



UNIVERSIDAD MICHOCANA DE  
SAN NICOLAS DE HIDALGO

---

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES METALURGICAS

MAESTRIA EN GEOCIENCIAS Y PLANIFICACION DEL TERRITORIO

TESIS:

**“ESTUDIO GEOLOGICO, GEOFÍSICO E HIDROGEOQUÍMICO PARA  
GENERAR UN MODELO CONCEPTUAL DEL ACUÍFERO DE CUITZEO,  
MICHOCÁN MÉXICO”**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**MAESTRO EN GEOCIENCIAS Y PLANIFICACION DEL TERRITORIO**

PRESENTA:

**VÍCTOR HUGO MEDINA VEGA**

ASESOR:

**DR. VÍCTOR HUGO GARDUÑO MONROY**

CO-ASESOR:

**DR. MANUEL EDUARDO MENDOZA CANTÚ**

MORELIA, MICHOCÁN, AGOSTO DE 2008

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco al Dr. Víctor H. Garduño Monroy por su asesoría y apoyo moral y por su importante contribución a mi superación académica.

A la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos de la CFE por las facilidades otorgadas y en especial al Dr. Jesús Arredondo Fragoso y al Dr. Gerardo García Estrada por su gran ayuda en las cuestiones geofísicas e importantes observaciones durante la elaboración de este proyecto.

Al Dr. Manuel Mendoza Cantú por su gran apoyo en el trabajo de campo así como sus valiosas observaciones y comentarios.

A la Comisión Nacional del Agua por las facilidades otorgadas.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, Departamento de Geografía por contribuir en parte de mi formación académica.

A los Maestros Teodoro Carlón Allende y Neftali Razo por su importante colaboración en el trabajo de campo y laboratorio.

Al proyecto “Uso de técnicas de análisis multicriterio para la priorización de subcuencas para la conservación, restauración y el aprovechamiento de los recursos naturales en la Cuenca del Lago de Cuitzeo” con clave: MICHOACÁN-2005-C01-011 por su apoyo económico

Agradezco a mi familia, cuñados (as), sobrinos (as), amigos, abuelos, tíos, primos por apoyarme y motivarme en todo momento

A mis compañeros y amigos Magda, Teodoro, Mónica, Jorge, Gaby, Ramón, Adalberto, José, Gerardo, Neftali, Daniel, Euriel, Gonzalo, Ramiro por la amistad que me han brindado y por ser unos grandes amigos.

## **DEDICATORIA**

A mi esposa Ana María por todo el apoyo que siempre me ha brindado, por compartir grandes momentos de alegría y tristeza, y sobre todo por su amor incondicional.

A mis padres José y Sara por apoyarme en todas mis decisiones, gracias por todo el cariño y amor que me han dado.

A mis hermanos Carlos, Jorge, José, Maribel, Ricardo, Gris y Laura.

## INDICE DE CONTENIDO

Resumen .....	i
I.- INTRODUCCIÓN .....	1
II.- ANTECEDENTES .....	2
II.1. Delimitación .....	4
II.2. Justificación .....	4
II.3. Objetivo General .....	4
II.4. Objetivos particulares .....	4
II.5. Formulación de preguntas .....	5
II.6. Respuesta de las preguntas .....	5
II.7. Hipótesis de trabajo .....	6
III.- METODOLOGÍA .....	7
IV.- LOCALIZACIÓN Y CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LA CUENCA DE CUITZEO .....	13
IV.1. Población .....	15
IV.2. Actividades Económicas .....	15
IV.3. Clima .....	15
IV.4. Temperatura .....	16
IV.5. Precipitación .....	17
IV.6. Evaporación Potencial .....	18
IV.7. Hidrología Superficial .....	19
IV.8. Escurrimientos Superficiales .....	19
RESULTADOS	
V.- GEOLOGÍA .....	21
V.1. Geología de la zona .....	21
V.1.1. Depresión lacustre de Cuitzeo .....	21
V.1.2. Estratigrafía .....	24
V.2. Geología del subsuelo .....	25
V.2.1. Perfil 1-1' .....	27
V.2.2. Perfil 2-2' .....	28
V.2.3. Perfil 3-3' .....	29
V.2.4. Perfil 4-4' .....	32
V.2.5. Perfil 5-5' .....	34
V.2.6. Perfil 6-6' .....	36
V.2.7. Perfil 7-7' .....	38
V.2.8. Perfil 8-8' .....	41
V.2.9. Perfil 9-9' .....	43
V.3. Geología estructural .....	44
V.4. Conclusiones .....	48
VI.- GRAVIMETRÍA Y MAGNETOMETRÍA .....	50
VI.1. Localización de la zona de estudio .....	50
VI.2. Datos de campo .....	51
VI.2.1. Gravimetría .....	51
VI.2.2. Aeromagnetometría .....	51
VI.2.3. Geología .....	52
VI.3. Procesamiento .....	52
VI.3.1. Gravimetría .....	52
VI.3.2. Magnetometría .....	53
VI.4. Interpretación .....	54
VI.4.1. Gravimetría .....	54
VI.4.2. Magnetometría .....	58
VI.5. Perfiles gravimétricos .....	62
VI.5.1. Perfil P1-P1' .....	62
VI.5.2. Perfil P2-P2' .....	65
VI.5.3. Perfil P3-P3' .....	67
VI.5.4. Perfil P4-P4' .....	69

VI.5.5. Perfil P5-P5' .....	71
VI.5.6. Perfil P6-P6' .....	73
VI.5.7. Perfil P7-P7' .....	75
VI.5.8. Perfiles P8-P8', P9-P9' y P10-P10' .....	77
VI.6. Conclusiones .....	82
VII.- BALANCE HIDROLÓGICO .....	84
VII.1. Generalidades .....	84
VII.2. Ubicación de las estaciones .....	86
VII.3. Temperatura .....	87
VII.4. Precipitación, evaporación, infiltración .....	96
VII.4.1. Precipitación .....	96
VII.4.2. Evaporación potencial .....	105
VII.4.3. Infiltración .....	113
VII.5. Balance hidrológico .....	114
VII.6. Conclusiones .....	114
VIII.- HIDROGEOQUÍMICA .....	116
VIII.1. Generalidades .....	116
VIII.2. Contaminación del agua .....	118
VIII.3. Parámetros fisicoquímicos .....	120
VIII.4. Componentes Mayores .....	121
VIII.5. Análisis de las características físicas y químicas de la cuenca del Lago de Cuitzeo .....	122
VIII.5.1 Parámetros fisicoquímicos y componentes mayores .....	124
VIII.5.2. Concentración Traza .....	128
VIII.6. Caracterización del agua subterránea .....	132
VIII.7. Conclusiones .....	134
IX.- ANALISIS DE PIEZOMETRÍAS .....	136
IX.1. Metodología .....	136
IX.2. Análisis de los niveles estáticos para el año 1990 .....	136
IX.3. Análisis de los niveles estáticos en el mes de mayo de 2001 .....	140
IX.4. Análisis de los niveles estáticos del mes de noviembre de 2001 .....	143
IX.5. Análisis de los niveles estáticos del mes de mayo de 2002 .....	146
IX.6. Análisis de los niveles estáticos del mes de diciembre de 2002 .....	149
IX.7. Análisis de la evolución de los niveles estáticos .....	151
IX.8. Censo de aprovechamientos de agua subterránea y análisis de la densidad de pozos .....	152
IX.9. Conclusiones .....	153
X.- MODELO CONCEPTUAL .....	155
XI.- DISCUSIÓN .....	167
XII.- CONCLUSIONES .....	169
XIII. APORTACIONES Y CONTRIBUCIONES .....	174
XIII.- BIBLIOGRAFÍA .....	175

## Relación de Tablas y Figuras

Tablas	Pag.
Tabla VII. 1. Temperatura promedio mensual	89
Tabla VII. 2. Precipitación media mensual	98
Tabla VII. 3. Evaporación media mensual	106
Tabla VIII. 1. Técnica y equipo para análisis de agua	124
Tabla VIII. 2. Parámetros Físicoquímicos y componentes mayores	127
Tabla VIII. 3. Parámetros Químicos de las concentraciones Traza	131
Figuras	
Figura III. 1. Organigrama de la metodología de investigación	19
Figura IV.1. Localización de la cuenca de Cuitzeo.	14
Figura IV. 2. Temperatura promedio anual de la cuenca del Lago de Cuitzeo	16
Figura IV. 3. Precipitación promedio anual en la cuenca de Cuitzeo	17
Figura IV. 4. Evaporación promedio anual de la cuenca del Lago de Cuitzeo	18
Figura IV. 5. Principales ríos de la zona de estudio	20
Figura V. 1. Geología de la Cuenca del lago de Cuitzeo	23
Figura V. 2. Ubicación de los perfiles de la geología del subsuelo	26
Figura No. 3. Perfil 1-1'	28
Figura V. 4. Perfil 2-2'	29
Figura V. 5. Perfil 3-3'	31
Figura V. 6. Perfil 4-4'	33
Figura V. 7. Perfil 5-5'	35
Figura V. 8. Perfil 6-6'	38
Figura V. 9. Perfil 7-7'	40
Figura V. 10. Perfil 8-8'	42
Figura V. 11. Perfil 9-9'	44
Figura V. 12. Sistema de fallas y fracturas con los respectivos diagramas rosas.	46
Figura V. 13. Grafica del desplazamiento Real Vs Aparente de las fallas	47
Figura VI. 1. Localización de la zona de estudio	50
Figura VI. 2. Anomalía de Bouguer	56
Figura VI. 3. Mapa local de anomalía de Bouguer [mGal]	57
Figura VI. 4. Campo magnético total reducido al polo	59
Figura VI. 5. Campo magnético reducido al polo	60
Figura VI. 6. Perfil P1-P1' (SO-NE)	64
Figura VI. 7. Modelado gravimétrico bidimensional del perfil 1-1' (SO-NE)	65
Figura VI. 8. Perfil P2-P2' (SO-NE)	66
Figura VI. 9. Modelado gravimétrico bidimensional del perfil 2-2' (SO-NE)	67
Figura VI. 10. Perfil P3-P3' (SO-NE)	68
Figura VI. 11. Modelado gravimétrico bidimensional del perfil 3-3' (SO-NE)	69
Figura VI. 12. Perfil P4-P4' (NNO-SSE)	70
Figura VI. 13. Modelado gravimétrico bidimensional del perfil 4-4' (NNO-SSE)	71
Figura VI. 14. Perfil P5-P5' (NNO-SSE)	72
Figura VI. 15. Modelado gravimétrico bidimensional del perfil 5-5' (NNO-SSE)	73
Figura VI. 16. Perfil P6-P6' (NNO-SSE)	74
Figura VI. 17. Modelado gravimétrico bidimensional del perfil 6-6' (NNO-SSE)	75
Figura VI. 18. Perfil P7-P7' (NNO-SSE)	76
Figura No. 19.- Modelado gravimétrico bidimensional del perfil 7-7' (NNO-SSE)	76
Figura VI. 20. Perfil P8-P8' (NNE-SSO)	78
Figura VI. 21. Modelado gravimétrico bidimensional del perfil 8-8' (NNE-SSO)	78
Figura VI. 22. Perfil P9-P9' (NNE-SSO)	79
Figura VI. 23. Modelado gravimétrico bidimensional del perfil 9-9' (NNE-SSO)	80

Figura VI. 24. Perfil P10-P10' (NNE-SSO)	81
Figura VI. 25. Modelado gravimétrico bidimensional del perfil 10-10' (NNE-SSO)	82
Figura VII. 1. Ciclo Hidrológico	84
Figura VII. 2. Ubicación de las estaciones meteorológicas	86
Figura VII. 3. Temperatura media mensual de la cuenca de Cuitzeo	87
Figura VII. 4. Temperatura media anual	88
Figura VII. 5. Temperatura media del mes de enero	90
Figura VII. 6. Temperatura media del mes de febrero	90
Figura VII. 7. Temperatura media del mes de marzo	91
Figura VII. 8. Temperatura media del mes de abril	91
Figura VII. 9. Temperatura media del mes de mayo	92
Figura VII. 10. Temperatura media del mes de junio	92
Figura VII. 11. Temperatura media del mes de julio	93
Figura VII. 12. Temperatura media del mes de agosto	93
Figura VII. 13. Temperatura media del mes de septiembre	94
Figura VII. 14. Temperatura media del mes de octubre	94
Figura VII. 15. Temperatura media del mes de noviembre	95
Figura VII. 16. Temperatura media del mes de diciembre	95
Figura VII. 17. Precipitación media anual de la cuenca de Cuitzeo	96
Figura VII. 18. Precipitación media mensual de la cuenca de Cuitzeo	97
Figura VII. 19. Precipitación media del mes de enero	99
Figura VII. 20. Precipitación media del mes de febrero	99
Figura VII. 21. Precipitación media del mes de marzo	100
Figura VII. 22. Precipitación media del mes de abril	100
Figura VII. 23. Precipitación media del mes de mayo	101
Figura VII. 24. Precipitación media del mes de junio	101
Figura VII. 25. Precipitación media del mes de julio	102
Figura VII. 26. Precipitación media del mes de agosto	102
Figura VII. 27. Precipitación media del mes de septiembre	103
Figura VII. 28. Precipitación media del mes de octubre	103
Figura VII. 29. Precipitación media del mes de noviembre	104
Figura VII. 30. Precipitación media del mes de diciembre	104
Figura VII. 31. Evaporación media mensual de la cuenca de Cuitzeo	105
Figura VII. 32. Evaporación media del mes de enero	107
Figura VII. 33. Evaporación media del mes de febrero	107
Figura VII. 34. Evaporación media del mes de marzo	108
Figura VII. 35. Evaporación media del mes de abril	108
Figura VII. 36. Evaporación media del mes de mayo	109
Figura VII. 37. Evaporación media del mes de junio	109
Figura VII. 38. Evaporación media del mes de julio	110
Figura VII. 39. Evaporación media del mes de agosto	110
Figura VII. 40. Evaporación media del mes de septiembre	111
Figura VII. 41. Evaporación media del mes de octubre	111
Figura VII. 42. Evaporación media del mes de noviembre	112
Figura VII. 43. Evaporación media del mes de diciembre	112
Figura VII. 44. Evaporación media anual de la cuenca de Cuitzeo	113
Figura VIII. 1. Balance Mundial del Agua	116
Figura VIII. 2. Ubicación de los puntos de muestreo	123
Figura VIII. 3. Ubicación de los diferentes tipos de agua encontrados	133
Figura VIII. 4. Tipos de agua encontrados	134
Figura IX. 1. Nivel estático para el año 1990	138
Figura IX. 2. Nivel estático para el año 1990, perfil 1-1'	138

Figura IX. 3. Nivel estático para el año 1990, perfil 2-2'	139
Figura IX. 4. Nivel estático para el año 1990, perfil 3-3'	139
Figura IX. 5. Nivel estático para el mes de Mayo del año 2001	141
Figura IX. 6. Nivel estático para el mes de mayo del año 2001, perfil 1-1'	141
Figura IX. 7. Nivel estático para el mes de mayo del año 2001, perfil 2-2'	142
Figura IX. 8. Nivel estático para el mes de mayo del año 2001, perfil 3-3'	142
Figura IX. 9. Nivel estático para el mes de noviembre del año 2001	144
Figura IX. 10. Nivel estático para el mes de noviembre del año 2001, perfil 1-1'	144
Figura IX. 11. Nivel estático para el mes de noviembre del año 2001, perfil 2-2'	145
Figura IX. 12. Nivel estático para el mes de noviembre del año 2001, perfil 3-3'	145
Figura IX. 13. Nivel estático para el mes de mayo del año 2002	147
Figura IX. 14. Nivel estático para el mes de mayo del año 2002, perfil 1-1'	147
Figura IX. 15. Nivel estático para el mes de mayo del año 2002, perfil 2-2'	148
Figura IX. 16. Nivele estático para el mes de mayo del año 2002, perfil 3-3'	148
Figura IX. 17. Nivel estático para el mes de diciembre del año 2002	149
Figura IX. 18. Nivel estático para el mes de diciembre del año 2002, perfil 1-1'	150
Figura IX. 19. Nivel estático para el mes de diciembre del año 2002, perfil 2-2'	150
Figura IX. 20. Nivel estático para el mes de diciembre del año 2002, perfil 3-3'	151
Figura IX. 21. Evolución del nivel estático del agua	152
Figura IX. 22. Ubicación de los pozos de extracción de agua	153
Figura X. 1. Ubicación de la zona de estudio.	156
Figura X. 2. Esquema generalizado de las unidades geohidrológicas de la cuenca de Cuitzeo	157
Figura XII. 1. Esquema general en sección, de los diferentes tipos de agua encontrados dentro de la cuenca del Lago de Cuitzeo	170
Figura XII. 2. Modelo geohidrológico conceptual de la cuenca del Lago de Cuitzeo	172

## RESUMEN

En este trabajo se presentan las características más importantes que se encontraron dentro de la cuenca del Lago de Cuitzeo, se ha reunido y realizado estudios que consisten principalmente en datos de cartografía geológica, estudios gravimétricos y magnetométricos, hidrogeoquímicos, geología del subsuelo y análisis de la evolución piezométrica, con esta información y con apoyo de algunas herramientas básicas de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), se ha logrado llegar a plantear un modelo claro de los diferentes acuíferos que componen la cuenca de Cuitzeo.

Se han definido cuatro unidades geohidrológicas, la primera de ellas está constituida por los sedimentos fluvio-lacustres la cual presenta conductividades hidráulicas buenas, la segunda de ellas la constituyen los flujos piroclásticos y riolíticos con conductividades hidráulicas bajas, la tercera de las unidades está compuesta por las andesitas fracturadas con propiedades hidráulicas buenas, y la cuarta unidad geohidrológica la componen las andesitas basálticas y malpais con buenas conductividades hidráulicas.

Es además importante hacer alusión que por medio de la reinterpretación geofísica se logró determinar un espesor máximo de 1140 m de la columna de sedimentos que contienen al Lago de Cuitzeo, en donde anteriormente se había reportado un espesor de 1500m (Arredondo, 1983).

La configuración de los niveles estáticos del agua para diferentes periodos (1990,2001 y 2002) evidencia un abatimiento de más de 80 m dentro de la ciudad de Morelia, mientras que en la mayor parte de la cuenca se mantienen estables los niveles, encontrándose en un rango de 10 a 30m de profundidad. La dirección del flujo nos indica que ésta ocurre de SO-NE, la cual está siendo influenciada por el sistema de fallas regional de la zona.

Se realizó un muestreo de agua para 13 pozos, 2 ríos y 7 manantiales, encontrándose en el manantial Huingo una concentración de arsénico de 2.839 ppm rebasando la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 hasta por 56 veces la cual establece el límite máximo de 0.05 ppm.

Se logró determinar por medio de la gravimetría el espesor de los sedimentos que contiene el Lago de Cuitzeo, dicho espesor es variable, determinándose que la zona de mayor espesor es la centro sur del lago en donde esperaríamos un relleno aproximado de 630 m, mientras que hacia la parte este del lago esperaríamos un espesor promedio de 220 m y en la parte oeste tendríamos un espesor promedio de sedimentos de 150 m y en la rama norte del lago tendríamos un espesor aproximado de 340 m.

En este trabajo se determinaron componentes mayores, elementos traza en muestras de agua de 22 fuentes de agua subterráneas en el mes de abril del 2006, de las cuales 7 se tomaron en manantiales fríos y calientes, 13 muestras en pozos de agua potable y agrícola, y 2 muestras en los ríos Queréndaro y Atécuaro. Se realizó la caracterización de 17 muestras utilizando el diagrama de Piper, descartándose 5 de las 22 muestras por tener un error superior al 10 % considerado en el balance iónico, de esta caracterización se obtuvo las familias de agua, siendo las bicarbonatadas las que mayormente se encontraron (15 muestras) y del tipo clorurada se obtuvo las dos muestras restantes. Se encontró además que en el manantial Huingo se sobrepasa 56 veces la cantidad de arsénico establecida en la Norma Oficial Mexicana (DOF, 1994).

Se determinó que las zonas de recarga del acuífero ocurren mayormente en la parte sur Sierra de Mil Cumbres y al este hacia Los Azufre. Se define además que las zonas de descarga ocurren hacia el área de Santa Ana Maya,

# I.- INTRODUCCIÓN

Los estudios geohidrológicos en México han adquirido mayor importancia debido a que este recurso presenta indicios claros de escasez. Hasta ahora los estudios sobre las cuencas hidrológicas y geohidrológicas han sido abordados sin un modelo claro de geometría del acuífero, de la hidrogeoquímica y de propiedades físicas para la modelización de acuíferos.

El origen tectónico de la cuenca de Cuitzeo la hace altamente sensible a la colmatación final, además, la cuenca de Cuitzeo desde hace una decena de años presenta características que la convierten en una cuenca de recursos hídricos en riesgo. Aunado a ello, hasta ahora no existe un modelo conceptual del o los acuíferos de ésta donde se combinen fallas geológicas con su pila sedimentaria y un entorno de tipo tectónico-volcánico donde los procesos hidrotermales están presentes y son importantes.

Generalmente un modelo conceptual de acuíferos, se formula con base en parámetros inferidos tanto de geometría (Pérez-Huerta, S.A. 2002), como físicos y químicos, sobre los que se aplica software que sólo darán como resultado modelos sin un sustento adecuado y alejados de la realidad.

El campo de conocimiento a que corresponde este trabajo es de la geohidrología, puesto que es la encargada de conocer las características de las fuentes subterráneas del agua, asimismo es la encargada de la toma de decisiones para el aprovechamiento y la explotación de la misma.

La importancia de estudiar el agua subterránea se deriva de que en México y en el mundo, esta fuente se está agotando y la calidad de la misma se está viendo afectada por la contaminación de los suelos, ríos, lagos y el mar. Esta contaminación a su vez está interactuando con el agua subterránea afectándole de manera considerable, de tal forma que la calidad de vida de las personas se ve disminuida por el consumo de agua de baja calidad y en algunos casos muy perjudiciales para la salud.

## II.- ANTECEDENTES

La cuenca del Lago de Cuitzeo ha sido estudiada desde hace unas décadas atrás y en particular el propio lago ha sido objeto de numerosos estudios de tipo biológico, geofísico, geológico, limnológicos, etc. Como lo hemos mencionado los estudios realizados dentro de la cuenca son de diversa índole; a manera resumen bibliográfico se describen los mas representativos de acuerdo al objetivo de este trabajo.

Los estudios fisicoquímicos del agua subterránea (Cedillo et al, 1981; CNA, 1990; Cuevas-Villanueva, R.A. 2002; García-Vega, E. 2004) muestran la existencia de familias de agua con diferencias significativas que caracterizan parte de la cuenca del Lago de Cuitzeo. Estas características fisicoquímicas cambian de un lugar a otro. En el caso de las riberas del Lago de Cuitzeo se han encontrado tres tipos principales de agua que son: Cloruradas, Sulfatadas y Bicarbonatadas. En los estudios más recientes (Cuevas-Villanueva, R.A. 2002; García-Vega, E. 2004) se ha determinado que la calidad del agua subterránea, analizada de algunos pozos de agua potable, es de manera general de buena calidad.

Los estudios de tipo geohidrológico en los que se han definido los diversos acuíferos para la cuenca del Lago de Cuitzeo son pocos (Cedillo et al, 1981; CNA, 1990; SARH, 1993). Cedillo et al, 1981, definen tres tipos de acuíferos, el primero de ellos constituido por ser un acuífero superficial contenido en medios granulares; el segundo lo establece como un acuífero intermedio constituido por rocas andesíticas, donde establece que el origen de algunos de los manantiales calientes, es su interacción con el sistema geotérmico; el tercer acuífero lo define como profundo y al igual que intermedio está constituido por rocas andesíticas. En este último acuífero se encuentra contenido el sistema geotérmico de Los Azufres. Los estudios realizados por la CNA y SARH definen solamente dos tipos de acuíferos para toda la planicie Tarímbaro-Álvaro Obregón-Queréndaro, el primero de estos acuíferos es el superficial, compuesto por medios sedimentarios, y el segundo acuífero, subyaciendo al anterior, está contenido en rocas volcánicas; y para el valle de la ciudad de Morelia, definen tres tipos de acuíferos, el primero de ellos se clasifica como un acuífero

sedimentario, el segundo acuífero lo definen como un acuífero constituido por un paquete de tobas riolíticas, y el tercer acuífero lo establecen constituido por andesitas.

Los estudios donde se ha realizado de alguna forma una modelización numérica del agua subterránea son pocos (SARH, 1993; Mora-Rodríguez, J. 2001; Pérez-Huerta, S.A 2002). En estos se ha intentado la aplicación de algún método analítico para la simulación del flujo del agua subterránea (Mora-Rodríguez, J. 2001; Pérez-Huerta, S.A. 2002). Solamente existe uno de aplicación práctica (SARH, 1993) utilizado para la toma de decisiones en el manejo del agua subterránea en el Valle Morelia-Queréndaro. Además de estos estudios, existen otros con el propósito de exploración y búsqueda de agua subterránea (E. G. S., 1998; 1999; Arroyo-Serrato, A. 1999; Riquelme-Alcantar, 2000; COMAPAS, 2001; GUTMED, 2002).

Entre todos los estudios revisados, los de modelización presentan la mayor carencia de información, siendo ésta altamente necesaria para el modelado del flujo del agua subterránea por métodos analíticos. Estos estudios tienen algunas características que los hacen vulnerables, las principales son las siguientes:

- La conceptualización del medio geohidrológico está simplificada, por lo que no presenta detalle de ella.
- Existen diferencias entre los distintos modelos propuestos.
- La alimentación de la información así como los datos de salida de los modelos distan de la realidad.

Con base en las características geohidrológicas descritas en los antecedentes revisados, dentro de la cuenca del Lago de Cuitzeo se encuentran tres tipos de acuíferos:

1. Acuífero en secuencias lacustres (libre)
2. Acuífero en rocas volcánicas (Ignimbritas y Andesitas)
3. Acuífero geotérmico profundo (Fallas-Los Azufres)

## **II.1 Delimitación**

El trabajo de investigación de esta tesis consiste en estudiar la cuenca de Lago de Cuitzeo desde el punto de vista geohidrológico, en este sentido y con base en los antecedentes se observó que se han realizado estudios de simulación geohidrológica donde aplican software o interpretan de manera errónea la geometría del acuífero por lo que no representan las características propias de la zona de estudio. En este sentido se pretende obtener un modelo geohidrológico conceptual debido a que es la base medular para poder realizar una simulación del acuífero.

## **II.2. Justificación**

Se justifica su estudio debido a que la CNA tiene considerado al acuífero de la cuenca del Lago de Cuitzeo ó “Acuífero Morelia-Queréndaro” (Denominado por CNA) como un acuífero sobreexplotado, donde se le mantiene en veda o mejor dicho, en un programa de protección en el cual no se otorgan concesiones para incrementar el volumen de extracción del agua subterránea. También se justifica su estudio porque dentro de la cuenca se tiene concentrada un poco más del 20% de la población del Estado de Michoacán, por lo que se justifica realizar un modelo geohidrologico conceptual que nos permita conocer las condiciones actuales y propiedades tanto físicas como hidráulicas del acuífero de la cuenca de Cuitzeo abordándola desde el punto de vista geocientífico.

## **II.3. Objetivo General**

Obtener un modelo geohidrologico conceptual de los acuíferos presentes dentro de la cuenca del Lago de Cuitzeo mediante una revisión de datos geológicos, piezométricos, meteorológicos, hidrogeoquímicos, estudios geofísicos, parámetros físicos y estudios de la misma índole, más apegados a la realidad.

## **II.4. Objetivos Particulares**

- Evaluar la influencia de las fallas de los sistemas, NE-SO y E-O sobre el acuífero intermedio.

- Determinar si en las zonas con alta densidad de pozos existe un proceso acelerado de abatimiento de los acuíferos explotados.
- Determinar las zonas de recarga y descarga de los acuíferos
- Evaluar si la calidad del agua subterránea ha sido afectada por la contaminación superficial.

## **II.5. Formulación de preguntas**

Partamos de la definición de modelo conceptual, según la cual “Es una representación simplificada de las características físicas hidrogeológicas”. En la que incluye la identificación y la descripción del marco geológico e hidrológico, el medio en que se desarrolla, las propiedades hidráulicas, y las fuentes y salidas del flujo. (Groundwater Hydrology, 1999)

De aquí surgen las primeras preguntas del tema central de esta investigación:

**¿Cuáles son las propiedades más importantes que se deben tomar en consideración para realizar el modelo conceptual?**

**¿La información disponible es representativa de la zona de estudio?**

**¿Hasta que punto se puede simplificar el modelo conceptual?**

## **II.6. Respuesta de las preguntas**

Las propiedades más importantes que se deben tomar en consideración para la realización de un modelo conceptual son las variables cualitativas y cuantitativas que afectan o intervienen dentro del sistema de agua subterránea las cuales son más representativas si se obtienen directamente a partir de datos de campo.

La información disponible dentro de la zona de estudio debe estar bien distribuida y los datos deben ser de buena calidad, porque ello permitirá un mejor ajuste al momento de realizar el modelado numérico.

Un modelo se puede simplificar con base en la información disponible. Sin embargo, el resultado es ambiguo debido a que es un proceso natural en el que intervienen numerosas variables, por lo que los modelos estarán alejados de la realidad por falta de información, o bien cuando se hacen interpretaciones de geometrías o propiedades físicas y químicas con un desconocimiento casi total de las geociencias.

## **II.7. hipótesis de trabajo**

1. El mapeo de fallas y la comparación de niveles piezométricos permiten inferir si los bloques definidos por fallas son independientes y por lo tanto las fallas actúan como barreras.
2. El análisis del abatimiento histórico del nivel piezométrico permite determinar si en las zonas con muchos pozos existe un abatimiento mayor.
3. Las zonas de mayor altura y precipitación dan lugar a un potencial piezométrico mayor y por tanto actúa como zona de recarga (Si existe un sistema favorable de fallas).
4. Los análisis químicos de agua de pozo y superficial y su evolución histórica permite demostrar que existe una influencia en los acuíferos por la contaminación.

### III.- METODOLOGÍA

La metodología empleada para la obtención del modelo geohidrológico conceptual en este trabajo de tesis se realizó conforme a la Figura III.1, a continuación se describe el organigrama de la metodología:

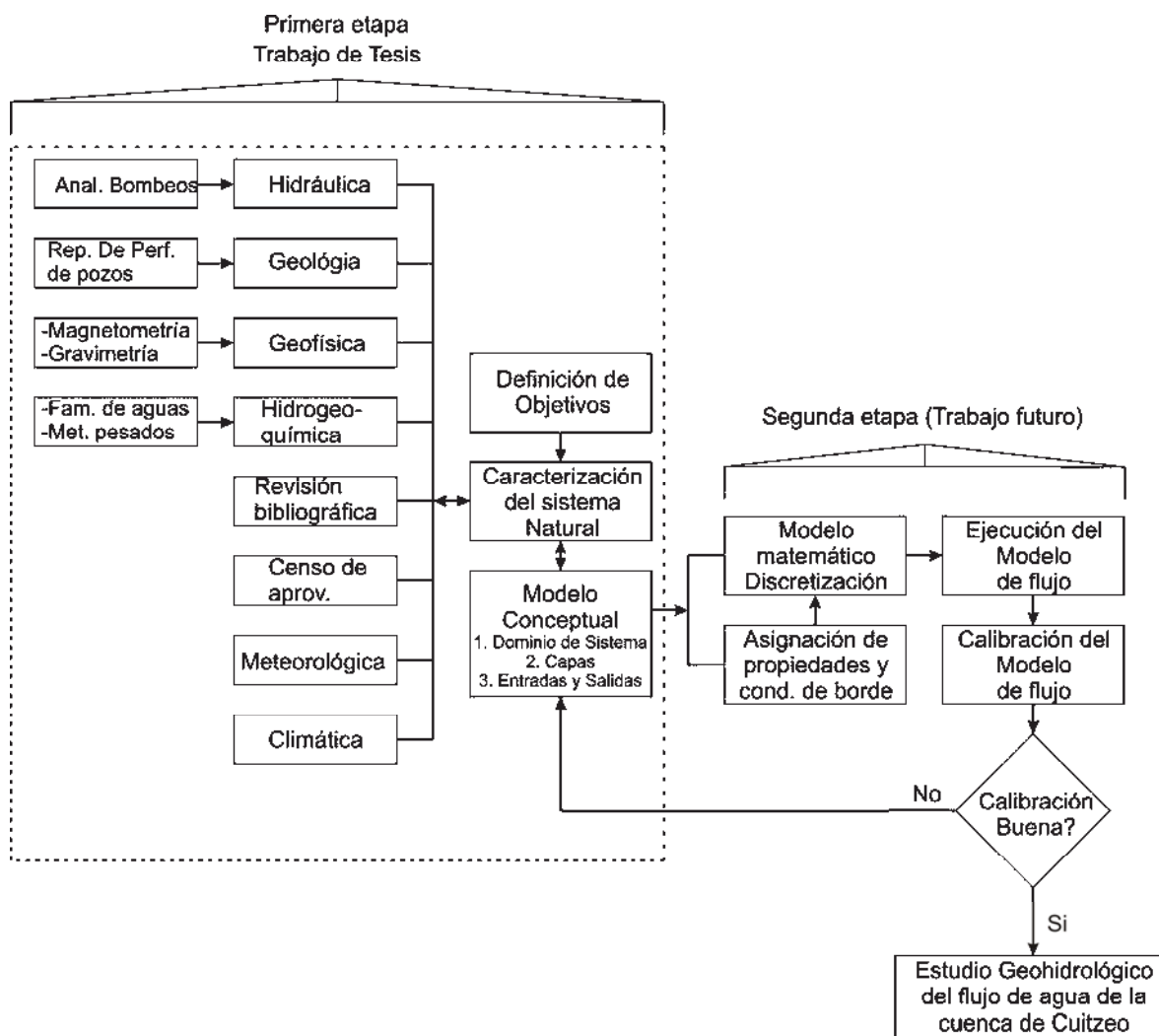


Figura III. 1. Organigrama de la metodología de investigación

En principio se definieron los objetivos principales del estudio y se plantearon las hipótesis de trabajo, y con base en estos se procedió a la recopilación y obtención de datos, esta recopilación incluyó información geográfica, geofísica, geoquímica, geológica y algunas propiedades de uso del suelo, información climática y meteorológica.

Una vez conjuntada toda la información se procede a validar la misma, debido a que existe información de carácter geográfico y de reportes de perforaciones de pozos poco exacta o de la que no se tiene la certeza de su posicionamiento en el espacio, por otro lado la mala o equivocada descripción litológica acarrea grandes errores en las correlaciones y estilos de formación. Continuándose con la digitalización de la información relevante y clasificación de la misma a través de bases de datos para posteriormente utilizarse en los Sistemas de Información Geográfica (SIG).

En relación con las propiedades hidráulicas del subsuelo, se realiza una reinterpretación de las pruebas de bombeo (CNA, 1990) para la obtención de las transmisividades y así poder inferir el tipo de acuífero en la zona de estudio.

En la parte geofísica se realiza la gravimetría la cual nos ayuda a definir el espesor de sedimentos de nuestra zona de estudio, y como dato importante y que era desconocido, se estima el espesor de la columna de sedimentos fluviolacustres o lacustres que contiene el Lago de Cuitzeo. En este estudio se hizo una reinterpretación gravimétrica de las estaciones realizadas por Arredondo-Fragoso, J.J. 1983 cuando el lago presentó una sequía importante. Se procedió a la recopilación de dicha información y a conjuntarla con los datos levantados por PEMEX, una vez que se obtuvo toda la información conjuntada se empalmó para la realización de los perfiles gravimétricos, con el objeto de definir el espesor de los sedimentos del Lago de Cuitzeo. Es importante destacar que se realizaron mediciones de densidades de los tres tipos de rocas principales de la zona (sedimentos, flujos piroclásticos y andesitas).

En lo referente al trabajo de la geología, se realizó dentro de este capítulo el subtema de la geología del subsuelo en la que se determinó basándose en los reportes de las perforaciones de pozos de agua subterránea, obteniéndose de estos reportes la información relevante como es su localización y litología perforada a cada 2m de profundidad. Una vez que se identificaron los pozos con la información necesaria, se realizó un mapa en planta de estos sobre un mapa topográfico y se procedió a la realización de los perfiles litológicos, la forma

de trazar estos perfiles fue tratando de que estos pasaran por la mayor cantidad de pozos con el objeto de realizar una mejor correlación litológica del subsuelo.

Dentro del trabajo hidrogeoquímico se procedió a revisar la base de datos de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) en donde se ubicaron los diversos pozos y manantiales, para así realizar una preselección de los sitios de interés a muestrear. La ubicación de los sitios se realizó con base en una representación en planta de las fuentes subterráneas de agua, tratando de que estas estuvieran espaciadas en la cobertura la zona de estudio y accesibles a los vehículos, una vez tomadas las muestras estas se analizaron en el Instituto de Investigaciones Metalúrgicas de la UMSNH los cationes y los aniones se procedió a mandar analizarse al Instituto Tecnológico Agropecuario No. 7 de la ciudad de Morelia.

La información del censo de los aprovechamientos del agua subterránea, climática y meteorológica se consultara y se obtendrá los parámetros e información necesaria para realizar el balance hidráulico de la cuenca. Una vez analizada toda la información de manera separada se procedió a la conjunción de esta, para interpretarse con objetivos geohidrológicos, y continuar con la etapa de la construcción de modelo conceptual de la cuenca del Lago de Cuitzeo.

Puesto que el modelo conceptual es realizar una idealización o simplificación de las características conocidas de la zona de estudio para facilitar la posterior aproximación práctica y el modelado numérico.

Se establecen los aspectos que se consideran en el desarrollo del modelo conceptual:

1. Dominio del sistema
2. Número de niveles/capas a considerar
3. Entradas y salidas de agua del sistema (recargas, manantiales, ríos, etc.)

### **1. Dominio del sistema**

Para la definición del dominio del sistema se consideran tres aspectos clave.

El primero es el de cubrir el área de interés.

El segundo aspecto a considerarse es la selección de un dominio que sea lo suficientemente grande como para que las condiciones de borde no influyan de manera significativa en los resultados.

El tercer aspecto a considerar es el aprovechamiento de condiciones de borde naturales, como cursos de agua superficiales (ríos, lagos, etc.), bordes geológicos (afloramientos, escarpes, etc.).

## **2. Número de niveles/capas a considerar**

La elección del número de capas a considerar es otro factor importante debido a que en un sistema con dos capas se simplifica el modelo matemático y supone un ahorro de memoria y tiempo de cálculo computacional; mientras que los modelos con tres, cuatro o más capas implican un incremento importante de la complejidad del modelo y de las necesidades de memoria de cálculo.

## **3. Entradas y salidas de agua del sistema**

La convergencia de un modelo matemático se consigue cuando se logra ajustar el balance de flujo, para lo cual es necesario establecer las entradas y salidas de agua del sistema.

Las entradas de agua estarán constituidas, en este sistema, por las zonas de recarga o conocidas como carga constante del sistema, con las posibles aportaciones de los ríos y canales, y la recarga debida fundamentalmente a las precipitaciones.

Como salidas del sistema se considera; los manantiales, pozos de extracción y lagos.

Para la definición de los parámetros físicos del sistema debemos de considerar a los acuíferos como grandes depósitos subterráneos de almacenamiento de agua, a través de los cuales el agua fluye desde niveles piezométricos elevados a otros mas bajos. Un acuífero está caracterizado por tres propiedades físicas: conductividad hidráulica,  $K$ , transmisividad,  $T$ , y coeficiente de almacenamiento,  $S$ .

La determinación de estos tres parámetros es crucial para el desarrollo adecuado del modelo de flujo. La conductividad hidráulica es una medida de la capacidad del acuífero para transmitir agua y es la variable más importante que gobierna el flujo de aguas subterráneas.

Los métodos más comunes para cuantificar los parámetros que caracterizan el acuífero son los ensayos de bombeo y para este trabajo no se realizarán ningún ensayo en campo debido al equipo y costo que ello implica, pero se realizará una reinterpretación de los ensayos realizados por CNA, 1990.

Una vez establecido el modelo conceptual (objeto de este trabajo), la siguiente etapa es la implementación de un modelo matemático que simula el comportamiento real del acuífero. En el modelo matemático el dominio del sistema se discretiza mediante una malla tridimensional que estructura el sistema en celdas, en las que se definirán sus características (carga hidráulica, permeabilidad, etc.). En este trabajo se analizará la información que se requiere para el uso o desuso del software Visual MODFLOW 3.1.

Una vez realizada la discretización del sistema se le asigna a cada celda o grupo de celdas las propiedades básicas que controlan el flujo. En primer lugar se tendrían que definir la conductividad hidráulica teniendo en cuenta las características hidrogeológicas del sistema.

La segunda etapa en la construcción del modelo matemático es la asignación de las condiciones de borde, en las que se establecen las entradas y salidas de agua dentro del sistema. A partir del modelo conceptual se definen las condiciones de borde del tipo: carga constante, río, dren y recarga. Al asignar estas condiciones al modelo matemático, se especifica la variable del tiempo. Después de la asignación de todas las propiedades se debe proceder a la ejecución del modelo de flujo con el solucionador numérico elegido, en esta etapa se le asignan las propiedades de iteración. Una vez cubiertas todas las etapas se debe proceder a la calibración del modelo, con lo cual se concluye la etapa más importante en un estudio de simulación del flujo.

La formulación de los modelos conceptuales está afectada por incertidumbres. Estas incertidumbres dependen de la calidad y disponibilidad de los datos, además del nivel de confianza requerido para los objetivos del modelado, así como de la calidad y cantidad de los recursos disponibles para realizar el trabajo del modelado. Eliminar totalmente la incertidumbre es imposible e impráctico para el modelado del agua subterránea, por lo

que se debe de manejar dicha incertidumbre y comunicar sus efectos esenciales para el buen modelado, por lo que en este trabajo se seguirán las recomendaciones para el manejo de la incertidumbre en el modelo conceptual propuesta por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos (Groundwater Hydrology, 1999), las cuales se enuncian a continuación:

- 1.- Documente la calidad, cantidad, e integridad de los datos en los cuales se basa.
- 2.- Documenten las fuentes de los datos.
- 3.- Evalúe la necesidad de datos adicionales.
- 4.- Documentar las suposiciones de las condiciones de borde.
- 5.- Si un componente está fijo en un solo valor, o si una superficie del agua es fija como única, documente las suposiciones que se hará e implicaciones de las mismas.
- 6.- Si los componentes serán llevados adelante al modelo numérico como un rango o una distribución, documente cómo fueron derivados estos y por qué se hicieron, para que se encuentren dentro de los objetivos del modelado.

## **IV.- LOCALIZACIÓN Y CARACTERIZACION FISICA DE LA CUENCA DE CUITZEO**

La zona de estudio se localiza en la porción centro-norte del estado de Michoacán, entre los paralelos 19°30' y 20°05' de latitud norte y los meridianos 100°35' y 101°30' de longitud oeste (Figura IV.1). Geográficamente colinda con: el Estado de Guanajuato, al Norte; el poblado de Quiroga, al occidente; Zinapécuaro, al oriente; y las Sierras Alta y Mil Cumbres al sur. Comprende un área de 4000 Km<sup>2</sup>, calculada a partir de la definición y digitalización del parteaguas de la cuenca (Mendoza-Cantú, M.E, 2003). La altitud media del valle es aproximadamente de 2200 msnm, pero el lago actual se localiza en una altitud cercana a los 1826 msnm teniendo su punto de desborde en la localidad de La Cinta (1824 msnm).

El principal núcleo de población es la ciudad de Morelia, Michoacán, existiendo también importantes concentraciones poblacionales en Zinapécuaro, Cuitzeo, Huandacareo, Queréndaro, Álvaro Obregón, Charo, Indaparapeo y Tarímbaro, en los que la cuenca de Cuitzeo juega un papel vital.

La zona de estudio se encuentra comunicada con la Ciudad de México por medio de las carreteras federales números 15 y 43, así como por la Autopista de Occidente que va de la Ciudad de México a Guadalajara.

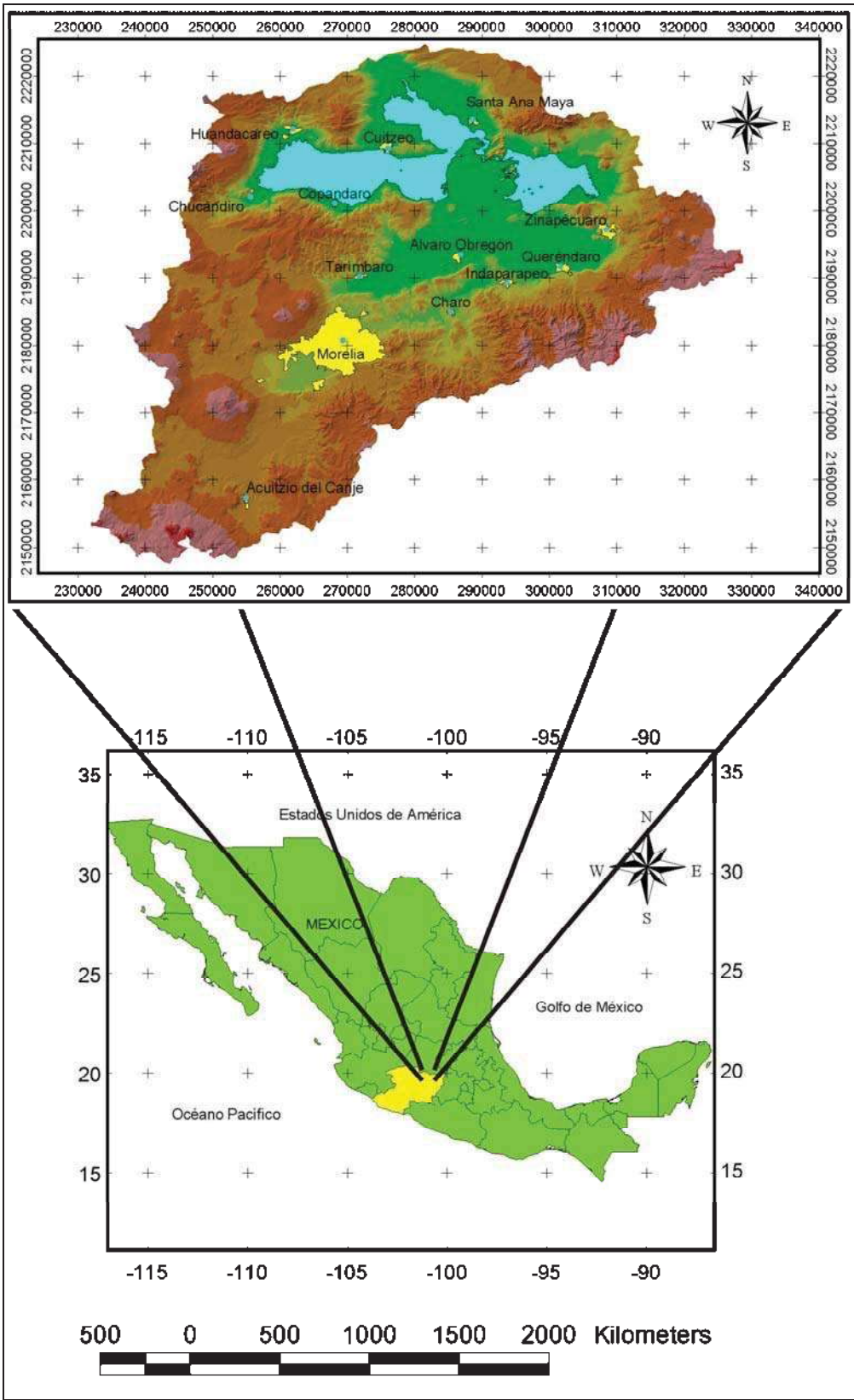


Figura IV.1. Localización de la cuenca de Cuitzeo.

## **IV.1. Población**

Dentro de la cuenca del Lago de Cuitzeo y de acuerdo con los resultados del censo oficial del INEGI 2000, se tiene una población total de 749,784 personas, que representa un poco más del 21% del total de los habitantes del Estado de Michoacán.

La ciudad de Morelia es la única dentro de la cuenca que tiene más de 600,000 habitantes, siguiéndole la ciudad de Zinapécuaro con una población de 14,670 habitantes, 28 localidades entre 2,000 y 9,999 habitantes y 425 comunidades con menos de 2,000 habitantes. (Clasificación INEGI, 2000)

## **IV.2. Actividades Económicas**

Los censos de población y vivienda efectuados por el INEGI en 1990, señala una población económicamente activa de 178,187 personas.

Dentro de la cuenca, las ocupaciones laborales que destacan son 6, las cuales se mencionan según el orden ocupacional:

(1) El comercio, (2) Agricultura-Ganadería-Pesca, (3) Industria Manufacturera, (4) Servicios Comunales y Sociales, (5) Construcción, (6) Servicios Personales y de Mantenimiento. El hecho de que el comercio sea la actividad más practicada, se debe a que el municipio de Morelia tiene más gente dedicada a ello, pero si se descarta el municipio de Morelia obtendríamos que la mayoría de la población se dedica a la Agricultura, Ganadería, Selvicultura y Pesca, es decir actividades primarias.

## **IV.3. Clima**

Según la clasificación de Köpen, modificada y propuesta para la República Mexicana por E. García (1988), en la cuenca del Lago de Cuitzeo predominan los tres tipos de clima pertenecientes al grupo de templados subhúmedos con lluvias en verano, los cuales se distinguen por tener humedades distintas.

El más húmedo de los climas templados subhúmedos con lluvias en verano pertenece a la clasificación C (W<sub>2</sub>) (W), que se presenta en el extremo sur del área de estudio, a partir de los 2100 msnm aproximadamente, es decir, en las estribaciones de la Sierra de Mil Cumbres. El segundo tipo de este clima es el C (W<sub>1</sub>) (W), el cual es de humedad intermedia, y cubre la mayor parte del área de estudio incluyendo a la ciudad de Morelia, Copándaro, Chucándiro, Queréndaro y Zinapécuaro. El menos húmedo de este tipo de

climas es el clasificado como C (W<sub>0</sub>) (W), mismo que abarca una porción considerable de la planicie de Álvaro Obregón, incluyendo a la población del mismo nombre, y las de Felipe Carillo Puerto, Benito Juárez, Estación Quirio, Cuitzillo Grande y San Agustín del Maíz.

Además de los templados subhúmedos está presente en la región el clima semicálido subhúmedo con lluvias en verano, en su tipo menos húmedo y clasificado como (A)C(W<sub>0</sub>)(W), presentándose en una pequeña porción de terreno localizada al Noroeste del poblado de Araró, municipio de Zinapécuaro.

#### IV.4. Temperatura

En la cuenca las temperaturas más elevadas se presentan en las planicies y bajíos (Figura IV. 2), y las menores temperaturas en las zonas montañosas. Cercas del Lago de Cuitzeo se tienen temperaturas medias anuales de 17.5° C, en el poblado de Álvaro Obregón y sus alrededores se observan temperaturas promedio de 18.5° C, disminuyendo hacia la sierra de Mil Cumbres donde se registran temperaturas de 16.5° C.

En la zona de estudio se tiene una temperatura media anual de 17.3° C, y de acuerdo con estudios de la CONAGUA se consideran dos intervalos de temperatura, uno de frío y el otro cálido. El primero de Octubre a Marzo y el segundo de Abril a Septiembre.

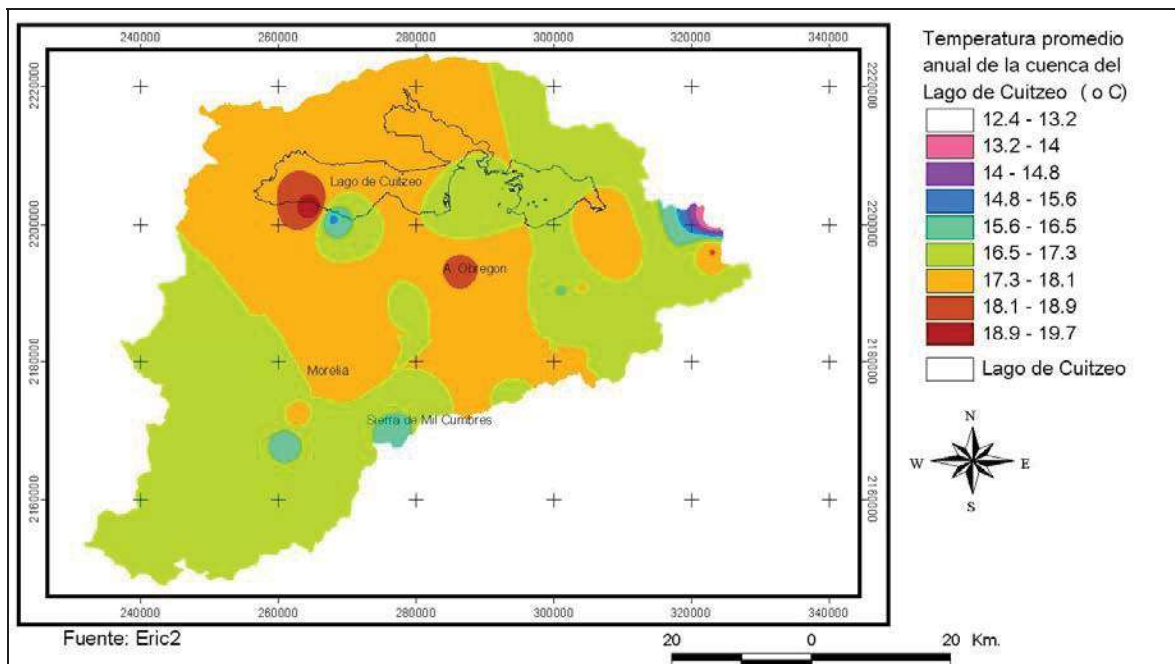


Figura II. 2. Temperatura promedio anual de la cuenca del Lago de Cuitzeo de acuerdo a los datos de Eric 2.

## IV.5. Precipitación

La precipitación está influenciada por el relieve, por lo que se dice que es de tipo orográfico. De acuerdo con los datos obtenidos y con base en los polígonos de Thiessen (Figura IV. 3) la precipitación media de la cuenca es del orden de 817.713 mm/año. Se observa que las precipitaciones que se registran dentro de la cuenca son muy variadas y éstas van desde 1395 mm, registrados en la Sierra de Mil Cumbres, hasta los 650 mm en las cercanías de los poblados de Cuitzeo, Atapaneo, Uruetaro, Cuitzillo El Grande, San Pedro de los Sauces, Tájaro, San Agustín del Pulque, Estación Queréndaro y Álvaro Obregón. Los poblados de San José de las Torres, El Lometón, Tarímbaro, El Colegio y La Ciudad de Morelia presentan una precipitación media anual mayor a 750 mm e inferior a los 800 mm/año. Los 800 mm se registran en las elevaciones del orden de 2,000 a 2,100 msnm. La temporada de lluvias ocurre en el periodo de Mayo a Octubre, siendo Julio y Agosto los meses de mayor precipitación, por otra parte, en el extremo opuesto encontramos al mes de Febrero con las precipitaciones más bajas.

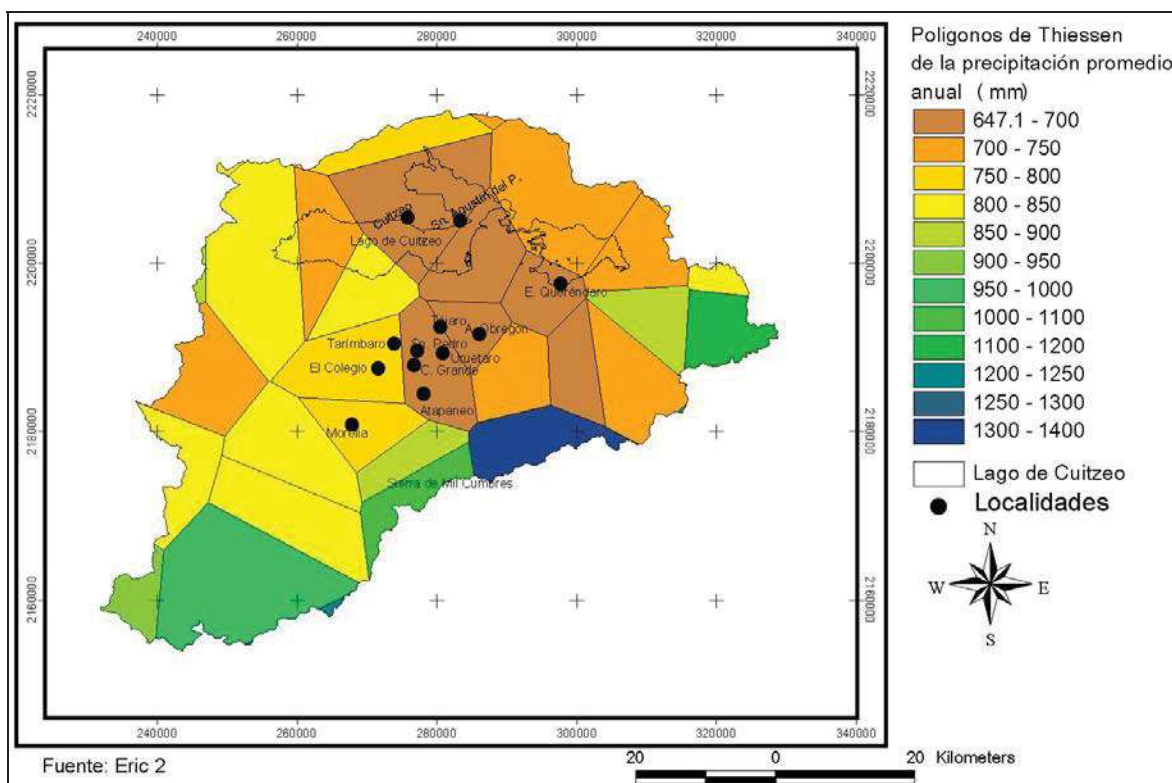


Figura II. 3. Precipitación promedio anual en la cuenca de Cuitzeo, destacan las altas precipitaciones de la Sierra de Mil Cumbres.

## II.6. Evaporación Potencial

Las mayores evaporaciones ocurren en las planicies y bajíos del área de estudio, mientras que las más bajas se localizan en las zonas montañosas (Figura IV. 4). Dicha evaporación se incrementa de Enero a Mayo y disminuye en el periodo de Junio a Diciembre, siendo el mes de Mayo el de mayor evaporación.

En el Norte, Este y Oeste del Lago de Cuitzeo y parte de la planicie de Queréndaro, se registra una evaporación media anual de entre 1831 y 1916 mm, aumentando la evaporación hasta 2,085 mm hacia la zona de Chehuayo, y en las cercanías de la comunidad Huingo. En el área de Téjaro y Álvaro Obregón ocurre una evaporación de entre 1746 y 1831 mm/año. Dentro de la ciudad de Morelia se evaporan alrededor de 1,705 mm/año. Las evaporaciones más bajas se ubican dentro de la Sierra de Mil Cumbres y parte sur del área de estudio con valores inferiores a 1408 mm.

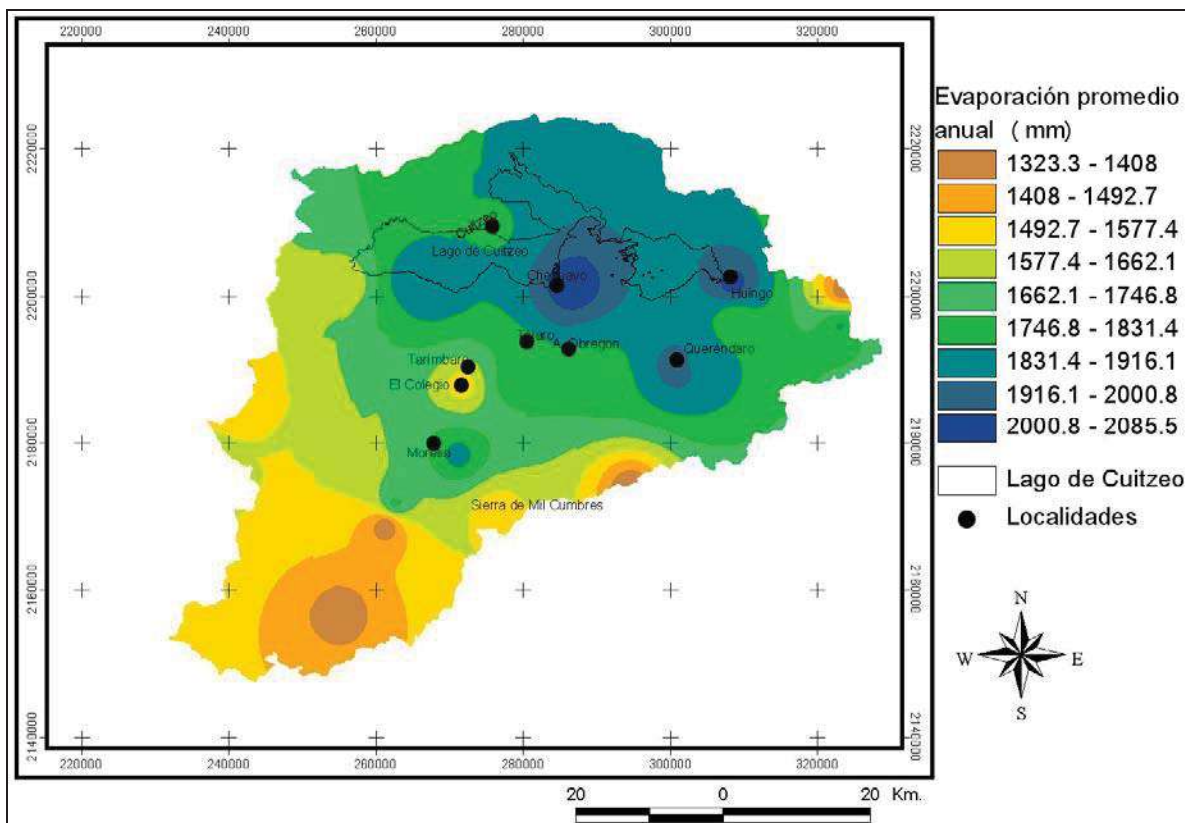


Figura IV. 4. Evaporación promedio anual de la cuenca del Lago de Cuitzeo, donde se observa que las evaporaciones más altas ocurren al centro del lago y al lado Este del mismo.

## **II.7. Hidrología Superficial**

La zona en cuestión se encuentra enclavada en la región hidrológica No. 12, denominada "Cuenca del Río Lerma"; al sur colinda con el parteaguas geográfico que la separa de la subcuenca del río Tepalcatepec, afluente del Balsas; mientras que al norte, se comunica con el Río Lerma, a través del dren artificial llamado "La Cinta".

## **II.8. Escurrimientos Superficiales**

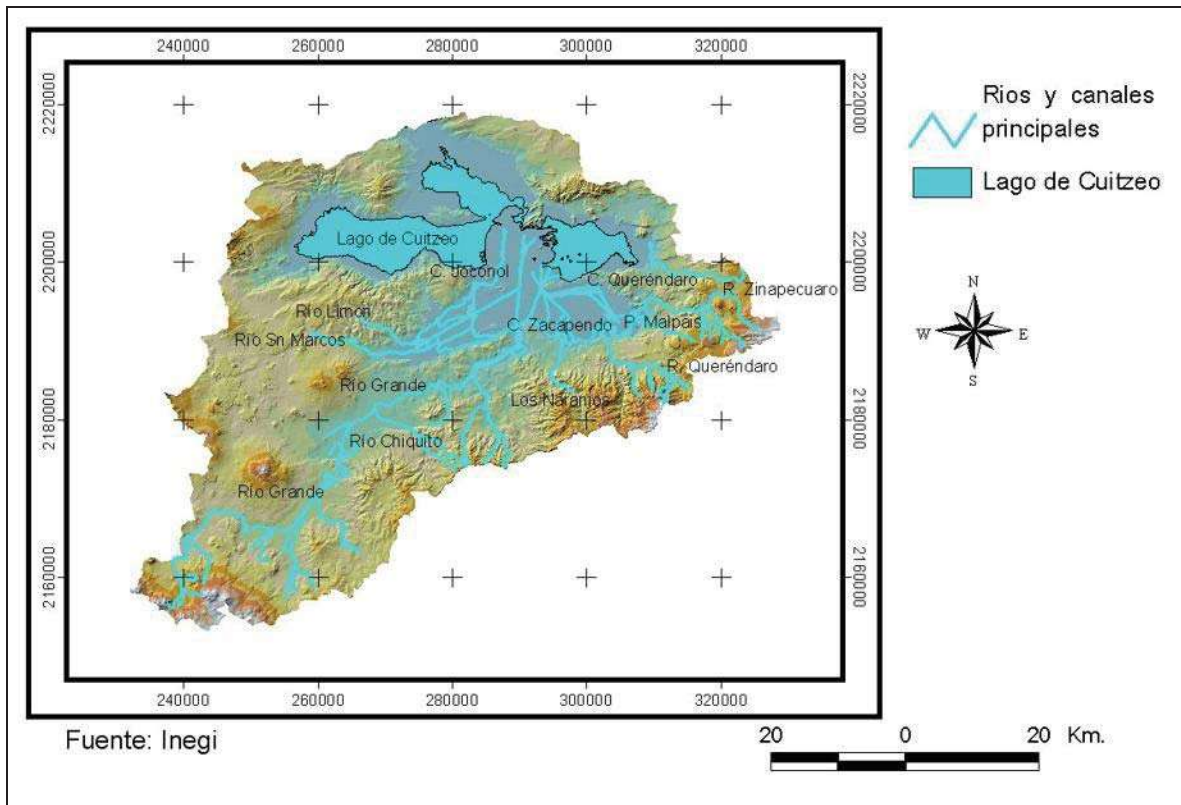
Las corrientes principales de la zona son los ríos Grande de Morelia, Queréndaro, San Lucas, Los Naranjos y Zinapécuaro, así como el arroyo San Marcos (Figura IV.5).

El Río Grande de Morelia nace de la unión de varios arroyos en la zona montañosa que se extiende al sur del área de estudio; mantiene un curso suroeste-noreste, y recibe varios tributarios por su margen derecha, antes de cruzar por la ciudad de Morelia. En Zacapendo, cambia bruscamente de dirección hacia el norte, entrando a la planicie de Álvaro Obregón-Queréndaro con un curso divagante, para desembocar al Lago de Cuitzeo. Su último tramo se modificó mediante la construcción del Canal Río Rectificado de Morelia. En el nacimiento de esa planicie, su escurrimiento es derivado a través de dos canales principales el Joconol y el Zacapendo.

Al sureste de la zona de estudio, de la confluencia de varios arroyos nace el Río Queréndaro, el cual originalmente divagaba por la planicie hasta desembocar al Lago de Cuitzeo; su curso fue rectificado para canalizar sus escurrimientos directamente a la presa Malpaís. Los principales afluentes del Río Queréndaro son los ríos San Lucas y Los Naranjos, que actualmente drenan artificialmente al Lago de Cuitzeo, por el canal central de Queréndaro.

El Río Zinapécuaro drena la porción oriental de la cuenca. Se origina en la zona montañosa, de la confluencia de varios arroyos, siguiendo un curso de sureste a noroeste hasta unirse con el río Agrio, en el borde superior de la planicie, desde donde es canalizado a la presa Malpaís.

En el extremo poniente de la cuenca, nace el arroyo San Marcos, que recibe los escurrimientos de los arroyos Tarímbaro y Téjaro. Originalmente, tenía un curso divagante en la planicie; en la actualidad, fluye a través de los drenes colectores del distrito de riego.



**Figura IV. 5. Principales ríos de la zona de estudio, donde destacan el Río Grande de Morelia que obedece al fallamiento NE-SO.**

# RESULTADOS

## V.- GEOLOGÍA

### V.1. Marco geológico

#### V.1.1. Depresión lacustre de Cuitzeo

Se considera que la depresión de Cuitzeo se extiende desde Zacapu hasta el Estado de México (Israde et al, 2003). En ella se observan dos altos importantes, como son el alto de Puruándiro-Huaniqueo y el alto de Los Azufres. Todos estos elementos estructurales están cortados por fallas NE-SO y E-O (Ferrari et al., 1994). Las estructuras NE-SO son más abundantes en el sector occidental y las E-O se observan mejor en el sector oriental.

Se ha definido que el borde sur de la depresión de Cuitzeo está dentro del Estado de Michoacán, mientras que el borde norte se ubica entre los estados de Guanajuato y de Querétaro (Israde-Alcántara, I. 1999).

El Lago de Cuitzeo está localizado en el límite septentrional de la cuenca del mismo nombre, actualmente ocupa una gran depresión dividida en dos subcuencas de forma asimétrica. Está tectónicamente delimitado por semigrabens constituidos principalmente por rocas volcánicas y productos fluviolacustres que tienden a depositarse hacia el lago, el cual presenta en su sector oriente espejos de agua permanentes, mientras que en la zona occidental el desecamiento es más frecuente en los años 1983 y 1998. La región de Cuitzeo se caracteriza por mostrar una morfología donde alternan pilares y fosas tectónicas con orientación E-O y NE-SO (Figura 1), en las que por la técnica gravimétrica se han observado valores de hasta 1,500 metros de espesor de sedimentos lacustres (Arredondo-Fragoso, J.J. 1983). La secuencia lacustre y fluviolacustre que se asoma en las inmediaciones del Lago de Cuitzeo sobreyace a un substrato volcánico miocénico de composición andesítica. Presenta una longitud aproximada de 20 kilómetros y topográficamente tiene un salto de más de 200 metros con respecto al bloque alto (Israde-Alcántara, I. 1999).

El sistema de semigrabens de Cuitzeo incluye además la subcuenca de Charo (Rico et al., 1995), esta se localiza al sur del actual Lago de Cuitzeo a 1880 msnm. Esta subcuenca se formó por la actividad del sistema de falla Morelia-Acambay (Sutter et al., 1992) causando

el basculamiento de los bloques hacia el sur y su sucesivo levantamiento hacia el norte. Este fenómeno también fue generado por reactivación de las fallas NE-SO. La región se encuentra comprendida dentro del sistema de fallas orientadas NE-OSO que cortan gran parte del sector central del Cinturón Volcánico Mexicano (Israde et al., 1992), y en particular en la zona de estudio se puede observar la sucesión lacustre que se apoya en discordancia directa entre un substrato volcánico, configurando un semigraben de 15 km de largo con desniveles de hasta 200 metros (Israde-Alcántara, I. 1999). A lo largo del margen septentrional del lago se observan depósitos lacustres recientes, mientras que al E y O se encuentran domos riolíticos y volcanes de edad Plio-Cuaternaria. En el sur aflora el basamento constituido por andesitas, ignimbritas y algunas dacitas del Mioceno medio (Figura V.1). (Israde-Alcántara, I. 1999).

Entre las subcuencas de Charo-Morelia se observa otro semigraben que presenta un relleno de rocas sedimentarias y epiclásticas de más de 1,500 metros observados a partir de los datos gravimétricos (Arredondo, 1983; Israde et al., 1992, Onida et al., 1998).

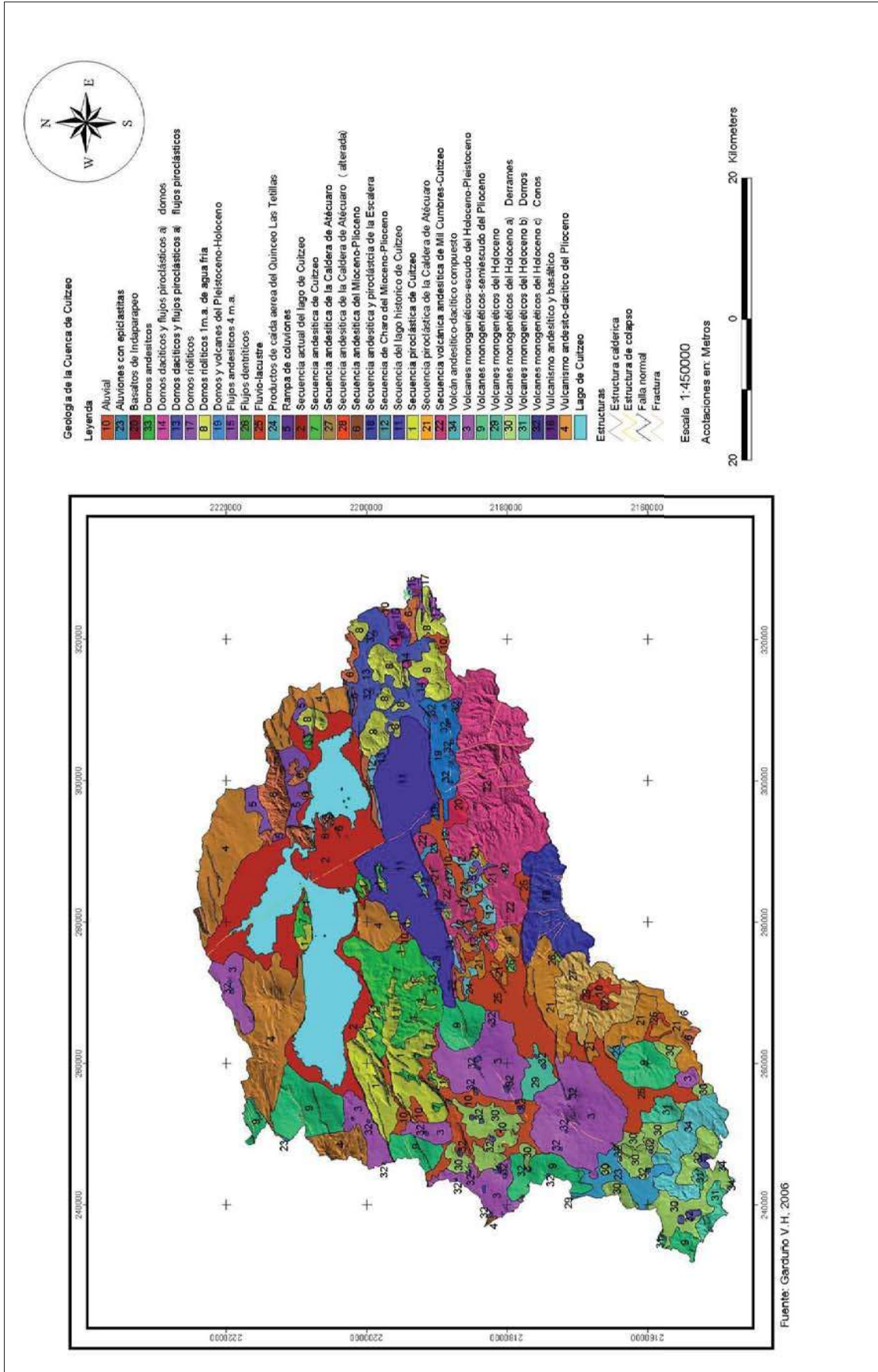


Figura V. 1. Geología de la Cuenca del lago de Cuzco, elaboró Garduño V.H., 2006.

### **V.1.2. Estratigrafía**

El registro estratigráfico más antiguo del paleolago de Cuitzeo está delimitado hacia el sur por la falla de Morelia y la secuencia de Mil Cumbres, mientras que hacia el norte es incierto debido a la falta de afloramientos y a la acumulación de depósitos aluviales y la actividad agrícola principalmente. Sin embargo, los depósitos de la zona de Tzintzimeo presentan una gran similitud con los existentes en la región sur del paleolago, lo cual permite inferir que posiblemente formaba parte de un solo cuerpo de agua (Israde-Alcántara, I. 1999).

Estudios relacionados a la evolución del sistema lacustre (Garduño et al., 1992; Israde-Alcántara, I. 1993; Israde-Alcántara, I. 1995; Israde-Alcántara, I. 1998; Israde y Garduño, 1999), tuvieron el propósito de reconstruir la geometría inicial del Lago de Cuitzeo y de establecer la cronología de los eventos tectónicos con apoyo de estudios de tipo estructural, estratigráficos y micro paleontológicos. En estos trabajos se sugiere una edad de formación de la cubeta lacustre del Mioceno superior ( $8 \pm 0.2$  Ma.) basados en las lavas andesíticas que subyacen los depósitos lacustres en contacto discordante. La secuencia vulcano sedimentaria presenta espesores aflorantes de hasta 50 metros y se reduce gradualmente hacia los márgenes donde las variaciones laterales, obviamente son comunes. Los ambientes de sedimentación varían de litorales de aguas bajas a profundas en pocos kilómetros (Israde Alcántara, I.1999).

Los elementos que conforman la depresión están caracterizados, de la base a la cima; por un basamento relativo constituido por andesitas miocénicas (13.6 a  $8 \pm 0.2$  Ma., IMP, 1986; CFE, 1986), las cuales se exhiben muy fracturadas. En algunos casos sobre estas andesitas se observan secuencias de ignimbritas miocénicas de composición calco-alcalina (Silva-Mora, L. 1979) y forman parte de la cantera de Morelia. A estas secuencias le sobreyacen los depósitos lacustres que presentan alternancias de facies de diatomita pura depositada durante periodos de calma vulcanotectónica; y está interestratificada con los depósitos piroclásticos como tobas y cenizas. Con menos persistencia se tienen niveles fluvio-lacustres de tipo conoide aluvional como son arenas y gravas, en las arenas se pueden observar estructuras primarias tales como estratificación cruzada, marcas de rizaduras (ripple marks), laminación convoluta, que evidencian la ubicación y energía de la línea de

riba. La secuencia lacustre se encuentra sobreyacida por depósitos fluviales de tipo tempestivo caracterizados por macroconglomerados con matriz volcánica cuyos diámetros de los clastos alcanzan entre 10 y 40 centímetros (Israde-Alcántara, I. 1999).

En relación a la edad asignada a la cima de la secuencia, Miller y Carranza (1984), fecharon un nivel cinerítico en 3.6 Ma. (Blancano- Plioceno medio). Por otra parte Silva-Mora (1995) considera que los materiales que componen la secuencia lacustre iniciaron su acumulación en el Plioceno tardío y los cartografiaron como QTI (Depósitos de lacustre Pliocénicos cuaternarios).

Esa edad se registró en la cima de la secuencia lacustre por lo que se infiere que la secuencia tuvo su desarrollo a partir del Mioceno superior, con base en las lavas andesíticas que subyacen los lacustres y la presencia de la flora arcaica de diatomeas (Serieyssol et al., 1998) estos depósitos son coronados en discordancia angular por basaltos Plio Cuaternarios con edades de 2.8 Ma.(Pasquaré et al., 1991) y en ocasiones por lavas cuyas emisiones han sido históricas (Garduño Monroy et al., 2002; Martínez y Hobson, 1907).

## **V.2. Geología del subsuelo**

Para realizar la geología del subsuelo se hizo un trabajo de gabinete, el cual consistió en la recolección de los registros litológicos, obteniéndose del diseño constructivo de los diferentes pozos dentro de la zona de estudio, sondeos eléctricos verticales, estudios geohidrológicos y geofísicos, dicha información fue recabada de los archivos de la Comisión Nacional del Agua de Michoacán.

Posteriormente se ubicaron los pozos en un plano topográfico escala 1:50,000, obteniéndose así el mapa de localización de los diferentes pozos dentro de la zona de estudio (Figura V. 2). Una vez que se obtuvo el mapa con la localización de los pozos, se procedió a la realización de los perfiles litológicos (Figura V.2), los cuales se trazaron con una dirección preferencial de Sur a Norte y procurando que dichos perfiles pasarán por la mayor cantidad posible de pozos ó datos de sondeos eléctricos verticales (SEV's), con la finalidad de tener una mejor correlación del subsuelo.



### **V.2.1. Perfil 1-1'**

El perfil 1-1' parte con una dirección SE-NO y tiene una longitud de 55 Km (Figura V. 3), comienza en la Sierra de Mil cumbres y llega al Lago de Cuitzeo, pasando por varias poblaciones entre las que destacan Santiago Undameo, La Presa de Cointzio, San Juanito Itzicuaró, Las Canoas y el Lago de Cuitzeo.

El perfil I se inicia en la Sierra de Mil Cumbres que tiene una elevación de 2200 msnm, la cual está formada por flujos piroclásticos riolíticos. Al final de la sierra se encuentra la presa de Cointzio que alimenta de agua potable a un sector de la ciudad de Morelia. En la cortina de la presa se observa claramente un desnivel topográfico de 160 m, dicho desnivel es lo que se conoce como la falla normal de Cointzio, siendo un segmento de la falla más grande del área de estudio, ya que forma parte del sistema de fallas Morelia-Acambay con una longitud de 300 km.

Dentro de la zona encontramos el valle de Morelia, que está caracterizado por ser un valle alargado con una orientación E-O y una elevación promedio de 1900 msnm, en el valle apreciamos 2 bloques con basculamiento hacia el sur. El primero de ellos se encuentra entre la falla de Cointzio y el pozo # 127 del poblado de San Juanito Itzicuaró. Entre estos dos puntos se observa un desnivel topográfico aparente de 160 m y un desnivel real de 200 m, tomando como el desnivel topográfico aparente la distancia entre la parte alta de la falla de Cointzio y el nivel del poblado de San Juanito y el desnivel real, medido desde la parte alta de la falla y la profundidad dentro del pozo o poblado que se encuentra el mismo tipo de litología que el de la parte alta de la falla Cointzio que en este caso está formado por material riolítico. El bloque presenta un ángulo de basculamiento de 7 grados, medido desde la superficie horizontal hasta el hechado del bloque; y el segundo bloque está localizado entre la población de San Lorenzo Itzicuaró y el cerro del Quinceo, presentando un ángulo de basculamiento de 8 grados, de igual forma medido que el anterior, el bloque está constituido por material volcánico, principalmente por basalto o andesitas.

Más adelante encontramos la sierra con elevaciones variables en un intervalo que va desde los 2100 a los 2400 msnm, la cual está constituida por material de origen volcánico encontrándose flujos piroclásticos riolíticos, andesitas, basalto y material de origen fluvial.

Terminada la sierra se encuentra el Lago de Cuitzeo el cual está caracterizado por ser un lago alargado en dirección E-O, en ésta parte del lago se tiene ubicado un pozo # 35 en la población de Copándaro que nos ayuda a darnos una idea del basamento del lago, en el que

notamos un basculamiento del basamento volcánico del Mioceno del lago con dirección hacia el sur por las direcciones invertidas en ambas partes de las orillas del mismo.

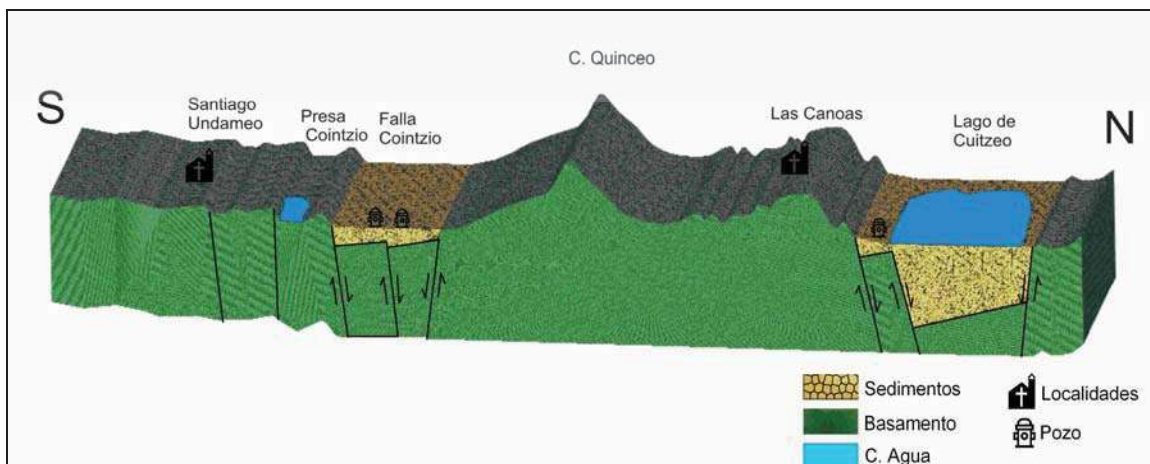


Figura No. 3. Perfil 1-1' (SE-NO).

### V.2.2. Perfil 2-2'

El Perfil 2-2' parte en dirección sur a norte con una longitud de 39 Km. (Figura V. 4), inicia entre la parte final de la Sierra de Mil Cumbres y el Observatorio de la Ciudad de Morelia, cruza por la parte poniente de la ciudad de Morelia así como por las poblaciones de Guadalupe, Cañada de los Sauces, Nispo, el Lago de Cuitzeo y Capacho.

Como mencionamos el perfil se inicia en la Sierra de Mil Cumbres con una elevación de 2,000 msnm, se observa la existencia de 4 bloques basculados hacia el sur dentro del valle de la Ciudad de Morelia. El primero de estos bloques está localizado entre la parte alta de la falla de La Paloma y el pozo # 75 que se ubica en La Huerta, encontrando un desnivel aparente de 100 m y un desnivel real de 134 m, con un ángulo de basculamiento de  $9^\circ$ . El segundo bloque es el que se ubica por medio del pozo # 83 de la colonia Torremolinos, en el se observa un desnivel topográfico real de 72 m, presentando un basculamiento hacia el sur con un ángulo de  $10^\circ$ . El tercer bloque está definido por medio de dos pozos, el primero de ellos es el pozo # 67 ubicado en Cosmos II y el segundo pozo está localizado con el # 79 en la Industrial OKEN, presentando una profundidad de 76 m. para la parte del pozo en Cosmos II y 69 m. para el pozo de Industrial OKEN, formando de esta forma un bloque basculado hacia el sur y con un ángulo de basculamiento de  $12^\circ$ . El cuarto bloque solamente está marcado por el pozo # 61 de la colonia López Mateos, donde se tiene un

desnivel topográfico aparente de < 20 m y desnivel real de 130 m. Por falta de más datos no se pudo saber exactamente su basculamiento, pero seguramente será superior a los 15°. Cabe mencionar que en el Valle de Morelia existe material de tipo riolítico, el cual está relleno por material areno-arcilloso y gravas de origen lacustre. El valle tiene una orientación preferencial de este-oeste. Una vez cruzado el Valle de Morelia inicia el sistema montañoso con una longitud de 16 Km. y elevaciones que van del orden de 2,000-2,200 msnm. el cual está formado principalmente por material basáltico y flujos piroclásticos riolíticos.

Al termino del sistema anteriormente descrito se puede observar un basculamiento de un bloque en la localidad de Nispo, en el que se observa un desnivel topográfico aparente de 340 m y un desnivel real de 500 m, estos desniveles están medidos entre la parte más alta de la sierra y la elevación del pozo, y entre la elevación de la sierra y la elevación del bloque basculado respectivamente.

Cabe señalar que dentro del vaso del Lago de Cuitzeo se tiene material de origen lacustre y aluvial como son las arcillas y arenas principalmente, encontrándose asimismo que está limitado en la parte sur y norte por fallas antitéticas, es decir, formando una especie de graben.

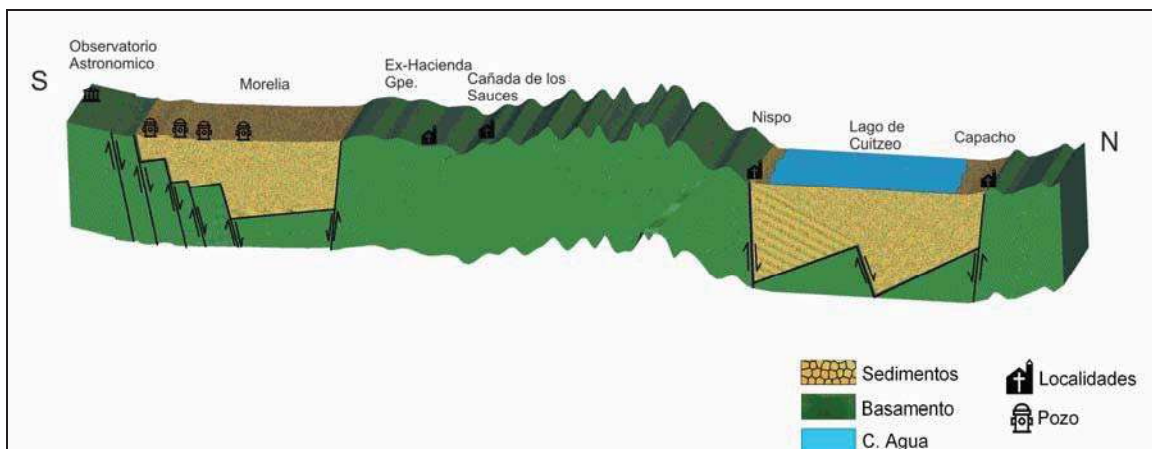


Figura V. 4. Perfil 2-2' (S-N)

### V.2.3. Perfil 3-3'

El perfil 3-3' (Figura V.5), parte de la porción sur de la Ciudad de Morelia con una longitud de 38.5 km. Comienza en la parte final de la Sierra de Mil Cumbres, cruza la ciudad de

Morelia, las poblaciones de la Yerbabuena, Copándaro y finalmente el Lago de Cuitzeo. En la ciudad de Morelia encontramos 6 bloques basculados y un horst, los cuales se describen a continuación.

Este perfil comienza en la Loma de Santa María con una elevación de 2,220 m, el primer bloque lo ubicamos en el pozo # 62 de Arroyo Agua Clara, que para este caso presenta un desnivel aparente de 100 m. y un desnivel real de 106 m. El segundo bloque, se ubica por medio del pozo # 88 que se ubica en Valle Quieto, y debido a que dentro del pozo no se encontró ningún material riolítico o basáltico hasta la perforación del pozo (126 m), se tiene un desnivel aparente de 40 m y un desnivel real de 166 m, el cual fue medido desde el lugar donde se ubica el panteón Jardines del Tiempo de la ciudad de Morelia hasta el lugar donde se localiza el pozo, el bloque presenta un ángulo del basculamiento de  $11^{\circ}$ . El tercer bloque está ubicado por el pozo # 65 localizado en C.U., en el que se tiene la profundidad del bloque a 24 m, el cual fue medido desde una elevación de 1900 msnm y con un ángulo de basculamiento de  $11^{\circ}$ . El cuarto bloque basculado se observa por el pozo # 71 que está ubicado en el IMJUDE, en el que presenta un desnivel topográfico aparente  $< 20$  m y un desnivel real de 42 m, siendo la profundidad a la que encontramos la toba lítica y con un ángulo de basculamiento de  $10^{\circ}$ . El quinto bloque lo encontramos en el pozo # 73 de la antigua refresquera Jarritos con una elevación de 1900 msnm en el que encontramos un desnivel topográfico aparente de  $< 20$  m y un desnivel real de 120 m. Estos bloques descritos anteriormente están cubiertos por material de origen fluviolacustre entre los que encontramos arcillas, gravas, arenas y limos.

Continuando dentro de la zona de Morelia encontramos una falla normal, la cual esta ubicada por medio de 3 pozos, el primero de ello es el pozo # 74 conocido como La Cartonera (frente al Realito), el segundo de estos es el pozo # 68 de la Ex-Hacienda el Realito y el último es el pozo Solidaridad # 86, y con base en sus litologías se logra observar que el basalto está casi de forma superficial a una profundidad de 2 m, 2 m y 4 m respectivamente.

En el valle de Morelia se logran apreciar los derrames de lava en la parte norte de la ciudad, producto de la actividad volcánica del Cerro del Quinceo o Tetillas del Quinceo y la forma que conserva el valle sigue siendo alargada en la dirección E-O y es un poco más amplio que en el perfil anterior.

Pasando el valle de la ciudad de Morelia se observa una falla normal denominada Falla de Tarímbaro, entre esta falla y el pozo # 45 localizado en la localidad de Peña del Panal se observa un desnivel topográfico aparente de 120 m. y un desnivel real de 242 m y con un ángulo del bloque de  $12^\circ$ , entre la falla anteriormente descrita y la sierra forman un valle con una orientación este-oeste. Pasando la planicie de Tarímbaro se inicia la sierra con una longitud de 10 km y con elevaciones que van desde los 2,000 a los 2,260 msnm, la cual está formada principalmente por material basáltico, andesítico, y flujos piroclásticos riolíticos.

Una vez terminada la sierra, comienza el Lago de Cuitzeo que conserva su orientación preferencial este-oeste en él se observan depósitos superficiales que por falta de datos no se pueden correlacionar, al término del lago en el perfil comienza a aumentar la altura hacia el Cerro Manuna.

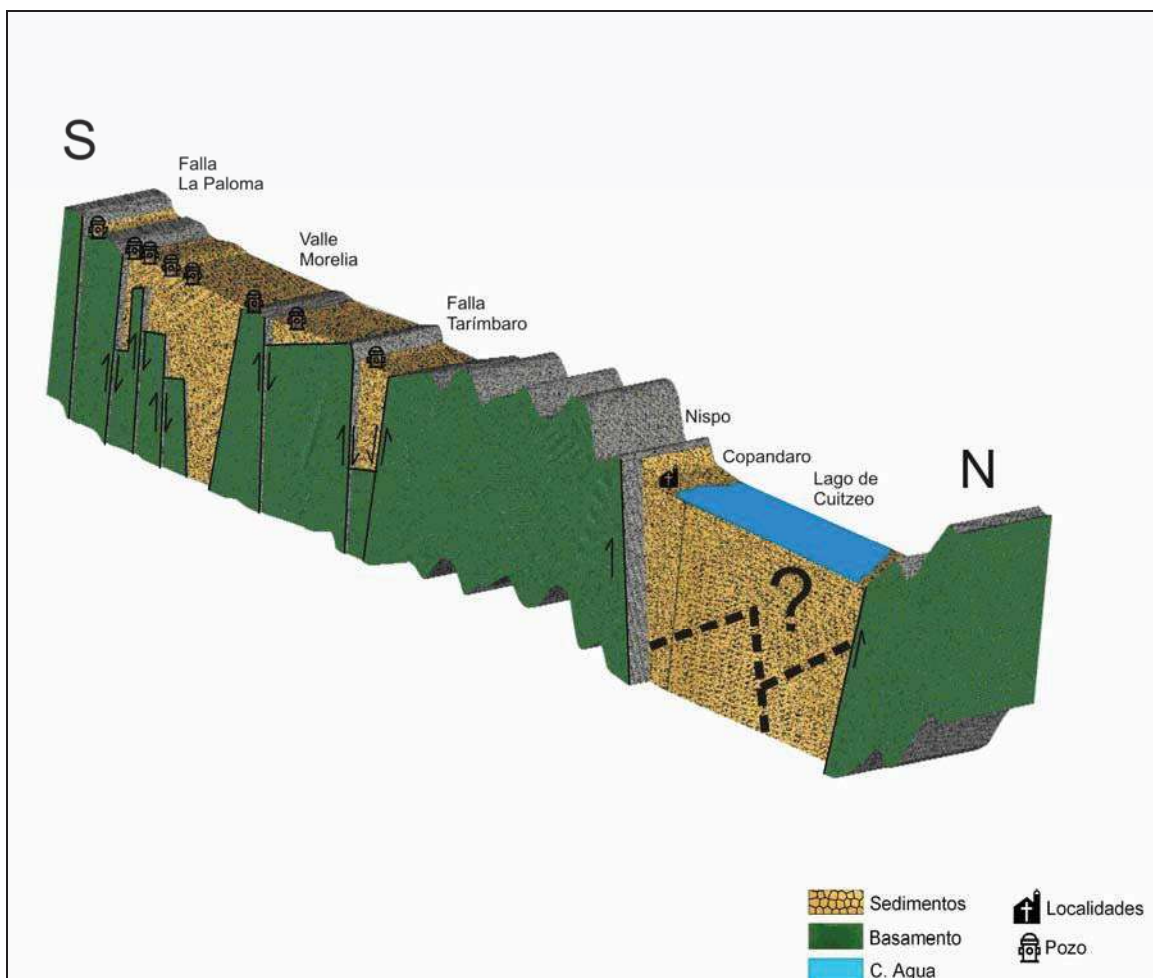


Figura V. 5. Perfil 3-3' (S-N)

#### **V.2.4. Perfil 4-4'**

Comienza en la parte alta de la Falla La Paloma, en Loma Larga con una pequeña inclinación hacia la parte noroeste y una longitud del perfil de 38 km (Figura V. 6), pasando por la ciudad de Morelia, Col. Francisco Villa, El Colegio, Tarímbaro, San Agustín del Maíz, el Lago de Cuitzeo y finalmente cerca de la población de Dr. Miguel Silva.

Dentro de la ciudad de Morelia se observan 2 bloques basculados hacia el sur, los cuales se describen a continuación. Comenzando en Loma Larga, se observa un cambio de pendiente muy pronunciada la cual es debida a la falla de La Paloma, entre esta falla y el pozo # 87, que se ubica en el boulevard García de León (6 de Julio), en el que se observa un desnivel aparente de 190 m y un desnivel real de 246 m y con un ángulo de basculamiento del bloque de  $14^\circ$ . Dicho bloque está formado por toba riolítica, la cual es característica del Valle de Morelia.

Después del bloque se forma una falla normal la cual se aprecia por la forma del perfil y por diferencia de elevaciones entre el valle y la elevación del pozo # 69 que se ubica en la colonia Enrique Ramírez, dicha diferencia es de 40 m. El segundo bloque basculado se ubica en el Mercado de Abastos por medio del pozo # 77, para el cual se tiene un desnivel aparente de 40 m y un desnivel real de 52 m dichos desniveles fueron medidos entre la parte alta de la falla normal y la elevación del pozo y entre la parte alta de la falla y la elevación de la toba riolítica; presenta un ángulo de basculamiento de  $9^\circ$ .

El valle de la ciudad de Morelia sigue conservando su geometría para este perfil con la misma orientación este-oeste y solamente se amplía un poco más que en el perfil anterior en la parte norte.

Puede observarse claramente como el valle de Morelia está delimitado en su parte norte por la falla de Tarímbaro, la cual guarda una dirección preferencial este-oeste. Dentro de la planicie de Tarímbaro se ubicó el pozo # 115 con el nombre de El Colegio, en el cual observamos un bloque basculado hacia el sur con un desnivel topográfico aparente de 120 m y un desnivel real de 288 m ambos desniveles están medidos entre la parte alta de la falla y la elevación del brocal del pozo y entre la parte alta de la falla y el bloque basculado respectivamente. Éste bloque forma un ángulo de  $10^\circ$  el cual está formado por material de origen basáltico y andesítico.

Una vez terminado el bloque comienza la sierra con elevaciones del orden de los 2,050-2,150 msnm y con una longitud de la misma de 10.5 km. Al igual que en los anteriores perfiles está constituida por material basáltico, andesítico y mesas de flujos piroclásticos riolíticos.

Una vez terminada la sierra, se inicia el Lago de Cuitzeo continuando con su orientación preferencial este-oeste y con una ligera desviación hacia el norte, dentro del lago se tienen depósitos superficiales que por falta de datos no se pueden correlacionar, una vez terminado el lago comienza a subir la topografía hacia el Cerro Manuna, en las faldas del mismo encontramos el pozo # 47 con el nombre de Cuitzeo (Chupícuaro) en el que se logra apreciar un desnivel topográfico aparente < 20 m y desnivel real de 32 m, dicho pozo presenta un ángulo de basculamiento del bloque de 14°.

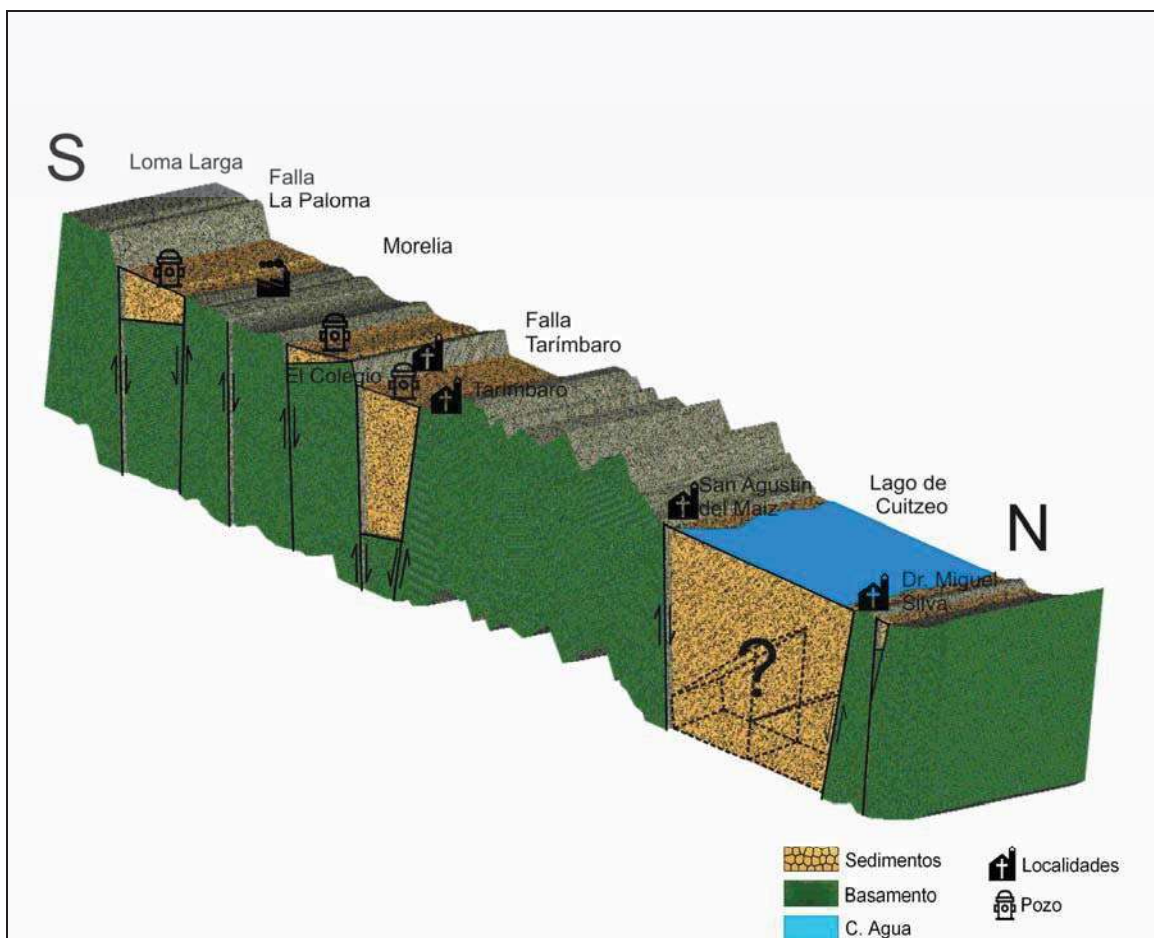


Figura V. 6. Perfil 4-4' (S-N)

### **V.2.5. Perfil 5-5'**

El Perfil V parte en dirección SO-NE y tiene una longitud de 33 km, pasa por la Ciudad de Morelia, Ciudad Industrial, cerca de San José de la Trinidad, Cuto del Porvenir, La Palma, Cruzando el Lago de Cuitzeo y finalmente el poblado de Cuitzeo (Figura V. 7).

Comienza en la parte alta de la Loma de Santa María de la ciudad de Morelia con una elevación de 2,160 msnm, se observan dos bloques basculados dentro de este perfil que a continuación se describen. El primero de ellos lo ubicamos por medio del pozo # 78 que se encuentra en la colonia Jardines del Rincón, para el cual tenemos un desnivel topográfico aparente de 220 m y un desnivel real de 232 m los cuales fueron medidos entre la falla La Paloma y la elevación del brocal, y entre la falla y la elevación del bloque basculado, respectivamente. Presenta un ángulo de 8° de basculamiento, el cual está formado de basalto y andesitas. El segundo bloque encontrado dentro del valle de la ciudad de Morelia está referido por medio del pozo # 85 ubicado en la Ciudad Industrial, en dicho bloque se tiene un desnivel topográfico aparente de 90 m y un desnivel real de 136 m medido entre la parte alta de las lavas producto del Cerro del Punhuato y la elevación del brocal, y entre las lavas del cerro hasta la profundidad a la que se encuentra el bloque, el bloque está formado por material basáltico y andesítico, y presenta un ángulo de basculamiento de 10°.

Una vez descrito los dos bloques que se ubican dentro del valle de la ciudad de Morelia, se observa otro bloque con un tipo de falla normal que delimita el valle de Morelia. La falla normal tiene una elevación promedio 1,980 msnm y para éste perfil tiene una orientación preferencial suroeste-noreste, cabe hacer notar que dentro de esta falla es por donde pasa la carretera que comunica a Morelia con Moroleón, por otra parte se observa que la planicie de Tarímbaro se amplía un poco más que en los perfiles anteriores.

Después de la falla normal nótese que se forma una estructura de tipo Graben, la cual fue identificada por medio de tres pozos que se tienen cerca de la zona. Para el primer caso se trata del pozo # 15 que se ubica en El Trébol donde se tiene un desnivel topográfico aparente de cerca de 120 m y un desnivel real de 164 m, con un ángulo del bloque basculado de 10°. El segundo pozo es el # 115 de la comunidad El Colegio el cual está transpuesto, lo que significa que el perfil no pasa directamente por el pozo, este bloque tiene la característica de estar más abajo que el bloque anterior, y se encuentra a una profundidad de 168 m con un ángulo de basculamiento de 10°. El Tercer bloque está ubicado por el pozo # 37 nombrado Cañada de la Magdalena, en el se tiene un desnivel

topográfico aparente < 20 m y un desnivel real de 46 m, profundidad a la que encontramos el bloque basculado, dicho bloque presenta un ángulo de basculamiento de 11°, constituido de material basáltico andesítico. Después de la estructura de tipo graben se inicia la sierra que se viene presentando en los perfiles anteriores, para este caso las elevaciones de la sierra varían de los 1,920 a 2,180 msnm con una longitud de 11 km, al igual que los anteriores está formada por material andesítico y basáltico.

Al final de la sierra le sigue el Lago de Cuitzeo que por falta de datos no se puede correlacionar o definírsele. Sin embargo, pasando una pequeña línea en forma de meseta tenemos un pozo al final del perfil con el nombre de Epifanio Pérez y # 33 el cual tiene un desnivel topográfico < 20 m y un desnivel real de más de 40 m (por falta de toda la información litológica). El pozo presenta hasta la profundidad de 40 m material arenoso y gravas de origen fluvial y grava de origen basáltico y andesítico.



Figura V. 7. Perfil 5-5' (SO-NE)

### **V.2.6. Perfil 6-6'**

El perfil comienza con una dirección preferencial de sur a norte y con una longitud del mismo de 33 km (Figura V. 8) pasando por las siguientes localidades: Buenavista, Atapaneo, Cuitzillo Grande, El Lometón, cerca de La Noria, cerca de San Juan Tarameo y el Lago de Cuitzeo.

Comienza en la parte alta de la falla de La Paloma con una elevación de 2,260 msnm, se aprecia claramente el desnivel que tiene la falla de La Paloma para este perfil, la cual es de 250 m. y en la que por falta de alguna litología cerca del perfil no se pudo determinar con exactitud el desnivel real de la falla.

El perfil cruza por una parte del cerro de Punhuato, hasta llegar al cauce del río Grande de Morelia, en esta depresión topográfica se encuentra un pozo cercano con el nombre de La Aldea y # 112, el cual nos marca que la profundidad a la cual encontramos el bloque basculado es de 62 m.

Cabe señalar que para este caso, el Valle de Morelia se ve disminuido drásticamente por el cerro de Punhuato, quedando comunicado con el valle de Queréndaro de manera natural por donde pasa el río Grande de Morelia. Nuevamente se presenta la falla normal o falla de Tarímbaro, aumentando su ancho hasta 4,000 m, mientras que para los perfiles anteriores presentaba un ancho cerca de los 3,000 y 3,500 m.

Continuando con nuestro recorrido del perfil, se presentan seis bloques basculados para el valle de Álvaro Obregón los cuales se describen a continuación: El primero de los bloques se observa en torno del pozo # 120 ubicado en Cuitzillo, en el se tiene un desnivel topográfico aparente de 140 m y un desnivel real de mas de 370 m, los cuales fueron medidos desde la parte alta de la falla normal de Tarímbaro hasta la elevación del brocal, y entre la falla normal y el bloque basculado, respectivamente. Cabe aclarar que el bloque basculado tiene una profundidad de 230 m a partir de la elevación del brocal hasta donde se realizó la perforación total del pozo. Debido a que no se encontró ningún material de origen volcánico en toda la litología este desnivel real podría aumentar. El segundo bloque basculado lo encontramos en el pozo # 106 conocido como El Pantano, en el se tiene un desnivel topográfico < 20 m y desnivel real 2 m, con un ángulo de inclinación de basculamiento de 11°. El tercer bloque basculado está ubicado en el pozo # 105 conocido como Plan de Ayala, este pozo tiene un desnivel topográfico aparente < 20 m y desnivel real de 32 m, con un ángulo del bloque basculado de 14°. El cuarto bloque basculado está

ubicado con el nombre Téjaro de los Martínez y # 104, presenta un desnivel topográfico aparente < 20 m y un desnivel topográfico real de 122 m, profundidad a la que se encuentra la andesita, con un ángulo de basculamiento de 13°. El quinto bloque basculado lo encontramos en el pozo # 103 conocido como El Borrego, en el que se tiene un desnivel topográfico aparente < 20 m y un desnivel topográfico real de 82 m, con un ángulo de basculamiento del bloque de 15°, dicho bloque está formado de material andesítico. El sexto bloque que se presenta dentro del valle Álvaro Obregón es el que se encuentra por medio del pozo # 102 ubicado en el Plan de la Noria, presenta un desnivel topográfico aparente < 20 m y un desnivel real de 104 m, y un ángulo de basculamiento de 14°, dicho bloque se forma al igual que los anteriores de material basáltico.

En este perfil se observa que el valle se amplía conservando básicamente la misma orientación este-oeste, además, se observa que la sierra se ve disminuida para este perfil. Como ya se mencionaba anteriormente la sierra disminuye notablemente a una longitud de 7.00 km y sus elevaciones van del orden de los 2,000 a 2,080 msnm, la cual está formada por flujos piroclásticos de riolita y andesitas. Una vez terminada la sierra, el Lago de Cuitzeo guarda la misma orientación este-oeste y por falta de datos no se puede determinar el espesor de sedimentos o tener una idea del basculamiento.

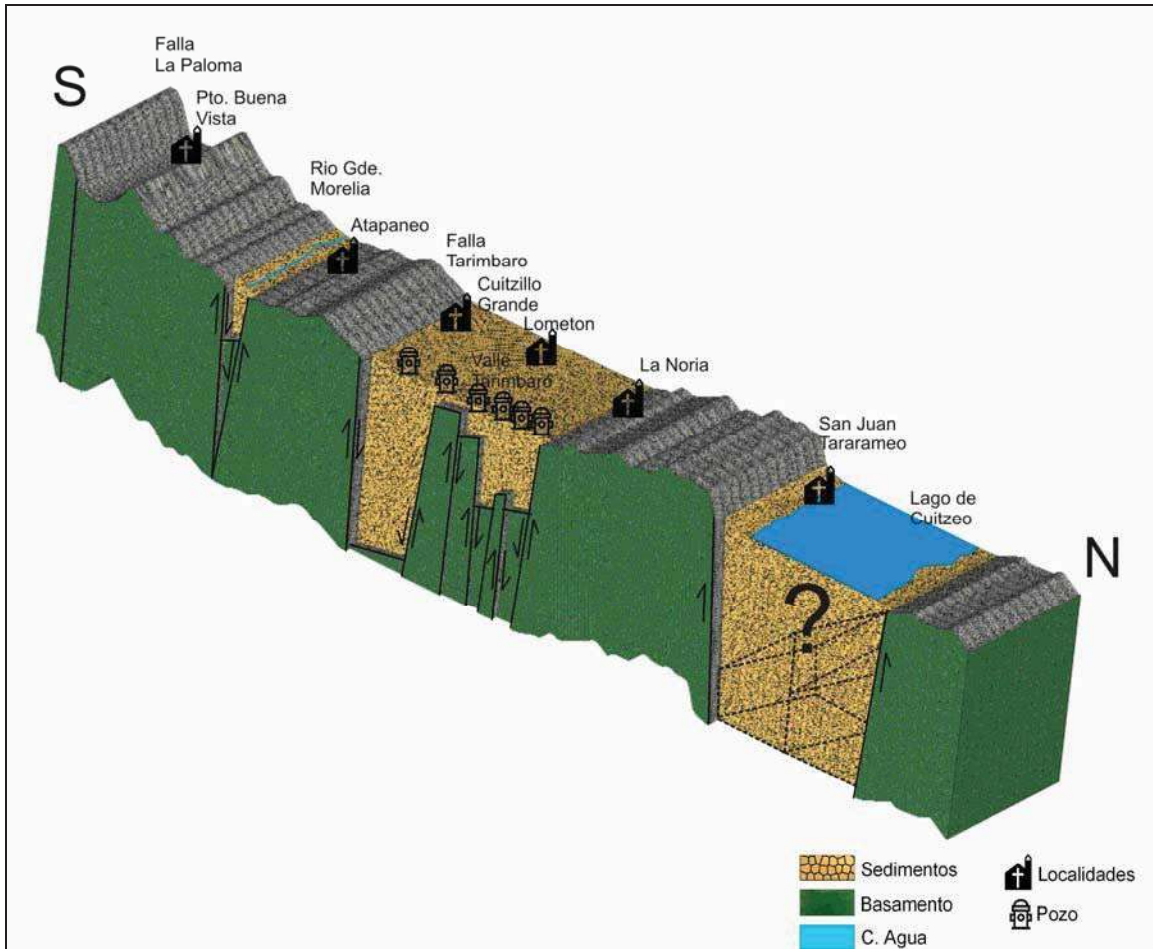


Figura V. 8. Perfil 6-6' (S-N)

### V.2.7. Perfil 7-7'

El perfil 7-7' comienza con una orientación suroeste-noreste y tiene una longitud de 37 km, pasa por los siguientes poblados: Las Mesas, Jaripeo, La Goleta, cerca de Uruétaro, Emiliano Zapata, Chehuayo chico, el Lago de Cuitzeo y el poblado de San Agustín del Pulque (Figura V. 9).

Comienza en la Sierra de Mil Cumbres con una elevación de 2,200 msnm, a pocos metros del principio del perfil se localiza el pozo # 49 con el nombre de Jaripeo 2, en el cual la roca se encuentra a 10 m de profundidad, la cual no se indica debido a que es superficial. Posteriormente se observa un desnivel topográfico de 200 m y un desnivel real de 200 m, el cual parece ser el desnivel de la falla La Paloma y para este caso es el mismo desnivel debido a que la roca aflora. En esta parte del perfil se tienen ubicados otros pozos como son Jaripeo # 44, San José de las Torres # 48 y El Molinito # 52, donde la roca se encuentra

superficialmente por lo tanto no se representan en el perfil los bloques basculados como se presentan en los anteriores perfiles donde se tenía material sedimentario.

En este perfil se logra apreciar el cauce por el que pasa el Río Grande de Morelia, así como los cerros que limitan el cauce de mencionado río, guardando una orientación hacia el noreste.

Este perfil cruza el cauce del río Grande de Morelia, en el se marcó un basculamiento por el pozo # 57 de San Antonio Corrales, el cual está sobrepuesto por quedar en medio de dos perfiles (perfil 7-7' y 8-8'), proporcionándonos información del basculamiento en ese sector, la cual nos indica que hasta la profundidad de 200 m se tiene solamente material de origen sedimentario sin encontrarse el basamento o algún material de tipo volcánico, por lo que el desnivel real podría incrementarse.

Al norte del bloque basculado del río, encontramos la falla normal de Tarímbaro que para este perfil tiene una longitud de 4.5 km y elevaciones del orden de 1,900-1,920 msnm. Se observan 5 bloques basculados dentro del valle de Álvaro Obregón, los cuales se describen a continuación. El Primero de estos bloques está representado por el pozo # 60 Colonia Miguel Hidalgo perteneciente al municipio de Tarímbaro, el cual es trasladado al perfil para la interpretación, presentándose un desnivel topográfico aparente de 80 m y un desnivel real de 238 m, con un ángulo de basculamiento de  $13^\circ$ , dicho bloque está formado por basalto. El segundo de los bloques basculados se encuentra en el pozo # 55 con el nombre Rosa de Castilla, en el que se observa un desnivel topográfico aparente  $< 20$  m y un desnivel real de 30 m, con un ángulo de basculamiento de  $14^\circ$ , el bloque está formado por material basáltico. El tercero de los bloques está ubicado en el pozo # 54 Rosa de Castilla 2, en el que se tiene un desnivel topográfico aparente  $< 20$  m y un desnivel real de 34 m, con un ángulo del basculamiento de  $14^\circ$ , formado de material basáltico. El cuarto bloque está ubicado en el pozo # 56 con el nombre Téjaro de los Izquierdo # 6 con un desnivel topográfico aparente  $< 20$  m y un desnivel topográfico real de 72 m, con un ángulo de bloque basculado de  $15^\circ$ , y al igual que los bloques anteriores está formado de material basáltico. El quinto bloque está ubicado por el pozo # 96 Palo Blanco 1, el cual presenta un desnivel topográfico aparente  $< 20$  m y un desnivel real de 6 m, formado de material basáltico y con un ángulo del basculamiento de  $14^\circ$ . El valle que se representa en este perfil sigue guardando la misma dirección de suroeste-noreste.

Una vez terminada la descripción del valle y de sus respectivos bloques, se observa que la sierra descrita en los perfiles anteriores no es tan amplia y solamente se tienen una longitud de 2.5 km con una elevación de 1,890 msnm, conformada de material basáltico principalmente. En la orilla de la parte sur del Lago de Cuitzeo se encuentra el pozo # 59 ubicado con el nombre de Chehuayito, en el que se tiene un desnivel topográfico aparente de 50 m y un desnivel real de 200 m, con un ángulo del bloque basculado de  $16^\circ$ , para éste pozo y al igual que en los pozos de Cuitzillo y San Antonio Corrales no se encontró material basáltico o material de origen volcánico hasta la perforación total de los mismos, por lo que se podría incrementar el desnivel real.

El Lago de Cuitzeo en este perfil sigue guardando la misma dirección y el graben lo siguen formando la sierra de la parte sur y la loma La Panoncita, ubicada en la parte norte del lago.

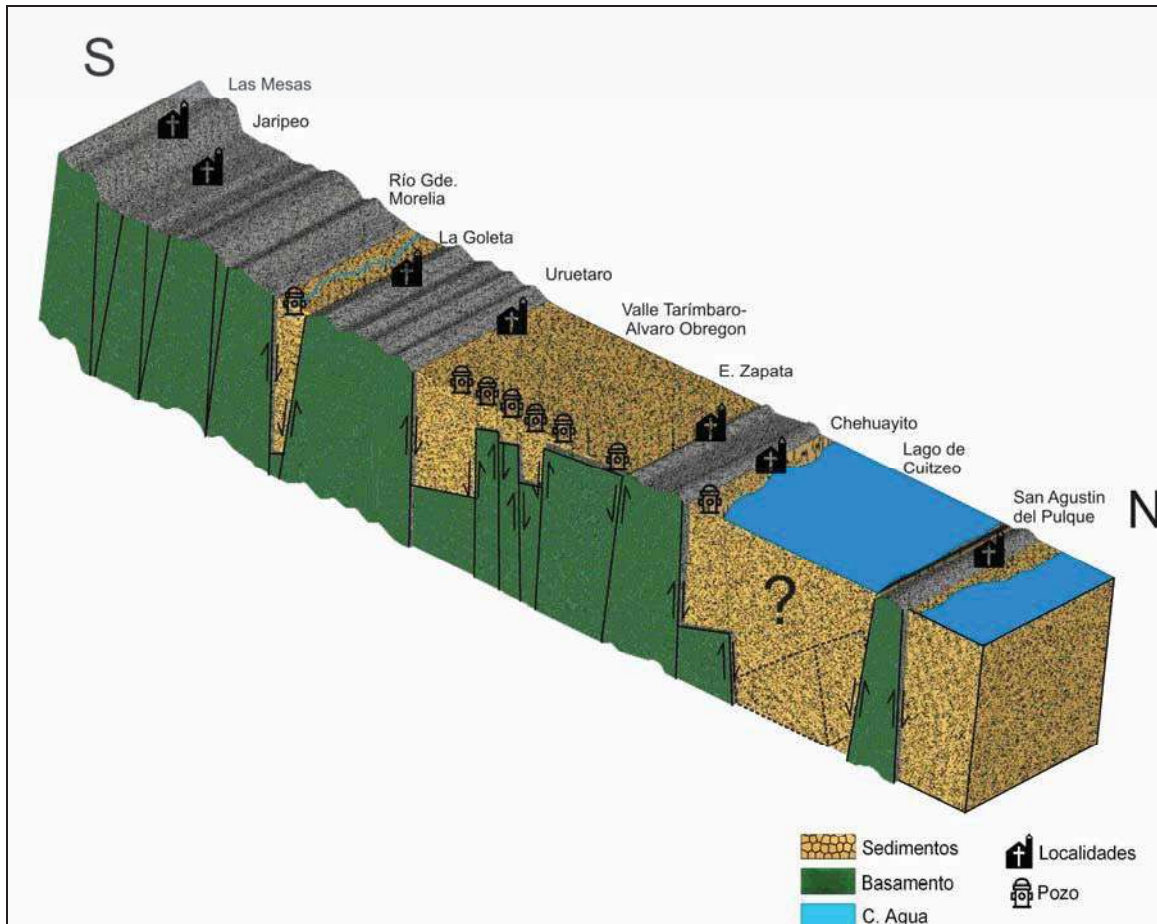


Figura V. 9. Perfil 7-7' (SO-NE)

### **V.2.8. Perfil 8-8'**

El perfil 8-8' tiene una orientación preferencial de sur-norte, con una longitud de 34 km pasando entre los poblados de Zurumbeneo y Fco. I. Madero, El calvario, Alto de Aviles, Lázaro Cárdenas (La Purísima) y finalmente el Lago de Cuitzeo (Figura V. 10).

El perfil comienza con una elevación de 2,100 hasta alcanzar la elevación de 2000 msnm, a partir de esa elevación tiende a ir bajando de manera suave y gradual hasta llegar al cauce del Río Grande de Morelia, en el que encontramos un basculamiento por medio del pozo # 57 San Antonio Corrales que está dentro del bloque formado entre el perfil 7-7' y 8-8', aunque propiamente el pozo no este dentro del perfil 8-8', se ha transpuesto dicho pozo para darnos una referencia del basculamiento probable que se puede presentar en la zona del cauce, que para este caso es de 200 m.

En la parte anterior al cauce del Río Grande de Morelia se puede observar el Cerro El Chomuro y algunas de sus coladas de lava, que hacen que se desvíe el cauce ligeramente. Después del cauce se observa la falla normal que se observa también en los perfiles anteriores, con una elevación promedio de 1,920 msnm, y en la parte norte del mismo se observa una serie de bloques basculados que a continuación se describen. El primero de los bloques basculados es el que se encuentra referenciado por medio de los pozos con los nombres de Tzintzimeo 2 (pozo # 96), El Cedro (pozo # 95), La Purísima 4 (pozo # 94), La Purísima 3 (pozo # 93), el cual tiene un desnivel topográfico aparente de 80 m y un desnivel real de 300 m, bloque tiene un ángulo de basculamiento de 29°. En el pozo con el nombre Tzintzimeo 2 se considero que la profundidad a la que se encuentra el basalto es de 220 m, y no la que reporta (74 m.) debido a que probablemente la litología fue descrita erróneamente. El segundo de los bloques es el que esta ubicado en el pozo # 92 con el nombre de La Línea el cual tiene un desnivel topográfico aparente < 20 m y un desnivel real 124 m, con un ángulo del bloque basculado de 18°, este bloque está formado por material basáltico y en la parte superior por material arcilloso principalmente. El tercer bloque es el que esta ubicado por el pozo # 91 Las Piedras, presentando un desnivel topográfico aparente < 20 m y un desnivel real de 192 m, con un ángulo de basculamiento de 21°, este bloque y al igual que los anteriores está formado por material basáltico. El cuarto bloque es el que esta ubicado por el pozo # 90 ubicado en El Moral, el cual presenta un desnivel topográfico aparente de < 20 m y un desnivel real de 40 m, con un ángulo de basculamiento de 32°, dicho bloque está conformado por material basáltico. El quinto

bloque es el que esta ubicado en el pozo # 89 que se encuentra en El Injerto en el que se tiene un desnivel topográfico aparente  $< 20$  m y un desnivel real de 90 m, presenta un ángulo de basculamiento de  $30^\circ$  conformado de material basáltico.

En esta zona el valle tiene una orientación preferencial hacia el noreste y se observan dos pequeñas líneas de lomeríos suaves, la primera es la de Álvaro Obregón la cual tiene una longitud aproximada de 4 km y tiene una elevación aproximada de 60 m medida desde la parte plana del valle, en donde el valle tiene una elevación de 1840 msnm. La segunda es la loma de Las Mulas la cual tiene una longitud aproximada de 4.5 km con una elevación de 40 m, la cual esta medida desde la parte plana del valle.

También es importante notar que el sistema montañoso que limita al Lago de Cuitzeo en la parte sur observado en los perfiles anteriores, disminuye hasta terminar como parte de un lomerío suave en un orden de 1.5-2.0 km de extensión y con elevaciones del orden de los 1,860-1,900 msnm.

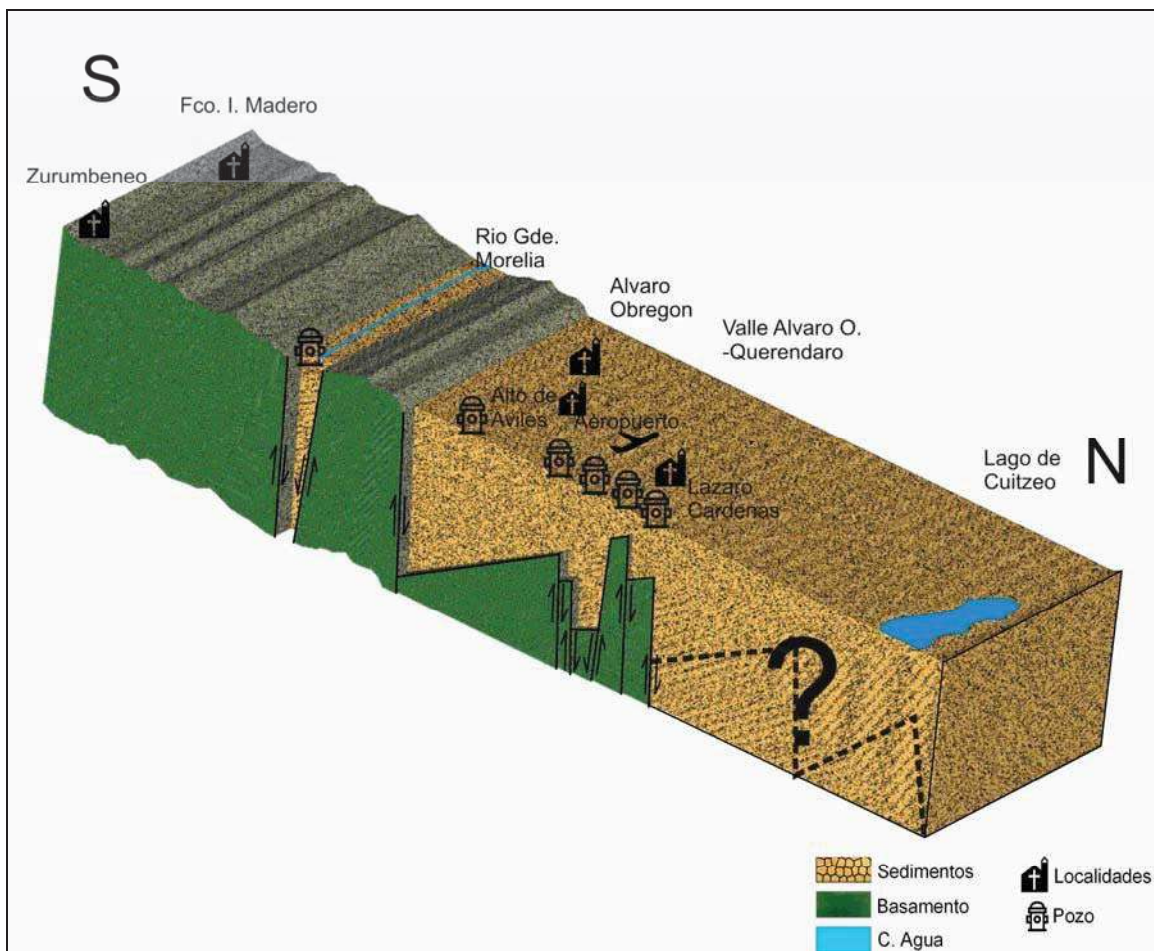


Figura V. 10. Perfil 8-8' (S-N)

### **V.2.9. Perfil 9-9'**

El perfil 9-9' tiene una orientación de sur a norte con una longitud de 20 km pasando por un lado de Indaparapeo, Benito Juárez, La mina (Figura V. 11).

Con una elevación de inicio de 2,040 msnm, dentro del perfil se puede notar como desciende la topografía de una manera fuerte pero constante. La falla de Tarímbaro que se presentaba en los perfiles anteriores en este no se aprecia y el cauce del Río Grande de Morelia cambia la orientación de noreste al norte para posteriormente desembocar en el Lago de Cuitzeo por medio de canales.

Después de los derrames de lava se observa una estructura de tipo semigraben que se identifica por medio de tres pozos ubicados en la planicie con una elevación promedio de 1,840 msnm. El primero de los bloques está ubicado por medio de los pozos que se encuentran en Zacapendo 2 (pozo # 110) y Tzintzimeo I (pozo # 107), donde presentan un desnivel aparente de 70 m y un desnivel real 144 m, el cual fue medido desde la parte alta hasta la elevación del valle, y desde la parte alta de la loma hasta la profundidad a la que se encuentra el bloque basculado en el pozo de Zacapendo 2 (# 110), con un ángulo del bloque basculado de 26°, el bloque está formado de material basáltico. El segundo de los bloques lo ubicamos por medio del pozo # 108 que se ubica en Belisario Domínguez en donde se tiene un desnivel topográfico aparente < 20 m y un desnivel real de 76 m, con un ángulo de basculamiento de 31°, dicho bloque está formado de material basáltico. El tercero de los bloques está ubicado por medio del pozo # 51 con el nombre de Aeropuerto, en el que se tiene un desnivel topográfico aparente < 20 m y un desnivel real de 100 m, y presenta un ángulo de basculamiento de 25°, el cual está formado de material arcilloso y siendo posible que la profundidad del material basáltico este varios metros hacia abajo.

Se puede observar que la longitud de este último perfil es más pequeña que la de los perfiles anteriores, esto se hizo principalmente por la falta de información litológica que nos permita realizar una buena correlación del subsuelo.

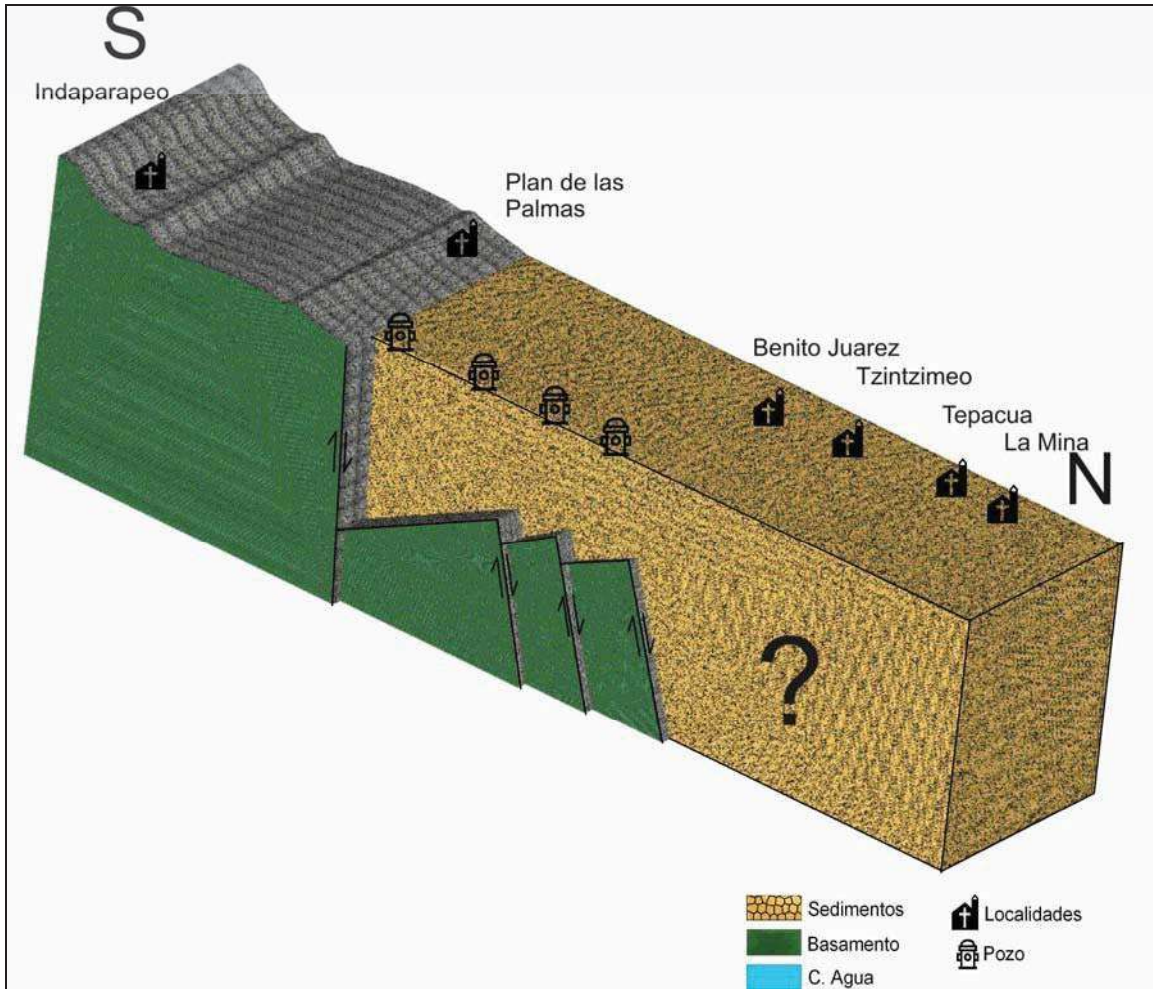


Figura V. 11. Perfil 9-9' (S-N). Obsérvese el sistema de semigraben definido en el valle Queréndaro.

### V.3. Geología estructural

En este subtema comenzamos por describir las distintas fallas encontradas dentro del área de estudio, obsérvese la Figura V.12., en esta figura encontramos las fallas más importantes las cuales se describen a continuación:

I.- De manera general dentro de la cuenca encontramos un total aproximado de 95 fallas identificadas, de este total cartografiado todas ellas corresponden a fallas de tipo normal con una longitud de las mismas que van desde los 600 m de longitud hasta un poco más de 15 km (falla de Tarímbaro), las fallas comprendidas entre los 1000 y 6000 m de longitud representan el 75% del total de las fallas geológicas, y únicamente 5 de las fallas

cartografiadas sobrepasan los 14 km por lo que estas fallas tienen rasgos característicos que son visibles desde las imágenes de satélite así como en la cartografía del INEGI escala 1:50,000.

II.- Otro sistema menor consiste por las fallas con dirección preferente NE-SO son las que se encuentran mayoritariamente en gran parte de la cuenca, principalmente al NE y O de la zona de estudio, la longitud de las fallas varía desde los 1000 hasta los 7000 m con una inclinación hacia el NO en un intervalo de 70-85°, este tipo de fallas normales o estructuras afectan principalmente las unidades del Pleistoceno y Holoceno (Garduño, 1997).

III.- Tercer sistema de fallas encontradas en la cuenca tienen dirección NO-SE con una longitud promedio de 4000 m y una inclinación hacia el noreste en valores de inclinación que van de 60-80° y se presentan principalmente en las zonas donde aflora el basamento de rocas andesíticas ubicados en la porción centro-oeste y sur de la zona de estudio, en esta última zona se encuentran las rocas más antiguas de la región con una edad de 25 M.a.

IV.- Las fallas con dirección E-O son las más recientes dentro de la región de estudio (Israde-Garduño, 2004), tienen una longitud de fallas de cerca de 14 km y presentan una inclinación hacia el norte en un intervalo de inclinación de 80 a 85°, este tipo de fallas están afectando las formaciones del Cuaternario, a dos fallas de estas (La Paloma y Tarímbaro) se les considera como activas debido a que presentan o han tenido desplazamientos en los últimos 10,000 años, es decir que están desplazando a suelos que contienen cerámica del periodo clásico.

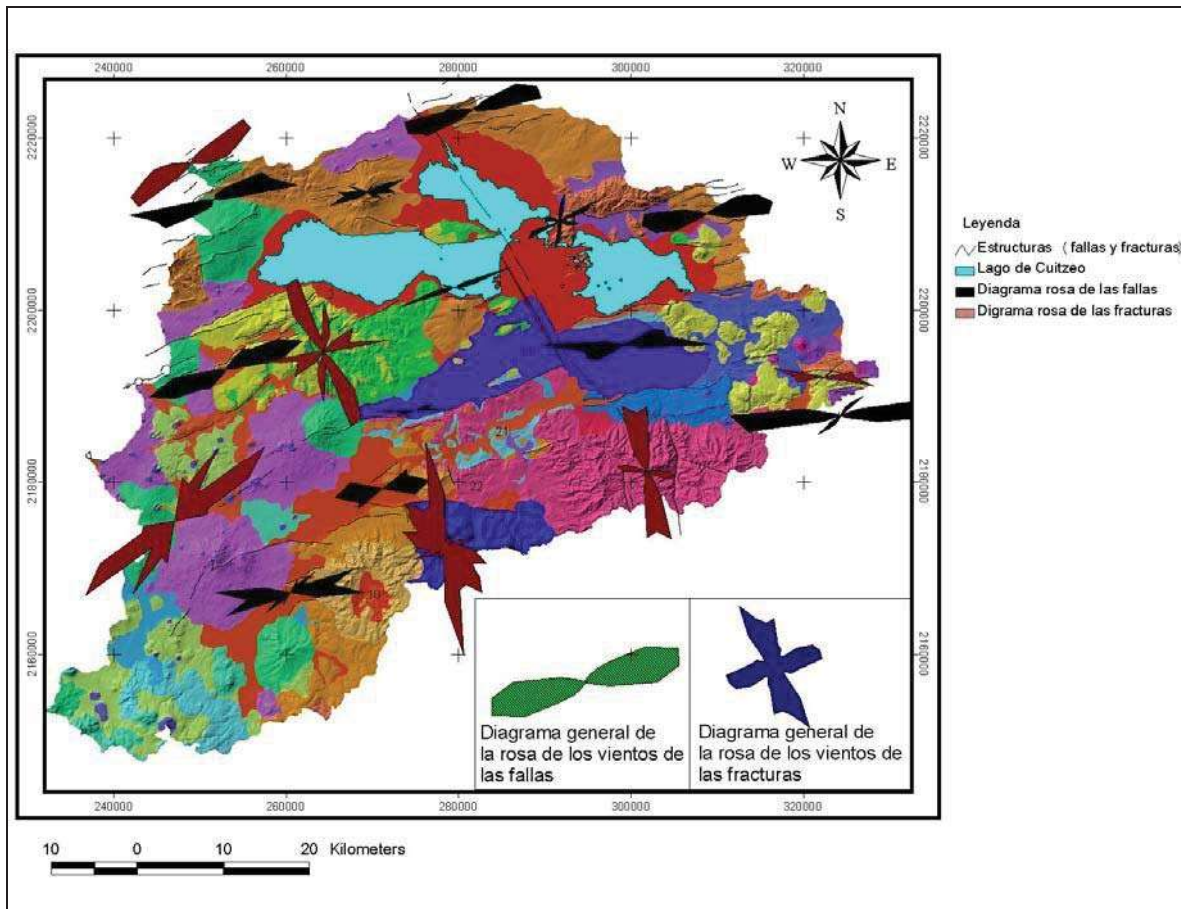


Figura V. 12. Sistema de fallas y fracturas con los respectivos diagramas rosas.

Analizaremos ahora si existe alguna relación temporal entre las fallas de la zona. Para ello realizaremos una gráfica que relaciona el desplazamiento real de la falla contra el desplazamiento aparente de la misma. Para el caso del primer desplazamiento que aquí se ha definido como real este está definido por medio de la diferencia de alturas entre el bloque alto y el bloque bajo, este último se sabe bien conocido por medio de las perforaciones de algunos pozos que atravesaron el mismo material que el que aflora en el bloque alto, mientras que el desplazamiento aparente es la diferencia entre el desnivel topográfico observable del bloque alto de la falla y el nivel del terreno natural. Se inició por ubicar las principales fallas de la zona de estudio en conjunto con los pozos de agua perforados para la obtención de los datos como se describe en este párrafo, para posteriormente graficar los datos. Resultado de estos es la Figura V. 13, a la cual se le agregó una línea de tendencia de tipo exponencial que es la que mejor se ajustó a los datos.

La gráfica nos muestra que no existe relación entre el desplazamiento real de la falla y el desplazamiento aparente u observable, por lo que las fallas de la zona de estudio no tienen correlación alguna entre sus desplazamientos.

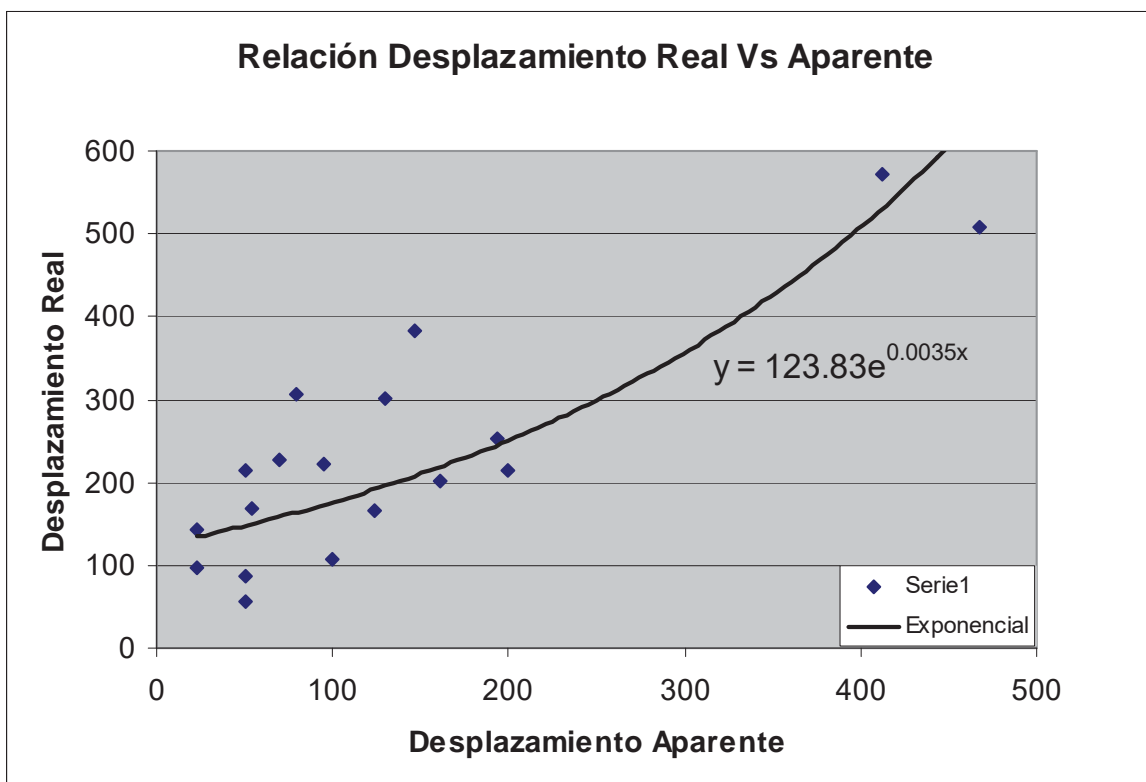


Figura V. 13. Grafica del desplazamiento Real Vs Aparente de las fallas

En la geología del subsuelo descrita en este capítulo se observa que existen desplazamientos verticales de las estructuras. Se tratan de fallas de tipo normal, por lo que es importante conocer dicho desplazamiento en cada uno de los perfiles, con ello lograremos conocer cuanto se ha extendido la región de estudio que es afectada por los principales sistemas de fallas NE-SO y E-O. La forma de cálculo se explica solamente para el primero de ellos, consiste en realizar una diferencia entre la longitud total del perfil 1-1' (55500m) y la suma de las longitudes de los bloques basculados del perfil 1-1' (53906.7m), estas capas se miden sobre una capa de referencia que en este caso se trata de las rocas andesíticas, por ser la que se pueden controlar mejor, al resultado de esta diferencia se le divide por la suma de las longitudes de los bloques basculados del perfil 1-1' (53906.7m) y

se le transforma en porcentaje para conocer el desplazamiento horizontal del material base con respecto al estado actual en el perfil.

Por lo que el perfil 1-1' presenta la siguiente extensión:

$$\frac{55500 - 53906.7}{53906.7} = 2.96 \%$$

El perfil 2-2' presenta la siguiente extensión:

$$\frac{39000 - 36835.3}{36835.3} = 5.88 \%$$

El perfil 3-3' presenta la siguiente extensión:

$$\frac{38474.47 - 36390.77}{36390.77} = 5.73 \%$$

El perfil 4-4' presenta la siguiente extensión:

$$\frac{38375 - 36817.4}{36817.4} = 4.23 \%$$

El perfil 5-5' presenta la siguiente extensión:

$$\frac{33830.69 - 32326.39}{32326.39} = 4.65 \%$$

El perfil 6-6' presenta la siguiente extensión:

$$\frac{33250 - 31885.4}{31885.4} = 4.28 \%$$

El perfil 7-7' presenta la siguiente extensión:

$$\frac{34000 - 32319.9}{32319.9} = 5.20 \%$$

El cálculo de las extensiones en los perfiles realizados nos muestran valores desde 2.96 % a 5.88 % en las extensiones. Para los casos de los perfiles 8-8' y 9-9' no se realizaron por no tener una terminación bien establecida.

#### **V.4. Conclusiones**

Por medio de la geología del subsuelo se infiere la geometría de las unidades que forman los tres principales acuíferos de la zona de estudio, estos están conformados por las siguientes unidades geohidrológicas; la primera corresponde a la unidad fluvio-lacustre que es considerada como el acuífero superficial, la segunda corresponde al acuífero intermedio

constituido por material de tipo ácido que comprende los flujos piroclásticos e ignimbritas; y la tercera corresponde al material adesítico que es el más antiguo de la zona. Además de haberse identificado los tres tipos de roca huésped de los acuíferos se observa que la geometría del basamento presenta ciertas irregularidades, por lo que los espesores de las tres unidades geohidrológicas varían de acuerdo a las zonas y se debe tener en cuenta al momento de utilizar esta información cuando se pretenda realizar un modelo numérico del agua subterránea.

Se identificaron los tres tipos principales sistemas de fallas que predominan en la cuenca los cuales corresponden a los sistemas NE-SO, E-O y al NO-SE. Las estructuras NE-SO son los causantes del vulcanismo reciente (Garduño, 1997), mientras que el sistema E-O es el que está delimitando el borde sur del lago así como el valle de la ciudad de Morelia; el sistema de fallas NO-SE está afectando las rocas más antiguas que afloran en la parte sur y central de la zona de estudio. Estas últimas estructuras están siendo reactivadas por el campo de esfuerzos actual, generando así fallas regionales NNO-SSE, NO-SE con componente lateral derecha (Ewa Azynnkaruk, 2004).

## VI.- GRAVIMETRÍA Y MAGNETOMETRÍA

### VI.1. Localización de la zona de estudio

A pesar de que la zona de estudio está definida en el capítulo IV, se observa que es una región extensa para este capítulo en particular por lo que se decreto acotar la zona en un sector más pequeño que abarcara el Lago de Cuizeo debido a que es donde se desconoce con exactitud el espesor de sedimentos. Por lo que la zona de estudio comprende un rectángulo de coordenadas UTM, Zona 14 (254000,2158600) y (324900,2226500), que abarca el norte de la ciudad de Morelia, Michoacán y parte del límite sur del Estado de Guanajuato.

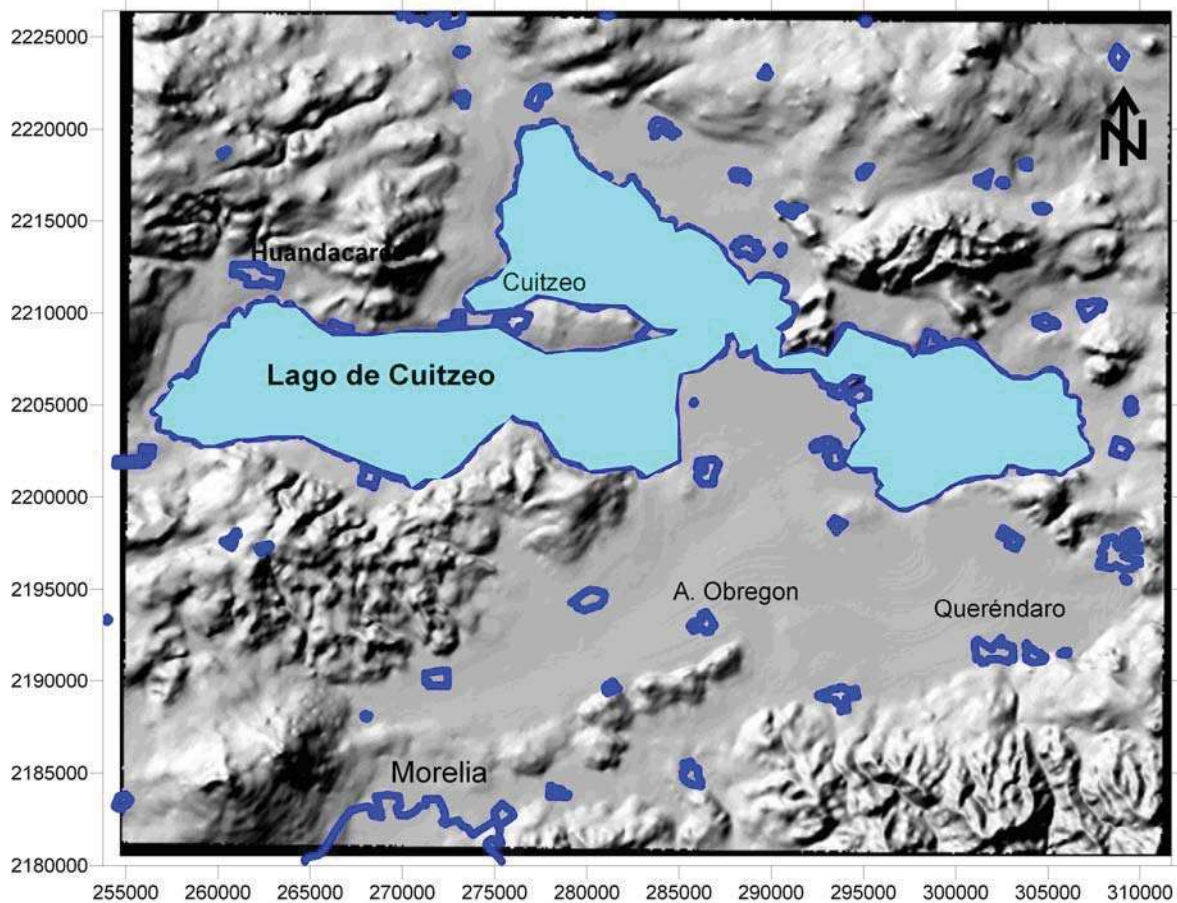


Figura VI. 1. Localización de la zona de estudio

## **VI.2. Datos de campo**

### **VI.2.1. Gravimetría**

El estudio se basa en la reinterpretación de datos medidos por Arredondo-Fragoso (1983), quien realizó 129 estaciones gravimétricas a lo largo de 5 líneas rectas con estaciones a cada 250 m, aprovechando el periodo de desecación del lago en ese año. Con apoyo de la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos de la CFE se procedió a realizar una compilación de datos, tanto del estudio realizado por Arredondo-Fragoso (1983) como de otras instituciones, con los cuales se formó una rejilla regular de anomalía de Bouguer. Con objeto de lograr un correcto empalme de la información proveniente de los estudios previos, los datos de Arredondo-Fragoso (1983) fueron reprocesados. La interpretación se hizo mediante separaciones regional-residual y el modelado de perfiles coincidentes con el levantamiento de campo de Arredondo pero extendiéndose hacia los extremos.

Este estudio se basa en los datos de anomalía de Bouguer en un total de 2715 estaciones, reprocesadas al nivel del mar utilizando una densidad de 2.67 g/cm<sup>3</sup>. Las estaciones del estudio regional, fueron tomadas con una separación de 500 m y levantadas a lo largo de recorridos poligonales con un promedio de 5 km de diámetro, a lo largo de los principales caminos de acceso a la zona.

### **VI.2.2. Aeromagnetometría**

Además de la información gravimétrica se contó con mapas raster de campo magnético total y su reducción al polo, basados en la cartografía 1:250,000 del Servicio Geológico Mexicano (SGM) antes Consejo de Recursos Minerales, y casi al final del capítulo se dispuso de datos aeromagnéticos ASCII del SGM a lo largo de las líneas de vuelo. Estos datos fueron medidos usando técnicas digitales de registro a lo largo de líneas N-S con espaciamiento cada 1000 m y líneas transversales de amarre cada 10,000 m con el sensor a 300 m sobre el nivel del terreno (levantamiento drapeado). Además de las correcciones propias del levantamiento los datos del SGM incluyen la sustracción de un valor de campo teórico correspondiente al Campo Geomagnético Internacional de Referencia estándar correspondiente a 1995 (IGRF95).

### **VI.2.3. Geología**

Se utilizó la cartografía geológica 1:250,000 del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) así como información geológica impresa basada en el mapa de Pasquaré et al., 1991. Esta última se rasterizó y se registró espacialmente, en tanto que las fallas fueron vectorizadas para su inclusión como referencia en los modelos por secciones.

## **VI.3. Procesamiento**

### **VI.3.1. Gravimetría**

Los datos de la CFE se reprocesaron para calcular la anomalía de Bouguer a 0 msnm, a fin de hacer el empare de la información, sin embargo, como resultado de este proceso se encontró una discrepancia casi constante de 51 mGal en la anomalía de Bouguer entre los datos de estaciones comunes a ambos levantamientos. Por la imposibilidad de recalcular los datos regionales dado que no se dispuso de los valores de gravedad observada ni corrección por rugosidad se optó por hacer un corrimiento vertical de los datos de la CFE hasta hacerlos emparejar con los valores del estudio regional. Considerando que el error introducido por este procedimiento es aceptable comparado con la ventaja de disponer de datos sobre el lago cruciales para modelar el espesor del relleno sedimentario de las cuencas.

El procesamiento de datos se hizo mediante la superposición de toda la información disponible, para lo cual fue necesario la georeferenciación y el uso de proyecciones comunes. Posteriormente se hizo una interpretación cualitativa en planta, y finalmente un modelado bidimensional tipo Talwani con base en 10 perfiles, 7 de carácter general cruzando toda el área y 3 locales en la zona sur.

En virtud de que no se dispuso de datos de pozo que permitieran ajustar la profundidad de las distintas unidades aflorantes, para el modelado se mantuvo el criterio de acotar la geometría de las cuencas utilizando modelos simples sin utilizar estratos con continuidad lateral. Una razón adicional para seguir este procedimiento es la consideración de que de esta forma se hacen patentes los aportes de la gravimetría evitando el prejuicio de forzar la

interpretación en la búsqueda de la compatibilidad, a menos que se trate de evidencias de campo, pero no cuando estos son a su vez productos de la interpretación.

### **VI.3.2. Magnetometría**

Por diferencias de procedimiento, no bien conocidas, las dos cartas que cubren los sectores SO y SE del lago muestran ciertas discrepancias con los datos provenientes de las que cubren los sectores NO y NE, e incluso entre las dos primeras se observan diferencias aunque de menor magnitud. Se intentó la corrección de éstas sin éxito, pues se obtuvieron incompatibilidades mayores aún, debido a que se ignoran los detalles técnicos con los que se hizo el procedimiento de corrección de los datos originales en el SGM. Como los problemas de traslape no se consideraron graves, se optó por utilizar los datos tal como se expenden sin otra corrección, para producir una rejilla regular que cubre toda el área de estudio.

La Rejilla resultante fue reducida al polo utilizando los siguientes parámetros de campo magnético: Intensidad 42025 nT, inclinación  $47^{\circ} 05'$ , declinación  $07^{\circ} 30'$  E. El mapa resultante fue suavizado mediante continuaciones ascendentes a 500 y 1000 m y se aplicaron procedimientos de derivación tanto vertical como horizontal.

Sobre los mapas de anomalía de Bouguer y de reducción al polo se aplicaron procesos de segunda derivada vertical y gradiente horizontal con objeto de determinar la ubicación de probables interfaces laterales, las cuales son indicadas en el primer caso por el contorno cero y en el segundo por los valores máximos. En algunos casos la forma recta de estas interfaces pueden tener origen estructural, es decir pueden deberse a la presencia de fallas, pero en otras simplemente puede tratarse de contactos litológicos. Para su representación gráfica se utilizó el mismo símbolo empleado para la representación de fallas con las plicas hacia el lado del valor geofísico más bajo (de anomalía de Bouguer o de intensidad de campo magnético reducido al polo).

Tanto en los mapas de anomalía de Bouguer como en el de reducción al polo se marcaron ejes de máximos y mínimos relativos dado que se considera que la elongación de tales anomalías puede reflejar el efecto de fenómenos estructurales.

La interpretación cualitativa sobre perfiles se hizo mediante diez secciones que se consideraron representativas. Sobre ellas se incluyó el efecto del campo magnético reducido al polo sobre las mismas secciones. Finalmente se hizo una interpretación cuantitativa con base en el modelado tipo Talwani de las anomalías gravimétricas.

#### **VI.4. Interpretación**

La comparación visual de la información geofísica, geológica y geográfica en esta área (litología, estructuras y topografía) demuestra que tanto la gravimetría como la magnetometría reflejan predominantemente efectos de subsuelo de carácter más regional que el representado por la mayoría de los tipos litológicos locales y estructuras mapeados en la superficie. Algunas unidades litológicas o estructuras superficiales son evidencia visible de fenómenos en el subsuelo que son observables a través de la geofísica pero la mayoría de los rasgos geológicos superficiales carecen de un efecto geofísico distinguible.

Consecuentemente, la geofísica brinda una visión complementaria independiente, más regional.

Con base en los objetivos por parte de la CFE y los perseguidos por esta investigación se mantuvo el uso de información geológica en su mínimo indispensable con objeto de resaltar los resultados aportados por la geofísica, sin el sesgo tendiente a hacerla compatible con la información geológica que a su vez es producto de la interpretación.

Antes de hacer la discusión de las características locales de la información geofísica (Perfiles gravimétricos), se describe ésta en un contexto regional.

##### **VI.4.1. Gravimetría**

Desde un punto de vista regional (Figura VI.2), la cuenca de Cuitzeo se ubica en una especie de punto silla que representa un alto gravimétrico relativo si la zona se cruza en dirección E-O y un bajo si se cruza en dirección N-S. Hacia el E se encuentra un bajo

gravimétrico regional en uno de cuyos flancos se encuentra la zona de Los Azufres situada entre Zinapécuaro y Ciudad Hidalgo.

Uno de los límites del bajo gravimétrico tiene una forma lineal en dirección NE-SO y se extiende desde el lóbulo este del lago de Cuitzeo hasta las inmediaciones de la ciudad de Querétaro en donde es interrumpido por un bajo de dirección NO-SE cuyo flanco son las fallas observables en la superficie. Hacia el O el bajo gravimétrico se extiende hacia la región de Pátzcuaro y la Meseta Tarasca. Unos 15 km al E de la ciudad de Querétaro se produce un punto silla gravimétrico con valores descendentes hacia los flancos N y S y ascendente hacia O y E.

En dirección al S la gravimetría muestra valores muy altos hacia la zona de tierra caliente en tanto que hacia el N se tiene el flanco con menor contraste lateral, los valores son iguales o apenas ligeramente mayores y un poco más consistentes que en la zona de la cuenca.

En un nivel de regionalidad menor se encuentran tendencias de máximos en dirección NO-SE y NE-SO así como una tendencia de mínimos E-O bajo el lago, interrumpidas por altos relativos pertenecientes a las otras orientaciones mencionadas.

En el contexto local (Figura VI. 3), se observa que el Lago de Cuitzeo tiene cuando menos tres mínimos gravimétricos locales, el más intenso en su sector central con influencia E-O, en la rama norte con influencia NO-SE y en el extremo centro occidental con dirección E-O. El sector oriental no presenta un mínimo bien definido. Sin embargo, los mínimos más intensos forman parte de los bajos regionales hacia el E y O del lago

Otros mínimos relevantes se encuentran hacia el NO del lago (NE de Capacho), al norte de Téjaro y en los extremos NE y SO de la zona de estudio (Pila de los Árboles y Quinceo respectivamente). Hacia el sur se observa el fuerte aumento de la aceleración alcanzando los valores absolutos máximos hacia el SE de la zona de estudio.

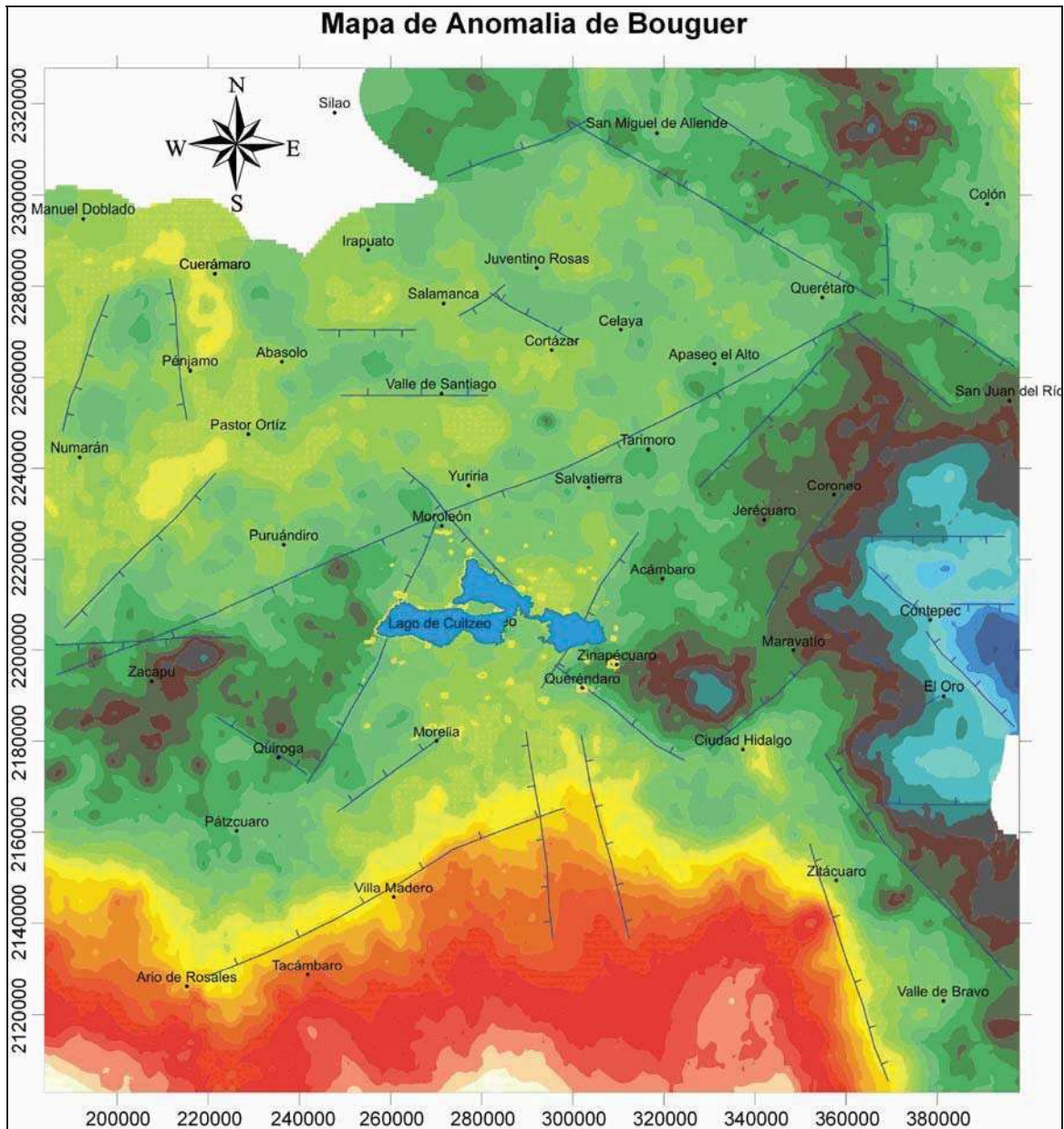
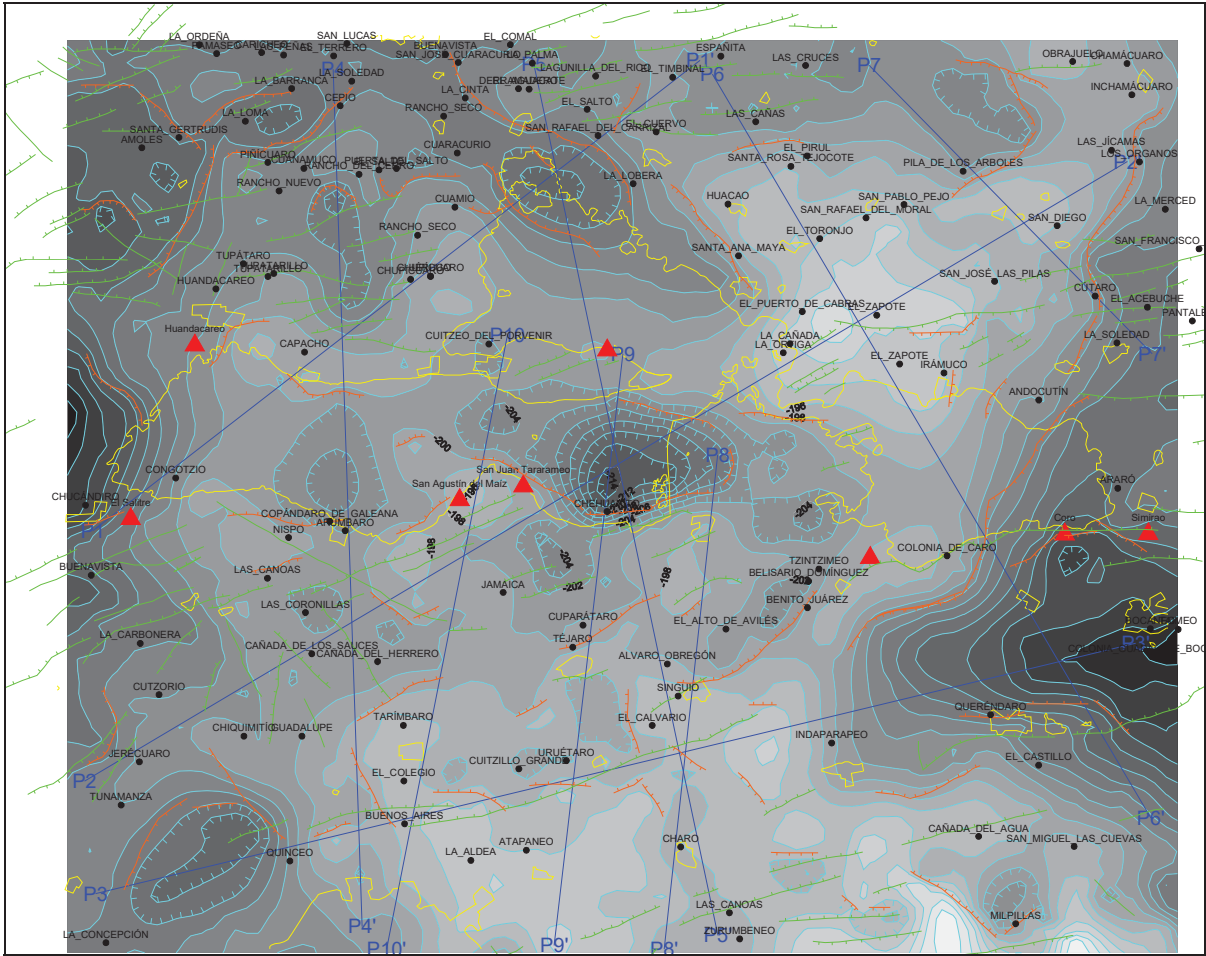


Figura VI. 2. Anomalia de Bouguer regional indicando valores bajos con colores azules y verde oscuro, y valores altos con rojo, amarillo y verde claro. Las líneas azules indican interfaces en las que las plicas señalan al bloque de baja densidad relativa. La línea azul indica la ubicación del Lago de Cuitzeo.



**Figura VI. 3.** Mapa local de anomalía de Bouguer [mGal] en el que se han superpuesto las fallas identificadas en el mapa geológico de Pasquaré et al., (1991) (líneas verdes) y una interpretación de lineamientos gravimétricos identificados con base en derivación vertical y horizontal (líneas anaranjadas), así como la traza de las secciones modeladas que se discuten posteriormente. La línea amarilla corresponde al límite de la laguna de Cuitzeo y pueblos circunvecinos. Los triángulos rojos indican las zonas de termalismo más importantes.

Se considera que la rama oriental del Lago de Cuitzeo se encuentra en la convergencia de dos sistemas estructurales sepultados, uno con orientación NE-SO y otro con orientación NO-SE, los cuales delimitan a un bloque de alta densidad de forma rectangular alargado en dirección NE-SO, en cuyo vértice sur se encuentra el lago (Figura VI. 2). A su vez la rama N del lago cuya orientación es NO-SE forma parte de una depresión gravimétrica que se extiende hacia la zona de Moreleón y salvo por la interrupción de una depresión E-O que va de Valle de Santiago a Abasolo, continúa hasta el E de Cuerámara.

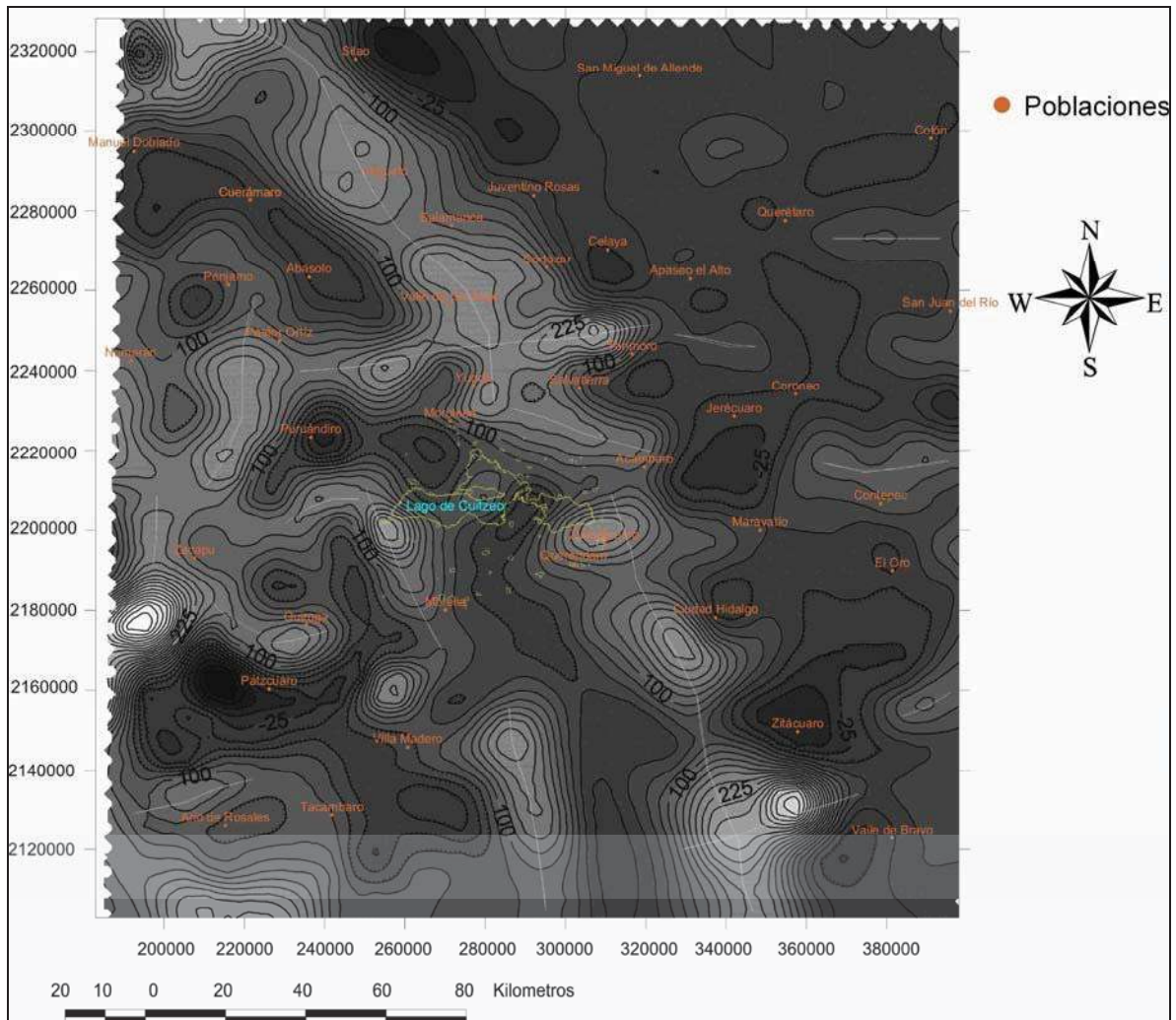
La depresión gravimétrica E-O que contiene al lago de Cuitzeo continúa hacia el oeste hasta el sur de Puruándiro (Huaniqueo) con un corrimiento hacia el sur hasta Zacapu. Las depresiones están delimitadas por altos gradientes de contornos NE-SO, NO-SE y en menor grado N-S. La depresión E-O que aloja al lago tiene un límite sur asociado con una estructura en esa dirección que va de Cointzio a Indaparapeo y continúa hacia el E, en donde su efecto se confunde con el de otros rasgos. Una falla más pequeña E-O con caída al N puede existir en la zona de Álvaro Obregón.

El área ocupada por el actual lago muestra evidencias de fallamiento normal E-O que hacen pensar en un graben. La anomalía central muestra una ligera asimetría que tácitamente se ha considerado como evidencia de que el flanco N del lago no es causado por una falla sino simplemente por la existencia de un bloque basculado. Este aspecto se discute posteriormente en la sección de modelado. La anomalía negativa del sector occidental es menos conspicua y su carácter estructural es menos claro pero en principio también debe considerarse como de origen estructural.

El mínimo al NE de Capacho tiene un interés especial debido a que se encuentra rodeado de pequeños altos gravimétricos locales que forman un anillo continuo en el sector sur y discontinuo en el norte, aparentemente las anomalías no están relacionadas con las rocas superficiales sino con la estructura de una pequeña caldera

#### **VI.4.2. Magnetometría**

Los datos regionales de campo magnético total reducidos al polo (Figura VI. 4) muestran que la cuenca de Cuitzeo forma parte de un alineamiento de bajos magnéticos de orientación NO-SE que localmente se encuentra interrumpido por un alto de menor regionalidad de dirección NE-SO. Paralelo al alineamiento regional de mínimos se observa otro más regional aún de altos magnéticos con la misma orientación, situado más al Este, que cruza totalmente el área estudiada. Este último alineamiento muestra deformaciones locales causadas por cuerpos más locales con elongación NE-SO y E-O, estos últimos en la parte media del mapa.

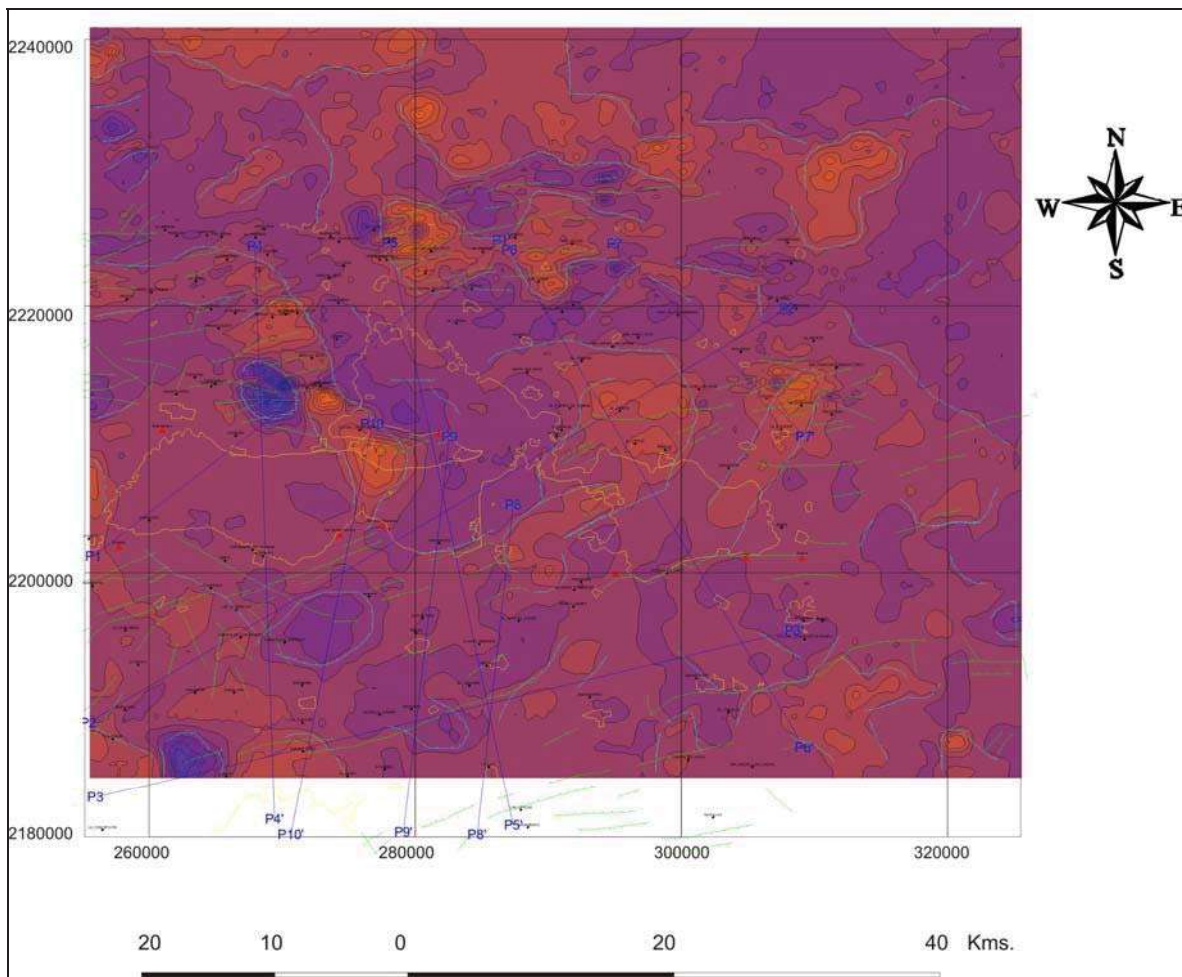


**Figura VI. 4. Campo magnético total reducido al polo. [nT]. Las líneas indican ejes de máximo que se interpretan como posibles ejes de volcanismo probablemente con un origen común. La línea amarilla indica la ribera del lago y pueblos circunvecinos.**

En forma general, al E del lineamiento de altos NO-SE las anomalías son de menor intensidad y muestran altos elongados en dirección E-O, en tanto que hacia el O del lineamiento existe una mayor cantidad de anomalías locales individuales y éstas son más intensas, además de que exhiben elongaciones en direcciones NNO-SSE, NE-SO y en menor medida E-O. Estas últimas en la parte media del mapa.

Localmente el campo magnético total (no se incluye figura) muestra anomalías dipolares individualizables en posición normal en el extremo O del Lago de Cuitzeo; otra asociada con el volcán Quinceo, ubicado en el extremo SO del área de estudio; una más en relación con

la península en la que se asienta la población de Cuitzeo, en la parte media del lago y otras menos notorias, una hacia el extremo NO del mapa y otra al N del sector oriental del lago. Al NO- N y NE de la cuenca se observan campos de anomalías en las que los dipolos aislados no son claramente distinguibles. Las menores intensidades del campo magnético total se observan en las ramas N y O del lago así como hacia el NO de éste. En el extremo oriental se observa el efecto de cuerpos ígneos bajo la cuenca.



**Figura VI. 5. Campo magnético reducido al polo. Se incluye la traza de fallas identificadas por Pasquaré et al., (1991) (líneas verdes) y los lineamientos magnéticos asociados con altos gradientes horizontales y el contorno 0 de la segunda derivada vertical de la reducción al polo continuada a 1000 m (azul claro). Las líneas amarillas representan la ribera del lago y las poblaciones circunvecinas.**

La reducción al polo (Figura VI. 5) permite ubicar varias de las anomalías por encima de los cuerpos fuente que les dan lugar, tal como ocurre con el que se encuentra bajo la

península de Cuitzeo, en la zona de las Pilas inmediatamente al N de la rama oriental del lago, el edificio SO del macizo del Quinceo. Sin embargo, también resalta la presencia de cuerpos de comportamiento singular, siendo el más notorio el que ocurre inmediatamente al NE de Copándaro, en el edificio NE del macizo del Quinceo y una anomalía menos intensa inmediatamente al sur de la zona central del lago entre Tarímbaro y Jamaica. Con regular claridad se observa la presencia de anomalías de tamaño medio o pequeño alineadas en dirección NE-SO, incluso bajo los sedimentos del lago, y en algunas zonas altos gradientes N-S con contornos alineados en dirección E-O.

El alineamiento de altos magnéticos en la reducción al polo está reflejando una serie de cuerpos ígneos que en algunos casos se observan en la superficie pero que en otros se encuentran mayoritariamente bajo el subsuelo. Los más interesantes son los que van desde el NE de Téjaro siguen una dirección NE hasta Irámuco y el que se extiende hacia el NE desde el extremo E del lago en el sur de Andocutín hasta el E de Cútaro en donde las anomalías locales muestran claros efectos de estructuras E-O.

Con auxilio de los mapas aeromagnéticos raster Esc. 1:250,000 (no se incluye figura) se observa que las anomalías regionales observadas en la Figura VI. 4 se conforman localmente con los siguientes rasgos. La anomalía de mayor intensidad corresponde a un cuerpo situado 20 km al sur de Zitácuaro que puede tener relación genética con el cerro Chilacallote. Continúa con el volcanismo situado al SO de Ciudad Hidalgo, con el que ocurre en torno a Zinapécuaro, continúa hacia Yuriria, Valle de Santiago, sur de Salamanca, O de Irapuato y alrededores de León.

El sector del alto magnético entre Valle de Santiago y Yuriria es afectado por un alineamiento de altos de dirección NE-SO de menor regionalidad que incluye el cerro Culiacán y continúa hasta el Cerro Grande, al SE de la población de Jícamas.

Por lo que respecta al alineamiento de mínimos paralelo que se encuentra hacia el O, en el sur del área muestra el efecto del anticlinal de Tzitzio (NNO-SSE), en donde se encuentra flanqueado hacia por un alto al O de Tafetán. Unos 8 km al SE de Tzitzio se produce un

punto silla en donde ocurre una inflexión del alineamiento de bajos magnéticos hacia el NO. 20 km al SE de Morelia, el mínimo es intersecado por un mínimo de menor regionalidad y dirección NE-SO cuyo efecto se percibe hasta el SE de Queréndaro.

En la zona de Charo, el mínimo toma una dirección N-S y en la de Téjaro-Álvaro Obregón se dirige hacia el NE dando lugar a valores más bajos asociados sin duda con el espesor de relleno sedimentario de la depresión gravimétrica. En este punto, el bajo se flexiona hacia el NO pero se encuentra interrumpido por el alto magnético situado en la península de Cuitzeo y luego de la interrupción por el alineamiento de altos en Jícamas continúa hasta Cuerámara y Manuel Doblado.

Tanto para el alineamiento de máximos como el de mínimos existen rocas superficiales de alta y baja susceptibilidad magnética que influyen en su presencia, pero la magnetometría permite dar una continuidad a los rasgos causados por las rocas sepultadas y permite hacer correlaciones entre las rocas superficiales que no resultan obvias a partir de la información geológica superficial.

En el área de estudio la anomalía más intensa se ubica en torno a Nahuatzen en la Meseta Tarasca. Otras anomalías de interés son: en los cerro Tariácuri y Tzintzuntzan en el flanco E del lago de Pátzcuaro; en torno al cerro La Trampa al NE de Acuitzio del Canje que se prolonga hasta Atécuaro hacia el NE; 15 km al O de Tafetán centrada en el cerro La Muñeca.

## **VI.5. Perfiles gravimétricos**

### **VI.5.1. Perfil P1-P1'**

En el perfil P1-P1' (Figura VI. 6) de orientación SO-NE (ver localización en Figura VI. 5) se observan dos mínimos gravimétricos principales. El que tiene su centro en el km 18 corresponde a un alto topográfico que de acuerdo con el mapa de Pasquaré et al., (1991) es ocupado por rocas andesíticas rodeadas por afloramientos de ignimbritas y domos riolíticos. De acuerdo con esta litología se esperaría que el sector central se comportara como una zona densa y de alta magnetización. Sin embargo ocurre totalmente al contrario por lo que

se considera que se trata de un efecto que no se relaciona directamente con las rocas superficiales sino con cuerpos sepultados y representa un cuerpo de baja densidad y baja susceptibilidad rodeado de cuerpos densos y magnéticos, muy probablemente una estructura caldérica pequeña.

El mínimo magnético tan notorio podría deberse a un efecto de un cuerpo con magnetismo remanente en dirección opuesta al campo magnético actual. Ambos flancos del mínimo pueden tener su origen por falla.

El mínimo gravimétrico con centro en el km 29 tiene mayor amplitud y su origen es tectónico, por su simetría se asocia con un graben NO-SE que aloja la rama norte del lago de Cuitzeo. El alto relativo entre los km 20 y 25 muestra un cuerpo local denso pero que solo tiene alta magnetización en su porción SO lo que sugiere que no se trata de un cuerpo homogéneo o se trata de cuerpos densos distintos, con el de mayor magnetización adosado al flanco del alto topográfico. El bajo gravimétrico no es acompañado por un mínimo magnético sino por un aumento paulatino de la magnetización hacia el NE con algunos efectos locales.

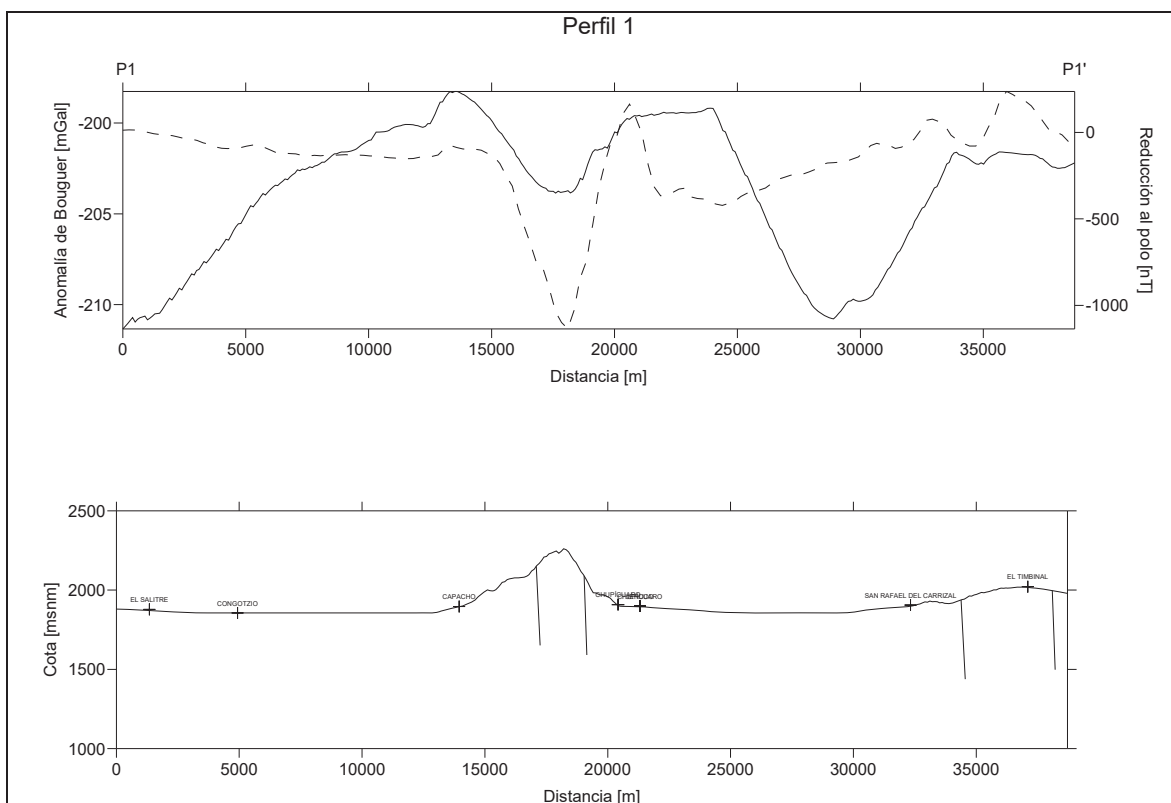
Esto se debe a que está reflejando la existencia de cuerpos ígneos locales que no alcanzan a modificar la baja densidad general del relleno volcanosedimentario del graben.

Como ya se mencionó, frecuentemente los límites de las anomalías magnéticas locales (pequeñas ondulaciones de la reducción al polo en el extremo derecho del perfil) coinciden aproximadamente con fallas identificadas en la geología de campo efecto que para ser observado requiere la amplificación de la escala del mapa magnético, en este trabajo no se incluyó la identificación de lineamientos pequeños pero los datos magnéticos tienen la calidad suficiente para identificar fallas de con longitudes mínimas de 2 o 3 km.

En la Figura VI. 7 se muestra el modelo Talwani bidimensional del perfil gravimétrico. Nótese que el mínimo del lado izquierdo fue modelado como producto de una baja densidad en el material que forma la prominencia topográfica, más el efecto debido a los

cuerpos densos que flanquean al pilar de densidad normal bajo la protuberancia topográfica. Si no fuera cierto que las rocas que forman la prominencia sean de densidad baja, bajo ese volcán se requiere la existencia de un cuerpo de menor densidad que el mostrado y el contacto lateral debe estar inclinado en la dirección opuesta.

El mínimo del lado derecho es modelado con un relleno de baja densidad que alcanza una profundidad máxima de unos 500 nT usando un contraste de densidad de 0.6 g/cm<sup>3</sup>.



**Figura VI. 6. Perfil P1-P1' (SO-NE). En la parte superior se incluye la anomalía de Bouguer (línea continua) y el campo magnético reducido al polo (línea discontinua). En la parte inferior la topografía, referencias geográficas y el echado aparente de las fallas identificadas en el campo por Pasquaré et al., (1991).**

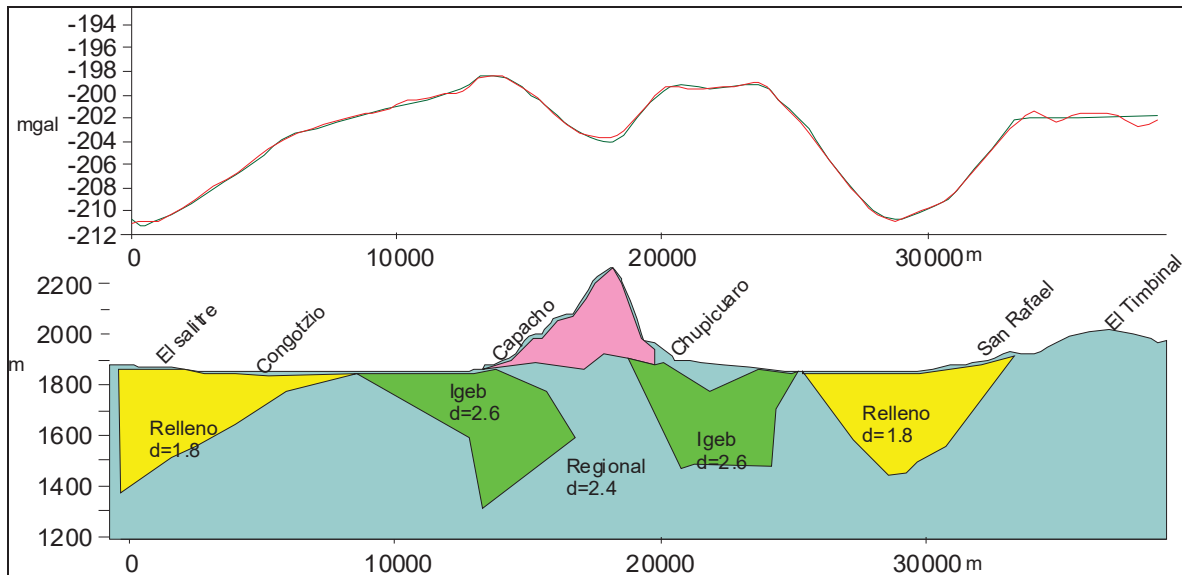


Figura VI. 7. Modelado gravimétrico bidimensional del perfil 1-1' (SO-NE).

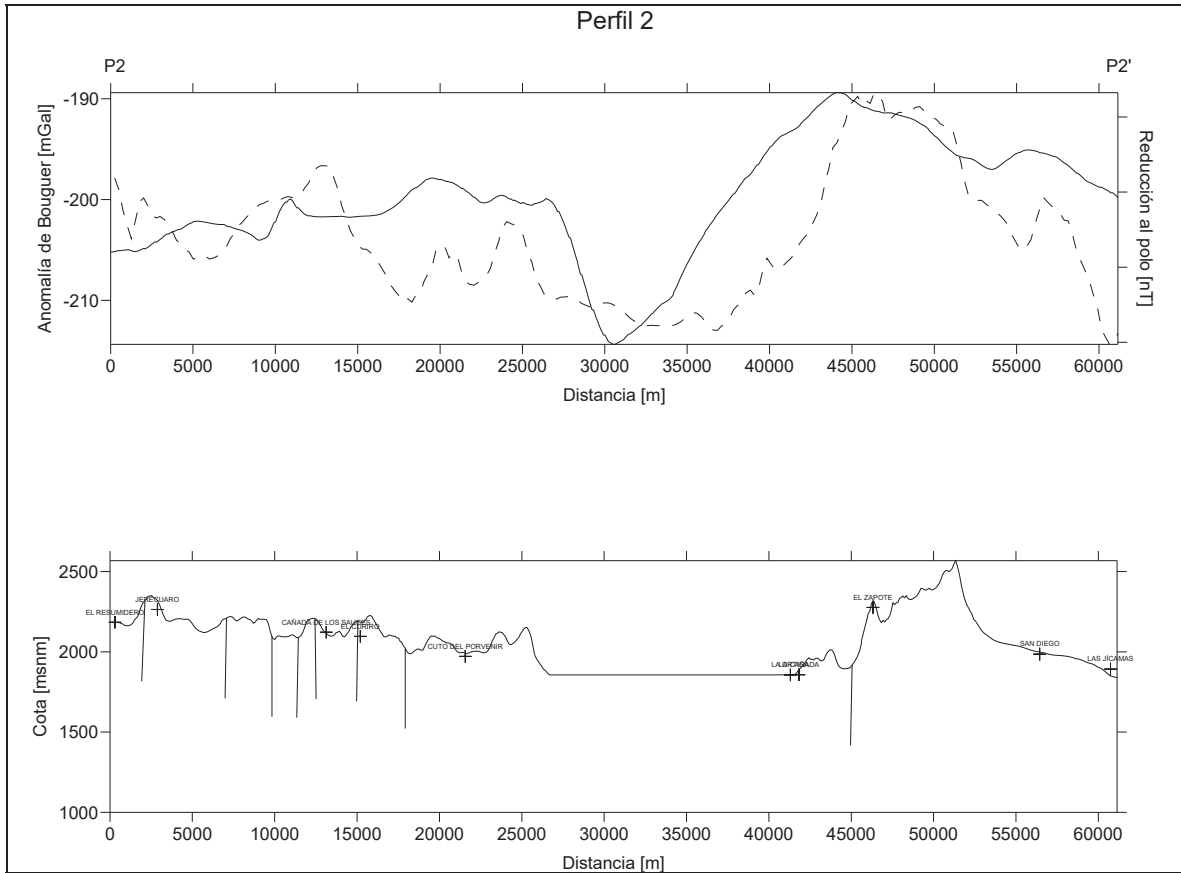
### VI.5.2. Perfil P2-P2'

El rasgo más notorio del perfil (Figura VI. 8) es el mínimo gravimétrico en su parte media, en donde se aloja el Lago de Cuitzeo, y el máximo asociado con el cerro Las Pilas en el km 45. Desde el punto de vista magnético el sector central es ocupado por un mínimo más extenso que el gravimétrico con el efecto superpuesto de cuerpos locales con extensión de menos de 5 km.

La correlación de la magnetometría con la topografía es alta, lo que sugiere que las rocas superficiales son al menos parcialmente responsables del efecto aunque haya también una contribución del subsuelo. La gravimetría muestra que el cerro Las Pilas tiene un sector sepultado bajo los sedimentos del lago pero su efecto magnético es poco importante. Esto puede deberse a que se trata de un material de baja susceptibilidad o que se profundiza rápidamente hacia el subsuelo, lo que hace disminuir rápidamente su efecto magnético.

En la Figura VI. 9 se presenta el modelo gravimétrico 2-D en el que se interpreta un espesor máximo de relleno sedimentario del orden de 750 m. La orientación del perfil produce una clara asimetría que puede interpretarse como causada por la presencia de bloques basculados con inclinaciones hacia el SO (lado izquierdo del perfil) pero tomando en

cuenta la vista de esta misma información en planta, se interpretará como efecto de las rocas ígneas sepultadas y no de basculamiento.



**Figura VI. 8. Perfil P2-P2' (SO-NE). En la parte superior se incluye la anomalía de Bouguer (línea continua) y el campo magnético reducido al polo (línea discontinua). En la parte inferior la topografía, referencias geográficas y el echado aparente de las fallas identificadas en el campo por Pasquaré et al., (1991).**

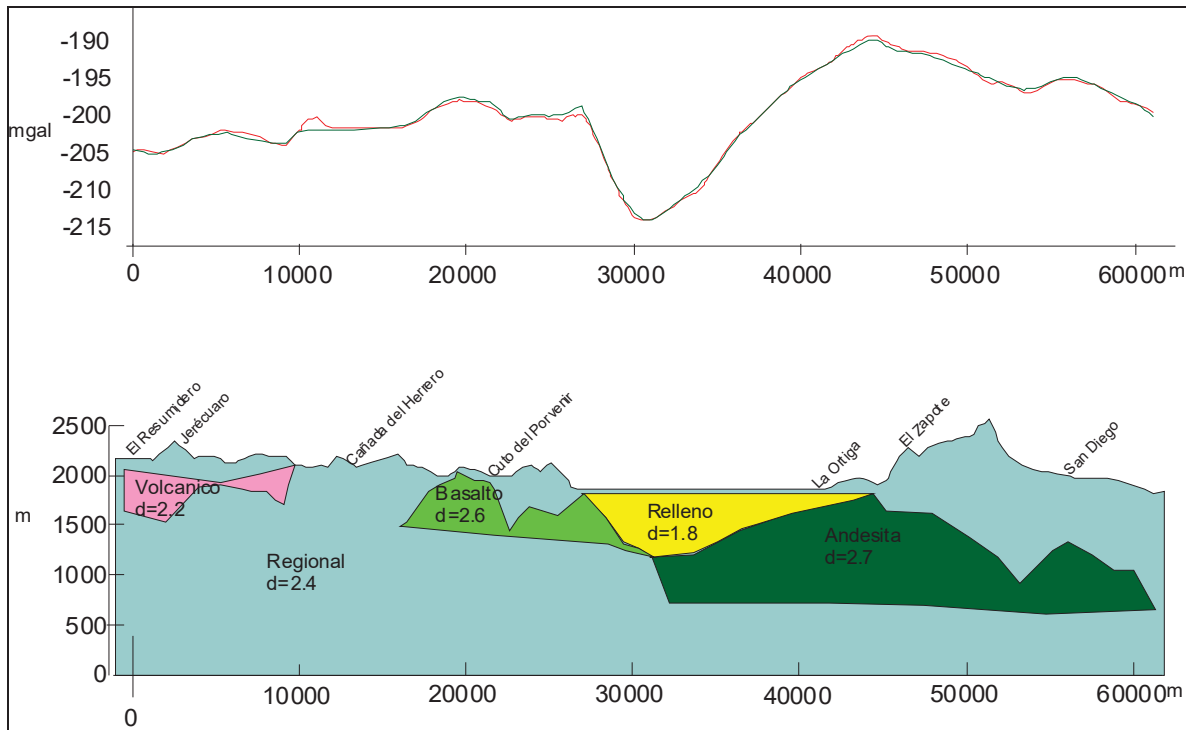


Figura VI. 9. Modelado gravimétrico bidimensional del perfil 2-2' (SO-NE).

### VI.5.3. Perfil P3-P3'

Este perfil (Figura VI.10) de orientación SO-NE se inicia con un mínimo asociado al complejo de rocas del volcán Quinceo y termina en un mínimo más intenso y de mayor regionalidad hacia el NE, en uno de sus flancos se sitúa la zona geotérmica de Los Azufres. La composición de las rocas del volcán Quinceo es incompatible con la presencia del mínimo, lo que sugiere que existe un déficit de masa que debe ser causado por rocas en el subsuelo, rellenando posiblemente una depresión de carácter tectónico. El alto gravimétrico en la parte media corresponde a un efecto regional que no tiene que ver con las rocas aflorantes. Es posible que se trate de un efecto de la Sierra Mil cumbres, la cual a su vez se halla superpuesta a un alto estructural que afecta a las rocas sedimentarias. El efecto magnético más importante corresponde a un cuerpo sepultado en la base del volcán Quinceo, en tanto que el cuerpo del volcán se comporta como un mínimo, lo que significa que las rocas son de baja susceptibilidad o más probablemente tienen una magnetización remanente en dirección distinta al campo actual.

La depresión gravimétrica en el extremo NO corresponde a valores magnéticos sin disminución importante por lo que se concluye que debe tratarse de una depresión tectónica (delimitada por fallas) parcialmente llena por rocas volcánicas de susceptibilidad intermedia.

La ligera concavidad que se observa tanto en el alto gravimétrico como magnético que ocupan la porción central del perfil parece debido a la existencia de zonas de mayor relleno volcanosedimentario entre Morelia y Queréndaro.

En el modelo gravimétrico (Figura VI. 11) únicamente se incluyeron dos cuerpos que representan las dos depresiones de los extremos del perfil. Las pequeñas ondulaciones de la parte media no se modelaron, en tanto que la zona central relativamente densa queda modelada con una densidad media de valor ‘normal’ (2.4 g/cm<sup>3</sup>).

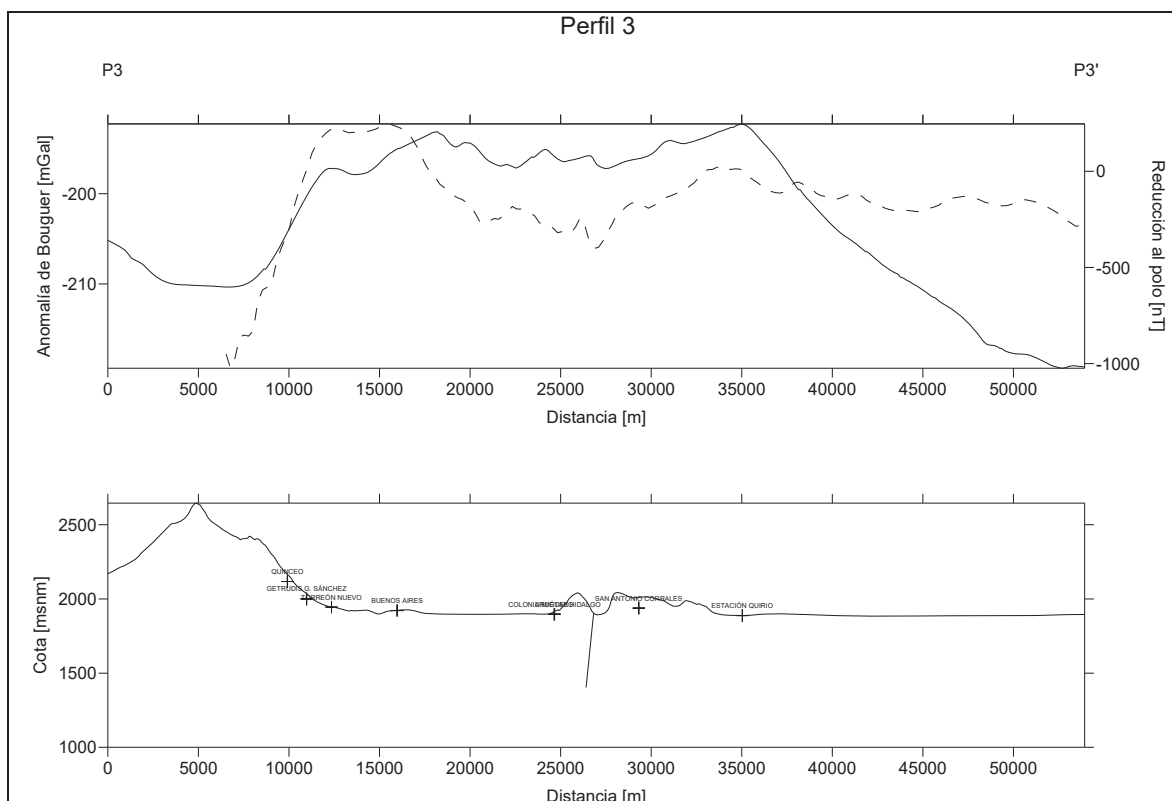


Figura VI. 10. Perfil P3-P3' (SO-NE). En la parte superior se incluye la anomalía de Bouguer (línea continua) y el campo magnético reducido al polo (línea discontinua). En la parte inferior la topografía, referencias geográficas y el echado aparente de las fallas identificadas en el campo por Pasquaré et al., (1991).

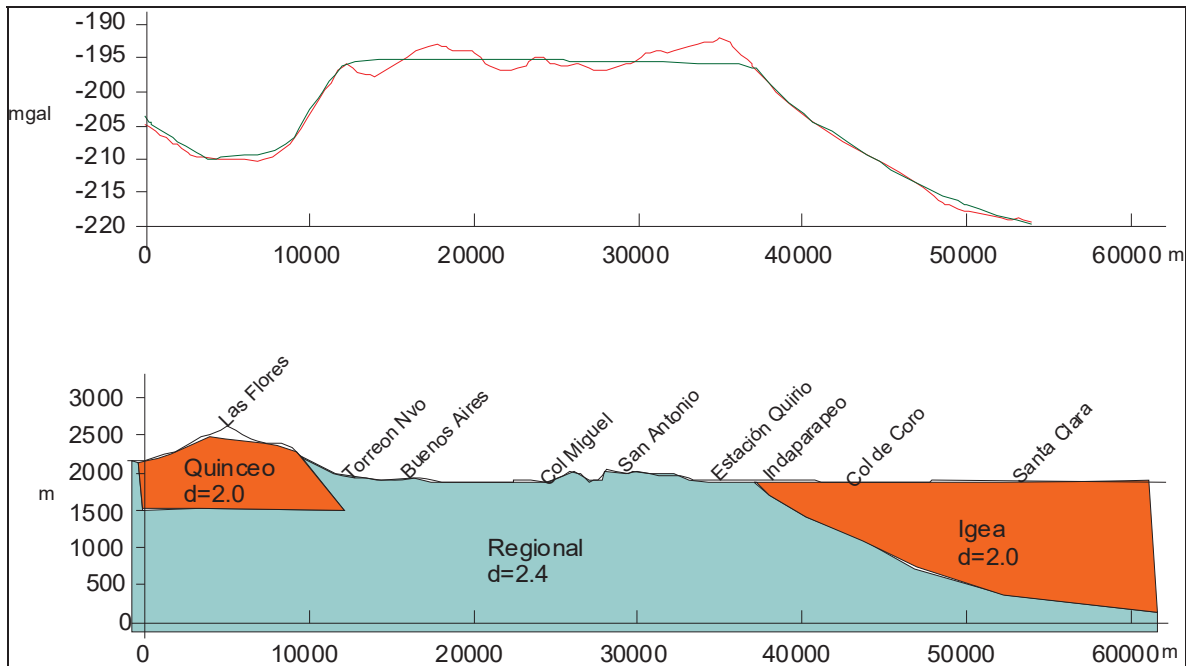


Figura VI. 11. Modelado gravimétrico bidimensional del perfil 3-3' (SO-NE).

#### VI.5.4. Perfil P4-P4'

Se trata de un perfil de orientación NNO-SSE (Figura VI. 12) en el que gravimétricamente se observa una tendencia creciente hacia el sur. Se observan tres mínimos gravimétricos principales. El primero se debe a una depresión tectónica. El segundo se asocia a lo que se postula como una pequeña caldera, descrita en el perfil P1-P1' y el último constituye un efecto de la depresión tectónica que contiene el Lago de Cuitzeo. Sus flancos son casi simétricos y por tanto se postula como un graben. Sin embargo, sus bordes no coinciden con los límites del lago sino que son más restringidos. El nulo efecto magnético que se refleja en esta depresión gravitacional sugiere que hay un contenido de rocas ígneas similar al de sus inmediaciones lo que sugiere que en este sector deben existir depósitos ígneos junto con los sedimentos. El aumento gravitacional hacia el sur es el efecto combinado de la disminución de las raíces continentales con rumbo a la costa pero con una contribución de rocas densas someras, posiblemente calizas compactas.

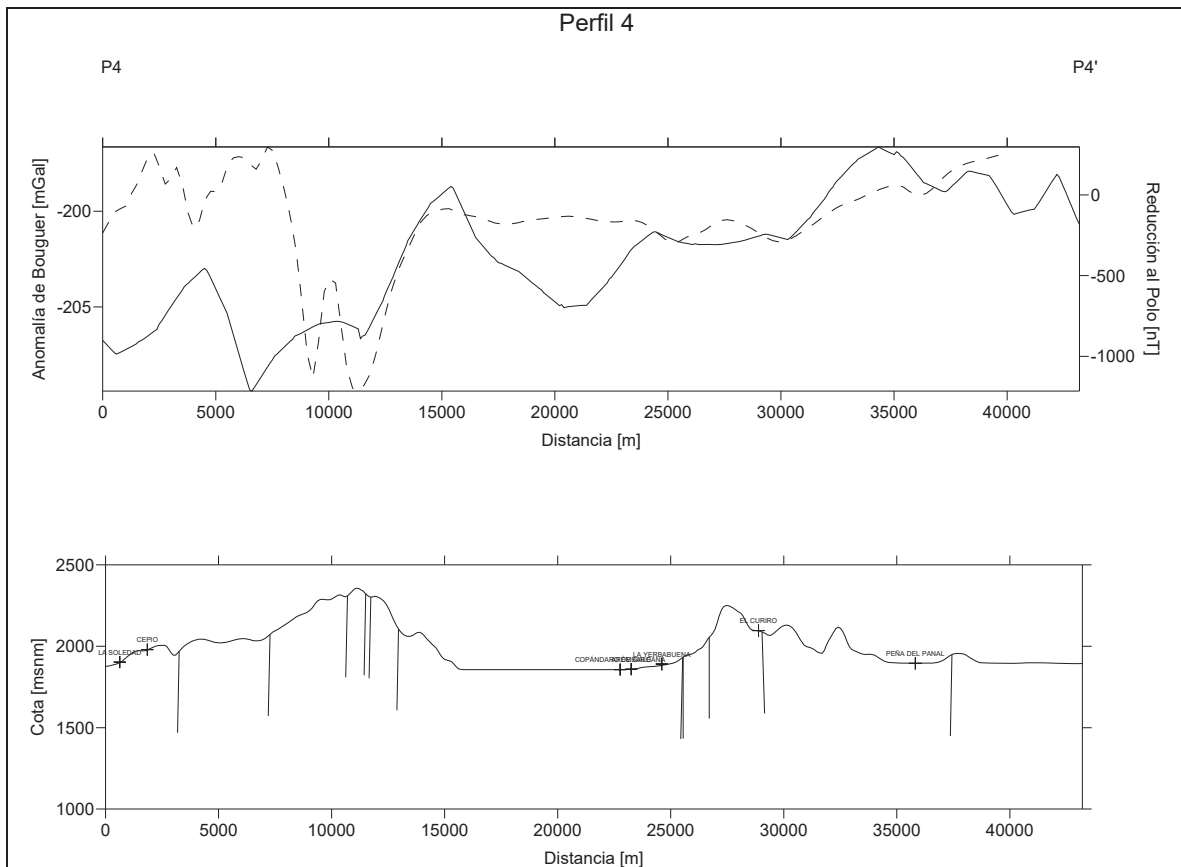
Para el modelado (Figura VI. 13) se utilizó una serie de pequeños cuerpos. Es importante notar la presencia de las anomalías positivas a 5 y 15 km y que han tenido que modelarse

con cuerpos densos sepultados, cuerpos que no tienen un reflejo topográfico y consecuentemente son efectos en el subsuelo en los flancos del alto topográfico.

Un efecto local importante es el alto magnético en el km 10 que puede reflejar una roca magnética asociada con una resurgencia.

El relleno del lago se modela con un cuerpo de apenas 300 m de espesor, lo que puede ser razonable por la presencia de rocas ígneas someras. En tal caso el basamento gravimétrico correspondería a rocas ígneas más someras y recientes que en el resto de los modelos.

En el extremo derecho (SSE) del perfil se modelaron las pequeñas cuencas locales con objeto de ilustrar el tamaño de los cuerpos que podrían estar causando tales efectos. El modelado de este tipo de anomalías de pequeño tamaño es adecuado para los fines de un estudio con objetivos agrícolas, pero con los datos disponibles solo es adecuado cuando existen estaciones gravimétricas próximas con una orientación adecuada para el modelado.



**Figura VI. 12. Perfil P4-P4' (NNO-SSE). En la parte superior se incluye la anomalía de Bouguer (línea continua) y el campo magnético reducido al polo (línea discontinua). En la parte inferior la topografía, referencias geográficas y el echado aparente de las fallas identificadas en el campo por Pasquaré et al., (1991).**

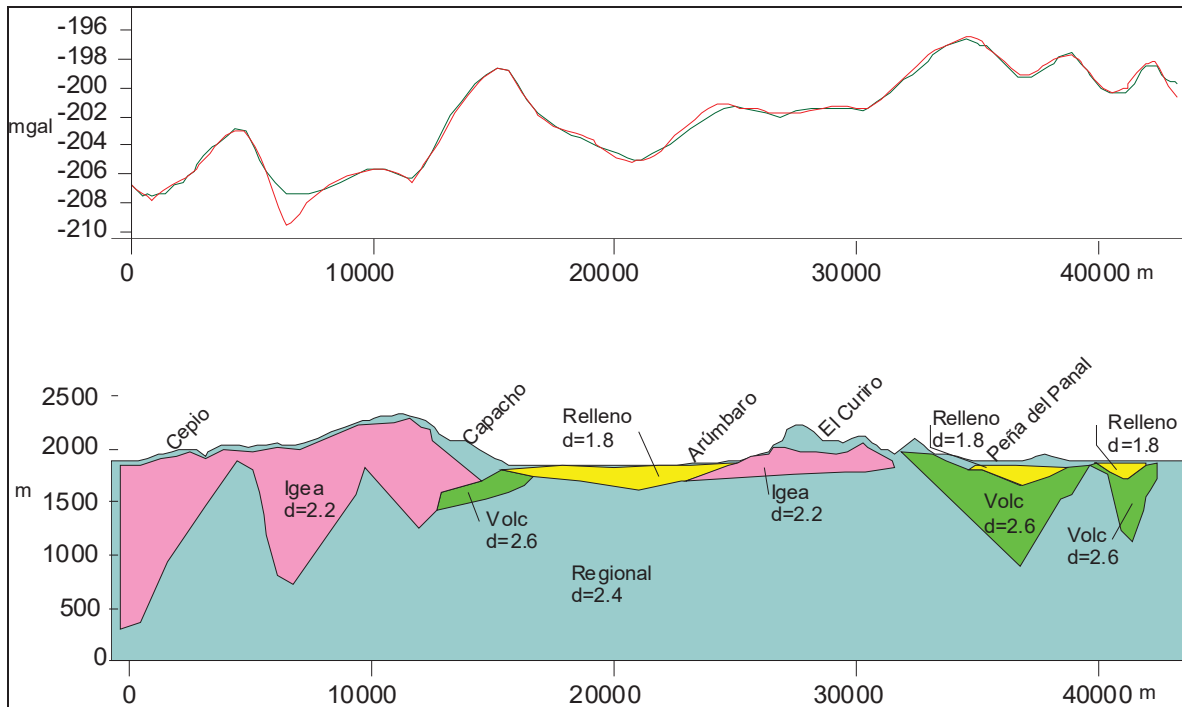
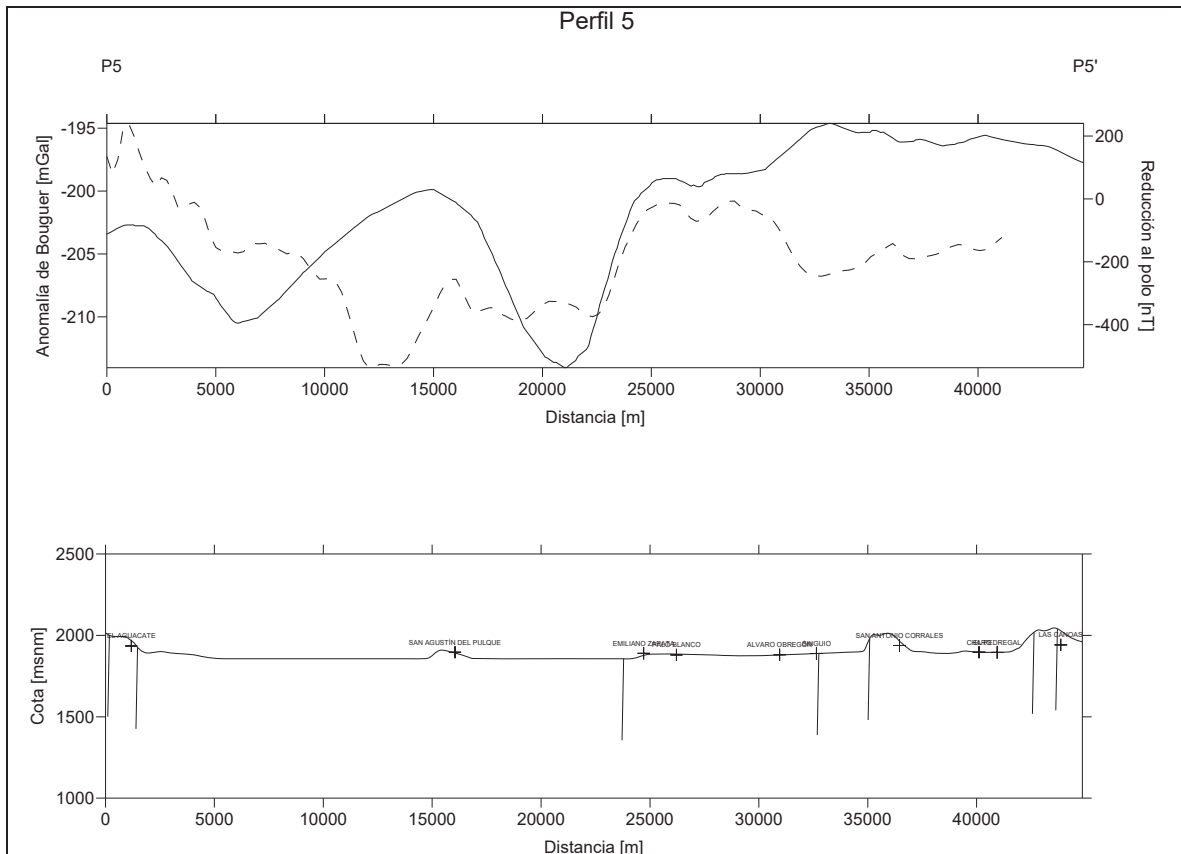


Figura VI. 13. Modelado gravimétrico bidimensional del perfil 4-4' (NNO-SSE).

### VI.5.5. Perfil P5-P5'

Este perfil es el más adecuado para modelar bidimensionalmente la zona de relleno del Lago de Cuitzeo (Figura VI. 14). Gravimétricamente se observan dos mínimos que corresponden a la depresión tectónica que contiene la rama norte del lago y la máxima depresión gravimétrica en la cuenca. De fundamental importancia es observar el alto gravitacional que separa a ambas anomalías y que se asocia a una roca ígnea sepultada bajo la península en la que se asienta la población de Cuitzeo. Sin embargo, debe notarse que la forma detallada de la anomalía es aproximada pues no se dispone de estaciones en la zona cubierta por agua en la rama norte del lago.



**Figura VI. 14. Perfil P5-P5' (NNO-SSE). En la parte superior se incluye la anomalía de Bouguer (línea continua) y el campo magnético reducido al polo (línea discontinua). En la parte inferior la topografía, referencias geográficas y el echado aparente de las fallas identificadas en el campo por Pasquaré et al., (1991).**

Magnéticamente se observa en el perfil un mínimo asociado con el alto gravimétrico, sin embargo la Figura VI. 15 muestra claramente que el alto magnético correspondiente al cuerpo denso se encuentra desplazado hacia el O y NO y parte del cuerpo fuente se encuentra sepultado en los sedimentos del lago. El mínimo gravimétrico al sur es casi simétrico y consecuentemente se considera un graben. Magnéticamente solo se observa un escarpe en la ribera sur.

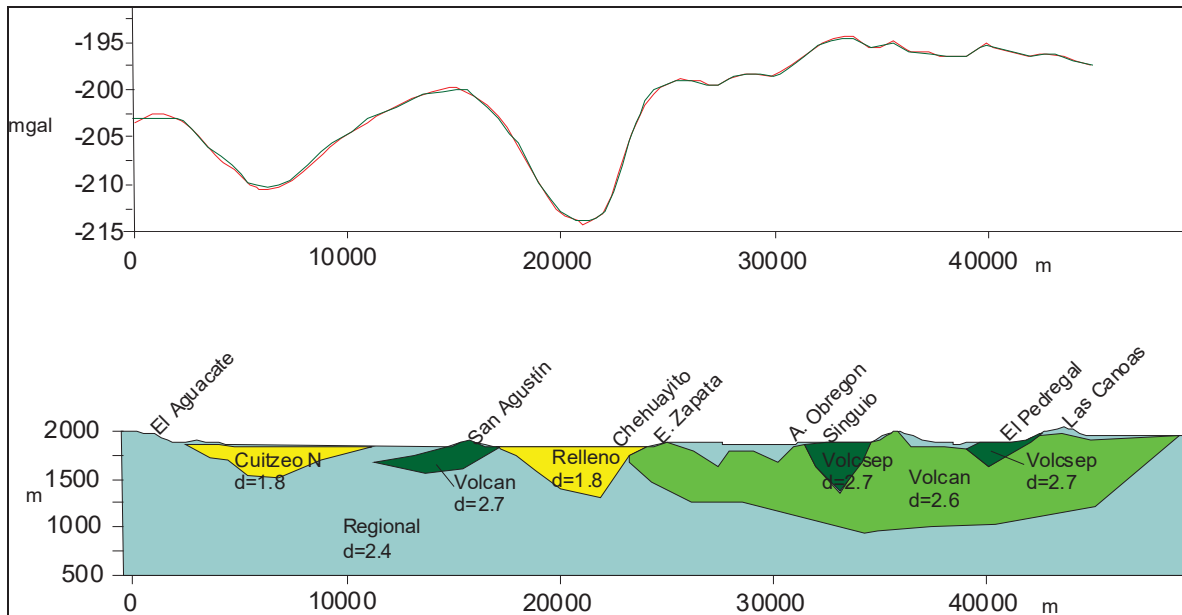


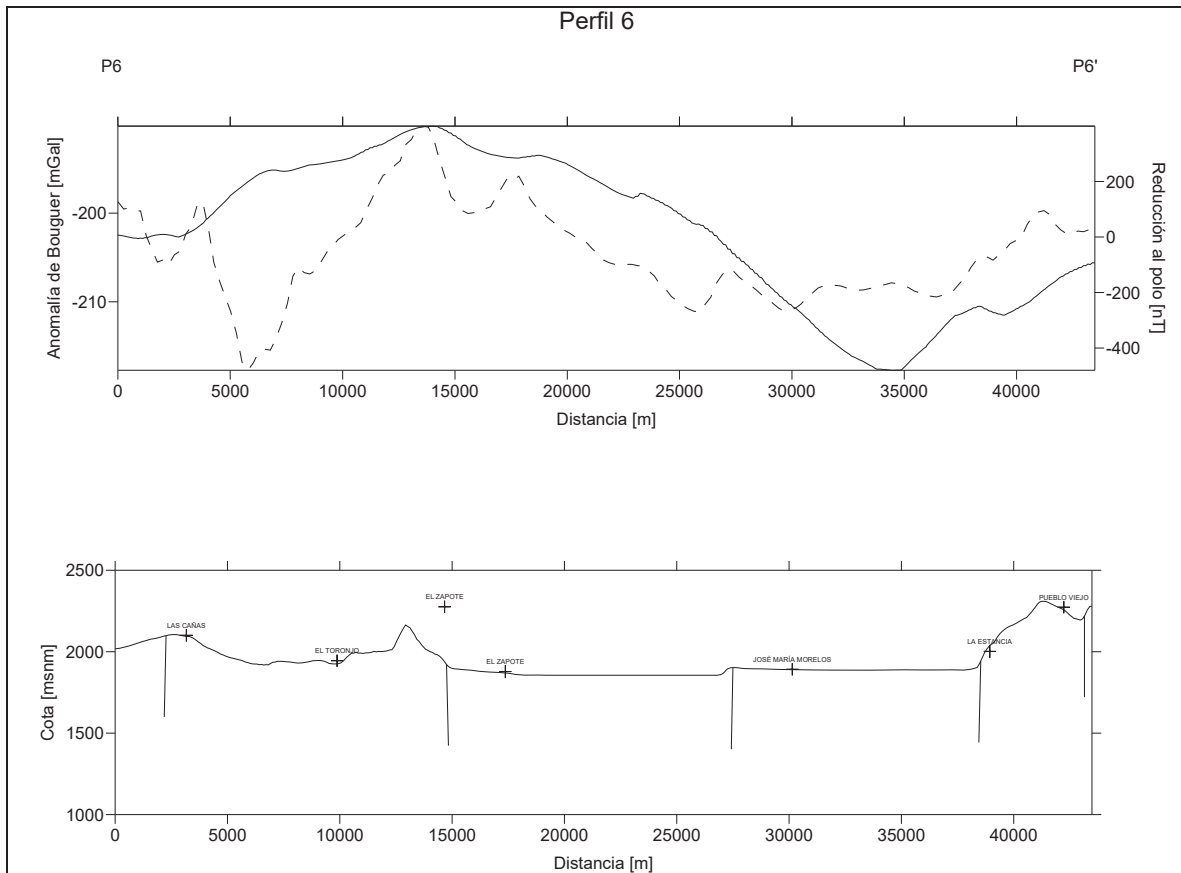
Figura VI. 15. Modelado gravimétrico bidimensional del perfil 5-5' (NNO-SSE).

### VI.5.6. Perfil P6-P6'

Se trata de un perfil que tiene por objeto modelar la rama oriental del Lago de Cuitzeo y la acequia de Queréndaro. (Figura VI. 16). Gravimétricamente el efecto dominante es un máximo que ocupa los dos tercios iniciales del perfil y que refleja la existencia de una zona ígnea de dimensiones mayores que las sugeridas por los afloramientos volcánicos. Claramente parte de estas rocas ígneas se encuentran bajo la rama oriental del lago, por lo que el espesor de sedimentos debe ser menor a los que se encuentran al oeste del lago.

El efecto magnético más notorio corresponde al volcanismo de Las Pilas, al N del cual hay una depresión magnética correspondiente a una depresión tectónica rellena por material de baja susceptibilidad (entre Las Cañas y El Toronjo).

El mínimo gravimétrico más importante ocurre entre José María Morelos y La Estancia, la cual es modelada con un cuerpo con densidad 2.1 g/cm<sup>3</sup>, posiblemente una combinación de rocas ígneas con sedimentos (Figura VI. 17).



**Figura VI. 16. Perfil P6-P6' (NNO-SSE). En la parte superior se incluye la anomalía de Bouguer (línea continua) y el campo magnético reducido al polo (línea discontinua). En la parte inferior la topografía, referencias geográficas y el echado aparente de las fallas identificadas en el campo por Pasquaré et al., (1991).**

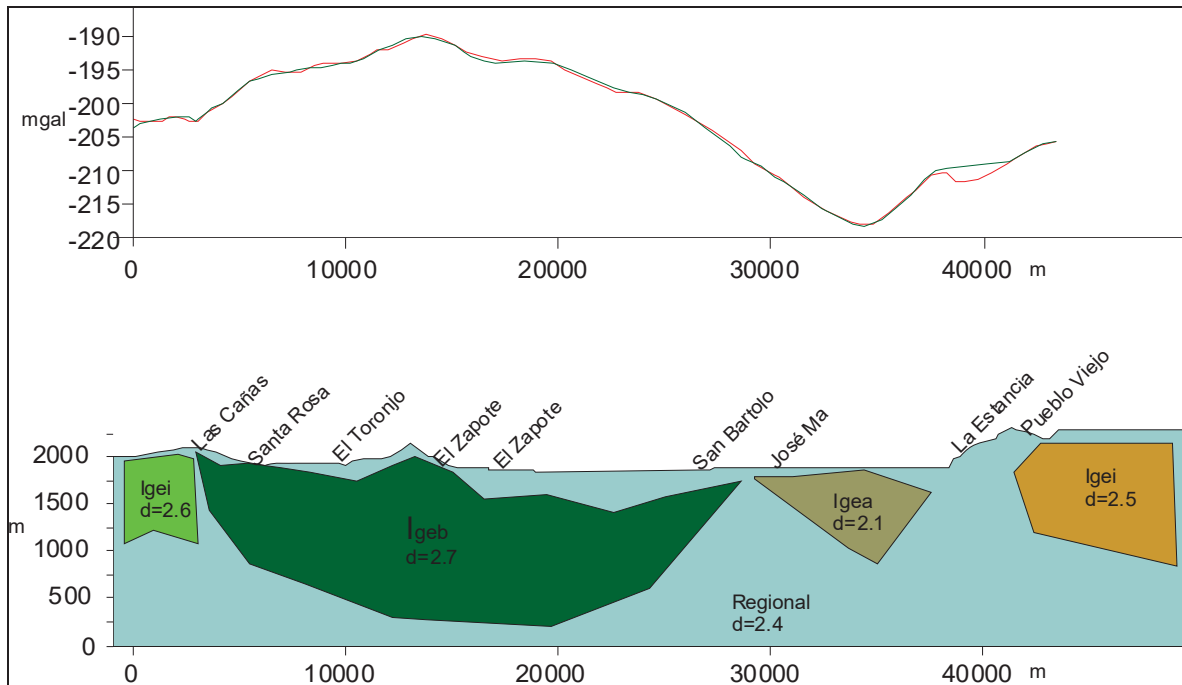


Figura VI. 17. Modelado gravimétrico bidimensional del perfil 6-6' (NNO-SSE).

### VI.5.7. Perfil P7-P7'

Se trata de un perfil corto con orientación NO-SE dominado por la presencia de un alto gravimétrico que se ubica en una zona topográfica relativamente deprimida. Esto no puede tener otro origen que la existencia de rocas de alta densidad sepultadas bajo los sedimentos de lo que parece una cuenca tectónica con orientación E-O. El alto gravimétrico aparece en planta (Figura VI. 2) como una prolongación hacia el NE del volcanismo de Las Pilas. Sin embargo, en este sector las rocas ígneas que dan origen a la anomalía gravimétrica tienen una susceptibilidad relativamente baja.

El alto magnético en el extremo SE del perfil forma parte de un cuerpo ígneo de orientación SO-NE que cubre desde el subsuelo de la rama oriental del lago hacia Andocutín y más al NE. Esta cadena ígnea se ubica en un rasgo muy regional que se prolonga hasta las inmediaciones de Querétaro y que parece ser una falla SO-NE con caída al SE. Ese sector tiene bajos valores gravimétricos debido a que el efecto dominante es el de la gran depresión tectónica. Aún así, las rocas ígneas pueden tener poco espesor o ser de densidad relativamente baja pues no exhiben ningún efecto gravimétrico propio.

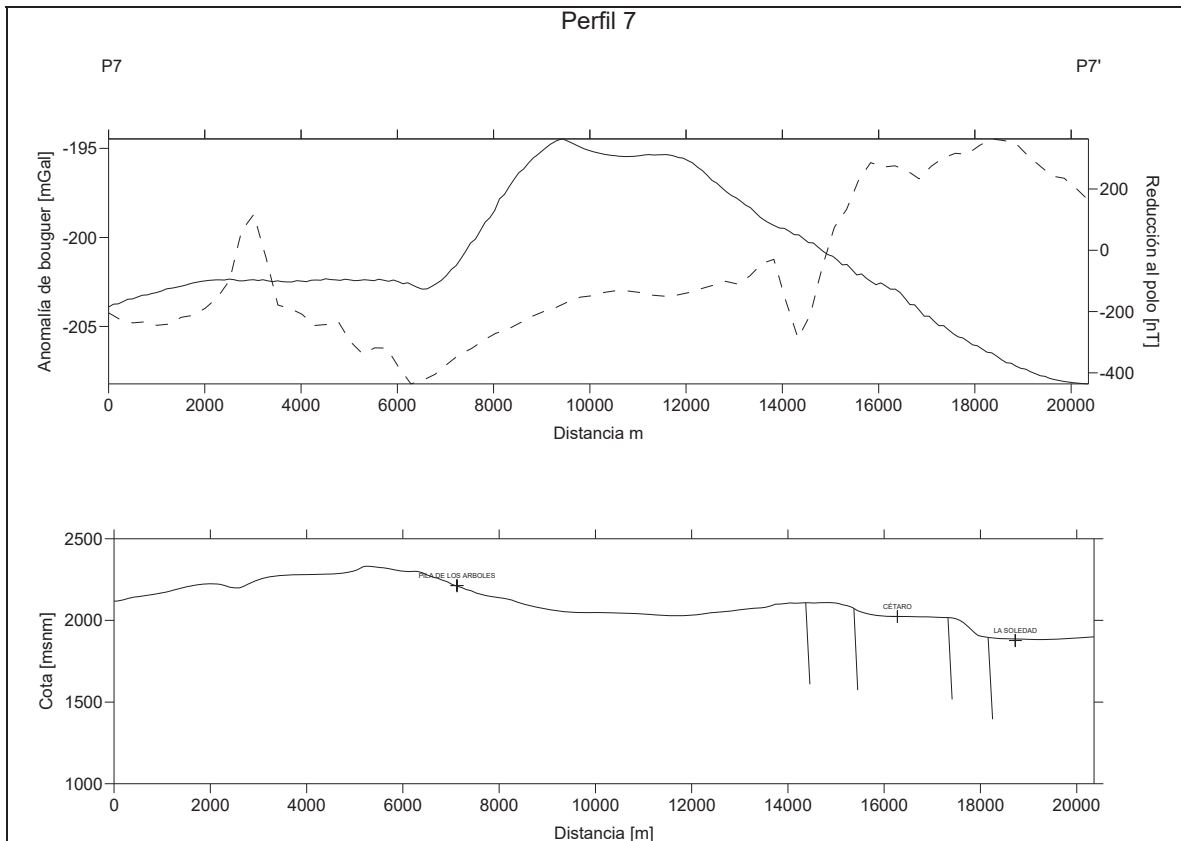


Figura VI. 18. Perfil P7-P7' (NNO-SSE). En la parte superior se incluye la anomalía de Bouguer (línea continua) y el campo magnético reducido al polo (línea discontinua). En la parte inferior la topografía, referencias geográficas y el echado aparente de las fallas identificadas en el campo por Pasquaré et al., (1991).

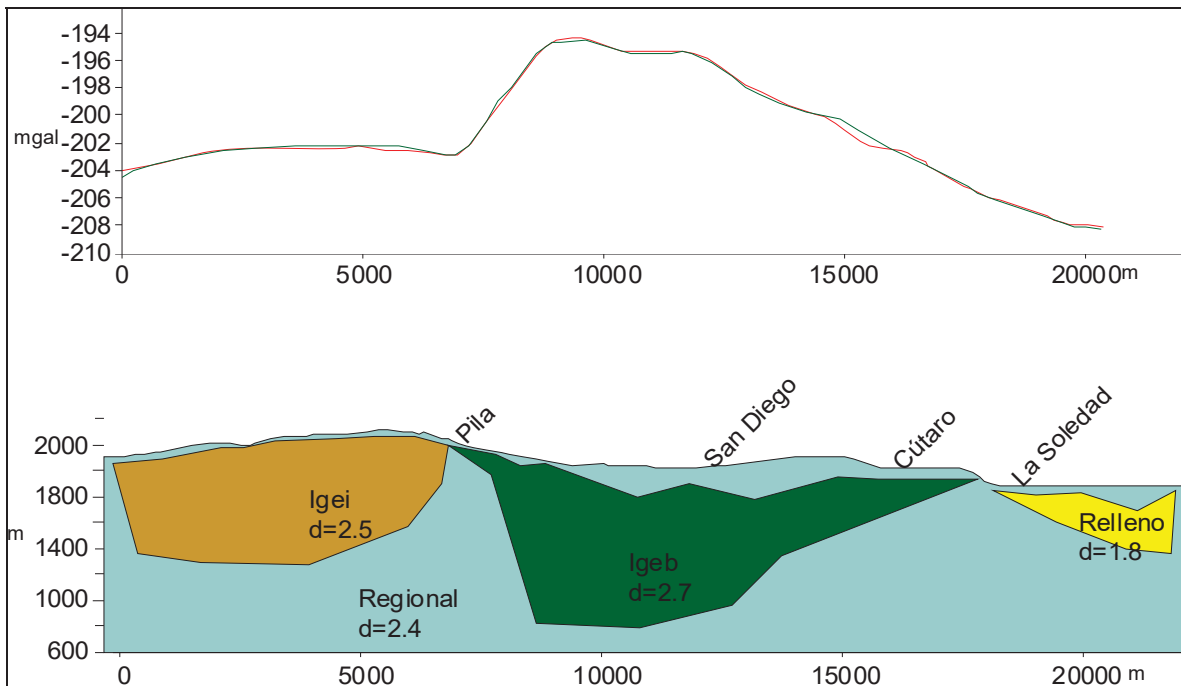


Figura No. 19.- Modelado gravimétrico bidimensional del perfil 7-7' (NNO-SSE).

#### **VI.5.8. Perfiles P8-P8', P9-P9' y P10-P10'**

Estos perfiles son ilustrativos del nivel de detalle requerido para el uso de los campos potenciales utilizados en este estudio para su aplicación con fines de la investigación de los acuíferos agrícolas de la región sur de la cuenca de Cuitzeo (Figuras VI. 20, VI. 22 y VI. 24). Los perfiles fueron ubicados de tal forma que tratan de aproximarse a la ubicación de las estaciones gravimétricas. En este sentido el de mejor ubicación es el primero de ellos. En el modelado (Figuras Nos. VI. 21, VI. 23 y VI. 25) se utilizaron cuerpos pequeños para reproducir hasta las ondulaciones gravimétricas de un par de kilómetros de ancho.

Desde luego las zonas de bajo valor gravimétrico responden a la presencia de rocas de menor densidad y consecuentemente indican la existencia de un mayor espesor del relleno que tienen valores de algunas centenas de metros. En principio tales zonas deben tener valores de magnetización relativamente bajos y topografías bajas y planas. Cuando se encuentran anomalías magnéticas positivas y no existe rasgo topográfico superficial sin duda se trata de la presencia de rocas ígneas dentro del relleno sedimentario.

No se hace una descripción detallada de los perfiles debido a que los rasgos son muy numerosos y no es posible hacer una discusión individual de cada uno de ellos.

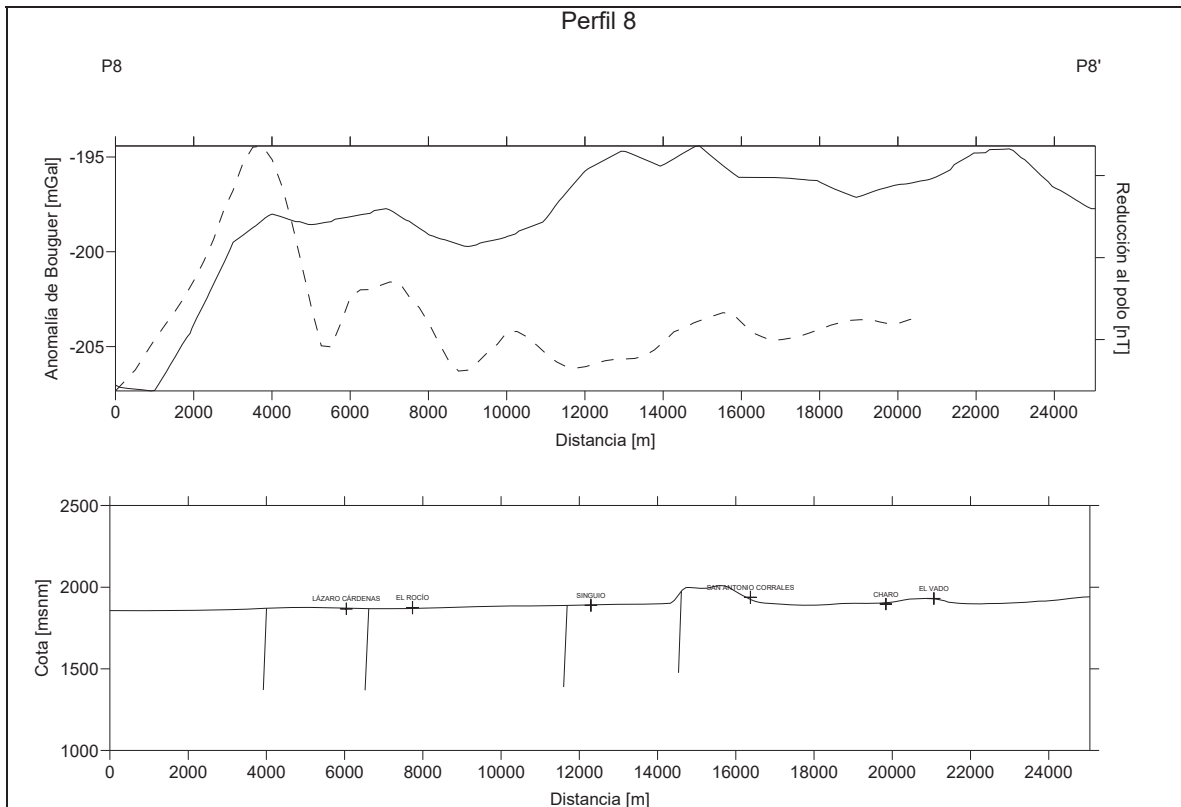


Figura VI. 20. Perfil P8-P8' (NNE-SSO). En la parte superior se incluye la anomalía de Bouguer (línea continua) y el campo magnético reducido al polo (línea discontinua). En la parte inferior la topografía, referencias geográficas y el echado aparente de las fallas identificadas en el campo por Pasquaré et al., (1991).

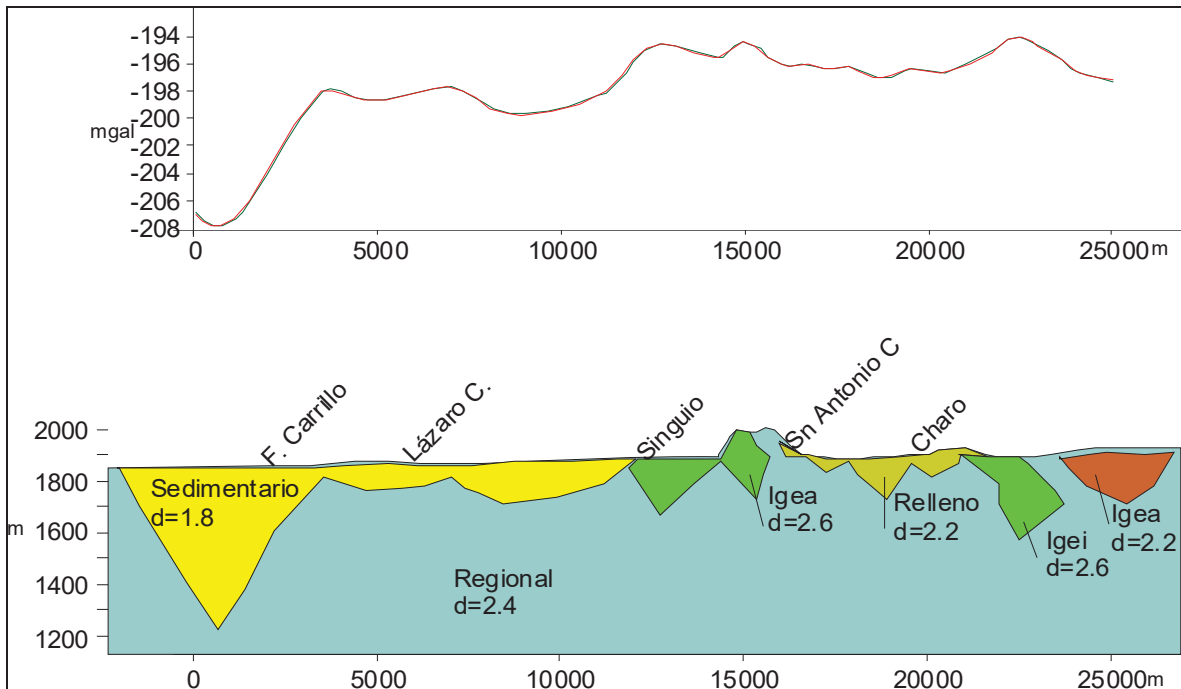
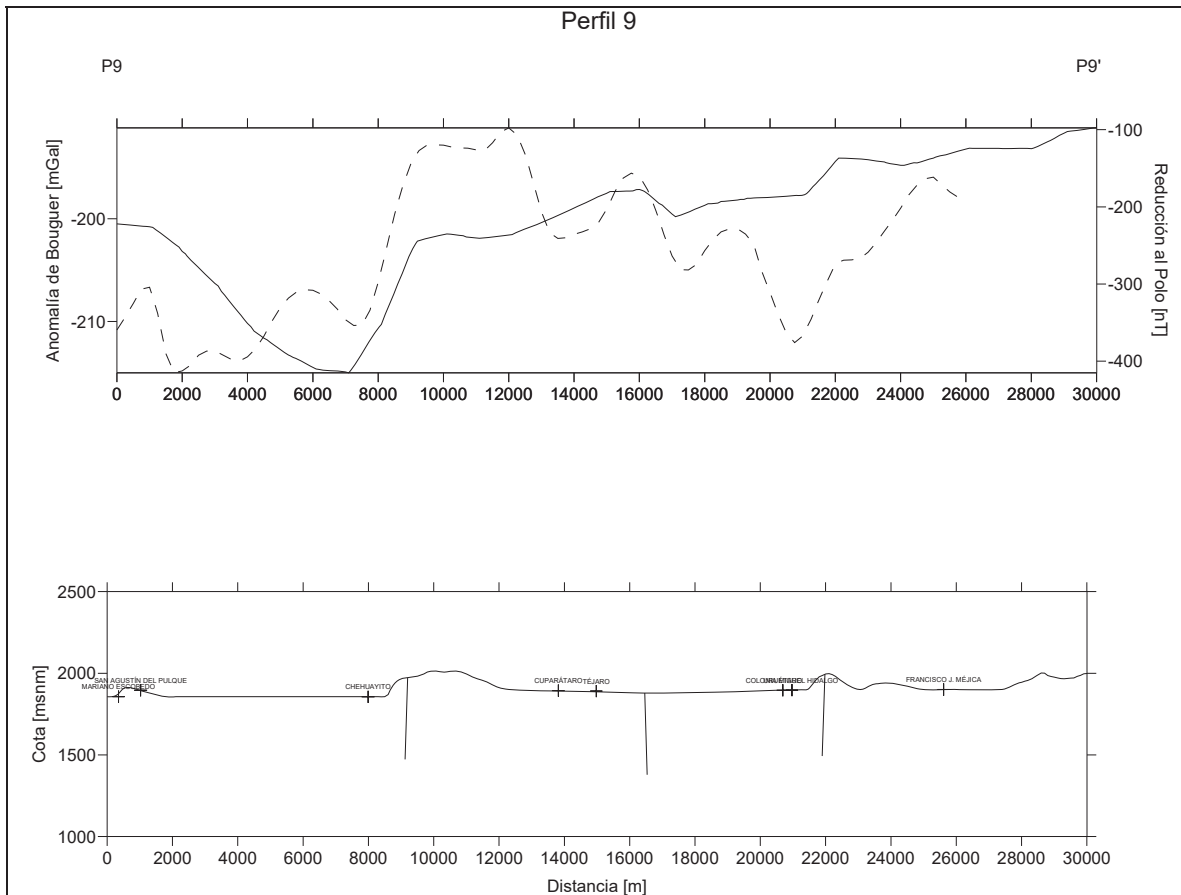


Figura VI. 21. Modelado gravimétrico bidimensional del perfil 8-8' (NNE-SSO).



**Figura VI. 22. Perfil P9-P9' (NNE-SSO). En la parte superior se incluye la anomalía de Bouguer (línea continua) y el campo magnético reducido al polo (línea discontinua). En la parte inferior la topografía, referencias geográficas y el echado aparente de las fallas identificadas en el campo por Pasquaré et al., (1991).**

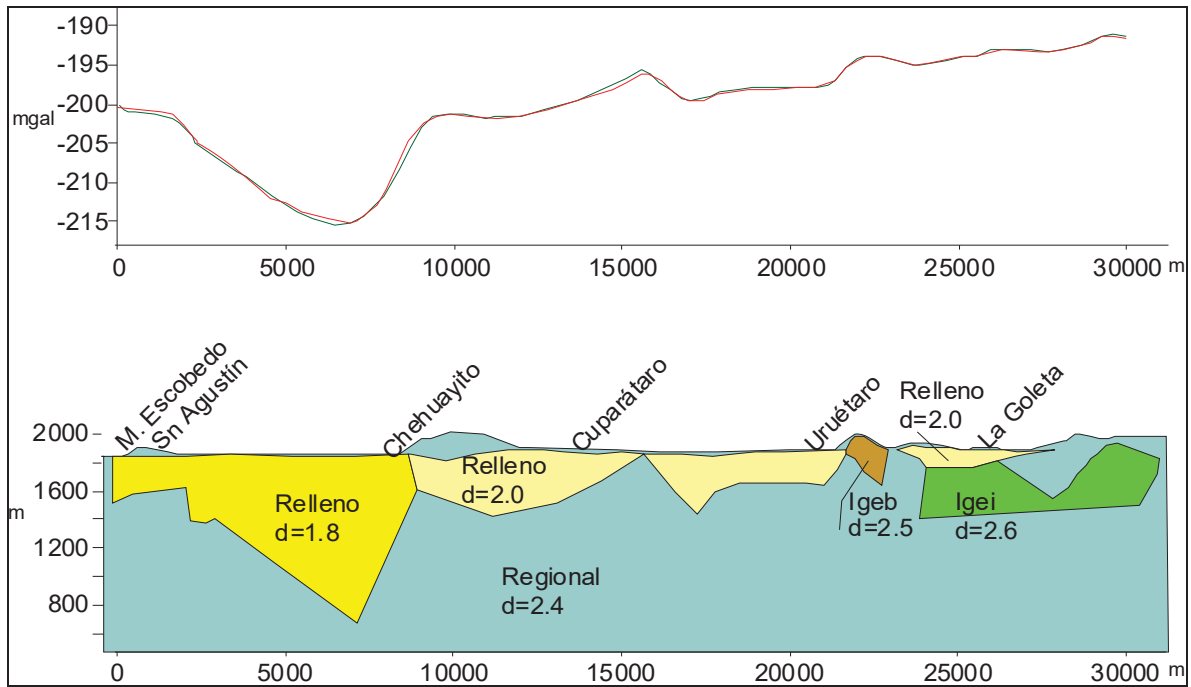
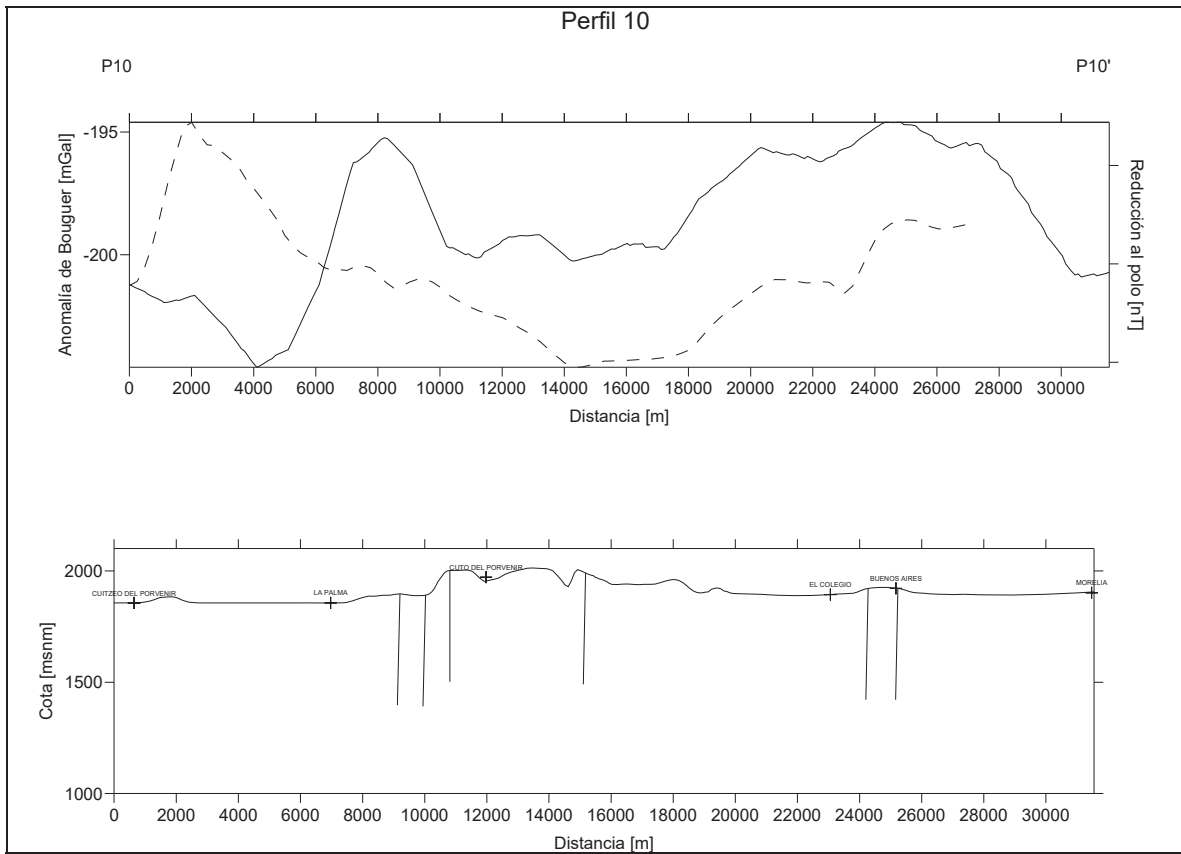


Figura VI. 23. Modelado gravimétrico bidimensional del perfil 9-9' (NNE-SSO).



**Figura VI. 24. Perfil P10-P10' (NNE-SSO). En la parte superior se incluye la anomalía de Bouguer (línea continua) y el campo magnético reducido al polo (línea discontinua). En la parte inferior la topografía, referencias geográficas y el echado aparente de las fallas identificadas en el campo por Pasquaré et al., (1991).**

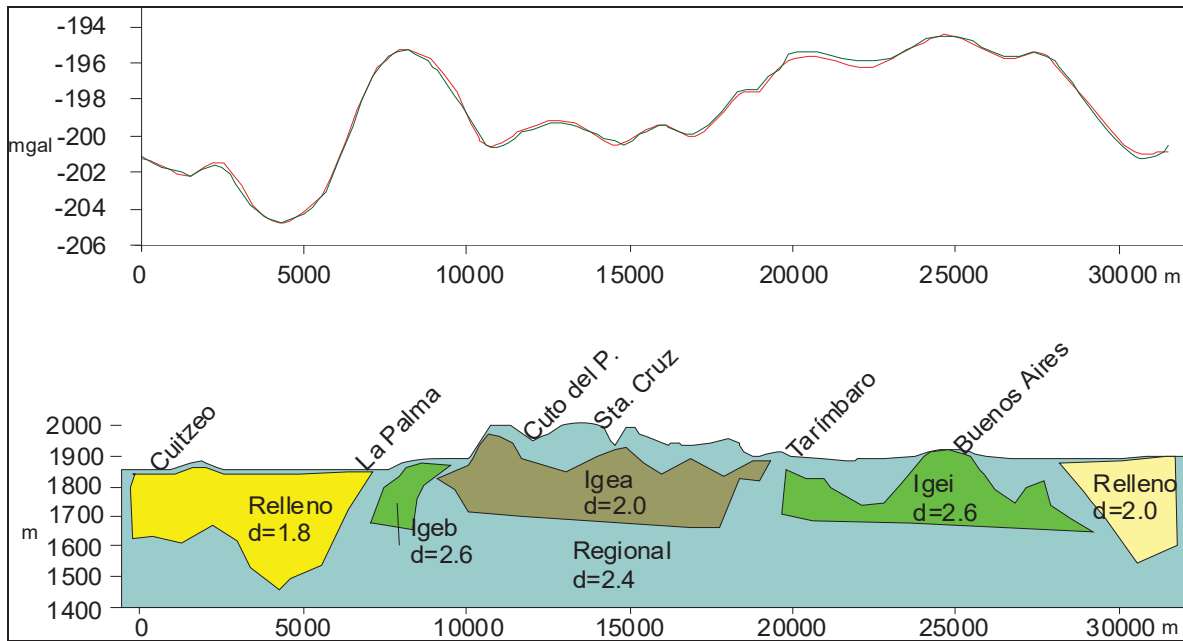


Figura VI. 25. Modelado gravimétrico bidimensional del perfil 10-10' (NNE-SSO).

## VI.6. Conclusiones

La presencia de cuerpos ígneos sepultados bajo los sedimentos del Lago de Cuitzeo permiten postular la existencia de fuentes de calor de origen volcánico como el origen de calor que alimenta a las manifestaciones termales en los alrededores del lago. En tal caso algunas de las fallas identificadas por la geología de campo, como los lineamientos gravimétricos y magnéticos pueden actuar como vías de comunicación de las aguas meteóricas con las fuentes de calor en el subsuelo. En términos generales no se encontraron evidencias que sugieran la existencia de grandes fallas que mediante la circulación profunda y sin la presencia de volcanismo reciente, pudieran explicar las altas temperaturas medidas en los manantiales. Las de mayores dimensiones serían las de orientación NE-SO que confluyen en la zona de Querétaro.

Se considera que las manifestaciones termales pueden relacionarse a diferentes áreas de volcanismo emparentados por su origen tectónico, pero que constituyen sistemas hidrotermales separados.

A partir de los perfiles gravimétricos se estimó que el espesor de los sedimentos varia por zonas, siendo mayor en la parte central del lago donde se estima un espesor aproximado de 630 m, mientras que hacia la parte este se calcula un espesor aproximado de 220 m y en la parte oeste tendríamos un espesor promedio de sedimentos de 150 m, en la rama norte del lago se estimó un espesor cercano a los 340 m. Con el espesor de sedimentos definidos dentro del lago de Cuitzeo y las riberas del mismo, se tiene delimitada la forma del subsuelo, la cual es incorporada a los perfiles realizados de la geología del subsuelo e integrada al SIG.

## VII.- BALANCE HIDROLÓGICO

### VII.1. Generalidades

Comencemos por definir el concepto de ciclo hidrológico, que describe al movimiento general del agua, ascendente por la evaporación y descendente primero por las precipitaciones y después en forma de escorrentía superficial y subterránea. (Figura VII. 1)

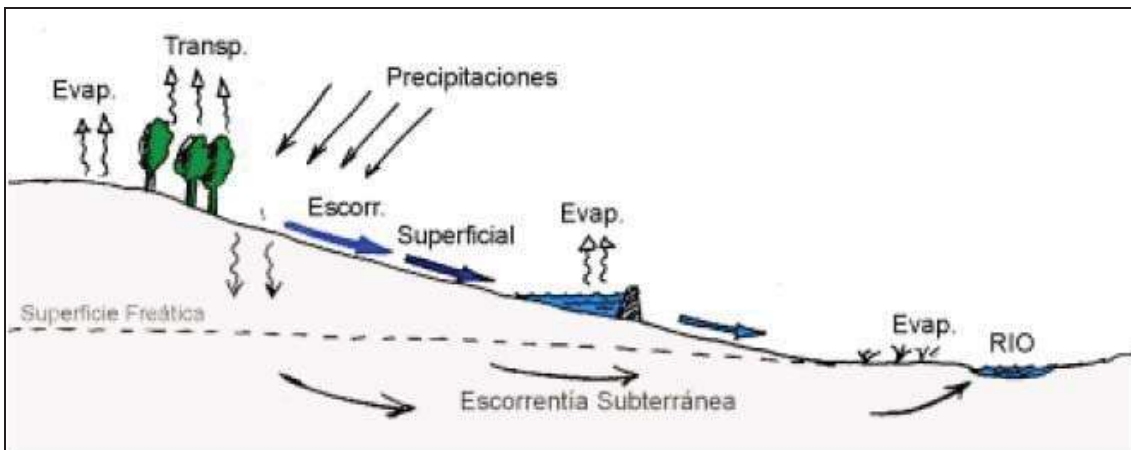


Figura VII. 1. Ciclo Hidrológico

La escorrentía subterránea es mucho más lenta que la superficial. La lentitud (a veces inmovilidad) de la escorrentía subterránea confiere al ciclo algunas características fundamentales, como que los ríos continúen con caudal mucho tiempo después de las últimas precipitaciones.

Las aguas subterráneas no son más que una de las fases o etapas del ciclo hidrológico del agua. A veces se olvida esta obviedad y se explotan las aguas de una región como si nada tuviera que ver con las precipitaciones o la escorrentía superficial, con resultados indeseables.

Como se trata de un ciclo podríamos considerar todas sus fases comenzando desde cualquier punto, pero lo más intuitivo puede ser comenzar en la precipitación y considerar qué caminos puede seguir el agua que cae sobre los continentes en las precipitaciones:

**E v a p o r a c i ó n**. Una parte se evapora desde la superficie del suelo (“charcos”) o si ha quedado retenida sobre las hojas de los árboles. A este último fenómeno se le denomina “intercepción”, y en lluvias de corta duración sobre zonas de bosque puede devolver a la atmósfera una gran parte del agua precipitada sin haber tocado el suelo.

**I n f i l t r a c i ó n**. El agua infiltrada puede, a su vez, seguir estos caminos:

**Evaporación**. Se evapora desde el suelo húmedo, sin relación con la posible vegetación.

**Transpiración**. Las raíces de las plantas absorben el agua infiltrada en el suelo, una pequeña parte es retenida para su crecimiento y la mayor parte es transpirada.

La suma de la evaporación y la transpiración se estudia conjuntamente: y es conocida como la evapotranspiración

**Escorrentía subsuperficial o hipodérmica (“interflow”)**, que tras un corto recorrido lateral antes de llegar a la superficie freática acaba saliendo a la superficie.

Si no es evaporada ni atrapada por las raíces, la gravedad continuará llevando el agua hacia abajo, hasta la superficie freática; allí aún puede ser atrapada por las raíces de las plantas “freatofitas” (chopos, álamos,...), de raíces muy profundas, y que a diferencia de otras plantas, buscan el agua del medio saturado.

Finalmente, el agua restante da lugar a la escorrentía subterránea

**E s c o r r e n t í a s u p e r f i c i a l**. El agua de las precipitaciones que no es evaporada ni infiltrada, escurre superficialmente. Aún le pueden suceder varias cosas:

Parte es evaporada: desde la superficie de ríos, lagos y embalses también se evapora una pequeña parte.

Otra parte puede quedar retenida como nieve o hielo o en lagos o embalses.

(“Escorrentía superficial diferida”)

Finalmente una parte importante es la escorrentía superficial rápidamente sigue su camino hacia el mar o una cuenca cerrada.

## VII.2. Ubicación de las estaciones

En la Figura VII. 2 se ubican en planta de las estaciones meteorológicas con su clave de referencia, en la figura se ubicaron las estaciones que se tienen dentro de la cuenca así como las estaciones cercanas al límite de la cuenca.

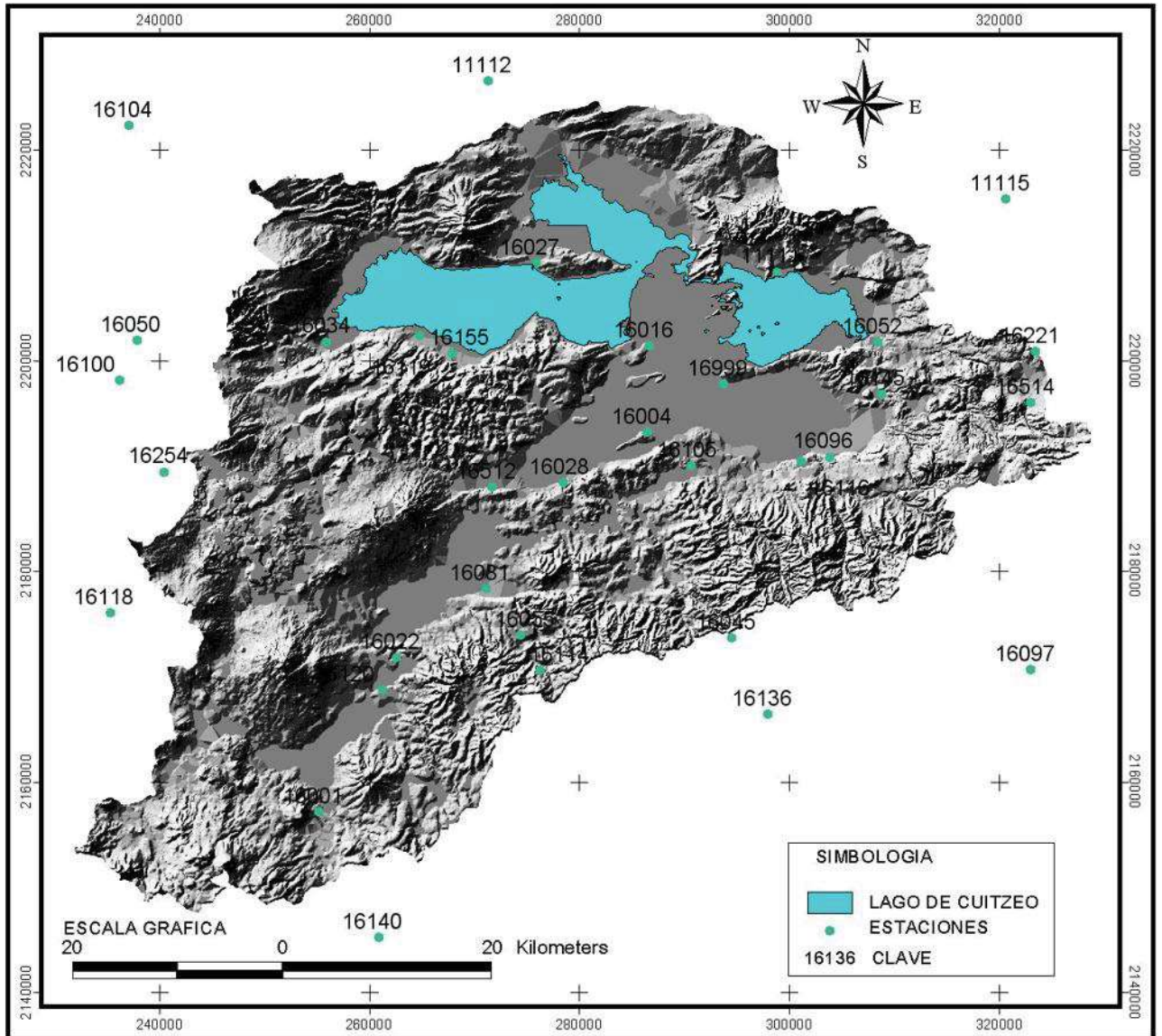


Figura VII. 2. Ubicación de las estaciones meteorológicas,

### VII.3. Temperatura

Dentro de la cuenca se observa que las temperaturas ascienden de Febrero a Mayo (Figura VII. 3), registrándose los valores máximos durante los meses de Mayo y Junio; y descienden de Junio a Enero, registrándose las mínimas en el mes de Enero, variando entre 13.7° y 20.1° C.

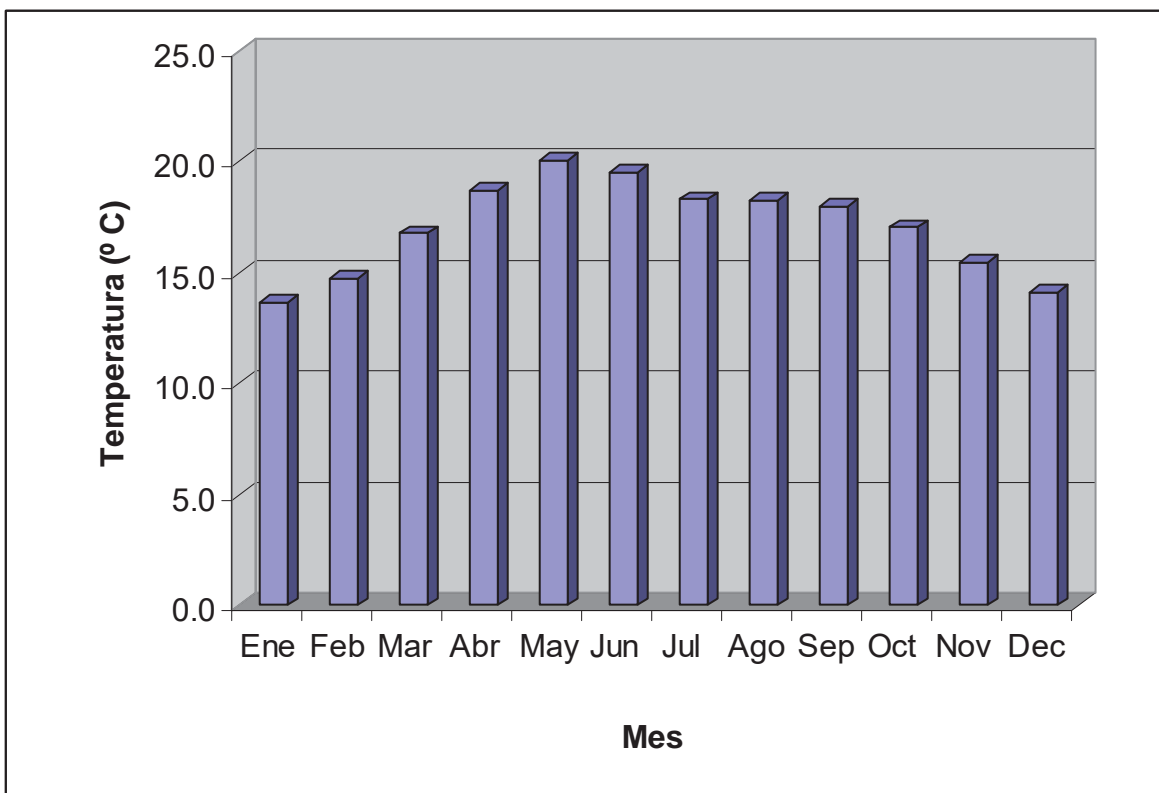
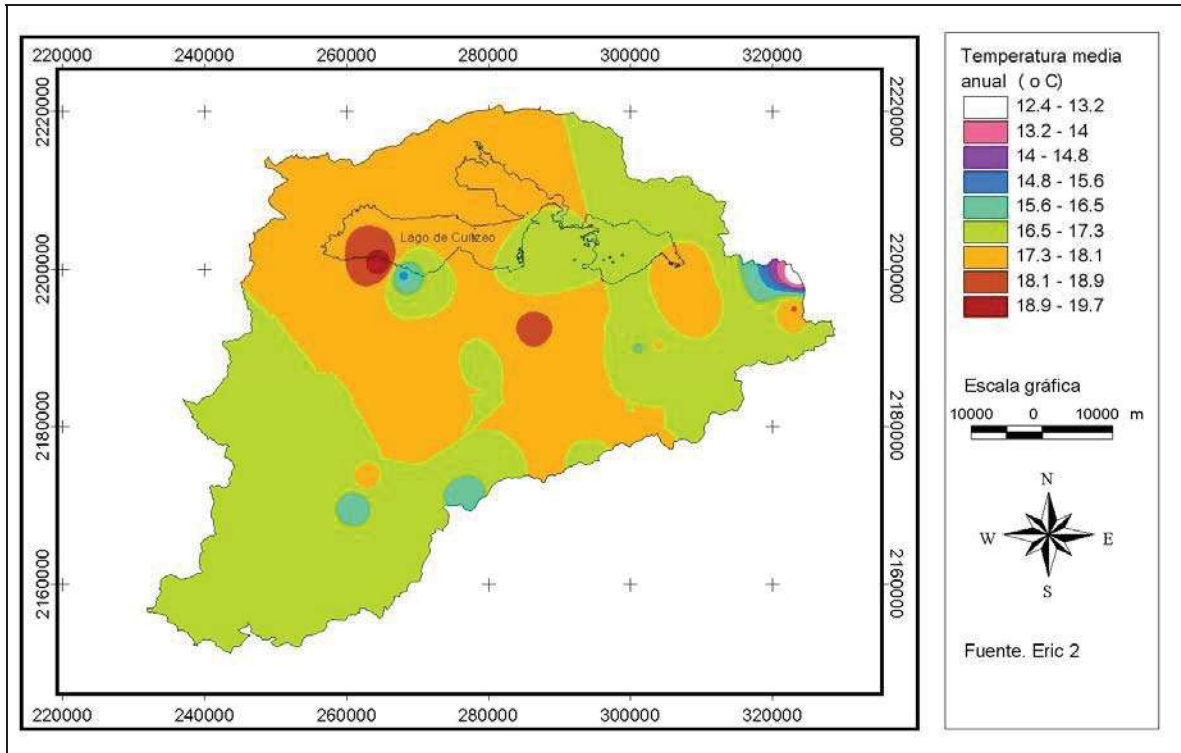


Figura VII. 3. Temperatura media mensual de la cuenca de Cuitzeo.

Fuente: Eric 2

La Figura VII. 4 muestra la distribución en el área de las isotermas medias anuales con la siguiente distribución, las temperaturas entre los 16.5° C y los 17.26° C se presentan hacia el noreste y suroeste de la cuenca y las temperaturas entre los 17.27° C y los 18° C con una dirección sureste-noroeste incluyendo la parte central. La temperatura media anual en la zona es de 17.3° C.



**Figura VII. 4. Temperatura media anual en °C, con base en los datos del Eric 2.**

En la Tabla VII.1 se presentan los valores de la temperatura promedio mensual para cada una de las estaciones encontradas dentro y los alrededores de la cuenca, con ella se elaboraron las figuras VII. 5 a la VII. 16, que muestran la distribución de las temperaturas medias mensuales.

clave	ESTACION	X	Y	Periodo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dec	Promedio
16001	ACUITZIO DEL CANJE,(SMIN)	255216.0	2157105.0	1961-2005	13.2	13.9	16.4	17.7	19.3	20.0	18.0	18.7	17.8	16.7	15.1	13.1	16.7
16004	ALVARO OBREGON, (SMIN)	286524.0	2193231.0	1965-1985	15.0	16.0	18.4	20.5	22.3	21.7	19.9	19.5	19.6	18.5	16.6	15.7	18.6
16016	CARRILLO PUERTO, A. O.	286730.0	2201447.0	1969-2004	12.8	14.1	16.3	18.2	19.7	19.2	18.0	18.0	17.8	16.6	14.8	13.2	16.6
16034	CHUCANDIRO, CHUCANDIRO	255947.0	2201807.0	1969-1987	14.8	15.8	18.3	19.6	20.9	20.4	19.1	18.6	18.4	17.9	16.4	15.6	18.0
16020	CIUDAD HIDALGO (DGE)	337265.0	2178365.0	1961-2004	13.4	14.4	16.2	18.1	19.6	19.5	18.6	18.6	18.4	17.4	15.5	14.0	17.0
16022	COINTZIO, MORELIA	262593.0	2171766.0	1940-2005	14.3	15.4	17.4	19.2	20.5	19.9	18.5	18.5	18.4	17.8	16.3	14.8	17.6
16512	EL COLEGIO, TARIMBARO	271707.0	2187997.0	1986-2005	14.3	15.5	16.9	18.4	20.5	20.7	20.1	20.0	19.3	17.8	16.2	14.4	17.8
16155	COPANDARO, JIMENEZ	267946.0	2200711.0	1969-2001	11.7	12.8	14.9	16.9	18.6	18.6	17.4	17.2	17.0	15.3	13.4	12.1	15.5
16027	CUITZEO, CUITZEO	275915.0	2209225.0	1923-2005	14.5	16.0	18.3	20.1	21.4	20.4	19.1	18.9	18.6	17.9	16.4	14.9	18.0
16028	CUITZILLO GRANDE,	278540.0	2188444.0	1969-2005	13.4	14.5	16.6	18.4	20.0	19.7	18.8	18.8	18.7	17.1	15.1	13.7	17.1
16100	PUENTE SAN ISIDRO,	236196.0	2198137.0	1948-1993	12.4	13.2	15.3	17.2	18.9	19.2	18.2	18.2	17.9	16.4	14.4	12.9	16.2
16045	EL TEMASCAL, CHARO	294560.0	2173655.0	1965-2004	14.8	15.8	17.6	19.3	19.8	18.1	16.9	16.8	16.7	16.6	16.0	15.4	17.0
16050	HUANIQUEO, HUANIQUEO	237889.0	2201951.0	1974-1987	14.6	15.8	18.2	20.1	21.0	19.9	18.8	18.8	18.6	17.6	16.2	15.0	17.9
16052	HUINGO, ZINAPECUARO	308494.0	2201735.0	1941-2004	13.6	14.9	17.1	19.1	20.6	20.5	19.2	19.1	18.8	17.6	15.6	14.0	17.5
16514	JARIPEO, IRIMBO	323057.0	2196001.0	1991-2004	15.2	16.1	17.5	19.1	20.5	20.4	19.6	19.6	19.4	18.6	17.1	15.7	18.2
16055	JESUS DEL MONTE, MORELIA	274407.0	2173856.0	1935-2004	14.9	16.0	18.7	20.9	21.2	18.5	16.8	16.5	16.3	16.3	15.9	15.0	17.2
16078	MARAVATIO, MARAVATIO	349197.0	2199923.0	1923-1984	14.3	15.4	17.5	19.5	20.9	20.5	19.3	19.0	19.1	18.0	16.2	14.6	17.9
16081	MORELIA, MORELIA (DGE)	271153.0	2178293.0	1947-2005	14.3	15.7	18.0	20.1	21.3	20.7	19.3	19.4	19.0	17.9	16.4	14.9	18.1
16087	PATZCUARO, PATZCUARO	225942.0	2159947.0	1973-2005	12.7	13.9	15.9	17.7	19.0	19.2	17.9	18.1	17.9	16.8	15.0	13.5	16.5
16096	PSA. MALPAIS, QUERENDARO	303892.0	2190863.0	1940-2004	13.7	14.9	17.2	19.3	20.9	20.3	19.1	18.9	18.5	17.3	15.2	13.9	17.4
16097	PSA. PUCUATO, CD. HIDALGO	323072.0	2170633.0	1980-2004	10.6	11.6	13.6	15.1	16.5	16.6	16.0	16.1	15.9	14.8	13.1	11.5	14.3
16104	PURUANDIRO, PURUANDIRO	237081.0	2222321.0	1950-2005	15.4	17.0	19.0	21.5	22.9	21.9	20.2	20.4	20.0	18.9	17.4	15.7	19.2
16105	QUIRIO, INDAPARAPEO	290647.0	2189999.0	1964-2005	14.1	15.2	17.4	19.7	21.2	20.8	19.4	19.2	19.1	17.9	16.1	14.7	17.9
16199	SAN MIGUEL CURAHUANGO,	348461.0	2198369.0	1975-2002	13.3	14.2	16.0	18.0	19.6	20.0	18.4	18.4	18.0	16.4	15.0	13.9	16.8
16114	S. MIGUEL DEL MONTE, MOR.	276260.0	2170551.0	1967-2005	12.6	13.6	15.8	17.9	19.4	18.3	17.1	17.1	16.7	15.8	14.5	13.0	16.0
16116	SAN SEBASTIAN, QUERENDARO	301164.0	2190457.0	1969-1991	12.5	13.6	15.8	18.1	19.7	19.6	18.5	18.3	17.9	16.7	14.3	12.9	16.5
16118	SANTA FE, QUIROGA	235315.0	2175961.0	1964-2004	13.3	14.1	15.7	17.6	18.9	18.5	17.3	17.7	17.5	16.4	15.1	13.9	16.3
16119	STA. RITA, COPANDARO DE G.	264868.0	2202343.0	1964-2005	16.9	18.0	19.8	21.8	22.4	21.6	20.6	20.5	20.4	20.0	18.0	16.8	19.7
16120	SANTIAGO UNDAMEO, MORELIA	261327.0	2168657.0	1954-2004	12.4	13.8	16.0	17.9	19.5	19.1	17.7	17.7	17.4	16.2	14.1	12.7	16.2
16121	SENGUIO, SENGUIO	358406.0	2182169.0	1969-2004	12.7	13.4	16.1	18.1	19.2	18.0	16.3	16.2	16.4	15.5	14.2	13.0	15.7
16254	TEREMENDO, MORELIA	240504.0	2189458.0	1982-2005	13.6	14.8	16.7	18.8	19.9	18.7	17.3	17.1	16.6	15.9	15.3	14.3	16.6
16136	TZITZIO, TZITZIO	298019.0	2166345.0	1971-2004	17.8	18.9	21.1	22.7	23.5	22.1	20.9	20.7	20.6	20.4	19.6	18.3	20.5
16221	UCAREO UNION DE FRUT.	323520.0	2200855.0	1980-2003	9.9	10.1	11.5	13.9	15.6	14.2	13.5	13.5	13.2	12.7	11.0	9.9	12.4
16140	VILLA MADERO, MADERO	260925.0	2145245.0	1961-1990	12.7	13.7	15.5	17.6	18.4	17.8	17.2	16.7	16.5	15.7	14.4	13.3	15.8
16145	ZINAPECUARO, ZINAPECUARO	308834.0	2196819.0	1923-2005	14.5	15.6	17.3	19.9	21.1	20.4	19.1	18.8	18.7	17.9	16.2	14.8	17.9
16146	ZIRAHUEN, VILLA ESCALANTE	213170.0	2153219.0	1971-2004	12.4	13.3	14.5	15.7	17.2	17.9	17.1	17.4	17.2	16.7	15.1	13.8	15.7
				Promedio	13.7	14.7	16.8	18.7	20.1	19.5	18.3	18.3	18.0	17.1	15.5	14.1	

Tabla VII. 1. Temperatura media mensual

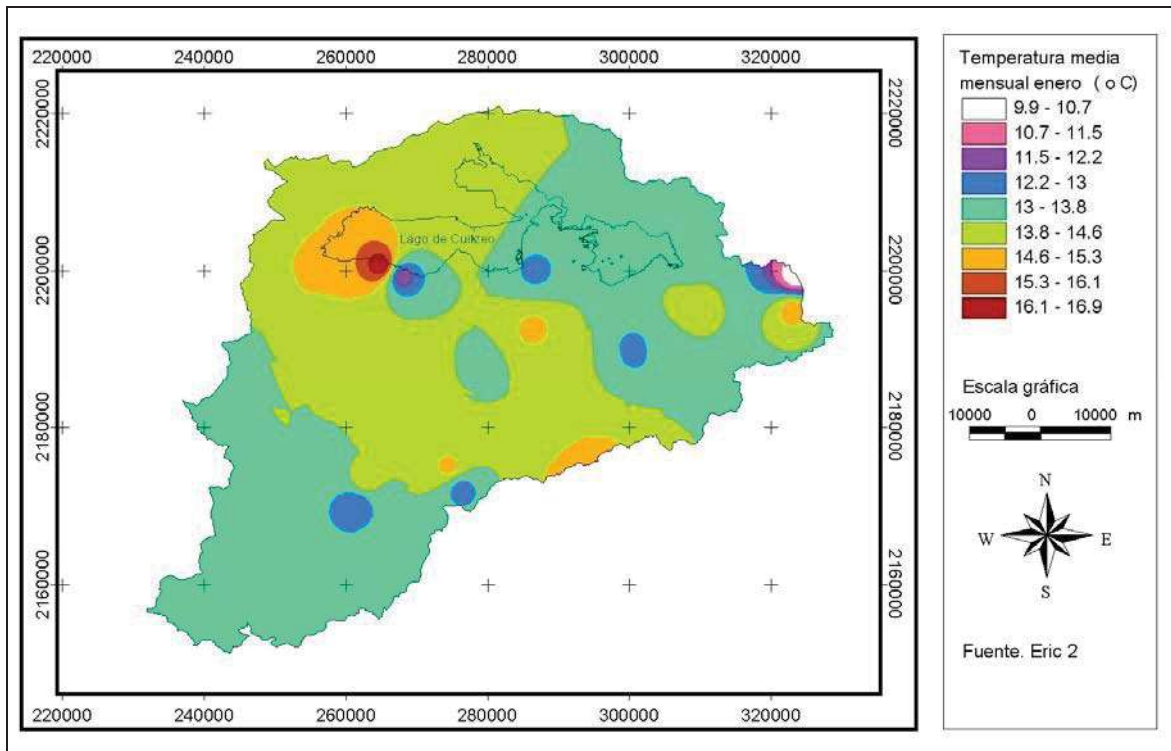


Figura VII. 5. Temperatura media del mes de enero en °C, con base en los datos del Eric 2.

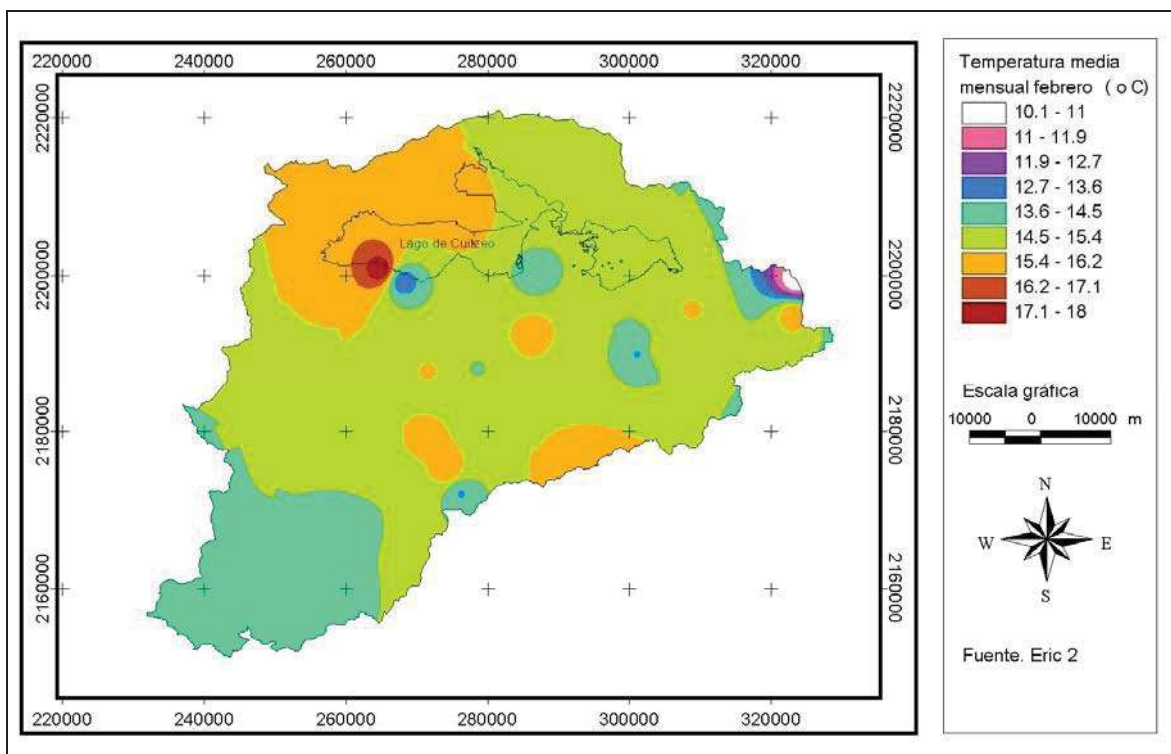


Figura VII. 6. Temperatura media del mes de febrero en °C, con base en los datos del Eric 2.

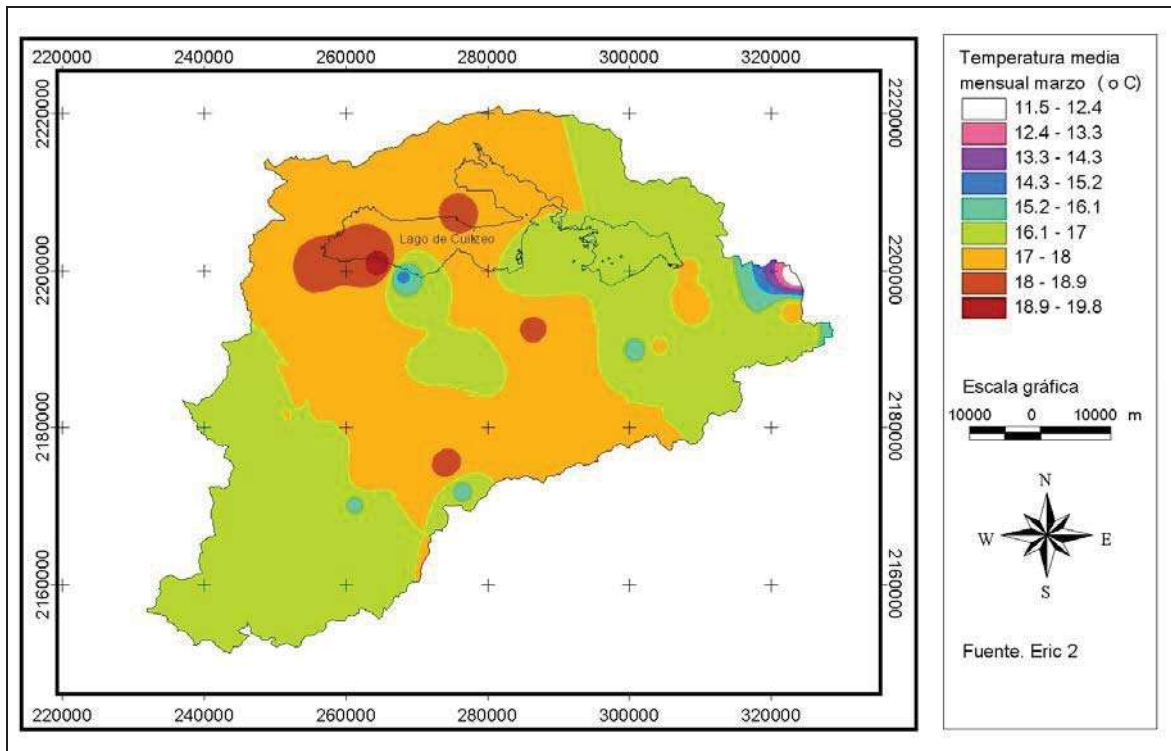


Figura VII. 7. Temperatura media del mes de marzo en °C, con base en los datos del Eric 2.

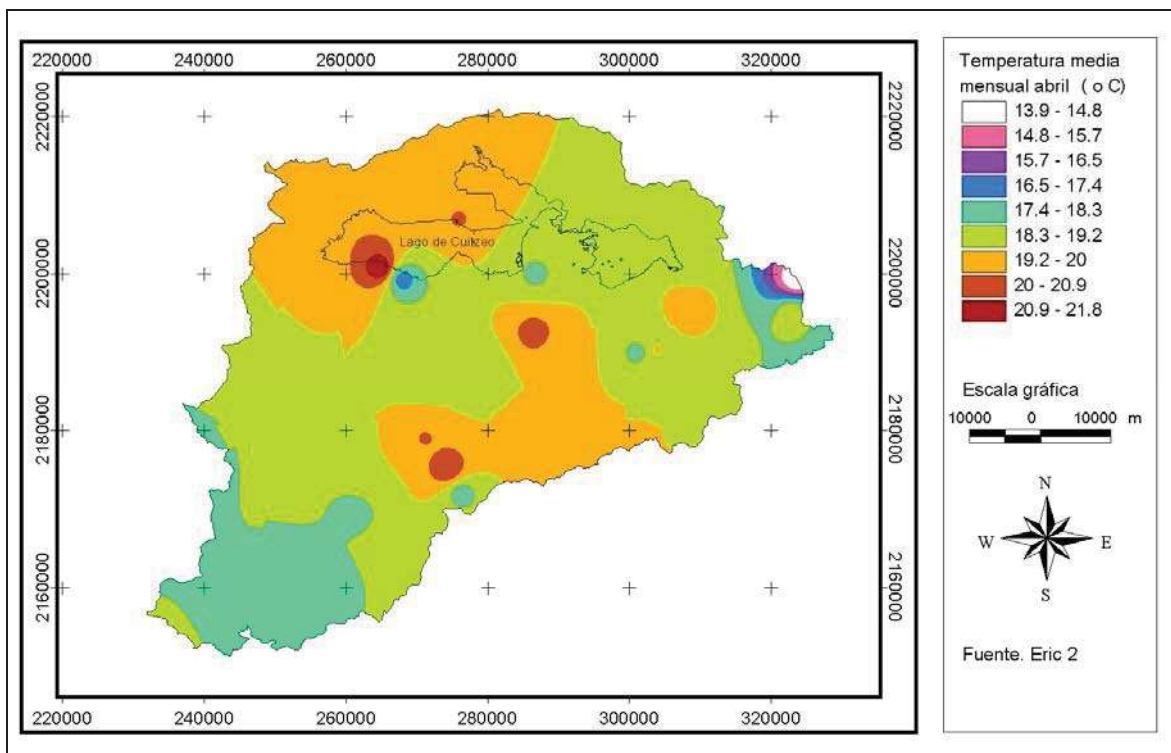


Figura VII. 8. Temperatura media del mes de abril en °C, con base en los datos del Eric 2.

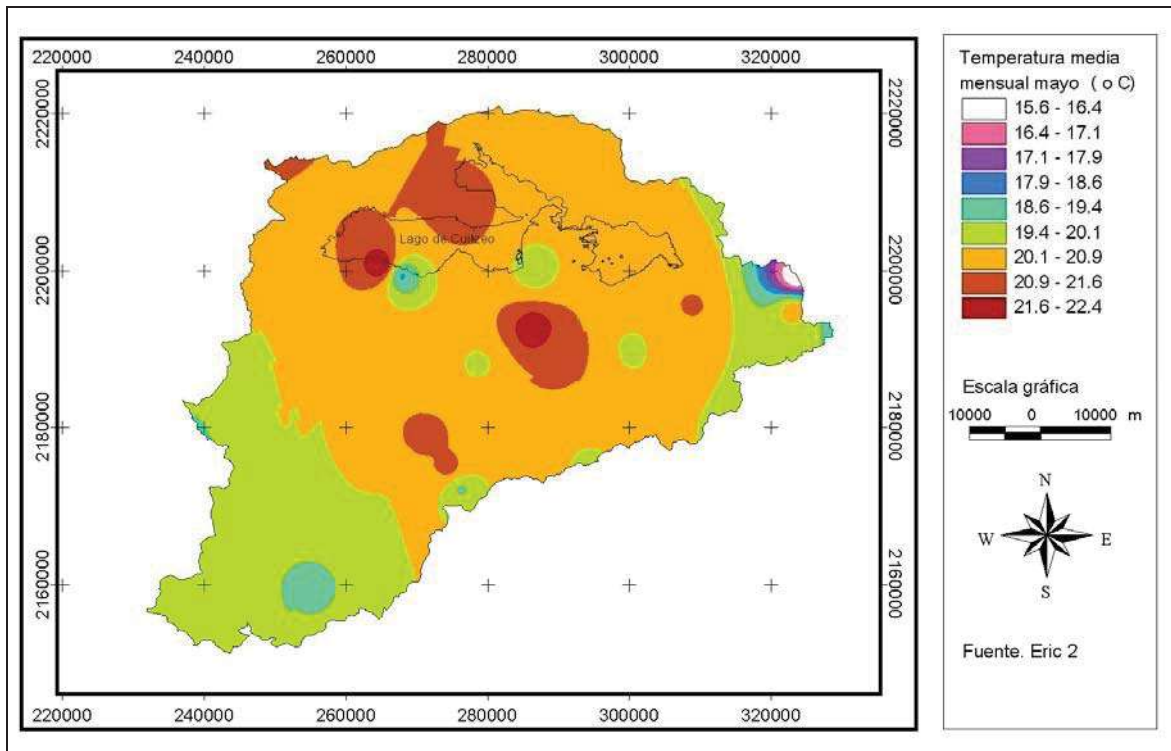


Figura VII. 9. Temperatura media del mes de mayo en °C, con base en los datos del Eric 2.

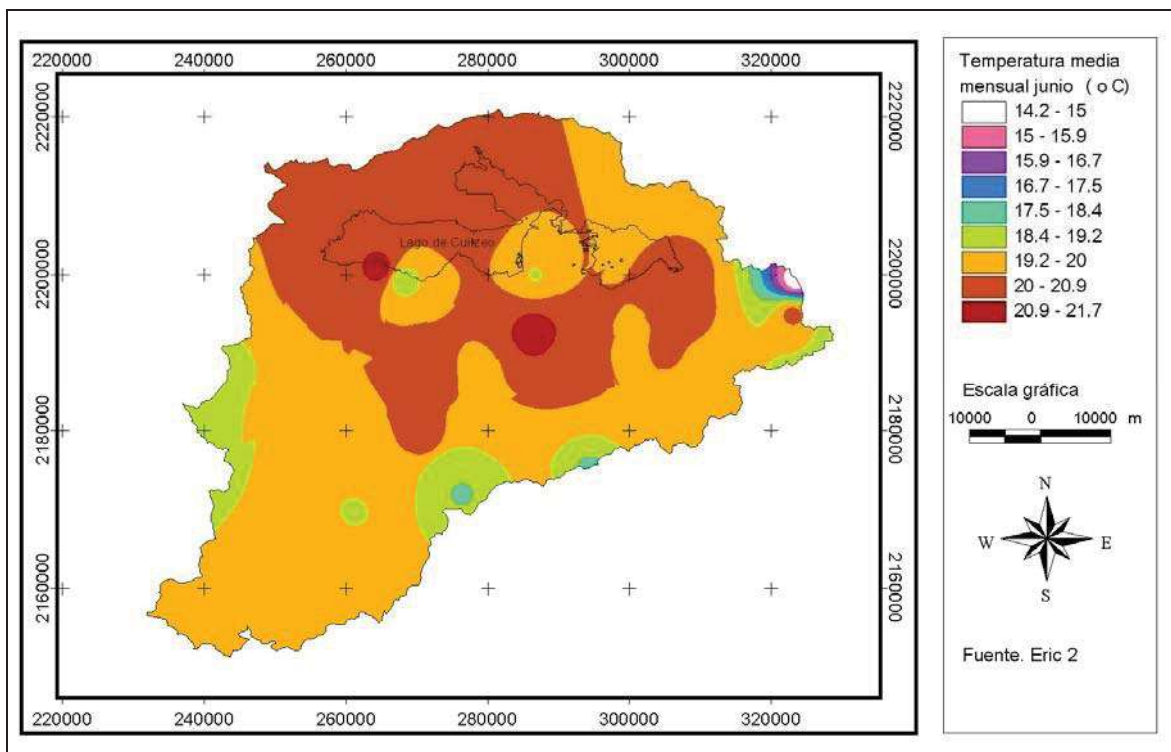


Figura VII. 10. Temperatura media del mes de junio en °C, con base en los datos del Eric 2.

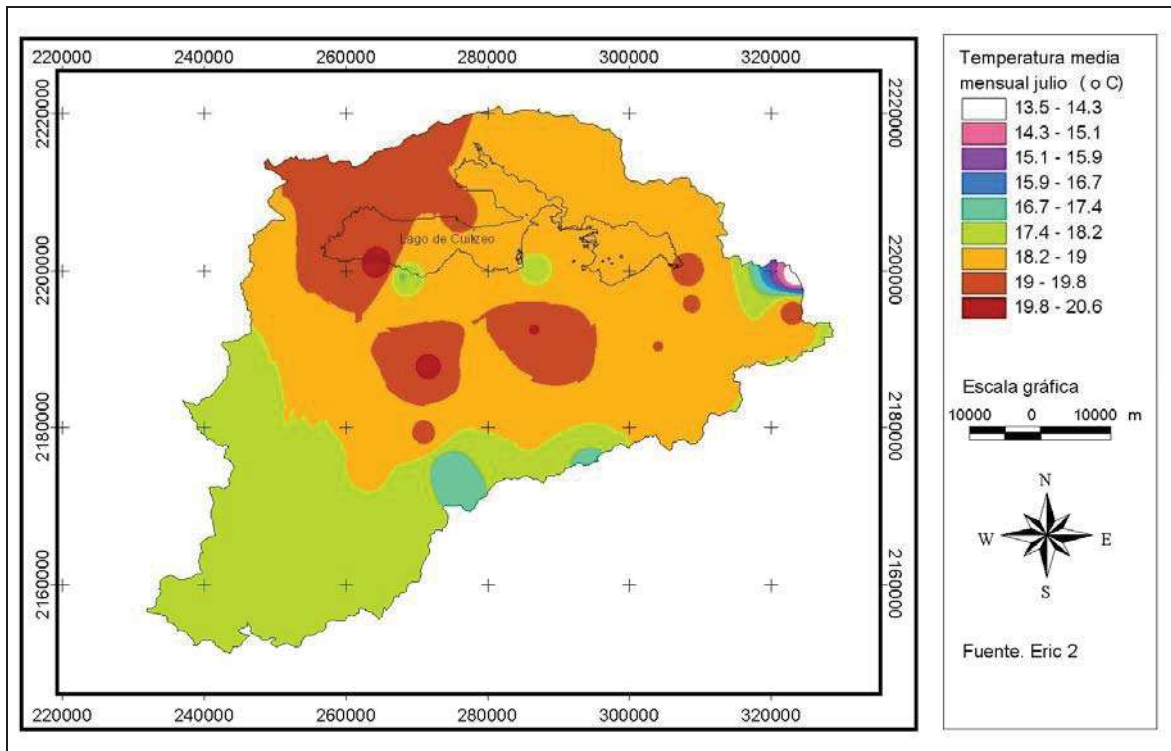


Figura VII. 11. Temperatura media del mes de julio en °C, con base en los datos del Eric 2.

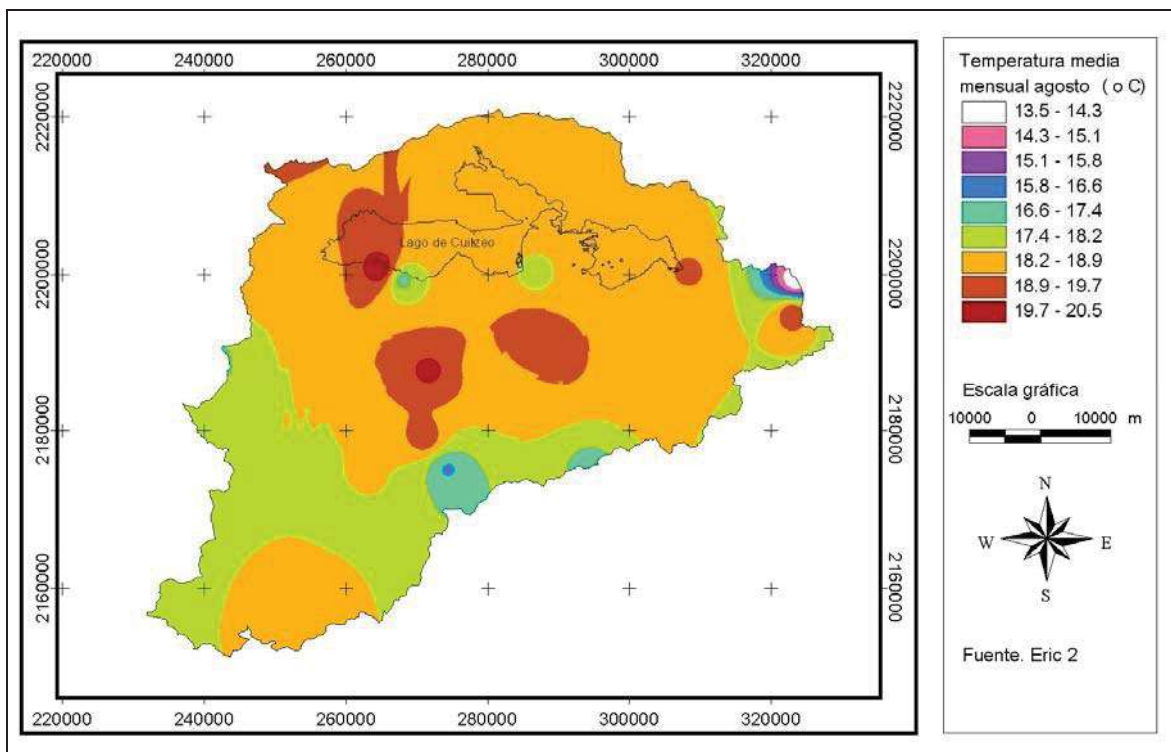


Figura VII. 12. Temperatura media del mes de agosto en °C, con base en los datos del Eric 2.

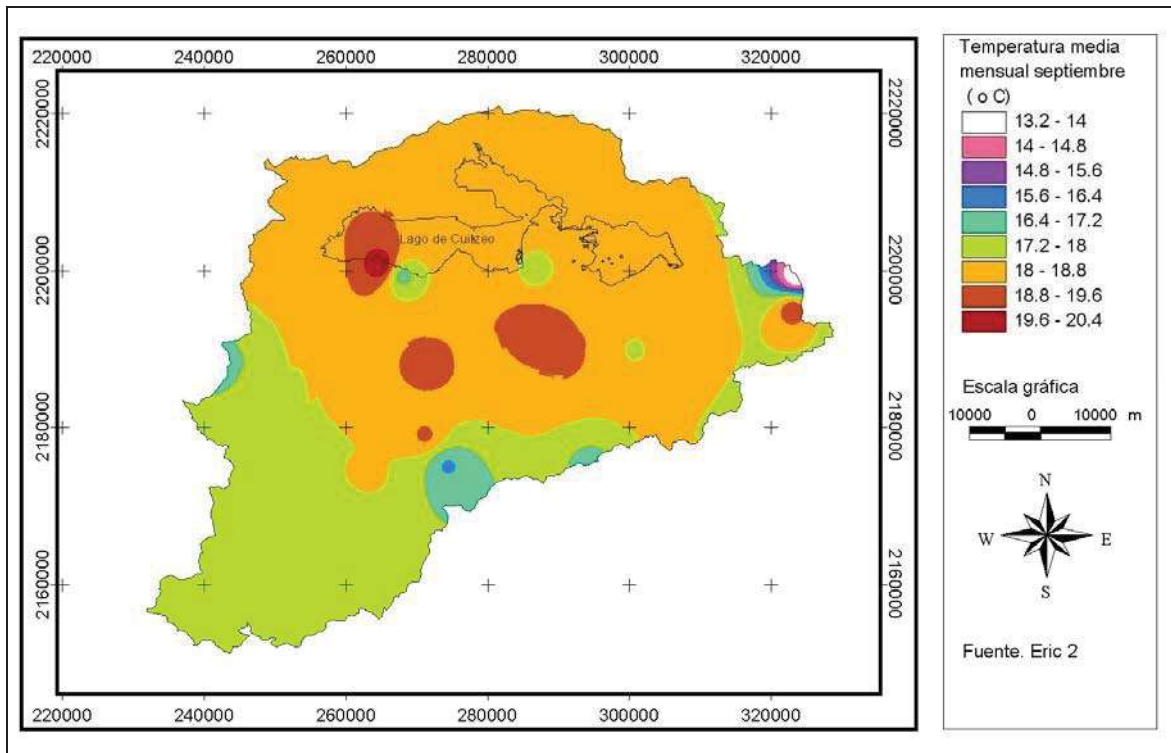


Figura VII. 13. Temperatura media del mes de septiembre en °C, con base en los datos del Eric 2.

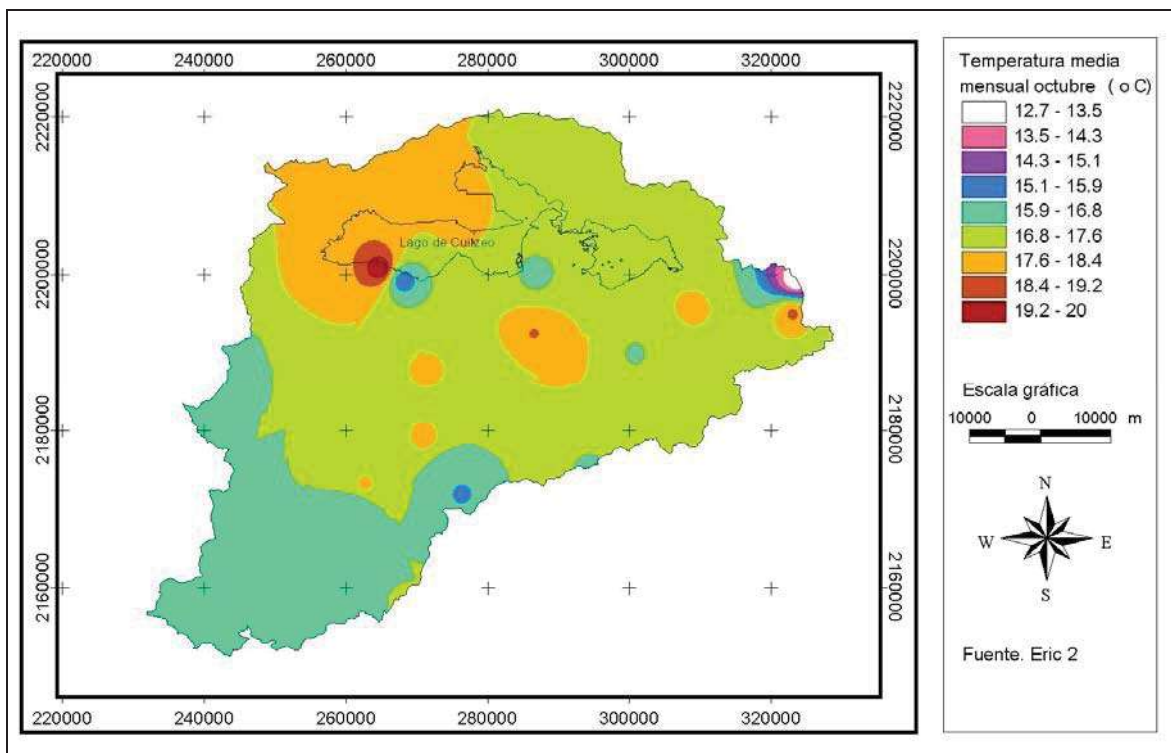


Figura VII. 14. Temperatura media del mes de octubre en °C, con base en los datos del Eric 2.

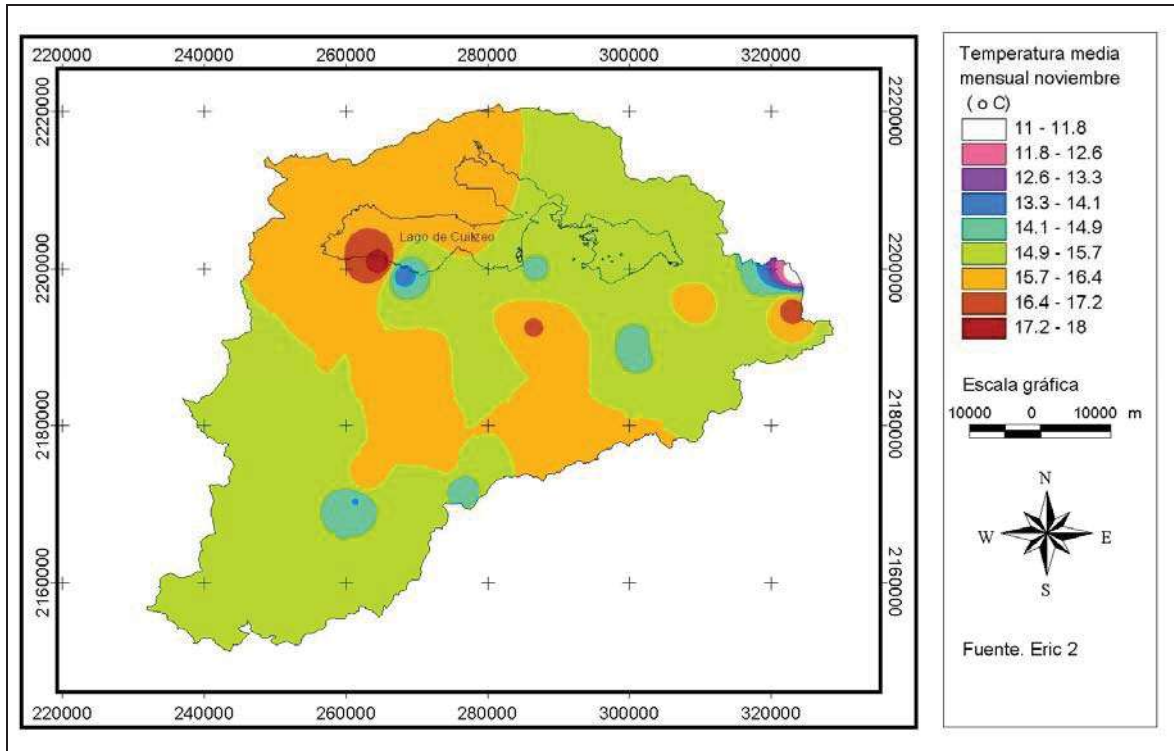


Figura VII. 15. Temperatura media del mes de noviembre en °C, con base en los datos del Eric 2.

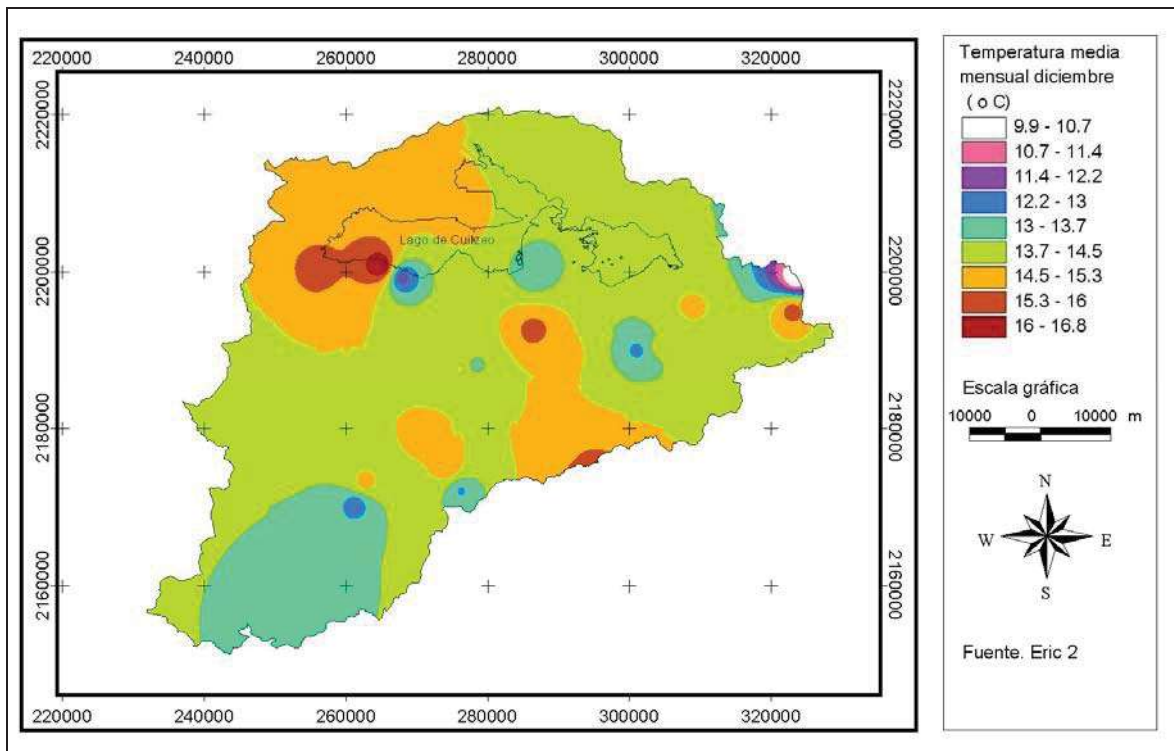


Figura VII. 16. Temperatura media del mes de diciembre en °C, con base en los datos del Eric 2.

## VII.4. Precipitación, evaporación, infiltración

### VII.4.1. Precipitación

La precipitación pluvial en la zona es de tipo orográfico o de relieve. Los valores más altos ocurren en la porción poniente y sur del área y las menores ocurren en la zona de valles y mesetas, disminuyendo hacia el norte del área conforme aumenta la distancia hacia las zonas topográficas más altas.

En la Figura VII.17 se ilustra la variación de la precipitación media anual. Se observa que hacia la cima de Mil Cumbres se presentan los valores más altos, 1390 mm/año, y disminuyen hacia el norte y occidente a valores de 700 mm/año. La precipitación media anual en el área de estudio es de 852 mm.

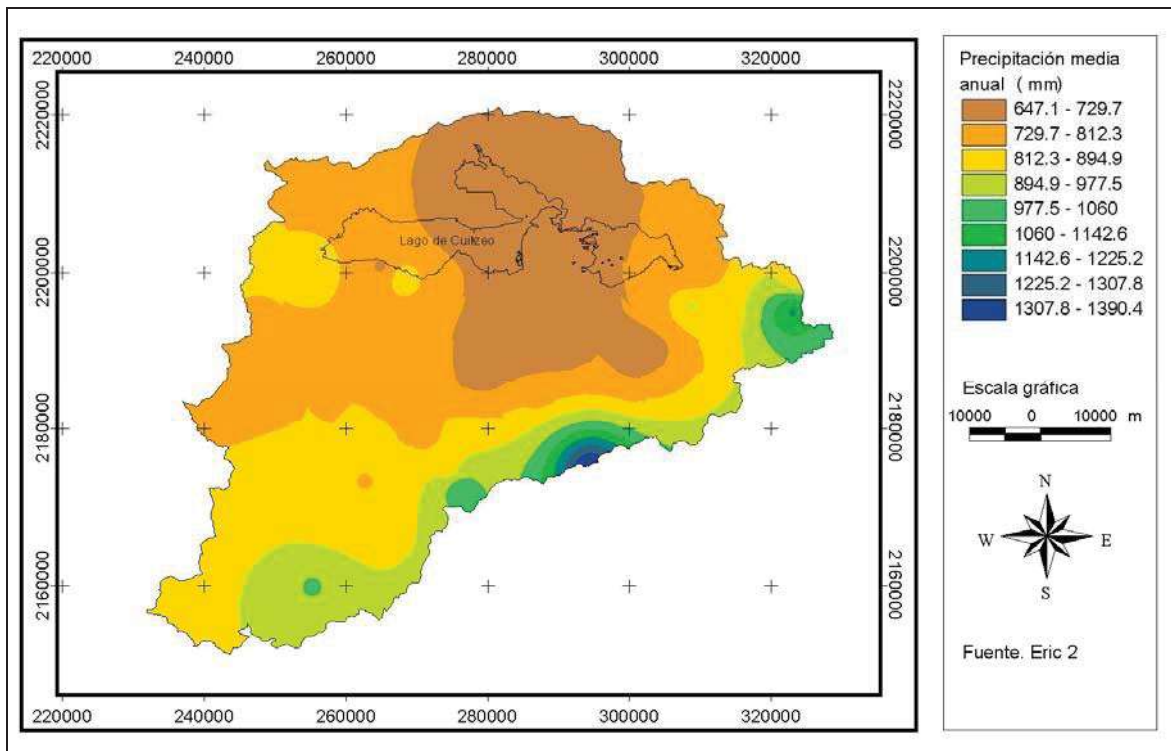
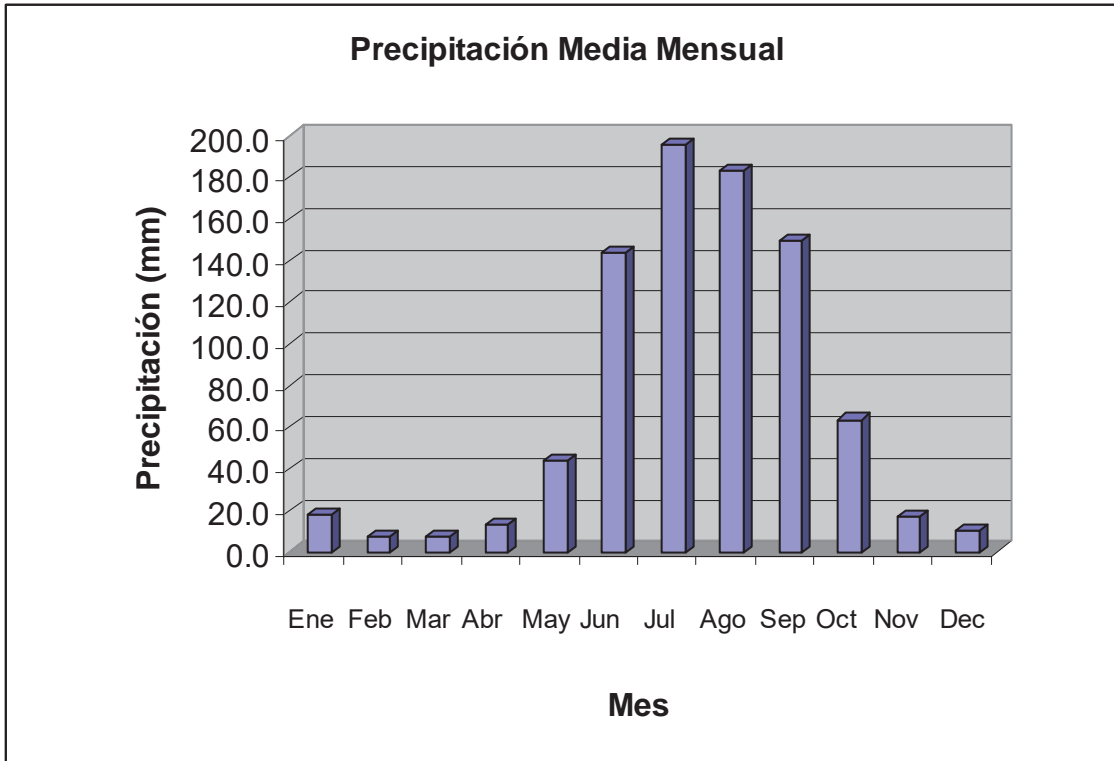


Figura VII. 17. Precipitación media anual de la cuenca de Cuitzeo en milímetros, con base en los datos del Eric 2.

El período de lluvia ocurre de Mayo a Octubre con precipitaciones menores o nulas en los meses restantes. Figura VII. 18.



**Figura VII. 18. Precipitación media mensual de la cuenca de Cuitzeo**

Fuente: Eric 2

Los valores de la precipitación media mensual de las estaciones con registro se presentan en la Tabla VII. 2 y con ella se el elaboraron las figuras VII. 19 a VII. 30 que muestran la distribución de la precipitación media mensual.

clave	Nombre	X	Y	Periodo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dec	Promedio
16001	Acuitzio del Canje	255216.0	2157105.0	1961-2005	19.7	9.1	23.3	19.5	78.9	158.8	200.5	162.4	167.0	77.3	56.8	9.0	982.2
16004	Alvaro_Obregon	286524.0	2193231.0	1965-1985	13.57	13.68	6.89	12.62	42.60	100.40	148.30	137.61	102.53	50.38	12.46	6.04	647.09
16016	Carrillo_Puerto	286730.0	2201447.0	1969-2004	14.5	5.5	7.2	12.5	36.4	117.1	162.3	156.1	123.3	43.4	12.9	7.2	698.2
16034	Chucandiro	255947.0	2201807.0	1969-1987	11.5	14.4	6.9	16.9	39.2	152.1	180.6	172.9	158.3	70.9	13.5	10.8	847.9
16020	Ciudad_Hidalgo	337265.0	2178365.0	1961-2004	21.2	9.7	10.2	19.3	60.3	142.6	165.0	164.4	130.3	67.8	19.1	10.1	819.9
16022	Cointizio	262593.0	2171766.0	1940-2005	15.6	6.8	6.0	13.9	45.8	143.6	181.4	165.1	140.2	61.3	19.7	10.6	809.8
16512	El_Colegio	271707.0	2187997.0	1986-2005	22.2	7.7	7.5	13.9	39.7	146.2	177.0	154.5	141.4	55.6	15.2	7.2	788.1
16155	Copandaro_de_Jim	267946.0	2200711.0	1969-2001	17.3	6.3	6.3	8.9	33.8	136.9	204.9	193.7	157.0	56.2	15.6	12.9	849.8
16027	Cuitzeo	275915.0	2209225.0	1923-2005	15.9	7.2	8.5	9.4	38.8	113.0	151.3	141.3	121.3	45.6	13.3	9.0	674.5
16028	Cuiztillo_Grande	278540.0	2188444.0	1969-2005	10.2	6.6	7.8	15.4	33.3	108.8	148.2	140.4	113.8	44.9	13.5	7.2	649.9
16100	El_Puerto_San_Isidro	236196.0	2198137.0	1948-1993	32.1	6.8	5.4	11.0	40.6	137.7	191.5	169.7	141.2	66.1	13.5	11.4	827.1
16045	El_Tamazcal	294560.0	2173855.0	1965-2004	27.2	10.9	9.0	17.5	55.4	231.4	322.8	312.7	265.6	108.8	23.5	10.4	1395.2
16050	Huaniqueo	237889.0	2201951.0	1970-2004	17.7	6.3	6.7	13.1	44.3	160.9	207.9	175.1	160.7	65.1	16.8	10.1	884.6
16052	Huingo	308494.0	2201735.0	1941-2004	15.2	5.4	5.7	10.8	33.6	124.5	180.4	171.2	131.6	46.8	10.2	7.3	742.7
16514	Jarapeo_Irimbo	323057.0	2196001.0	1991-2004	15.5	5.4	11.0	16.8	79.3	172.5	251.7	235.9	173.9	129.3	32.8	24.0	1148.0
16055	Jesus_del_Monte	274407.0	2173856.0	1935-2004	16.9	7.8	8.4	17.3	50.6	138.7	188.6	189.6	158.1	66.5	20.1	11.6	874.3
16078	Maravatio	349197.0	2199923.0	1923-1984	19.6	10.4	6.7	24.8	60.4	146.8	195.7	179.2	144.1	65.4	21.5	10.2	884.8
16081	Morelia	271153.0	2178293.0	1947-2005	15.7	6.5	8.0	14.5	46.6	142.0	181.1	159.7	138.5	56.5	12.9	7.4	789.3
16087	Patzcuaro	225942.0	215947.0	1970-2005	25.0	5.0	7.5	8.9	36.3	150.4	217.2	207.2	165.7	70.5	16.9	12.0	922.6
16096	Presa_Malpais	303892.0	2190863.0	1944-2004	14.9	6.4	4.8	10.9	36.6	124.0	168.3	162.9	130.5	46.3	9.8	7.5	722.8
16097	Pucuat	323072.0	2170633.0	1980-2004	28.7	19.2	6.7	17.3	68.5	203.6	272.1	241.3	198.9	80.0	23.2	8.7	1168.0
16104	Puruandiro	237081.0	222321.0	1950-2005	12.3	4.6	6.6	17.4	37.7	139.9	208.9	167.5	132.6	52.4	17.1	15.1	812.1
16105	Quirofo	290647.0	2189999.0	1963-2005	17.9	8.4	9.3	14.3	38.5	125.9	164.4	149.9	126.5	52.9	10.6	7.5	726.0
16199	San_Miguel_Curahuango	348461.0	2198369.0	1975-2002	13.2	8.5	6.4	23.1	40.3	138.9	175.0	175.9	128.0	65.1	13.1	9.7	797.3
16114	San_Miguel_del_Monte	276260.0	2170551.0	1963-2005	17.7	7.4	9.2	10.5	44.4	187.5	236.9	237.4	206.4	66.4	10.1	6.3	1040.2
16116	San_Sebastian	301164.0	2190457.0	1969-1991	13.1	5.8	6.1	9.6	30.9	109.0	157.8	152.4	125.0	42.8	8.2	6.5	667.3
16118	Santa_Fe	235315.0	2175961.0	1963-2004	22.0	6.0	5.9	6.5	37.4	147.6	195.4	187.8	129.0	63.6	11.0	10.5	822.5
16119	Santa_Rita	264868.0	2202343.0	1964-2005	14.7	6.9	5.3	17.2	30.6	106.2	173.0	161.3	146.3	45.9	12.0	4.4	723.9
16120	Santiago_Undameo	261327.0	2168657.0	1954-2004	12.8	9.6	9.0	15.1	38.7	131.6	187.7	170.6	161.6	60.0	17.2	9.8	823.8
16121	Senguio	358406.0	2182169.0	1969-2004	23.4	7.7	6.5	14.3	49.3	149.5	206.7	217.9	143.7	60.0	12.1	11.3	902.4
16254	Teremendo	240504.0	2189458.0	1982-2005	13.1	4.4	4.7	9.5	29.1	127.0	169.9	163.8	111.8	56.6	11.8	6.0	707.7
16136	Tizitio	298019.0	2166345.0	1970-2004	23.8	7.7	4.7	11.6	46.7	210.9	284.3	247.2	244.9	110.4	24.1	6.3	1222.5
16221	Ucareo	323520.0	2200855.0	1980-2003	10.9	5.0	2.0	8.4	42.7	151.5	231.5	214.5	108.3	50.9	20.0	4.0	849.7
16140	Villa_Madero	260925.0	2145245.0	1961-1990	33.6	8.9	8.9	18.1	46.2	212.5	251.8	236.5	248.6	100.2	23.0	12.7	1201.1
16145	Zinapecuaro	308834.0	2196819.0	1923-2005	19.2	6.5	7.2	9.3	44.5	135.9	212.6	207.6	136.2	79.5	23.7	16.5	898.7
16146	Zirahuen	213170.0	2153219.0	1971-2004	36.7	11.2	4.5	7.5	45.6	157.3	264.9	242.7	207.0	85.9	44.8	7.0	1129.3
16999	Planta_de_Bombeo_Zinzim	293808.0	2197787.0	1977-2007	16.3	6.5	6.8	10.1	34.1	105.7	154.3	156.6	134.2	50.6	10.0	7.1	692.2
11717	Iramuco	298848.0	2208422.0	1977-2007	8.4	6.5	7.3	14.2	37.6	122.9	175.2	158.8	129.8	44.0	7.7	8.4	720.6
11727	Moroleon	271334.0	2226557.0	1977-2007	15.6	3.4	9.4	7.7	36.9	127.9	177.3	174.0	138.9	48.9	15.4	15.6	771.0
11737	Yuriria	277593.0	2235766.0	1977-2007	7.7	7.5	6.9	9.0	37.2	138.0	160.1	176.7	125.5	49.2	8.8	7.7	734.3
11747	Salvatierra	304021.0	2234865.0	1977-2007	9.3	7.6	6.4	11.1	33.6	140.2	143.4	152.5	109.0	48.1	14.7	9.3	685.1
11757	Acambaro	320674.0	2215371.0	1977-2007	7.1	6.6	5.9	7.6	42.7	129.3	184.6	160.9	128.7	61.1	13.3	7.1	754.8
				Promedio	17.6	7.7	7.4	13.3	43.5	144.0	195.5	183.5	149.7	63.5	17.2	9.8	852.6

Tabla VII. 2. Precipitación media mensual

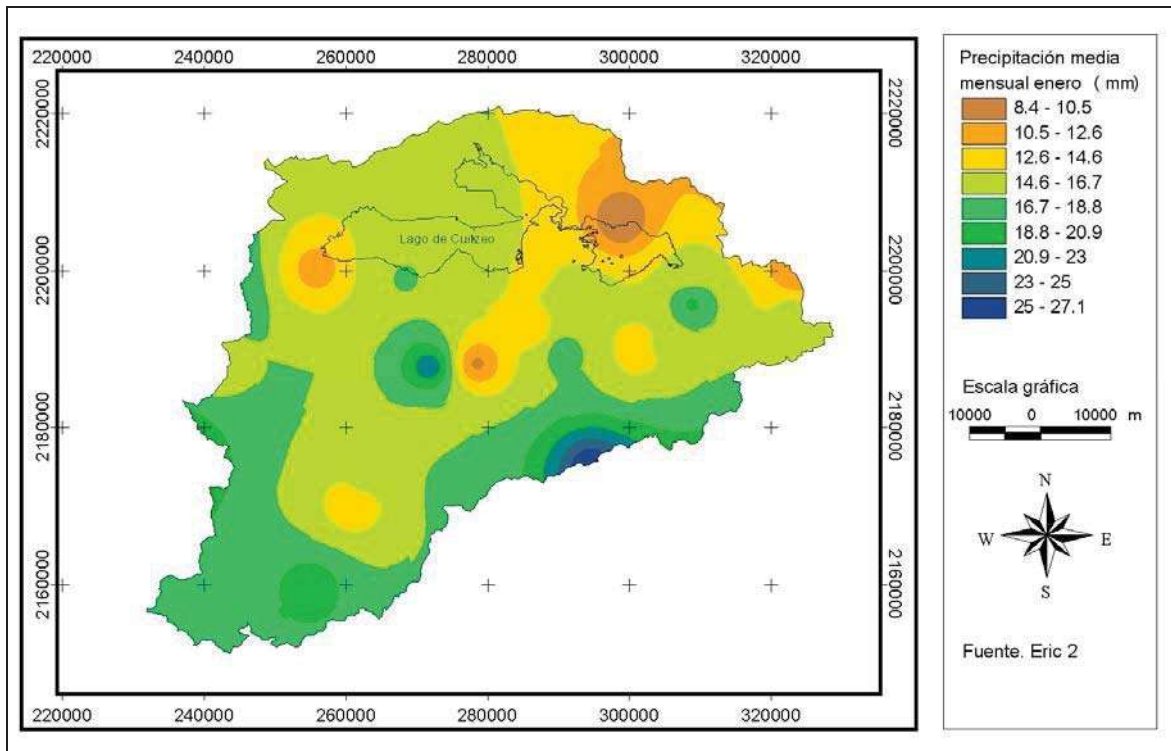


Figura VII. 19. Precipitación media del mes de enero en milímetros, con base en los datos del Eric 2.

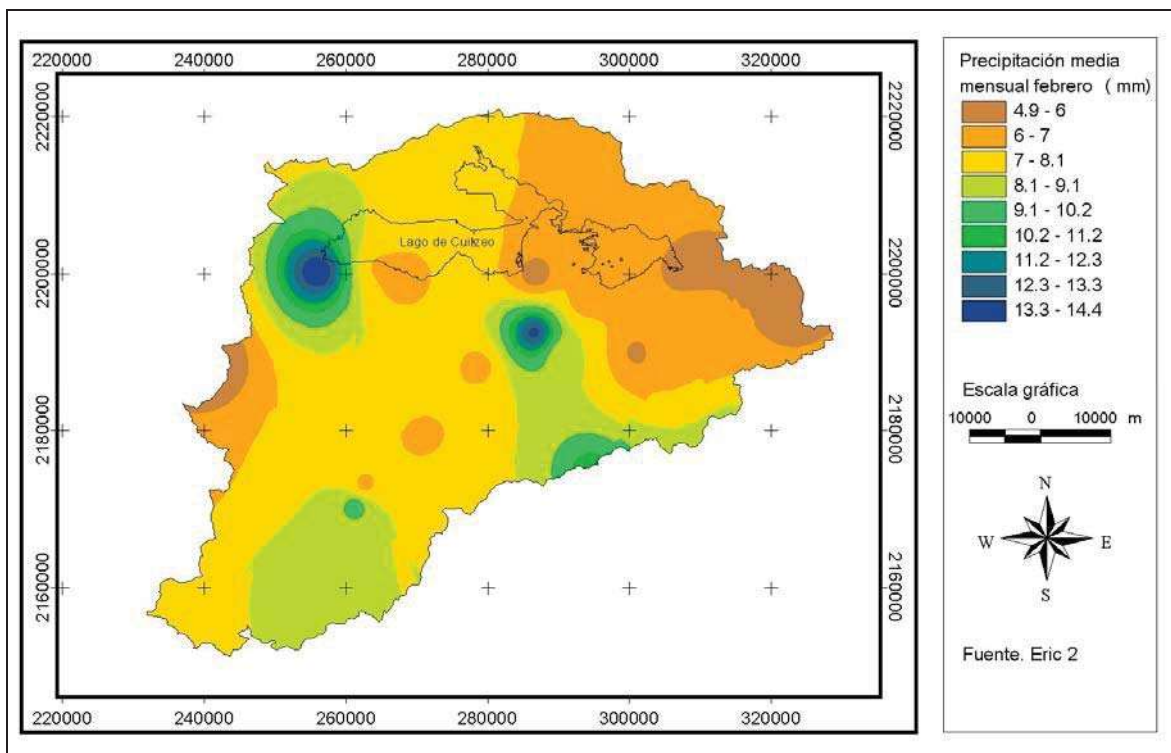


Figura VII. 20. Precipitación media del mes de febrero en milímetros, con base en los datos del Eric 2.

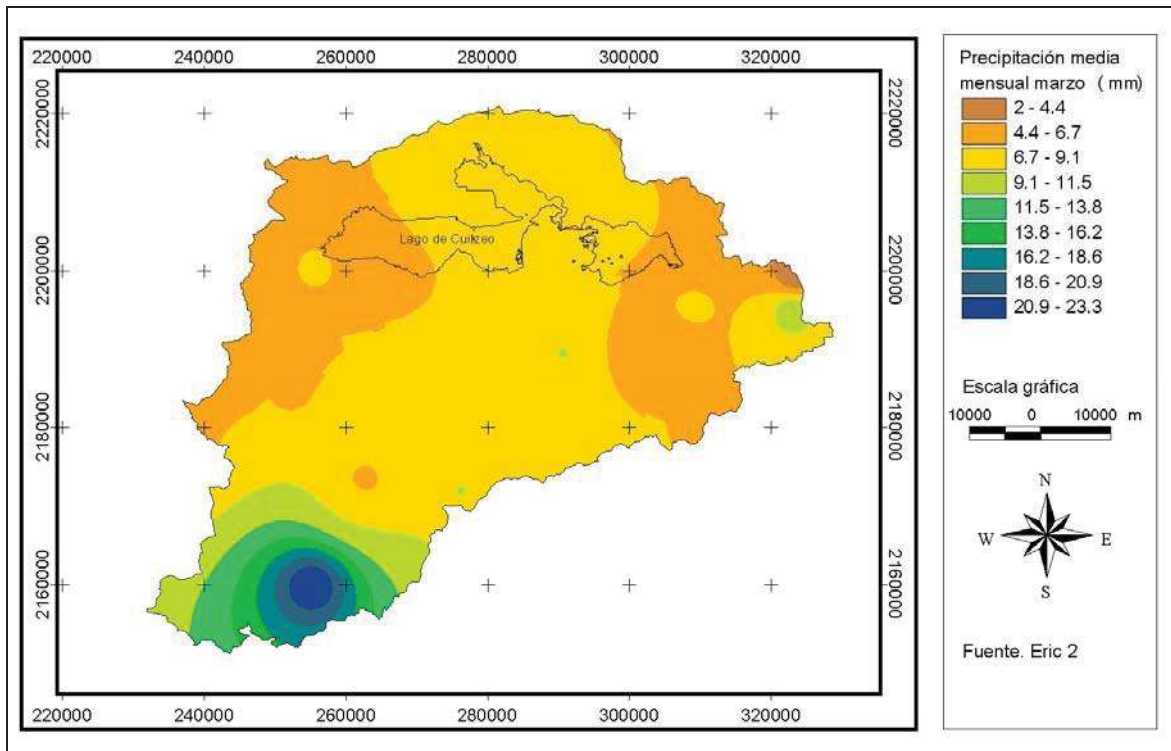


Figura VII. 21. Precipitación media del mes de marzo en milímetros, con base en los datos del Eric 2.

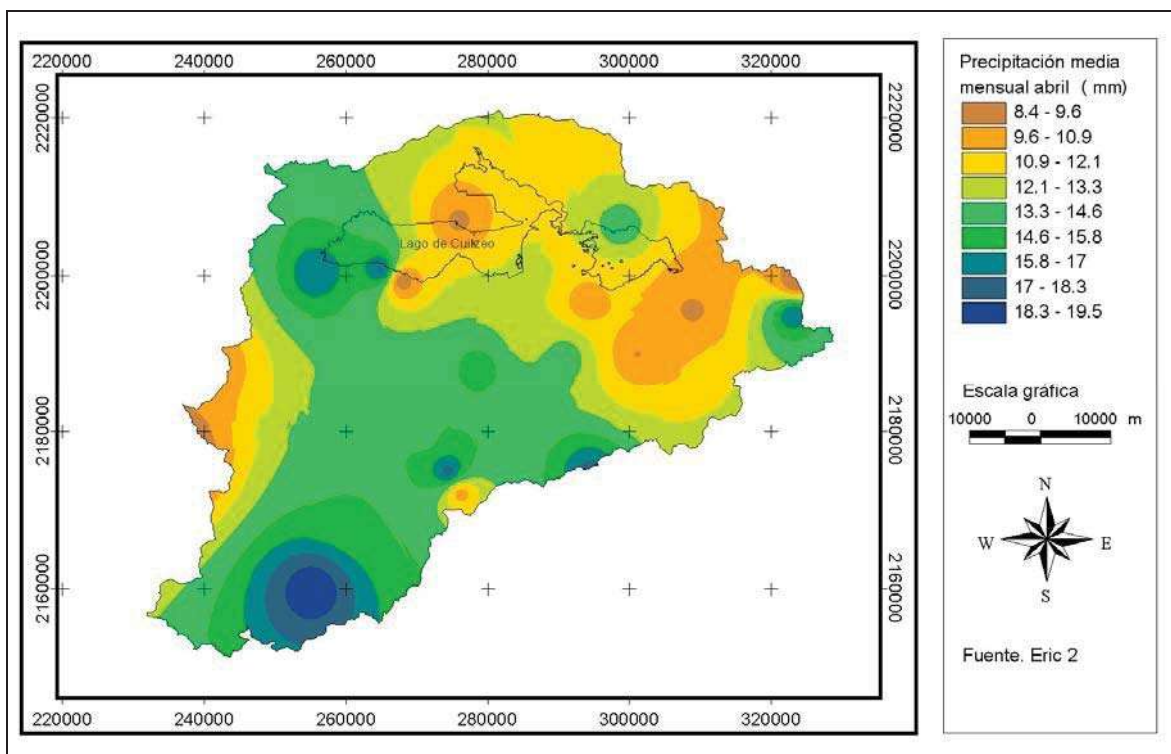


Figura VII. 22. Precipitación media del mes de abril en milímetros, con base en los datos del Eric 2.

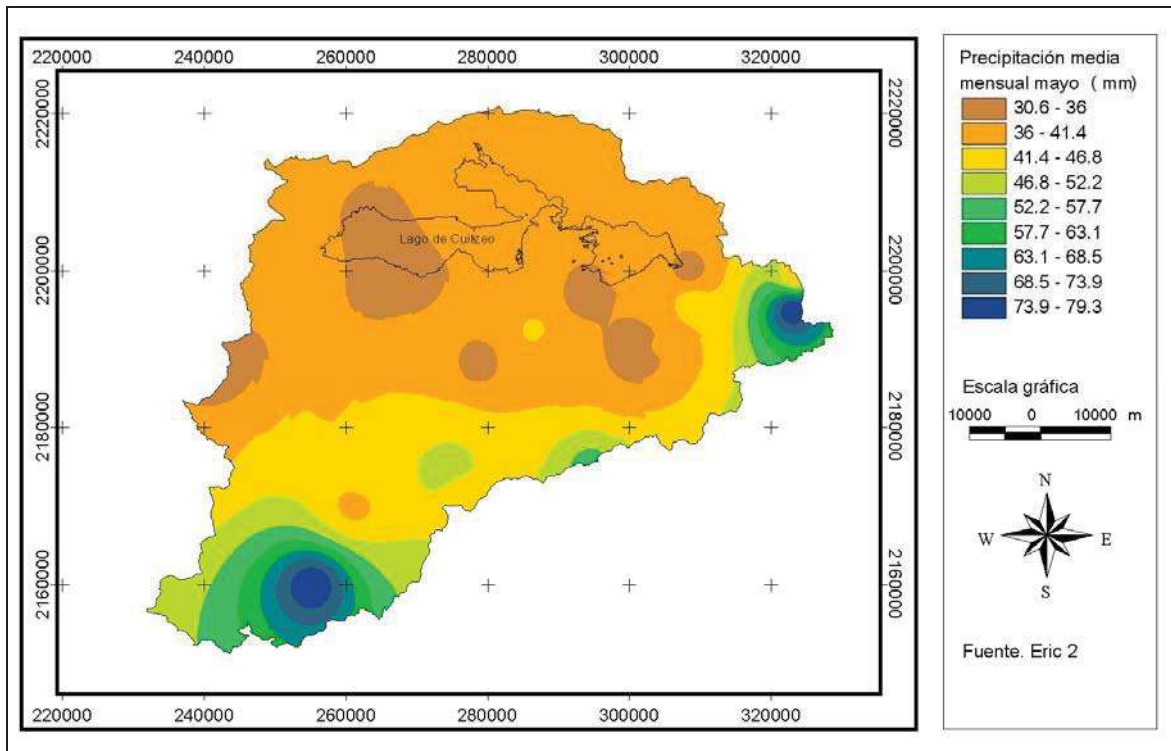


Figura VII. 23. Precipitación media del mes de mayo en milímetros, con base en los datos del Eric 2.

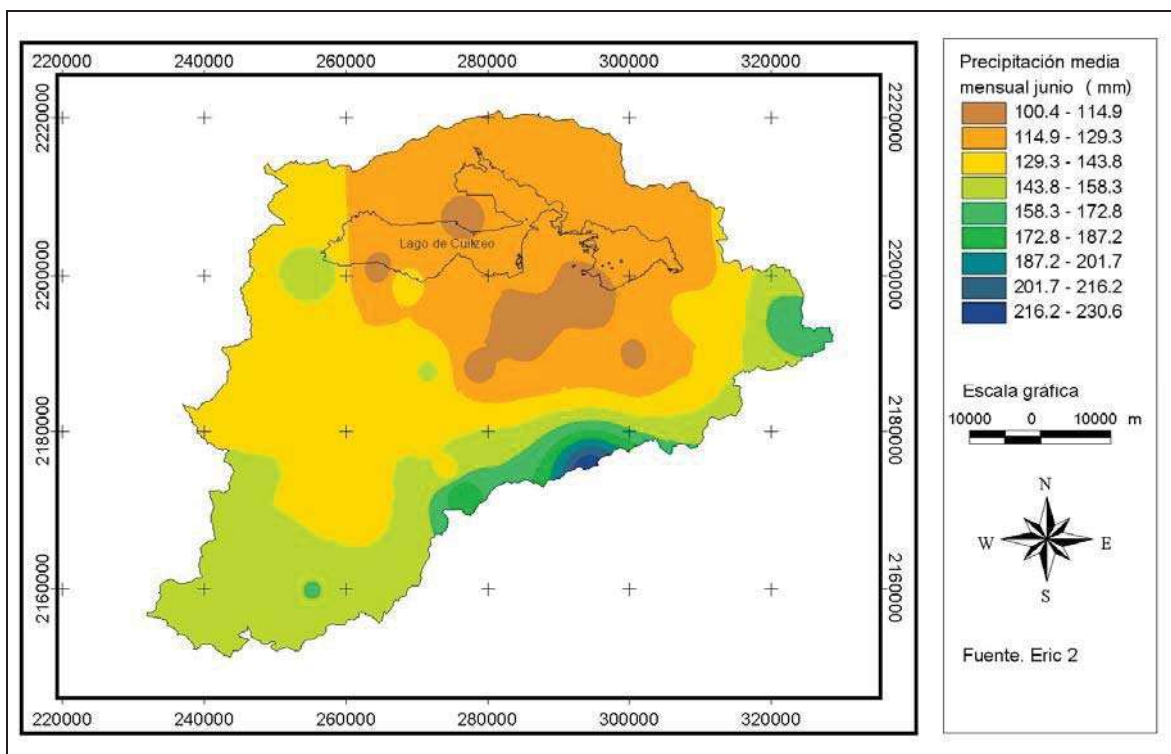


Figura VII. 24. Precipitación media del mes de junio en milímetros, con base en los datos del Eric 2.

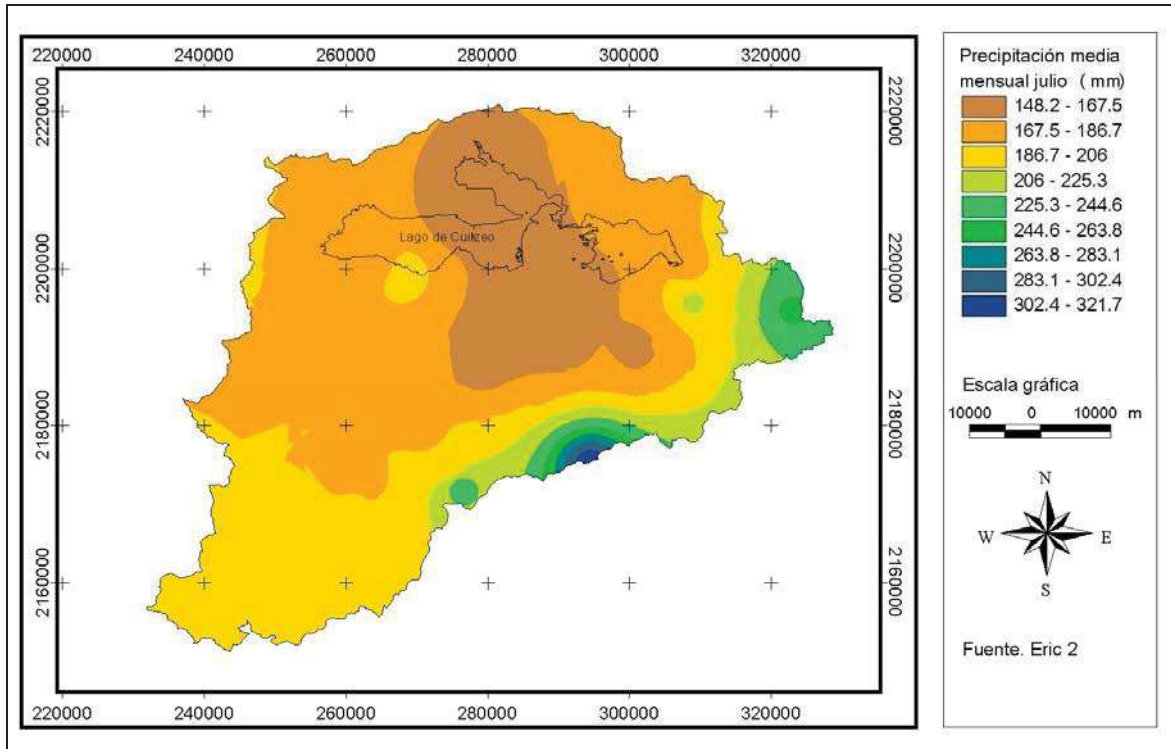


Figura VII. 25. Precipitación media del mes de julio en milímetros, con base en los datos del Eric 2.

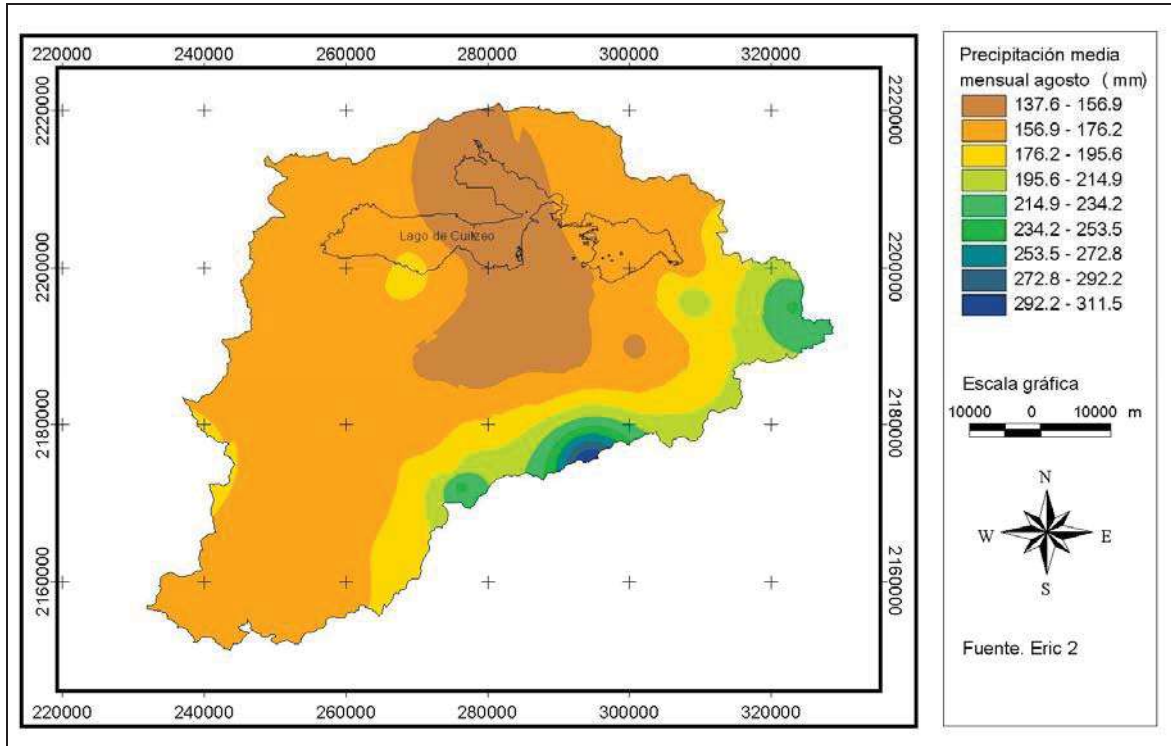


Figura VII. 26. Precipitación media del mes de agosto en milímetros, con base en los datos del Eric 2.

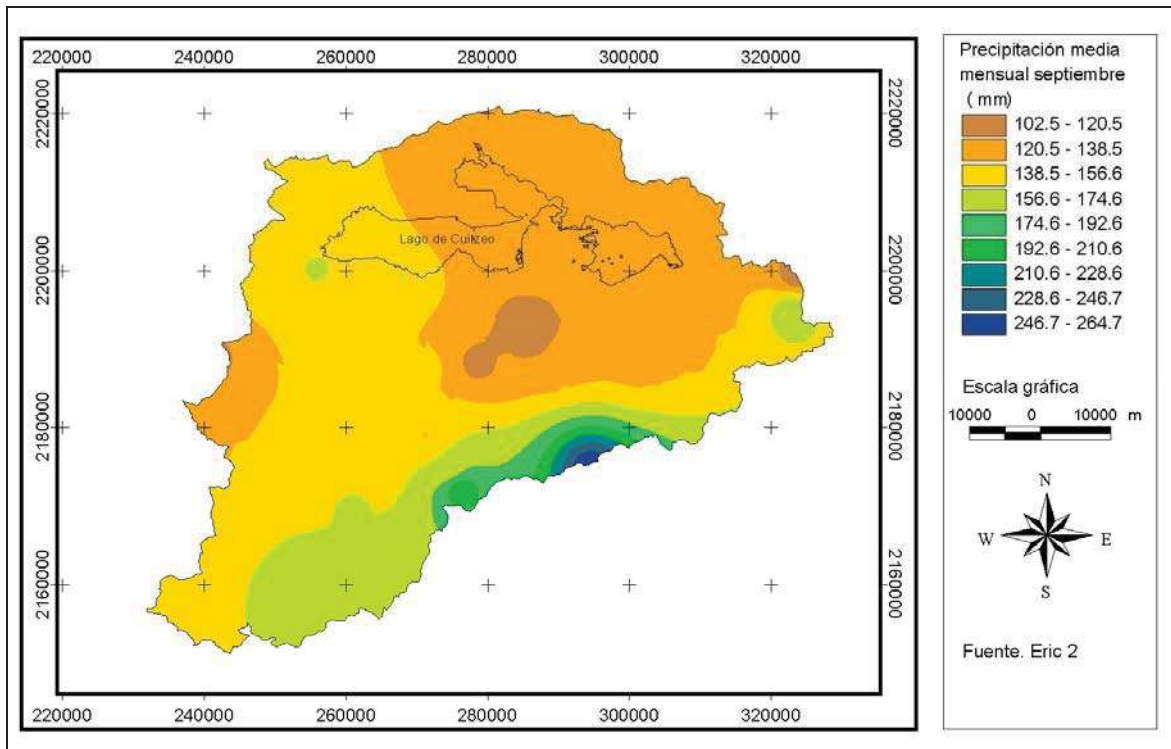


Figura VII. 27. Precipitación media del mes de septiembre en milímetros, con base en los datos del Eric 2.

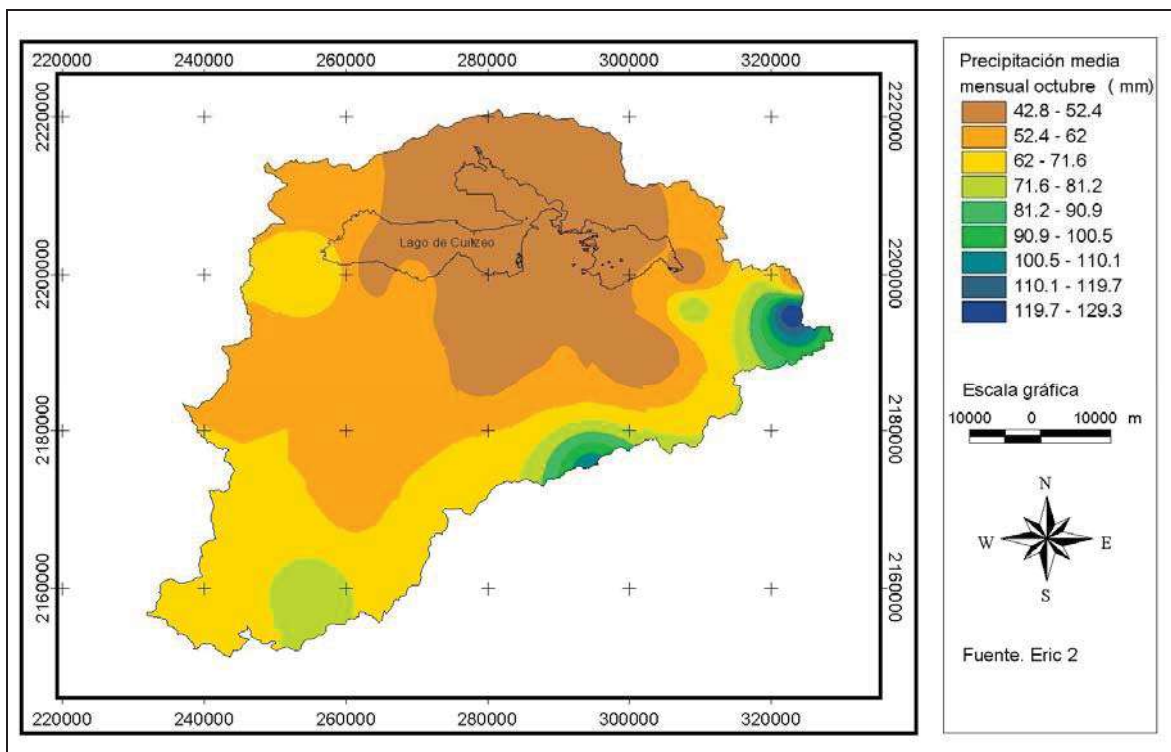


Figura VII. 28. Precipitación media del mes de octubre en milímetros, con base en los datos del Eric 2.

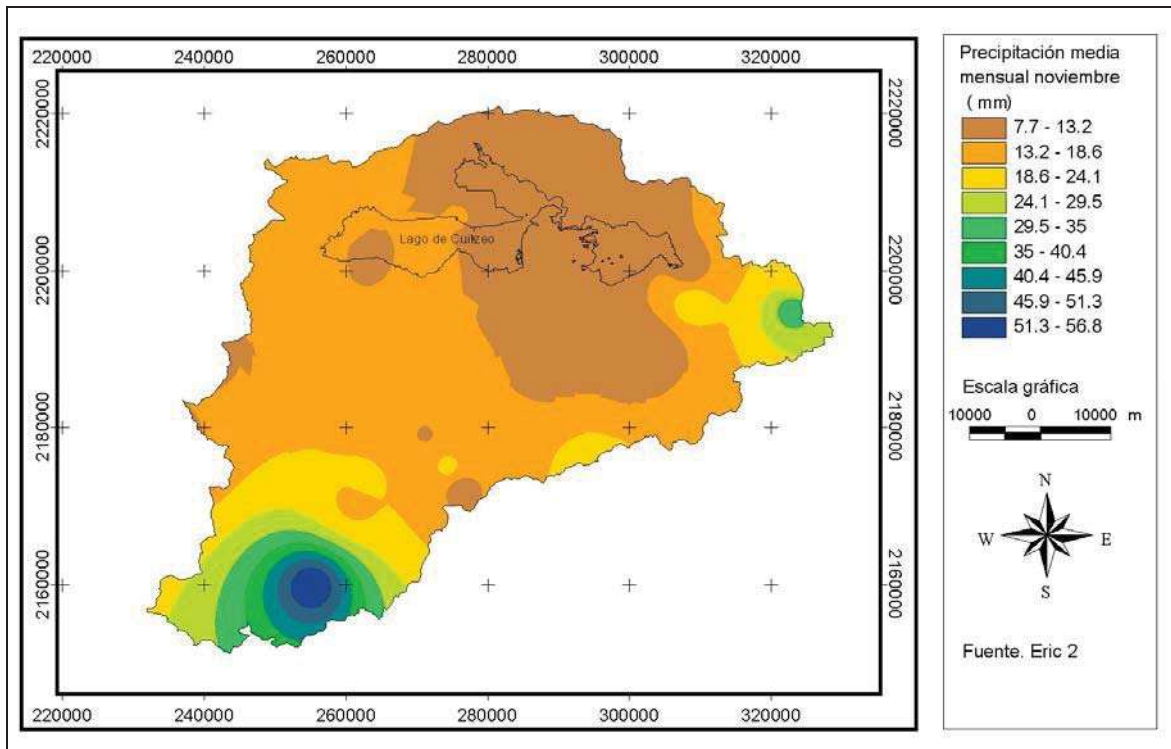


Figura VII. 29. Precipitación media del mes de noviembre en milímetros, con base en los datos del Eric 2.

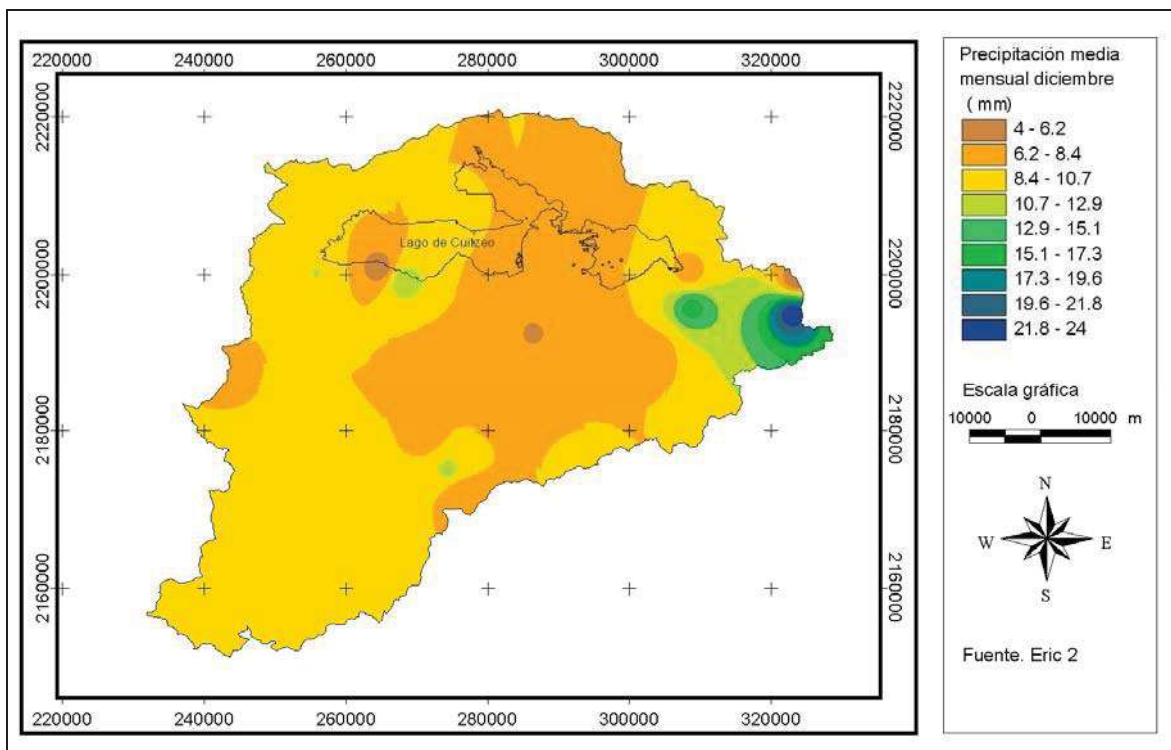


Figura VII. 30. Precipitación media del mes de diciembre en milímetros, con base en los datos del Eric 2.

#### VII.4.2. Evaporación potencial

En la Figura VII. 31 se observa que la evaporación aumenta de enero a mayo y disminuyen de junio a diciembre, presentándose los valores más altos de evaporación en los meses de abril y mayo con un valor 194.4 mm y la mínima evaporación ocurre en el mes de diciembre con un valor de 103.3 mm.

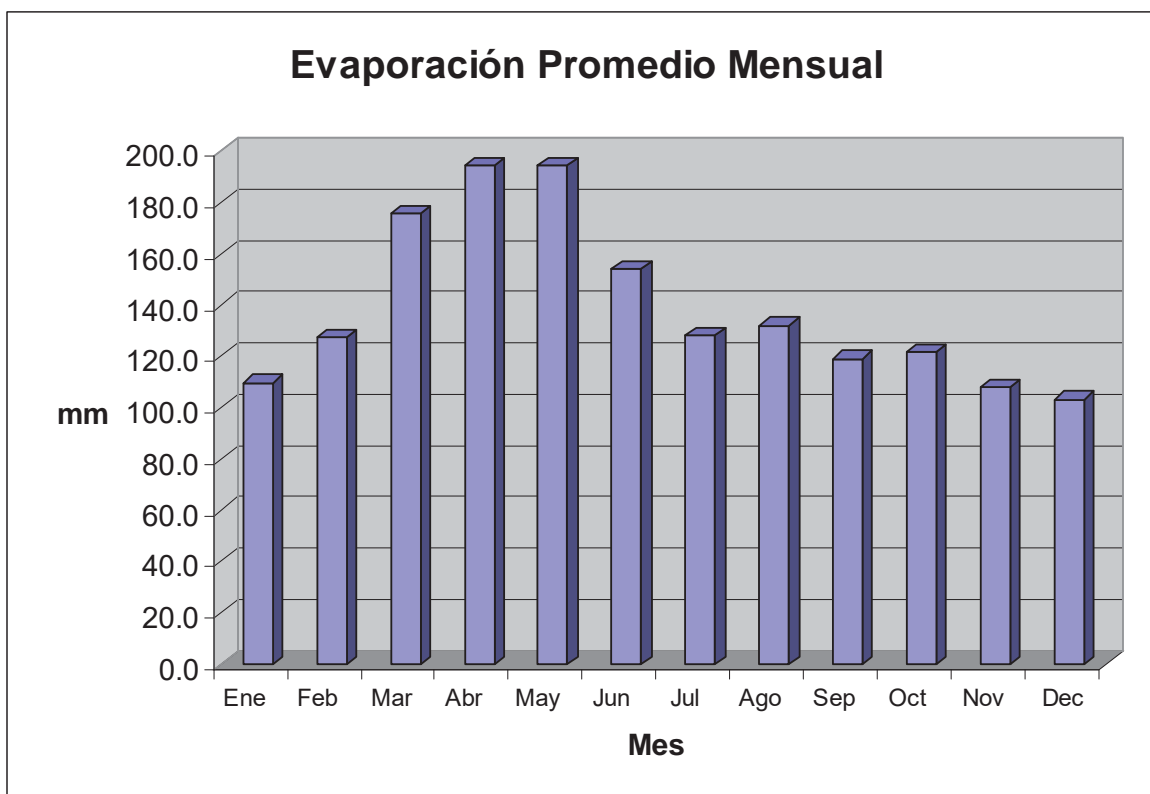


Figura VII. 31. Evaporación media mensual de la cuenca de Cuitzeo.

Fuente: Eric 2

Los valores promedio de la evaporación potencial mensual para cada una de las estaciones se presentan en la Tabla VII. 3 y las figuras VII. 32 a VII. 43 se ilustran su distribución en el año.

Clave	Nombre	X	Y	Periodo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dec	Promedio
16001	Acuitzio_del_Canje	255216	2157105	1961-2005	86.7	97.4	138.8	150.6	137.6	125.5	127.6	122.8	103.0	108.1	84.5	83.7	1366.5
16016	Carrillo_Puerto	286730	2201447	1969-2004	138.3	168.4	237.7	241.7	246.9	194.6	165.9	162.5	145.3	143.2	123.7	117.4	2085.5
16034	Chucandiro	255947	2201807	1969-1987	64.6	98.1	150.1	215.0	192.6	142.1	156.0	153.6	127.6	130.5	90.8	80.7	1601.6
16020	Ciudad_Hidalgo	337265	2178365	1961-2004	117.3	135.5	190.0	233.9	186.0	153.6	129.4	129.5	126.0	127.7	116.7	108.3	1723.8
16022	Cointizio	262593	2171766	1940-2005	119.0	147.1	217.1	233.8	215.4	156.7	125.8	122.5	107.7	112.9	104.8	102.4	1765.4
16512	El_Colegio	271707	2187997	1988-2005	102.1	124.5	183.5	181.8	173.3	139.7	121.1	116.5	103.7	101.8	92.6	98.2	1538.8
16155	Copandaro_de_Jim	267946	2200711	1969-2001	131.0	147.7	202.5	218.6	223.0	179.4	150.0	143.5	128.1	131.8	121.8	118.4	1895.9
16027	Cuitzeo	275915	2209225	1923-2005	117.9	135.1	177.3	192.3	203.1	173.5	152.0	153.9	140.3	138.2	120.4	114.2	1818.3
16028	Cuitzillo_Grande	278540	2188444	1969-2005	116.3	150.5	202.0	200.7	204.9	157.2	149.8	141.9	129.1	122.7	108.7	104.2	1787.9
16100	El_Puerto_San_Isidro	236196	2198137	1948-1993	116.2	135.2	180.2	184.3	188.8	155.2	135.1	134.3	121.6	119.6	110.0	106.3	1686.7
16045	El_Tamazcal	294560	2173655	1965-2004	81.8	92.4	140.7	160.2	157.3	115.8	108.4	106.8	104.7	89.8	81.7	79.4	1319.1
16050	Huaniqueo	237889	2201951	1974-1987	104.2	117.4	179.3	188.1	183.9	139.6	116.4	117.7	109.8	106.7	99.5	95.0	1557.5
16052	Huingo	308494	2201735	1941-2004	139.7	149.0	201.7	225.7	233.7	188.0	161.9	153.7	147.4	158.5	144.9	137.4	2041.5
16514	Jarapeo_Irimbo	323057	2196001	1991-2004	133.8	156.2	203.3	213.7	204.6	148.3	138.2	141.6	123.1	133.9	121.5	117.0	1835.2
16081	Morelia	271153	2178293	1952-2005	124.5	144.4	204.4	221.7	220.1	170.6	146.4	143.8	127.8	128.4	121.2	110.6	1863.9
16087	Patzcuaro	225942	2159947	197-1992	88.9	114.4	167.4	185.5	182.1	138.6	117.3	115.2	103.9	104.4	86.0	78.0	1481.8
16096	Presa_Malpais	303892	2190863	1940-2004	122.1	142.0	203.0	227.8	236.4	179.7	140.2	137.4	127.1	131.0	117.9	110.5	1875.1
16097	Pucua	323072	2170633	1980-2004	99.5	110.8	149.5	160.3	151.7	119.8	113.6	115.5	105.9	106.6	101.6	97.7	1432.6
16104	Puruandiro	237081	2222321	1950-2005	106.0	119.2	85.2	249.4	252.1	193.6	0.0	189.6	104.1	187.4	143.1	138.9	1768.7
16105	Quiro	290647	2189999	1963-2005	120.1	143.4	202.7	214.3	214.0	173.4	140.3	130.8	116.9	119.0	107.7	103.2	1785.9
16199	San_Miguel_Curahuango	348461	2198369	1975-2002	132.1	143.2	199.6	199.8	213.9	181.2	158.2	158.4	149.0	155.3	132.1	126.6	1949.3
16114	San_Miguel_del_Monte	276260	2170551	1969-2005	103.4	115.6	143.7	153.8	160.8	140.2	130.3	119.9	119.4	109.8	115.3	108.6	1520.8
16116	San_Sebastian	301164	2190457	1969-1991	140.3	164.6	223.5	232.5	230.4	179.6	148.4	142.6	133.6	140.8	126.4	122.0	1984.5
16118	Santa_Fe	235315	2175961	1969-2004	119.8	127.2	169.9	179.7	180.3	144.7	125.5	120.4	109.9	117.3	108.9	115.6	1619.3
16119	Santa_Rita	264868	2202343	1964-2005	97.9	141.7	182.2	233.2	269.2	199.8	145.8	152.9	133.1	126.0	109.9	96.2	1887.8
16120	Santiago_Undameo	261327	2168657	1954-2004	83.8	104.4	146.7	146.3	152.7	133.5	111.2	115.5	107.0	95.8	74.7	74.4	1345.9
16121	Senguio	358406	2182169	1969-2004	101.4	120.3	181.8	194.8	184.8	143.6	122.4	119.1	115.7	117.1	106.3	97.1	1604.4
16254	Teremendo	240504	2189458	1982-2005	95.8	115.8	163.8	192.4	186.0	135.3	103.5	101.8	97.0	87.8	81.6	89.9	1450.8
16136	Tzitzio	298019	2166345	1971-2004	120.1	123.3	177.2	184.7	189.1	161.7	148.6	146.6	131.7	133.2	120.5	112.6	1749.5
16221	Ucareo	323520	2200855	1980-2003	103.8	104.7	144.0	137.3	141.9	112.8	100.8	109.6	111.8	97.3	97.8	89.2	1351.0
16140	Villa_Madero	260925	2145245	1961-1990	93.7	102.5	151.1	161.3	157.2	120.9	109.3	104.1	95.2	95.6	85.8	83.4	1360.0
16145	Zinapécuaro	308834	2196819	1923-2005	113.5	118.9	164.2	187.3	199.8	175.4	151.0	143.6	137.7	139.1	117.9	107.2	1755.6
16146	Zirahuen	213170	2153219	1971-2004	85.0	93.8	123.9	142.1	143.0	102.6	87.0	88.8	86.1	94.4	90.9	84.0	1221.5
				Promedio	109.7	127.4	175.4	194.4	194.4	153.8	128.4	132.0	119.1	121.6	108.1	103.3	1667.6

Tabla VII. 3. Evaporación media mensual

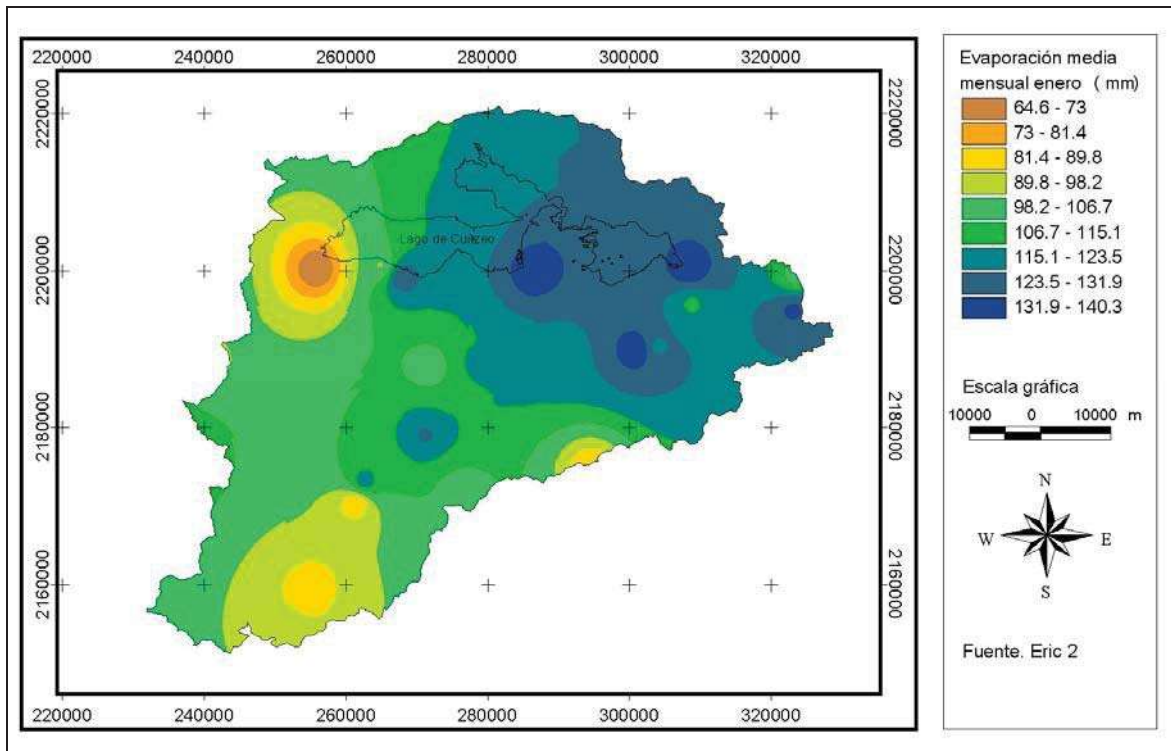


Figura VII. 32. Evaporación media del mes de enero en milímetros, con base en los datos del Eric 2.

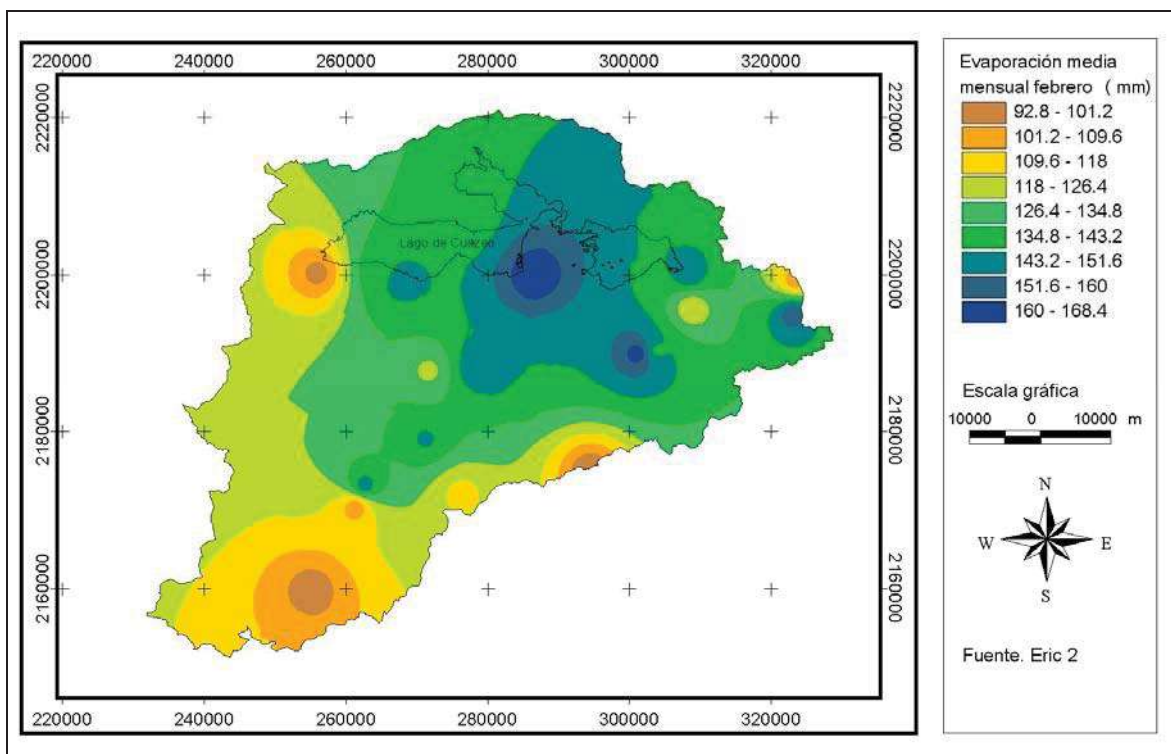


Figura VII. 33. Evaporación media del mes de febrero en milímetros, con base en los datos del Eric 2.

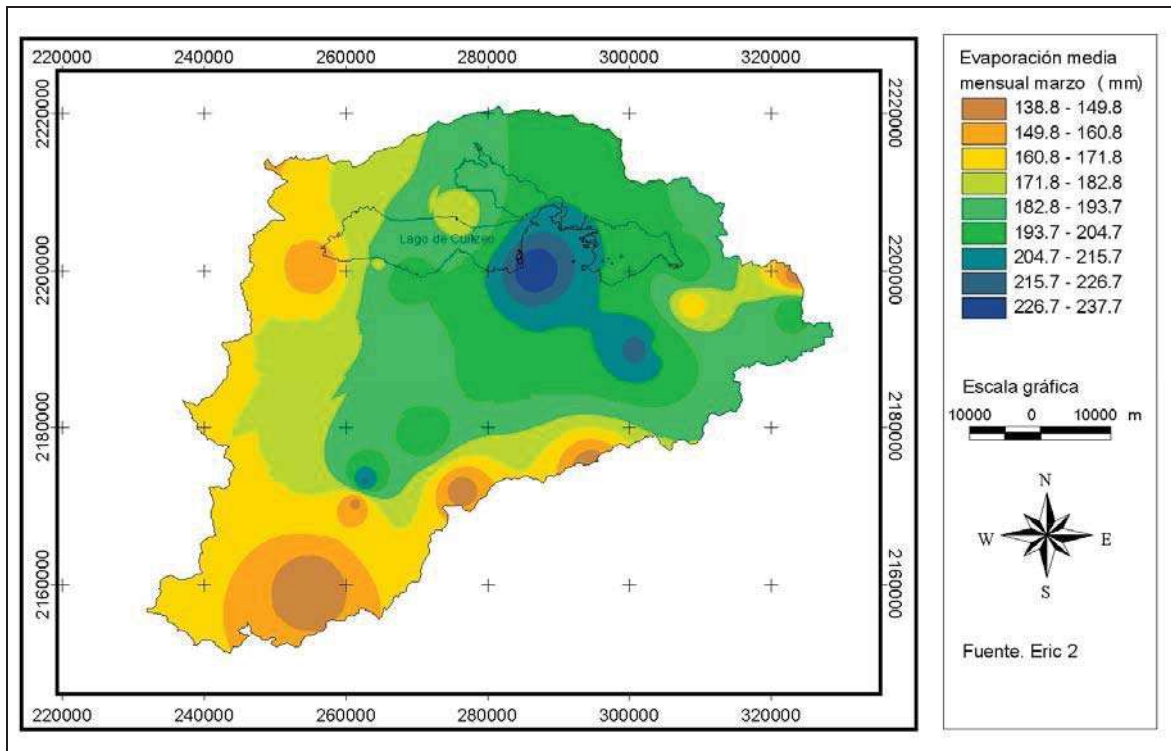


Figura VII. 34. Evaporación media del mes de marzo en milímetros, con base en los datos del Eric 2.

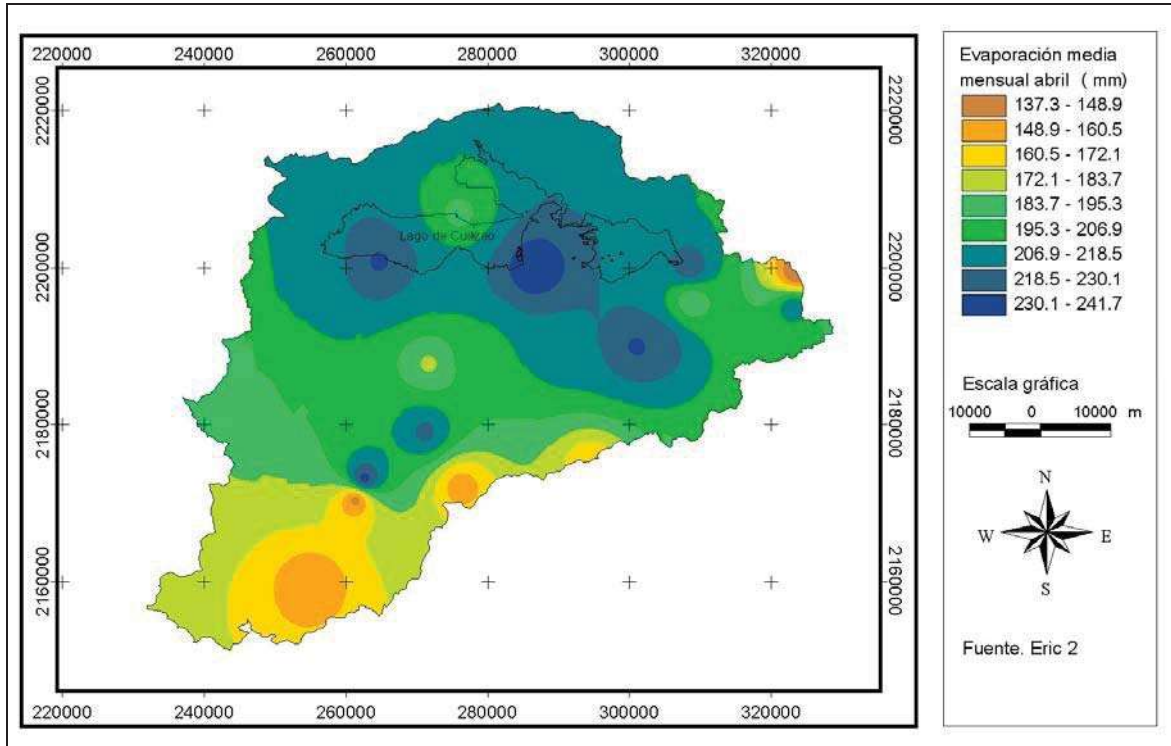


Figura VII. 35. Evaporación media del mes de abril en milímetros, con base en los datos del Eric 2.

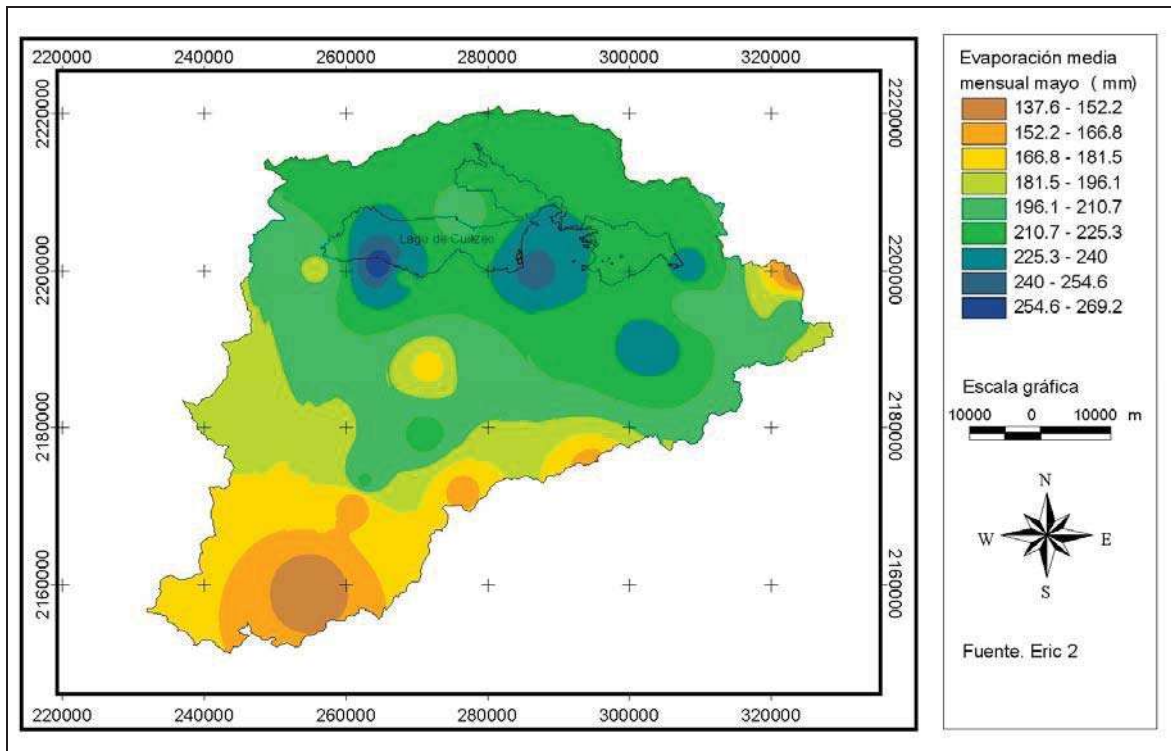


Figura VII. 36. Evaporación media del mes de mayo en milímetros, con base en los datos del Eric 2.

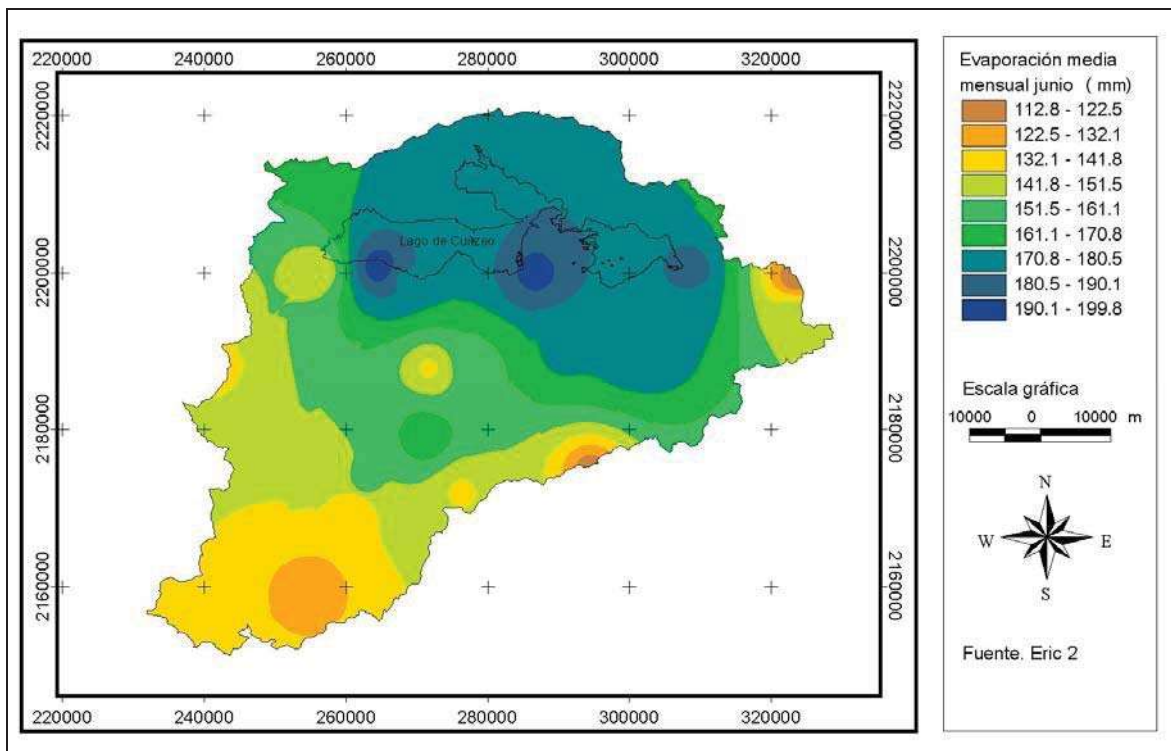


Figura VII. 37. Evaporación media del mes de junio en milímetros, con base en los datos del Eric 2.

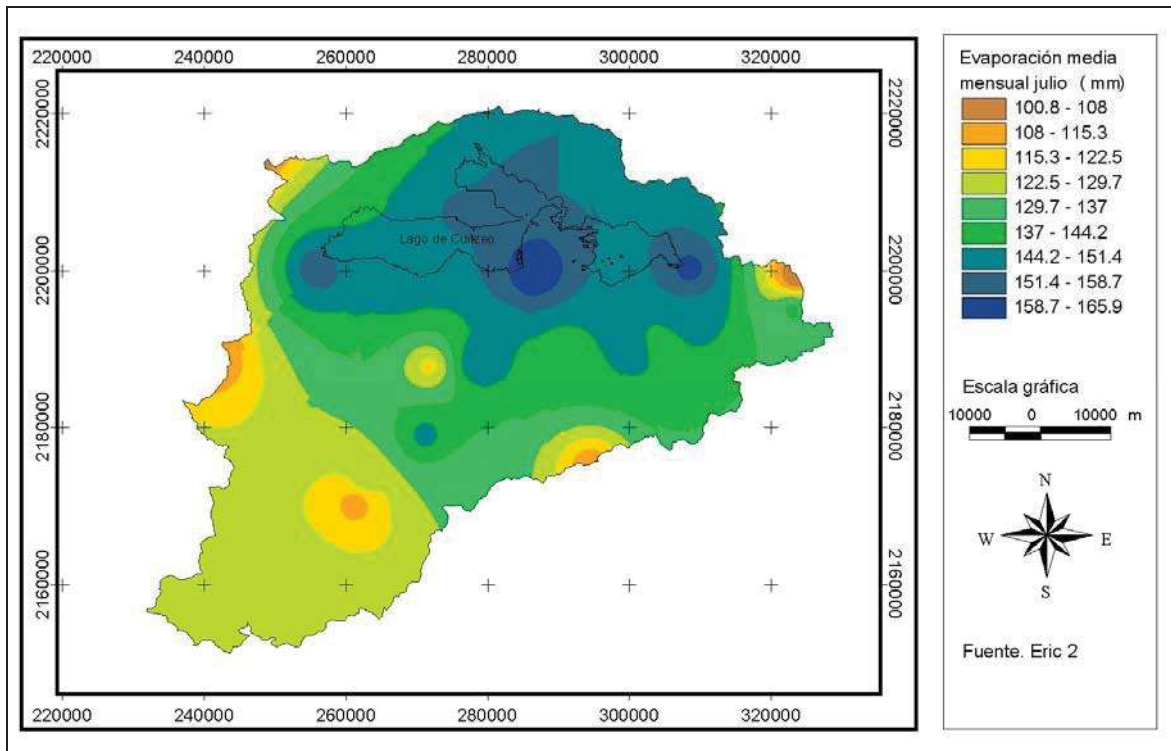


Figura VII. 38. Evaporación media del mes de julio en milímetros, con base en los datos del Eric 2.

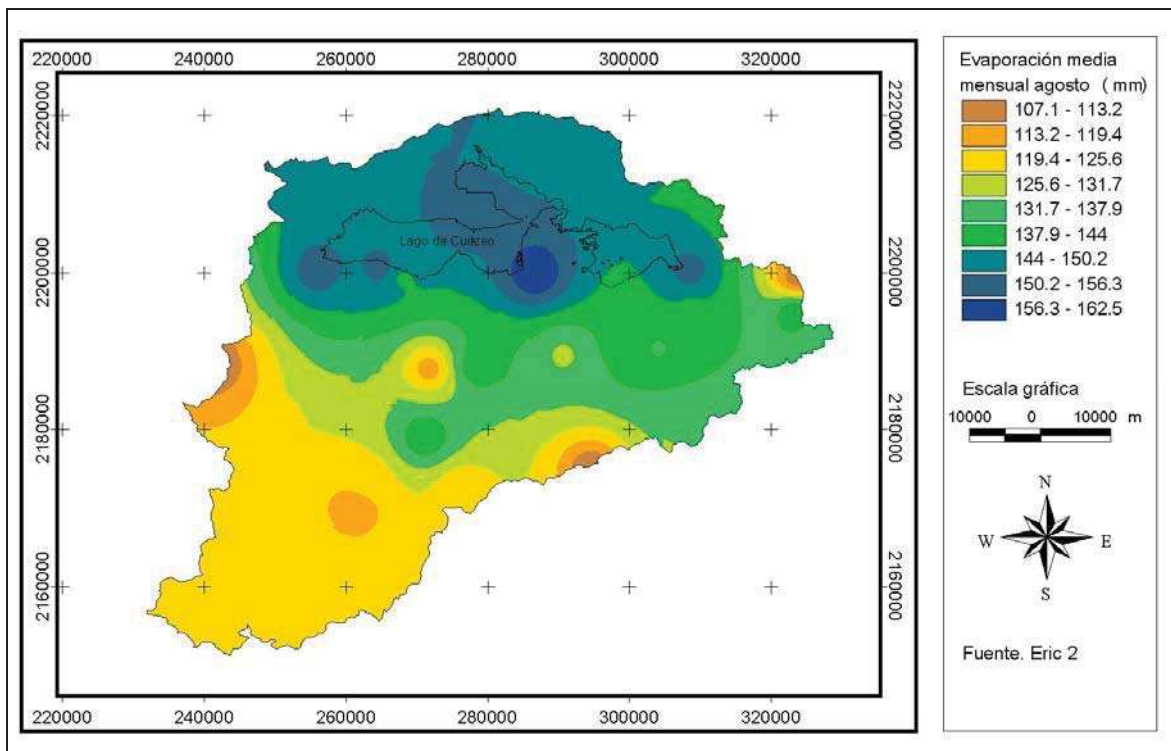


Figura VII. 39. Evaporación media del mes de agosto en milímetros, con base en los datos del Eric 2.

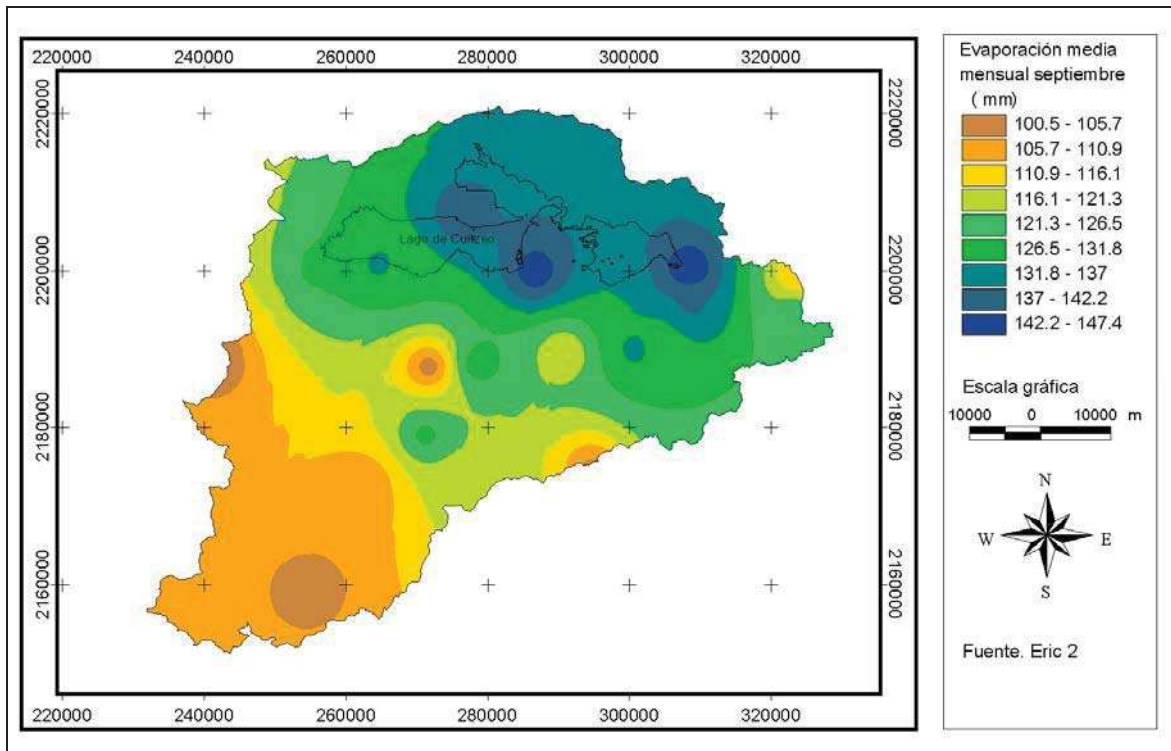


Figura VII. 40. Evaporación media del mes de septiembre en milímetros, con base en los datos del Eric 2.

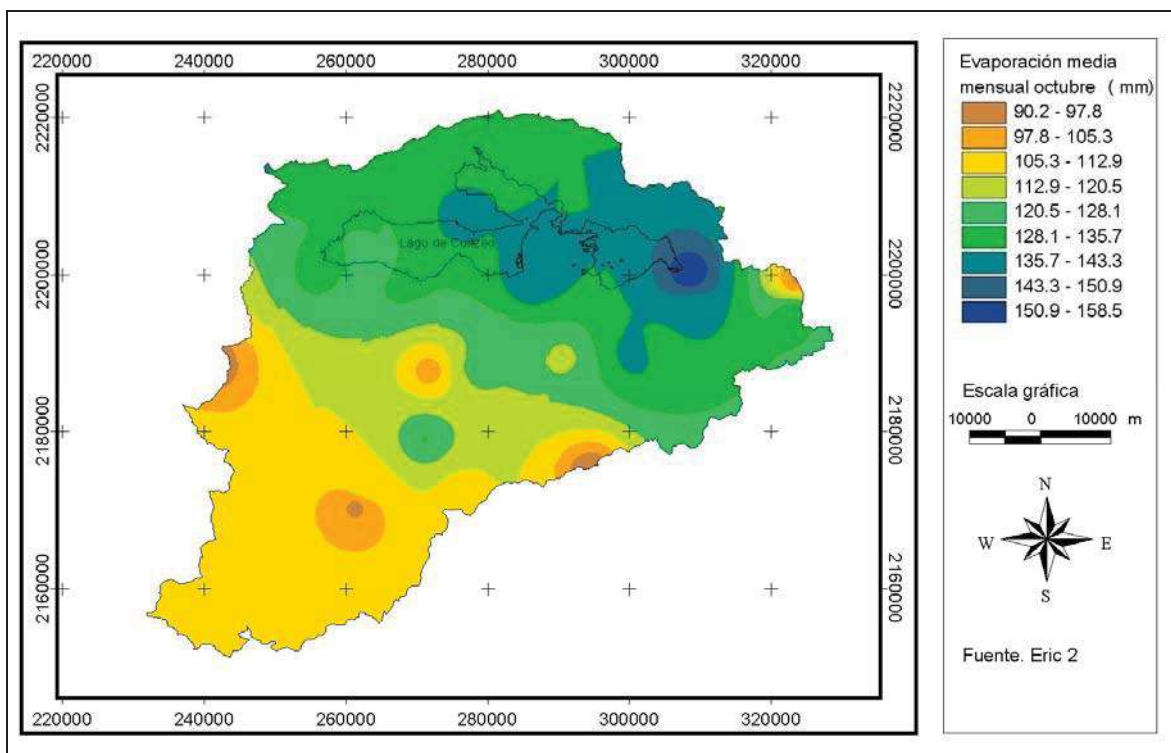


Figura VII. 41. Evaporación media del mes de octubre en milímetros, con base en los datos del Eric 2.

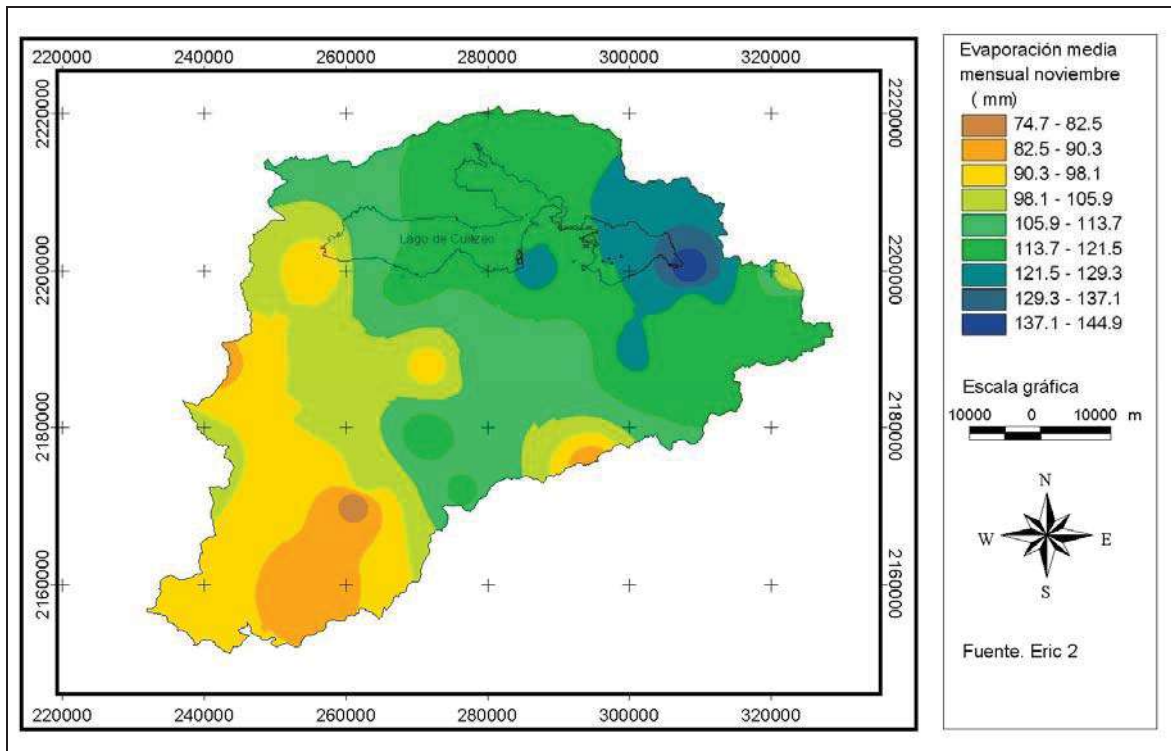


Figura VII. 42. Evaporación media del mes de noviembre en milímetros, con base en los datos del Eric 2.

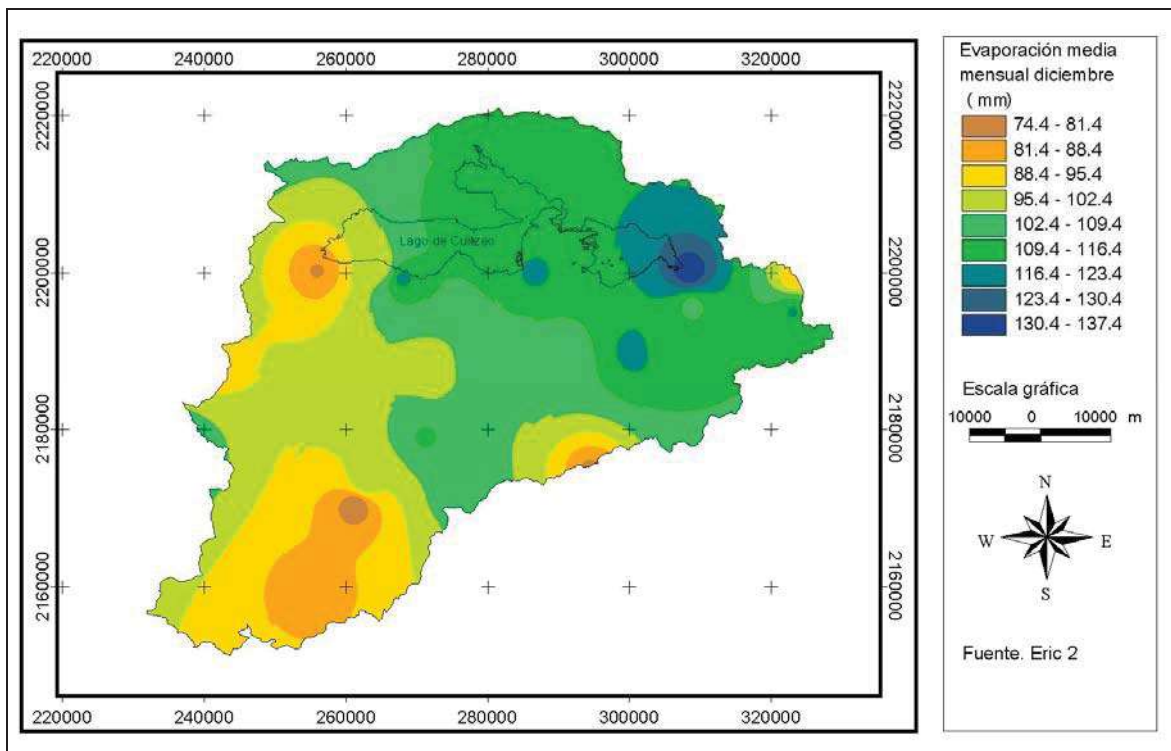


Figura VII. 43. Evaporación media del mes de diciembre en milímetros, con base en los datos del Eric 2.

Los valores de la evaporación media anual se ilustran en la Figura VII. 44, en esta se presentan las curvas de igual evaporación media anual.

Los valores menores de evaporación, 1,500 mm/año, se presentan hacia la Sierra de Mil Cumbres y el suroeste de la cuenca, y los valores más altos (2,000 mm/año) se presentan en la porción central del lago y en el valle Queréndaro. La evaporación media anual en el período resultó de 1,667.6 mm/año.

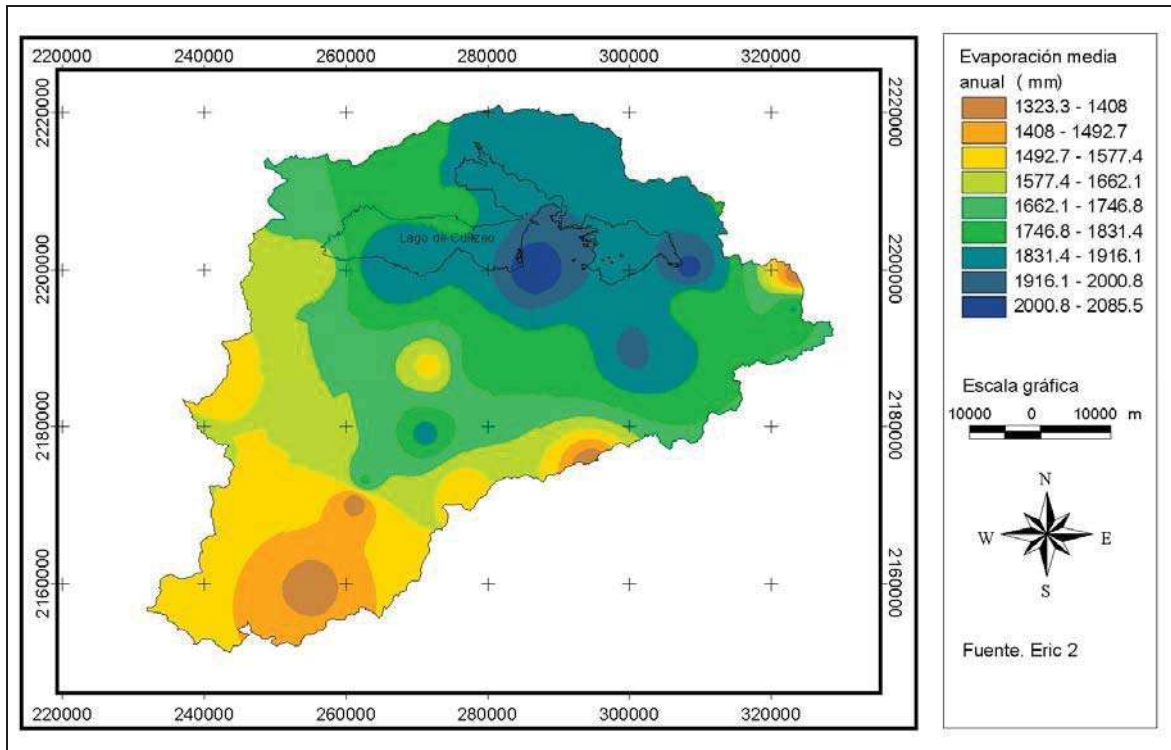


Figura VII. 44. Evaporación media anual de la cuenca de Cuitzeo en milímetros, con base en los datos del Eric 2.

### VII.4.3. Infiltración

En relación con la infiltración no se tiene información que pudiera utilizarse, pero de acuerdo al estudio realizado por la SARH (1993) se estima que para el periodo comprendido entre 1977 y 1992 dentro del valle Morelia-Queréndaro, 75 Mm<sup>3</sup>/año son recargados de manera natural en los flancos montañosos y 45 Mm<sup>3</sup>/año son producto de la infiltración de excedentes de riego y de la contribución del río Grande de Morelia.

## VII. 5. Balance hidrológico

Para abordar el balance hidrológico se tiene que plantear la ecuación que nos permita realizar dicho balance, para esto se considera la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000 que nos dice las especificaciones para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales. La disponibilidad media anual de agua subterránea en una unidad hidrogeológica se determina mediante la siguiente expresión:

$$\text{Disponibilidad media anual de agua subterránea en una unidad hidrogeológica} = \text{Recarga total media anual} - \text{Descarga natural comprometida} - \text{Volumen concesionado de agua subterránea}$$

De estas se define a la recarga total media anual mediante la siguiente expresión:

$$\text{Recarga Total (suma de entradas)} = \text{Cambio de almacenamiento de la unidad geohidrológica} + \text{Descarga total (suma de Salidas)}$$

De esta última expresión el cambio de almacenamiento se determina a partir de la evolución de los niveles del agua subterránea y de los valores representativos del coeficiente de almacenamiento (obtenido a partir de pruebas de bombeo) y la descarga total se calcula como la suma de los volúmenes descargados de forma natural y de los extraídos por medio de captaciones.

La descarga natural comprometida, se hace sumando los volúmenes de agua concesionados de los manantiales y del caudal base de los ríos que están comprometidos como agua superficial mas las descargas que se deben conservar para no afectar a las unidades hidrogeológicas adyacentes; sostener el gasto ecológico; y prevenir la migración de agua de mala calidad a la unidad hidrogeológica considerada.

El volumen concesionado de agua subterránea se determina sumando los volúmenes anuales de agua, asignados y concesionados por la CNA, adicioandole de ser el caso volúmenes correspondientes a reservas, reglamentos y programación hidráulica.

Pero como se contó con pocos datos, no es posible llevar adelante este balance porque no se cuenta con estaciones hidrométricas para determinar el caudal base de los ríos, una prueba de bombeo con pozos de observación y conocer a un mejor detalle las extracciones.

## VII. 6. Conclusiones

En este capítulo se trató de obtener un balance hidrológico que nos permitiera conocer el estado del recurso hídrico en la cuenca, sin embargo, únicamente existe el estudio realizado

por la SARH, 1993 en el que se hacen grandes simplificaciones y se hacen estimaciones sin bases sostenibles.

En la cuenca de Cuitzeo se ubica en un clima predominantemente como templado húmedo y de acuerdo a Mendoza-Cantú, 2003 se encuentra en una zona de transición entre climas templados secos a templados húmedos.

Con base en las precipitaciones pluviales se observa que a través de los meses las mayores precipitaciones ocurren en la parte SO-NE de la cuenca, por lo se determina que la precipitación es de tipo orografico o de relieve.

La evaporación potencial que se registra es mayor que la precipitación registrada en las estaciones meteorológicas, por lo que esta última se incrementa de enero a mayo, que son los meses donde se registran valores que van desde los 109 hasta los 194 mm.

## VIII.- HIDROGEOQUIMICA

### VIII.1. Generalidades

La composición general de los diversos tipos de agua en la hidrosfera puede estudiarse mejor dentro del marco de referencia del ciclo hidrológico. De la cantidad total del agua sobre la Tierra, los océanos conforman el 97.20 %, y el 2.80 % restante se encuentra dentro de los continentes, de este porcentaje los casquetes polares y los glaciares comprenden el 2.14 %, el agua subterránea el 0.61 % y los ríos, lagos y corrientes solo el 0.009% del total ver figura VIII. 1. (Henry y Heinke, 1999).

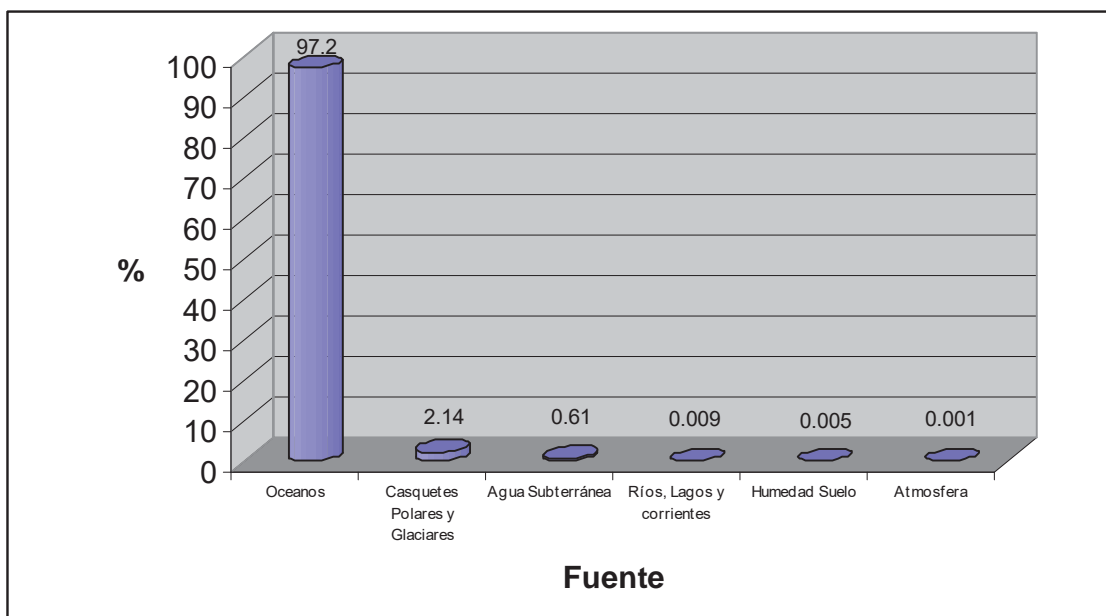


Figura VIII. 1. Balance Mundial del Agua

El agua de los océanos se evapora y es transportada sobre las masas territoriales, donde se puede depositar por cualquier forma de precipitación (lluvia, nieve, granizo, etc.). El agua atraviesa la parte inferior de la atmósfera durante su paso del océano a la superficie terrestre. Debido a esto, tiene la posibilidad de equilibrarse con los gases de la atmósfera. La composición promedio de la atmósfera terrestre está sujeta a variaciones considerables, especialmente en los niveles de ciertos constituyentes menores como son  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ , etc., que son productos de los procesos de combustión y están asociados a la contaminación atmosférica que hay en las comunidades urbanas-industriales (Manahan, S. 1996). La composición de la precipitación es variable y los contaminantes atmosféricos

influyen considerablemente sobre ella. Una precipitación cerca de los océanos contiene más  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{Mg}^{2+}$  que la que ocurre en el interior del continente. La lluvia y la nieve que se generan en una atmósfera que tiene cierta concentración de  $\text{SO}_2$  producida por combustión puede ser ácida. Sin embargo, el agua de lluvia es sin duda una solución muy diluida de sales, lo que indica la notable eficiencia del proceso de destilación que resulta en la producción de agua potable a partir del agua de mar (Droste, R.L. 1997; Fair et al., 1997).

El valor del pH de un agua de precipitación no contaminada puede variar entre 5.5 y 6.5, siendo éste significativamente menor que el del agua de mar de la cual se generó. Este es un reflejo del equilibrio que se logra con el  $\text{CO}_2$  atmosférico. El agua de lluvia no contiene amortiguadores, de manera que no puede mantener su PH neutro en presencia de estas cantidades tan pequeñas de gases que producen ácidos (Henry y Heinke, 1999; Stumm y Morgan, 1996).

El agua cae sobre la superficie de la tierra durante la precipitación pluvial y establece contacto con rocas, sedimentos y el suelo; así como con los habitantes, tanto animales como vegetales, de la superficie terrestre, llevándose a cabo reacciones químicas que modifican aun más la composición del agua. Estas reacciones se pueden considerar en términos generales como una titulación ácido-base gigantesca en donde los ácidos del agua de lluvia ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$  y  $\text{NO}_x$ ) neutralizan las bases de las rocas. Como la composición de la superficie terrestre varia de un lugar a otro, estas reacciones pueden ocurrir en aguas de diversas composiciones. El tiempo y el grado de contacto también influyen sobre la composición de la solución.

Las aguas superficiales que se originan en cuencas donde las rocas principales son graníticas contienen pequeñas cantidades de materiales disueltos (no más de 30 mg/L). Dichas aguas forman un grupo importante. Un segundo tipo general de aguas superficiales tiene su origen en cuencas distintas a las graníticas. Esta agua tiene valores intermedios de dureza (cálcica y magnésica), alcalinidad y contenido total de minerales (Snoeyink y Jenkins, 1996).

Las aguas subterráneas generalmente tienen concentraciones de sólidos disueltos, sulfatos y cloruros superiores a las de las aguas superficiales provenientes de fuentes naturales, por el escaso contacto entre el agua cargada de CO<sub>2</sub> y las rocas y tierra en el suelo, así como por el tiempo de disolución (Fetter, C.W. 1999). Además, puede agregarse CO<sub>2</sub> al agua en el suelo por la actividad de microorganismos (Snoeyink y Jenkins, 1996; Seoanez, M. 1996).

## **VIII.2. Contaminación del agua**

Los contaminantes del agua pueden ser muy diversos: materia tóxica, sólidos en suspensión o disueltos, microorganismos patógenos, etc. La contaminación puede dar al agua propiedades indeseables, como corrosividad, incrustabilidad, toxicidad, mal olor, mal sabor y mala apariencia.

Una parte de los contaminantes que adquiere el agua proviene de la atmósfera, pero la mayoría los toma del suelo. Por lo cual se le da una especial importancia a la geología, ya que la composición de los estratos será la que finalmente proporcione las características de la calidad del agua extraída (Henry y Heinke, 1999; Segovia et al., 1999a).

El agua potable 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 ni olor, además no debe contener bacterias. Lo anterior es fundamental para prevenir y evitar enfermedades, por lo que las características físicas, químicas, bacteriológicas y radiactivas del agua deben estar dentro de los límites permisibles establecidos por la normatividad vigente (DOF, 1994; EPA, 2002)

La mayoría de las aguas subterráneas son de excelente calidad natural sin embargo, su composición puede deteriorarse como resultado de la contaminación hasta niveles perjudiciales para la salud. Las fuentes principales de contaminación pueden clasificarse en fuentes antropogénicas (industriales, agrícolas y urbanas) y fuentes naturales (Snoeyink y Jenkins, 1996).

En algunos sistemas de agua subterránea del país se ha detectado la presencia de contaminantes, los cuales se definen como “toda sustancia presente en una concentración mayor que la natural. Como resultado de la actividad humana, que tiene un efecto perjudicial sobre el entorno” (Manahan, S. 1996).

Las actividades humanas producen una gran cantidad de desechos y provocan perturbaciones en el ciclo hidrológico y en la circulación de las aguas.

La contaminación de acuíferos depende mucho de factores locales y por ello, un estudio requiere un buen conocimiento de la zona y de casos similares. Los posibles orígenes de la contaminación de los acuíferos son muy variados, pero destacan los siguientes focos contaminantes (Hem, J.D. 1992; Henry y Heinke, 1999):

**Aguas residuales industriales.** Las aguas residuales de la industria incluyen los residuos sanitarios, los residuos de proceso derivados de la manufactura, aguas de lavado y aguas relativamente poco contaminadas procedentes de las operaciones de calentamiento y enfriamiento. Las aguas residuales de los procesos son las que causan más preocupación y su contaminación puede tener un rango muy amplio según el tipo de industria. En contraste con las cualidades relativamente poco variables de las aguas negras domésticas, las aguas residuales industriales suelen tener características muy variadas. Los residuos son específicos de cada industria y varían desde residuos biodegradables como los que proceden del empaquetado de carnes, hasta residuos no degradables como los de talleres de recubrimiento con metales y de fábricas textiles, los cuales pueden ser inorgánicos y/o tóxicos y requerir un tratamiento físico y químico local antes de su descarga al sistema municipal.

**Aguas residuales municipales.** Las aguas residuales producidas del consumo humano se conocen como aguas negras sanitarias. Las aguas residuales de áreas residenciales, que se conocen como aguas negras domésticas incluyen residuos provenientes de cocinas, baños, lavado de ropa y pisos. Estas, junto con los residuos líquidos de los establecimientos comerciales e industriales, se denominan aguas residuales municipales.

**Contaminación por labores agrícolas.** El uso de abonos ocasiona el aporte de sustancias que pueden ser nocivas para el agua y el suelo. En los regadíos se puede generar una contaminación por depósitos de sales, producto de la infiltración del agua y retención superficial de éstas. Asimismo, la utilización de plaguicidas (insecticidas, fungicidas, herbicidas), que son compuestos altamente tóxicos y contaminantes potenciales del suelo y del agua, puede aportar compuestos persistentes en ambos medios por lo que, al alcanzar las aguas subterráneas alteran sus características fisicoquímicas naturales.

El agua se contamina cuando la descarga de residuos perjudica su calidad o perturba el equilibrio ecológico natural. Los contaminantes que causan problemas comprenden organismos patógenos, materia orgánica, sólidos, nutrientes, sustancias tóxicas, color y espuma. La descarga de contaminantes específicos no es la única causa de contaminación del agua. La construcción de presas, los embalses y las desviaciones de ríos también pueden degradar seriamente su calidad (Snoeyink y Jenkins, 1996; Henry y Heinke, 1999).

### **VIII.3. Parámetros fisicoquímicos**

La determinación de parámetros fisicoquímicos en las aguas subterráneas permite estimar la interacción entre el fluido y la matriz sólida, y puede dar información referente al transporte de contaminantes en los acuíferos. (Gómez, A.C. 2000).

La comprensión de la contaminación química del agua y su control dependen de un conocimiento básico de la química ambiental acuática, donde están comprendidos los componentes mayores y los elementos traza (Manahan, S. 1994).

La mayoría de las especies disueltas en las aguas subterráneas son:  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{Cl}^-$ , en cantidades entre 1 y 1000 mg/L, los cuales se conocen como constituyentes mayores. Los elementos traza se encuentran en concentraciones iguales o menores de 1 mg/l (Rodier, J.1998).

#### VIII.4. Componentes Mayores

**Sílice.** Este compuesto es uno de los más abundantes en la corteza terrestre; se encuentra disuelto en la mayor parte de las aguas naturales. En el agua subterránea sus concentraciones pueden llegar hasta 100 mg/l (Rodier, J.1998).

**Calcio.** Su presencia en la corteza terrestre es abundante y tiene gran movilidad en la hidrosfera, por lo que es uno de los iones más frecuentes en las aguas subterráneas. Generalmente se encuentra en concentraciones de 5 a 500 mg/l como  $\text{CaCO}_3$  (2 a 200 mg/l como  $\text{Ca}^{2+}$ ). Los efectos que producen estas concentraciones sobre la salud son insignificantes. Las aguas que sobrepasan los 200 mg/l presentan inconvenientes para uso doméstico y alimentación de calderas, debido a las incrustaciones que ocasionan (Nalco, 1994).

**Magnesio.** Es un componente común en muchos minerales. A pesar de su gran solubilidad, suele encontrarse en menores concentraciones que el calcio. Su concentración en aguas dulces oscila entre 1 y 100 mg/l. Contribuye a la dureza del agua y puede ocasionar incrustaciones (Hem, J.D.1992; Nalco, 1994; Rodier, J.1998).

**Sodio.** No es un constituyente fundamental de la roca. Es el ión más abundante en el agua de Mar (casi 10000 mg/l). En el agua subterránea su concentración varía de 10 a 100 mg/l. Puede estar presente en forma de cloruros, carbonatos o bicarbonatos (Rodier, J. 1998). La Norma Oficial Mexicana establece una concentración máxima permisible de 200 mg/l (DOF, 1994).

**Potasio.** Se encuentra en cantidades ligeramente mayores que el sodio en las rocas ígneas, y es notablemente más abundante en las rocas sedimentarias. En aguas subterráneas su concentración es menor a 50% en relación al sodio. La mayor parte de las aguas subterráneas contienen menos de 10 mg/l, generalmente oscilan entre 1 y 5 mg/l (Armienta et al., 1994; Marini et al., 2001).

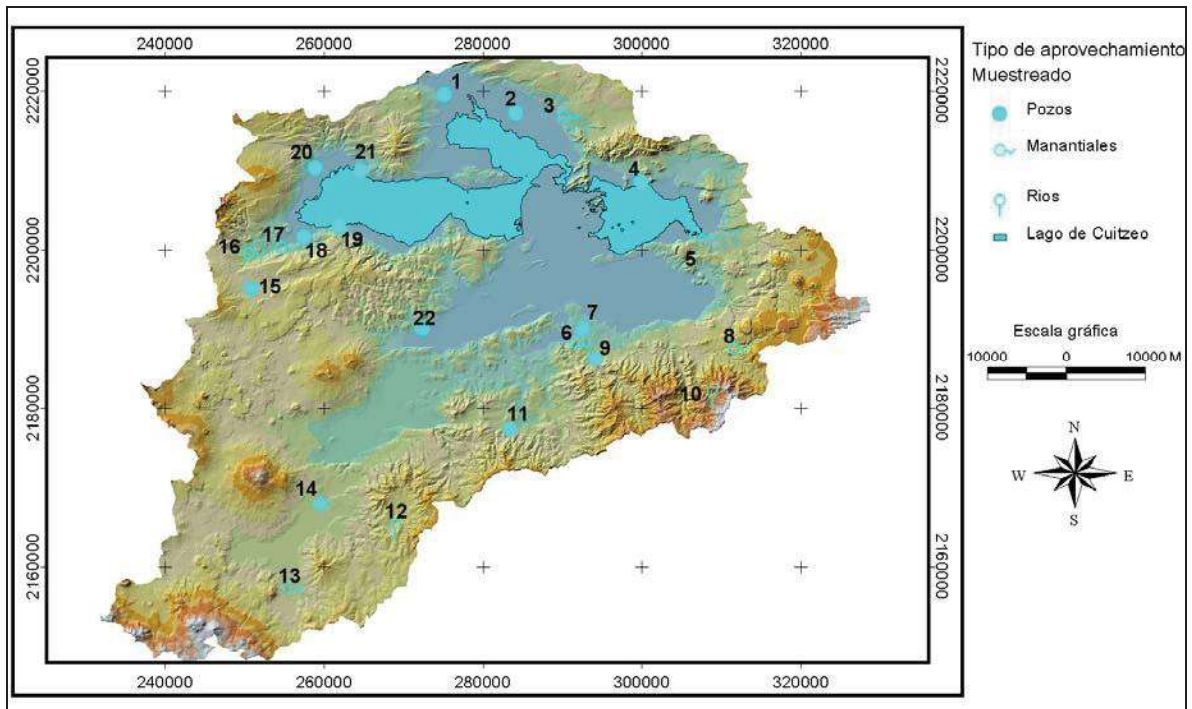
**Cloruros.** Se encuentran en la mayor parte de las aguas naturales. Los cloruros tienen cuatro fuentes principales de procedencia: el agua marina atrapada en sedimentos, la disolución de la sal común y minerales afines, la concentración por evaporación de los cloruros existentes en la lluvia y la nieve y la disolución de las partículas de material sólido de la atmósfera. La concentración de cloruros en aguas dulces oscila entre 10 y 250 mg/l (Hem, J.D. 1992; Manahan, S.1996). La concentración máxima permisible establecida por La Norma Oficial Mexicana es 250 mg/l (DOF, 1994).

**Sulfatos.** Su presencia en las aguas subterráneas generalmente se debe a la disolución de yacimientos evaporíticos y a la transformación de los minerales sulfurosos disueltos por la acción del agua percolada rica en oxígeno disuelto. La concentración de sulfatos en aguas subterráneas oscila entre 2 y 150 mg/l, habiéndose encontrado hasta 5000 mg/l en aguas saladas con presencia de calcio (Hem, J.D. 1992; Armienta et al., 1994). La concentración máxima permisible establecida por La Norma Oficial Mexicana es 400 mg/l (DOF, 1994).

**Bicarbonatos y Carbonatos.** La presencia de estas dos especies en el agua subterránea se debe principalmente a la existencia de dióxido de carbono procedente de la atmósfera y del suelo y por disolución de las rocas carbonatadas. La concentración total de carbonatos y bicarbonatos varía de 5 a 500 mg/l como  $\text{CaCO}_3$ . A valores de pH inferiores a 8.3, la especie predominante son los bicarbonatos (Hem, J.D. 1992; Nalco, 1994; Rodier, J. 1998).

### **VIII.5. Análisis de las características físicas y químicas de la cuenca del Lago de Cuitzeo**

En este estudio se realizó un muestreo de 22 fuentes de agua subterráneas en el mes de abril del 2006, de las cuales 7 se tomaron en manantiales fríos y calientes, 13 muestras en pozos de agua potable y agrícola, y 2 muestras a los ríos Queréndaro y Atécuaro (Figura VIII. 2).



**Figura VIII. 2. Ubicación de los puntos de muestreo**

La selección de los pozos y manantiales se hizo de acuerdo a su ubicación en planta, y ello dependería de las facilidades para muestrear y del funcionamiento de los pozos.

El muestreo se realizó en botellas de 250 ml y se llenaron tratando de minimizar la presencia de aire con objeto de evitar cambios químicos. Cada uno de los recipientes se marcó con la fecha y lugar de muestreo. El equipo utilizado en las pruebas de campo y laboratorio se indica en la Tabla 1. Para el caso de los parámetros de la temperatura, conductividad y el pH se tomaron in situ, y el equipo utilizado aparece en la Tabla VIII. 1.

El análisis de cationes tanto de elementos mayores como de los traza se realizaron en el Instituto de Investigaciones Metalúrgicas de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en el Espectrometro de Masa (ICP-MS), mientras que el análisis de los aniones se mandaron realizar al Instituto Tecnológico Agropecuario # 7 de la ciudad de Morelia, para el caso de los aniones los métodos que se emplearon aparecen en la Tabla VIII. 1.

<b>Parámetro</b>	<b>Equipo</b>
Fisicoquímico (In Situ)	Conductímetro Potenciómetro
Químicos (Cationes)	Espectro de Masas ICP-MS
Químico (Aniones)	Volumetría de Acido Sulfúrico Volumetría de Nitrato de Plata Turbidimetría

**Tabla VIII. 1. Técnica y equipo para análisis de agua**

### **VIII.5.1 Parámetros fisicoquímicos y componentes mayores**

La tabla VIII. 2 muestra las concentraciones obtenidas de los diversos sitios de muestreo.

#### **Temperatura**

Las temperaturas encontradas en estas aguas tuvieron una variación en un rango de 13 a 44.3° C. Las temperaturas mas elevadas se encontraron en los manantiales de Huingo con 44.3° C, Manantiales los Baños con una temperatura de 40.4° C, en el pozo el Salitre con una temperatura de 33.2° C, el pozo de La Estancia con una temperatura de 33.1° C y el manantial La Herradura con 31.3° C. Por el contrario, las menores temperaturas se obtuvieron en los Ríos Queréndaro y Atécuaro con 13° C y 13.9° C respectivamente.

#### **pH**

El pH osciló entre 6.55 y 7.72, el valor mínimo registrado lo encontramos en el Manantial Las Brujas con el valor del pH= 6.55, Mientras que el máximo lo ubicamos en el pozo La Estancia con el valor del pH= 7.72, este rango de concentracion del pH (6.55-7.72) nos indica que los carbonatos disueltos se encuentran predominante en forma de  $\text{HCO}_3^-$  (Snoeyink y Jenkins, 1996).

### **Conductividad Eléctrica**

La conductividad eléctrica varió en un intervalo desde 56.72 hasta 2076  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , obteniéndose los valores más altos en los manantiales de Huingo con un valor de 2076  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , en el pozo el Salitre con un valor de 1305  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , y en el pozo la Lobera y Santa Rita con un valor de 1021 y 998  $\mu\text{S}/\text{cm}$  respectivamente. Las de menor conductividad eléctrica se presentaron en el Manantial el Jaral con 56.72  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , en los ríos Atécuaro y Queréndaro con valores de 81.89 y 189.3  $\mu\text{S}/\text{cm}$  cada uno.

### **Dureza**

La dureza osciló entre 5.92 y 269.41  $\text{mg}/\text{l}$   $\text{CaCO}_3$ , siendo las de mayor concentración la de los pozos Santa Rita y Tarímbaro con valores de 269.41 y 254.35  $\text{mg}/\text{l}$  respectivamente y las de menor concentración en el manantial El Jaral, el Río Atécuaro y manantial los Baños con 5.92, 24.48 y 29.34  $\text{mg}/\text{l}$  respectivamente.

### **Calcio y Magnesio**

La presencia de calcio y magnesio es la causa principal de la dureza en el agua. Las concentraciones de calcio variaron entre 1.67  $\text{mg}/\text{l}$  en el manantial el Jaral y 36.23  $\text{mg}/\text{l}$  en el pozo Irámuco. El Mg se encontró en un rango de 0.14  $\text{mg}/\text{l}$  en el manantial de Los Baños y un valor de 49.58  $\text{mg}/\text{l}$  en el pozo Santa Rita.

### **Sodio y Potasio**

Estos valores contribuyen a la conductividad eléctrica de las aguas. Las concentraciones más elevadas de estos iones las encontramos en los manantiales de Huingo con 347.65  $\text{mg}/\text{l}$  Na y 34.18  $\text{mg}/\text{l}$  K; mientras los valores más bajos fueron los encontrados en el río Atécuaro con 4.94  $\text{mg}/\text{l}$  Na y 2.75  $\text{mg}/\text{l}$  K.

### **Cloruros**

Las concentraciones de cloruros variaron desde 12.43 hasta 514.77  $\text{mg}/\text{l}$ , encontrándose la más elevada en el manantial de Huingo y la de menor concentración en el manantial el Jaral y el pozo Pueblo Nuevo.

### **Sulfatos**

Los sulfatos variaron de 1.24 hasta 81.64 mg/l, encontrando la de menor concentración en el pozo Urundaneo con valor de 1.24 mg/l y la de mayor concentración en el pozo La Lobera con 81.64 mg/l.

### **Bicarbonatos y Carbonatos**

La presencia de bicarbonatos y de carbonatos en el agua se determina a partir de la concentración de la alcalinidad total. Se encontraron valores de bicarbonatos entre 30.5 mg/l en el Manantial el Jaral y el pozo Pueblo Nuevo y de 305 mg/l en el pozo Santa Rita. El valor máximo de carbonatos se obtuvo en el pozo La Lobera con 60 mg/l y los mínimos en los manantiales el Jaral, Acuitzio del Canje, Tanimireche; los ríos Queréndaro y Atécuaro; y los pozos Pueblo Nuevo y Urundaneo, todos ellos con valor de 0 mg/l.

### **Balance Iónico**

Los balances iónicos tuvieron valores distintos, 13 de los 22 análisis superan el 6% de error y las otras 9 están dentro del rango. Esto puede ser debido a diversas causas, siendo las más importantes el que no se analizaron otros parámetros con son los Nitratos y el Flúor. Otra de las causas es debida al mal manejo de las muestras durante su transporte y técnica de muestreo, y por último, a la precisión de los métodos utilizados para la determinación de los elementos mayores. En este trabajo se considera los errores menores al 10% para tener un rango de 17 muestras.

Código	Nombre	X	Y	Z	Fecha M. (dd/mm/aa)	Temp. (°C)	pH	STD (mg/l)	Conduc. (µS/cm)	Dureza T.	Na ppm	Mg ppm	Ca ppm	K ppm	CO3 ppm	HCO3 ppm	Cl ppm	SO4 ppm	B.I. ICP- ITA
1	Pozo Cuaracurio	275226	2219651	1844	03/04/2006	23.80	6.64	385.00	720.80	149.21	97.14	24.46	18.92	15.60	36.00	195.20	56.80	55.66	3.04
2	Pozo La Lobera	284184	2217332	1835	03/04/2006	26.00	6.93	484.00	1021.00	103.71	181.84	10.39	24.16	17.81	60.00	183.00	72.78	81.64	8.80
3	Manantial Las Brujas	290189	2216999	1905	03/04/2006	21.70	6.55	184.00	407.50	163.13	18.89	21.91	28.74	3.95	30.00	122.00	17.75	19.79	3.37
4	Pozo Irámuco	299957	2208682	1830	03/04/2006	25.50	7.00	408.00	694.40	193.00	74.84	24.58	36.23	8.59	18.00	158.60	17.75	32.16	25.33
5	Manantiales de Huingo	306790	2201921	1828	03/04/2006	44.30	6.92	1004.00	2076.00	84.22	347.65	4.68	25.88	34.18	30.00	140.30	514.77	39.58	-2.60
6	Manantial La Herradura	291807	2188315	1889	04/04/2006	31.30	7.37	182.80	380.80	55.13	55.46	4.36	14.78	2.96	30.00	109.80	26.63	11.13	-2.59
7	Pozo Indaparapeo	292687	2190196	1903	04/04/2006	24.50	7.18	265.00	560.30	129.82	70.03	12.25	31.52	10.62	18.00	176.90	26.73	35.87	8.37
8	Manantial EL Jeral	311560	2187630	2347	04/04/2006	22.10	7.02	24.20	56.72	5.92	12.11	0.42	1.67	5.57	0.00	30.50	12.43	28.45	-29.38
9	Pozo Pueblo Nuevo	294272	2186204	2005	05/04/2006	28.90	7.19	182.40	395.10	115.88	42.90	10.01	29.67	3.63	0.00	30.50	12.43	28.45	49.55
10	Río "Quérendaro"	308898	2181884	2576	05/04/2006	13.00	7.45	68.50	189.30	63.91	5.67	5.11	17.05	3.63	0.00	79.30	17.75	3.71	-7.42
11	Pozo Irapeo	283489	2177435	1990	05/04/2006	26.00	7.26	146.50	391.90	130.17	21.45	15.45	26.32	5.91	30.00	152.50	15.98	1.24	-3.77
12	Río Atécuaro	268958	2165445	2200	06/04/2006	13.90	7.29	32.90	81.89	24.48	4.94	1.96	6.52	2.75	0.00	54.90	17.75	2.47	-30.39
13	Manantial Acuitzio del Canje	255521	2157351	2049	06/04/2006	20.60	7.07	97.80	228.20	85.60	10.84	12.06	14.14	6.89	0.00	97.60	30.18	2.47	-2.92
14	Pozo Santiago Uhdameo	259658	2167953	2014	06/04/2006	25.40	7.14	170.60	381.00	135.35	29.89	16.79	26.15	10.38	30.00	170.80	44.38	2.47	-8.85
15	Pozo Urundaneo	250886	2195268	2263	07/04/2006	22.20	7.27	735.00	149.60	51.49	13.40	6.38	9.97	7.75	0.00	91.50	21.30	1.24	-8.00
16	Manantial Tanimireche	250479	2199690	1964	07/04/2006	23.60	7.55	101.40	204.00	79.95	16.55	10.83	13.93	7.16	0.00	109.80	26.63	9.90	-4.83
17	Manantial Los Baños	254632	2200391	1890	07/04/2006	40.40	7.52	224.00	577.00	29.34	98.41	0.14	11.50	3.68	18.00	146.40	71.00	38.35	-7.78
18	Pozo El Salitre	257508	2201668	1848	07/04/2006	33.20	7.34	553.00	1305.00	145.46	210.01	14.13	34.63	19.79	42.00	176.90	248.50	43.29	1.41
19	Pozo Sta. Rita	261934	2202938	1862	07/04/2006	28.90	7.39	460.00	998.00	269.41	121.08	49.58	25.13	14.03	42.00	305.00	71.00	27.21	10.24
20	Pozo La Estancia	258992	2210406	1836	07/04/2006	33.10	7.72	259.00	621.00	65.12	101.99	4.68	18.25	6.23	36.00	128.10	49.70	23.50	6.39
21	Pozo Capacho	264728	2210072	1860	07/04/2006	28.90	7.45	273.00	604.00	78.57	105.44	2.96	26.49	6.53	30.00	158.60	71.00	19.71	2.55
22	Pozo Tarímbaro	272492	2190247	1878	07/04/2006	22.80	7.13	384.00	747.00	254.35	42.67	44.92	26.87	8.99	36.00	195.20	58.58	12.37	6.42
					Máximo	44.30	7.72	1004.00	2076.00	269.41	347.65	49.58	36.23	34.18	60.00	305.00	514.77	81.64	
					Mínimo	13.00	6.55	24.20	56.72	5.92	4.94	0.14	1.67	2.75	0.00	30.50	12.43	1.24	

Tabla VIII. 2. Parámetros Físicoquímicos y componentes mayores

### **VIII.5.2. Concentración Traza**

La Tabla VIII. 3 muestra las concentraciones traza.

#### **Litio**

Las concentraciones de litio oscilaron entre  $0.908 \times 10^{-3}$  mg/l encontrada en el manantial Las Brujas y 2.566 mg/l obtenido en el manantial de Huingo. En algunos estudios (Pelig-Ba, 1998) se ha observado un incremento de la concentración de Li de acuerdo al valor de pH y de la temperatura, además de la influencia que ejerce la geología local (Pelig-Ba, 1998).

#### **Aluminio**

El aluminio varió de 0 mg/l en el manantial La Herradura y el pozo Santiago Undameo, hasta una concentración de 1.15 mg/l en el manantial el Jaral. La norma nos dice que este metal está excedido para el manantial El Jaral 5 veces el límite (0.20 mg/l).

#### **Titanio**

Las mayores concentraciones de este metal las encontramos en el manantial Tanimireche con un valor de  $31.14 \times 10^{-3}$  mg/l y la mínima concentración la tenemos en el Río Queréndaro con  $3.24 \times 10^{-3}$  mg/l. Este metal no lo tiene contemplado la Norma Oficial Mexicana (DOF, 1994).

#### **Cromo**

Las concentraciones del cromo encontradas en los muestreos no sobrepasan la Norma Oficial Mexicana (DOF, 1994); encontrándose la mayor concentración en el pozo Tarímbaro con  $6.12 \times 10^{-3}$  mg/l y la menor concentración  $0.26 \times 10^{-3}$  mg/l localizada en el manantial el Jaral.

#### **Manganeso**

La mayor concentración la encontramos en el pozo Santiago Undameo con un valor de  $187.01 \times 10^{-3}$  mg/l, el cual sobrepasa los límites permisibles para consumo humano, la norma nos indica que debe de ser inferior a  $150 \times 10^{-3}$  mg/l.

### **Hierro**

Las concentraciones del Hierro oscilaron entre 0.06 mg/l para el pozo Urundaneo y 0.44 mg/l para el pozo Cuaracurio. Los lugares que sobre pasaron el limite máximo permitido de 0.30 mg/l fueron el pozo Cuaracurio, La Lobera, y los manantiales de Acuitzio del Canje y de Tanimireche.

### **Niquel**

Los niveles más bajos de este metal lo encontramos en el pozo Urundaneo con 0 Mg/l, mientras que el valor más alto lo encontramos en el pozo el Salitre con un valor de  $2.83 \times 10^{-3}$  mg/l.

### **Cobre**

Las concentraciones del cobre no sobrepasaron los limites establecidos por la Norma Oficial Mexicana (DOF, 1994). Estos valores se mantuvieron en un rango de  $3.44 \times 10^{-4}$  mg/l a  $21.06 \times 10^{-3}$  mg/l. La menor concentración se encontró en el Río Queréndaro y la mayor se observó en el pozo El Salitre.

### **Cinc**

Los valores del cinc fluctuaron entre 0 mg/l observado en pozo Cuaracurio y el río Queréndaro hasta  $22.36 \times 10^{-3}$  mg/l en el manantial Las Brujas. Ninguna de las concentraciones observadas sobrepasó el límite máximo permisible que indica la Norma Oficial Mexicana (DOF, 1994).

### **Arsénico**

Las concentraciones del arsénico oscilaron entre  $1.28 \times 10^{-4}$  mg/l para el río Atécuaro hasta 2.84 mg/l para el manantial de Huingo. Cabe destacar que en el manantial de Huingo sobrepasa 56 veces el límite máximo permisible establecido por la Norma Oficial Mexicana (DOF, 1994), cuyo valor máximo es de 0.05 mg/l.

### **Cadmio**

Las concentraciones de cadmio no sobrepasaron los límites establecidos por la Norma Oficial Mexicana (DOF, 1994). Estos valores se mantuvieron en un rango de  $4 \times 10^{-5}$  mg/l a  $1.08 \times 10^{-3}$  mg/l. La menor concentración se encontró en el manantial de Acuitzio del Canje y el pozo Tarímbaro y la mayor se observó en el pozo Indaparapeo.

### **Plomo**

Este elemento suele encontrarse en las aguas subterráneas en concentraciones muy bajas. En este estudio las concentraciones estuvieron por debajo de la Norma Oficial Mexicana, siendo la concentración más elevada la del manantial Los Baños con  $5.28 \times 10^{-3}$  mg/l, mientras que la menor se observó en el pozo Cuaracurio, el manantial La Herradura y el pozo Tarímbaro con 0 mg/l.

Código	Nombre	X	Y	Z	Fecha M. (dd/mm/aa)	Li ppb	Al ppb	Ti ppb	Cr ppb	Mn ppb	Fe ppm	Ni ppb	Cu ppb	Zn ppb	As ppb	Cd ppb	Pb ppb
1	Pozo Cuaracurio	275226	2219651	1844	03/04/2006	69.219	7.715	7.280	0.889	2.585	0.444	1.030	1.060	0.000	8.351	0.061	0.000
2	Pozo La Lobera	284184	2217332	1835	03/04/2006	199.534	6.933	10.667	3.608	21.022	0.429	1.989	5.217	9.419	9.438	0.176	3.793
3	Manantial Las Brujas	290189	2216999	1905	03/04/2006	0.908	13.393	5.589	2.026	1.856	0.150	2.046	4.291	22.355	0.319	0.329	1.327
4	Pozo Irámuco	299957	2208682	1830	03/04/2006	14.948	2.539	7.301	2.618	0.425	0.148	1.927	2.924	3.586	6.797	0.099	0.701
5	Manantiales de Huingo	306790	2201921	1828	03/04/2006	2566.317	4.208	15.248	0.574	0.693	0.139	1.248	1.356	2.515	2839.307	0.228	2.881
6	Manantial La Herradura	291807	2188315	1889	04/04/2006	11.089	0.000	4.955	0.896	0.181	0.081	0.383	3.867	1.863	21.080	0.161	0.000
7	Pozo Indaparapeo	292687	2190196	1903	04/04/2006	14.000	4.040	7.567	2.010	1.182	0.207	1.931	3.803	4.335	25.400	1.084	0.571
8	Manantial EL Jaraí	311560	2187630	2347	04/04/2006	9.009	1150.378	21.000	0.259	2.098	0.219	0.736	16.774	17.401	0.935	0.099	0.050
9	Pozo Pueblo Nuevo	294272	2186204	2005	05/04/2006	8.919	2.973	5.866	1.041	0.691	0.150	1.421	7.918	4.985	3.594	0.220	0.410
10	Río "Quérendaro"	308898	2181884	2576	05/04/2006	1.315	6.503	3.236	0.273	0.920	0.131	0.435	0.344	0.000	0.344	0.182	0.081
11	Pozo Irapeo	283489	2177435	1990	05/04/2006	6.838	8.653	7.169	2.557	0.561	0.120	1.293	17.385	16.323	1.885	0.291	1.684
12	Río Atécuaro	268958	2165445	2200	06/04/2006	1.198	19.866	4.684	0.903	1.856	0.128	0.491	1.768	2.543	0.128	0.147	2.121
13	Manantial Acuitzio del Canje	255521	2157351	2049	06/04/2006	1.903	161.371	10.693	2.306	1.440	0.302	1.641	1.581	2.517	0.584	0.040	0.070
14	Pozo Santiago Uhdameo	259658	2167953	2014	06/04/2006	14.959	0.000	7.233	2.072	187.013	0.227	1.381	3.611	10.755	6.986	0.109	0.039
15	Pozo Urundaneo	250886	2195268	2263	07/04/2006	3.393	7.898	7.888	0.300	1.622	0.060	0.000	14.555	14.465	1.261	0.140	0.671
16	Manantial Tanimireche	250479	2199690	1964	07/04/2006	2.225	949.790	31.141	2.640	1.889	0.405	0.989	5.063	8.554	0.672	0.188	0.732
17	Manantial Los Baños	254632	2200391	1890	07/04/2006	94.717	11.993	6.261	4.014	0.589	0.090	0.709	12.163	18.764	15.279	0.419	5.283
18	Pozo El Salitre	257508	2201668	1848	07/04/2006	85.681	11.517	9.205	3.265	66.503	0.197	2.832	21.066	11.566	7.770	0.305	2.144
19	Pozo Sta. Rita	261934	2202938	1862	07/04/2006	25.165	12.179	11.193	4.670	0.532	0.138	1.537	3.557	6.119	1.823	0.207	0.709
20	Pozo La Estancia	258992	2210406	1836	07/04/2006	87.118	6.229	3.527	3.054	0.462	0.100	0.965	9.384	11.755	7.857	0.241	0.864
21	Pozo Capacho	264728	2210072	1860	07/04/2006	78.493	13.195	5.080	4.607	0.827	0.151	1.794	8.014	9.354	26.218	0.161	1.472
22	Pozo Tarimbaro	272492	2190247	1878	07/04/2006	16.321	0.682	6.420	6.119	0.241	0.130	1.123	0.411	0.191	2.137	0.040	0.000
					Máximo	2566.317	1150.378	31.141	6.119	187.013	0.444	2.832	21.066	22.355	2839.307	1.084	5.283
					Mínimo	0.908	0.000	3.236	0.259	0.181	0.060	0.000	0.344	0.000	0.128	0.040	0.000

Tabla VIII. 3. Parámetros químicos de las concentraciones traza

## VIII.6. Caracterización del agua subterránea

Como se había mencionado anteriormente en el balance iónico, decíamos que solamente nueve de las veintidós muestras analizadas estaban dentro del error permisible pero que se había cambiado ese rango de error de 6% al 10%. Para tener un total de 17 muestras.

La figura VIII. 3 muestra la localización de los diferentes tipos de aguas subterráneas se clasifican en forma gráfica sobre su composición química (Figura VIII. 4). La clasificación de acuerdo al ión dominante consiste en nombrar al agua por el anión o catión que sobrepasa el 50% de sus sumas respectivas; si ninguno supera el 50% se nombran los más abundantes (Deutsch, 1997; Domenico y Schwartz, 1998). Los tipos de agua encontrados de las 17 muestras son las siguientes, la primera de ellas es Bicarbonatada Sódica ( $\text{HCO}_3^-$ -Na) encontrada en el pozo Cuaracurio, Manantial la Herradura, pozo Indaparapeo, pozo Capacho, pozo La Estancia, pozo la Lobera y manantial Los Baños; el segundo tipo de agua es la Bicarbonatada Magnésica Cálcida ( $\text{HCO}_3^-$ - $\text{Mg}^{2+}$ - $\text{Ca}^{2+}$ ) encontrada en los manantiales Las Brujas, Acuitzio del Canje; el tercer tipo de agua es Bicarbonatada Cálcida Magnésica ( $\text{HCO}_3^-$ - $\text{Ca}^{2+}$ - $\text{Mg}^{2+}$ ) localizada en el pozo Irapeo, el cuarto tipo de agua caracterizada es Bicarbonatada Sódica Magnésica ( $\text{HCO}_3^-$ - $\text{Na}^+$ - $\text{Mg}^{2+}$ ) encontrada en el pozo Urundaneo, Santiago Undameo y el manantial Tanimireche; el quinto tipo de agua es la Bicarbonatada Cálcida ( $\text{HCO}_3^-$ - $\text{Ca}^{2+}$ ) ubicada en el Río Queréndaro; el sexto tipo de agua es la Bicarbonatada Magnésica ( $\text{HCO}_3^-$ - $\text{Mg}^{2+}$ ) ubicada en el pozo Tarímbaro; y el séptimo tipo de agua es la Sódica Clorurada ( $\text{Na}^+$ - $\text{Cl}^-$ ) localizada en el manantial Huingo y el pozo el Salitre.

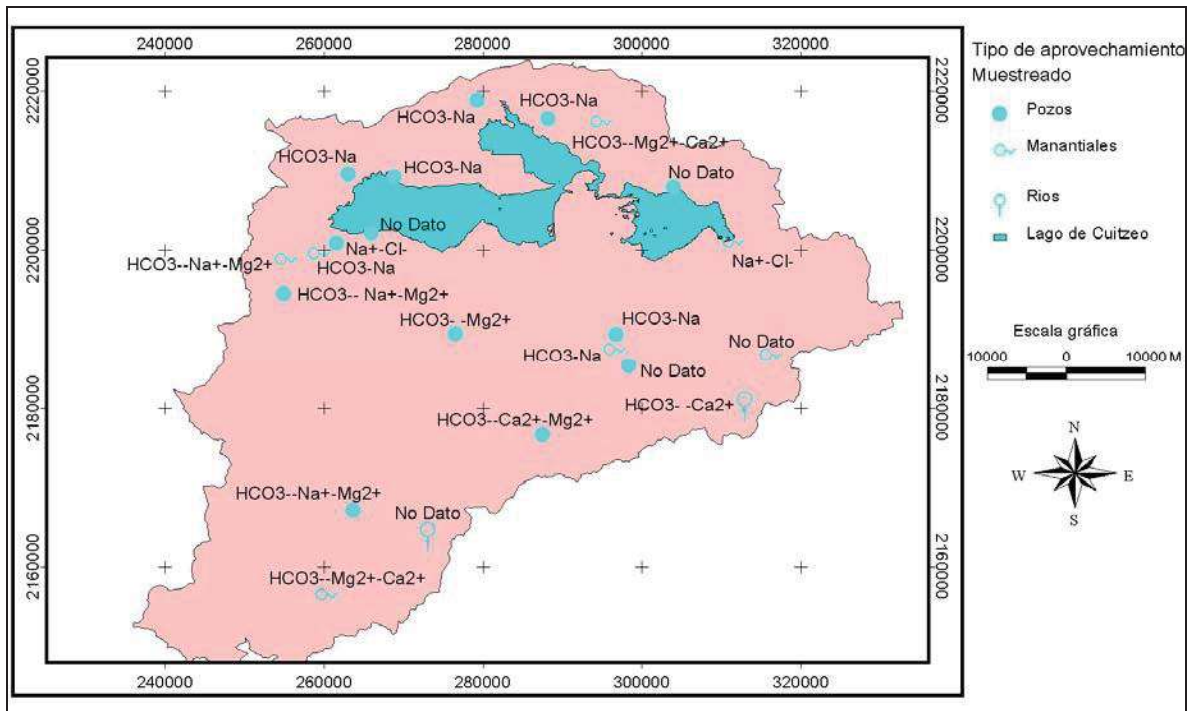
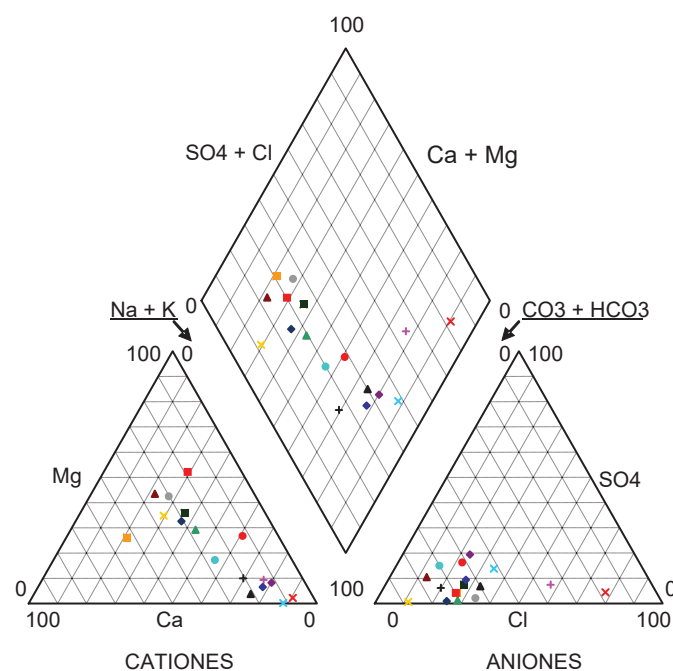


Figura VIII. 3. Ubicación y clasificación de los diferentes tipos de agua encontrados

## DIAGRAMA DE PIPER

Muestreo Cuenca Cuitzeo (Abril/06)



• Pozo Cuaracurio	◆ Pozo La Lobera
▲ Manantial Las Brujas	× Manantiales de Huingo
+ Manantial La Herradura	● Pozo Indaparapeo
■ Río "Queréndaro"	× Pozo Irapeo
● Manantial Acuitzio del Canje	◆ Pozo Santiago Undameo
▲ Pozo Urundaneo	■ Manantial Tanimireche
× Manantial Los Baños	+ Pozo El Salitre
◆ Pozo La Estancia	▲ Pozo Capacho
■ Pozo Tarímbaro	

Figura VIII. 4. Diagrama de Piper de los tipos de agua encontrados

### VIII.7. Conclusiones

Los resultados obtenidos indican que en general las muestras de agua analizadas son de buena calidad excepto en algunos lugares donde se sobrepasó la Norma Oficial Mexicana (DOF, 1994). Tal es el caso del manantial del Jaral en el aluminio, el pozo Santiago Undameo en el caso del manganeso, y los lugares que sobrepasaron el límite máximo permitido de 0.30 mg/l de Hierro fueron el pozo Cuaracurio, La Lobera, y los manantiales

de Acuitzio del Canje y de Tanimireche. El manantial de Huingo sobrepasó 56 veces el valor máximo permisible del arsénico.

Comparando los tipos de agua encontrados en este estudio con los análisis realizados por Cedillo et al, 1983 se observa que existen relaciones entre el tipo de agua y las zonas de muestreo, por lo que se sugiere que las principales zonas de recarga de los acuíferos ocurren en las parte sur de la Cuenca del Lago de Cuitzeo, relacionándose los tipos de agua bicarbonatadas con poco tiempo de residencia en el acuífero y/o recorrido corto; otro tipo de agua encontrada es la clorurada, la cual es proporcionada por el acuífero profundo y/o con mayor tiempo de residencia en el mismo. En este estudio no se encontraron aguas de origen sulfatadas que sugieran aportación de un acuífero intermedio, pero en el realizado por Cedillo et al., 1983 este tipo de aguas las encontramos en la planicie sur del Lago de Cuitzeo y específicamente por la zona donde descargan los drenes de Queréndaro, Joconol y Zacapendo, además de los lugares mencionados, también se encuentran aguas de origen sulfatado en las zonas de San Juan Tarameo y Mariano Escobedo.

## **IX.- ANALISIS DE PIEZOMETRÍAS**

### **IX.1. Metodología**

El análisis de la piezometría del valle Morelia-Querendaro y la planicie de Álvaro Obregón, se hizo con base en un acopio de la información relativa a los niveles estáticos y a su localización, información que se obtuvo de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), y de los registros piezométricos del Organismo Operador de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de la Ciudad de Morelia, asimismo de algunos trabajos realizados dentro del área de estudio.

El nivel estático dentro la cuenca del Lago de Cuitzeo tiene gran importancia porque con base en el se logra conocer el abatimiento que registra el agua subterránea y en este trabajo se analizan los registros piezométricos de los años 1990, 2001 y 2002. A pesar de que en estudios anteriores se tiene información piezométrica, dicha información no cuenta con una base de datos con la ubicación de los pozos censados y sus respectivas coordenadas y/o elevación del brocal.

### **IX.2. Análisis de los niveles estáticos para el año 1990**

En la Figura IX. 1 se observan el nivel estático del agua para el año de 1990 en el cual están marcadas de mayor a menor con colores del Rojo, Anaranjado, Amarillo y Verde y con diferencia de 5m entre curvas del nivel estático. Las curvas muestran una tendencia de valores con mayor elevación hacia el SW, en esta figura se han marcado las direcciones del flujo con flechas de color negro. Para este año se aprecia que el nivel estático del agua presenta el nivel mas bajo en la planicie lacustre comprendida desde Tarímbaro hasta Queréndaro en la que observamos una elevación del nivel estático del agua de 1825 m, lo que refleja que el nivel estático del agua se encontraba en un valor promedio de 15 m de profundidad, dicho valor es medido desde la superficie del terreno natural hasta la profundidad del nivel del agua. Además, de la representación del nivel estático del agua en planta se realizaron tres perfiles que ayudan a entender mejor su comportamiento.

El perfil 1-1' (Figura IX. 2) tiene una dirección SO-NE, en este perfil apreciamos que el nivel estático del agua disminuye en la misma dirección que el perfil, es decir de SO al NE

y en la ciudad de Morelia el nivel estático del agua presenta un pequeño cono de abatimiento de alrededor de 30 m de profundidad. Al noreste de la falla de Tarímbaro se observa a una profundidad de 20 m otro pequeño cono de abatimiento de alrededor de 5 m. Por otra parte, no se observa ningún cambio significativo en el nivel estático dentro de la planicie Tarímbaro-Queréndaro.

El perfil 2-2' representado por la Figura IX. 3, tiene dirección de sur a norte y una longitud de 49 km. Se observa que la dirección del flujo ocurre de sur a norte, con la principal aportación de recarga del acuífero en la Sierra de Mil Cumbres.

El perfil 3-3' (Figura IX. 4) tiene dirección S-N, se inicia al pie de la caldera de Atécuaro y cruzando la Cd. de Morelia hasta llegar al Lago de Cuitzeo. Dentro de la ciudad de Morelia observamos que se presenta un pequeño cono de abatimiento de cerca de 20 m de profundidad, al norte del cono se aprecia en el perfil que el nivel del agua disminuye con un gradiente casi constante hasta alcanzar un valor de 1820 msnm hasta llegar al Lago de Cuitzeo.

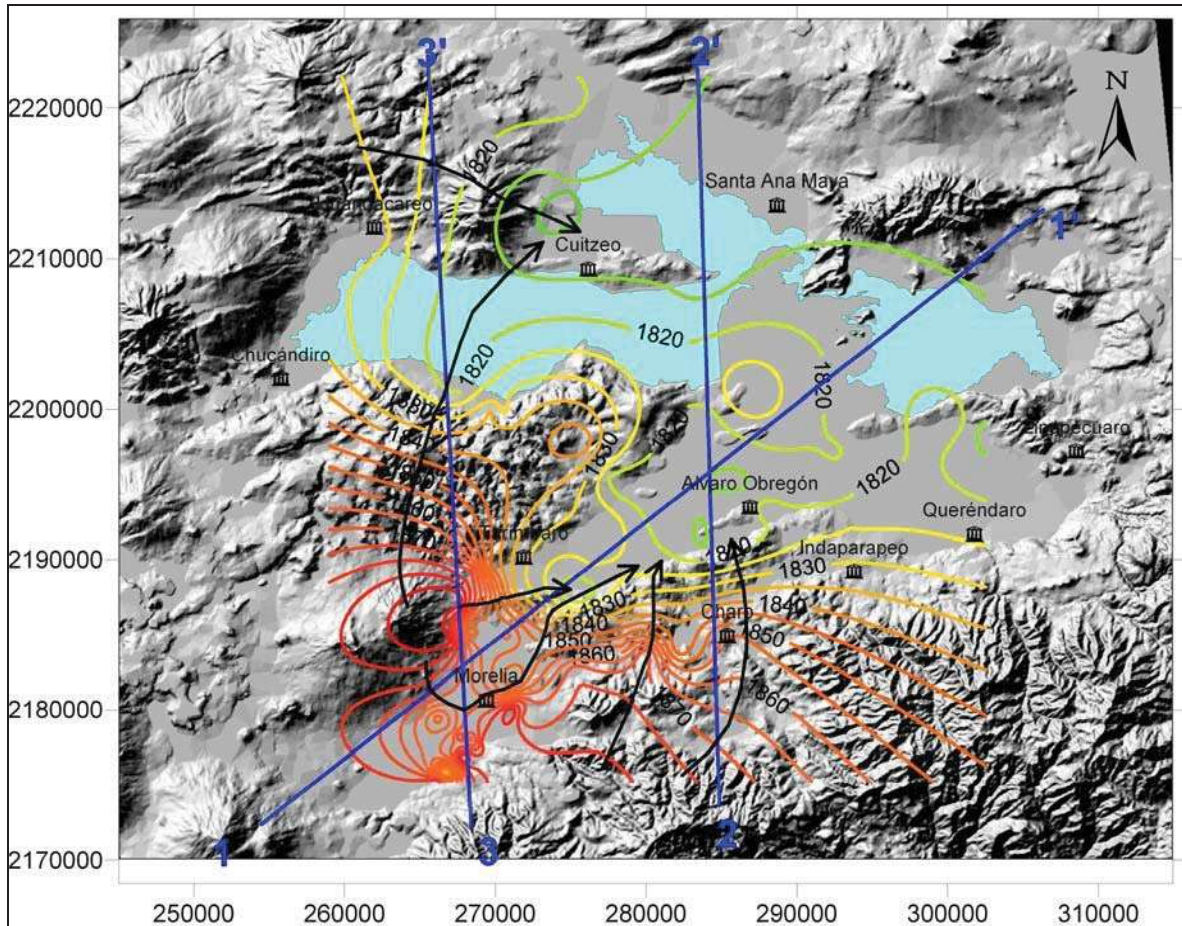


Figura IX. 1. Nivel estático para el año 1990

Fuente: Datos tomados de la CONAGUA

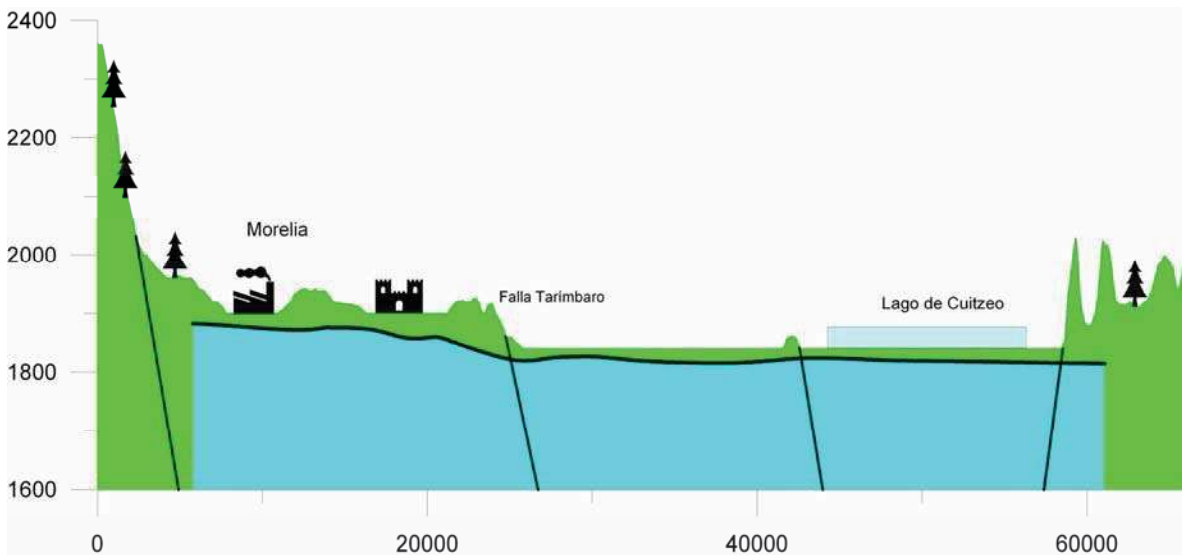


Figura IX. 2. Nivel estático para el año 1990, perfil 1-1'

Fuente: Datos tomados de la CONAGUA

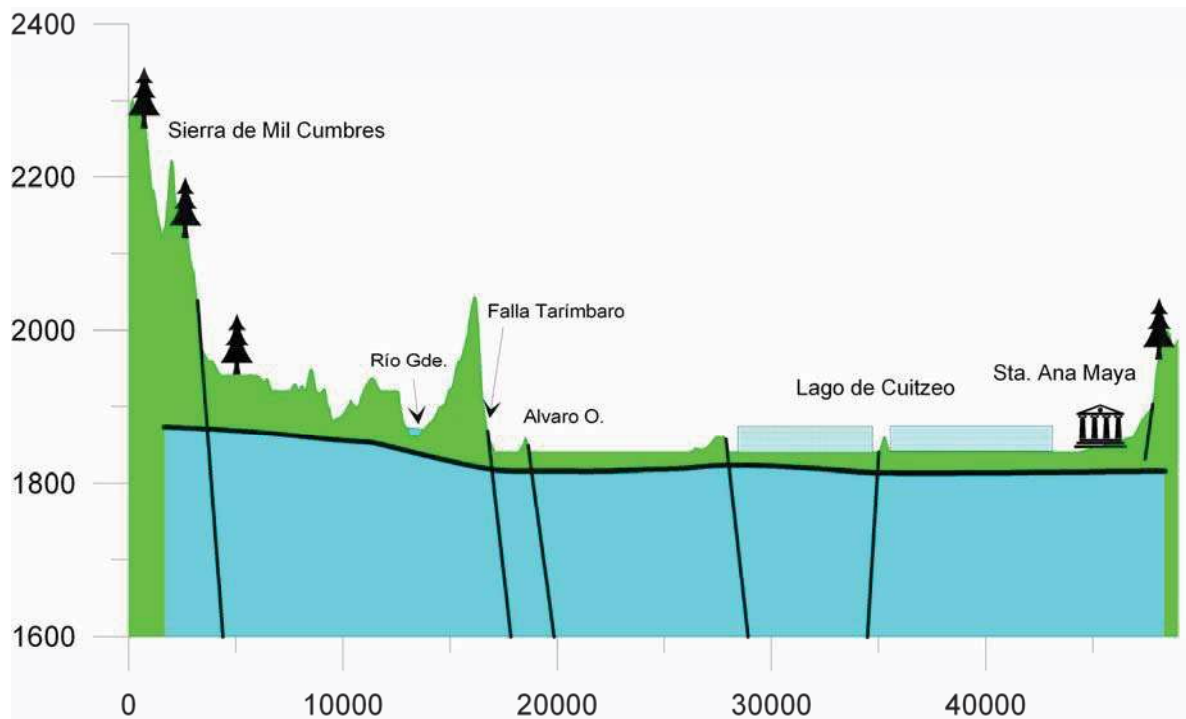


Figura IX. 3. Nivel estático para el año 1990, perfil 2-2'

Fuente: Datos tomados de la CONAGUA

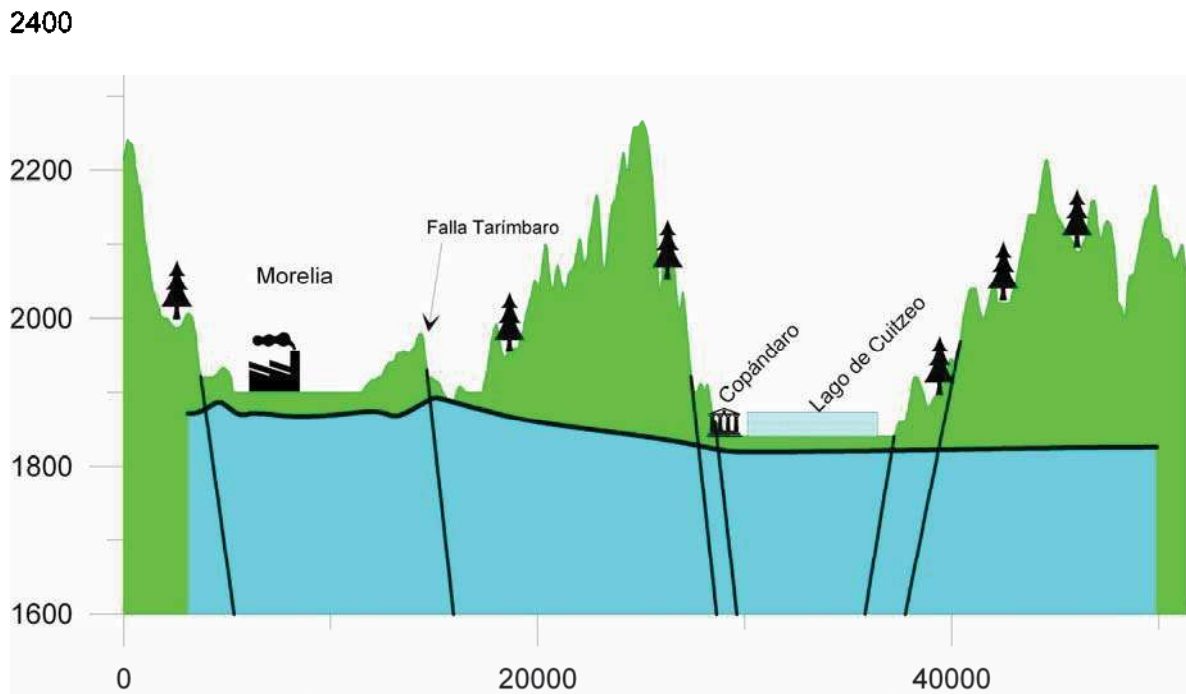


Figura IX. 4. Nivel estático para el año 1990, perfil 3-3'

Fuente: Datos tomados de la CONAGUA

### **IX.3. Análisis de los niveles estáticos en el mes de mayo de 2001**

En la Figura IX. 5 se muestra la configuración del nivel estático de 61 pozos en el año 2001, medidos en el mes de mayo y graficados e interpolados con el programa *Surfer*, en esta figura se marcaron las direcciones preferenciales del flujo (líneas de color negro) observándose la intercepción del nivel estático del agua dentro de la ciudad de Morelia, donde se aprecia como las curvas isovalor son interceptadas por los diversos pozos de extracción. Además se observa que la dirección preferencial del flujo tiene tendencias hacia el NE y NO, esta última dirección es determinada por la Sierra de Mil Cumbres, que actúa como zona de recarga al acuífero.

Se describirá el comportamiento del nivel piezométrico de los mismos 3 perfiles analizados para el año de 1990.

El Perfil 1-1' (Figura IX. 6) tiene una longitud de 65 km y una dirección SO-NE, pasa por la ciudad de Morelia y es justamente dentro de la ciudad donde se manifiesta un cono de abatimiento de 20 m con una profundidad del cono de 50 m. Al noreste del posterior al cono de abatimiento se mantiene el nivel estático del agua con un decremento gradual hasta un a valor de 1830 msnm.

El Perfil 2-2' (Figura IX. 7) nos indica que la dirección del flujo ocurre desde la parte sur del área de estudio hacia la parte norte, específicamente la zona de recarga ocurre en la Sierra de Mil Cumbres y la de descarga está localizada hacia el poblado de Santa Ana Maya.

En el perfil 3-3' (Figura IX. 8) observamos el cono de abatimiento descrito en el perfil 1-1', dicho cono está ubicado dentro de la ciudad de Morelia excepto que para este perfil no se marca de igual forma que en el perfil 1-1', debido a que este pasa por un costado del cono de abatimiento. A unos 20 km al noreste del cono de abatimiento en el perfil encontramos otro pequeño cono de abatimiento en la ribera del Lago de Cuitzeo, muy cercano al poblado de Copándaro, el cual presenta un desnivel de aproximadamente 5 m con respecto al nivel general.

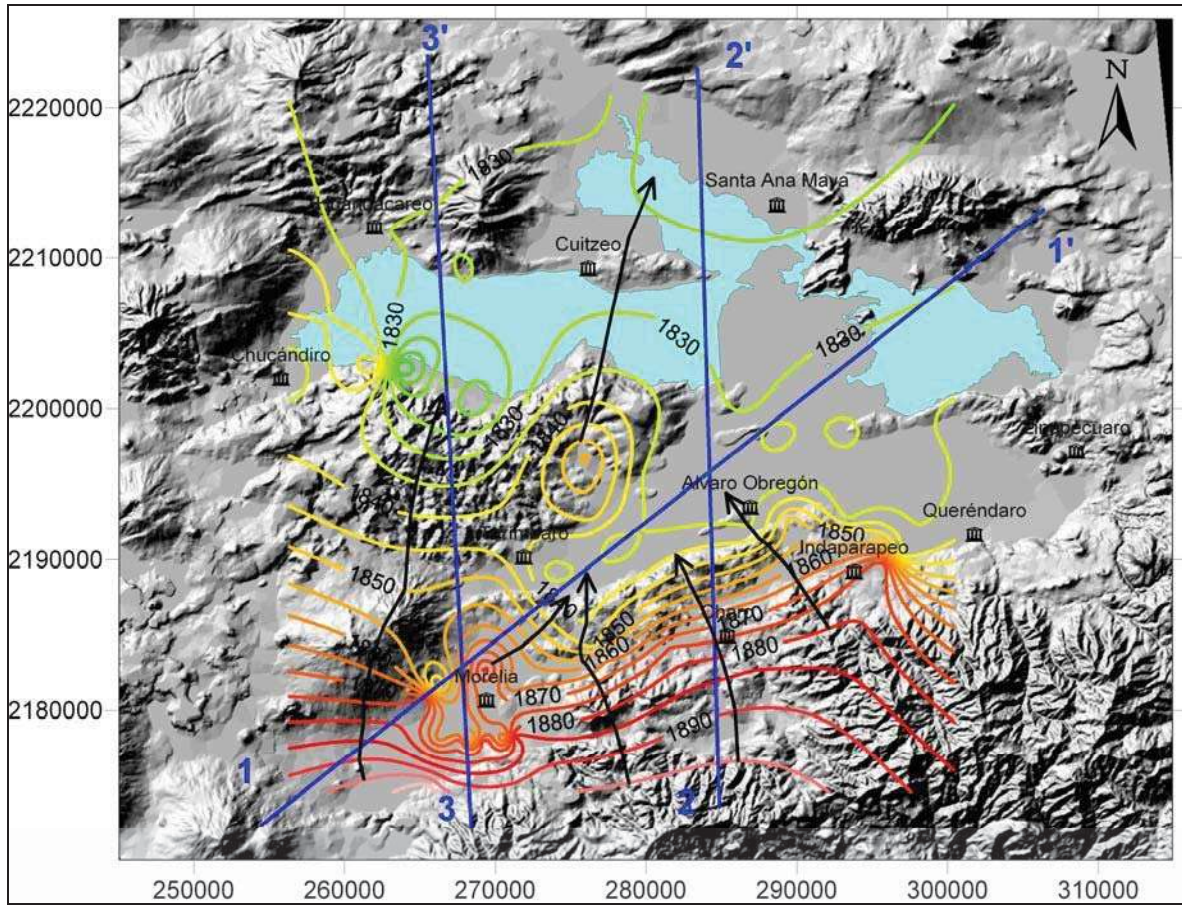


Figura IX. 5. Nivel estático para el mes de mayo del año 2001

Fuente: Datos tomados de la CONAGUA

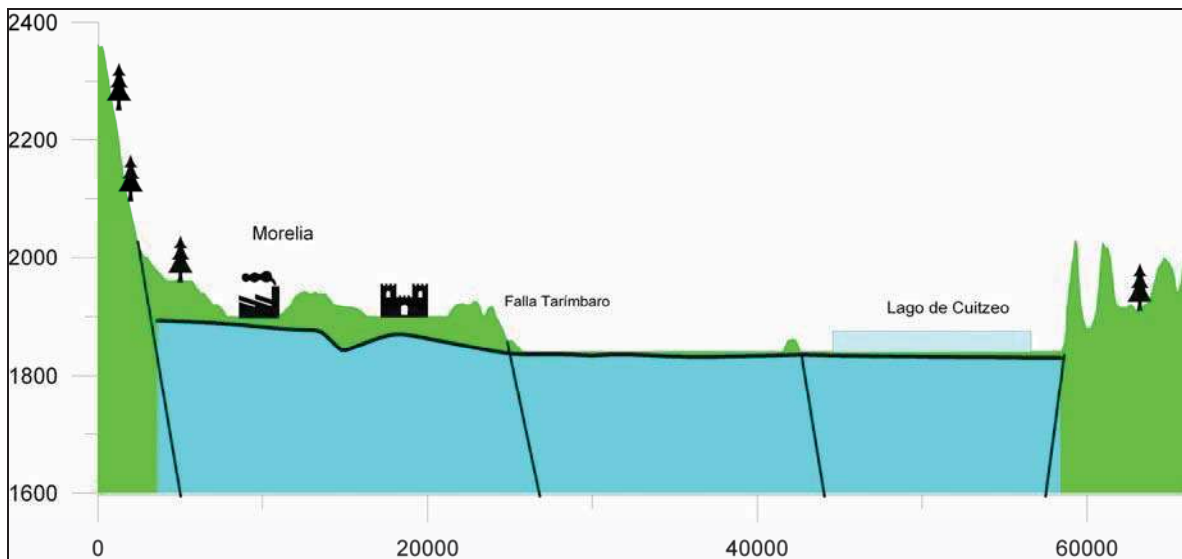


Figura IX. 6. Nivel estático para el mes de mayo del año 2001, perfil 1-1'

Fuente: Datos tomados de la CONAGUA

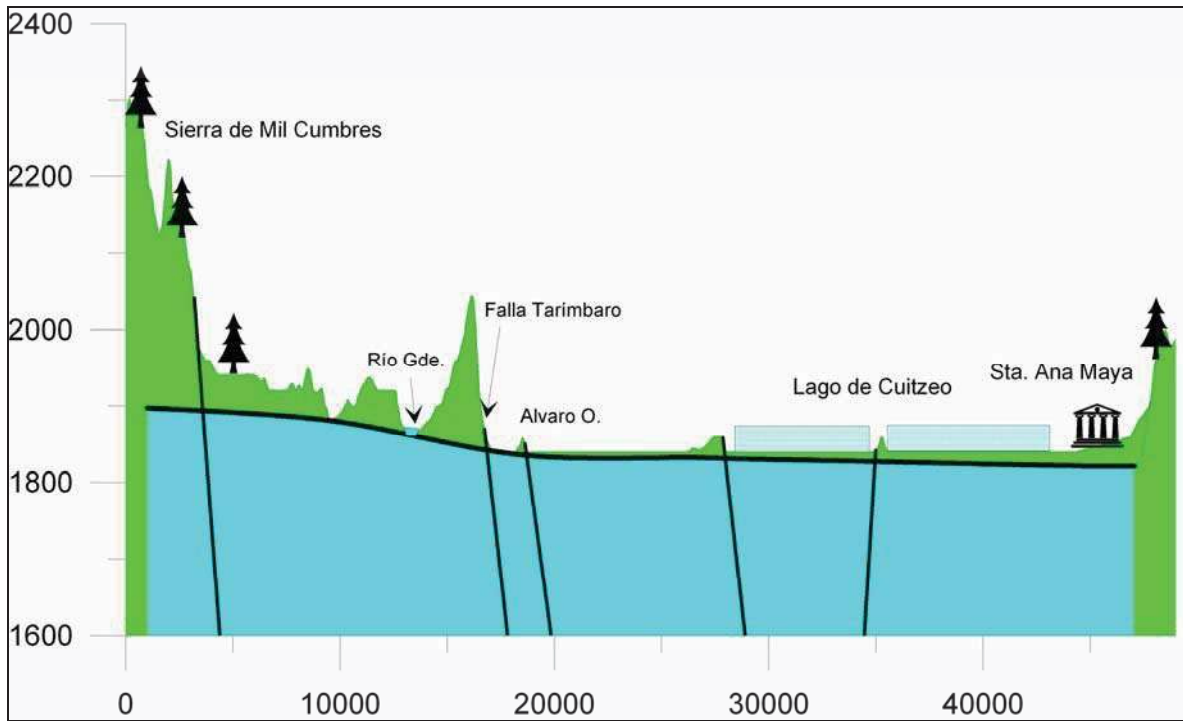


Figura IX. 7. Nivel estático para el mes de mayo del año 2001, perfil 2-2'

Fuente: Datos tomados de la CONAGUA

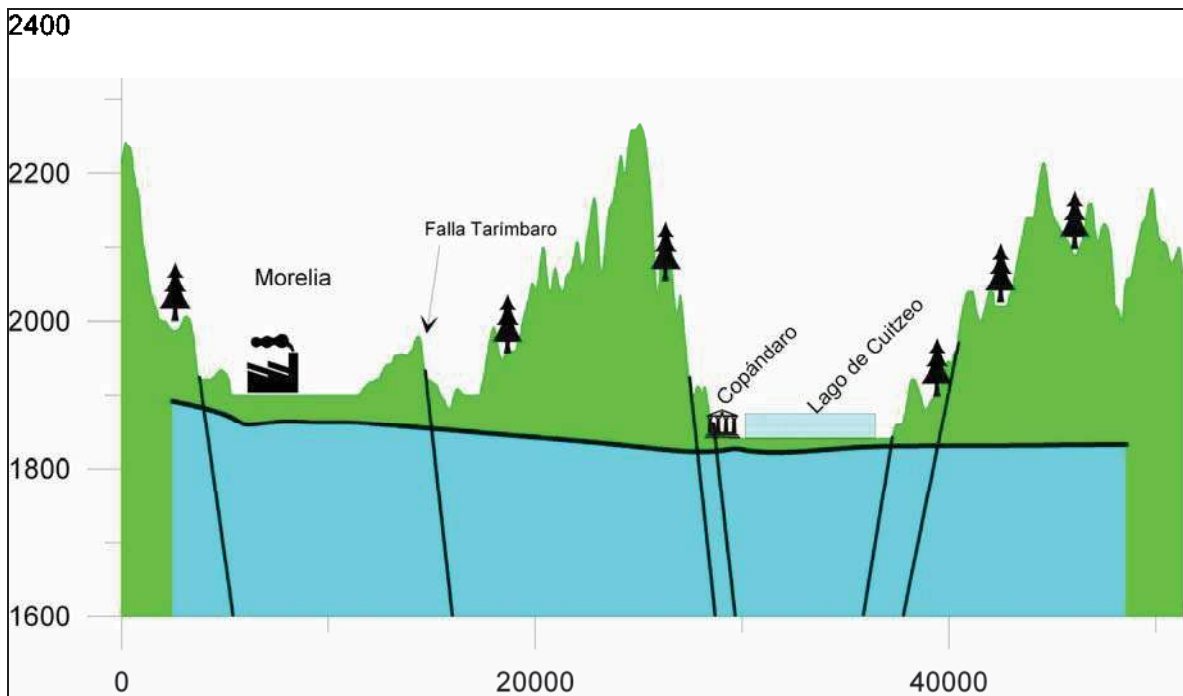


Figura IX. 8. Nivel estático para el mes de mayo del año 2001, perfil 3-3'

Fuente: Datos tomados de la CONAGUA

#### **IX.4. Análisis de los niveles estáticos del mes de noviembre de 2001**

En noviembre de 2001 se midieron los niveles estáticos de 66 pozos dentro de la cuenca del Lago de Cuitzeo (Figura IX. 9). De forma general el flujo ocurre en dos direcciones principales, la primera de ellas con dirección SO a NE que se localiza en toda el área de la ciudad de Morelia hasta el municipio de Tarímbaro, la otra componente de la dirección del flujo ocurre de SE a NO recibiendo la principal aportación de la Sierra de Mil Cumbre, ambas direcciones concurren hacia el Lago de Cuitzeo.

El perfil 1-1' (Figura IX. 10), de igual forma que sus similares para los años descritos anteriormente, nos indica que la dirección del flujo subterráneo es desde el SO hacia el NE, con la diferencia de que en este perfil desaparece el cono de abatimiento local que estaba localizado en la ciudad de Morelia.

El perfil 2-2' (Figura IX. 11) muestra que la dirección del flujo ocurre de Sur a Norte. En él se presenta un cono de abatimiento ubicado en Santa Ana Maya en el área de descarga.

En el perfil 3-3' (Figura IX. 12) se observa un cono de abatimiento dentro de la ciudad de Morelia el cual parece estar ocurriendo en la intercepción del nivel estático del agua. Parece afectar la recarga y de continuar en un futuro acabara con los manantiales de los que se sirve para abastecer de agua potable a cerca del 50% de la población de Morelia.

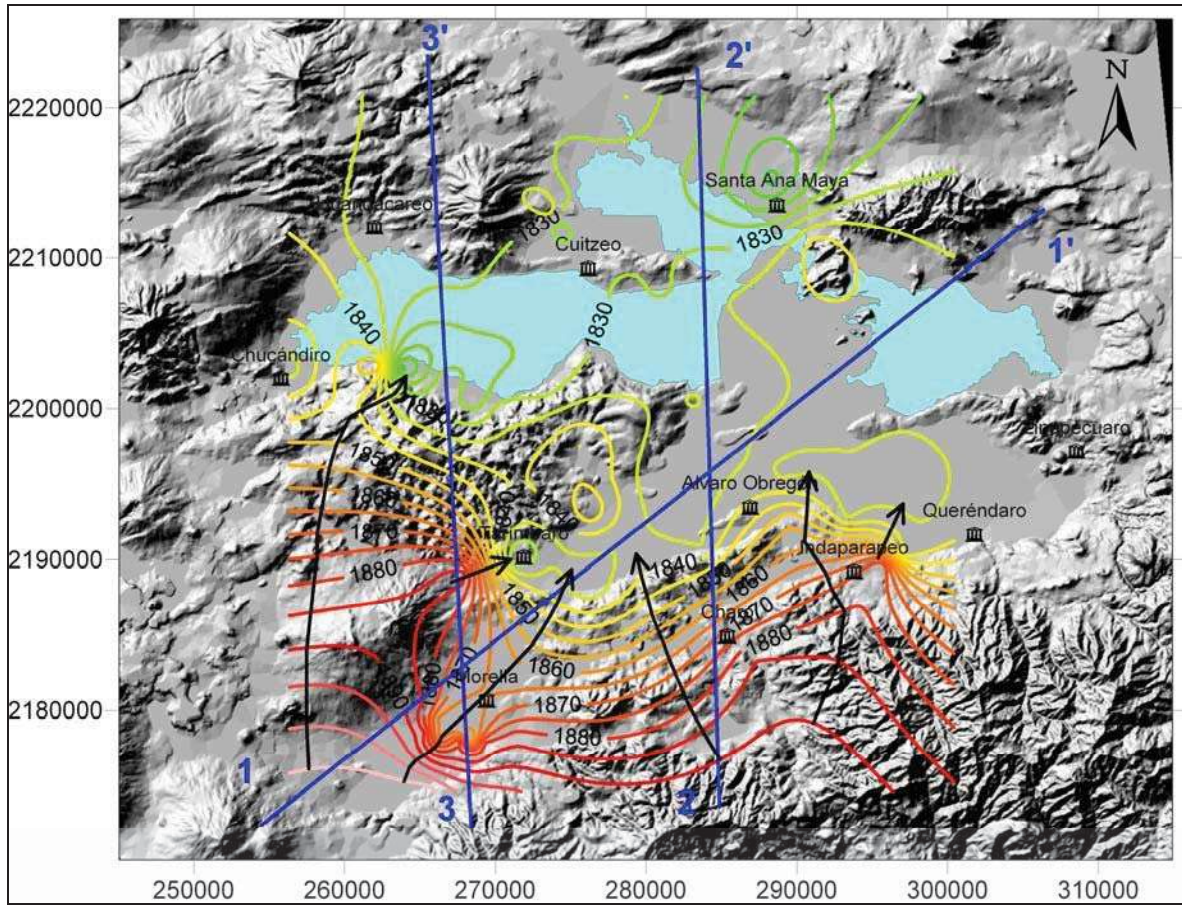


Figura IX. 9. Nivel estático para el mes de noviembre del año 2001

Fuente: Datos tomados de la CONAGUA

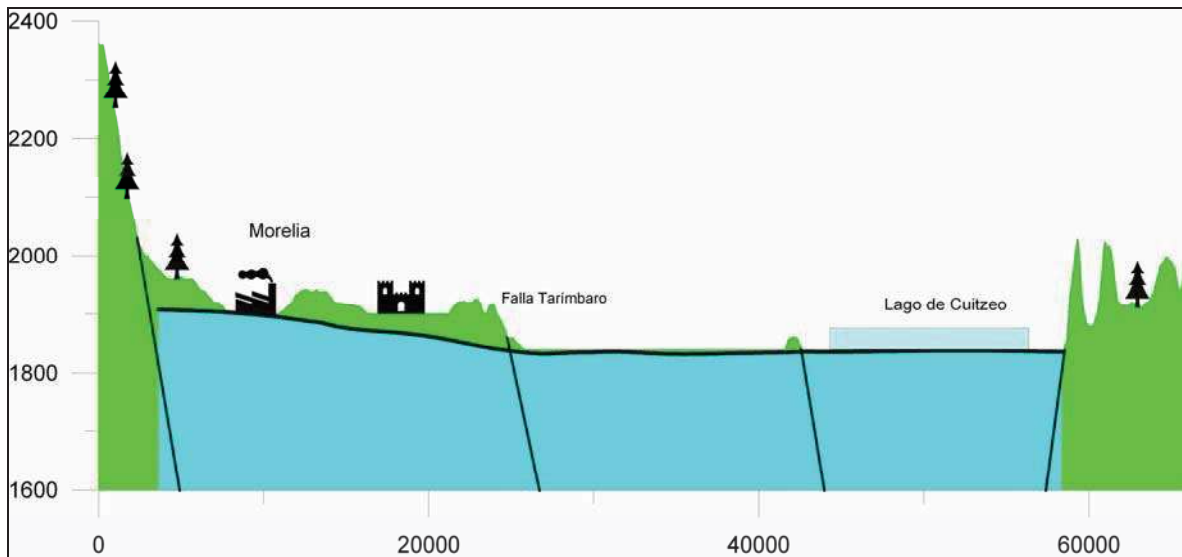


Figura IX. 10. Nivel estático para el mes de noviembre del año 2001, perfil 1-1'

Fuente: Datos tomados de la CONAGUA

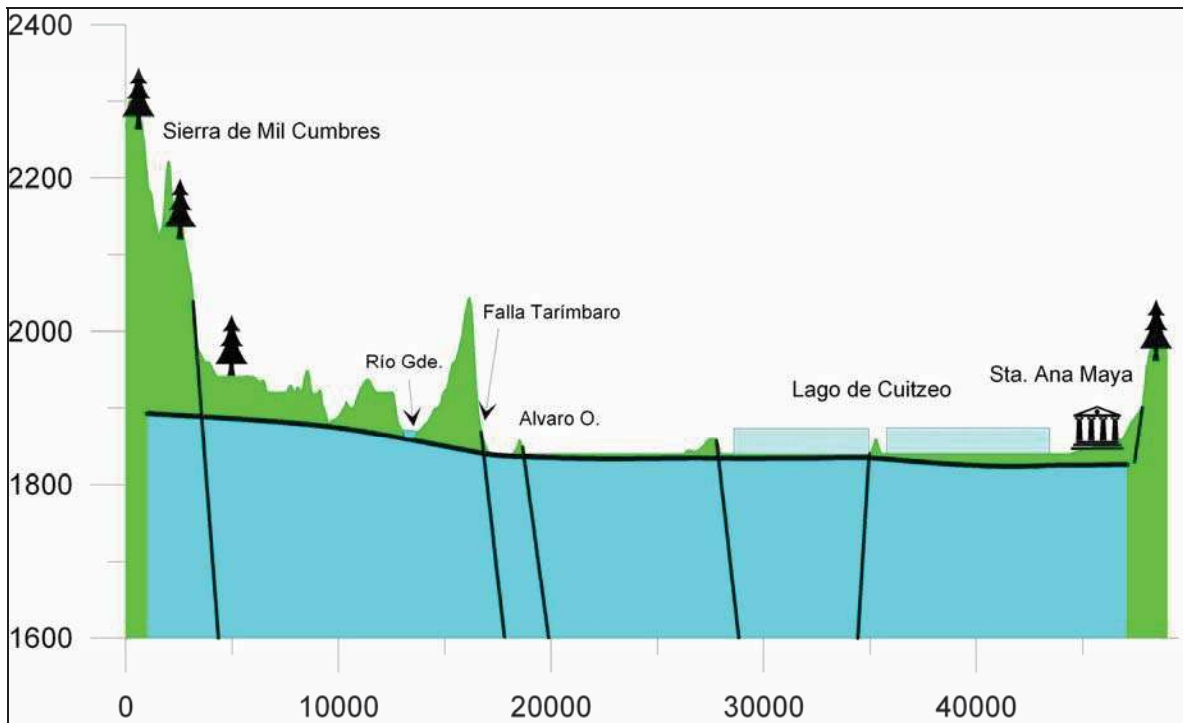


Figura IX. 11. Nivel estático para el mes de noviembre del año 2001, perfil 2-2'

Fuente: Datos tomados de la CONAGUA

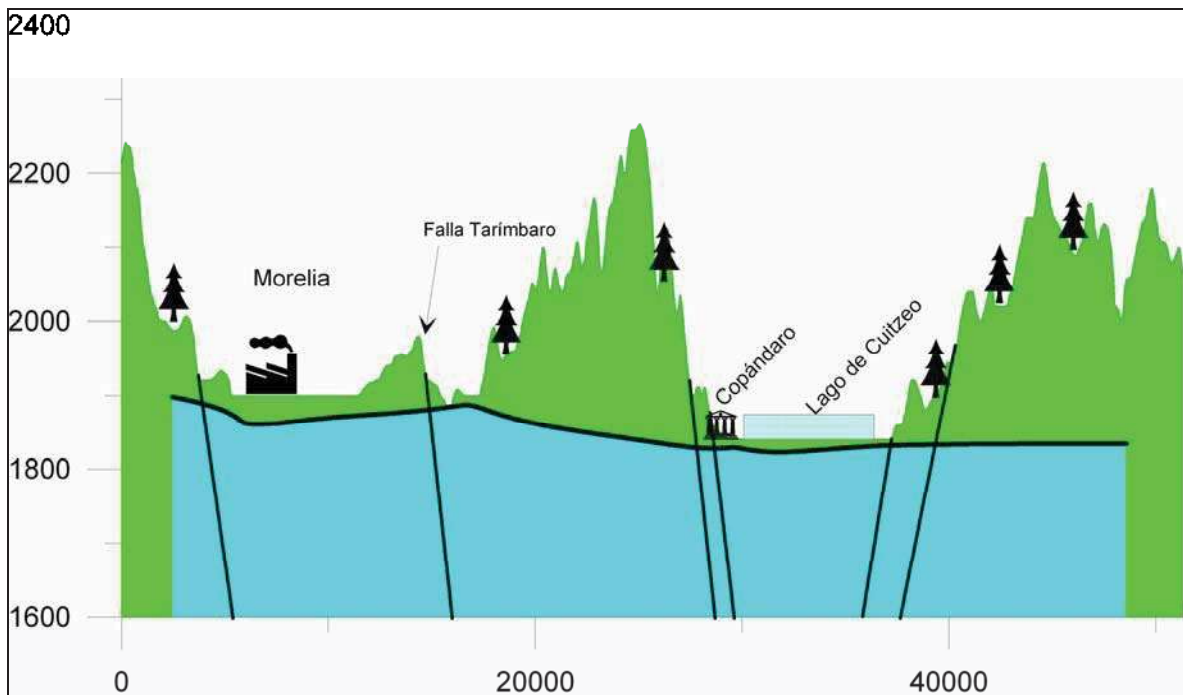


Figura IX. 12. Nivel estático para el mes de noviembre del año 2001, perfil 3-3'

Fuente: Datos tomados de la CONAGUA

## **IX.5. Análisis de los niveles estáticos del mes de mayo de 2002**

En mayo de 2002 se registraron nuevamente los niveles estáticos dentro de la cuenca del Lago de Cuitzeo en un total de 43 pozos los cuales se graficaron con sus respectivos valores de los niveles estáticos (Figura IX. 13). Por falta de información del nivel estático en algunos pozos no se aprecian las tendencias regionales hacia la zona este (Zinapécuaro, Irámuco, Queréndaro, Indaparapeo).

El perfil 1-1' (Figura IX. 14) no es relevante debido a la falta de información, pero confirma que se mantiene la tendencia del flujo de agua subterránea.

El perfil 2-2' de la Figura IX. 15 nos muestra que el nivel estático del agua mantiene su gradiente normal sin afectación local por extracción. Mientras que el perfil 3-3' de la Figura IX. 16 nos indica que dentro de la ciudad de Morelia se mantiene una intercepción del flujo de agua subterránea lo que provoca que las curvas del nivel de agua (Figura IX. 13) se junten más hacia la zona sur de la ciudad.

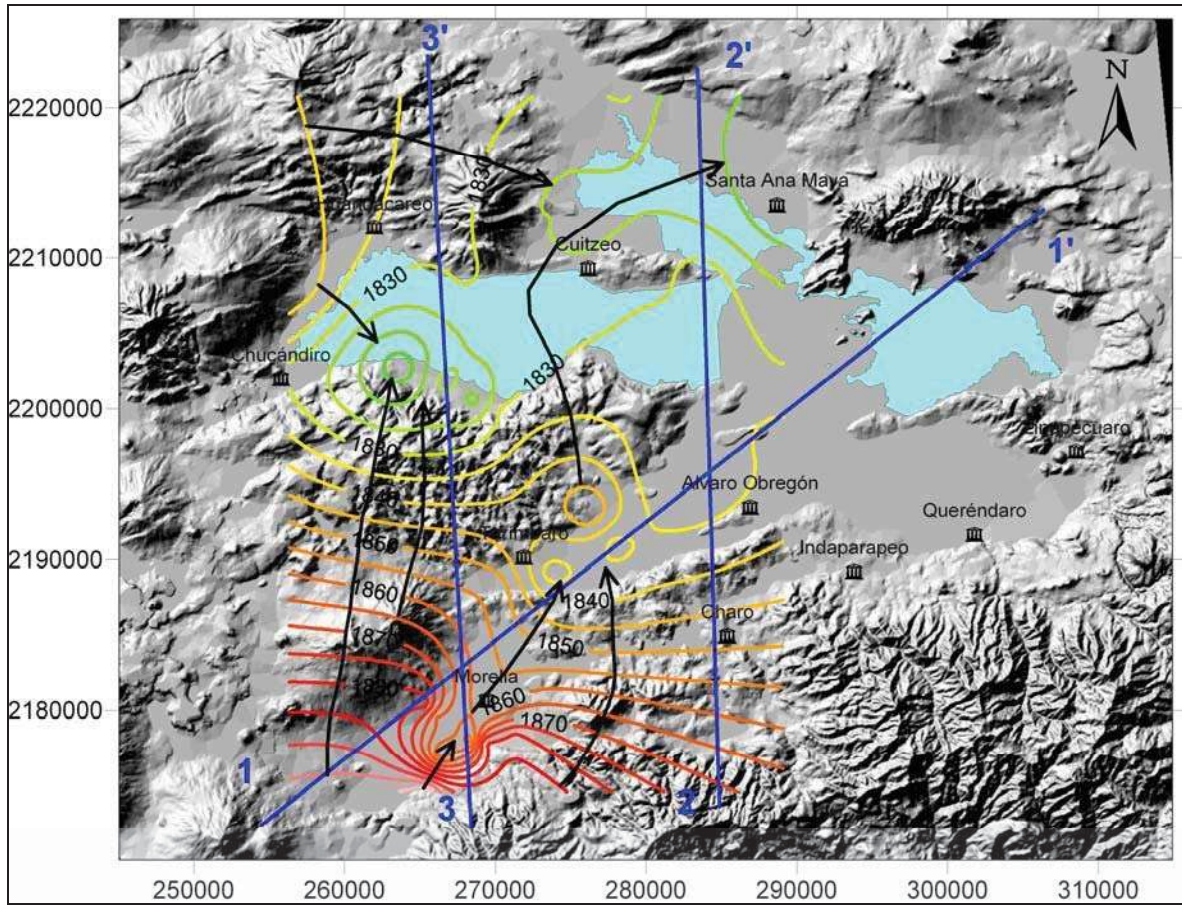


Figura IX. 13. Nivel estático para el mes de mayo del año 2002

Fuente: Datos tomados de la CONAGUA

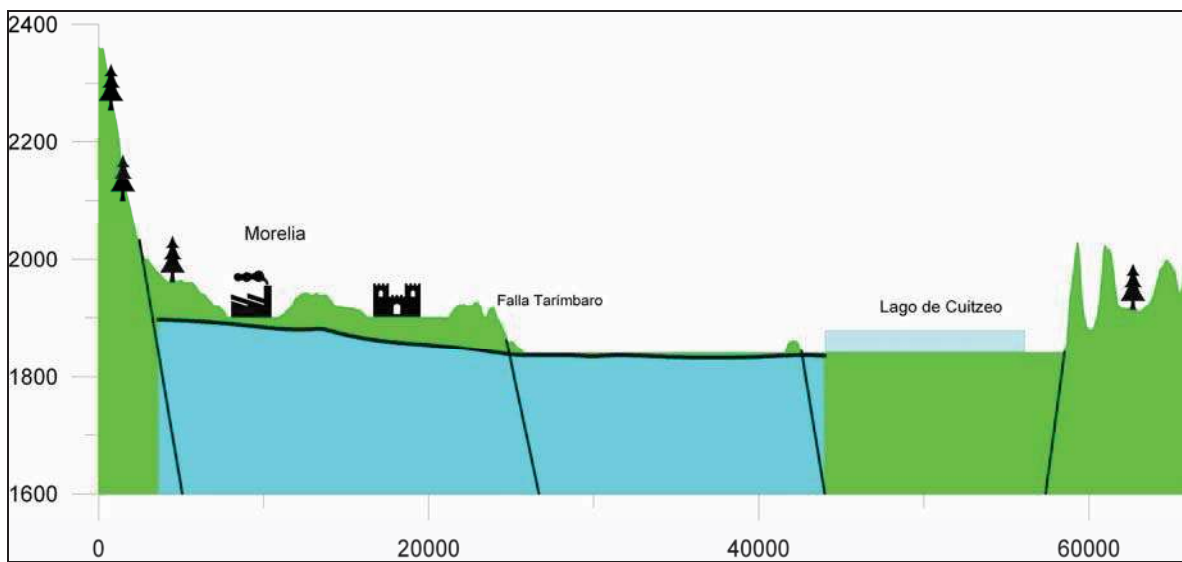


Figura IX. 14. Nivel estático para el mes de mayo del año 2002, perfil 1-1'

Fuente: Datos tomados de la CONAGUA

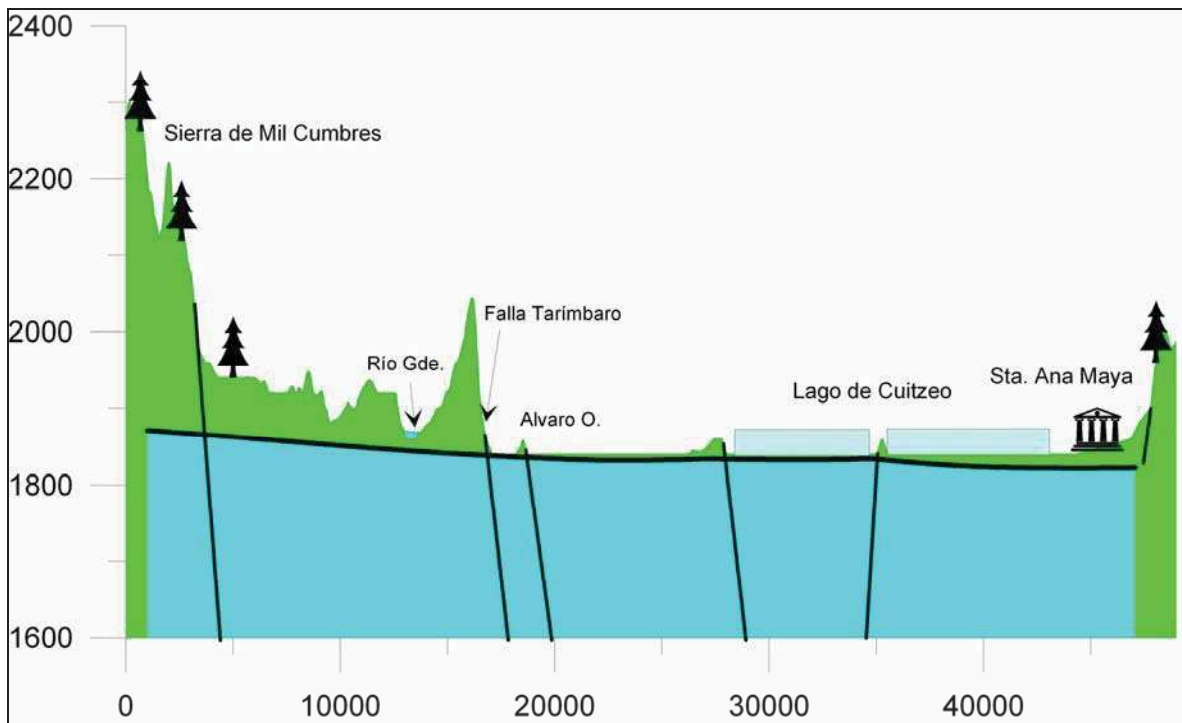


Figura IX. 15. Nivel estático para el mes de mayo del año 2002, perfil 2-2'

Fuente: Datos tomados de la CONAGUA

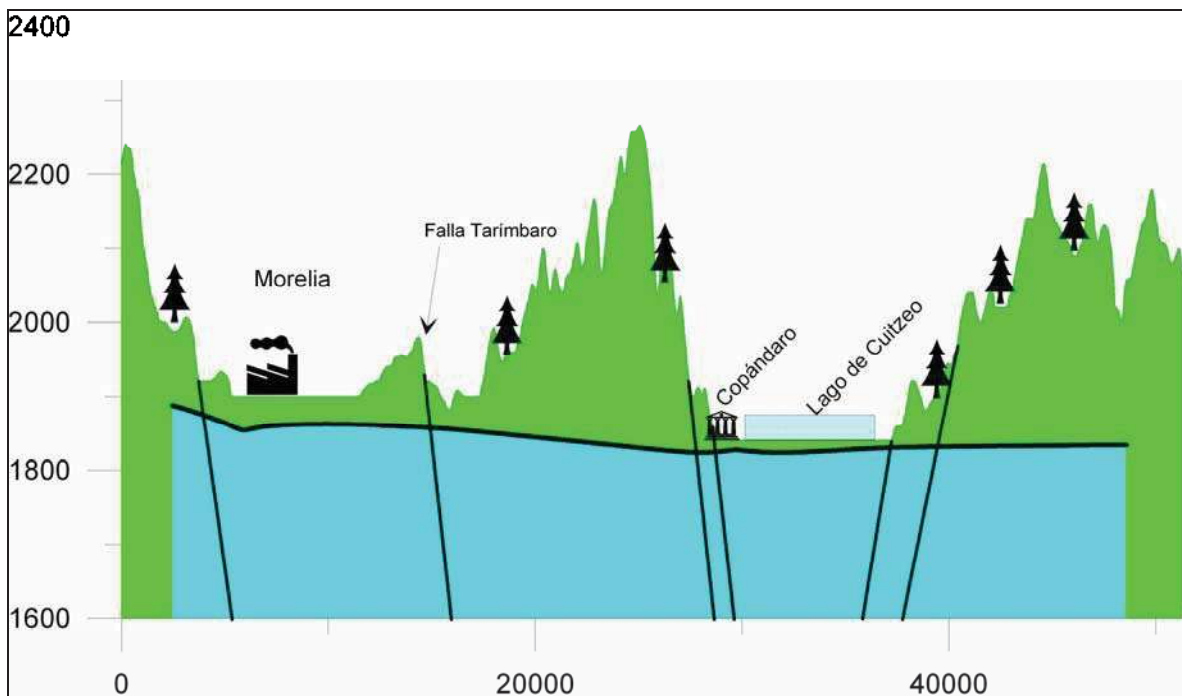


Figura IX. 16. Nivel estático para el mes de mayo del año 2002, perfil 3-3'

Fuente: Datos tomados de la CONAGUA

## IX.6. Análisis de los niveles estáticos del mes de diciembre de 2002

En el mes de Diciembre se tomaron las lecturas del nivel estático dentro de la cuenca en un total de 61 pozos, en la Figura IX. 17 se observa la configuración de dicho nivel, haciendo el análisis de igual forma que en los años anteriores.

En el perfil 1-1' (Figura IX. 18) persiste la dirección del flujo de agua subterránea que nos indica que esta va en dirección NE. En el perfil 2-2' (Figura IX. 19) se mantiene de la misma forma la dirección del nivel estático del agua por lo que la recarga ocurre en la Sierra de Mil Cumbres. El perfil 3-3' está diferenciado de alguna manera porque se logra apreciar que las líneas de isovalor son interceptadas por los pozos de extracción de la ciudad de Morelia (Figura IX. 20).

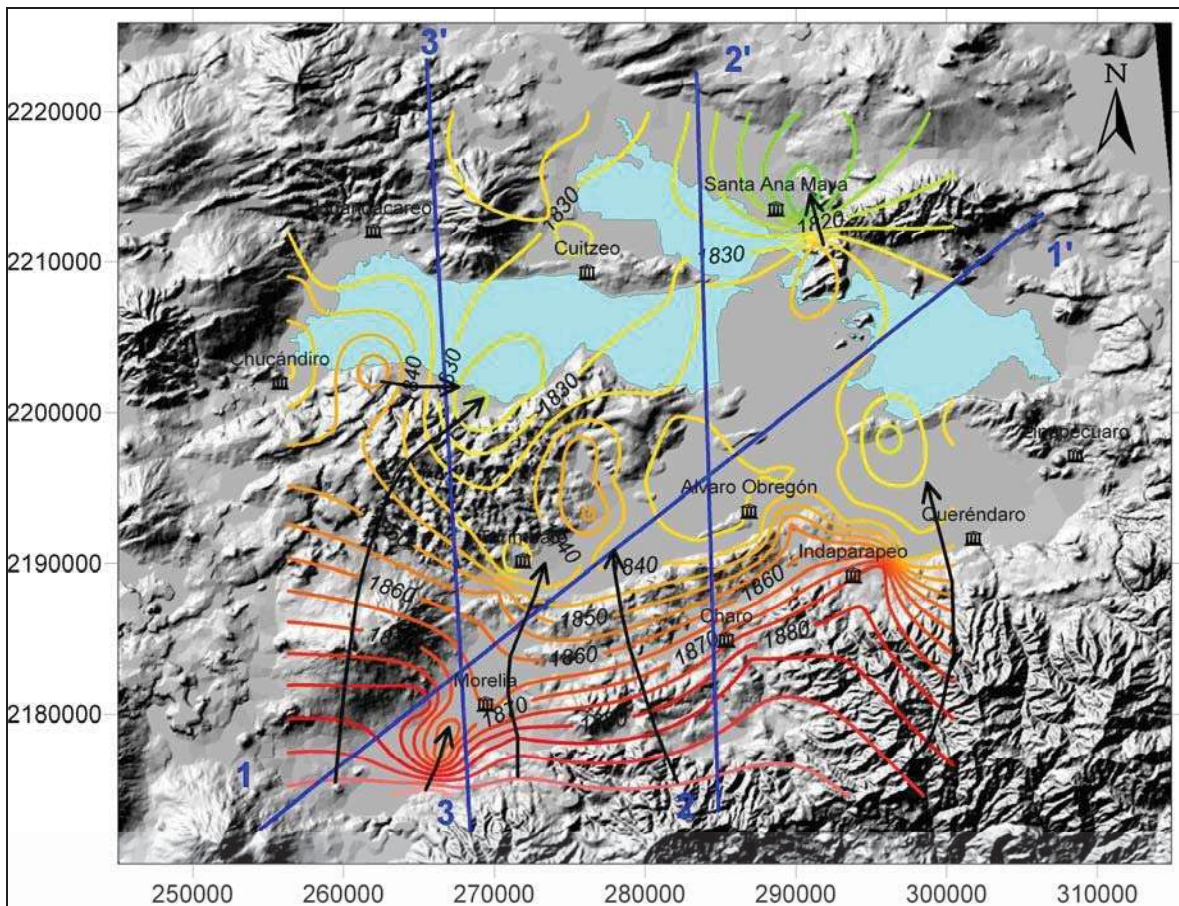


Figura IX. 17. Nivel estático para el mes de diciembre del año 2002

Fuente: Datos tomados de la CONAGUA

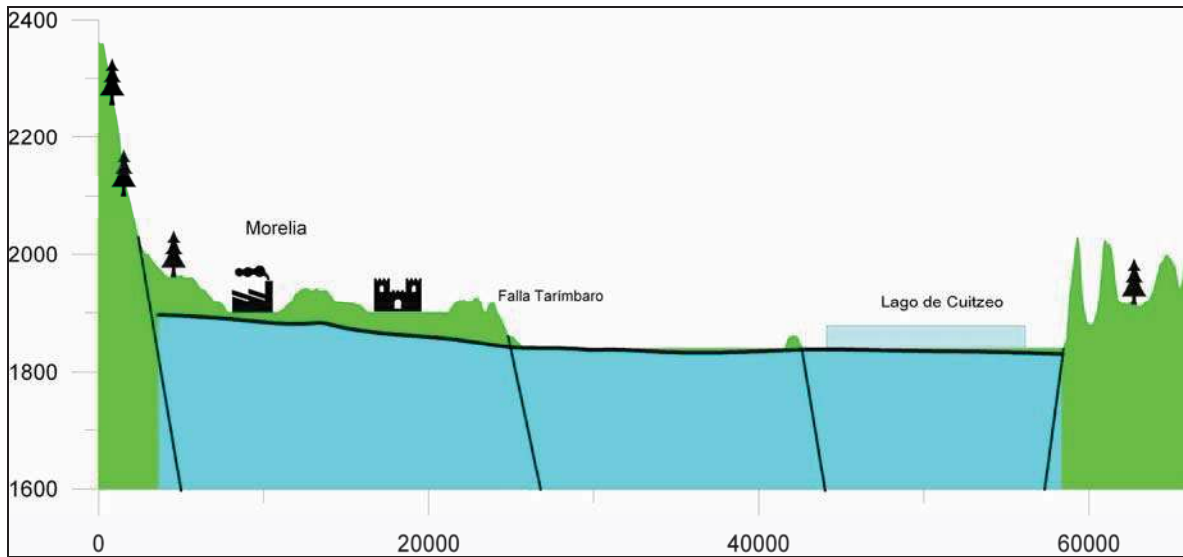


Figura IX. 18. Nivel estático para el mes de diciembre del año 2002, perfil 1-1'

Fuente: Datos tomados de la CONAGUA

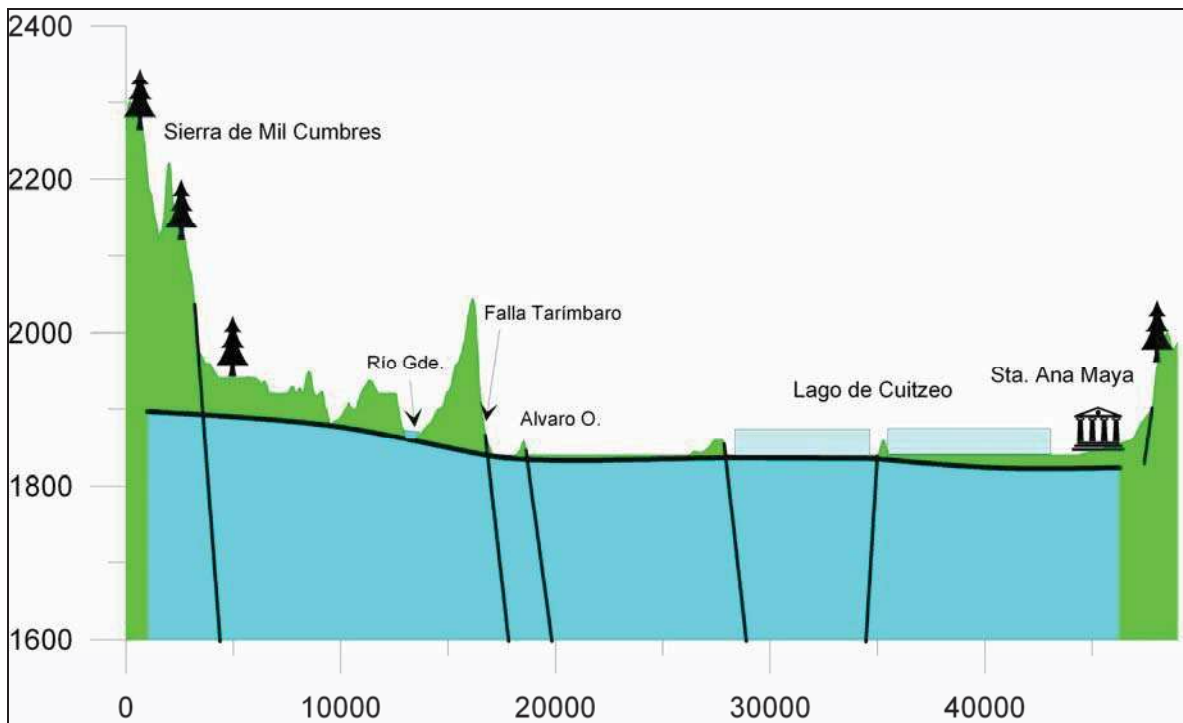


Figura IX. 19. Nivel estático para el mes de diciembre del año 2002, perfil 2-2'

Fuente: Datos tomados de la CONAGUA

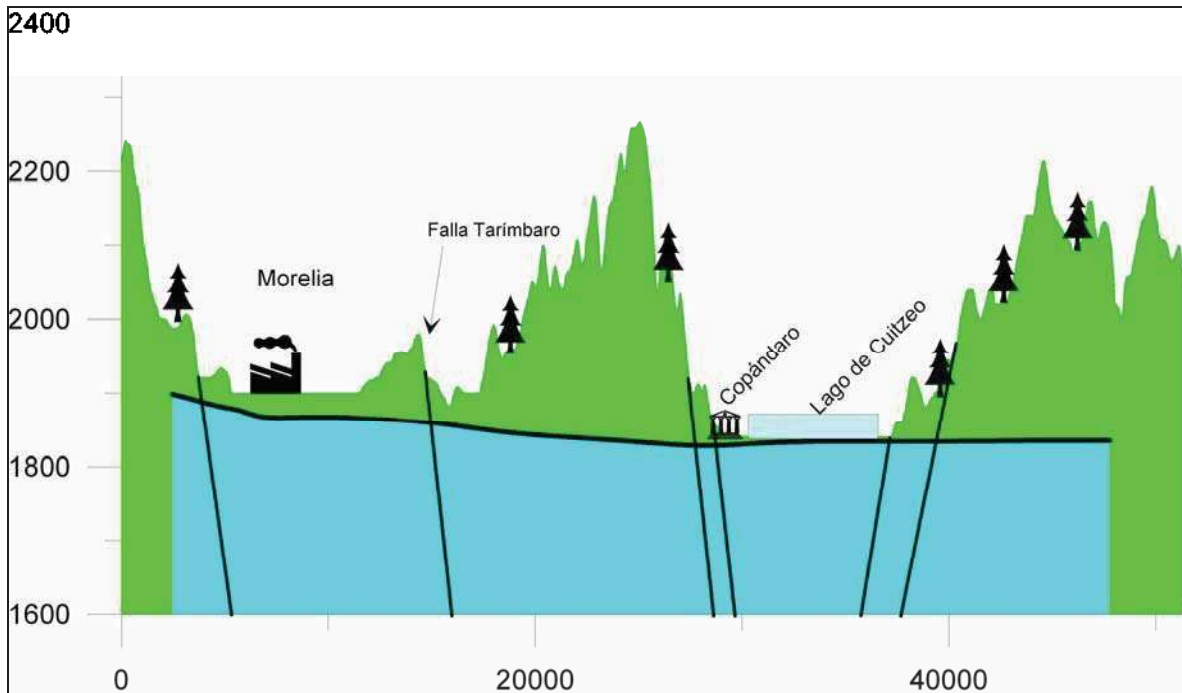


Figura IX. 20. Nivel estático para el mes de diciembre del año 2002, perfil 3-3'

Fuente: Datos tomados de la CONAGUA

### IX.7. Análisis de la evolución de los niveles estáticos

Para entender la evolución de los niveles estáticos del agua se realizó una gráfica del nivel piezométrico vs el tiempo para 7 pozos localizados dentro de la ciudad de Morelia, esto se realizó debido a que cuentan con un mayor número de registros y se tienen las litologías de estos pozos. En la Figura IX. 21 se observa la estabilización del nivel estático para los pozos Boulevard, Villa Universidad, C.U., Ocolusen II, mientras que los pozos Conalep y San Rafael están estabilizándose en el acuífero superficial; el pozo denominado Las Américas se encuentra dentro del acuífero en un proceso de abatimiento acelerado por lo que es de esperarse que continúe descendiendo el nivel estático del agua.

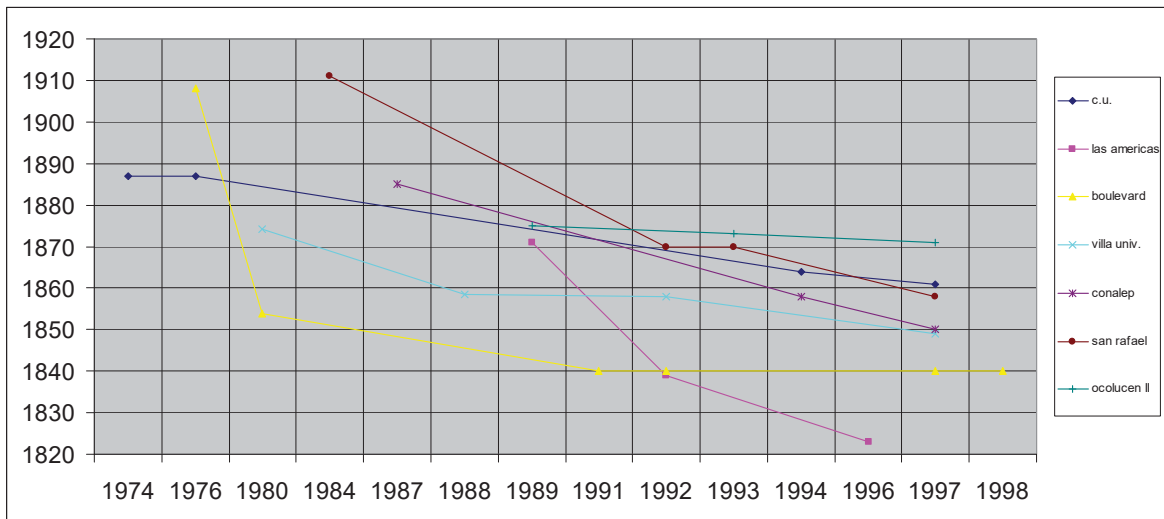


Figura IX. 21. Evolución del nivel estático del agua

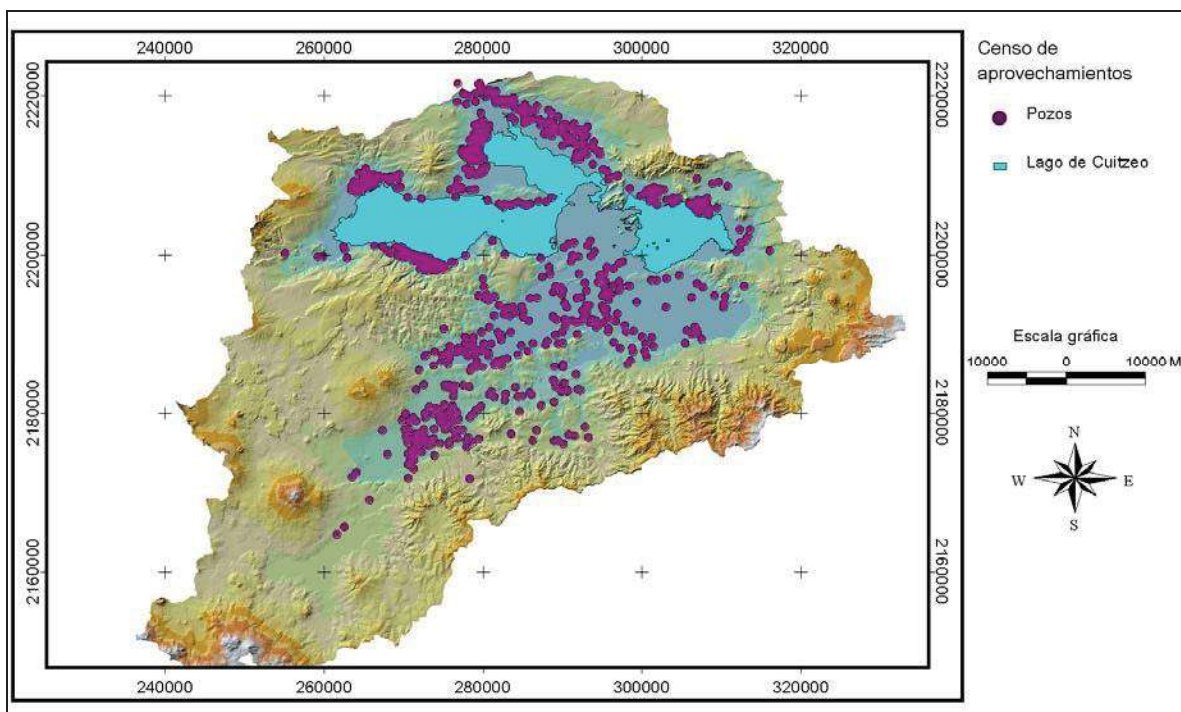
Fuente: Datos tomados de la CONAGUA

## IX.8. Censo de aprovechamientos de agua subterránea y análisis de la densidad de pozos

El censo de aprovechamientos de agua subterránea realizado por parte de CNA, 1990; revela que dentro de la cuenca de Cuitzeo existen 1038 aprovechamientos de los cuales 62 corresponden a manantiales, 52 a norias y 924 a los pozos (Figura IX. 22). En la figura se observa que existe una gran cantidad de pozos que están demasiado cerca unos de otros, con una distancia de separación menor a los 500 m (distancia mínima que toma el personal de la CONAGUA para otorgar concesión) principalmente en la ciudad de Morelia, Copándaro, Huandacareo, Santa Ana Maya, Cuaracurio e Iramuco. Describiremos de manera general los efectos que causan esta explotación concentrada en las zonas con la mayor densidad pozos de extracción.

Comenzamos con el análisis de la ciudad de Morelia en la cual la densidad de pozos está afectando el acuífero superficial. En ella se han reportado asentamientos diferenciales en algunas colonias al interior de la ciudad Garduño et al, (1999), lo que es causado principalmente por el incremento de la demanda de agua y la cercanía de las zonas habitadas a los pozos; en el municipio de Copándaro, en los alrededores de la cabecera municipal, se observa que la densidad de pozos de extracción provoca que las curvas de isovalor del nivel estático del agua se muestren una depresión o disminución del nivel de

hasta 10m (Figura IX.1); dentro del municipio de Santa Ana Maya se observa que al igual que en la ciudad de Morelia, tiende a presentar problemas en el acuífero superficial debido a que en algunas partes se han reportado hundimientos diferenciales que hicieron posible la aparición de grietas en las construcciones (Gutierrez, 1983); mientras que en la zona de Cuaracurio se aprecia un disminución del nivel estático de forma local, no tan marcada como la que se encuentra en Copándaro de la Figura IX. 1. En las zonas de Huandacareo e Iramuco no se observa ninguna depresión del nivel estático del agua, aunque no debemos descartar que en un futuro cercano estas tengan problemas de hundimientos diferenciales.



**Figura IX. 22. Ubicación de los pozos de extracción de agua**

**Fuente: Datos tomados de la CNA, 1990**

### **IX.9. Conclusiones**

Con base a la información del nivel estático del agua dentro de la cuenca del Lago de Cuitzeo nos indica que el acuífero superficial en la zona de la ciudad de Morelia está siendo explotado por una gran densidad de pozos de extracción, por lo que en un futuro los manantiales que aún afloran en esta área se verán perjudicados por esta extracción concentrada debido a la demanda que se tiene dentro de la ciudad. Para la mayor parte de

planicie de la cuenca del Lago de Cuitzeo se estable que el nivel estático se ha mantenido estable al menos en los periodos analizados en este capítulo.

También es importante resaltar que existen dos direcciones principales de flujo, la primera de ellas, que ocurre en la zona de Morelia y Tarímbaro, tiene un aporte de agua o recarga del acuífero en las zonas suroeste y sur que mantienen una dirección del flujo hacia el lago; si se analiza esta información y se tiene en cuenta que las mediciones del nivel estático se hicieron principalmente en el acuífero superficial, se puede relacionar con las estructuras geológicas NE-SO que al parecer delimitan al acuífero superficial en esta dirección.

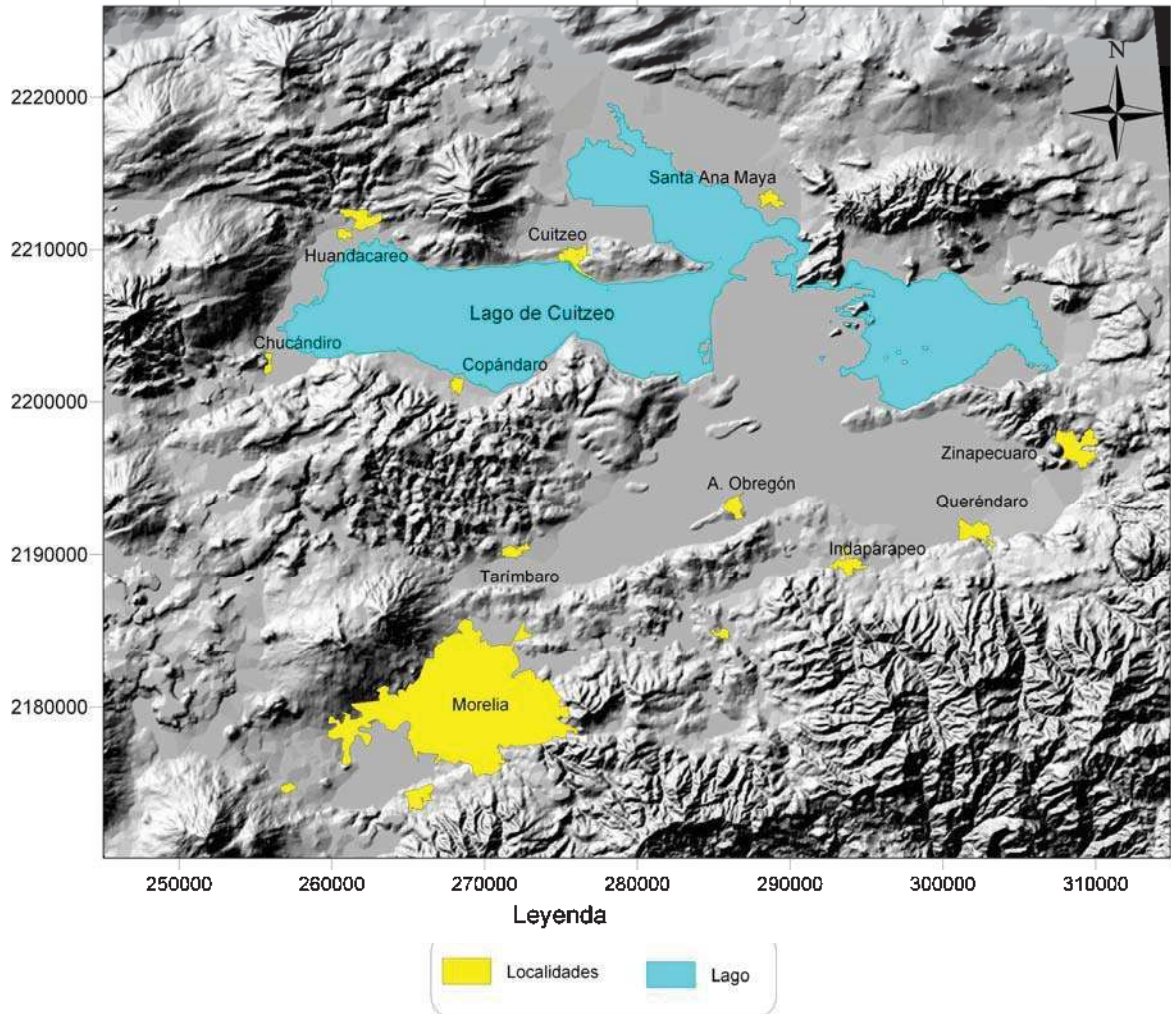
La segunda de las direcciones del flujo va hacia el NO. Esta recibe principalmente la aportación de la parte sur, específicamente de la Sierra de Mil Cumbres; de igual forma que la primera de las direcciones el flujo tiende a ir hacia el vaso del Lago de Cuitzeo.

El nivel del agua en el acuífero de la ciudad de Morelia está en proceso de estabilización en algunas zonas, puesto que se ha agotado prácticamente el acuífero superficial y actualmente se encuentra en explotación el acuífero profundo. Muestra de ello son pozos como el de “El Realito” y “Primo Tapia” que han dejado de producir el gasto requerido y se han tenido que abandonar (Realito) o hacerse más profundos (Primo Tapia). Otro caso que confirma lo expuesto son los pozos exploratorios en Ciudad Tres Marías en donde se tuvo que cambiar en 5 ocasiones el lugar y profundidad de exploración de los pozos hasta llegar finalmente a un pozo final de 450 m de profundidad, con lo cual se demostró la dificultad que se está teniendo para el abastecimiento de un sector de la ciudad de Morelia, (Com. pers. CONAGUA).

## **X.- MODELO CONCEPTUAL**

Los modelos conceptuales, como se mencionó en el principio de este trabajo, son una simplificación del medio físico hidrogeológico, que se utilizan junto con los modelos computarizados para lograr los objetivos específicos de cada trabajo. Estos modelos conceptuales nos ayudan a seleccionar el tipo de código por utilizar, el diseño de la malla, a definir las condiciones de frontera y las variaciones en el tiempo, y por último a establecer las condiciones iniciales en el modelo numérico. Por ejemplo, si el modelo conceptual describe un sistema de flujo horizontal simple en un acuífero libre sobre una capa relativamente plana e impermeable, la construcción de un modelo matemático de dos dimensiones sería suficiente. Pero si el modelo conceptual revela que se trata de un sistema mucho más complejo, como es en este caso, debe ser tratado como un modelo casi tridimensional o completamente tridimensional.

En el cuarto capítulo de este trabajo ya se había definido la zona de estudio, la cual corresponde a la geometría de la cuenca hidrológica. Sin embargo, debido a la carencia de información (litologías, propiedades hidráulicas de los acuíferos, etc.) y las limitaciones de software, esta área, demasiado extensa e irregular se redujo a una figura rectangular de coordenadas  $X_{min}=245000$  -  $X_{max}= 315000$  y  $Y_{min}= 2170000$  -  $Y_{max}= 2226000$ , con una longitud de 70 Km en el sentido este-oeste y 56 Km en la parte norte-sur, coordenadas UTM (Figura X. 1)

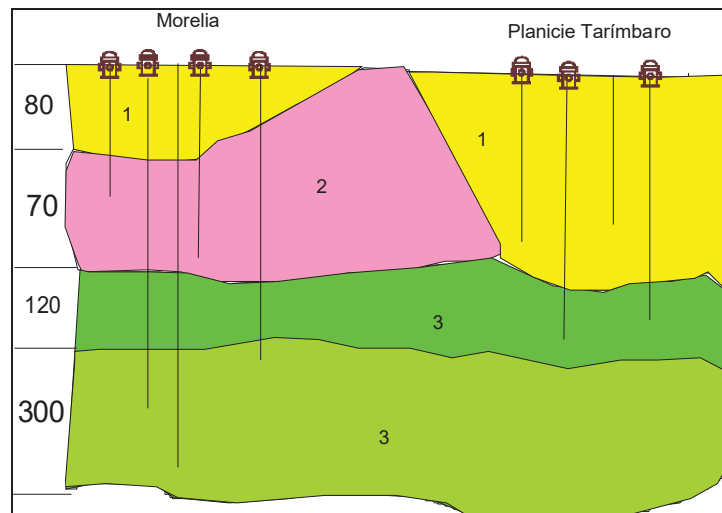


**Figura X. 1. Ubicación de la zona de estudio.**

La zona presenta un clima templado subhúmedo con lluvias en verano, y de acuerdo a los datos analizados del Eric 2 la precipitación media de la zona de estudio es del orden de los 852 mm/año.

Una vez definida el área de estudio se definieron tres unidades geohidrológicas, la primera de ellas está compuesta por los sedimentos fluvio-lacustres que representan el acuífero en explotación de la mayor parte de la zona de estudio, dicha explotación está localizada principalmente en el municipio de Tarímbaro, la planicie de Álvaro Obregón, Zinapécuaro, Queréndaro, y en las poblaciones que bordean la margen del Lago de Cuitzeo como son Copándaro, Chucándiro, Huandacareo, Queréndaro y Santa Ana Maya; la segunda unidad geohidrológica está formada por rocas de composición ácida, como son las tobas riolíticas e

ignimbríticas, localizadas básicamente en la zona de la ciudad de Morelia, donde es aprovechado este acuífero; la tercera y última unidad correspondería a la rocas andesíticas miocénicas, acuífero explotado principalmente en la zona de Morelia y en algunos pozos que se localizan en la planicie de Tarímbaro-Queréndaro, dicha explotación es identificada por medio de los reportes de perforación y el diseño constructivo de los pozos, los cuales sobrepasan las dos primeras unidades geohidrológicas para extraer el agua desde una profundidad cercana a los 150 m (ver Figura X.2).



**Figura X. 2.** Esquema generalizado de las unidades geohidrológicas de la cuenca de Cuitzeo

Una de las principales herramientas de trabajo dentro de cualquier estudio hidrogeológico es el inventario de puntos de agua subterránea, ya que de ellos se extrae toda la información necesaria para interpretar el funcionamiento hidrogeológico del sistema y constituyen los puntos de muestreo de las aguas.

En este trabajo se ha realizado un análisis de los estudios previos en los que pudieran aparecer datos históricos sobre pozos o piezómetros de utilidad para completar el inventario. De los estudios consultados se encontró que el estudio cuantitativo del acuífero Morelia-Queréndaro (CNA, 1990) realizó un inventario de las fuentes de agua subterránea; en tanto otros estudios (Cedillo et al, 1981; Silva J., 1998, Pérez S.A., 2002) incluyen solamente parte de algunas fuentes de agua debido a que no es parte de sus objetivos el realizar un inventario de las fuentes de agua subterránea.

En el trabajo analizado (CNA, 1990) se inventarió un total de 1038 fuentes de agua subterránea, de estas 62 corresponden a manantiales, 52 norias y 924 pozos. De la cantidad de pozos inventariados en este estudio solamente 5 están fuera de la cuenca de estudio. En este trabajo se estimó que el volumen de extracción anual de agua subterránea durante el año de 1990 fue de 196.837 millones de m<sup>3</sup>.

Al analizar y realizar un estudio comparativo de los trabajos se ha comprobado que existen ciertas diferencias en las coordenadas que proporciona cada uno de los trabajos para los mismos puntos de agua. Para tratar de resolver estas discrepancias se consultó las bases de datos del OOAPAS (Organismo Operador de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Morelia) y de la CONAGUA. Se tomaron estas bases de datos como referencia para la corrección de la ubicación en algunas de las fuentes de agua subterránea. Otra forma de corregir la ubicación de otros pozos fue por medio de las visitas de campo empleando GPS y con la ayuda de cartas topográficas 1:50,000 editadas por el INEGI.

Continuando con la descripción, recordemos que dentro de la cuenca se cuenta con el registro de los niveles piezométricos de 3 años (1990, 2001 y 2002) y además de estos, se cuenta con los registros del nivel estático del agua de algunos pozos de forma aislada. En función del análisis realizado de los niveles estáticos tendríamos que la dirección del flujo confluyen hacia el vaso del Lago de Cuitzeo, en donde se observa que las principales direcciones del flujo provienen de la parte sur y específicamente de la Sierra de Mil Cumbres; otra de las direcciones o aportaciones de agua subterránea proviene del suroeste de la Ciudad de Morelia, éste aporte lo definimos por medio de las curvas del nivel estático las cuales nos muestran que el gradiente ocurre de SO hacia el NE; hacia el este del área de estudio no se cuenta con información que nos ayude a definir las dirección del flujo, sin embargo, recordemos que la cuenca de Cuitzeo es una cuenca cerrada de 4000 km<sup>2</sup> (Mendoza, 2003), y que en el SE de la cuenca se presentan precipitaciones de lluvia por arriba de la media. Haciendo una analogía de estas dos condiciones esperaríamos que la dirección del flujo subterráneo también tuviera dirección hacia el lago, por lo menos en la zona SE de la cuenca, en donde dicha dirección tendría su manifestación en el acuífero superficial.

La recarga del acuífero se produce principalmente a partir de las precipitaciones que se producen con mayor intensidad en las partes altas, como son las Sierras de Mil Cumbres y la de San Andrés, por lo que estas sierras se considerarían zonas de recarga; otra área o zona de recarga la ubicamos hacia el oeste de la ciudad de Morelia específicamente hacia la zona del Malpais. Además de las zonas de recarga anteriormente descritas, es posible la recarga por medio de las pérdidas agua o infiltración de los ríos perennes hacia el acuífero como son el Río Grande de Morelia, Zinapécuaro y arroyo Guadalupe, y una recarga adicional debida a los retornos o excesos de agua de la actividad agrícola de la planicie Tarímbaro-Alvaro Obregón-Queréndaro, la cual se practica principalmente por inundación.

Las zonas de descarga se ubican en área donde existe el afloramiento de manantiales tanto de agua caliente como de agua fría, teniendo un numero importante de estos en la ribera sur del Lago de Cuitzeo; algunos manantiales los encontramos asociados a estructuras de fallas como es el caso de la falla de Tarímbaro y la falla Cointzio en Morelia en donde afloran manantiales de agua fría; otra zona en donde existen importantes cantidades de manantiales se ubican al SO del área de estudio sobre una franja SO-NE. Ahí se concentra una gran cantidad de manantiales de agua fría a los cuales se les da un uso recreativo o un uso publico urbano; por último tenemos los manantiales que se ubican hacia el este del área de estudio (Zinapécuaro-Salida Maravatío) donde encontramos un numero importante de manantiales de agua caliente y agua fría.

También se considera en una primera aproximación al Lago de Cuitzeo como área de descarga debido a que es el lago más salado de México y esto nos hace suponer que es alimentado por flujos de agua regionales y también debido a que mantiene el tirante de agua casi estable.

Del análisis de la información hidrogeoquímica proveniente de este trabajo, como de otros autores (Cedillo et al, 1981; Silva M. J., 1997; Villanueva C.R., 2002) se observa que existen semejanzas en las características químicas del agua muestreadas en distintas fechas por lo que esta no cambia en el tiempo, se observó que la mayoría de lugares de muestreo de este trabajo son aguas del tipo bicarbonatadas (clasificación Piper, A.M., 1944), por lo que se trata de aguas que están en contacto con el subsuelo en una distancia corta y/o tienen

poco tiempo de residencia en el subsuelo, destacando que se trata de flujos locales; el segundo tipo de agua encontrada por Cedillo et al, 1981 es el agua de composición sulfatada y se localiza en la zona sur del Lago de Cuitzeo, principalmente en San Juan Tararameo, San Agustín del Maíz y San Agustín del Pulque por lo que se trata de una zona de descarga de un flujo intermedio; y el tercer tipo de agua corresponde al agua clorurada, muestreada y analizada tanto en este estudio como en el de Cedillo et al, 1981 ubicándola en el área de Araró-Huingo y El Salitre, por lo que se concluye que este tipo de agua provienen de un flujo regional que han recorrido grandes distancias y/o tienen un mayor tiempo de permanencia en el acuífero.

Las propiedades físicas de las unidades geohidrológicas están basadas en la información de 15 pruebas de bombeo de corta duración, las cuales fueron realizadas por la CNA, 1990 (Figura X.3). En estas pruebas se determinó que las transmisividades varían desde  $0.13 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{S}$  hasta  $7.08 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{S}$  para caudales específicos de 0.56 a 6.72 lps/m las cuales son acordes a la naturaleza de los sedimentos y al fracturamiento de las rocas andesíticas y riolíticas. En las gráficas de bombeo se observó que después del primer tramo recto se define un tramo de menor pendiente, llegando a estabilizarse los niveles, lo que muestra que existe una penetración parcial del pozo en el acuífero y/o un semiconfinamiento. Cabe aclarar que no se contó en ninguna de las pruebas de bombeo con pozos de observación que pudieran ser utilizados para determinar el coeficiente de almacenamiento, el cual consiste en medir el nivel dinámico y gasto de extracción dentro de un pozo, y al mismo tiempo se mide el abatimiento del nivel estático en el pozo de observación ubicado a una distancia menor a 100 m del pozo de extracción, pero de acuerdo a la bibliografía consultada nos dice que este coeficiente para acuíferos confinados tendría valores menores de 0.005 y para acuíferos libres los valores del coeficiente de almacenamiento están entre 0.02 y 0.30 Fetter, C.W. 1994.

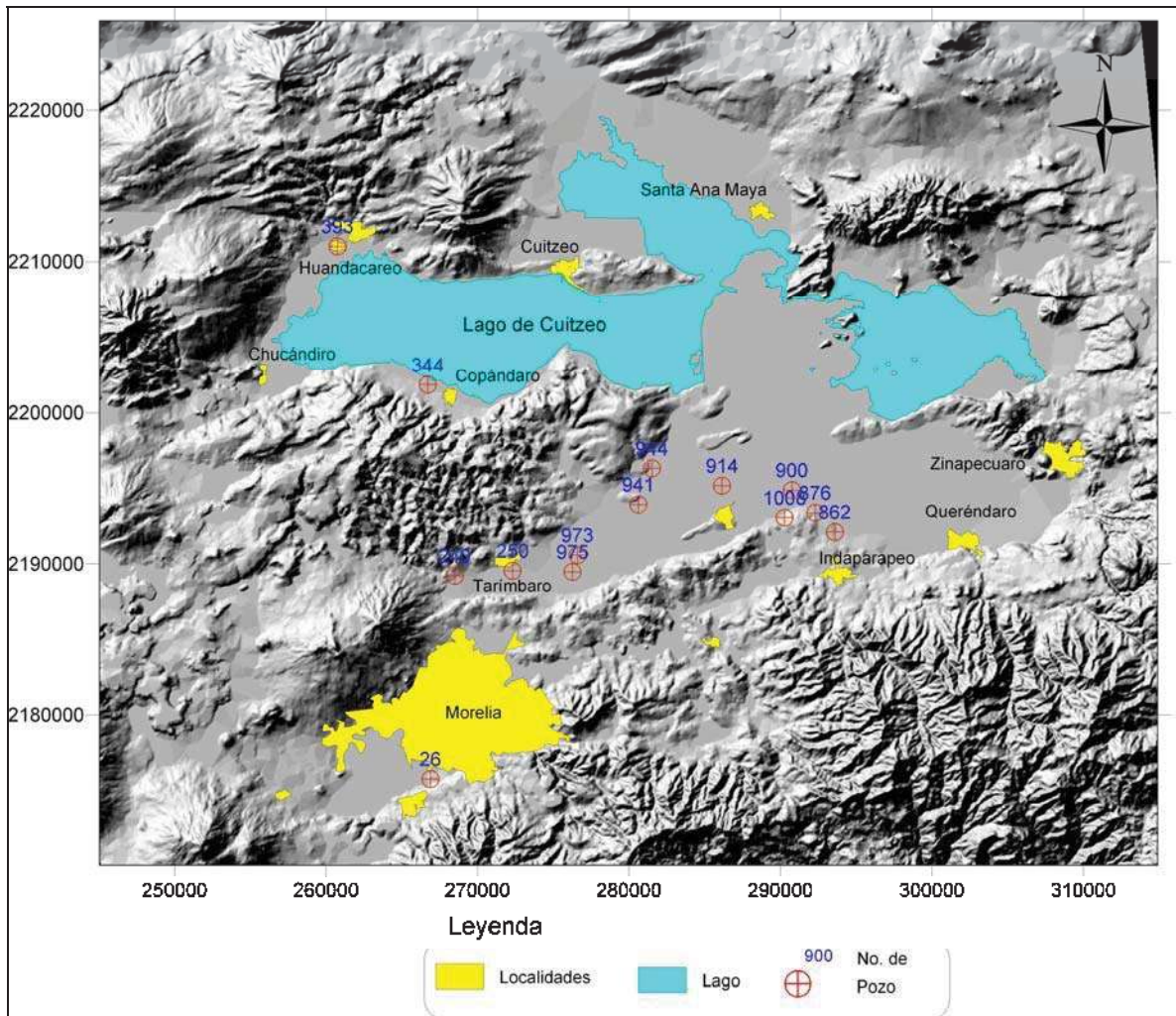


Figura X. 3. Ubicación de las pruebas de bombeo, identificadas de acuerdo al estudio de CNA, 1990.

Desde el punto de vista geológico-geofísico, existen las siguientes unidades geohidrológicas:

Secuencia andesítica fracturada.- Se compone de rocas volcánicas formadas por derrames muy fracturados que alternan con brechas volcánicas. Hasta ahora este acuífero ha sido explotado en Morelia y parte de la planicie de Queréndaro, presenta buenas propiedades hidráulicas.

Secuencia de flujos piroclásticos riolíticos.- Está constituida por diferentes tipos de flujos, formados por unidades consolidadas y fracturadas, de flujos arenosos, aglomeráticos y con niveles arcillosos. Su espesor va de 30 a 100m. Este acuífero se caracteriza por contener aguas con muchos contenidos de sólidos y se explota en el sur de Morelia (Pepsi, Xangari,

Tec. Montrey, etc.) se caracteriza por ser un acuífero con bajas conductividades hidráulicas.

Secuencia fluvio lacustre.- Se compone de dos grandes unidades, la de Charo formada por arcillas y limos en su base, haciéndose más arenosas y conglomeráticas hacia la cima. Es el acuífero más explotado y tiene un espesor medido de 30 a 40m, presenta conductividades hidráulicas buenas. El segundo paquete son los sedimentos del lago actual ocupados por alternancias arenas, limos y arcillas. Son estos sedimentos y las fallas los que están más ligados a la subsidencia.

Secuencia de andesitas basálticas y malpais, se observan al poniente de la ciudad de Morelia y en su base se localizan los manantiales de la Minzita y San Isidro Itzicuaru, los que presenta buenas propiedades hidráulicas.

Todas estas unidades geohidrológicas se encuentran controladas por fallas E-O, NE-SO y NNO-SSE, que no parecen ser fronteras determinantes de los acuíferos.

La condición de flujo depende de la cantidad de datos disponibles, por lo que al realizar la recopilación de la información y su análisis se observó que nos se cuenta con los datos temporales del censo de aprovechamientos, el volumen de extracción así como los descensos del nivel estático del agua, por lo que se tendrá que simular en un régimen de flujo estacionario donde no existe variación en la carga hidráulica del acuífero a través del tiempo.

Como parte del modelo conceptual se tiene que definir el tipo de fronteras del área de estudio. Se considera que la zona sur de la misma debe simularse con carga constante, debido a que es ahí donde se presentan las máximas precipitaciones de la zona, la frontera oeste de la zona de estudio se tendrá que considerar como frontera impermeable debido a la estructura que está presente hacia esa área y en la que existe un bloque de baja densidad (anomalía de Bouguer, capítulo de geofísica de este trabajo); la zona norte se considera como frontera impermeable en casi toda su longitud exceptuando el área de la población de Santa Ana Maya en donde se le debe de considerar como área de salida de la misma ,

por último, hacia el lado este de la región de estudio, se consideran tres sectores el primero actúa como zona de aporte de flujo o de carga constante, se ubica principalmente hacia la Sierra de San Andrés; otro sector actúa como barrera impermeable y el tercero se considera como una frontera de salida hacia el noreste.

Con el desarrollo del modelo conceptual tenemos una idea aproximada de las condiciones geohidrológicas del área de estudio, además de las propiedades y condiciones de los acuíferos ya descritas en los párrafos anteriores. Sin embargo, nos damos cuenta que la información que se tiene es insuficiente para poder ser modelado con el software Visual Modflow 3.1 por lo que se tendrá que medir u obtener información referente a las condiciones hidrodinámicas de los acuíferos mediante la realización de pruebas de bombeo para determinar la conductividad hidráulica (en otras áreas) así como el coeficiente de almacenamiento, si es que se cuenta con algunos pozos que pudieran servir como pozos de observación. Además, se observó que es necesario tener información del nivel estático del agua con una mayor área de cobertura, un censo actualizado de las fuentes de agua subterránea para poder corroborar resultados actuales, estimar los volúmenes de extracción y realizar un análisis físico-químico más completo del agua subterránea, en el que se incluya un estudio de isótopos para conocer la edad del agua en el acuífero, además de analizar el agua de lluvia y el agua del Lago de Cuitzeo para determinar su interconexión con el agua subterránea.

Las formulación del modelo conceptual está afectado por estas incertidumbres, lo que se debe a que en el modelo los parámetros se representan como valores de un solo numero o rango de valores, tal es el caso de la conductividad hidráulica estimada, la cual puede tener un gran impacto relativo sobre los resultados del modelado numérico. Estas incertidumbres dependen de la calidad y disponibilidad de los datos, además del nivel de confianza requerido para los objetivos del modelado, así como de la calidad y cantidad de los recursos disponibles para realizar el trabajo del modelado. Eliminar la totalmente la incertidumbre es imposible e impractico para el modelado del agua subterránea, por lo que se debe de manejar dicha incertidumbre y comunicar sus efectos esenciales para el buen modelado, a

continuación se describen las recomendaciones para el manejo de la incertidumbre en el modelo conceptual (Groundwater Hydrology, 1999).

1.- Documente la calidad, cantidad, e integridad de los datos en los cuales se basa. Para cumplir esta recomendación en esta tesis esta se discute en los capítulos correspondientes a cada fuente de datos. Por lo que respecta a la calidad de la información geológica, esta se clasifica como buena, y está constituida por la cartografía geológica del área de estudio (Garduño V.H., 2006), se le considera completa e integrable a un Sistema de Información Geográfica (SIG); por lo que respecta a la geología del subsuelo, los datos originales de los reportes de perforación presenta una descripción simplificada en la mayoría de los reportes (80) por lo que estos se consideran de calidad media, con una cantidad de datos considerada de media a baja, la clasificación baja en cuanto a la cantidad es debida a que se presentan áreas donde falta información como en su caso ocurrió cerca del Lago de Cuitzeo y hacia la planicie de Queréndaro, esta información se integró en formato digital para que pudieran realizarse los perfiles de la geología del subsuelo. La información geofísica se considera de buena calidad y cantidad, esto a pesar de las ligeras diferencias del empalme de los diferentes estudios y a la distancia de separación entre las estaciones de medición gravimétrica las cuales proporcionan poco detalle a 300 m de profundidad. Sin embargo se logra determinar el basamento de la cuenca lacustre y se identifican las grandes fallas del bloque sur del lago lo cual permitió la incorporación de estas fallas y del basamento a la geología del subsuelo. En lo que se refiere a la información del balance hidrológico se considera que la información contenida en el Eric 2 y la proporcionada por CONAGUA es de mediana calidad con una baja cantidad de datos, esta clasificación es debida a la falta de información del escurrimiento superficial, infiltración, evapotranspiración y al volumen de extracción. En lo referente a la información hidrogeoquímica se considera que la información disponible es de buena calidad lo que puede comprobarse cuantitativamente por medio del balance iónico, con su integración nos ayuda a identificar las zonas de descarga así como el tipo de flujo que encontramos (regional, intermedio o local), en cuanto a la cantidad se considera buena excepto que faltaría información isotópica. En el aspecto hidrodinámico del acuífero y de los niveles estáticos del agua se considera que la información tiene calidad media, con una baja cantidad de datos, esto se traduce a que en el

área de estudio hace falta mayor cantidad de datos para poder dar un valor medio o intervalo de valores de la conductividad hidráulica, carga hidráulica, porosidad y transmisividades

2.- La segunda de las recomendaciones nos dice que se documenten las fuentes de los datos. Puesto que esto se hizo en las secciones correspondientes no se discute aquí.

3.- Evalúe la necesidad de datos adicionales. Como se había mencionado, se requieren datos adicionales de las propiedades hidrodinámicas del acuífero como son el coeficiente de almacenamiento, el censo de aprovechamientos actualizado, la estimación del volumen de extracción y la medición de los niveles estáticos del agua en zonas donde no se tiene datos. También se requiere conocer el volumen de escurrimiento en los principales ríos o cauces además de realizar mediciones de las infiltraciones.

4.- Documentar las suposiciones de las condiciones de borde. Las suposiciones de las condiciones de borde fueron descritas anteriormente, tanto su ubicación como el tipo de frontera para los cuatro lados del área de estudio.

5.- Si un componente está fijo en un solo valor, o si una superficie del agua es fija como única, documente las suposiciones que se hará e implicaciones de las mismas. Atendiendo a esta recomendación dentro de nuestro modelo se considera como un solo valor único la recarga del acuífero. Esto como es de esperarse no se puede medir en ciertas áreas por lo que su representación es puntual con un solo valor afectando de alguna forma al modelo de simulación que para términos prácticos se considera como aceptable el valor estimado, otro de los valores que se consideran como fijos son las condiciones de borde con carga constante en las que se tiene que suponer un valor de carga constante que no cambia en el tiempo, lo cual no representa las condiciones reales del sistema e implica que se traten de ajustar otros parámetros para tener un mejor ajuste dentro del modelo como son las conductividades hidráulicas y los coeficientes de almacenamiento.

6.- Si los componentes serán llevados adelante al modelo numérico como un rango o una distribución, documente cómo fueron derivados estos y por qué se hicieron, para que se encuentren dentro de los objetivos del modelado. Haciendo hincapié en la sexta recomendación tenemos que existen rangos de valores para las conductividades y cargas hidráulicas, por lo que las primeras están proporcionadas de acuerdo a los ensayos de bombeo y varían de acuerdo a las condiciones de la geología local en esos puntos. Las cargas hidráulicas están determinadas por medio de una malla de interpolación la cual se determinó de acuerdo a la cobertura de los datos del nivel estático y se hicieron de esta forma para entender hacia donde fluye el agua subterránea y para ser incorporados dentro del software.

## XI.- DISCUSIÓN

Para la elaboración del modelo conceptual presente en este trabajo se ha considerado un número importante de datos disponibles. En él se han incluido la geología y las tres unidades geohidrológicas encontradas por medio de la correlación litológica de la zona de estudio, estas unidades se hicieron mediante la interpretación, correlación y corrección de datos técnicos de perforación se incluyó la corrección de datos litológicos tomando en cuenta las similitudes de algunos pozos cercanos y el fallamiento regional de la cuenca. No obstante que se hizo el trabajo de correlación litológica se observó que hacia el área Queréndaro-Zinapécuaro se carece de información que permita obtener una geología del subsuelo más confiable, para mitigar la falta de datos. Hacia la zona en cuestión se utilizaron los datos de algunos Sondeos Eléctricos Verticales (SEV's) que nos ayudaron a realizar la interpretación de la geología del subsuelo, ya que dicha geología alimenta al modelo numérico. El manejo de solo tres unidades geohidrológicas tiene el inconveniente de que no representa en detalle las distribuciones de las formaciones geológicas pero su conceptualización se considera suficiente para poder ser aplicada en el modelado del agua subterránea. Antes de este estudio las únicas fallas que se consideran importantes dentro de la cuenca del Lago de Cuitzeo eran la falla de La Paloma y la falla de Tarímbaro. Con la información obtenida de las litologías y el trabajo geofísico, se aprecia que la cuenca indudablemente está afallada en dirección NE-SO, E-O y NNO-SSE.

También es de destacar, que por medio del análisis fisico-químico del agua fue posible determinar varias familias de estas. Se infirió la precedencia del agua subterránea de acuerdo a la clasificación hecha por Tóth, (1963) encontrándose que la mayoría de los puntos muestreados corresponde a un flujo local, mientras que en este estudio no se encontraron aguas provenientes de un flujo intermedio. Por lo que se refiere al flujo regional o profundo, se obtuvo este tipo de agua en solamente dos de los sitios muestreados.

Otra cuestión que no se logró resolver en el modelo conceptual fue la determinación de los valores del coeficiente de almacenamiento, debido a que no se contó con pozos de

observación que ayudaran a determinar estos valores de las pruebas de bombeo. Mediante la reinterpretación de estas pruebas se obtuvieron ligeras diferencias en los valores de las conductividades hidráulicas y de las transmisividades, diferencias que no repercuten de manera importante para la aplicación de estas características hidráulicas en el modelado numérico (trabajo futuro).

La piezometría dentro de la cuenca se ha dejado de monitorear por lapsos de tiempo prolongados (1991-2000) y años recientes, lo cual indica que no se cuenta con programas de monitoreo periódico regular constante de las piezometrías por parte de las autoridades competentes. Esto genera cierta limitación en la disponibilidad de datos y si a esto le sumamos que no se cubren la totalidad de los pozos, esto nos lleva a que tengamos falta información en ciertas áreas y no se pueda conocer las profundidades del nivel estático para esa zonas, por lo que esta información repercute de alguna forma en los resultados de la modelación numérica generando incertidumbre en la determinación de los niveles estáticos en algunos sectores.

En la información proporcionada por el Organismo Operador de Agua Potable Alcantarillado y Saneamiento de la Ciudad de Morelia (OOAPAS), se observa que la separación entre algunos pozos es menor de 500m (Figura IX.22), por lo que existe una sobre explotación del acuífero superficial provocando la aparición del cono de abatimiento del nivel estático del agua en la ciudad, el cual fue descrito en el capítulo IX de este trabajo. La disminución del nivel estático del agua (Figura IX. 21), hace que disminuya la presión de poro de los sedimentos fluvio-lacustres (arcillas, limos y arenas), generando así la aparición de fallas y fracturas en las estructuras civiles dentro de la ciudad de Morelia.

## XII.- CONCLUSIONES

Se concluye que la cuenca del Lago de Cuitzeo está delimitada 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.

Se definieron tres acuíferos dentro de la cuenca del Lago de Cuitzeo, el primero de ellos es el acuífero superficial, constituido por materiales fluvio-lacustres con un espesor promedio de 30-50 metros, el segundo acuífero (acuífero intermedio) está constituido por una secuencia de flujos piroclásticos riolíticos que constituyen un acuífero con un espesor promedio de 30 a 80 metros para la ciudad de Morelia y de 30-40 metros para la mayor parte del área de estudio; el tercer acuífero está constituido por la secuencia de andesitas fracturadas cuyo espesor varía de unos 100 a 500 m. De estos acuíferos el primero es sometido a mayor explotación dentro de la cuenca del lago de Cuitzeo.

Con la información geofísica se observó la existencia de una gran estructura de superficie con un lineamiento del vulcanismo en dirección SSE-NNO que podría tratarse de una falla transcurrente que se identifica por medio de algunas características en superficie.

La identificación de cuerpos ígneos sepultados bajo los sedimentos del Lago de Cuitzeo permite postular la existencia de fuentes de calor de origen volcánico como el origen de las manifestaciones en los alrededores del lago. En tal caso algunas de las fallas identificadas por la geología de campo, como los lineamientos gravimétricos y magnéticos pueden actuar como vías de comunicación de las aguas meteóricas con las fuentes de calor en el subsuelo. En general no se encontraron evidencias que sugieran la existencia de grandes fallas que mediante la circulación profunda y sin la presencia de vulcanismo reciente, pudieran explicar las altas temperaturas registradas en los manantiales. Las fallas de mayor dimensión serían las de orientación NE-SO que confluyen en la zona de Querétaro.

Se considera que las manifestaciones termales pueden relacionarse a diferentes áreas del vulcanismo, emparentados por su origen tectónico, pero que constituyen sistemas hidrotermales separados.

Además de que se obtuvo a través de los perfiles gravimétricos la forma de la cuenca que contiene los sedimentos del Lago de Cuitzeo, dándonos una estimación del espesor de la columna de sedimentos, el cual varía para distintas zonas, siendo la de mayor espesor la del centro del lago, en donde esperaríamos un relleno aproximado de 630 m, mientras que hacia la parte este del lago esperaríamos un espesor promedio de 220 m y en la parte oeste tendríamos un espesor promedio de sedimentos de 150 m y en la rama norte del lago tendríamos un espesor aproximado de 340 m.

En general, por sus características fisicoquímicas las muestras de agua analizadas son de buena calidad excepto en algunos lugares donde se sobrepasó la Norma Oficial Mexicana (DOF, 1994). Tal es el caso del manantial del Jaral donde sobrepasó el límite permitido para el aluminio, el pozo Santiago Undameo en el caso del manganeso. Los lugares que sobrepasaron el límite máximo permitido de 0.30 mg/L de Hierro fueron el pozo Cuaracurio, La Lobera, y los manantiales de Acuitzio del Canje y de Tanimireche. El manantial de Huingo sobrepasó 56 veces el valor máximo permisible del Arsénico.

Comparando los tipos de agua encontrados por Cedillo et al, 1983 con los realizados en este estudio se observa que existen similitudes en los tipos de agua reportados para las mismas zonas de muestreo, por lo que se sugiere que las principales zonas de recarga de los acuíferos ocurren en las parte sur de la Cuenca del Lago de Cuitzeo, relacionándose este tipo de agua con las bicarbonatadas, las cuales corresponden a un flujo local de poco tiempo de residencia en el acuífero y/o recorrido corto; el otro tipo de agua encontrada es la clorurada, la cual es una manifestación de un flujo regional proveniente del acuífero profundo y/o que tiene un mayor tiempo de residencia en el mismo. En este estudio no se encontraron aguas sulfatadas que sugieran la aportación de un flujo de agua de profundidad intermedia, pero Cedillo et al., 1983 reporta este tipo de agua en la planicie cercana al Lago de Cuitzeo y específicamente en la zona de descarga de los drenes Queréndaro, Joconol y Zacapendo. En estas zonas también se encuentran aguas sulfatadas provenientes de un flujo intermedio en San Juan Tarameo, San Agustín del Maíz y Mariano Escobedo (Figura XII. 1).

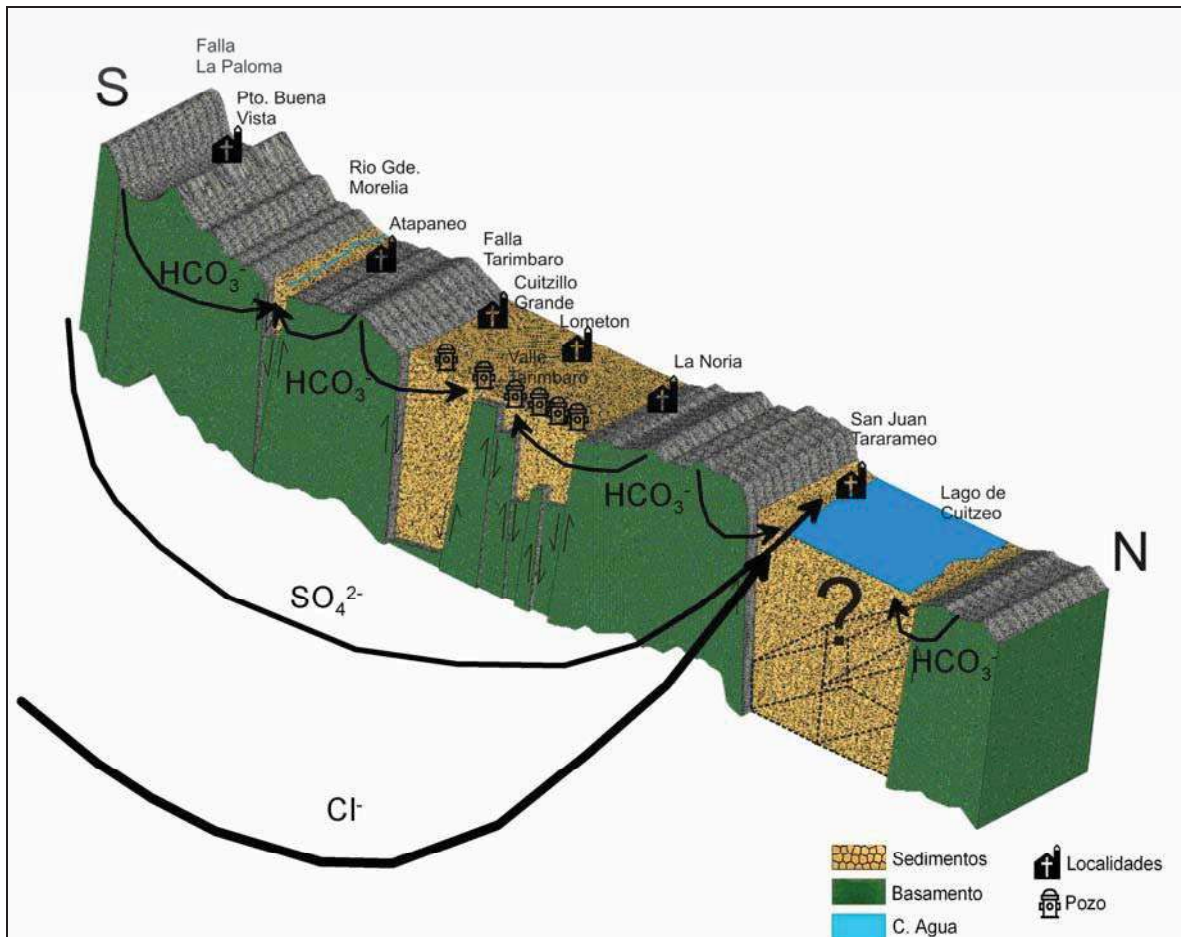


Figura XII. 1. Esquema general en sección, de los diferentes tipos de agua encontrados dentro de la cuenca del Lago de Cuitzeo

Los datos de nivel estático de pozos dentro de la Cuenca del Lago de Cuitzeo nos indica que el acuífero superficial en la zona de la ciudad de Morelia está siendo interceptado por la gran densidad de pozo de extracción, por lo que en un futuro los manantiales que aún afloran en esta área se verán perjudicados por esta extracción. Dentro de la mayor parte de planicie de la cuenca del Lago de Cuitzeo y con base en los datos proporcionados por la Comisión Nacional del Agua, se concluye que el nivel estático se mantiene estable en los periodos analizados de 1990, 2001 y 2002.

Se identifican dos direcciones principales de flujo, la primera de ellas ubicada en la zona de Morelia y Tarímbaro tiene un aporte de agua o recarga del acuífero en los sectores suroeste y sur de la cuenca, manteniendo la dirección del flujo hacia el norte. Si tenemos en cuenta

que las mediciones del nivel estático se hicieron principalmente en el acuífero superficial, y lo relacionamos con la geología estructural, era de esperarse dicha dirección debido a que las estructuras geológicas (fallas) observables en superficie están delimitando al acuífero superficial en la dirección Suroeste-Noreste.

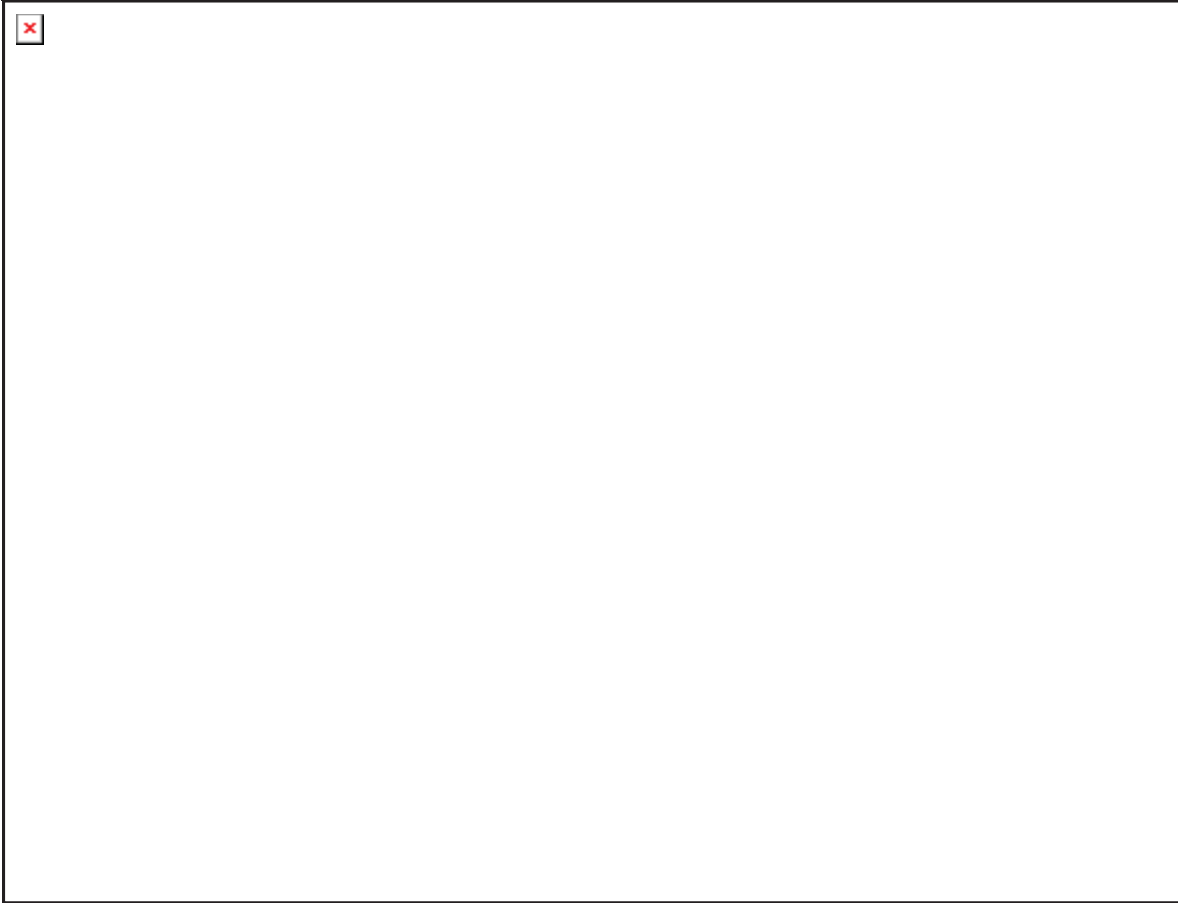
La segunda dirección del flujo ocurre hacia el noroeste, esta recibe principalmente la aportación de recarga proveniente de la parte sur de la zona de estudio, específicamente de la Sierra de Mil Cumbres con el sentido del flujo hacia el vaso del Lago de Cuitzeo.

Se observó que el nivel del agua en el acuífero de la ciudad de Morelia en algunas zonas está en proceso de estabilización, por lo que se concluye que se ha terminado prácticamente el acuífero superficial y actualmente se encuentra en explotación el acuífero profundo. Muestra de ello son algunos de los pozos como el de “El Realito” y “Primo Tapia” que han dejado de producir el gasto requerido y se tienen que abandonar como ocurrió en el caso del Realito o hacerse más profundo como es del pozo Primo Tapia. Otro caso que confirma lo expuesto son los pozos exploratorios en Ciudad Tres Marías en los que se tuvo que cambiar en 5 ocasiones el lugar y la profundidad de la perforación hasta llegar finalmente a un pozo de 450 m de profundidad, con lo cual se demostró la dificultad que se está teniendo para el abastecimiento de un sector de la ciudad de Morelia, (Com. pers. CONAGUA).

En función de que no se cuenta con toda la información referente a las conductividades hidráulicas (K), infiltración, escurrimientos superficiales, censo actualizado, coeficiente de Imacenamiento (S), volumen de extracción se considera que no es viable la utilización del software Visual Modflow 3.1, porque se tendría un modelo del flujo que no sería real, debido a que se tendría que suponer información donde no existe y se tendría que confiar plenamente en toda la información existente.

Para dar por terminado el modelo conceptual de este trabajo, se presenta en la Figura XII. 2 una simplificación de las características descritas por medio de siete perfiles en dirección sur-norte, a los cuales se les ha incluido las unidades geohidrológicas con algunas de sus fallas y fracturas, se define de manera general las zonas de recarga y se asignan los sitios de las condiciones de borde establecidas en la generación del modelo conceptual, con la

culminación de este trabajo queda de manifiesto que se logra tener un gran avance en la conceptualización geohidrológica de los acuíferos dentro de la cuenca del lago de Cuitzeo.



**Figura XII. 2. Modelo geohidrológico conceptual de la cuenca del Lago de Cuitzeo**

### **XIII. APORTACIONES Y CONTRIBUCIONES**

Las aportaciones y contribuciones que se tienen en este trabajo de tesis es de que se realizó una conjunción de la información relevante e integrable para la realización del modelo conceptual dentro de la cuenca del Lago de Cuitzeo, con el se llega avanzar en este terreno que se tiene poco estudiado en México, porque en el modelo que se plantea se conocen mejor las características del subsuelo, se analizan los niveles piezométricos del agua y se logra tener una configuración del basamento de la cuenca del lago y porque es la primera idea con este fin en la zona de estudio ya que anteriormente se han realizado simulaciones del flujo considerando al modelo conceptual sin un planteamiento claro, esto lo hacen debido que desconocen la geometría de los acuíferos y algunas de las propiedades del mismo modificando o alterando valores que considera el simulador u operador del software necesarios para ajustar la simulación del flujo y que no necesariamente son los que se tienen que afectar, sino más bien se tendría que recurrir al planteamiento del modelo conceptual y determinar si son correctas las modificaciones que se plantean para la simulación del flujo.

## XIV.- BIBLIOGRAFÍA

Armienta, M.A.; Zamora, V. y Juárez, F., 1994. Manual para el análisis químico de aguas naturales, en el campo y el laboratorio, Comunicaciones Técnicas, serie de docencia y divulgación No. 4 IGFUNAM.

Arredondo-Fragoso, J.J. 1983. Levantamiento gravimétrico en la zona central de la laguna de Cuitzeo, Michoacán. Informe 29-83 CFE. Gerencia de proyectos geotérmicos. México. Inédito.

Arroyo- Serrato, A. 1999. Informe del estudio geohidrológico realizado en terrenos de Cd. Industrial cuarta etapa, Morelia, Michoacán, Inédito.

Cedillo F., Silva R., y Vargas H., 1981. Estudio geohidrológico Los Azufres-Cuitzeo, Estado de Michoacán. Informe 37/81 Tomo I y IV. CFE, Gerencia de proyectos geotérmicos. México. Inéditos.

CNA (Comisión Nacional del Agua), 1990. Estudio geohidrologico cuantitativo del acuífero Morelia-Queréndaro, Mich. México. Inédito.

COMAPAS, 2001. Dictamen del reconocimiento Geohidrológico-Geofísico, realizado en la unidad La Cantera, del IVEM, municipio de Tarímbaro, Michoacán, Inédito.

Cuevas-Villanueva, R.A. 2002. "Determinación de la calidad del agua en pozos localizados en la Cuenca de Cuitzeo, Michoacán y alternativas de tratamiento para su mejoramiento". Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de México. México.

Deutsh, W.J. 1997. Groundwater geochemistry, 1ª edición, Editorial Lewis Publisher, Estados Unidos.

DOF, 1994. Diario Oficial de la Federación. NOM-127-SSA1-1993. Salud ambiental, agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamiento a que debe someterse el agua para su potabilización, México.

Domenico, P.A: y Schwartz, F.W., 1998. Physical and chemical hydrogeology, 2ª edición, Editorial John Willey and Sons. Estados Unidos.

Droste, R.L. 1997. Theory and practice of water and wastewater treatment, 1ª edición, Editorial John Willey and Sons., Estados Unidos.

EPA, 2002. Environmental Protection Agency. Office of ground water and drinking water. National Primary and Secondary Drinking Water Regulations, Estados Unidos.

Eric 2, 2004. Estaciones climatológicas del Estado de Michoacán. Versión CD-Room.

Estudios Geofísicos del Subsuelo, S.A. 1998. Estudio Geofísico para localizar agua subterránea en la colonia Los Ángeles, Morelia, Mich., Inédito.

Ewa Azyrkaruk (2004). Tectonic implications of geomorfologic and structural characteristics of the Morelia-Acambay fault system, central Trans-Mexican Volcanic Belt. Instituto de Geofísica de la UNAM. p.p. 107.

Fair, G.M.; Geyer, J.C. y Okun, D.A., 1997. Purificación de aguas y tratamiento y remoción de aguas residuales, Vol II, 1ª edición, Editorial Limusa, México.

Ferrari L., Garduño V.H., Pasquaré G. and Tibaldi A., 1994. Volcanic and tectonic evolution of Central Mexico: Holocene to Present. Geofísica Internacional, v. 33, p. 91105.

Fetter, C.W. 2001. Applied Hydrogeology, 4ª edición, Editorial Prentice Hall, Estados Unidos.

Fetter, C.W. 1999. Contaminant hydrogeology, 2ª edición, Editorial Prentice Hall, Estados Unidos.

García, E. 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köpen (para adaptarlo a las condiciones de la Republica Mexicana. Instituto de Geografía, UNAM. México.

García-Estrada, G.H. 2006. Modelado gravimétrico de la cuenca de Cuitzeo, Mich.. CFE, Gerencia de proyectos geotermoelectricos, Morelia, Mexico. Inédito

García-Vega, E. 2004.

Garduño, V.H. 1999. Marco Tectónico del Estado de Michoacán. Carta Geológica de Michoacán escala 1:250 000, Editores Corona-Chávez P. e Israde-Alcántara I., UMSNH. México.

Garduño V.H. y Gutierrez A., 1992. Magmatismo, hiatus y tectonismo de la Sierra Madre Occidental y del Cinturón Volcánico Mexicano. Geofísica Internacional. 31, pp. 417-429.

Garduño V.H., Israde I., Francalanci L., Carranza O., Chiesa S., Corona P., y Arreygue E., 1997. Sedimentology, volcanism and tectonics of the southern margin of the lacustrine Basin of Maravatio and Cuitzeo, Mich. IAVCEI general assembly. P. 1-13.

Garduño V.H., e Israde I., 1998. Michoacan Lake distric: Cuitzeo and Yuriria lacustrine Basins, Los Azufres caldera and Valle de Santiago volcanic field. Amqua 98 p.1-28.

Gómez, A. C. 2000. Evaluación fisicoquímica, bacteriológica y radioquímica en diez pozos de agua de la ciudad de Toluca, México, Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de México, México.

Gutiérrez, A. 1983. Informe geológico del área norte de la Laguna de Cuitzeo. SARH, Residencia de Geohidrología. Inédito.

GUTMED, S.A. 2002. Reporte geofísico de un sondeo eléctrico vertical complementario para evaluar las condiciones acuíferas, en los predios ubicados al occidente de la comunidad de Jesús del Monte, municipio de Morelia. Inédito.

Hem, J.D. 1992. Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water, 3ª edición, US Government Printing Office, Estados Unidos.

Henry, J.G. y Heinke, G. W., 1999. Ingeniería Ambiental, 2ª edición, Editorial Prentice Hall, México.

INEGI, 1990. Censo de población y vivienda 1990. Resultados definitivos. Michoacán. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. México.

INEGI, 2000. Censo de población y vivienda 2000. Resultados definitivos. Michoacán. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. México.

Israde Alcantara I. y Martínez L., 1986. Contribución al estudio Geológico de la transición Pacífico-Tetis en el área de Zitácuaro, Mich., México. Tesis prof. De ESIA-IPN.

Israde-Alcántara, I. 1999. Los lagos volcánicos y tectónicos de Michoacán. Carta geológica de Michoacán escala 1:250 000, Editores Corona-Chávez P. e Israde-Alcántara I., UMSNH, México.

Israde-Alcantara I. and Garduño-Monroy V.H. 1999. Lacustrine record in volcanic intra-arc setting: the evolution of the late Neogene Cuitzeo basin system (Central-Western Mexico, Michoacan). *Paleo* 151. p. 209-227.

Israde-Alcantara I. y Garduño-Monroy V.H. 2004. La geología de la región de Morelia. En: Victor Hugo Garduño Monroy (Editor) contribuciones a la geología e impacto ambiental de la región de Morelia. Ed. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Pp.:137-155.

Manahan, S. 1996. Environmental Chemistry, 6ª edición, Editorial CRC Press. INC. Estados Unidos.

Marini, L.; Canepa, M.; Cipolli, F.; Ottoneollo, G. y Zuccolini, M.V. 2001. "Use of stream sediments chemistry to predict trace elements chemistry of groundwater. A case study from the Bisagno valley (Genoa, Italy)", *J. Hydrol.*, 241:194-220.

Martínez S. M., y Hobson B. (1907). Restos de plantas en basalto. *Boletín de la sociedad Mexicana de geografía y estadística*. Tomo III. 15. p 119-141.

Mendoza-Cantú, M.E. 2003. Regionalización geomorfológica de la cuenca del Lago de Cuitzeo, Michoacán. Bases para su Ordenamiento Territorial. Implicaciones del cambio de cobertura vegetal y uso del suelo en el balance hídrico a nivel regional. El caso de la cuenca del Lago de Cuitzeo. Tesis doctoral, Instituto de Geofísica, UNAM. México.

Miller W.E. y Carranza, Castañeda O. 1984. Late Cenozoic Mammals from central Mexico: *Journal of vertebrate paleontology*. V.4, 2. p 216-236.

Mora-Rodríguez, J. 2001. "Análisis de Flujo de Agua Subterránea en Dos Dimensiones por el método Integral de Diferencias Finitas caso de estudio Acuífero de Morelia", Tesis de Licenciatura de la Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH, México.

Nalco, 1994. Manual del agua. Su naturaleza y tratamiento. Aplicaciones, Tomo I, Editorial McGraw-Hill, Estados Unidos.

M. Onida, D. Sabatini, I. Israde-Alcantara, V.H. Garduño (1998). Evoluzione del Bacino lacustre Neogenico di Charo, Michoacán, México. *Rev. Istituto Lombardo. Academia di Science e leetere. (Rendiconti.)* B129, p. 325-341.

Pasquaré G., Ferrari L., Garduño V., Tibaldi A., y Vezzoli L. 1991. Geologic map of the central sector of the Mexican Volcanic Belt, States of Guanajuato and Michoacan, Mexico. University of Milano, Editado por the Geological Society of America, Map an Chart series, MCH072.

Pelig-Ba, K.B. 1998. Trace elements in groundwater from some crystalline rocks in the upper regions of Ghana, *Water, Air, Soil poll.* 103:71-89.

Pérez Huerta, S. 2002. Modelo de gestión del acuífero Morelia-Queréndaro (Visual MODFLOW). Tesis de licenciatura, Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH. México.

Piper, A.M. 1944. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. *Transaction, American Geophysical Union* 25:914-23.

Riquelme-Alcantar, R. 2000. Estudio Geohidrológico-geofísico Colonia de Coro municipio de Zinapécuaro Estado de Michoacán, México. Inédito.

Rodier, J. 1998. Análisis de las aguas. Aguas naturales, aguas residuales, agua de mar, Editorial Omega, España.

SARH (Secretaria de Agricultura y Recursos Hidráulicos), 1993. Estudio de diagnostico de las condiciones geohidrológicas actuales y análisis de alternativas de operación del acuífero Morelia-Queréndaro, Michoacán. México. Inédito.

Segovia, N.; Tamez, E.; Peña, P.; Iturbe, J.L.; Hernández, E.; Aranda, P. y López-Castañares, R. 1999. Radon and radium determination in groundwater from volcanic zone in Central Mexico, Env. Radio. Anal., 37-44.

Seoanez, M. 1996. Aguas residuales urbanas. Tratamientos naturales de bajo costo y aprovechamiento, 1ª edición, Editorial Mundi-Prensa, España.

Serieyssol K., Israde I. y Gasse F. 1998. *Thalassisira dispar comb.nov.*, and *T. Cuitzeo-nensis spec.nov.* (bacillariophyceae) found in Miocene sediments from France and Mexico. *Nova Hedwigia*. V.66. pp 17-186.  
Silva C. Jesús 1998. Determinación de las condiciones hidrogeológicas y de calidad de agua de los acuíferos del Valle Morelia-Queréndaro. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH, México.

Silva-Mora, L. 1995. Carta geológica de México escala 1:100, 000. Hoja Morelia 14Q-g(2). Resumen de la geología de la hoja Morelia. Estado de Michoacán y Guanajuato. Instituto de Geología de la UNAM. P 1-25.

Snoeyink, V.L. y Jenkins, D. 1996. Química del Agua, 1ª edición, Editorial LIMUSA, México.

Stumm, W. y Morgan, J.J. 1996. Aquatic Chemistry, 3ª edición, Editorial Academic Press., Estados Unidos.

Tóth, J.A. 1963. A theoretical analysis of ground-water flow in small drainage basin. *Journal of Geophysical Research* 68, no. 16:4795-4811.

Visual ModFlow 3.1. Software