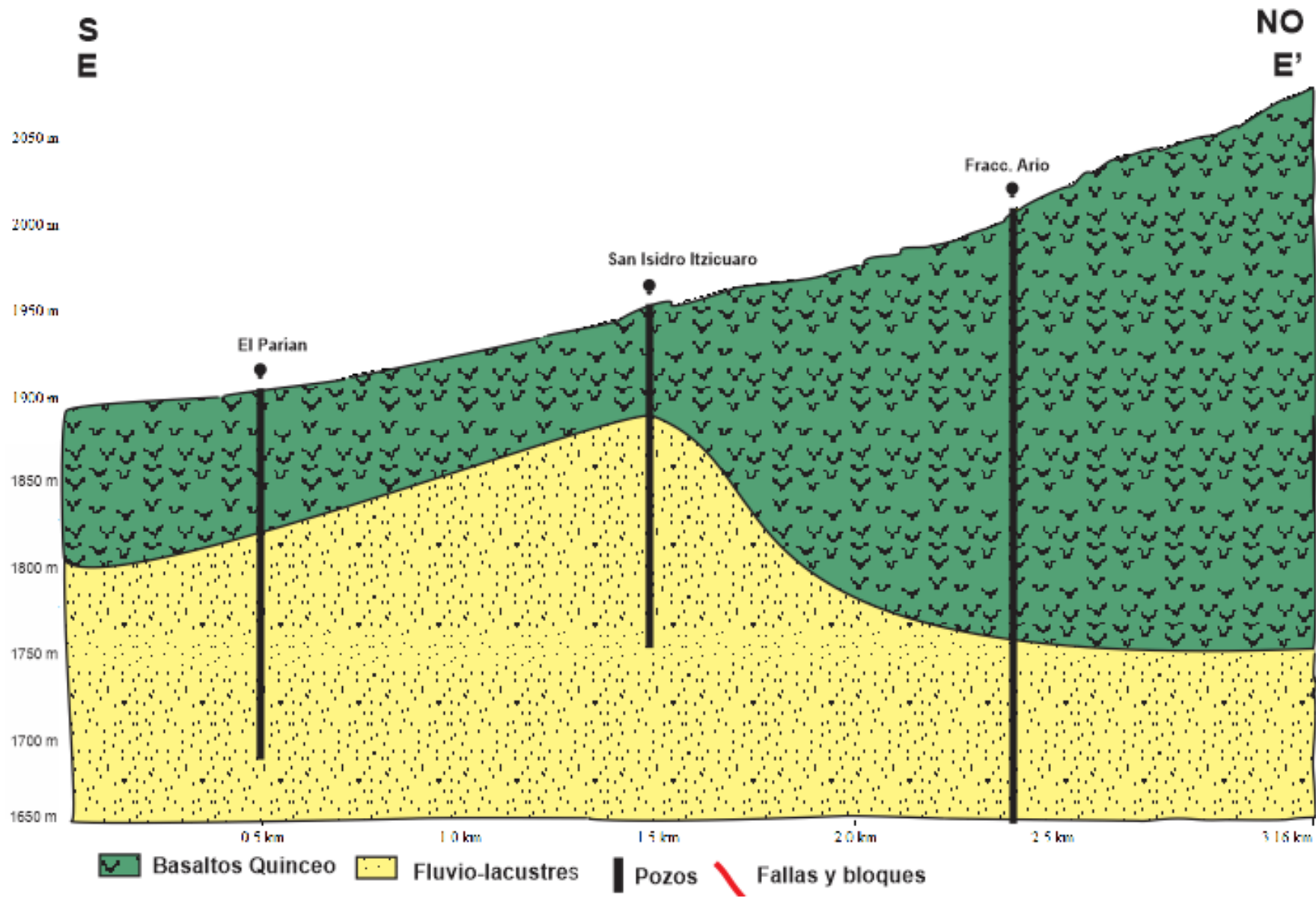
PERFILES DE ZONA DE ESTUDIO A TRAVÉS DE BASE DE DATOS PROPORCIONADA POR OOPAS Y AVILA-OLIVERA (2013)

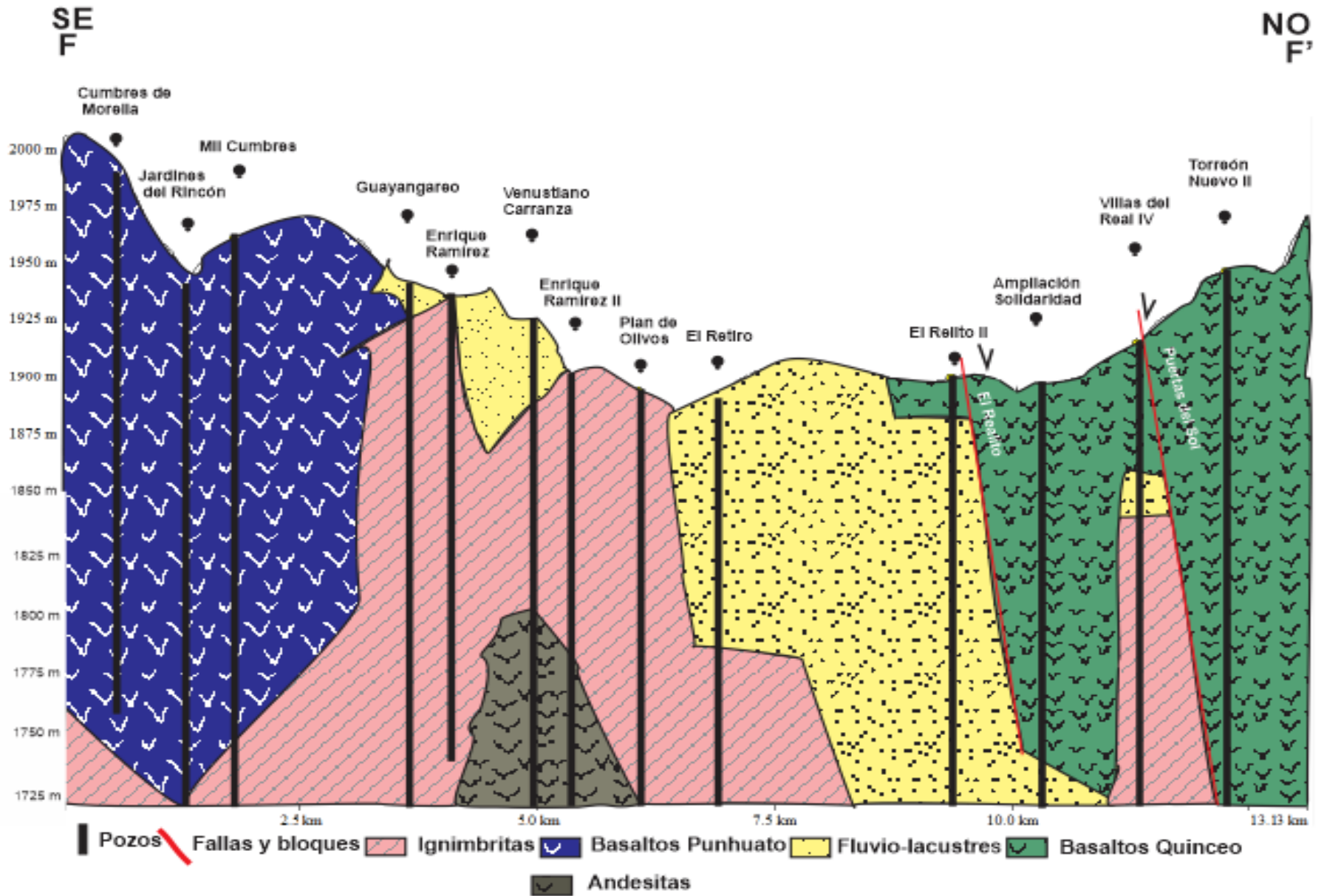


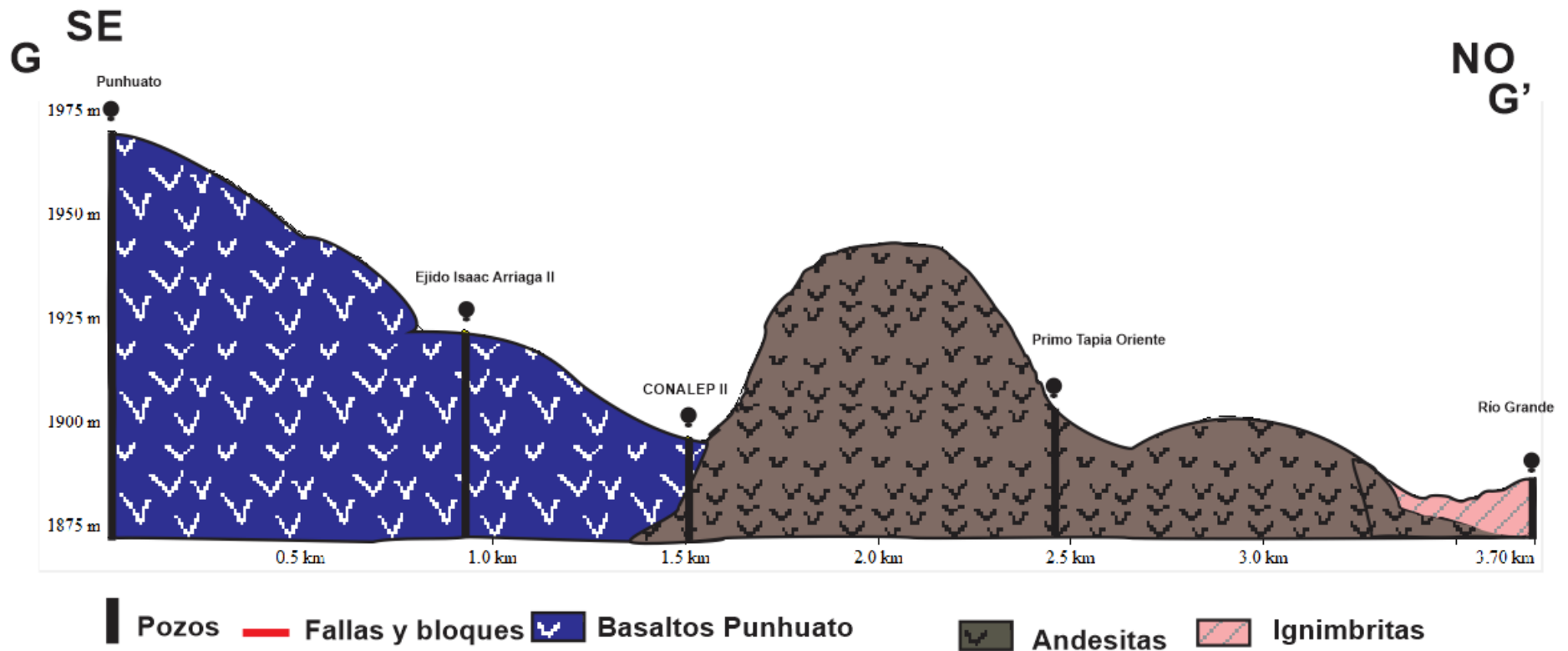












ANEXO B

Ecuación para Balance iónico:

$$\% \text{ Electroneutralidad} = ((\Sigma \text{ Cationes} - \Sigma \text{ Aniones}) / (\Sigma \text{ Cationes} + \Sigma \text{ Aniones})) \times 100$$

Ley de Darcy

$$Q = KA (\Delta h/l) \text{ [m}^3/\text{s]}$$

Donde:

Q= flujo

A= área de la sección transversal del flujo

Δh = pérdida de carga hidráulica entre dos puntos

L= longitud de la muestra

K =conductividad hidráulica

ANEXO C

Valores estimados de la porosidad (%), según Sanders (1998)

	total	eficaz
Arcillas	40 a 60	0 a 5
Limos	35 a 50	3 a 19
Arenas finas, arenas limosas	20 a 50	10 a 28
Arena gruesa o bien clasificada	21 a 50	22 a 35
Grava	25 a 40	13 a 26
Shale intacta	1 a 10	0,5 a 5
Shale fraturada/alterada	30 a 50	
Arenisca	5 a 35	0,5 a 10
Calizas, dolomías NO carstificadas	0,1 a 25	0,1 a 5
Calizas, dolomías carstificadas	5 a 50	5 a 40
Rocas ígneas y metamórficas sin fracturar	0,01 a 1	0,0005
Rocas ígneas y metamórficas fraturadas	1 a 10	0,00005 a 0,01

Valores estimados de la conductividad hidráulica (metros /día)

		Domenico	Smith & W	Freeze	Fetter	Sanders
Sedimentos	Grava	25 a 2500	100 a 10 ⁵	100 a 10 ⁵	10 a 1000	
	Grava con arena					
	Arena gruesa	0,1 a 500	0,01 a 1000	1 a 1000	1 a 100	1 a 100
	Arena media	0,1 a 50				
	Arena fina	0,02 a 20			0,01 a 1	0,01 a 1
	Arena arcillosa			0,01 a 100	0,001 a 0,1	
	Silt, loess	10 ⁻⁴ a 2	10 ⁻⁴ a 1	10 ⁻⁴ a 1	0,001 a 0,1	10 ⁻⁴ a 1
	Arcilla	10 ⁻⁵ a 4*10 ⁻⁴	10 ⁻⁷ a 10 ⁻³		10 ⁻⁵ a 10 ⁻³	10 ⁻⁶ a 10 ⁻³
Arcilla marina inalterada	10 ⁻⁷ a 2*10 ⁻⁴		10 ⁻¹¹ a 10 ⁻⁷			
Rocas Sedimentarias	Calizas carstificadas	0,1 a 2000	0,05 a 0,5	0,1 a 1000		0,1 a 10 ⁷
	Calizas, dolomías	10 ⁻⁴ a 0,5	0,001 a 0,5	10 ⁻⁴ a 1		10 ⁻⁴ a 1
	Areniscas	3*10 ⁻⁵ a 0,5	10 ⁻⁵ a 1	10 ⁻⁵ a 1		
	Argilitas (siltstone)	10 ⁻⁶ a 0,001				
	Pizarras sedimentarias (Shale) intactas	10 ⁻⁸ a 2*10 ⁻⁴	10 ⁻⁸ a 10 ⁻⁴	10 ⁻⁴ a 10 ⁻⁸		10 ⁻⁴ a 10 ⁻⁸
	Pizarras sed.(Shale) fracturadas/alteradas		10 ⁻⁴ a 1			
Rocas cristalinas	Basalto inalterado, sin fracturar		10 ⁻⁸ a 10 ⁻³			10 ⁻⁶ a 10 ⁻³
	Basalto fracturado/vesicular cuaternario		10 a 1000			0,1 a 10 ⁶
	Escorias basálticas		0,001 a 1000			
	Basalto permeable	0,03 a 2000		0,02 a 1000		
	Rocas igneas y metamórficas sin fracturar	10 ⁻⁹ a 10 ⁻⁶	10 ⁻⁹ a 10 ⁻⁶	10 ⁻⁹ a 10 ⁻⁵		10 ⁻⁶ a 10 ⁻⁶
	Rocas igneas y metamórficas fracturadas	0,001 a 25	10 ⁻⁵ a 1	0,0005 a 20		10 ⁻⁵ a 1
	Granito alterado	0,3 a 5				
Gabro alterado	0,05 a 0,3					

Las conductividades hidráulicas están expresadas en m/día.

Estas tablas fueron obtenidas de Sánchez, F. J. (2011).- Medidas puntuales de permeabilidad. Universidad de Salamanca, 13 pp. (En: <http://hidrologia.usal.es>)

ANEXO D

sitio	clave	Tabla 6.1 Análisis fisico-químicos in situ						
		Temperatura(°C)	pH	Conductividad (µS/cm)	Salinidad (%)	TDS (mg/L)	Turbidez (NTU)	OD(mg/l)
MANANTIAL EL RELICARIO	M-S1	20.5	7.55	456	0.2	243	6.48	1.2
		20.1	7.68	284	0.1	151.4	0.73	7
		21.3	8	276	0.1	143.4	3.86	10
		22.2	7.96	353	0.1	180.7	2.04	8
MANANTIAL COINTZIO	M-S2	31.5	6.18	456	0.2	243	0.14	2
		28.1	6.6	577	0.2	263	0.14	3
		30.6	6.3	597	0.2	259	0.44	2
		30.7	6	600	0.2	260	0.23	2
MANANTIAL MINTZITA	M-S3	23	7.26	184.7	0.09	87.5	5	8.5
		20.3	7.46	174.9	0.1	92.3	5.12	5
		20.5	7.67	165.4	0	87	5.32	4
		20.9	7.85	171	0	89.1	5.58	4
TOREO	P-S4	20.3	6.6	456	0.2	243	0.09	11
		29.2	7.02	783	0.3	351	0.2	3
		29.8	6.7	795	0.3	352	0.95	5
		29	6.31	790	0.3	356	1.46	3
BULEVART	P-S5	20.3	7.63	456	0.2	243	0.8	0.14
		25.8	7.72	580	0.2	277	0.5	5
		26.6	7.12	598	0.2	281	0.36	8
		27	7.01	600	0.2	280	0.62	17
COSMOS	P-S6	27.5	7.2	539	0.2	248	0.9	0.08
		26.7	6.71	529	0.2	247	0.3	3
		25.5	6.5	519	0.2	249	0.07	3
		26.4	7.03	526	0.2	248	0.18	6
6 DE JULIO	P-S7	24.9	7.89	601	0.3	293	0.5	0.14
		23.4	7.09	596	0.3	300	0.1	9
		24.4	7.33	592	0.3	291	0.24	8
		25.2	7.35	603	0.3	292	0.23	8

sitio	clave	Temperatura(°C)	pH	Conductividad (µS/cm)	Salinidad (%)	TDS (mg/L)	Turbidez (NTU)	OD(mg/l)
CU	P-S8	25.1	7.2	579	0.2	280	0.3	0.04
		24.7	6.55	598	0.3	292	0.1	4
		25.1	7	587	0.2	284	0.14	3
		26.8	6.65	539	0.2	277	0.19	3
ADOLFO LOPEZ MATEOS	P-S9	26.6	7.7	648	0.3	305	0.2	0.18
		24.8	7.02	640	3	312	0.4	7
		25.7	7.1	628	0.3	301	0.19	10
		25.6	7.56	595	0.2	285	0.11	9
RINCONADA DEL VALLE	P-S10	25.9	7.91	524	0.2	249	0.2	0.1
		26.1	7	518	0.2	245	0.1	5
		26.4	7.24	528	0.2	249	0.1	3
		27.1	7	538	0.2	250	0.16	5
VILLAS DEL REAL 4	P-S11	31.4	7.94	335	0.1	142.2	0.3	0.08
		32.7	7.2	338	0.1	140.6	0.1	5
		30.2	6.7	325	0.1	140.9	0.13	5
		32.3	8	334	0.1	139.4	0.29	6
SAN JUANITO ITZICUARO	P-S12	28	7.12	885	0.4	408	0.4	0.06
		25.8	6.81	838	0.4	403	0.5	3
		31.2	7	947	0.4	410	0.35	4
		29.1	6.74	919	0.4	414	0.07	6
MARIANO ABASOLO	P-S13	28	7.91	885	0.4	408	0.2	0.1
		23.8	7.59	420	0.2	208	0.2	5
		24.6	6.9	430	0.2	210	0.11	5
		22.7	6.81	417	0.2	211	0.12	8
MARIANO ESCOBEDO II	P-S14	28.4	7.02	1135	0.5	521	0.7	0.12
		28.8	6.8	1149	0.5	524	0.3	7
		28.9	7.1	1167	0.5	532	0.42	10
		28.1	7.57	1153	0.5	533	0.23	6

LA SOLEDAD I	P-S15	29.3	7.93	1374	0.6	622	0.2	0.22
		29.4	7.11	1366	0.6	618	0.3	5
		28.1	7.1	1344	0.6	624	0.32	6
		30.3	8.05	1398	0.6	623	0.45	5
sitio	clave	Temperatura(°C)	pH	Conductividad (µS/cm)	Salinidad (%)	TDS (mg/L)	Turbidez (NTU)	OD(mg/l)
AMPLIACIÓN TORREON NUEVO	P-S16	22.3	7.13	505	0.2	258	0.5	0.2
		22.2	7.38	501	0.2	257	0.19	12
		23.4	7	525	0.2	263	0.28	11
		23	8.03	524	0.2	264	0.01	8
IGNACIO ZARAGOZA	P-S17	31.2	7.52	1672	0.7	737	0.2	0.14
		33.5	7.07	1761	0.7	743	0.1	3
		35.6	7	1861		756	0.43	3
		33.4	7.22	1740	0.7	735	0.07	4
PRADOS VERDES GALEANA	P-S18	24.9	6.45	763	0.3	373	1.8	0.1
		23.6	7	749	0.3	377	1	4
		24.8	7.02	767	0.3	376	0.66	4
		24.5	7.69	763	0.3	376	0.69	4
REALITO II	P-S19	25.9	7.48	524	0.2	249	0.3	0.16
		26.6	7	988	0.4	469	0.1	7
		26.7	7	101.6	0.5	481	0.27	8
		24.9	7.85	985	0.5	485	0.18	8

sitio	clave	Tabla 6.2 Análisis de laboratorio									
		Alcalinidad(mg/L)	Dureza total(mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/L)	Na (mg/L)	CO3 (mg/L)	HCO3 (mg/L)	CL (mg/L)	SO4 (mg/L)	K(mg/L)
MANANTIAL EL RELICARIO	M-S1	171	205.2	17.71		41.3506622	<ld	171	30		1.57975986
		142	94.3	22.14	9.459	35.307	4	142	19.85	19.91	17.5883114
		128	57.4	13.94	5.472	43.769	<ld	128	17.88	18.85	4.62439344
		154	92.95	22.14	8.9619	50.278	<ld	154	28.42	26.96	4.54207832
MANANTIAL COINTZIO	M-S2	376.2	188.1	20.69			<ld	376.2	25		1.25880243
		75	63.55	16.4	5.476	19.081	<ld	75	16.4	17.45	17.5883114
		196	118.9	31.16	9.959	75.049	<ld	196	30.36	37.45	4.51004918
		206	159.9	42.64	12.9382	48.852	<ld	206	33.91	39.36	7.18871851
MANANTIAL MINTZITA	M-S3	119.7	102.6	8.51		19.9638069	<ld	119.7	60		1.13099953
		272	151.7	41	11.948	71.7	<ld	272	30.84	32.54	13.4051411
		64	65.6	18.04	4.9734	10.787	<ld	64	13.94	14.76	4.26988525
		70	51.5	14.76	5.9705	17.043	<ld	70	15.45	16.11	0.17836885
TOREO	P-S4	393.3	136.8	14.71		14.8227359	<ld	393.3	90		2.05184781
		276	131.2	32.8	11.948	112.64	<ld	276	59.56	56.27	8.41398361
		284	127.1	24.6	15.93	120.75	<ld	284	60.55	58.35	13.950772
		276	135.3	26.24	16.9267	111.918	<ld	276	60.77	56.71	9.0309906
BULEVART	P-S5	324.9	102.6	5.17		181.187793	<ld	324.9	50		0.66274754
		232	90.2	26.24	5.974	90.314	16	216	28.78	33.3	8.68918852
		270	95.85	17.94	12.388	92.0989	<ld	270	24.84	30.26	11.1013661
		284	159.9	31.16	82	72.082	4	280	26.91	31.32	3.34958017
COSMOS	P-S6	273.6	188.1	15.33		78.3663733	<ld	273.6	60		1.26854826
		224	127.1	36.08	8.961	61.158	<ld	224	27.73	27.22	4.36504918
		238	139.9	21.8	20.7372	64.5067	<ld	238	31.68	30.87	11.5459542
		248	144	24.68	82.3	66.7598	<ld	248	32.85	31.53	6.73480372
6 DE JULIO	P-S7	307.8	188.1	14.95		131.627869	<ld	307.8	60		1.257477
		262	147.6	39.36	11.948	72.896	<ld	262	33.79	34.4	15.1026594
		274	127.1	27.88	13.935	81.42	<ld	274	23.99	33.29	10.9902191
		292	131.2	31.16	53.3	92.644	<ld	292	32.4	36.9	3.55680214

sitio	clave	Alcalinidad(mg/L)	Dureza total(mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/L)	Na (mg/L)	CO3 (mg/L)	HCO3 (mg/L)	CL (mg/L)	SO4 (mg/L)	K(mg/L)
CU	P-S8	273.6	188.1	18.62		76.3099449	<ld	273.6	120		9.58975518
		238	143.5	47.56	5.974	72.926	<ld	238	42.66	36.94	5.00463934
		248	151.7	27.88	19.918	71.024	<ld	248	38.76	37.62	12.0612723
		258	151.7	29.52	77.9	76.314	<ld	258	40.22	39.04	6.57781738
ADOLFO LOPEZ MATEOS	P-S9	273.6	171	19.28		158.155795	<ld	273.6	90		0.88262903
		250	131.2	39.36	7.965	92.849	<ld	250	48.5	47.28	12.5462776
		256	102.5	26.24	8.962	106.053	<ld	256	49.71	42.97	14.0012933
		240	98.4	27.88	6.9676	98.049	<ld	240	46.51	40.21	7.94733632
RINCONADA DEL VALLE	P-S10	273.6	273.6	11.56		65.6165172	<ld	273.6	90		0.66246686
		190	102.5	32.8	4.978	67.633	<ld	190	36.72	36.64	21.5491876
		232	84.05	15.58	10.956	88.55	<ld	232	34.78	28.96	46.1429957
		228	168.1	29.52	94.3	48.093	<ld	228	34.27	28.53	3.04996053
VILLAS DEL REAL 4	P-S11	153.9	51.3	6.64			<ld	153.9	22.5		0.64185249
		136	51.25	14.76	3.484	42.904	4	132	11.4	9.11	12.121898
		142	55.35	15.58	3.988	44.459	12	130	10.08	7.27	3.00080738
		132	51.25	13.12	4.4748	43.608	16	116	7.45	9.45	0.12406557
SAN JUANITO ITZICUARO	P-S12	324.4	153.9	20.41		116.821584	<ld	324.4	150		1.09293622
		350	127.1	41	5.974	143.03	<ld	350	65.04	47.28	12.819093
		360	151.7	39.36	7.9648	147.591	<ld	360	67.3	48.87	14.7995312
		356	127.1	41	5.971	147.637	<ld	356	65.61	48.78	8.14319546
MARIANO ABASOLO	P-S13	239.4	171	12.6			<ld	239.4	60		1.03616092
		214	118.9	27.88	11.948	50.218	<ld	214	18.31	19.49	18.5381133
		218	116.85	29.52	10.4576	52.532	<ld	218	14.94	23.94	16.294964
		216	120.95	28.7	49.2	49.726	<ld	216	14.85	23.74	13.1972586
MARIANO ESCOBEDO II	P-S14	410.4	136.8	28.31		88.8541581	<ld	410.4	210		1.75948854
		360	268.1	84.48	13.818	126.951	<ld	360	93.76	95.13	11.6975184
		432	256.25	65.6	22.3987	160.954	<ld	432	96.57	101.71	22.6000323
		424	266.5	65.6	24.8915	152.329	<ld	424	81.96	105.21	15.8651293

LA SOLEDAD I	P-S15	513	153.9	17.08		260	<ld	513	150		1.50464681
		476	272.1	90.64	11.049	174.324	<ld	476	91.65	107.52	10.8386549
		450	254.75	49.18	32.0063	166.9547	<ld	450	86.72	104.32	18.7199903
		460	225.5	57.4	19.918	185.426	<ld	460	106.75	80.92	10.3960242
sitio	clave	Alcalinidad(mg/L)	Dureza total(mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/L)	Na (mg/L)	CO3 (mg/L)	HCO3 (mg/L)	CL (mg/L)	SO4 (mg/L)	K(mg/L)
AMPLIACIÓN TORREON NUEVO	P-S16	256.5	188.1	20.71		147.256725	<ld	256.5	90		1.14194605
		250	164	39.36	15.93	52.023	<ld	250	27.68	25.59	15.2239108
		252	123	22.96	15.9296	75.026	<ld	252	28.65	20.26	12.8797187
		242	159.9	36.08	16.9267	53.628	8	134	27.45	25.23	8.67874315
IGNACIO ZARAGOZA	P-S17	513	136.8	20.87		39.4998766	<ld	513	90		1.72590051
		600	315.25	77.3	29.627	202.365	<ld	600	98.69	98.64	14.354943
		710	356.25	88	33.034	247.443	<ld	710	117.34	117.11	19.7203136
		580	296	69.4	29.7482	201.103	<ld	580	83.14	107.2	8.77831735
PRADOS VERDES GALEANA	P-S18	342	136.8	16.6		21.6089496	<ld	342	150		13.5453142
		278	218.9	71.36	9.835	82.182	<ld	278	64.2	65.59	19.0837442
		294	181.2	58.48	8.3982	111.6719	<ld	294	70.4	71.01	14.9611996
		282	221.1	49.52	23.6185	85.3691	<ld	282	71.64	60.66	8.12196493
REALITO II	P-S19	376.2	222.3	33.41		79.1889446	<ld	376.2	100		1.0077031
		384	198.1	60.48	11.389	129.335	<ld	384	64.05	59.54	23.7317113
		410	172.2	45.92	13.935	157.734	<ld	410	68.58	63.81	24.4693234
		390	176.3	44.28	15.9296	143.428	<ld	390	60.72	63.52	17.6233763

<ld= FUERA DEL LIMITE DE DETECCIÓN

sitio	clave	Tabla 6.4 Análisis de coliformes	
		COLI FEC (UFC/100ml)	Organismos coliformes totales (NMP/100ml)
MANANTIAL EL RELICARIO	M-S1	1	>8.0
		0	>8
		0	>8
		0	>8.0
MANANTIAL COINTZIO	M-S2	2	>8.0
		3	4.6
		0	>8
		0	>8
MANANTIAL MINTZITA	M-S3	2	>8.0
		1	>8
		0	>8
		0	>8.0
TOREO	P-S4	0	NP
		2	NP
		2	NP
BULEVART	P-S5	0	NP
		4	NP
		0	NP
COSMOS	P-S6	0	2.6
		0	1.1
		0	8
6 DE JULIO	P-S7	0	NP
		0	1.1
		0	NP
		0	NP

NP= NO PRESENTA

sitio	clave	COLI FEC (UFC/100ml)	Organismos coliformes totales (NMP/100ml)
CU	P-S8	0 1 6	2.6 1.1 NP
ADOLFO LOPEZ MATEOS	P-S9	0 5 0	1.1 4.6 NP
RINCONADA DEL VALLE	P-S10	0 0 0	1.1 1.1 8
VILLAS DEL REAL 4	P-S11	0 0 0	NP 2.6 NP >8
SAN JUANITO ITZICUARO	P-S12	0 0 0	>8.0 NP 1.1
MARIANO ABASOLO	P-S13	2 0 1	8 NP 4.6
MARIANO ESCOBEDO II	P-S14	0 0 0	NP NP >8
LA SOLEDAD I	P-S15	0 0 0	>8.0 4.6 NP 4.6

sitio	clave	COLI FEC (UFC/100ml)	Organismos coliformes totales (NMP/100ml)
AMPLIACIÓN TORREON NUEVO	P-S16	0	NP
		0	NP
		0	NP
IGNACIO ZARAGOZA	P-S17	0	>8.0
		5	8
		6	>8.0
PRADOS VERDES GALEANA	P-S18	0	NP
		0	NP
		12	1.1
REALITO II	P-S19	0	1.1
		9	8
		16	NP

sitio	clave	Tabla 6.5 Análisis de ICP-masas																	
		Be	Al	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Mo	Cd	Sb	Tl	Pb
MANANTIAL EL RELICARIO	M-S1	<L.D	99.7310217	45.1892528	19.6697555	0.61664003	4.04227479	70.3279437	0.21064853	1.96270071	2.46676143	1.64298219	1.26057776	<L.D	2.2972167	2.10172464	0.09092579	0.01274697	0.26231419
		<L.D	145.01184	38.8283933	25.9638021	1.28637888	16.0944472	122.874972	0.32901719	2.17251575	2.35041819	3.38251762	0.8196316	<L.D	0.71004453	0.084253	0.0731441	0.00606649	0.7359892
		<L.D	34.6679928	31.250477	25.1765599	1.09596451	4.63187903	34.5223508	0.09021439	0.84972361	1.8014154	3.1131019	0.78501669	<L.D	0.95126175	0.14595942	0.04475983	0.00606649	0.4073824
		0.04908645	69.4799659	45.2181656	23.8210353	2.73720653	7.76772434	41.1402314	0.12842284	0.94356601	4.89706198	21.5486463	1.0841884	<L.D	1.56110836	0.02017325	0.09388646	0.01577287	0.20931803
MANANTIAL COINTZIO	M-S2	0.04073781	<L.D	48.6799425	7.1886121	0.07436873	0.3919608	1.48604674	0.00251805	0.40061475	0.2205006	1.94494284	4.16534653	<L.D	1.86958686	1.85085785	0.03096821	0.00201796	0.03837155
		0.02927108	<L.D.	43.1949913	6.34762276	0.22722808	0.48778566	<L.D.	<L.D.	<L.D.	<L.D.	<L.D.	3.59969364	<L.D.	1.70937345	0.09498083	0.01965441	0.00580945	<L.D.
		0.05997001	<L.D.	43.3162703	6.55572876	0.13424137	1.91725768	<L.D.	0.00272647	0.27647008	<L.D.	<L.D.	3.83797124	<L.D.	1.75648868	0.04618334	0.04340349	0.00193648	<L.D.
		0.09281074	<L.D.	43.446212	6.45206547	0.15454129	1.0748621	<L.D.	<L.D.	<L.D.	0.85060819	<L.D.	3.87456387	<L.D.	1.75731526	0.02178459	0.0098272	0.00193648	<L.D.
MNANTIAL MINTZITA	M-S3	<L.D	136.71886	22.3455143	16.8917133	0.91663784	12.6977302	222.301548	0.15611885	1.74795082	2.76434531	8.43133234	0.70990099	<L.D	0.44599303	3.46688393	0.05009564	0.0100898	2.29948526
		0.03436729	<L.D.	<L.D.	<L.D.	<L.D.	<L.D.	<L.D.	<L.D.	<L.D.	<L.D.	<L.D.	<L.D.	<L.D.	0.03949022	<L.D.	<L.D.	<L.D.	<L.D.
		<L.D.	401.029603	17.5585106	15.045746	0.81098477	8.56568482	172.555092	0.12038283	<L.D.	<L.D.	<L.D.	0.36804871	<L.D.	0.35630946	0.04099506	0.09984096	0.0029703	0.47402005
		<L.D.	189.188233	18.0416667	16.7772552	0.71658442	6.46184774	103.851102	0.061313	<L.D.	7.18708578	<L.D.	0.45670278	<L.D.	0.42810985	<L.D.	0.02208871	0.0029703	<L.D.
TOREO	P-S4	0.10619283	<L.D	33.64091	7.36395899	0.09926811	0.53950679	1.15830821	0.00580527	1.55181011	6.23797976	3.23962517	8.29491295	<L.D	4.28031809	1.37971353	0.06153564	0.01699596	0.25551346
		0.03763605	<L.D.	39.1379848	8.43245412	0.10168361	0.59382884	5.45425967	<L.D.	0.76226668	19.1299222	<L.D.	8.13205645	<L.D.	4.7239578	12.2188797	0.05053814	0.01976502	1.18671571
		0.12221342	12.2266249	38.1092178	8.86324352	0.21618817	11.8948105	404.734247	0.03357395	3.37295082	155.710029	43.3828882	8.72277228		4.95072175	0.05655133	0.15028691	0.0201796	16.4707534
		<L.D	1.48942094	36.3943377	8.43903458	0.14384703	13.9134476	192.943608	0.01975775	0.52152058	9.34382971	4.59882164	7.81882952	<L.D	4.72199757	0.01180754	0.04455356	0.02360912	0.47782875
BULEVART	P-S5	<L.D	<L.D	17.6887625	1.95485016	0.06141163	3.50276799	<L.D	0.01161055	2.40251321	24.3858182	9.42590876	9.85604513	<L.D	9.22763419	2.12998149	0.03306392	0.01168472	0.69173225
		<L.D.	<L.D.	18.0679636	2.00895934	0.05384836	5.51830798	20.3082672	0.00808467	4.38856105	36.5700483	<L.D.	8.7704918	<L.D.	9.01498569	8.80608628	0.00648456	0.01035782	1.40107348
		0.03455609	<L.D.	16.100025	1.86078567	0.06390006	3.52616619	2.93554414	<L.D.	<L.D.	15.0943396	<L.D.	8.11221903	<L.D.	8.45681091	0.06138152	<L.D.	0.00753296	0.14991671
		0.03612971	<L.D.	17.2367021	1.80846516	0.01644854	3.43588847	<L.D.	<L.D.	<L.D.	13.2219277	<L.D.	9.06152055	<L.D.	8.9454317	<L.D.	<L.D.	0.00891089	<L.D.
COSMOS	P-S6	<L.D	<L.D	43.1751324	3.98363565	0.08412552	36.6784097	1.36932493	0.0232211	5.17801935	9.89798478	2.75615282	4.77774536	<L.D	2.08747515	0.69083114	0.06337252	0.00424899	0.03788983
		<L.D.	<L.D.	42.1267542	4.44953724	0.06548594	35.059576	6.91174519	0.02417466	3.42460544	3.6236303	<L.D.	4.86123033	<L.D.	1.96610483	9.34886385	0.01791794	0.0021411	0.50225912
		<L.D.	<L.D.	37.5201449	3.99911855	0.08111326	31.1336955	4.45255474	0.01510916	<L.D.	16.3049071	<L.D.	4.20314735	<L.D.	1.79570291	0.03150659	0.04389894	0.00107055	1.26300305
		0.035313	<L.D.	43.0303298	4.60066913	0.06389312	41.0824335	4.80748852	0.01819974	<L.D.	<L.D.	<L.D.	4.76638073	0.18619829	2.07158158	<L.D.	0.01544402	0.00202245	<L.D.
6 DE JULIO	P-S7	0.03436426	<L.D	36.3732997	5.09886374	0.21641734	0.54014863	0.95060427	0.01357159	0.80563584	0.96972924	2.66413964	5.13376137	<L.D	4.85407208	1.93800515	0.02262823	0.0029656	0.083438
		<L.D.	<L.D.	41.3779991	5.82547378	0.17264474	2.95601892	<L.D.	0.00377729	<L.D.	<L.D.	<L.D.	5.45159752	0.20455522	5.35654751	8.1850296	0.01164666	0.00107055	<L.D.
		0.06763201	<L.D.	40.4074242	5.56632878	0.20389939	3.14964079	<L.D.	0.00604367	<L.D.	1.7856122	<L.D.	5.25703386	0.16673829	5.06667901	0.06492267	0.00985486	0.00107055	<L.D.
		0.06676494	<L.D.	35.7818017	4.86822389	0.13990177	0.48274049	<L.D.	<L.D.	<L.D.	<L.D.	<L.D.	4.4873629	<L.D.	4.43415447	<L.D.	<L.D.	0.00321165	<L.D.

sitio	clave	Be	Al	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Mo	Cd	Sb	Tl	Pb	
CU	P-S8	<L.D	<L.D	40.2892724	4.54160095	0.15310844	1.37292401	1.58764958	0.0165865	3.03081679	7.94297182	4.51240861	4.35171676	<L.D	2.07753479	1.92633733	0.04684056	0.00531124	0.35752453	
		<L.D.	<L.D.	43.3654611	4.61096337	0.17643215	2.81889211	<L.D.	0.00151665	<L.D.	3.79769895	<L.D.	4.23252418	<L.D.	2.30096394	8.5044289	0.01458601	0.0040449	0.47801335	
		<L.D.	<L.D.	41.4962986	4.53000779	0.21020234	0.58313633	<L.D.	0.00136323	<L.D.	<L.D.	<L.D.	5.48123564	<L.D.	2.17308646	0.05489718	0.01474081	0.00290473	<L.D.	
		<L.D.	<L.D.	38.8604505	4.25019486	0.14144457	0.54452325	<L.D.	<L.D.	<L.D.	<L.D.	<L.D.	4.14943409	0.18690108	2.05045852	<L.D.	0.01064614	0.00290473	<L.D.	
ADOLFO LOPEZ MATEOS	P-S9	0.03890232	<L.D	41.1776819	7.04751577	0.13291831	28.2103674	1.01488992	0.03068502	2.7715169	2.18078435	5.00051488	6.96430308	<L.D	4.72664016	1.42161161	0.04041146	0.07754408	0.05343437	
		<L.D.	<L.D.	50.4831349	8.19566657	0.08893518	61.5717752	2.63579967	0.04967831	1.51917098	5.76339627	-19.2927141	6.99288959	<L.D.	5.3375	9.84707382	0.03225806	0.09486892	2.09483369	
		0.03960195	<L.D.	45.859127	7.55322169	0.10576076	40.5460146	<L.D.	0.03013275	0.69740933	<L.D.	<L.D.	6.49614853	<L.D.	4.97788462	0.06862072	0.03041475	0.07854738	<L.D.	
0.03770384	<L.D.	40.1838134	7.03737383	0.04268618	36.8350734	<L.D.	0.02680542	1.38213792	<L.D.	<L.D.	6.24870759	<L.D.	4.20925703	<L.D.	0.02261263	0.07576523	<L.D.			
RINCONADA DEL VALLE	P-S10	0.06676485	1.76920847	24.8779389	7.32486356	0.30905915	0.77487765	5.27374483	0.01130966	4.37319364	1.06632187	1.89620478	9.88407348	<L.D	3.65144075	0.09059419	0.06453235	0.01087386	0.28350978	
		0.04264825	<L.D.	32.0406746	8.86460403	0.27962503	0.79708792	15.9918293	<L.D.	0.27564767	<L.D.	<L.D.	<L.D.	11.4102311	<L.D.	4.80673077	9.44123125	0.04423963	0.01020096	0.20018198
		<L.D.	<L.D.	29.1765873	8.122812	0.24276901	0.48534628	5.3139658	<L.D.	1.8880829	<L.D.	<L.D.	<L.D.	10.5332807	<L.D.	4.42884615	0.03823155	0.03502304	0.01020096	<L.D.
		0.0822502	<L.D.	31.0119048	8.79648027	0.23555805	0.46481239	5.58026933	<L.D.	<L.D.	<L.D.	<L.D.	<L.D.	11.4902232	<L.D.	4.58365385	<L.D.	0.03317972	0.01224115	<L.D.
VILLAS DEL REAL 4	P-S11	<L.D	4.18208176	13.2258355	32.4953029	1.45645076	0.65706	15.6541488	0.01206364	2.35458815	14.3808944	17.5455099	9.75298734	<L.D	1.64087835	0.0452971	0.18773047	0.00395413	0.97703212	
		0.07261298	2.61483853	14.4418605	36.6837321	1.69721954	0.64552778	10.2224191	0.01889872	5.57126401	7.55123582	5.64006427	10.1414758	<L.D	1.77820461	9.9567057	0.19549009	0.00102648	0.77312691	
		<L.D	7.62249443	14.5460061	37.775572	1.70335935	0.37595538	2.4968015	0.00859033	1.04304116	1.03175301	3.00749866	10.6015267	<L.D	1.86716539	0.04821411	0.19276232	0.00102648	0.16532875	
		<L.D	2.5702951	14.8291203	37.8069167	1.76914306	0.42243338	3.53016435	0.00343613	<L.D	0.27794881	2.97803964	10.8814249	<L.D	1.85705621	0.00787169	0.21276596	0.00205297	0.04969419	
SAN JUANITO ITZICUARO	P-S12	0.03574808	<L.D	42.7887821	13.6938091	0.32304198	10.4418722	1.58034165	0.00746392	2.73461654	3.08470608	7.52548656	6.65110398	<L.D	3.55168986	0.04774432	0.06061719	0.00849798	0.17487613	
		0.04158914	4.24074636	49.2735465	16.9278621	0.44735157	12.3616976	8.55596405	0.00994036	2.05769019	38.9575145	38.7735369	7.49570631	<L.D	4.32101373	9.98184752	0.06753631	0.01032951	2.75659824	
		<L.D	<L.D	49.0251676	16.3407181	0.41441771	13.1830659	4.96629902	0.00722935	0.41396015	6.59273816	12.8962398	7.10820094	<L.D	4.29250264	0.08168616	0.17392913	0.00929656	0.66959922	
		0.07536899	<L.D	45.9603799	15.4118132	0.40527723	10.376569	3.34064676	0.00769757	1.18031766	8.77384669	4.97331008	6.86984857	<L.D	3.92344036	0.01486298	0.04540003	0.00981643	0.69260978	
MARIANO ABASOLO	P-S13	<L.D	4.15540736	31.2485362	22.9095464	0.38727314	0.64890339	4.57214697	0.02865113	3.35802023	10.3011865	4.23931864	1.89673622	<L.D	1.60567034	0.0452971	0.04106604	0.00197707	0.42975058	
		<L.D	1.74902561	33.9019211	24.5836381	0.38943952	3.38359843	8.96663714	0.02748905	2.07561001	5.98909315	7.06427424	1.79440204	<L.D	1.67306915	5.64498672	0.0436443	0.00205297	0.55428135	
		<L.D	2.32357677	47.1250477	32.2478167	0.52580331	6.78482895	6.42500567	0.04776056	1.02712431	0.76667382	2.4589948	2.48114724	<L.D	2.26496784	0.03203987	0.06331878	0.00363989	0.1181634	
		0.04499591	<L.D	45.3720901	30.9973421	0.49226442	3.72211205	3.17449512	0.04139249	1.64545571	0.30666953	3.36473223	2.32538015	<L.D	2.10786739	0.01423994	0.0709607	0.0024266	0.29934729	
MARIANO ESCOBEDO II	P-S14	<L.D	<L.D	50.719755	7.5771674	<L.D	2.92550299	1.84280964	0.01960341	3.61813584	4.30711895	5.29973326	5.54574639	<L.D	5.16260539	0.04263256	0.03603755	0.01977066	<L.D	
		0.10433387	47.3330627	56.6601822	9.14386206	0.24540768	2.96637696	194.106912	0.01289148	<L.D.	<L.D.	<L.D.	7.7139989	<L.D.	5.36772581	8.85221445	0.02745603	0.02426939	1.56164115	
		<L.D.	<L.D.	56.4506146	8.75268079	0.13722501	3.24378896	177.970093	0.01137484	<L.D.	10.7162033	<L.D.	7.29421427	<L.D.	5.26865405	0.03916084	0.04375804	0.02528061	0.1590106	
0.13242376	<L.D.	54.6856486	8.52020245	0.07696217	2.44403476	142.255976	0.00606658	<L.D.	<L.D.	<L.D.	7.51962037	<L.D.	5.2954302	<L.D.	0.01973402	0.02426939	<L.D.			
LA SOLEDAD I	P-S15	0.03338243	<L.D	33.2924962	1.53082222	0.08808566	0.20391517	1.03658042	0.01130966	4.10314306	0.90584119	1.78295662	10.6937756	<L.D	6.31149819	0.04618527	0.02933289	0.02767892	0.0260183	
		<L.D	16.9966181	39.05749	1.91938975	0.16642235	8.70591751	16.1709434	0.03079028	1.23741306	1.83922997	4.51720311	9.70193598	<L.D	6.16912545	7.41105434	0.04368683	0.03043094	0.47840057	
		0.0762006	<L.D.	33.8406947	1.72984149	0.01435956	6.61678649	<L.D.	0.00587976	<L.D.	<L.D.	<L.D.	8.52290012	0.15168686	6.3377673	0.01556151	0.03242279	0.02919021	<L.D.	
<L.D.	<L.D.	37.8625699	2.03652653	0.05887421	6.49222538	2.58407286	0.00661473	<L.D.	<L.D.	<L.D.	8.96991719	0.15168686	6.8934164	<L.D.	0.02918051	0.03295669	<L.D.			

sitio	clave	Be	Al	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Mo	Cd	Sb	Tl	Pb
AMPLIACIÓN TORREON NUEVO	P-S16	<L.D	1.37803557	46.6562071	14.5721609	0.34996214	7.30749874	4.23951768	0.03068502	2.04547721	1.04691028	3.82967769	1.88211263	<L.D	0.91153082	0.08769366	0.05510654	0.06267262	0.10784028
		0.03507978	12.1435419	49.725929	15.7234367	0.57679004	5.26747325	8.19149985	0.03357395	2.85963115	1.20040865	4.51427693	1.81782178	<L.D	0.96167247	0.13514809	0.05738228	0.06255676	0.19092185
		<L.D	1.39196012	49.3912954	15.694967	0.42372881	2.84771523	3.26200572	0.02601981	0.80942623	1.75123446	3.42031066	1.96336634	<L.D	1.15878547	0.05655133	0.06011476	0.06457471	0.17875526
		<L.D	<L.D	48.4920961	15.4275547	0.38222068	4.28057194	3.31525491	0.02769851	0.35348361	0.87093479	2.67134875	1.80891089	<L.D	1.11796914	0.01054347	0.06284725	0.06558369	0.08610201
IGNACIO ZARAGOZA	P-S17	0.03785091	<L.D	40.3804668	2.08793375	0.09674434	0.14594867	1.35196858	0.07215127	2.62192081	17.4813948	2.96622387	14.5199883	<L.D	17.8280318	0.05359057	0.08357825	0.09029106	<L.D
		<L.D.	<L.D.	20.4517604	0.81022097	<L.D.	20.1194479	3.05683356	0.02838221	<L.D.	<L.D.	<L.D.	25.7796785	<L.D.	13.1277247	6.86395512	0.01652461	0.08384685	<L.D.
		<L.D.	<L.D.	22.1069959	0.75384196	<L.D.	21.4307202	5.02976996	0.02444024	<L.D.	<L.D.	<L.D.	26.5870853	<L.D.	13.8911047	0.01963534	0.01913376	0.10203051	0.25742374
		<L.D.	<L.D.	19.1074531	0.7338365	<L.D.	2.52079278	<L.D.	0.00867234	<L.D.	<L.D.	<L.D.	23.9881568	<L.D.	12.3522864	<L.D.	0.01826405	0.07273462	<L.D.
PRADOS VERDES GALEANA	P-S18	0.03338243	<L.D	35.7904693	6.67352599	0.02809629	1.29418162	1.1566226	0.0067858	1.61127168	1.55384849	3.63423651	3.15676833	<L.D	3.23543037	0.01687539	0.03687563	0.00395413	0.02512112
		<L.D	6.0004551	43.267392	12.6661574	0.23328149	65.2565456	194.543505	0.04970179	43.4140702	3.50832865	4.72603902	7.82310004	<L.D	4.20274551	7.75312626	0.03423073	0.00723066	0.73998045
		<L.D.	<L.D.	42.5062057	11.6613938	0.07652149	62.6169041	217.594997	0.00972035	<L.D.	<L.D.	<L.D.	6.77352915	<L.D.	3.88350386	0.02701947	0.01236968	0.0029703	<L.D.
		<L.D	<L.D	40.6253434	11.626105	0.09697191	60.1351351	131.844363	0.01536237	<L.D	1.6020962	0.98049194	7.5289824	<L.D	4.24920803	<L.D	0.02405403	0.00516476	0.13098729
REALITO II	P-S19	<L.D	<L.D	67.177878	16.0341088	0.24901153	5.51182687	2.07636795	0.03234367	1.84302384	2.003512	1.8103182	4.27973932	<L.D	2.2972167	0.12374549	0.08633358	0.04780115	0.03206062
		0.09680938	4.1773231	78.193614	19.373497	0.64913989	8.55478433	97.611754	0.0626194	6.86592107	2.61634141	2.73960872	4.88688342	<L.D	2.84265215	10.0059333	0.07641921	0.06551808	0.82376772
		<L.D	<L.D	70.0296736	17.7027175	0.49949684	7.16110642	29.028799	0.03524309	4.78806562	0.92551001	1.02798982	4.89051095	<L.D	2.78563886	0.14521985	0.08326395	0.05681231	0.14662757
		0.07661158	<L.D	68.6405099	17.1352177	0.51138963	6.88450169	20.9558824	0.03433942	2.46944842	7.67920644	2.06841956	4.86689566	<L.D	2.74023231	0.12404195	0.07216209	0.05681231	0.79178886

