



0301 5

12

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
INSTITUTO DE GEOFÍSICA

" ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO DEL SISTEMA ACUÍFERO DE LA
CIÉNEGA DE CHÁPALA, MICHOACÁN, ENFOCADO A UNA
GESTIÓN SUSTENTARLE".

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
DOCTORADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA (AGUAS
SUBTERRÁNEAS)

PRESENTA

JOSÉ TEODORO SILVA GARCÍA

CIUDAD UNIVERSITARIA

NOVIEMBRE 2002

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

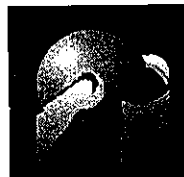
DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA



Universidad Nacional Autónoma de México

Of. No. PCT/JOCE/536/01

Asunto: Asignación de jurado para examen de grado.

TEODORO SILVA GARCÍA

Estudiante de Doctorado
Aguas Subterráneas
Presente,

El Comité Académico del Posgrado, reunido en sesión ordinaria el 29 de mayo del año en curso, aprobó a los siguientes investigadores como su jurado de examen de grado para defender la Tesis titulada "Análisis geohidrológico del sistema acuífero de la ciénega de Chápala, Mich., enfocado a una gestión sustentable":

Dr. Rafael Huizar Alvarez	Presidente
Dr. Javier Alcocer	Vocal
Dr. Gerardo Boceo	Vocal
Dr. Hugo Delgado Granados	Vocal
Dr. Ramiro Rodríguez Castillo	Secretario
Dra. María Vicenta Esteller	Suplente
Dra. Birgit Steinich	Suplente

Sin otro particular por el momento, reciba un saludo cordial.

Atentamente,

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPÍRITU"

Ciudad Universitaria/a 30 de mayo de 2001

EL COORDINADOR DEL PROGRAMA

DR. J. OSCAR CAMPOS ENRIQUÉZ

c.c.p.

Tutor
Archivo



Para mi esposa YOLANDA,
quien en tiempos como hoy...
pero de hace 17 años...su amor
se quedó conmigo para siempre.
Gracias Bolonbronchas.

Para *mi* hijo ROGER (Cabuyas, Temeboyas)
Mi principal motivación de superación

Para mi madre... Ma Beta...con el amor de siempre.

AlDocki

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

AGRADECIMIENTOS

Mi especial reconocimiento:

Al Ing. José Luis Duarte Aranda, Jefe del Distrito de Riego 024, de la CNA, cuyo apoyo logístico fue determinante para el desarrollo de este proyecto, esperando que sus perspectivas del mismo se hayan cumplido.

A los Presidentes y Gerentes de los Módulos de Riego de Cumuato, La Palma de la Génega y Ballesteros de San Cristóbal, Sres. Leonel Zepeda Razo, Jorge Buenrostro Calderón, Margante Sánchez Gil, Ricardo López Avalos, Jesús Elias Castellanos y José Luis Montes Estrada, quienes en todo momento mostraron interés por los avances del mismo y apoyando cuando fue necesario.

Al Dr. José Rosas-Elguera, que reviso el apartado de Geología, por lo cual le expreso mi especial gratitud por sus comentarios y sugerencias.

Al CONACYT-SIMORELOS y el IPN, organismos que soportaron financieramente la elaboración de estos trabajos, a través de su política de hacer investigación aplicada, congruente con el lema de nuestro instituto "La Técnica al Servicio de la Patria".

Mención especial para mi maestro y ahora también amigo el Dr. Ramiro Rodríguez Castillo, quien desde el primer día de trabajo de este proyecto doctoral contribuyó de manera determinante en el desarrollo del mismo.

Parte fundamental fue la minuciosa revisión que al trabajo hicieron los sinodales asignados, para cada uno mi especial gratitud, por que gracias a ellos este documento fue sustancialmente mejorado.

Finalmente, este trabajo se comparte con mis amigos y colaboradores: Salvador Ochoa Estrada, Federico Navarrete Ramírez, José Alfredo Ramos Leal, Rodrigo Mondragón Guzmán y Roberto Maciel

índice

1. AGRADECIMIENTOS	3
RESUMEN	6
ABSTRACT	8
2. INTRODUCCIÓN	10
1.1 Antecedentes.....	11
1.2 Objetivo y metas.....	13
1.3 Generalidades.....	13
3. METODOLOGÍA	17
3.1 MARCO GEOLOGICO	20
3.1 Estratigrafía.....	21
3.3 Análisis morfométrico.....	27
4. EL SISTEMA ACUÍFERO	31
4.1 Funcionamiento del acuífero.....	33
4.2 Hidrogeoquímica.....	34
4.3. Prospección geoelectrka.....	45
4.4. Comunicación hídrica lago-ciénega.....	56
4.5 Balance hidrológico.....	67
5. VULNERABILIDAD DEL ACUÍFERO	76
6. SUSTENTABILIDAD HÍDRICA	80
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	95
8. BIBLIOGRAFÍA	98

Índice de Figuras

Fig. 1.3.1.1 Esquema de localización del Distrito de Riego -Ciénega de Chápala..	14
Fig. 1.3.3.1 Esquema regional hidrológico del área de estudio.	16
Fig. 3.1 Localización del área de estudio en relación al marco tectónico.	20
Fig. 3.1.1 Edades radiométricas reportadas para el rift de Chápala.	22
Fig. 3.1.2. Columna geológica de la región de Chápala.	25
Fig. 3.1.3 Plano geológico regional para la Ciénega de Chápala.	26
Fig. 3.3.1 Mapa hipsométrico.	28
Fig. 3.3.2 Mapa de isolíneas de la densidad de disección del relieve.	29
Fig. 4.1 Sección geológica esquemática en la Ciénega de Chápala.	31
Fig. 4.1.1 Esquema del mecanismo hidrodinámico del acuífero.	34
Fig. 4.2.1 Localización del monitoreo hidrogeoquímico.	35
Fig. 4.2.2 Plano de isolíneas de STD.	36
Fig. 4.2.3 Distribución de la Conductividad Eléctrica.	38
Fig. 4.2.4 Plano de isolíneas de temperatura.	39
Fig. 4.2.5 Diagrama de Richard (1954)..	41
Fig. 4.2.6 Distribución espacial de Salinidad Efectiva.	42
Fig. 4.2.7 Salinidad potencial.	43
Fig. 4.2.8 Diagrama de Piper-Hill.	44
Fig. 4.3.1 Perfil geoelectrico "Ciénega".	48
Fig. 4.3.2 Seudo-sección resistiva "Ciénega".	49
Fig. 4.3.4 Relación lineal R_e vs.	54
Fig. 4.4.1 Diversos mecanismos de interacciones lago-agua subterránea.	57
Fig. 4.4.2 Esquema funcional de comunicación hidráulica Lago-Ciénega de Chápala.	58
Fig. 4.4.3 Puntos de muestreo en el acuífero de la Ciénega.	59
Fig. 4.4.4 Mapa de isocontenidos de fosfatos.	61
Fig. 4.4.5 Esquema de isoconcentraciones de cloruros.	63
Fig. 4.4.6 Esquema de asociación CE y T .	64
Fig. 4.4.7 Mapa piezométrico.	66
Fig. 5.1 Plano de vulnerabilidad DRASTIC.	79
Fig. 6.1 Distribución del Índice de densidad de pozos.	84
Fig. 6.2. Distribución del índice de extracción..	85
Fig. 6.3. Distribución del índice de calidad química del agua.	87
Fig. 6.4 Distribución del índice de suelo.	89
Fig. 6.7 Esquema general de distribución del índice de Veda.	94

RESUMEN

El área de estudio, se localiza al noroeste del estado de Michoacán, correspondiendo con la jurisdicción del distrito de riego No. 024 de la Comisión Nacional del Agua, con una superficie de 460 Km²; geológicamente es parte del extremo oriente del graben de Chápala.

En la zona existen cuatro unidades hidrogeológicas en explotación que son: los depósitos lacustres pliocénicos, los basaltos y andesitas correspondientes a las vulcanitas indiferenciadas del mioceno plioceno, las rocas basálticas pliocénicas y finalmente las rocas basálticas cuaternarias.

En el proceso de recarga del acuífero de la Ciénega, sobresale la comunicación hídrica existente con los cuerpos de agua superficial que delimitan la región de estudio (Lago de Chápala, Río Duero y Río Lerma); con flujos preferenciales del lago y ríos hacia el acuífero, lo cual pudo comprobarse al analizar tendencias piezométricas e hidrogeoquímicas.

Hidráulicamente, el sistema acuífero de la Ciénega se comporta como semiconfinado en su porción central y libre hacia las márgenes de las prominencias volcánicas que lo delimitan. Los cortes litológicos de algunos pozos, así como información geofísica, permiten confirmarlo ya que se ha detectado la presencia de un estrato arcilloso ampliamente distribuido en el área con espesores de hasta 8 metros.

Se identificaron las diversas facies químicas de agua presentes en la Ciénega de Chápala, el 80 % de los sitios monitoreados corresponden con bicarbonatada-sódica, concentrándose en su porción centro y N-NE; en menor proporción (10%) con bicarbonatadas-calcica (área NO) y el resto de sitios se asocia a un agua clorurada-sódica, vinculada a un ambiente termal presente en la región sur (Los Negritos, Municipio de Villamar, Mich.).

Para la obtención de valores de transmisividad en función de la resistividad/ se aplico el método Kosisnski; para ello, se contó con datos de 6 pruebas de bombeo y de 8 sondeos eléctricos verticales, distribuidos en sección en la porción central de la Ciénega. La proporción encontrada fue de tipo lineal resultando la expresión $T = 2.168 R_e - 0.0254$. Es de hacer notar que los valores obtenidos por el factor de formación (F), objetivo también por definir, fueron del orden de 4.23 a 9.70, lo que hace suponer que la formación acuífera que se está considerando es una unidad principalmente arenosa (Humble y Wyllie, en Astier, 1975).

El régimen de explotación actual del acuífero de la Ciénega de Chápala, en relación directa con las diferentes variables de entradas y de salidas resultó con un excedente para el año 2000 de 267.86 Mm³, mismo que pudiera ser mayor si se incorporan flujos regionales ascendentes y laterales, los cuales al momento no fue posible evaluar.

Se generó el mapa de vulnerabilidad del acuífero DRASHC, destacando del mismo el papel preponderante que juegan las estructuras regionales (fallas y fracturas) como los principal modificadores del grado de vulnerabilidad, incrementándolo notoriamente. Los valores más bajos (130) se encontraron hacia las zonas de menor pendiente y los valores altos (220) se ubicaron hacia la considerada como zona de recarga y en las proximidades de algunas estructuras con carácter permeable como son las fallas geológicas regionales.

Paralelamente, se propone una metodología, que pueda ser aplicada en otras regiones, encaminada a determinar estrategias de manejo y operatividad de un acuífero, con criterios de sustentabilidad, específicamente a lo concerniente con la extracción del agua subterránea.

A través de la definición de un "índice de Veda" (esquema de restricción a la apertura de nuevos aprovechamientos), esta propuesta genera un sistema de información geográfica, apoyados con el programa Arcview 32, involucrando a seis parámetros específicos. Se encontró que un alto porcentaje (43%) de la Ciénega de Chápala, presenta condiciones muy altas de inequidad y vulnerabilidad, manifestándose por la explotación de agua de mala calidad (malos diseños de pozos), existencia de altas concentraciones de pozos en áreas pequeñas y un alto grado de sobreposición de dominios entre pozos.

ABSTRACT

The study area. Ciénega de Chápala, is located in the Northwest of the Michoacan State. It corresponds with the Irrigation District Num. 024 of the National Commission of Water. It has an area of 460 Km². Geologically the study area is part of the Eastern portion of the Chápala Graven.

In the area there are four hydrogeological units in exploitation; Pliocene lacustrine deposits, basalts and andesites from the so-called Intermediate volcanic sequence, Pliocene basaltic rocks and Quaternary basaltic rocks.

From the recharge mechanisms, the hydraulic communication with regional superficial water bodies (Chápala Lake and Duero River) is one of the more important. This hypothesis was verified with piezometrical and hydrogeochemical tendencies.

The Ciénega aquifer system is semiconfined in the central area and unconfined to the margins of the surrounding volcanic formations. A low permeability clayey layer was detected by means of geoelectrical data as well as with well geological logging. Its presence confirms the previous aquifer description. This layer is widely distributed in the Ciénega area. It has until 8m thickness. The origin of the lacustrine sediments also supports the aquifer characterization; The Ciénega is confirmed by continuous successions of fine to very fine grain layers.

Familial water were identified in the Ciénega area. 80 % of the monitored sites are bicarbonate - sodium - calcic type, corresponding to the central and N-NE portion. In less proportion, 10 %, the types are bicarbonate - sodium - magnesian. The rest is sodium - chlorine type related to the prevalent thermal environment in the southern region (Los Negritos, Municipio de Villamar, Mich.).

Transmissivity, T, values as a function of the electrical resistivity were obtained applying the Kosinski method. 8 pumping tests and 7 vertical electrical soundings, VES's, were used. The VES's were distributed in a profile in the center part of the Ciénega area. A linear relation was obtained. $T=2.168 R_e^{-0.0254}$

The hydrologic balance in the Chápala aquifer is positive for 2000. The obtained surplus was 267.86 Mm³. In the balance, regional flows were not incorporated. Their consideration can increase the surplus.

The aquifer vulnerability map, DRASTIC, was generated. Regional structures, faults and fractures, play a relevant role in the vulnerability assessment. They act as the main vulnerability modifiers, increasing it notoriously.

A methodology for the determination of the "Hindrance Index" (índice de Veda) is proposed. It is based on a Geographic Information System. This proposal is a first approximation. This Index can help in the definition of strategies for the management of the abstraction in the Irrigation District 024.

INTRODUCCIÓN

E l manejo de recursos naturales está en función de una serie de factores de orden cultural, político y económico. Cada grupo poblacional define sus propias políticas de aprovechamiento. Las Directrices generales son propuestas o reglamentadas por las instituciones gubernamentales encargadas de la administración del agua; sin embargo, en las zonas rurales no existen planes de manejo de dichos recursos, lo que genera problemas no sólo en el abastecimiento sino en la planificación futura del mismo.

De hecho, "la falta de una adecuada caracterización de un acuífero será siempre un factor limitante en cuanto al manejo sustentable de mismo", hipótesis que justifica el desarrollo de este proyecto.

La Ciénega de Chápala no es propiamente una zona rural, ya que en ella se encuentran centros urbanos de importancia como Jiquilpan y Sahuayo que en conjunto concentran casi 170 mil habitantes.

El abastecimiento futuro para cubrir las necesidades de agua dependerá del conocimiento que se tenga del subsuelo que alberga el agua subterránea en la región, ello implica el conocer la geometría del sistema para poder predecir su evolución espacial y temporal por lo que se hace necesario definir la distribución de las unidades geológicas, sus espesores y características litológicas, así como su papel en la hidrodinámica del sistema acuífero.

El problema de abastecimiento de agua potable de las poblaciones que habitan esta región no se ha resuelto en su totalidad, de hecho, la mayoría de las comunidades que se ubican dentro de la Ciénega de Chápala no cuentan con fuentes de abastecimiento suficientes, tal es el caso de: Cuatro Esquinas, La Magdalena, El Fortín y San Gregorio.

El ámbito agropecuario, de igual forma, no cuenta con un adecuado sistema de suministro de agua, ya que en la gran mayoría de los casos, los pozos profundos del cual se abastecen, extraen agua de mala calidad química con conductividades eléctricas que en ocasiones superan los 4500 nS/cm, causando deterioro de suelos y disminución en sus índices de productividad.

Por lo anterior, en este trabajo se hace énfasis en la definición de las características y condiciones hidrogeológicas que definen el sistema acuífero de la Ciénega de Chápala, ha efecto de contribuir en la conformación de un esquema de gestión sustentable de los recursos hídricos de la zona.

1.1 Antecedentes

La región de estudio se corresponde con el Distrito de Riego No.024 de la Comisión Nacional de Agua (CNA), comprendiendo un total de 46,171 hectáreas, en su mayoría ejidal. En general, la zona cuenta con suficientes medios de riego (canales) que se abastecen principalmente del Lago de Chápala, ríos Duero y Lerma, así como de las presas de Guaracha y Jaripo.

Debido a la paulatina disminución durante la década de los noventa en los niveles de agua en el lago y las presas, el suministro de este líquido para la región ha sido insostenible, lo cual ha originado la necesidad de realizar obras de perforación de pozos profundos, lo que ha dado lugar a que actualmente el agua subterránea sea una de las principales fuente de abastecimiento para los distintos usos en la región.

Debido a lo anterior, en los últimos diez años (1990-2000), se ha empezado a notar problemas de sustentabilidad de este recurso, como son la disminución de caudales, el abatimiento en los niveles piezométricos y el deterioro en la calidad de agua (altas concentraciones de sales), entre otros, derivados de una intensiva explotación del mismo a través de aproximadamente 425 pozos en operación, no llegando aun a afectar en el balance hídrico local.

Pocos trabajos de investigación, para atender este problema, se han realizado en la Ciénega de Chápala (porción Michoacán) y los que existen se han desarrollado en la porción que corresponde al estado de Jalisco.

Así, por ejemplo, en 1990, la empresa Ariel Consultores S.A., realiza para la CNA el "Estudio Geohidrológico en la zona de Tesistán-Atemajac, Estado de Jalisco" encontrando valores negativos en el balance hidráulico para la porción Jalisciense de la Ciénega.

En 1991, la Gerencia de Estudios y Proyectos de la CNA, llevo a cabo el "Estudio Geohidrológico en la Región de Ocotlán, Jal", concluyendo que en la zona existen básicamente tres unidades geohidrológicas: basaltos, aluviones permeables y tobas de baja permeabilidad; que la principal fuente de recarga de los acuíferos es la infiltración del agua de lluvia, arroyos intermitentes y excedentes de riego y determinan valores de transmisividad en los basaltos, oscilando entre 109.81 y 155.9 m²/día.

Otro trabajo de especial relevancia es el "Estudio Hidrogeoquímico e Isotópico de la zona de Toluquilla-Ocotlán -La Barca, en el estado de Jalisco" realizado por el IMTA en 1993, en el cual se menciona que no existe recarga del Lago de Chápala hacia el acuífero de Toluquilla y que el agua subterránea de la zona de Jamay-La Barca puede estar influenciada por contribuciones provenientes del Lago; determinando, además, aspectos hidrogeológicos importantes como son áreas de recarga, dirección de flujo, tiempos de residencia, isotopía e hidrogeoquímica.

En el ámbito de la geología regional, se han publicado algunos trabajos que aportan un importante conocimiento para entender la evolución geodinámica del Graben de Chápala, destacan los realizados por Garduño et al. (1993), Rosas (1989, 1992,1997) y Delgado (1985,1991,1992 y 1995).

1.2 Objetivo y metas

Evaluar las actuales características y condiciones hidrogeológicas del acuífero de la Ciénega de Chápala, porción Michoacán, en la jurisdicción del Distrito de Riego 024 del la CNA, enfocado hacia la sustentabilidad del recurso hídrico de la zona de estudio.

Metas específicas

Caracterizar geológica e hidrogeológicamente el sistema acuífero.

Definir y en su caso cuantificar, si existe o no una conexión hidrológica entre el Lago de Chápala y el acuífero de la Ciénega de Chápala.

Determinar el balance hidrológico del área de estudio.

Definir los niveles de vulnerabilidad DRASTIC del acuífero de la Ciénega.

Proponer índices de veda local, en función de parámetros predeterminados.

1.3 Generalidades

1.3.1 Localización y vías de acceso

La zona de estudio conocida como Ciénega de Chápala (porción Michoacán), se localiza entre las coordenadas $19^{\circ} 53'$ y $20^{\circ} 14'$ de latitud norte y $102^{\circ} 29'$, $102^{\circ} 45'$ de longitud oeste, al noroeste del estado de Michoacán (Fig. 1.3.1.1). La región era originalmente un humedal, pero fue desecada por el bordo de Maltarafta. La denominación de Ciénega permaneció. Se encuentra a una altitud promedio sobre el nivel del mar de 1522 m.

Comprende parte de los municipios de Jiquípán, Sahuayo, Venustiano Carranza y Pajacuarán, con una superficie de 460 km², en donde se ubican un total de 32 poblaciones, concentrando a 165,979 habitantes según el censo poblacional del año 2000 elaborado por el INEGI.

Las principales vías de comunicación son: la carretera federal No 15 México-Guadalajara, en su tramo Villamar-Sahuayo, así como la carretera estatal No. 5, en su tramo Sahuayo-La Barca; además de un sinnúmero de caminos de terracería transitables todo el año que entroncan a las vías principales y que comunican con rancherías distantes.



Fig. 13.1.1 Esquema de localización del Distrito de Riego 024-Ciénega de Chápala..

1.3.2. Clima

El clima predominante en la región de la Ciénega de Chápala es, según la clasificación de Koppen modificada por García (1988), semicálido subhúmedo con lluvias en verano (A)C(wl)(w), con un porcentaje de precipitación invernal menor de 5 %; siendo marzo el mes que registra la menor precipitación (40 mm) y julio el mes con la máxima de 1930 mm. La precipitación media anual es de 800 mm, con un rango de escurrimiento superficial del 10 a 20%; siendo la temperatura promedio anual de 18°C

El periodo de lluvias está comprendido entre los meses de mayo a octubre, registrándose las precipitaciones mayores durante julio, la época de estiaje es de noviembre a abril. Los valores más altos de evaporación se dan en mayo alcanzando los 300 mm.

1.3.3 Hidrología

Con base en las cartas hidrológicas Colima y Morelia Escala: 1: 1'000,000, editadas por SPP-INEGI (1988), la zona de estudio queda ubicada dentro de la Región Hidrológica No. 12 del Río Lerma, en la Cuenca Lago de Chápala, específicamente en la Subcuenca del Río Sahuayo (Fig. 1.3.3.1).

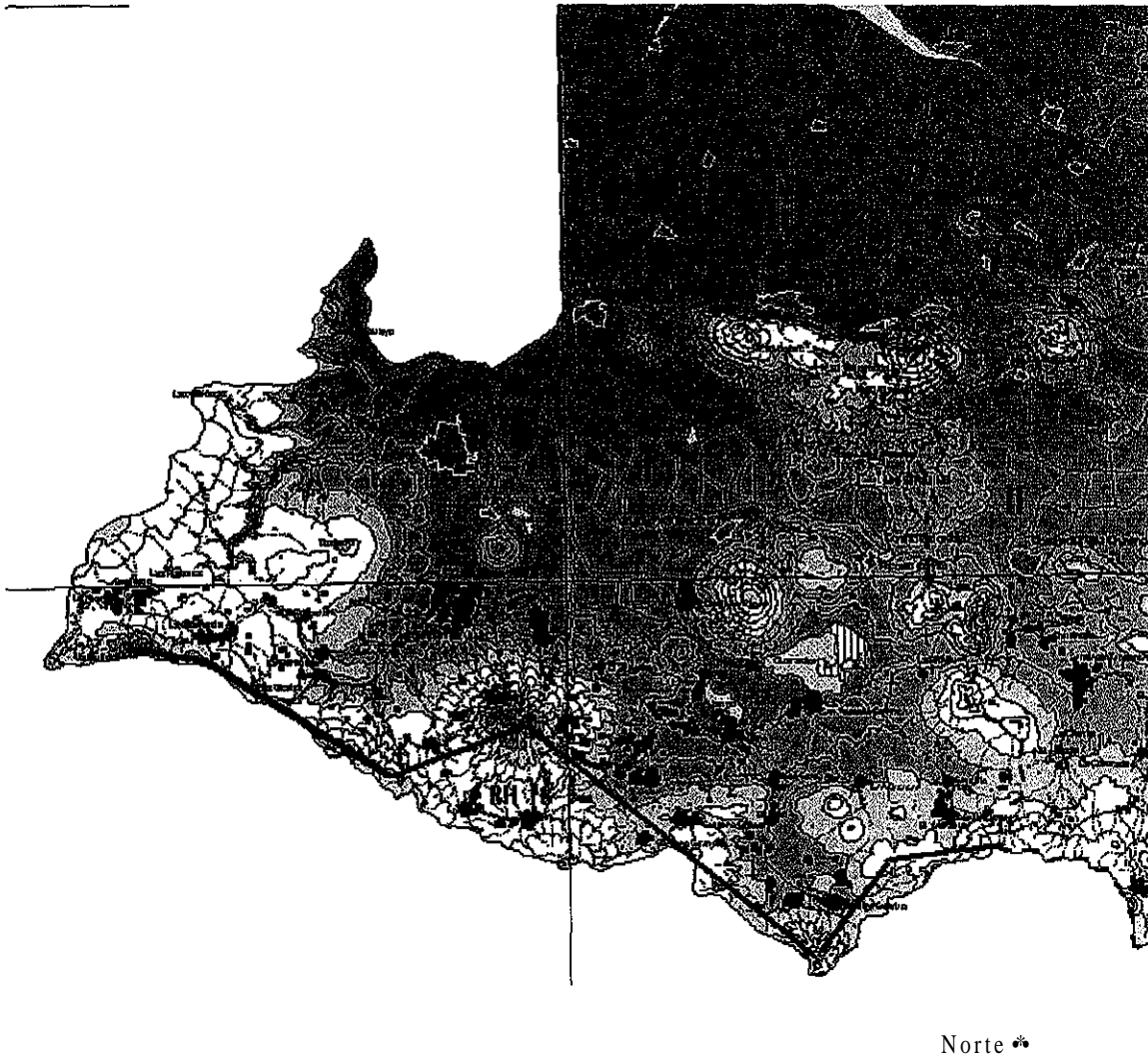


Fig. 13.3.1 Esquema regional hidrológico del área de estudio (INEGI, 1988)

- RH12.- Región Hidrológica del Río Lerma.
 - RH18.- Región Hidrológica del Río Balsas.
 - I. Cuenca Lago de Chapala. Subcuenca del Río Sahuayo.
 - II. Cuenca del Río Lerma-Chapala. b) Subcuenca del Río Duero
- Línea roja continua: Limite de cuenca. Línea roja discontinua: limite de subcuenca

Destacan como corrientes superficiales más importantes, los ríos Jiquipán y Sahuayo, de tipo intermitente, localizados al SO de la región cuya dirección de escurrimiento preferencial es hacia el Este confluendo hacia la parte media de la Ciénega, específicamente en el canal de riego Guaracha, para desembocar en la estación de bombeo La Palma, desde son enviadas al Lago de Chápala.

También existen numerosos arroyos originados en las prominencias volcánicas que delimitan a la Ciénega como son la Sierra de Pajacuarán, los volcanes San Francisco y Cerro Grande, disecados en términos generales por drenajes de tipo radial divergente típico de estas estructuras, destacan los arroyos Guayabo, El Salitre, Hondo, El Cometa y Sahuayo. De especial importancia hidrológica son el Lago de Chápala y los ríos Lerma y Duero que delimitan el distrito de riego hacia la porción Nor-Noroeste.

METODOLOGÍA

Durante el desarrollo de la presente investigación se aplicaron varios métodos y técnicas de trabajo de campo y gabinete según fue la actividad realizada.

Entre abril y mayo del 2000, se obtuvieron un total de 88 muestras de agua, para su análisis químico, provenientes de un igual numero de pozos profundos, tomando al momento de la colecta, con un conductivímetro portátil, datos como temperatura, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos y pH; en la medición de la alcalinidad, nitratos y fosfatos, se utilizó de igual forma instrumentos portátiles.

Por otro lado, la determinación de los demás elementos químicos (Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^+ , K^+ y HCO_3^- / Cb y SO_4 .) fueron realizados en el laboratorio del Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional (CJIDIR) - Michoacán, siguiendo en todos los casos patrones establecidos en el Standar Methods, APHA (1998). Con los diagrama de Piper y de Richard, se definieron las distintas facies químicas de agua prevalecientes en la Ciénega y la calidad del agua para su uso en la agricultura respectivamente.

Destacan como corrientes superficiales más importantes, los ríos Jiquipán y Sahuayo, de tipo intermitente, localizados al SO de la región cuya dirección de escurrimiento preferencial es hacia el Este confluyendo hacia la parte media de la Ciénega, específicamente en el canal de riego Guaracha, para desembocar en la estación de bombeo La Palma, desde son enviadas al Lago de Chápala.

También existen numerosos arroyos originados en las prominencias volcánicas que delimitan a la Ciénega como son la Sierra de Pajacuarán, los volcanes San Francisco y Cerro Grande, disecados en términos generales por drenajes de tipo radial divergente típico de estas estructuras, destacan los arroyos Guayabo, El Salitre, Hondo, El Cometa y Sahuayo. De especial importancia hidrológica son el Lago de Chápala y los ríos Lerma y Duero que delimitan el distrito de riego hacia la porción Nor-Noroeste.

METODOLOGÍA

Durante el desarrollo de la presente investigación se aplicaron varios métodos y técnicas de trabajo de campo y gabinete según fue la actividad realizada.

Entre abril y mayo del 2000, se obtuvieron un total de 88 muestras de agua, para su análisis químico, provenientes de un igual numero de pozos profundos, tomando al momento de la colecta, con un conductivímetro portátil, datos como temperatura, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos y pH; en la medición de la alcalinidad, nitratos y fosfatos, se utilizó de igual forma instrumentos portátiles.

Por otro lado, la determinación de los demás elementos químicos (Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^+ , K^+ y HCO_3^- / Cb y SO_4 .) fueron realizados en el laboratorio del Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional (CJIDIR) - Michoacán, siguiendo en todos los casos patrones establecidos en el Standar Methods, APHA (1998). Con los diagrama de Piper y de Richard, se definieron las distintas facies químicas de agua prevalecientes en la Ciénega y la calidad del agua para su uso en la agricultura respectivamente.

Los parámetros de salinidad efectiva y potencial, se obtuvieron siguiendo el método de Palacios y Aceves (1970) con los cuales se conoció el efecto directo de las sales solubles sobre los suelos. Asimismo se elaboraron los planos de curvas de igual concentración iónica, para los casos de sólidos totales disueltos, conductividad eléctrica, temperatura, RAS, salinidad efectiva y salinidad potencial, utilizando para ello, el programa de computo SURFER y como criterio de interpolación Kriging.

Para la obtención de valores de transmisividad se desarrollaron pruebas de bombeo de corta duración en 6 localidades de la Ciénega, utilizando el método de Jacob del programa de computo GWW (1990) para su interpretación. En áreas donde no fue posible realizar dichas pruebas (principalmente por problemas de disponibilidad del usuario) se aplicó el método Kosinski (1981) obteniendo valores de transmisividad a partir de datos geoelectricos; para ello se realizaron 8 sondeos eléctricos verticales localizados en la porción central de la región con orientación NE-SO, buscando estuviesen relativamente cercanos a los pozos con pruebas de bombeo. El equipo utilizado fue un aparato de corriente continua Terrameter SAS 300, el arreglo electrodico fue el Schlumberger.

Se realizaron pruebas de permeabilidad en afloramientos tipo de las distintas unidades litológicas reconocidas en la región, tal es el caso de los depósitos aluviales, basaltos cuaternarios y materiales piroclásticos, mediante un equipo de carga constante, Guelph (Soil Moisture Equipment, 1991), obteniendo con ello valores de conductividad hidráulica. Para realizar las mediciones se usaron las cargas hidráulicas de 5 y 10 cm recomendadas por el manual de operación del permeámetro Guelph.

Tomando en consideración bancos de nivel establecidos por la CNA, se realizaron dos campañas de medición de niveles piezométricos para el año 2000, una en época de estiaje (mayo) y otro en época de lluvia (septiembre). Se construyeron 6 piezómetros dentro de la zona federal del Lago a efecto de contar con un mayor control de medición.

La realización de un balance hidrológico tuvo como objetivo principal el de conocer el actual régimen de explotación del acuífero de la Ciénega de Chápala, en relación directa con las diferentes variables de entradas y de salidas; considerando, para el primer caso, los aspectos de precipitación e índice de infiltración, aportaciones por retorno agrícola (perdidas en canales principales, tramo muerto y sobreriego) y corrientes superficiales así como retorno de aguas residuales y para las salidas se tomaron en cuenta las extracciones por bombeo directo y salidas por manantiales.

Para cuantificar el índice de vulnerabilidad del acuífero prevaleciente en la Ciénega se empleó el método DRASTIC (Auer et al. 1985). La vulnerabilidad se determina asignando un esquema jerárquico numérico a los elementos que componen las siglas en inglés: profundidad del nivel freático (Depth to water table); recarga neta (net Recharge); medio acuífero (Aquifer media); tipo de suelo (media Soil); topografía (Topography); impacto de la zona no saturada (Impact) y conductividad hidráulica (hydraulic Conductivity).

Finalmente, se propone un método encaminado a la determinación de un índice de Veda (IV) del acuífero a través de la generación de un sistema de información geográfica, apoyados con el programa Arcview 3.2. El método utilizado consistió en un análisis, por cuadrantes de 4 km², de seis factores, seleccionado después de un exhaustivo análisis de circunstancias que se dan cuando se trata de otorgar autorización para un nuevo aprovechamiento, lo que permitió obtener una densidad de información detallada del ámbito de trabajo. Los aspectos considerados fueron: densidad de pozos, volumen de extracción, calidad química del agua subterránea, calidad química del suelo, abatimiento del nivel estático y subsidencia.

Cada factor previamente fue normalizado a una escala de 0 a 1 y una vez que todos ellos han sido asignados a un rango, éstos fueron multiplicado por un peso respectivo (P); que representa de manera numérica el grado de importancia e influencia que cada uno de ellos tiene en el ámbito de manejo del agua subterránea, siendo del 5, el de mayor índice de relevancia y de 1 como el de menor impacto.

3. MARCO GEOLOGICO

La región de estudio se localiza en el sector occidental de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM), que es uno de los arcos volcánicos más relevantes de México (Fig. 3.1), donde la distribución de los elementos tectonovolcánicos presentan una orientación general este-oeste. (Rosas, 1997)

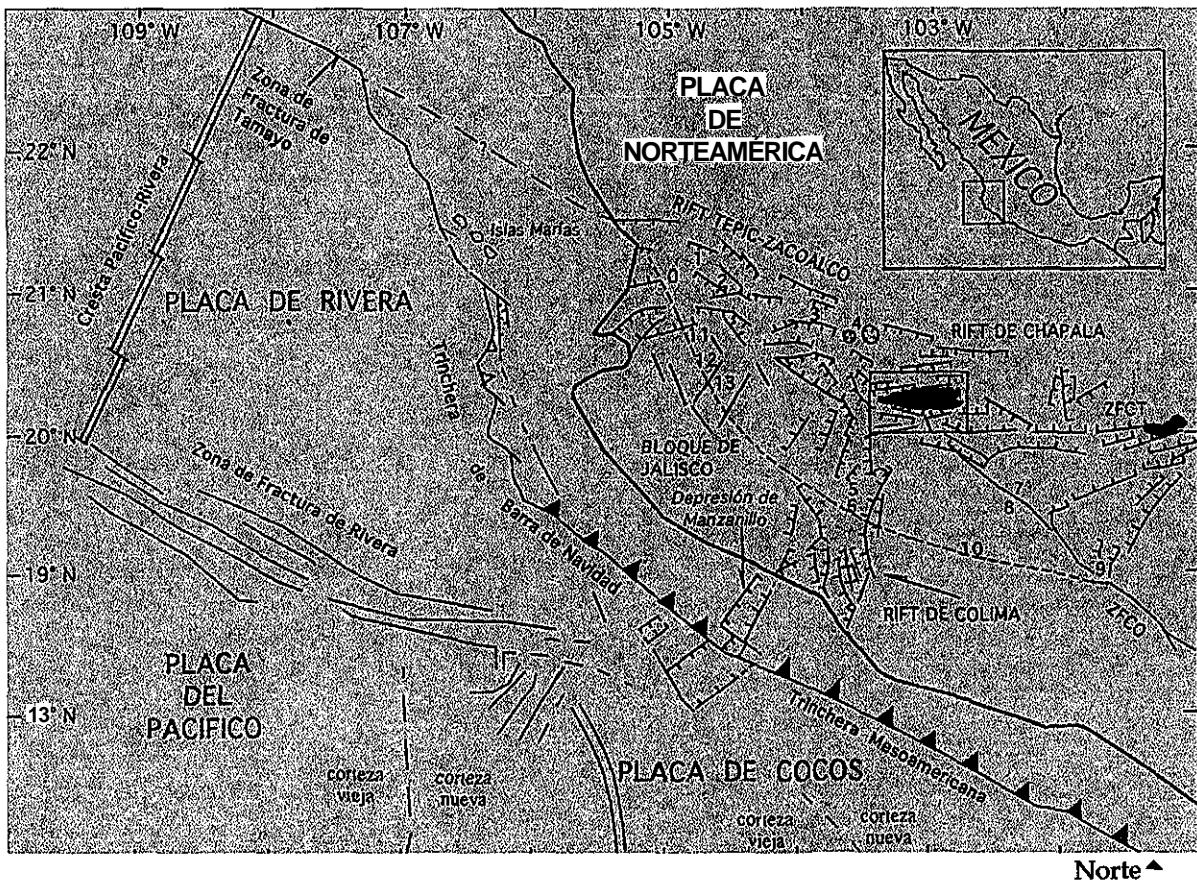


Fig. 3.1 Localización del área de estudio en relación al marco tectónico para el occidente del FVTM. Tomado de Rosas (1997).

Uno de los rasgos estructurales más notables en la porción occidental de la FVTM, es un sistema de tres rifts que se interceptan a 50 km al suroeste de la ciudad de Guadalajara, formando una unión triple continental tipo RRR (Rosas, 1997). Esta unión triple la forman los rifts de Tepic-Zacoalco, Colima y Chápala con orientaciones NO-SE, N-S y E-O, respectivamente. De manera particular, la zona de estudio se ubica en el extremo oriental del rift de Chápala donde es conocida como Ciénega de Chápala.

Las tres depresiones tectónicas anteriores alojaron y alojan extensos lagos como el de Sayula, en la porción norte del rift de Colima, el de San Marcos en el extremo SE del rift Tepic-Zacoalco y el Lago de Chápala en el rift del mismo nombre. Actualmente, solo el Lago de Chápala no es intermitente.

3.1 Estratigrafía

Algunas de las primeras publicaciones relacionadas con la zona de estudio datan de principios del siglo XX (e.g. Waitz, 1906). Otros trabajos están particularmente relacionados con el contexto geológico regional (e.g. Alian et al. 1991; Delgado, 1995). Sin embargo, pocos trabajos geológicos se han ocupado de manera específica del rift de Chápala (e.g. Rosas-Elguera et al., 1989; Garduño et al., 1993; Delgado et al., 1985, 1991; Johnson y Harrison, 1990).

Uno de los primeros trabajos geológico de esta estructura es el de Díaz y Mosser (1972) quienes sugieren que la depresión se formó por el colapso central de un anticlinal. Recientemente se ha demostrado que el rift de Chápala es la respuesta a una tectónica extensional (Rosas-Elguera et al., 1989; Garduño et al., 1993; Delgado et al., 1995).

Rosas et al. (1989) aportaron las primeras y únicas edades radiométricas para La Ciénega. En la figura 3.1.1, se ubican las distintas localidades, que para el rift de Chápala, cuenta con datos radiométricos publicados.

Según Delgado y Urrutia (1986) la estratificación del área abarca las edades desde el Mioceno Tardío al Reciente, donde cada grupo representa los diferentes eventos ocurridos en esta región.

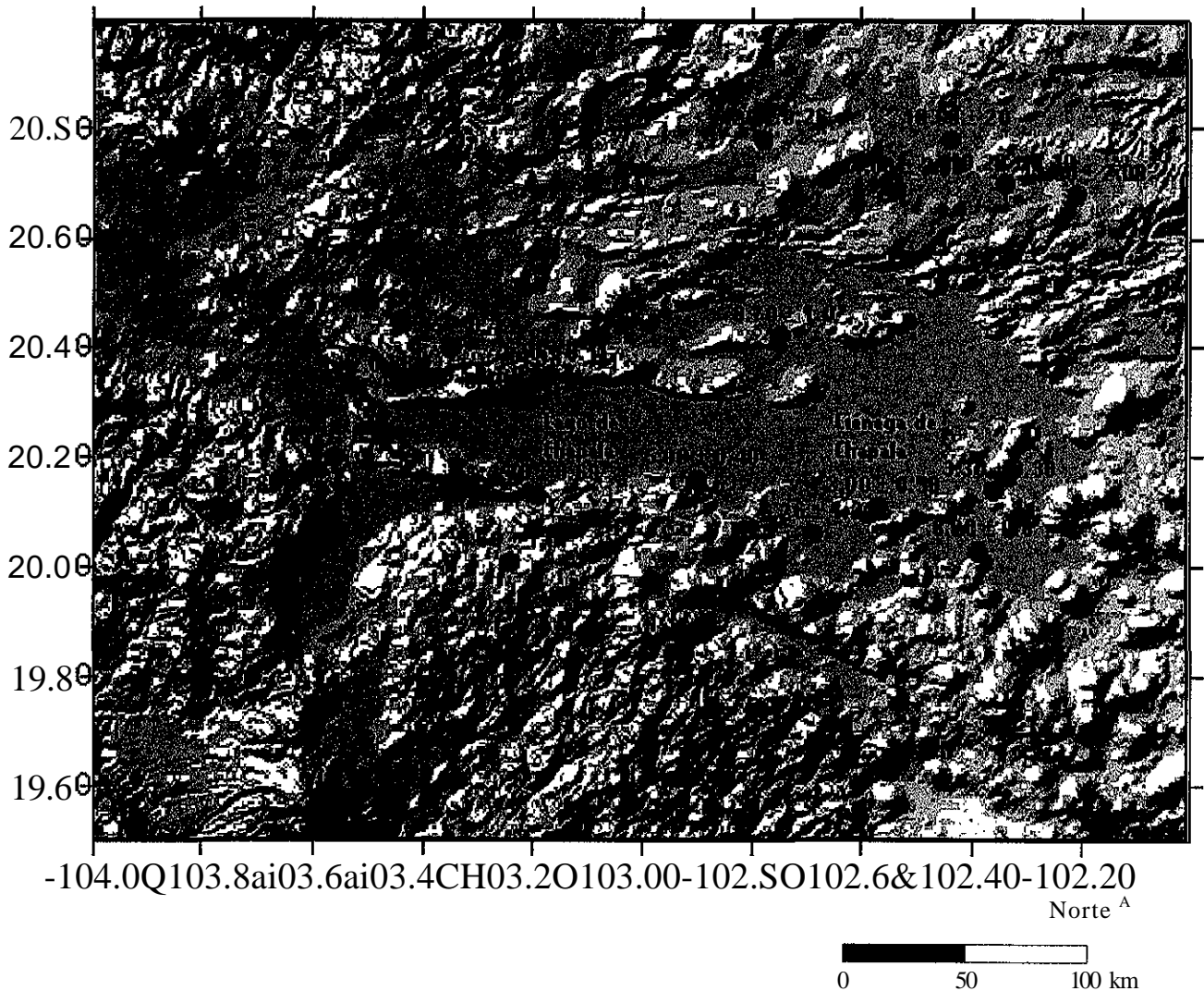


Fig. 3.1.1 Edades radiométricas reportadas para el rift de Chápala. Rosas, et ai (1989).

Las rocas más antiguas que afloran son rocas extrusivas de composición andesítica, las cuales se encuentran expuestas en las sierras que circundan al Lago de Chápala. Estas rocas están fracturadas, falladas, alteradas y mineralizadas. Estratigráficamente por encima de ellas se encuentran ignimbritas y tobas vitreas.

Estas rocas están cubiertas por derrames, brechas, tobas andesíticas y derrames basálticos que se observan fracturados y fallados. Sobre la secuencia mencionada se encuentran descansando sedimentos lacustres de la formación Chápala, consistentes en limolitas, areniscas, conglomerados con intercalaciones de tobas, vidrio y pómez. El espesor de los sedimentos es según Reyes (1985, en Delgado y Urrutia 1986) de 400 a 600 m. Arroyo(1986, en Delgado et al, 1994) estima que el espesor es de 800 m.

Delgado et al. (1994) determina que la secuencia volcano-sedimentaria tiene de 800 a 1000 m de espesor y define diez grupos estratigráficos en la región, con etapas de vulcanismo cuyas edades son: periodo Tizapán de 10.1~4.4 Ma; periodo Chápala de 6.7~4.2 Ma; periodo Travesano ~4.2 Ma; periodo Grande de 2.7~1.4 Ma; periodo Santa Cruz 1.7-0.61 Ma y periodo Acatlán Llámenes de 0.65 Ma. Se observa un hiato en la actividad volcánica entre 4.2 y 2.7 Ma.

Las Vulcanitas Indiferenciadas del Mioceno Plioceno (VIMP) incluyen andesitas y basaltos de edad Mio-Plioceno (6.3 Ma - 4.5 Ma). El Grupo Tizapán está compuesto por andesitas y basaltos. Las rocas volcánicas de las VIMP y el Grupo Tizapán fueron extraídas a través de volcanes monogenéticos como escudos, conos cineríticos, conos de lava, domos de lava y derrames fisurales. Las VIMP están distribuidas principalmente al Sur y al Este del Lago de Chápala, la Sierra de Pajacuarán es parte de este Grupo. El grupo Tizapán aflora en las cercanías del poblado la Palma; Sahuayo de Morelos y en los Cerros La Caja y El Camaleón.

El grupo Chápala comprende rocas volcánicas silíceas y los depósitos de caída de flujo, asociados con edades entre 6.7 a 4.2 Ma, mezclados con sedimentos lacustres. La base del grupo cubre concordantemente a las rocas de Grupo Tizapán y de las VIMP. Estos eventos tuvieron lugar durante el Mioceno Tardío - Plioceno Temprano y fueron también contemporáneos con la actividad volcánica del Grupo Tizapán.

El volcanismo bimodal caracterizó esta época y es la razón por la cual se observa una sobreposición de ambas actividades volcánicas y la sedimentación. Rosas (1991) define para la porción Oriente de Chápala la 2a unidad, la cual está constituida por ignimbrita, tobas, basalto y brechas.

Las intercalaciones de rocas volcánicas y de depósitos lacustres, sugieren que la actividad volcánica fue contemporánea con la subsidencia de la cuenca, también indica que la Sierra de Pajacuarán está formada por aglomerados y basaltos que subyacen a andesitas Plio-Cuaternarias.

El Grupo Travesano consiste de basaltos y andesitas con edades entre 4.0 a 4.3 Ma, con una composición similar a las rocas del Grupo Tizapán. Las rocas del Grupo Travesano cubren e intrusionan a las unidades del Grupo Chápala. Algunas lavas del Grupo Travesano muestran estructuras almohadilladas, las cuales fluyeron en condiciones subacuáticas dentro de las cuencas sedimentarias donde se encuentran los sedimentos del Grupo Chápala. En el área de estudio este Grupo aflora en los alrededores de los Poblados la Barca y Ocotlán.

El Grupo Grande, el Grupo Palo Verde y el Grupo Zacoalco, están formados por varias unidades de andesitas y basalto que constituyen volcanes, domos y conos de lava. Estas rocas cubren a los Grupos Tizapán, Chápala y Travesano. La actividad volcánica de estos grupos abarcó de 2.7 a 1.4 Ma.

Los Grupos La Zapotera, Santa Cruz y Sahuayo consisten de basaltos y andesitas extraídas a través de volcanes escudo, domos y conos de lava. La actividad volcánica del Grupo Santa Cruz abarca desde el Pleistoceno Temprano Pleistoceno Medio de 1.4 a 0.65 Ma. Los volcanes que dieron lugar a las rocas de esta unidad están asociados con el desarrollo de una caldera entre grandes fallas normales. El grupo La Zapotera es correlacionable con los Grupos Santa Cruz y Acatlán de la región de Chápala y con las rocas volcánicas de la cadena volcánica del sur de Guadalajara con edades entre 1.4 y 1.8 Ma. Esta unidad aflora en el Cerro El Pelón, el cual se encuentra entre los Poblados de Sahuayo y Jiquilpan y en el Cerro El Copito circundante al Poblado de La Palma.

La edad del Grupo Sahuayo está entre 1.3 y 1.9 Ma. El Grupo Acatlán consiste principalmente de lavas dacíticas y riolíticas expulsadas a partir de domos de lava y conos asociados con fisuras tectónicas. El volcanismo de este grupo fue contemporáneo al Grupo Santa Cruz de 1.1 Ma a menos de 0.65 Ma. En la Fig.3.1.2 se muestra la Columna Geológica de la región de Chápala y en la Fig. 3.1.3 se presenta el Mapa Geológico, (Delgado et al., op. cit.).

**TESIS CON
PALLA DE ORIGEN**

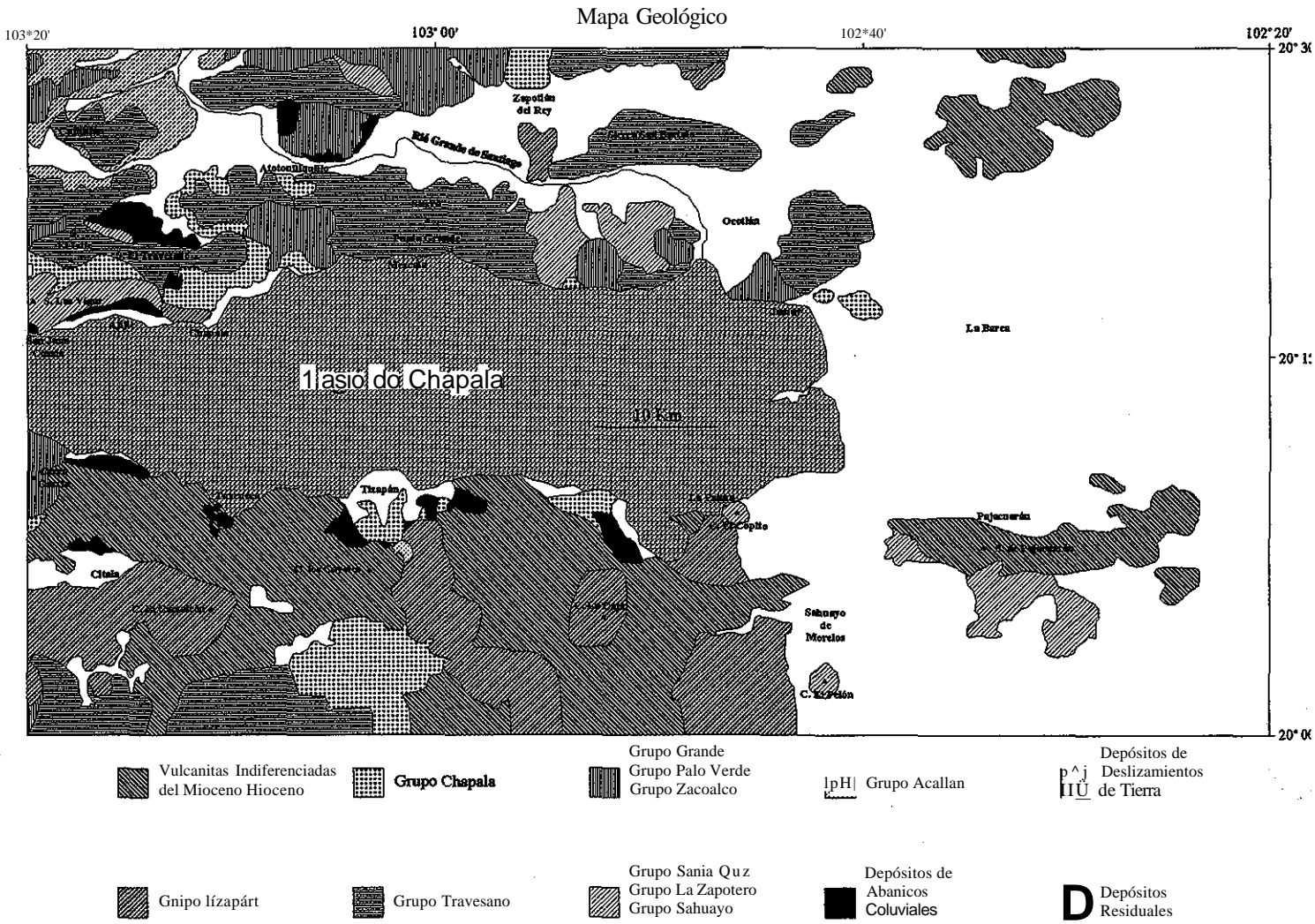


Fig. 3.1.3 Plano geológico regional para la Ciénega de Chapala. (Modificado de Delgado, 1994 y Garduño et al., 1993)

Localmente, la geología del área de estudio está compuesta por rocas volcánicas del Mioceno Tardío, depósitos lacustres, material volcánico y sedimentos del Reciente. Las Vulcanitas Indiferenciadas del Mioceno Plioceno (VTMP), (Delgado et al., op. cit.) dieron origen a la Sierra de Pajacuarán. Esta unidad tiene una composición andesítica-basáltica, se encuentra fracturada, fallada y su coloración es gris oscuro. La actividad del Reciente dio origen a la formación de los cerros El Copito y El Pelón, los cuales corresponden a volcanes de escudo, domos y conos de lava, cuya composición es de basalto y andesita.

Sobre las VIMP, se encuentra distribuido en la Ciénega de Chápala el Grupo del mismo nombre, que está compuesto principalmente por arena, arcilla e intercalaciones areno-arcillosas y arcillo-arenosas, de origen lacustre que forman cuerpos lenticulares con una gran extensión en el área de estudio. Con una gran variación en su grado de compactación y en sus espesores, que varían de metros a decenas de metros. Estos se interdigitan entre ellos y con el material volcánico hacia las Sierras circundantes. El Grupo Chápala está cubierto por depósitos lacustres Recientes y suelo residual.

Desde el punto de vista de la geología estructural, Delgado et al. (1994) reconoce seis sistemas de fallas en la región, el sistema Ajijic; Cósala; La Lima; Cítala; Cebollas y La Angostura. Para esta porción del graben de Chápala, el sistema de fallas La Angostura presenta lineamientos estructurales E-O que corresponden a fallas normales. En el caso particular de la Ciénega se encuentra delimitada en su parte Sur por la falla de Pajacuarán. Dicha falla tiene un plano inclinado de 70° N, con un escarpe en su ladera que puede alcanzar hasta los 400 m en su desnivel, su longitud es de 18 Km.

3.3 Análisis morfológico

A efecto de determinar aquellas zonas potenciales de recarga del acuífero o bien áreas cuyo papel hidrodinámico sería el de zonas de descarga, en el caso de la Ciénega, se aplicaron tres métodos morfológicos que son: hipsométrico; densidad de disección del relieve (DDR) y densidad de fracturamiento. A continuación se presenta la descripción general de los mismos:

Hipsométrico.- El mapa altimétrico o hipsométrico (Fig. 3.3.1) expresa de manera inmediata y clara el relieve en su totalidad, la elección de los colores no es arbitraria, sino que se apoya en un sistema, que bien aplicado, da la impresión de tridimensionalidad. En la Ciénega fueron definidos intervalos de curvas de nivel a cada 100 metros. Con este mapa, se delimitaron las principales geofórmas de la región de estudio, las posibles zonas donde los proceso exógenos son mayores y las áreas de depósito.

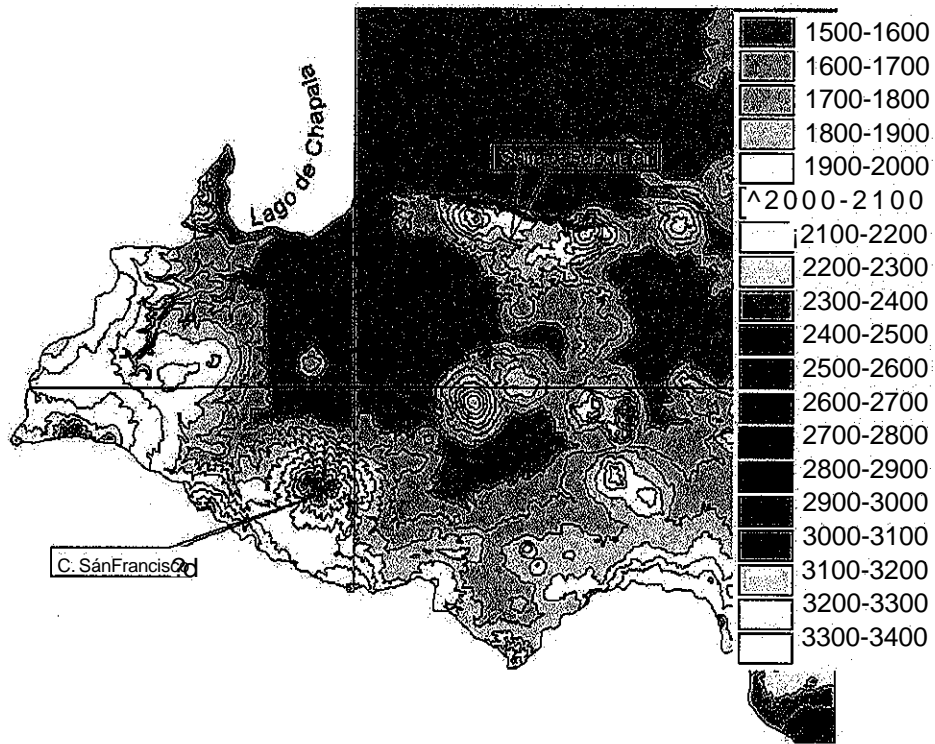


Fig. 3.3.1 Mapa hipsométrico para la Ciénega de Chápala, destacando como estribación más importante el Cerro San Francisco con 2500 msnm.

Las mayores altitudes se ubican en la porción sur de la Ciénega, en donde el Cerro San Francisco (2500 msnm) es el más destacado; la Sierra de Pajacuarán de orientación E-O define el límite central de la zona con una altitud media de 2200 msnm. La altitud promedio de la Ciénega es de 1522 msnm.

Densidad de Disección del Relieve (DDR). - Como se observa en la Fig. 3.3.2, los rangos de valores obtenidos fueron de 0.2 a 2.2 km/km^2 ; los valores superiores corresponden a las prominencias volcánicas de mayor altitud situadas al S-SE de la Ciénega (Cerros: San Francisco, Grande y Sierra de Pajacuarán) en rangos de 1.4 a 2.2 km/km^2 .

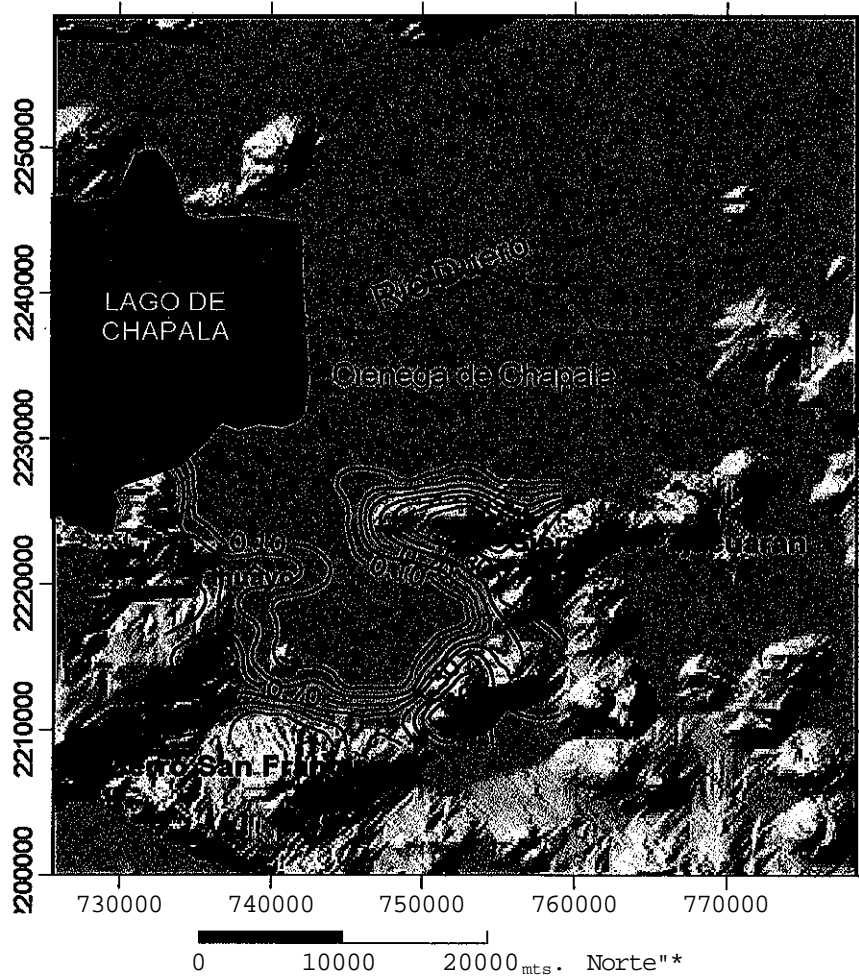


Fig. 3.3.2 Mapa de isólinas de la densidad de disección del relieve para la Ciénega de Chapala con rangos de valores de 0.2 a 2.2 km/km^2 .

Densidad de fracturamiento. Apoyados con fotografías aéreas, se obtuvo la distribución regional de la red de fracturamiento presente para la zona de estudio. Como se observa en la Fig. 3.3.3 los valores de igual concentración variaron de 0.2 a 2.6 km/km²-

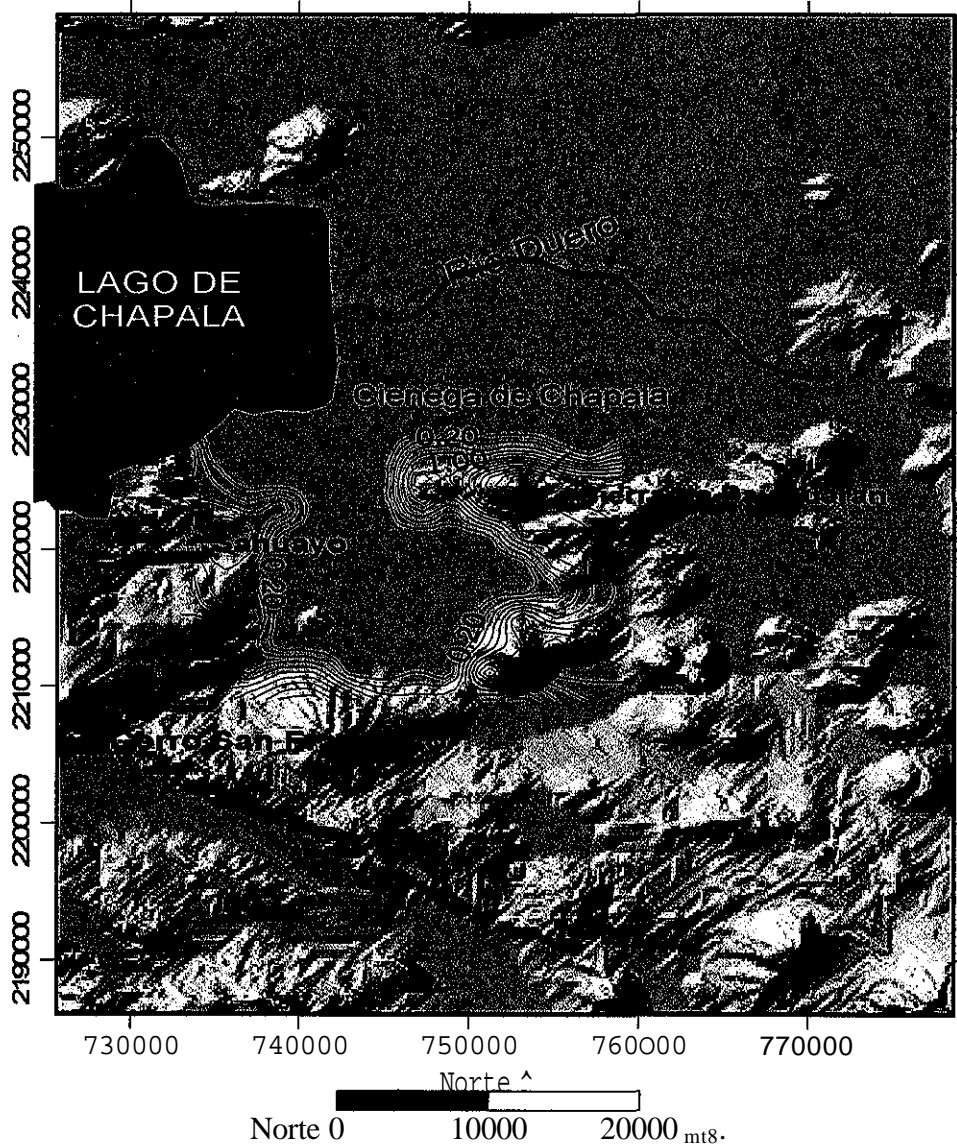


Fig. 3.3.3 Mapa de isolíneas de la densidad de fracturamiento para la Ciénega de Chápala en km/km².

La mayor concentración de ellos coincide con las zonas donde se localizan las principales prominencias volcánicas, siendo la Sierra de Pajacuarán la que registra el valor mas alto de 2.6 km/km^2 y en menor proporción el Cerro Grande al NE, así como el Cerro de San Francisco con valores de 1.8 km/km^2 , en promedio. Con ello es factible corroborar que estas zonas juegan un papel importante en el proceso de recarga de los acuíferos actualmente en explotación de la Ciénega.

EL SISTEMA ACUÍFERO

Tomando en consideración características de porosidad, permeabilidad, litología y posición estratigráfica de cada una de las unidades geológicas reconocidas en la región fue definido el sistema acuífero de la Ciénega de Chápala a escala regional como puede verse de manera esquemática en la Fig.4.1

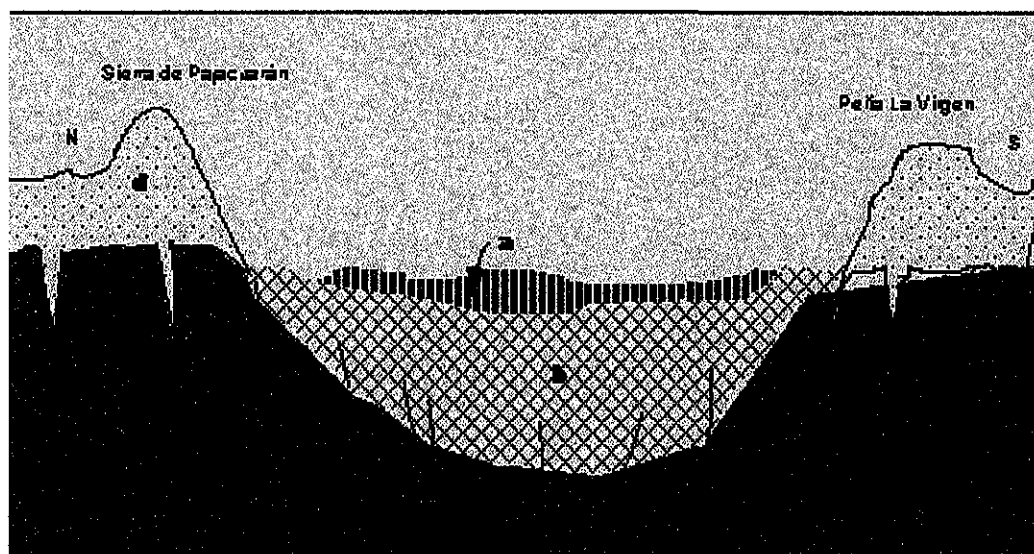


Fig. 4.1 Sección geológica esquemática en la Ciénega de Chápala, en la cual se aprecia la relación estratigráfica de las unidades de rocas que conforman el sistema acuífero. a) sedimentos superficiales arenos-arcillosos; b) sedimentos lacustres pliocénicos; c) rocas volcánicas miocénicas; d) lavas andesíticas cuaternarias. (Basado en Garduño et. al, 1993)

La mayor concentración de ellos coincide con las zonas donde se localizan las principales prominencias volcánicas, siendo la Sierra de Pajacuarán la que registra el valor mas alto de 2.6 km/km^2 y en menor proporción el Cerro Grande al NE, así como el Cerro de San Francisco con valores de 1.8 km/km^2 , en promedio. Con ello es factible corroborar que estas zonas juegan un papel importante en el proceso de recarga de los acuíferos actualmente en explotación de la Ciénega.

EL SISTEMA ACUÍFERO

Tomando en consideración características de porosidad, permeabilidad, litología y posición estratigráfica de cada una de las unidades geológicas reconocidas en la región fue definido el sistema acuífero de la Ciénega de Chápala a escala regional como puede verse de manera esquemática en la Fig.4.1

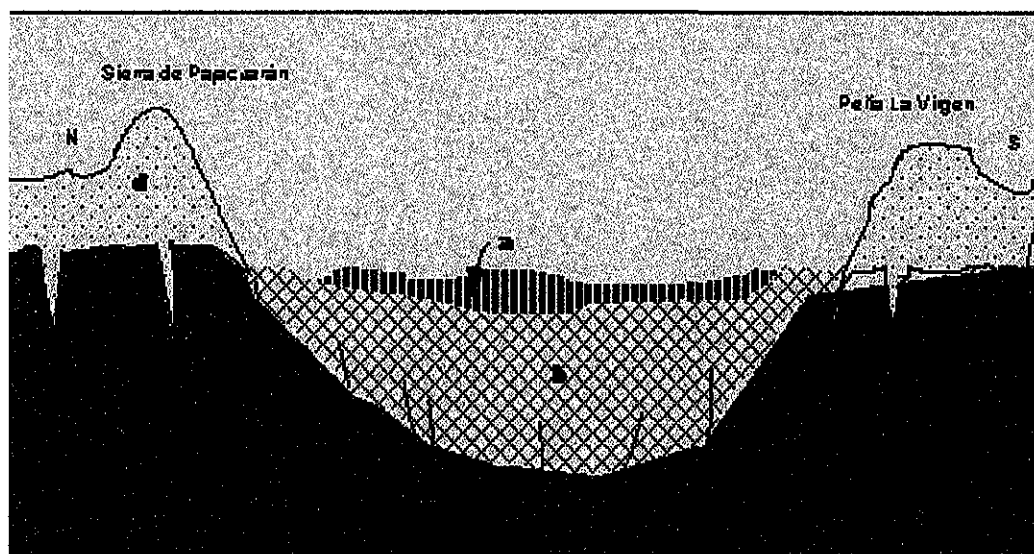


Fig. 4.1 Sección geológica esquemática en la Ciénega de Chápala, en la cual se aprecia la relación estratigráfica de las unidades de rocas que conforman el sistema acuífero. a) sedimentos superficiales arenos-arcillosos; b) sedimentos lacustres pliocénicos; c) rocas volcánicas miocénicas; d) lavas andesíticas cuaternarias. (Basado en Garduño et. al, 1993)

En la parte superficial (unidad a) se presentan los depósitos aluviales y lacustres recientes, de características areno-arcillosas, de alta porosidad, baja permeabilidad y heterogeneidad en su constitución, cuyo comportamiento hidráulico es el de un acuitardo que funciona como una unidad semiconfinante en gran parte de la Ciénega. Su espesor promedio es de 3m.

Subyaciendo a esta unidad, se encuentran los antiguos depósitos lacustres pliocénicos (unidad b) constituidos por intercalaciones de areniscas, limolitas, diatomitas y depósitos volcánicos piroclásticos. Su espesor llega a ser en la Ciénega de 300 a 450 m hacia la zona de Los Negritos y de Ixtlán de acuerdo a cortes litológicos reportado por Rosas, 1997, disminuyendo considerablemente hacia las prominencias volcánicas que delimitan la región.

Las unidades arriba descritas representan un sistema semiconfinado a Ubre en las márgenes de la cuenca y muestran comunicación hidráulica con la secuencia volcánica fracturada que la infrayace, como lo evidencia el termalismo de pozos ubicados en el paquete sedimentario (pozo IxÚán).

Bajo el paquete granular se encuentra la vulcanitas indiferenciadas del mioceno plioceno, estas rocas, están muy fracturadas por lo que a profundidad pueden ser consideradas como conducto preferencial del flujo térmico regional manifiesto en el área de estudio (unidad c); Sin embargo, cuando afloran en superficie (N de Sahuayo) las mismas asumen el papel de unidades permeables de recarga siendo excelentes acuíferos cuando se encuentran sepultadas en partes bajas.

Por otra parte, las rocas volcánicas del Cuaternario y Plioceno (unidad d) que conforman las principales prominencias de la región (sierra de Pajacuarán, Sahuayo, Jiquilpan) son consideradas como zonas de recarga de acuíferos por su alto grado de fracturamiento (2.6 km/km^2) y de igual manera, que la unidad anterior, en las porciones bajas de la Ciénega se comportan como buenos acuíferos.

4.1. Funcionamiento del acuífero

Los principales factores que influyen en el proceso de recarga del acuífero de la Ciénega son:

- El aporte de la infiltración de la precipitación a través de las consideradas zonas preferenciales de recarga, siendo en este caso, todo el relieve montañoso que circunda y delimita la Ciénega, destacando la sierra de Pajacuarán en la porción centro y las altitudes volcánicas localizadas al oeste y sur como son los cerros San Francisco, Grande y Pitahayita.

La circulación del agua es relativamente rápida ya que se da a través de un medio fracturado de alta conductividad hidráulica ($K= 1.2 E-4$) para fluir después por formaciones de porosidad variable.

- La comunicación hidráulica entre la superficie y el acuífero, ya que las discontinuidades laterales de los paquetes arcillosos permiten el paso del flujo procedente de la superficie del suelo.
- La comunicación hidráulica entre el Lago de Chápala y el acuífero sobre todo hacia la porción norte.

La descarga se lleva a cabo por medio de los diferentes pozos de extracción de agua, profundos y someros, norias y manantiales la cual es del orden anual de 22.676 Mm^3 a través de aproximadamente 425 obras hidráulicas predominando pozos con profundidades menores a 100 m.

El funcionamiento hidrodinámico prevaleciente para la zona de trabajo se esquematiza en la Fig. 4.1.1, en donde destaca la existencia de un gradiente piezométrico del Lago hacia el acuífero. Los flujos relacionados con procesos hidrotermales también se presentan asociados al alto grado de fracturamiento del contenedor volcánico.

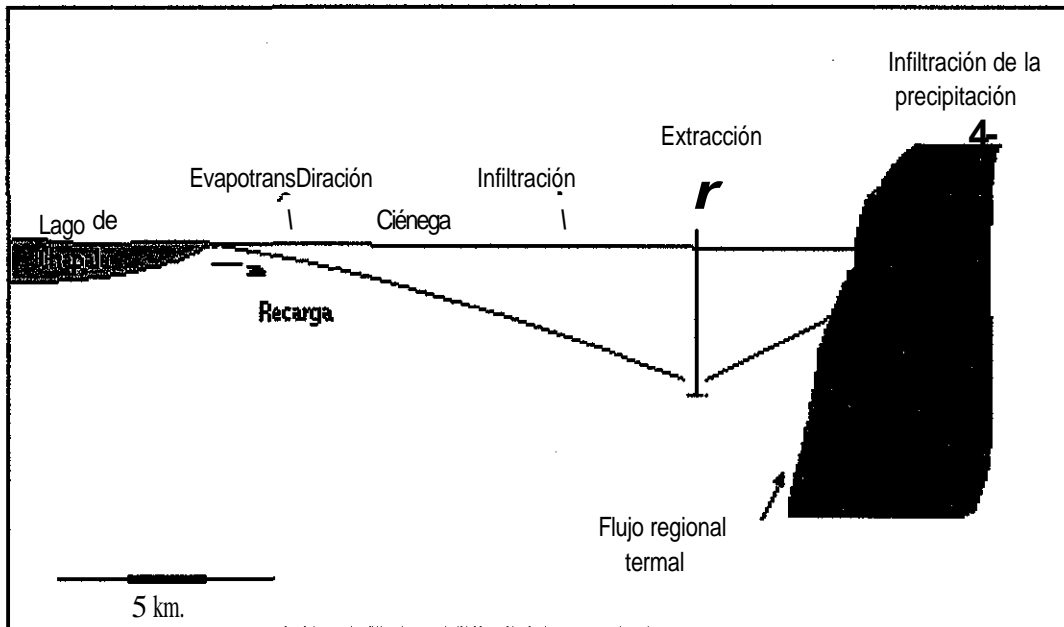


Fig. 4.1.1 Esquema del mecanismo hidrodinámico del acuífero de la ciénega de Chápala.

á.2 Eídrogeoquítmica

Actualmente en la zona de estudio, el problema asociado a la calidad química del agua proveniente de la explotación de pozos profundos, ha tenido efectos negativos sobre todo en el ámbito agropecuario, que es la principal actividad económica de la Ciénega. Los procesos de salinización de suelos son cada día mayores lo que ha repercutido en significativas mermas económicas a los agricultores por la disminución en sus índices de productividad.

Según datos del año 2000 de la CNA, del total de la superficie del distrito de riego, únicamente 18, 752 hectáreas son regadas; de éstas el 81.2 % (15,231 ha) utilizan agua proveniente de fuentes superficiales (ríos Duero y Lerma, así como de presas) y el 19.8% restante (3,521 ha) emplean agua proveniente del subsuelo.

El muestreo hidrogeológico del agua subterránea se realizó en 88 pozos (Fig.4.2.1).

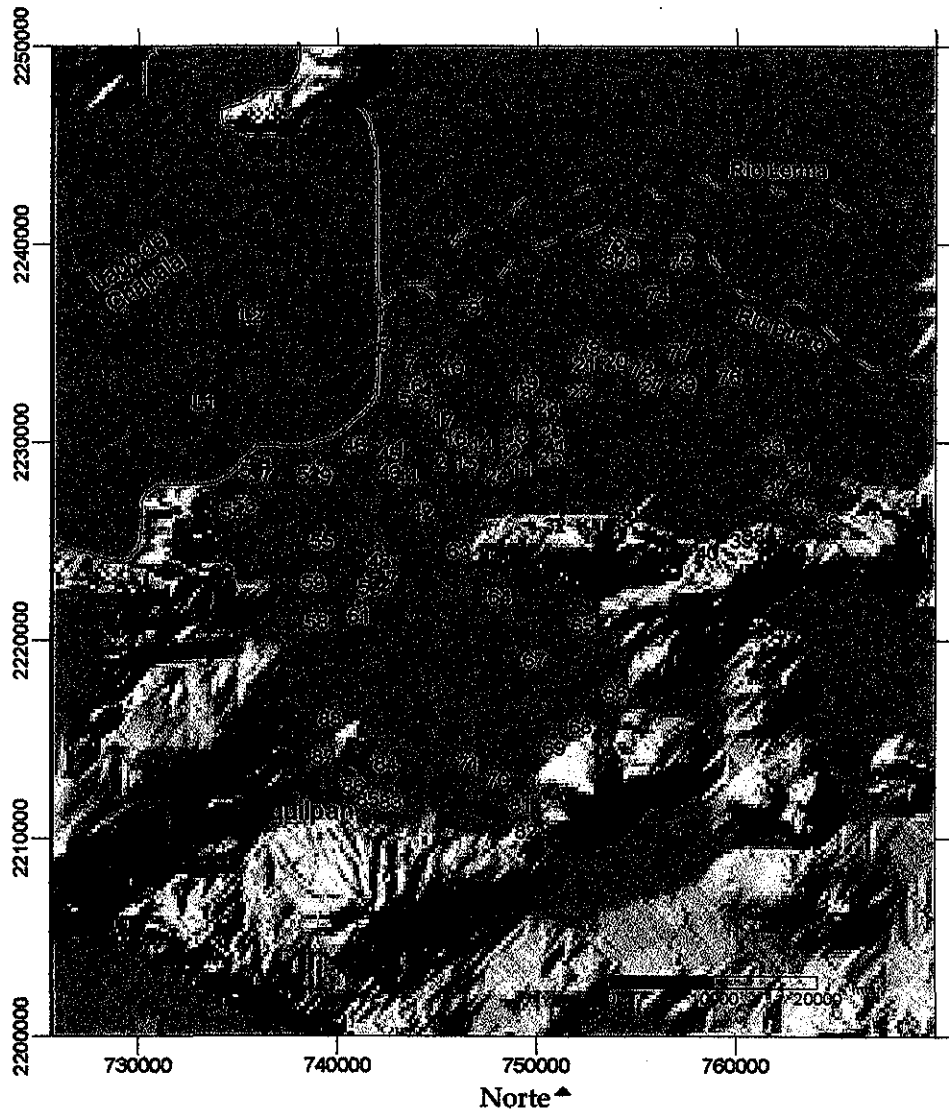


Fig. 4.2.1 Localización de los 88 pozos de monitoreo hidrogeológico, en la Ciénega de Chápala

Para tener una idea preliminar de la calidad del agua para uso agrícola así como su distribución en la zona, se trazaron las curvas de igual concentración de sólidos totales disueltos (Fig. 4.2,2) y conductividad eléctrica (Fig. 4.2.3).

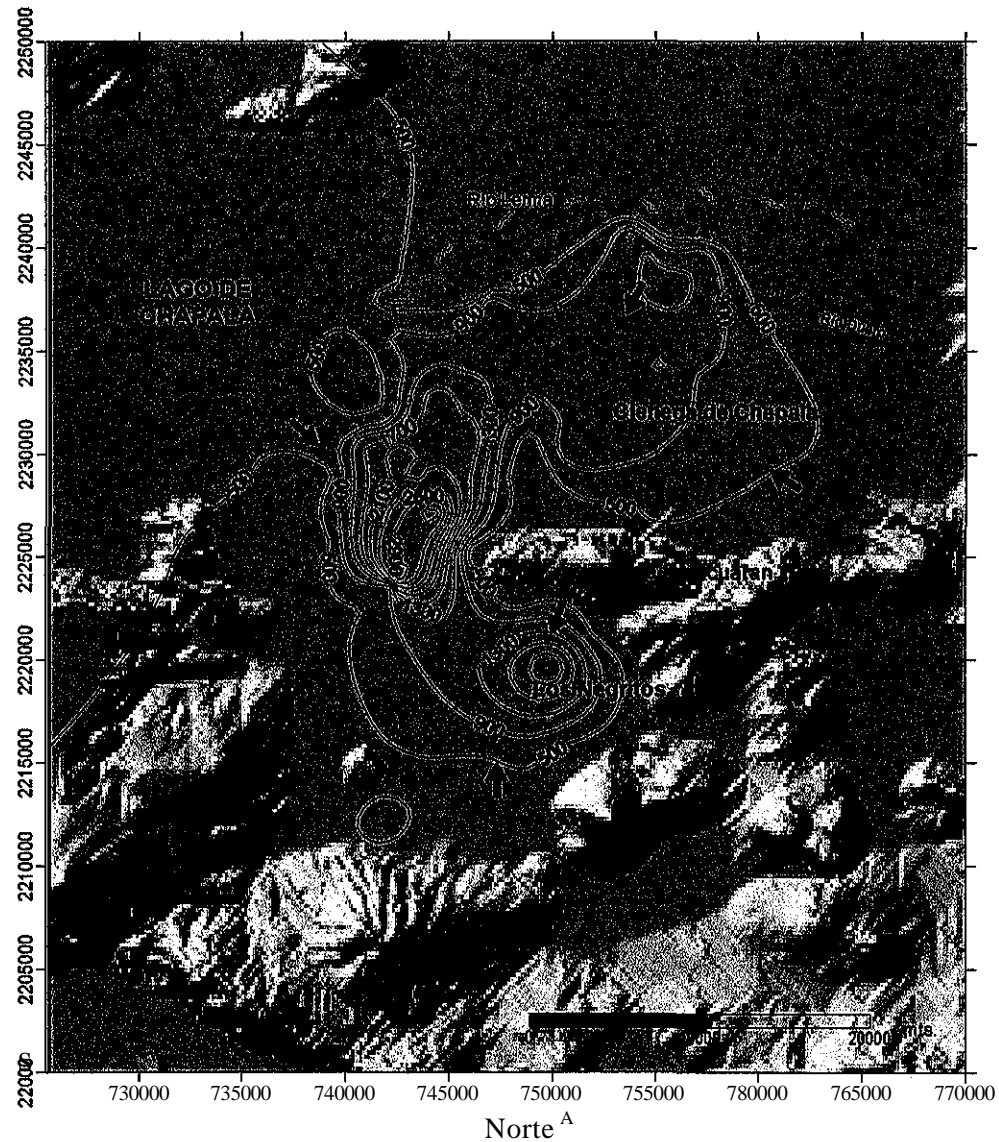


Fig.4.2,2 Plano de isoífiieas de STD (mg/1) en la ciénega de Chápala, Mayo/2000

Se obtuvieron rangos de valores para sólidos totales disueltos de 200 a 3200 mg/l, coincidiendo los valores más bajos con las estribaciones de los cerros de mayor altitud, así como con los principales cuerpos de agua superficial (lago de Chápala y ríos Duero y Lerma) lo que es indicativo de que éstos corresponden con potenciales zonas de recarga del acuífero regional, así como un indicador de la presencia de agua de mejor calidad asociada con el tipo de acuífero en explotación.

El área de mayor concentración se relaciona con la zona de influencia del campo geotérmico de Los Negritos/ al norte de la Ciénega, así como con la porción central orientada en el sentido de la falla de Pajacuarán.

Por lo que respecta a la conductividad eléctrica, se registraron datos de 500 a 4500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, apreciándose la misma relación en términos de recarga que los STD, ya que los valores mínimos igualmente se coincidieron con las principales estribaciones volcánicas de la zona y con los cuerpos superficiales de agua.

Paralelamente, fue posible evidenciar, la estrecha relación existente entre la concentración salina del agua con el tipo de unidad litológica en explotación. Es notorio como pozos perforados sobre roca volcánica, registran valores menores a los 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, por el contrario, aquellos pozos que están extrayendo agua de horizontes lacustres, las conductividades llegan a ser de hasta 4500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ representando un alto riesgo para la agricultura regional.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

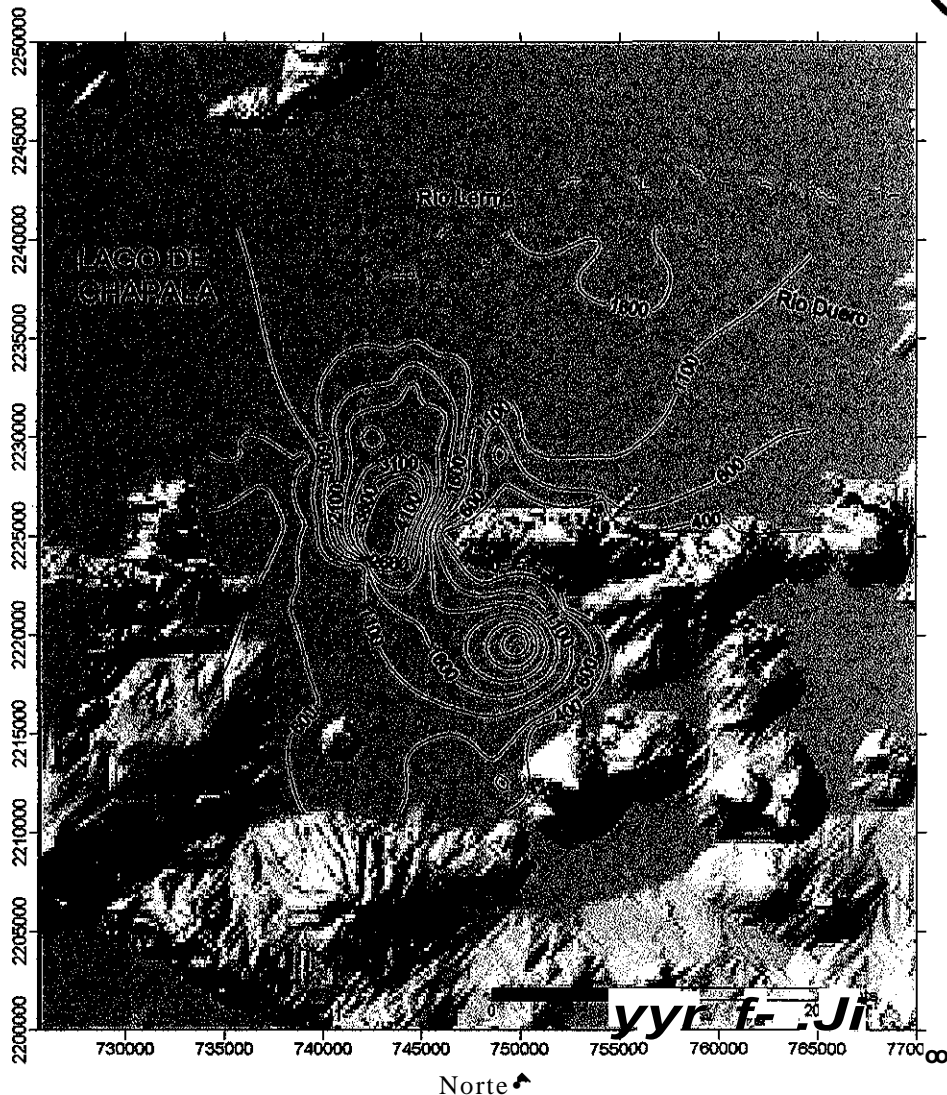


Fig. 4.2.3 Distribución de la Conductividad Eléctrica (nS/cm) en la Ciénega de Chápala Mayo, 2000.

Por lo que respecta a la temperatura del agua en pozos, los valores obtenidos fueron entre 20° y 36°C y su distribución se observa en la figura 4.2.4.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

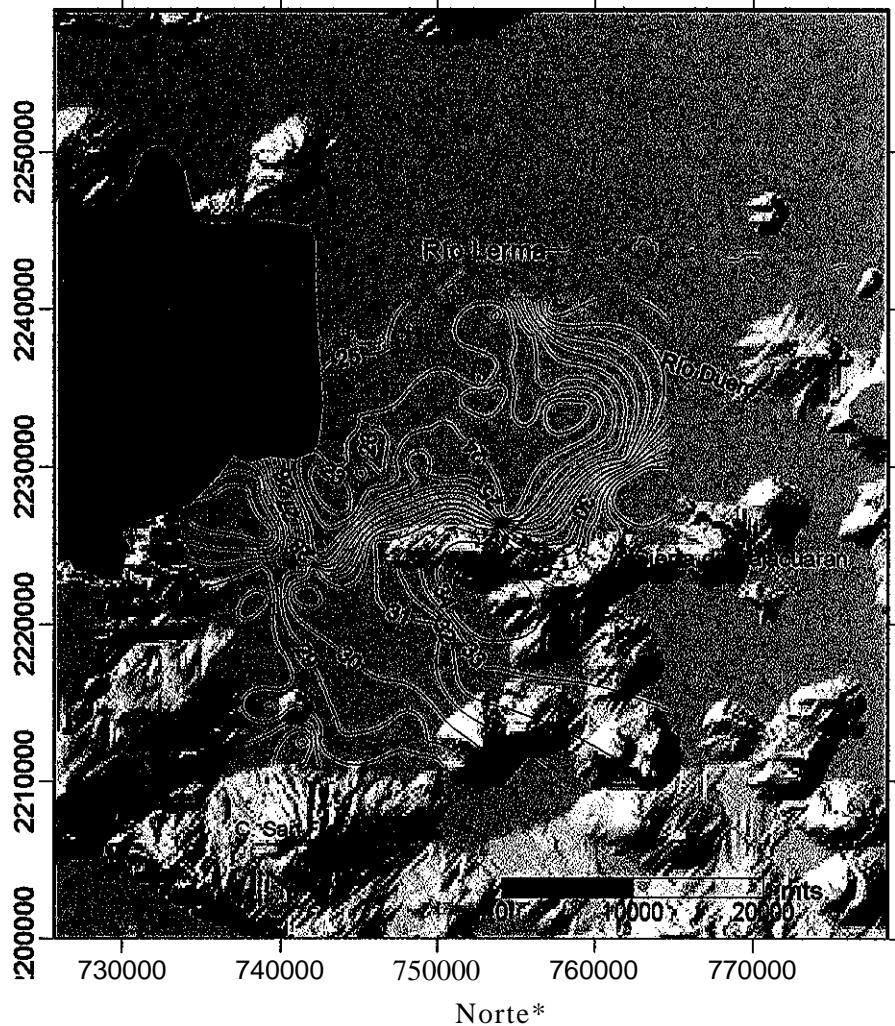


Fig. 4.2.4 Plano de isoténeas de temperatura en la ciénega de Chácala (°C).
Mayo,2000.

Los valores máximos se registran en pozos cercanos a las estructuras de falla geológica que potencialmente funcionan como conductos de fluidos geotérmicos profundos (Sierra de Pajacuarán) así como en la parte de Los Negritos (zona sur de la Ciénega), siendo la temperatura promedio para toda la zona norte de 24°C. En esencia estas anomalías de temperatura están relacionadas con el esquema geológico - estructural de la región.

Para conocer la calidad del agua para riego, se utilizó la clasificación de Richard (1954) en la cual, por medio de la conductividad eléctrica y la relación de adsorción de sodio (RAS), se obtiene la clase de agua.

El RAS, se calcula mediante la formula:

$$\text{RAS} = \text{Na}^+ / (\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{**}) / 2$$

Donde las concentraciones de Na^+ , Ca^{++} y Mg^{**} , están dadas en miliequivalentes por litro. Los valores obtenidos de RAS, para el área de estudio oscilaron entre 1 y 15 meq/l lo que reflejan que, en términos del elemento sodio, la mayoría de los pozos representan un grado medio de peligrosidad.

Para obtener la clase de agua para riego, los valores obtenidos de RAS y CE, son graneados en el nomograma de clasificación de Richard (1954), obteniéndose de esta manera, la clase de agua para riego, definida por los parámetros referidos al peligro a la salinización (C) y el peligro de alcalinización del suelo (S) y subíndices en cada uno de ellos.

En la fig. Fig.4.2.5, se puede observar como para la Ciénega predomina en primer termino la clase de agua C2-S1, de salinidad media y baja en sodio, pudiendo ser utilizada en riego sin necesidad de practicas especiales de control de la salinidad; en segundo termino las clases C3-S1 y C3-S2, altamente salinas, bajas en sodio, lo que implica que su uso este condicionado, al implemento de practicas agrícolas especiales como son la nivelación láser, drenaje eficiente, etc.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

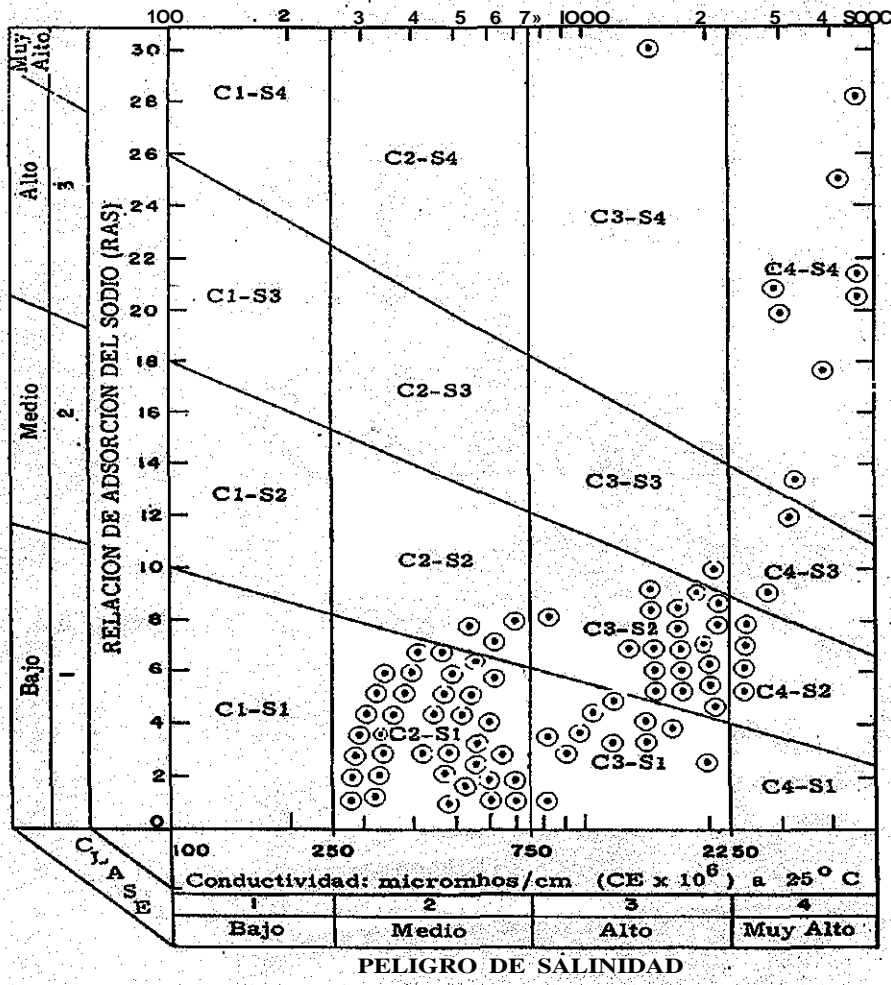


Fig. 4.2.5 Representación de los resultados de los análisis físicoquímicos de las muestras de agua subterránea en el diagrama de Richard (1954)..

Para el caso de la Salinidad Efectiva y Potencial, nos referimos en primer término a la estimación real que representan las sales solubles del agua de riego al incorporarse a la solución del suelo y en segundo, a la concentración de sales residuales.

Las figuras 4.2.6 y 4.2.7, representan la variación espacial de ambos parámetros.

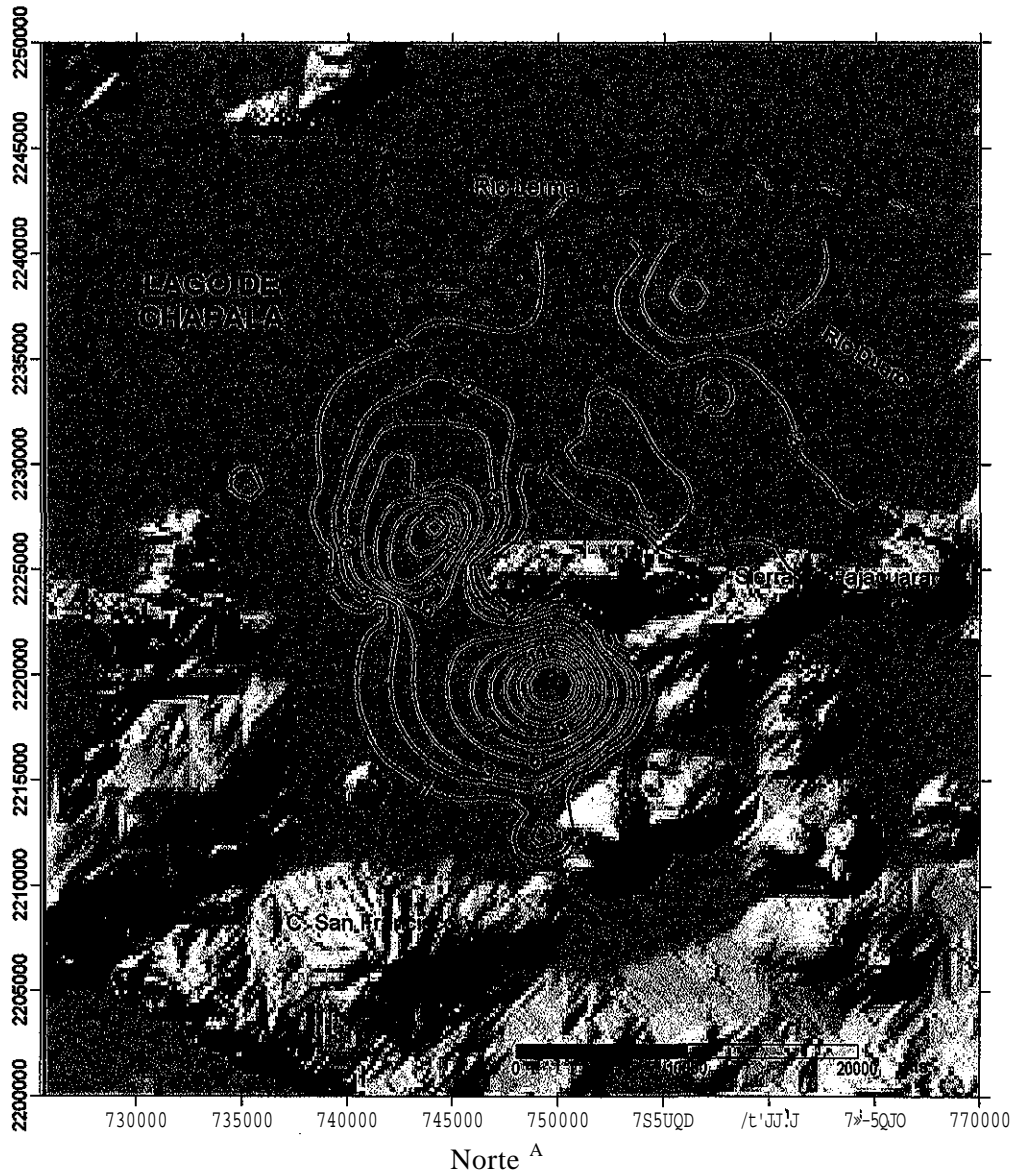


Fig. 4.2.6 Distribución espacial de Salinidad Efectiva (meq/l) en la ciénega de Chápala. Mayo 2000

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

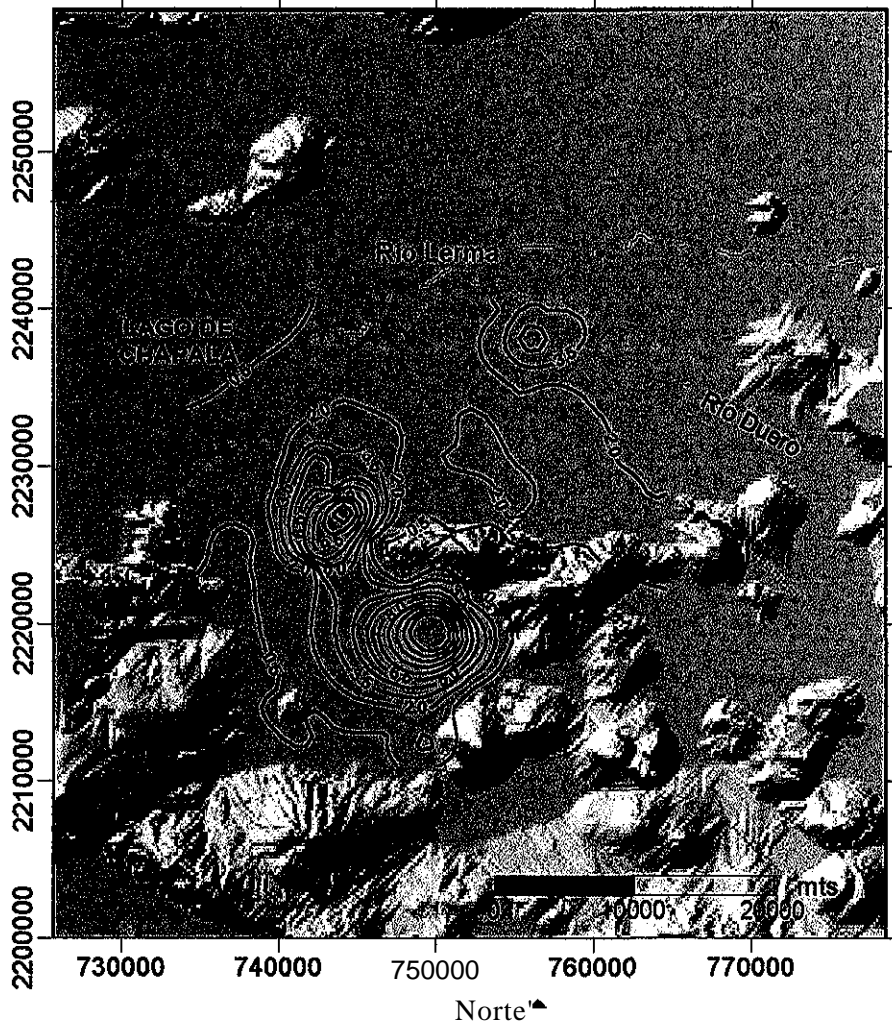


Fig. 4.2.7 Salinidad potencial en meq/l registrada en la ciénega de Chápala, Mayo 2000

Los rangos obtenidos para ambos parámetros varían de 1 a 15 meq/l. Tomando en consideración la clasificación de Palacios y Aceves (1970) y que se muestra en la tabla 4.1, un gran porcentaje del agua actualmente en explotación, debe ser considerada como condicionada para su uso en la agricultura, aunque existen zonas en donde este parámetro supera las 15 unidades, lo que revela la imposibilidad de su uso en dicha actividad económica.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Tabla 4.1

Clasificación del agua de mego por su salinidad efectiva	
CLASE	SALINIDAD EFECTIVA (meq/l)
Buena	Menos de 3.0
Condicionada	De 3.0 a 15.0
No recomendable	Más de 15.0

Fuente: Palacios y Aceves (1970)

Con la utilización del Diagrama de Piper (fig. 4.2.8) se puntualizaron las distintas facies químicas de agua presentes en la ciénega de Chápala.

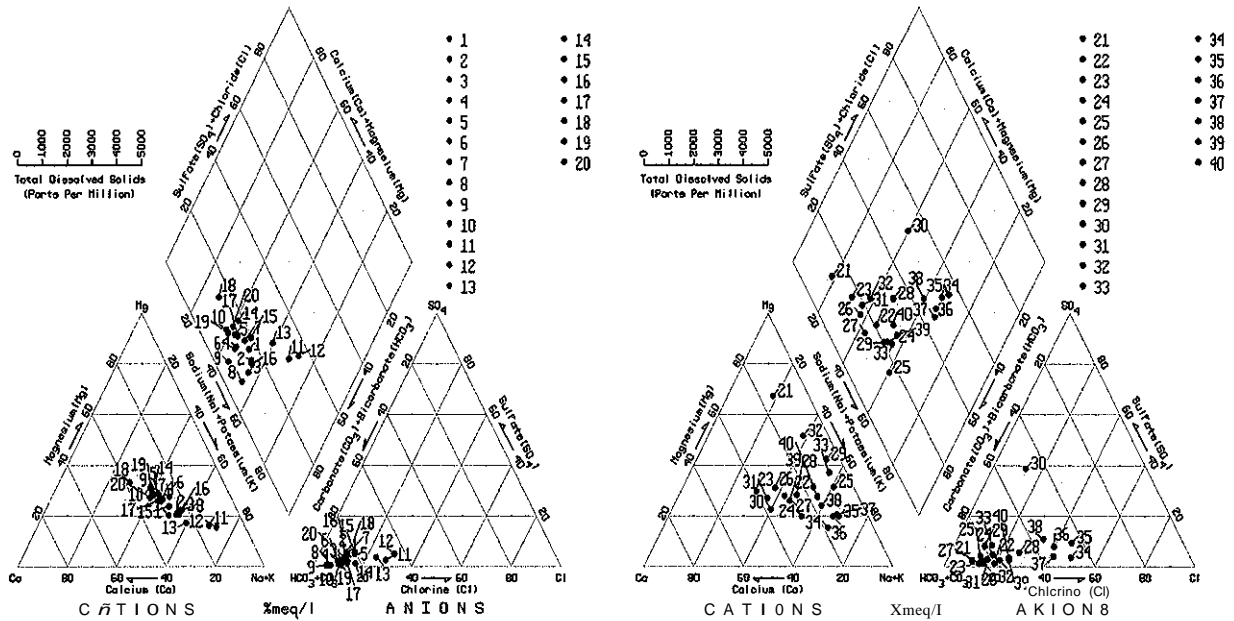


Fig. 4.2.8 Representación de los resultados de los análisis físicoquímicos de las muestras de agua subterránea en el diagrama de Piper-Hill

En términos generales, el 80 % se relacionan con agua de tipo Bicarbonatada-Sódica, concentrándose en la porción centro y N-NE de la zona y en menor proporción (10%) son Bicarbonatadas-Cálcicas; El resto se asocia a un agua Clorurada-Sódica, vinculada a un ambiente termal presente en la región sur de la Ciénega (Los negritos).

4.3. Prospección geoeUctrica.

La parametrización geoeUctrica del subsuelo de la Ciénega, tuvo como principal objetivo, el poder obtener a partir de valores de resistividad del subsuelo, parámetros como la transmisividad y el factor de formación, mediante la aplicación del método Kosinski.

En las ultimas tres décadas, diversos investigadores han trabajado para establecer relaciones empíricas y semiempíricas entre diferentes parámetros hidrodinámicos y parámetros geoeUctricos bajo diferentes condiciones geológicas, destacan: Kosinski y Kelly (1981); Schimschal (1981); Ponzini (1984); Mazac et al. (1985); Frohlich y Kelly (1985); Mazac et al. (1988); Kelly y Frohlich (1985); Park and Dickey, (1989); Curtís y Kelly (1990); Kalinski (1993); Yadav y Abolfazli (1998); Jorgensen y Petricola (1995); Frohlich et al. (1996); Acworth y Jankowsky (1997). En la mayoría de los casos, se propone que es factible dar mayor utilidad a la información obtenida de estudios geoeUctricos, para apoyar el proceso de evaluación de acuíferos de geometría regular.

Se utilizó el método Kosinski y Kelly (1981), basado fundamentalmente en que las relaciones de T (transmisividad) y R_t (resistencia transversal), tienen un factor común que es el espesor de la capa acuífera (h).

Esto es:

$$T = K \cdot h \left[\frac{m^2}{s} \right] \quad \text{y} \quad R_t = p \cdot h \quad [a \cdot m^2] \quad 4.3.1$$

Donde T es la transmisividad, K es la conductividad hidráulica, R_t es la resistencia transversal y p es la resistividad eléctrica del terreno. Obteniéndose así la expresión:

$$\frac{K}{\rho} = \frac{R_t}{p}, \quad 4.3.2$$

de donde:

$$T = K \frac{R_t}{\rho} \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right] \quad 4.3.3$$

Esto quiere decir que las ecuaciones que definen el comportamiento del flujo de agua y del flujo de corriente eléctrica tienen una gran similitud en un medio poroso, homogéneo, isotrópico y saturado, dando en ambos casos una relación lineal, entonces el agua y la corriente eléctrica deberían de fluir por el mismo camino.

Sin embargo, para medios porosos de baja conductividad hidráulica el flujo de agua y la corriente eléctrica no siguen necesariamente el mismo camino. Ya que estas relaciones no son tan sencillas de obtener, es necesario entonces conocer bien el comportamiento de la cuenca, para definir relaciones de la transmisividad que tengan cierta validez.

Por lo que:

$$T = f(\rho). \quad 4.3.4$$

Kosinski (1981), desarrollo una relación empírica entre la resistencia transversal obtenida de mediciones de resistividad y valores de transmisividad derivados de pruebas de bombeo. La resistencia transversal es normalizada por el efecto de calidad del agua, donde el factor de normalización es $1/p_w$ (p_w = resistividad del agua).

$$T = R_t K p_w / p \quad 4.3.5$$

Al graficar valores de T (transntísividad) contra valores de resistencia transversal (Rt) en acuíferos lo más homogéneos posibles y con un espesor h constante, se pueden obtener ecuaciones que relacionen ambos valores, Kosinski obtuvo, para su área de estudio, la siguiente expresión:

$$Rt=0.66*T^{1.0376} \qquad 4.3.6$$

Dependiendo del tipo de acuífero es factible definir relaciones del tipo:

$$K=f(p)Iog(k)-f(logp) \qquad 4.3.7$$

Al aplicar el método Kosinski, se uso la técnica de Sondeo Eléctrico Vertical (SEV's) para determinar las variaciones a profundidad de la resistividad eléctrica; paralelamente, se realizaron seis pruebas de bombeo en diferentes pozos cercanos a los puntos de exploración geofísica, con el fin de recopilar la información referente a la conductividad hidráulica del agua subterránea y tomar muestras para realizar análisis físico-químicos en el laboratorio del ODIR.

El perfil geoelectrico denominado "Ciénega", compuesto por ocho sondeos, se localizó a lo largo de la carretera Venustiano Carranza - Cuatro Esquinas con orientación NE-SO en la porción central de la región, cruzando los Ejidos Cumuato; El Fortín; Pajacuarán y Venustiano Carranza, buscando estuviesen relativamente cercana a los pozos identificados con las claves MW7 al 12 (Fig. 4.3.1). Su longitud es de 16.6 Km, para los sondeos Barajas y Chole se tiene la abertura menor en $\sqrt{2}$ de 215 m y para todos los demás la abertura máxima en los electrodos de corriente fue de 316 m.

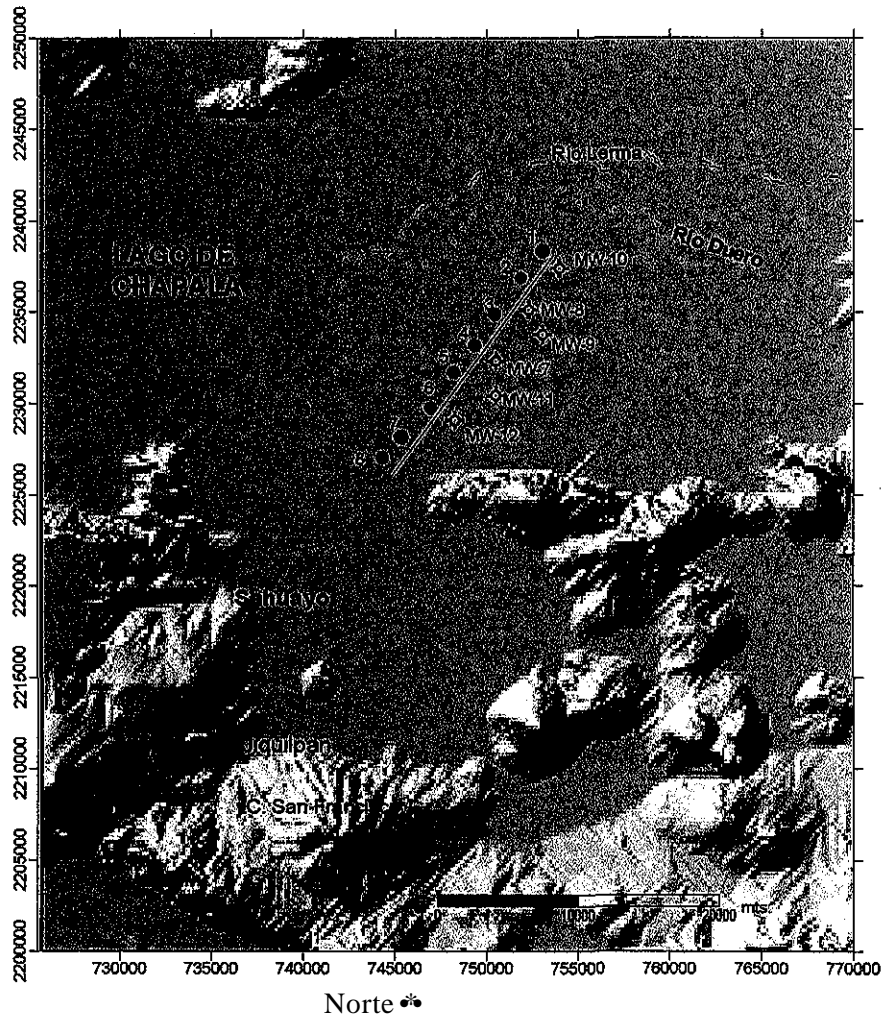


Fig. 4.3.1 Ubicación del perfil geoelectrico "Qiénega"/ mostrando además la localizaación de los pozos con pruebas de bombeo (claves MW7 al 15)..

En el procesamiento de la información geofísica, previamente se constituyeron pseudo secciones de resistividad aparentemente para apoyar la integración de los perfiles geoelectricos. En la fig. 4.3.2 se puede observar que las tendencias resistivas son de valores bajos uniformes (6-15 ohms-m) por lo que se infiere la existencia de un medio homogéneo a profundidad.

Sección Geoelectrica, "Ciénega".

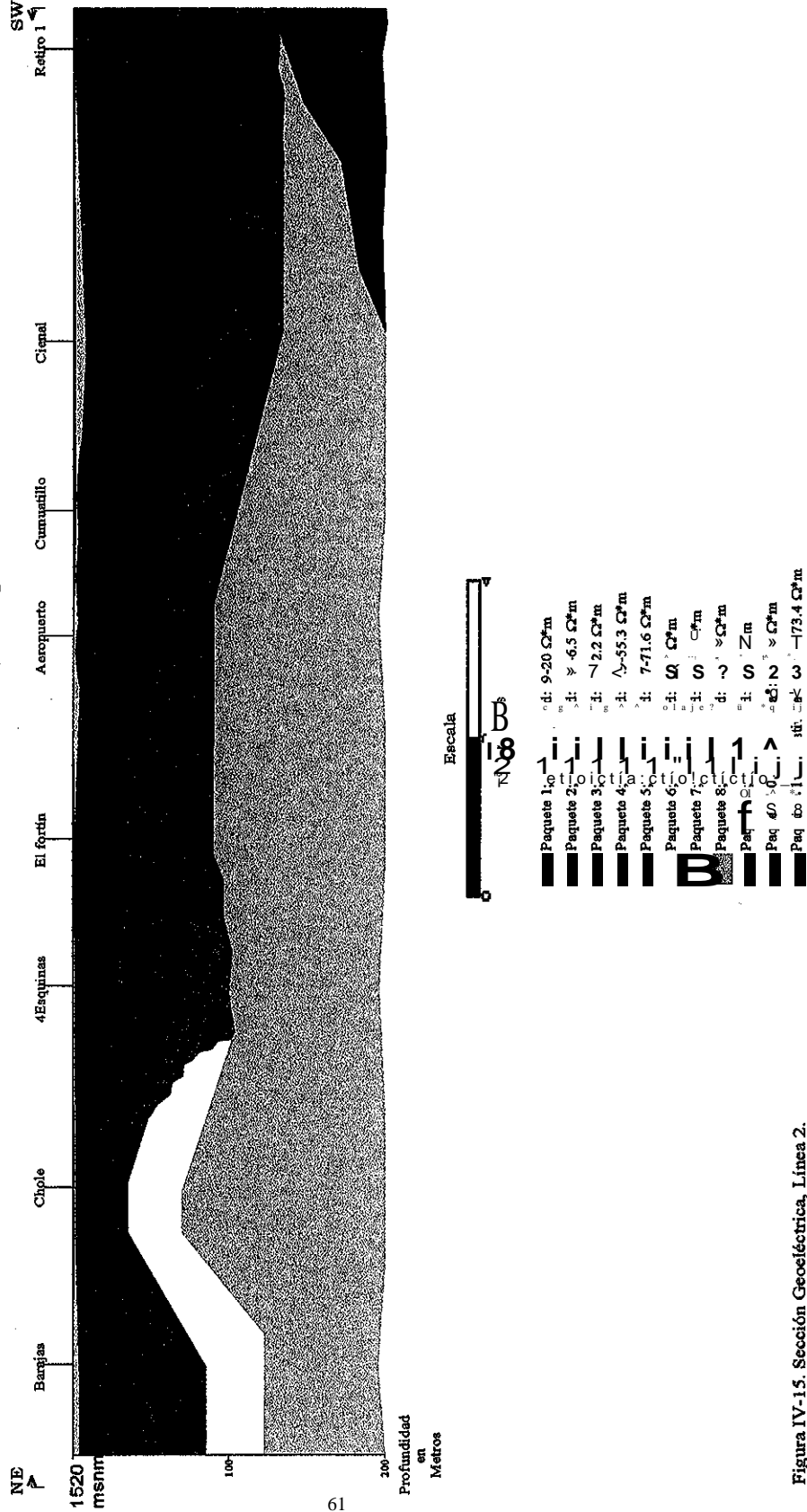


Figura IV-15. Sección Geoelectrica, Línea 2.

Fig. 4.3.2 Seudo-s \rightarrow b \rightarrow Ciénega, mostrando el comportamiento homogéneo en toda la sección.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

El valor más bajo, de 2.95 Q-m, se registro en el sondeo Chole, mientras que en el sondeo Retirol se detectó la mayor resistividad aparente con un valor de 38.9 O-m, cabe mencionar que el sondeo anterior se levantó en la cercanías del cerro el Sombrerete cuya composición se sabe es andesítica.

En general los valores menores aparecen en los sondeos Barajas, Chole y 4 Esquinas para un Δ igual a 3 m a partir del sondeo denominado Aeropuerto y hasta el denominado Retirol, para las aberturas en Δ de 10 m y 15 m los rangos en las resistividades son de 5 Q-m a 9.98 Q-m.

Los mayores valores de la resistividad se presentan en la abertura de 316 m para Δ , en los sondeos 4 Esquinas y Cumuatillo con valores de 31.5 Q-m y de 33.8 Q-m respectivamente. Este perfil presentó en general un esquema estratificado a lo largo de todo el perfil, como se observa en la figura anterior.

En la figura 4.3.3, se observa el modelo electroestratigráfico obtenido, infiriendo la existencia de hasta cuatro unidades geoelectricas, la más superficial es una capa con resistividades que varían desde 9.2 a 18.8 ohms-m y cuyo espesor es menor a un metro, esta unidad puede ser correlacionable con un estrato de composición arcillo-arenosa.

La segunda unidad litológica que subyace a la anterior registra resistividades de 1.6 a 4.2 ohms-m, esta se encuentra ampliamente distribuida a lo largo de toda la sección con espesores máximos de 5m (sondeo 7) y puede corresponder a una unidad lacustre arcillosa.

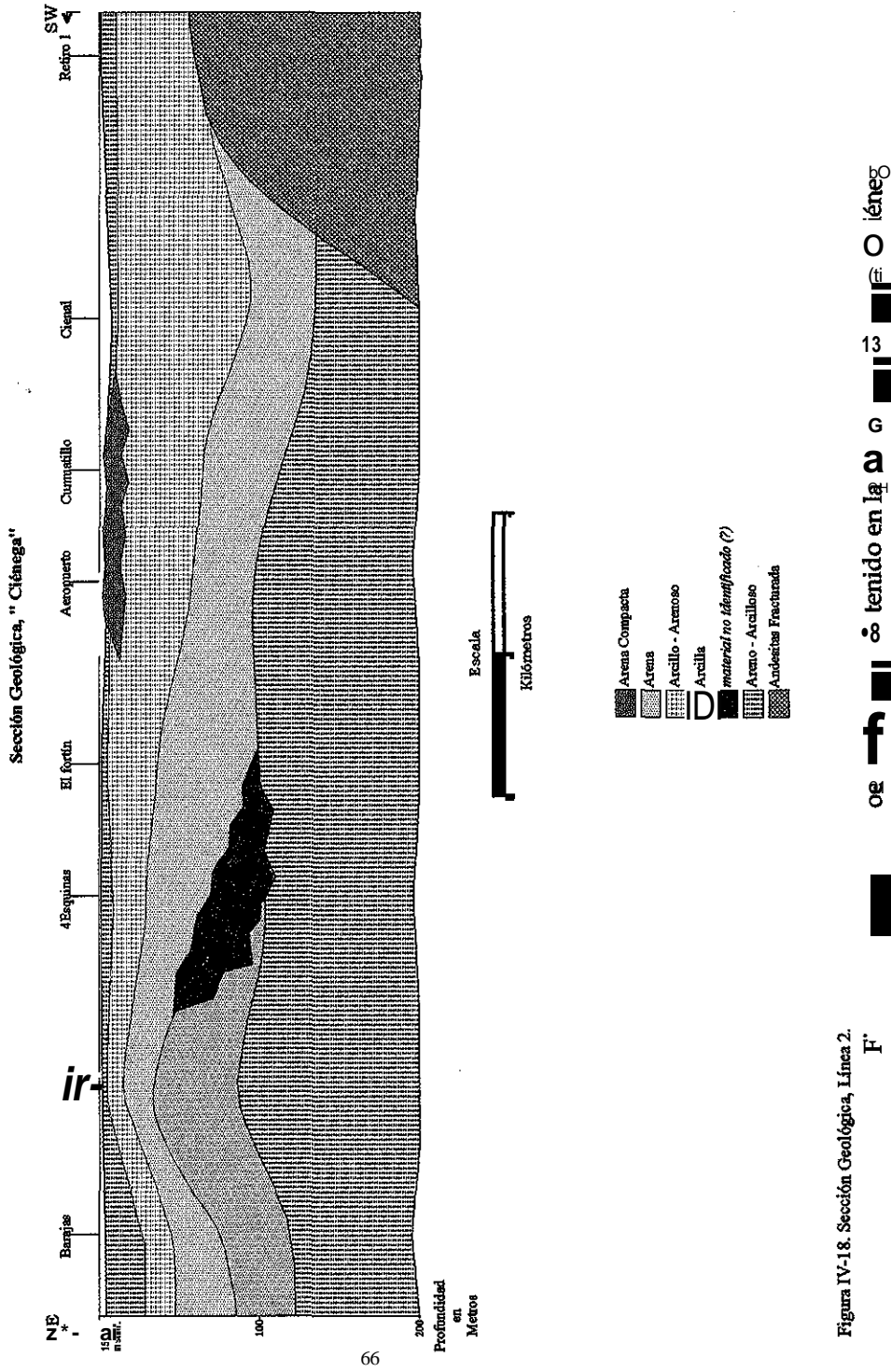


Figura IV-18. Sección Geológica, Línea 2.

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

Un tercer electroestrato, bien definido en toda la sección presenta valores resistivos de 7.4 a 22.4 ohms-m, correlacionable con un estrato de características arenos-arcülosas con espesores registrados en los SEV 5 y 6 de 31 y 28 metros respectivamente.

Finalmente la capa más profunda interpretada, presenta resistividades de 4 a 121 ohms-m y se detecta de manera uniforme en la sección, siendo considerada como el basamento geoelectrico; por sus valores resistivos, debe corresponder a una unidad con mayor contenido de arcilla.

El nivel estático regional obtenido de la medición directa en pozos profundos cercanos a las líneas de sección geofísica, se encuentra en promedio entre los 5.3 y 8.9 m. de profundidad. Este pudiera corresponder con la interfase de la segunda y tercera capa, o situarse ligeramente por arriba de ella.

Caracterización hidrogeofísica

Los valores de T (transmisividad) se tomaron de 6 pruebas de bombeo de corta duración realizada en pozos con profundidades máximas de 60m e interpretadas con el método de Jacob en el mismo periodo del levantamiento de la información geofísica.

De los modelos obtenidos para dicha línea, se obtuvieron los diferentes espesores a lo largo de toda la Sección Geoelectrica para el quinto paquete resistivo que en ella se detectó, el cual corresponde con el acuífero; ya que la localizarían de los pozos a los cuales se les realizó prueba de bombeo fueron muy coincidentes con la ubicación de los sondeos geofísicos, así los valores variaron en los espesores desde 19.85 m en el sondeo Chole hasta alcanzar los 56.49 m en el sondeo El Fortín y las resistividades variaron desde los 30.19 Q-m como mínimo en el sondeo Cienal hasta los 65.93 Q-m como máximo en el sondeo Aeropuerto.

Al referirnos a los valores de transmisividad (T), éstos oscilaron desde $0.0415 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ en el pozo Mw-12 hasta de $1.4761 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ en el pozo Mw-8.

Se utilizó el método de Jacob del programa de computo GWW (1999), para la interpretación de las pruebas de bombeo.

Con la información obtenida fue posible la caracterización hidrogeofísica del sistema acuífero de la porción central de la Ciénega de Chápala (tabla 4.3.1).

PARÁMETROS		hf	pi	pw	w	F	Rt	CL	T	Re	K
Pozo	Localidad	m	Q/m	Q/m	μS/cm	—	Q/m ²	(S)	X10* m ² /s	m	X1(H) m ² /s
Mw7	Fortín	56.49	52.7	6.6	1500	7.92	2982.1	1.07	0.8642	447.32	1.530
Mw8	4Es	53.10	71.6	7.38	1355	9.7	3801.9	0.742	1.4761	515.17	2.780
Mw9	Fortín	56.49	52.8	6.6	1500	7.92	2982.1	1.07	1.3557	447.32	2.400
MwlO	Chole	19.85	45.9	6.6	1517	6.97	912.5	0.432	0.4769	138.43	2.403
Mwl1	Paéreo	34.26	65.9	7.6	1314	8.66	2258.7	0.520	0.6519	296.80	1.903
Mwl2	Cienal	43.69	30.2	7.1	1400	4.23	1319.0	1.447	0.0415	184.66	0.095

Tabla 4.3.1 Principales parámetros hidrogeofísicos obtenidos para la porción central de la Ciénega de Chápala.

Los valores contenidos en la tabla 4.3.1 han sido calculados de la siguiente manera: el espesor (hf) y la resistividad de la formación (pi) de la interpretación directa de los sondeos eléctricos verticales; la resistividad del agua (pw) calculando el valor inverso de la conductividad (w) obtenida de los análisis químicos del agua de los pozos seleccionados; el factor de formación (F) es igual al cociente de pi entre pw; la resistencia transversal unitaria (Rt) es igual al producto de pi y hf; la conductancia longitudinal (CL) es obtenida del cociente de hf entre pi; la resistencia transversal unitaria corregida (Re) es igual al cociente de Rt entre pw; y por último la transmisividad cuyos valores fueron obtenidos de pruebas de bombeo de cada pozo.

Tomando en considerando los valores arriba descritos de los parámetros Re y T se integró la siguiente relación lineal (fig. 4.3.4):

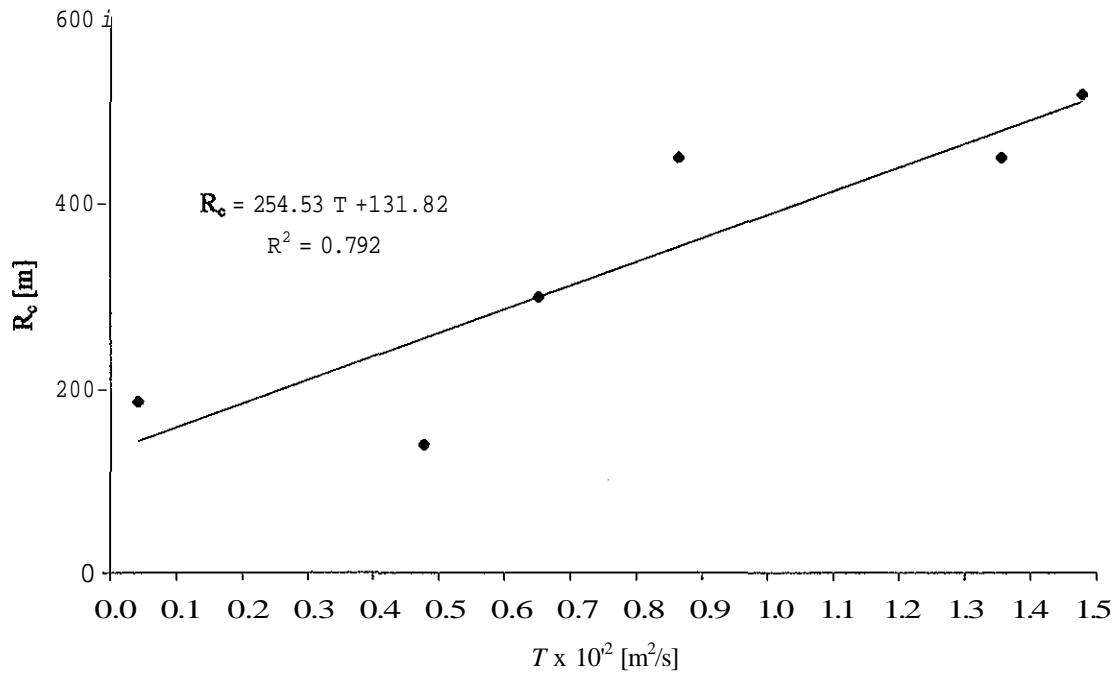


Fig. 4.3.4 Relación lineal Re vs T, obtenida para la porción central de la Ciénega de Chápala, Mich.

Mediante ella se obtuvo la expresión de la recta, la cual resultó:

$$T = 0.00393R_c - 0.51790 \quad 4.3.8$$

Se reporta el grado de correlación entre la resistencia transversal unitaria corregida (Re) y la transrásividad (T) con una regresión lineal simple cuyo coeficiente de correlación es del orden de 0.792 lo cual es indicativo del grado de confiabilidad.

Es de hacer notar que los valores obtenidos por el factor de formación (F) son del orden de 4.23 a 9.70, lo que hace suponer que la formación acuífera que se está considerando es una unidad principalmente arenosa (Humble y Wyllie, en Astier, 1975).

La relación encontrada es de tipo lineal como era de esperarse para medios granulares y es similar a la obtenida en otras investigaciones semejantes en los Valles de San Luis Potosí S.L.P. y Yautepec Mor. por Romero (1990) y Servín y Hernández (1992) en las cuales se obtuvieron las siguientes expresiones respectivamente:

$$T - 0.09Rc - 1.23$$

y

$$T - 0.0109Rc - 0.294$$

Habría que señalar que la relación encontrada para T sólo es válida para la zona donde se determinó o en áreas con similares condiciones hidrogeológicas, particularmente, en lo que respecta a la conductividad del agua, que en la región está en un rango de 400 a 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Aunque la fundamentación teórica sea de carácter empírico, la validez de estos resultados con todas sus restricciones, justifica su implementación a efecto de tener un mayor conocimiento en la distribución de los parámetros de un sistema acuífero, aunque sea de manera aproximada, lo cual permite parametrizar un modelo funcional del cual pudiera derivarse un modelo matemático computacional en una región como la Ciénega de Chápala.

Sin duda es factible mejorar la regresión lineal obtenida, al incrementarse el número de puntos, ya sea encontrando un mayor número de pozos con pruebas de bombeo o bien la realización de éstas en sitios comprometidos con los perfiles geoeléctricos.

4.4. *Comunicación Marica lago-ciénega*

Los estudios realizados para entender la comunicación hidráulica agua superficial-subterránea se han enfocado a situaciones de lagos profundos que presentan continuidad hidráulica con sistemas acuíferos adyacentes. Remson et al. (1971); Frezee (1969); Cooley (1974), Winter (1976), Anderson y Munter (1981) y mas recientemente Brown y Bradley (1995) son algunos de los autores que reportan varios esquemas de la interacción lago - agua subterránea.

En la ultima década se han estudiado diversos aspectos del Lago de Chapala (química, limnología, biología, geología) pero no existe antecedente alguno de trabajos que interrelacionen el agua subterránea de esta porción de la Ciénega con el agua del lago, es por ello que con esta investigación se explica el mecanismo de comunicación hidráulica que se presenta entre ambos; tomando en cuenta algunos modelos existentes en la literatura; considerándose como evidencias algunos indicadores químicos como son los fosfatos, cloruros, temperatura y conductividad eléctrica, así como aspectos piezométricos.

Mecanismos de comunicación hidráulica

Domenico y Schwarts (1990), han agrupado en cuatro categorías (Fig.4.4.1) a la mayoría de los lagos, en función de sus mecanismos de interacción con el agua subterránea:

- (a) Lagos de descarga, los cuales reciben la descarga de agua subterránea provenientes de un sistema acuífero.
- (b) Lagos de recarga/ los cuales aportan agua hacia el acuífero.
- (c) Lagos de flujo directo, en donde se combinan ambas situaciones, es decir, reciben y aportan agua al flujo subterráneo.
- (d) Lagos aislados, que no mantienen ningún tipo de relación hidráulica con los sistemas acuíferos de su entorno geológico.

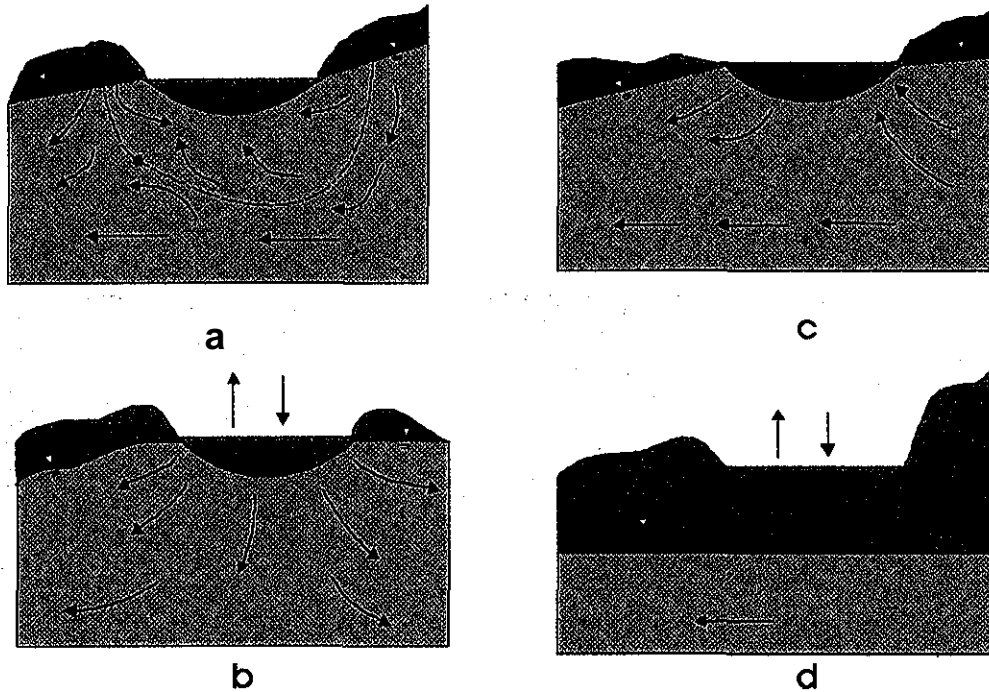


Fig. 4.4.1 Diversos mecanismos de interacciones lago-agua subterránea. Domenico y Schwartz (1990). El caso C se adapta a la región de estudio.

Como una primera aproximación para la zona de estudio se propone un modelo funcional mixto de tipo lagos de flujo directo, caso (c) de los descritos anteriormente, basado en los principales mecanismos de recarga (infiltración de la precipitación sobre la Sierra de Cojumatlán) y en las tendencias piezométricas de la Ciénega.

En la Fig. 4.4.2 se esquematizan los elementos mencionados, incorporando el marco geológico regional el cual permite la comunicación hidráulica.

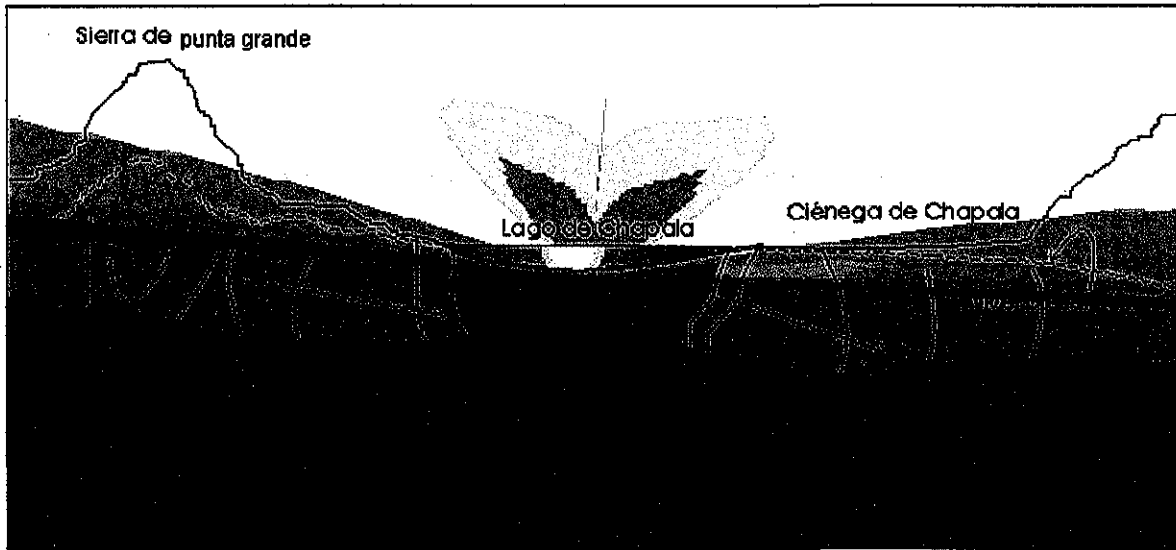


Fig. 4.4.2 Esquema funcional de comunicación hidráulica Lago-Ciénega de Chápala,

Evidencias hidrogeoquímicas

Con la finalidad de obtener otros argumentos acerca de la comunicación hidráulica planteada anteriormente, el análisis hidrogeoquímico se dirigió a caracterizar, adicionalmente, algunos otros elementos químicos tanto en el agua del lago como en el agua subterránea de la Ciénega.

El muestreo químico para la determinación del fósforo se efectuó en 14 pozos pilotos seleccionados del muestreo realizado en mayo del 2000. Los parámetros de cloruro, boro, temperatura, conductividad eléctrica, STD, pH fueron medidos en 88 pozos de la Ciénega. Fig. 4.4.3

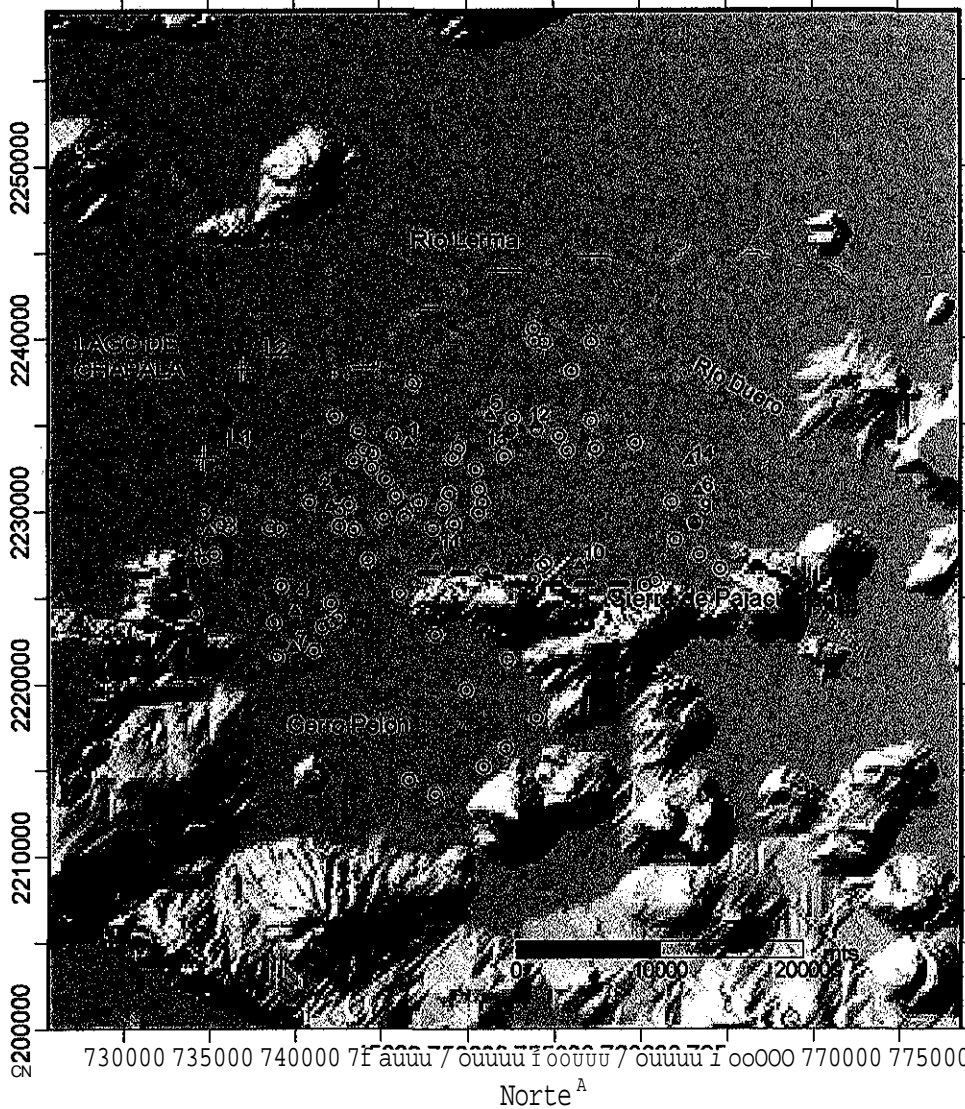


Fig. 4.4.3 Puntos de muestreo en el acuífero de la Ciénega de Chápala (^A pozos de monitoreo de fosfatos)

Los primeros 14 pozos se localizaron al norte en las proximidades del lago y del cauce del Río. El muestreo del lago, se realizó durante el mismo periodo en 2 puntos muy colindantes a la desembocadura del río Lerma (corroborando concentraciones de este nutriente reportadas por De Anda (2000).

			Uso	Fosfato mg/l	Cloruros mg/l	ÉfiÜi		ti	BHÍ^BI	STP
i	L. madas	A	2.66	5.0	N.D.	21.4	7.5	1880	3180	
2	R. Sánchez	A	1.60	0.8	N.D.	20.7	8.1	1880	928	
3	P. Montejano	A	1.68	1.3	N.D.	21.7	7.6	2010	1014	
4	J. Zepeda	A	2.07	0.8	N.D.	20.5	7.7	2050	1030	
5	J. Cervera	A	1.28	0.7	N.D.	21.0	7.8	1920	938	
6	La Luz	A	4.12	0.6	N.D.	21.6	7.0	941	941	
7	J. Padilla	A	0.61	1.4	N.D.	29.9	6.4	549	384	
8	La Palma	A	0.61	0.7	N.D.	30.4	8.5	430	300	
9	J. Zapien	A	2.84	1.9	N.D.	21.4	7.3	2600	1820	
10	R. Bravo	A	2.04	0.8	N.D.	20.6	5.4	1670	713	
11	E. Arceo	A	1.50	0.5	N.D.	23.6	7.9	855	598	
12	Casa Blanca	A	0.55	0.4	N.D.	31.5	8.5	565	395	
13	L. López	A	0.81	0.4	N.D.	37.4	9.1	438	307	
14	B. Alcaraz	A	0.76	0.4	N.D.	23.7	7.1	350	245	
15	CHÁPALA 1	L	0.60	1.4	N.D.	22.1	8.7	898	630	
16	CHÁPALA 2	L	1.05	1.3	N.D.	21.1	8.4	904	639	

Tabla 4.4.1. Valores obtenidos para cada parámetro físico - químico medido en cada punto de muestreo. A: agrícola; ND: por debajo del limite de detección; L: lago

Los pozos están explotando el mismo sistema acuífero y presentan profundidades promedio de 60 m. De igual manera el diseño constructivo de los mismos es similar.

Fosfatos

Se seleccionó el fosfato como un indicador de la comunicación hidráulica ya que éste es considerado como uno de los nutrientes de mayor presencia en el Lago de Chápala. De Anda (2000), reporta concentraciones de fósforo total de 0.517 mg/l en la zona próxima a la desembocadura del río Lerma y para el resto del lago valores que oscilan de 0.35 a 0.40 mg/l.

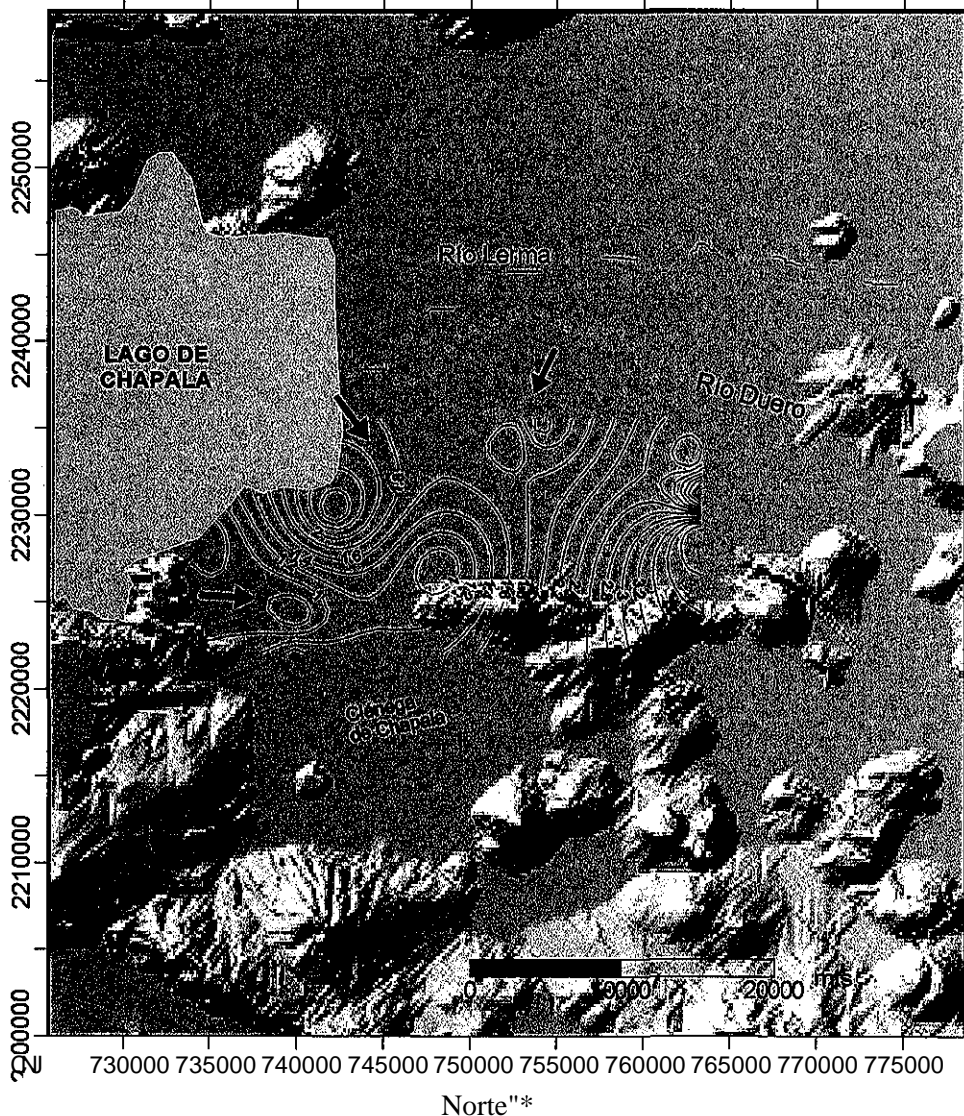


Fig. 4.4.4 Mapa de isocontenidos de fosfatos en el acuífero de la ciénega de Chapala. Mayo, 2000

La concentración de fosfatos en los pozos muestreados fluctuó de 0.55 - 4.12 mg/l, mientras que en el lago estas fueron de 0.6 a 1.05 mg/l. Los valores mayores se localizaron hacia las riberas del lago y del río Duero en la porción norte del área de estudio (Fig. 4.4.4), disminuyendo gradualmente a medida que nos alejamos del

lago, manifestándose los valores más bajos en las inmediaciones de la sierra de Pajacuarán (0.65mg/l) así como hacia cerro Pelón en la porción sur de la Ciénega.

Lo anterior hace suponer en primer termino, que la presencia de este indicador en el acuífero, empieza a evidenciarse aunque todavía sin representar algún tipo de consecuencia ambiental. Paralelamente, se denota la existencia también de un gradiente del río Duero hacia la Ciénega, lo cual pudiese considerarse como evidencia de que los cuerpos superficiales existentes están en comunicación hídrica con el acuífero.

Un máximo detectado hacia la margen oriental de la zona de estudio se asocia a los resultados de un pozo que presenta problemas de diseño y que esta seguramente facilitando la incorporación de compuestos de fósforo de origen agrícola.

Cloruros

El ion cloruro es un trazador real que se considera próximo al ideal ya que su solubilidad es muy elevada, prácticamente no interacciona con el terreno y es estable (Custodio y LLamas, 1976).

La distribución espacial de los valores obtenidos para el cloruro, se observa en la Fig. 4.4.5, oscilando entre 1 y 12 meq/l, en su determinación se empleó el método establecido por APHA- AWWA-WEF (1998).

La configuración obtenida evidencia un gradiente que va del lago y río Duero hacia la parte central del acuífero. Las concentraciones menores se ubican hacia las riberas de ambos cuerpos de agua (1-2 meq/l), en tanto que al adentrarnos hacia la Ciénega, los valores aumentan, siendo la porción central y sureste las que destacan con rangos de 7 y 9 meq/l, infiriendo así un esquema de flujo regional en esa misma dirección. Un esquema concéntrico se define para la porción sur de la Ciénega, siendo producto de la zona de influencia del campo geotérmico Los Negritos

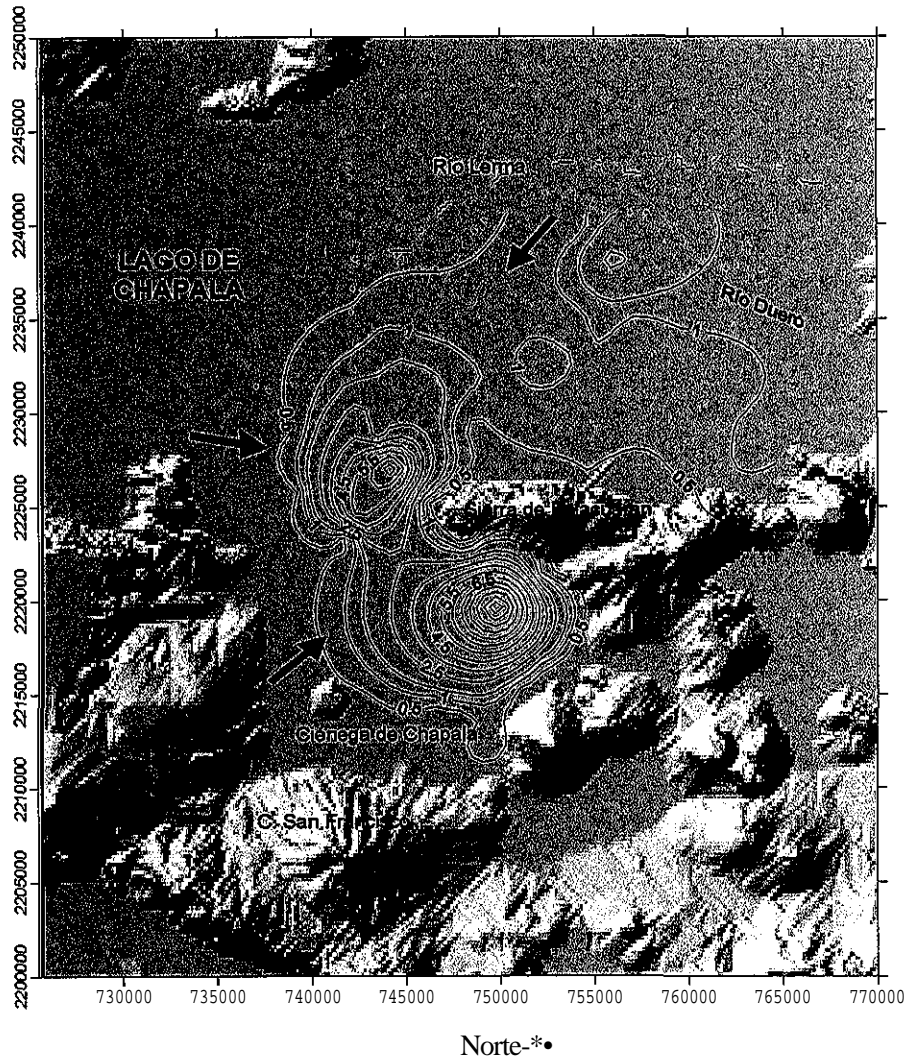


Fig. 4.4.5 Esquema de isoconcentraciones de cloruros (meq/l) en la ciénega de Chápala. Mayo, 2000

Conductividad eléctrica y Temperatura.

Estos dos parámetros son indicadores de la presencia del flujo preferencial regional del agua subterránea y evidencian el mecanismo de comunicación hídrica del lago y río Duero con el acuífero de la Ciénega de Chápala.

Al asociar el parámetro de la conductividad eléctrica con la temperatura se observa la interacción que coexiste con el probable origen de recarga hacia los distintos pozos. En la Fig.4.4.6 se ve como se manifiestan dos grupos preferenciales, mismos que pudieran asociarse hacia un origen tectónico representado por la falla de Pajacuarán, con valores inferiores a los 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y temperaturas promedio a los 30 °C o bien a un esquema de recarga influenciado por el lago de Chapala y río Duero, definidos por valores promedio de conductividad eléctrica de 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y temperaturas del orden de 22°C.

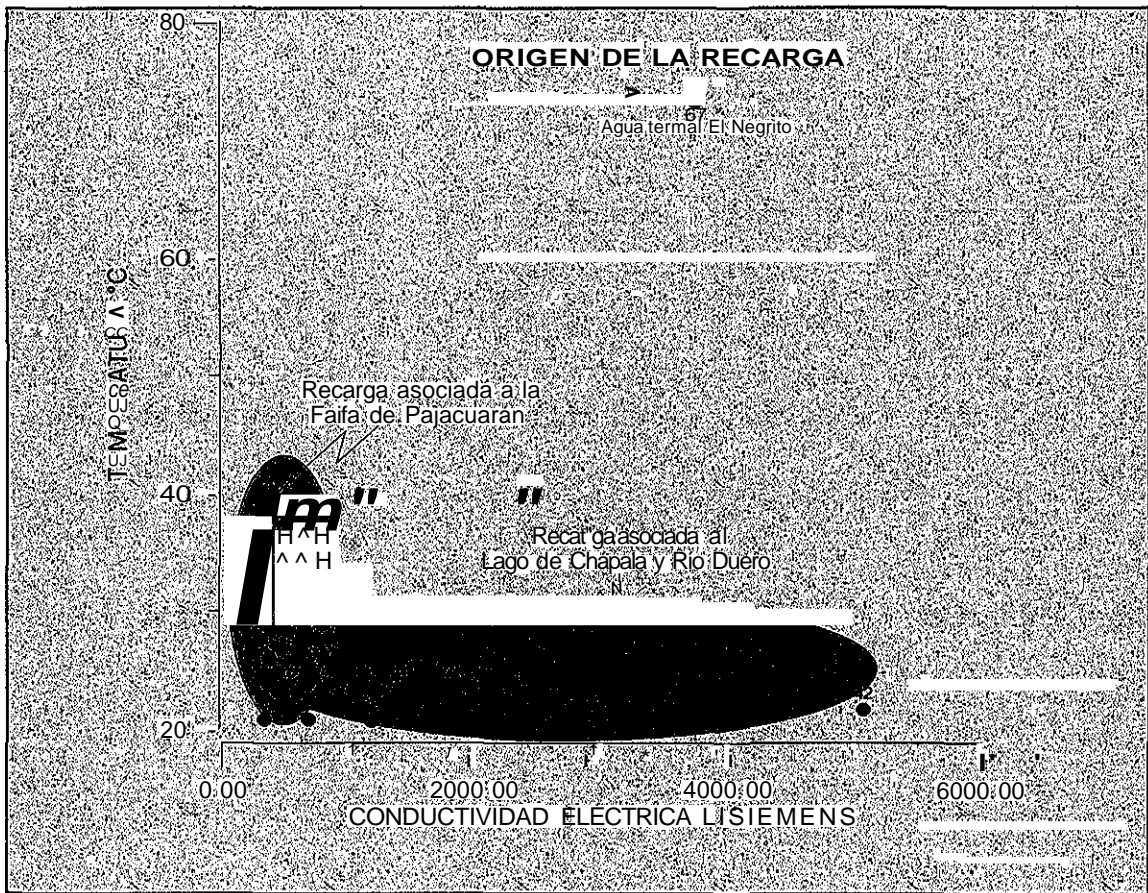


Fig.4.4.6 Esquema de asociación CE. y T, a efecto de inferir un probable origen de recarga del acuífero.

Evidencias basadas en la piezometría.

A efecto de tener un punto de partida en el conocimiento de los niveles piezométricos que actualmente se registran en la Ciénega, se procedió a la toma de lecturas de los niveles estáticos en los 88 puntos adoptados como pozos pilotos. Las profundidades de dichos niveles oscilaron de 1 m, en la zona ribereña del lago hasta 16 m hacia el Sur, para el mes de noviembre del año 2000.

Estas lecturas fueron referidas posteriormente a bancos de nivel de precisión proporcionados por la Comisión Nacional del Agua-Sahuayo, obteniendo así la altitud correspondiente para cada sitio. Una vez con la información referida al nivel del mar, se procedió a la elaboración de un mapa de niveles piezométricos, mismo que se representa en la Fig. 4.4.7.

En dicho gráfico se puede observar como los valores de mayor altitud se ubican hacia las riberas de los cuerpos de agua superficiales, con valores de 1520 msnm., disminuyendo paulatinamente hacia el centro de la Ciénega registrándose en su porción media una cota de 1515 msnm, delimitando con ello un gradiente en esa misma dirección.

Los niveles piezométricos menores se registran hacia la porción Sur de la región, entre cerro Pelón y cerro Grande; en estos lugares llegan a ser de hasta 1505 msnm, coincidiendo además con las zonas con un alto índice de volúmenes de extracción. Cabe mencionar, que la posición altitudinal del lago de Chápala es en promedio de 1535 msnm, es decir se encuentra por arriba de la cota promedio de la Ciénega que como se ha mencionado es de 1522msnm, factor que influye notablemente en la comunicación hídrica del lago hacia el acuífero.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

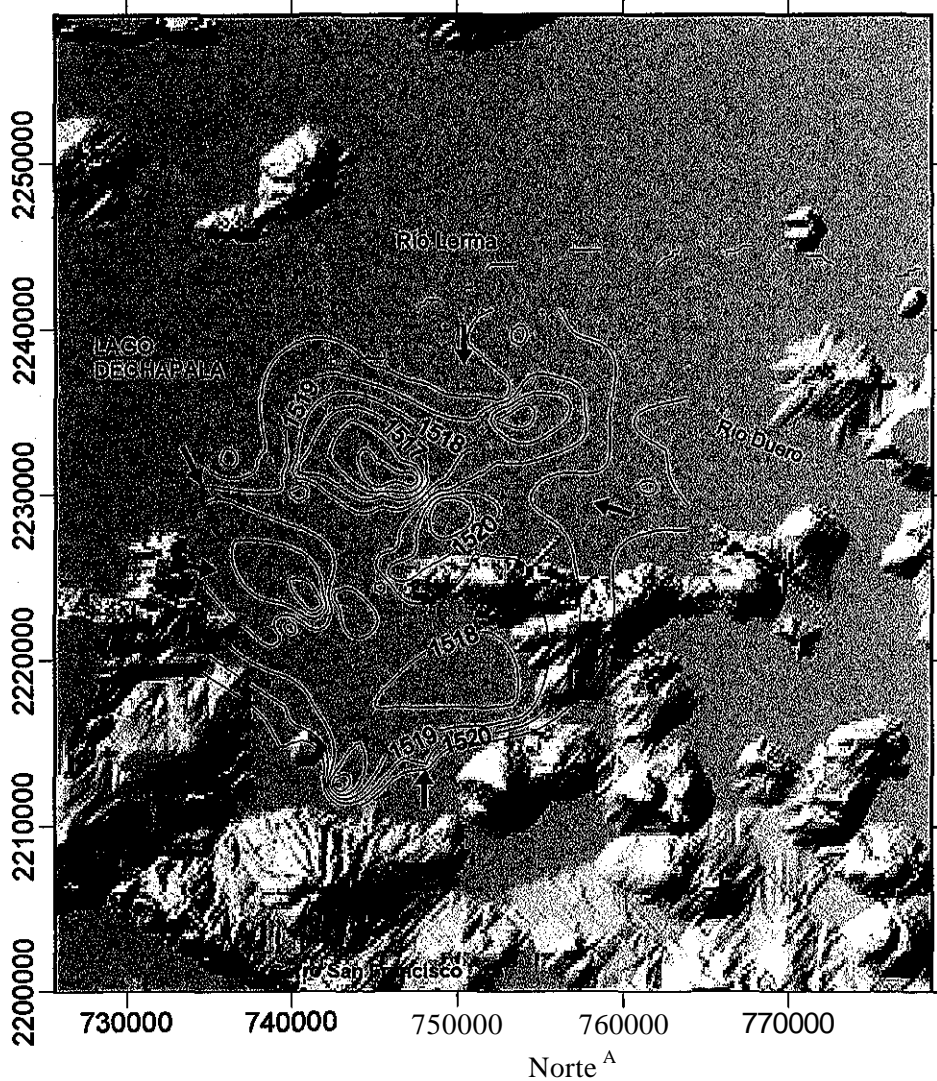


Fig. 4.4.7 Mapa piezométrico en la Ciénega de Chápala, Noviembre del 2000.

Las tendencias piezométricas de un acuífero en las inmediaciones de un lago, permiten postular hipótesis sobre los flujos preferenciales. En la Ciénega, esta situación evidencia flujos del lago hacia el acuífero, del mismo modo los gradientes de concentraciones de fósforo y de cloruros muestran condiciones semejantes.

En el caso tanto de los cloruros como del fósforo, habría que tomar en cuenta que estos pueden provenir también de las actividades agrícolas, aunque los valores permiten inferir que las capas de arcilla de la parte superior están actuando como barreras impermeables a retornos de riego, de no ser así los valores serían más altos. Una manera de confirmar esta hipótesis sería a través de determinaciones analíticas de otros agroquímicos solubles, si están presentes, el fósforo también podría ser el resultado de una mezcla de ambos procesos (infiltración del lago y del retorno de riego).

El cauce del río Duero también se podría considerar como fuente de recarga, específicamente hacia la zona de la desembocadura al lago, la piezometría igualmente describe flujos provenientes del río.

No se detectó boro, por lo menos en los límites de detección analítica (método de ácido carmínico), el cual en este caso es de 1.0 mg/l. Este elemento se incluyó en estos análisis buscando confirmar el origen termal de algunos pozos.

45 Balance hidrológico

La realización de un balance hidrológico tuvo como objetivo principal el de conocer el actual régimen de explotación del acuífero de la ciénega de Chápala, en relación directa con las diferentes variables de entradas y de salidas; considerando, para el primer caso, los aspectos de infiltración, aportaciones por retorno agrícola (perdidas en canales principales, tramo muerto y sobreriego) y corrientes superficiales así como retorno de aguas residuales y para las salidas se tomaron en cuenta las extracciones por bombeo directo y manantiales.

11.1 Entradas

a) Infiltración

El concepto de infiltración se refiere al proceso por el cual el agua penetra al suelo, y queda retenida por él o desciende hasta la zona saturada incrementando el volumen de agua ya existente.

En su calculo, intervienen los parámetros de precipitación, evapotranspiración real y el escurrimiento superficial (Davis y De Wiest, 1966) y se expresa en la siguiente ecuación:

$$O = P - E_r - E_s, \text{ donde } O = \text{índice de infiltración (m}^3/\text{año)}$$

$P = \text{Precipitación m}^3/\text{año}$
 $E_r = \text{Evapotranspiración real en m}^3/\text{año}$
 $E_s = \text{Escurrimiento superficial en m}^3/\text{año}$

Precipitación. El área total de la cuenca en donde se ubica la ciénega de Chápala es de 1356.37 km², de los cuales el 36.5% (495 km²) corresponden a la zona plana con altitudes que varían de 1520 a 1550msnm, caracterizada por su intensa actividad agropecuaria y el 63.5% (861.37 km²) corresponde a las zonas de lomeríos y sierras con altitudes que varían de los 1551 a los 2200msnm.

Para el cálculo de la precipitación, se consideraron datos de 10 estaciones meteorológicas localizadas en la zona de la Ciénega, así como de tres ubicadas en la zona alta, considerando para tal efecto datos de los últimos 20 años.

Con lo anterior se obtuvieron valores de precipitación total del orden de 1104.35 Mm³ por año (tabla 4.5.1), de los cuales el 34.8 % corresponden a la zona de menor pendiente y el resto (65.2%) en la porción montañosa.

Tabla 4.5.1

Valores de precipitación para el área de estudio			
Altitud	Area(km ²)	Precipitación(mm/año)	Volumen de precipitación (Mm ³ /año)
1520-1550	495.00	778	385.11
1551-2200	861.37	834	719.24
TOTAL	1356.37	-----	1104.35

Evapotranspiración: En el calculo de este parámetro, se tomó en cuenta el concepto de evapotranspiración real (Er), definido como la cantidad de agua utilizada por el complejo planta-suelo en las condiciones meteorológicas edáficas y biológicas existentes, aplicando para su cálculo el método de Ture.

Para tal efecto se hicieron los cálculos respectivos tanto para la zona plana como para el área de mayor pendiente o cerril. Para altitudes de 1520-1550 (ciénega de Chápala) considerando una precipitación de 778 mm/año y una temperatura media anual de 19° C, se obtuvo:

$$Er = \frac{P}{\sqrt{0.9 + P^2/L^2}}$$

Donde Er = Evapotranspiración real
 P = Precipitación anual en mm
 $L = 300 + 25T + 0.05T^2$
 T = Temperatura media anual

$$Er = 570.08 \text{ mm/año}$$

Para la altitud de 1551-2200 (Sierra de Pajacuarán) con una temperatura de 15° C y una precipitación de 834 mm/año, el valor obtenido fue:

$$Er = 540.9 \text{ mm/año.}$$

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

En la tabla 4.5.2, se especifica el total del volumen evaporado en toda el área de la cuenca, siendo de aproximadamente del 68% de la precipitación que se registra en la región.

Tabla 4.5.2

Altura (m)	Área (km ²)	P (mm/año)	Volumen evaporado (Mm ³ /año)
1520-1550 (ciénega)	495.00	570.08	282.19
1551-2200 (cerrú)	861.37	540.90	465.91
Total	1356.37		748.10

La influencia de la evapotranspiración en el ciclo hidrológico es importante, si se considera que en muchas partes del mundo el 70% de la precipitaciones se devuelven a la atmósfera, llegando a ser en algunos casos hasta del 90%. Desde el punto de vista hidrológico, este concepto, dentro de un balance hídrico es considerado en el rubro de pérdidas.

El escurrimiento superficial se presenta cuando la capacidad de infiltración en las unidades geológicas es pequeña, influyendo favorablemente en este proceso la vegetación al actuar como interceptor durante las precipitaciones.

Para la Ciénega de Chápala existen dos zonas de escurrimientos superficiales que están determinadas por los factores antes mencionados. La primera es la zona plana (zona a) con una superficie de 495 km² donde el escurrimiento superficial de la precipitación anual es del 20%, es decir del orden de 77.02 Mm³ (SPP-INEGI, 1988). La segunda zona se corresponde con la porción cerril que circunda al distrito de riego 024 (zona b) para esta, el escurrimiento superficial es de 71.92 Mm³, correspondiendo al 10%.(SPP-INEGI, 1988).

Con los cálculos obtenidos para cada parámetro, se procedió a determinar el índice de infiltración, para cada zona, obteniendo lo siguiente:

Zona a:

$$O = P - Er - Es = 385.11 - 282.1 - 77.02$$

$$O = 25.99 \text{ MmVaño}$$

Zona b:

$$0 = P - Er - Es = 719.24 - 465.91 - 71.92$$

$$0 = 181.41 \text{ MmVaño}$$

En resumen la cantidad total que se incorpora por concepto de infiltración de la precipitación en la ciénega de Chápala es de **207.40 Mm³ anuales, (zona a + zona b)**

b) Aportaciones por retorno agrícola

- Tramo muerto y canales principales:

Teniendo como base, datos del 2000 elaborados por la CNA-Sahuayo (com. pers)., para el riego de 18,752 hectáreas, se utilizó un volumen bruto de 101.186 Mm³, conociéndose como tal al caudal aforado en la toma de las fuentes de abastecimientos (presas Tarecuato, Jaripo, Barraje de Ibarra, Lago de Chápala y Bombeo Lerma); por otra parte, el volumen entregado a los usuarios o conocido como volumen neto fue de 80.464 Mm³.

La diferencia entre volúmenes, que es de **20.722 Mm³** y que considera también la evapotranspiración en canales, es el definido como perdidas por tramo muerto de canal y en canales principales del distrito. Lo anterior toma en cuenta que la red principal en su totalidad no cuenta con tramos revestidos. Cada ciclo agrícola esta compuesto por: auxilio de temporal, otoño- invierno, primavera-verano y los cultivos perennes

- Sobreriego

Tomando en consideración los distintos tipos de cultivos para los diversos subciclos agrícolas de los cuales se destacan por su extensión el trigo, cártamo, maíz y sorgo y los perennes como la caña, fresa, alfalfa, pradera y frutales, se obtuvo como volumen total de riego la cantidad de 80.464 Mm³, calculo referenciado a la correspondiente lamina de riego por cultivo; del mismo, se considera como aportación directa al acuífero el 20% del total, producto de excedentes causados principalmente por mal trazado de riego y problemas de drenaje superficial, así se tiene que el volumen que retorna al acuífero por sobreriego es de **16.092 Mm³**.

c) Aguas superficiales

Los principales cuerpos de aguas superficiales existentes en la zona se corresponden con el río Duero específicamente el conocido como Barraje de Ibarra, localizado en el límite norte de la Ciénega, el Río Lerma, así como el Lago de Chápala hacia el oeste del Distrito de Riego. Es de hacer notar que en temas anteriores se pudo definir los mecanismos de comunicación hídrica entre estos cuerpos de agua con el acuífero de la Ciénega, evidenciando la existencia de un flujo preferencial hacia la Ciénega.

El Barraje de Ibarra, cuyo principal afluente es el río Duero, concentra una superficie inundable del orden de 1110 hectáreas con un volumen máximo de almacenamiento de 19.268 Mm^3 . Este barraje es **multifuncional** ya que puede ser utilizado como una presa derivadora, o bien como presa de almacenamiento cuando el gasto que lo alimenta es mínimo y además en temporadas de lluvias se convierte en el cauce natural del río Duero. Presenta un volumen de escurrimiento anual, aforado en la estación San Cristóbal, de $303,907 \text{ Mm}^3$, siendo el mes de septiembre el que registra el mayor volumen con $69,674 \text{ Mm}^3$ y abril el de menor volumen con 4115 Mm^3 .

Para calcular su aporte hacia el acuífero se consideró en primer término, el total de la superficie diaria inundada, así como valores de conductividad hidráulica de la zona aledaña a dicho Barraje, para ello, fue utilizado el permeámetro Soilmoisture-2800, obteniendo un valor de conductividad hidráulica de $1.25 \cdot 10^6 \text{ m/s}$. Al relacionar ambos factores, se estimó su contribución hacia el acuífero que fue de **$40.545 \text{ Mm}^3/\text{año}$** .

En el cálculo de la alimentación del acuífero proveniente del Río Lerma, se tomó como referencia el valor anterior de la permeabilidad así como la longitud de influencia hacia la Ciénega de este afluente que es de 17 km, y un perímetro mojado de 34m que es el promedio obtenido durante los 90 días que dura el escurrimiento producto de la época de lluvias. Con lo anterior se alcanzaron valores del orden de **5.618 Mm^3** .

Para el caso del lago de Chápala, se consideraron los siguientes factores: Ancho de flujo, con una extensión de 10,250m; la distancia entre dos líneas piezométricas que fue de 2000m, así como su diferencia de carga hidráulica que fue de 1m.

El siguiente factor a considerar fue la transmisividad, obtenida de una prueba de bombeo de periodo corto (4 Hrs) cuyo valor fue de $1.5 \cdot 10^3 \text{ m}^2/\text{s}$. Para efecto de calculo se ha utilizado la siguiente la ecuación:

$$Q=T*(h1-h2)B/L$$

Donde:

Q = Gasto m^3/s

T = Transmisividad m^2/s

hi-h2= Carga hidráulica.

B = Ancho de flujo

L = distancia entre dos líneas equipotenciales

De lo anterior se tiene que el lago aporta un volumen de **0.893 Mm³/año**.

d) Aguas residuales:

En la Ciénega de Chápala, la población desecha aproximadamente el 80% del agua que consume (CNA, 2000); estas aguas residuales son incorporadas a la infraestructura agrícola existente, para posteriormente ser utilizadas en actividades de riego durante la época de estiaje, por lo que este volumen, también estará supeditado a la influencia de la evapotranspiración e infiltración.

Como el 95% de la infraestructura agrícola se localiza en una zona cuyo coeficiente de infiltración es del 20%, se tiene que de los 8.926Mm^3 (volumen de uso domestico) se incorporan **1.785 Mm³**.

e) Otras entradas no cuantificables:

Dada las características geológicas prevalecientes en la zona de estudio, caracterizado por la presencia de un ambiente geotérmico, manifiesto en áreas como Los Negrito e Ixtlán de los Hervores, es evidente la existencia de flujos regionales ascendentes profundos (Rva) que alimenta al acuífero a través del sistema de fallas geológicas profundas (fallas de Pajacuarán, Encinal, etc), que no fue posible su calculo. De igual modo, no fue viable cuantificar la recarga por concepto de flujo lateral regional (Rfl).

11.2 Salidas:

a) Extracción de pozos:

Del censo de pozos actualizado hasta el año 2000 por la CNA-Sahuayo, se tiene un total de 425, que en su mayoría son para uso agrícola, con un volumen autorizado de extracción del orden de 24.298 Mm³/anuales para el beneficio de una superficie de 4,039 hectáreas; en este caso, el volumen real de explotación tomando en cuenta datos del periodo, 1999-2000, es del orden de 11 Mm³/año.

Por otra parte, es necesario considerar la presencia de pozos clandestinos en explotación y que representan un 20 % del total de ellos, lo que significa tomar en cuenta un volumen adicional aproximado de 2.75 Mm³, por lo cual el volumen total de agua extraída para uso agrícola es de 13.75 Mm³.

Respecto del volumen para uso doméstico, el gasto obtenido fue de 8.926 Mm³/año, tomando en consideración que en la Ciénega se cuenta con una población de 174,924 habitantes (INEGI,1995), y cuyo promedio de consumo per cápita es de 140 lhd.

De manera que por este rubro la extracción se sitúa en **22.676 Mm³/año**.

b) Manantiales

En la zona de estudio los manantiales más importantes que se localizan son: Tzindio, Cieneguita y Ojo de agua, que en promedio arrojan un gasto total anual de 2.51 Mm³. De este volumen de agua, se aprovecha para uso domestico el 30% y el resto para actividades agrícolas que se desarrollan fuera de la Ciénega.

En la tabla 4.5.3, se presenta una síntesis de dichos conceptos:

Tabla 4.5.3

BALANCE HÍDRICO EN LA CIENEGA DE CHAPALA, AÑO 2000			
ENTRADAS	Mm ³ /año	SALIDAS	Mm ³ /año
Infiltración	207.40	Bombeo de pozos	22.676
Retorno agrícola. (TM,SR)	36.814	Manantiales	2.51
Corrientes superficiales (BI, RL, LCH)	47.056	Salidas laterales (SI)	No cuantificada
Aguas residuales	1.785		
Flujo vertical ascendente (Rva)	No cuantificada		
Recarga lateral regional (Rlr)	No cuantificada		
Total	293.055	Total	25.186
BALANCE = E - S = 293.055 - 25.186 = 267.869 Mm³/año DMU = I + R + K + A + Rva + KII S = Ip + N + SI			

TM: Tramo muerto; SR: Sobreriego; BI: Barraje de Ibarra; RL: Río Lerma; LCH: lago de Chápala

En resumen, la cantidad de aporte al acuífero por los diversos factores ya explicados es de 293.055 Mm³/año; y para el caso de salidas, un total de 25.186Mm³/año, con ello es factible mencionar que para el periodo medido, el balance hídrico obtenido es favorable en 267.869 Mm³.

Este pudiera ser mayor, si se incorporan flujos regionales ya sea de tipo ascendentes, propios de un ambiente termal o bien los flujos laterales, los cuales al momento no fue posible su cuantificación. Esto compensaría errores en todos los parámetros involucrados particularmente en las evaluaciones de las descargas. Por lo antes expuesto, este balance debe ser considerado como preliminar.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

6. VULNERABILIDAD DEL ACUÍFERO

El riesgo de contaminación de un acuífero se puede definir como la probabilidad de que el agua subterránea se contamine con alguna sustancia en concentraciones por encima de los valores recomendados por la Organización Mundial de la Salud para la calidad del agua de consumo humano (Foster e Hirata, 1991).

Para la zona de estudio, se aplicó el método DRASTIC (Aller et. al, 1985), como esquema de diagnóstico del grado de vulnerabilidad, basado en siete factores:

D, profundidad del nivel estático. Un monitoreo directo de este parámetro, en pozos profundos, se llevó a cabo en época de estiaje. Para esa temporada, la profundidad de dichos niveles osciló de 1 a 16 m, registrándose los valores menores hacia las estribaciones volcánicas existentes, así como en la periferia de los principales cuerpos superficiales de agua (Lago de Chápala y Río Duero).

Por otra parte, con las lecturas *piezométricas*, se definieron dos direcciones preferenciales de flujo; la primera, con orientación NE-SO, teniendo al lago de Chápala como elemento de recarga del acuífero y una segunda SE-NO que reconoce como zona de recarga a las principales prominencias volcánicas de la zona, específicamente la sierra de Pajacuarán.

R, recarga neta. Este factor involucra aspectos relacionados con la temperatura y la precipitación. El análisis de los datos obtenidos de las estaciones meteorológicas localizadas en la Ciénega (propiedad de la CNA), revela, para la última década, un incremento en la temperatura de un grado, manteniendo un promedio regional de 18.6°C; Para el caso de la precipitación, la misma refleja un ligero decremento para la década de los noventa con respecto de la década anterior (100mm), siendo el valor promedio regional de 911.9 mm.

A., tipo de acuífero. Descrito con anterioridad, en la parte superficial se presenta un paquete de características areno - arcillosas que se corresponde con los depósitos aluviales y lacustres recientes de alta porosidad y baja permeabilidad y cuya respuesta hidráulica es el de un acuitardo.

Infrayaciendo a esta unidad, se encuentra el acuífero actualmente en explotación, constituido por intercalaciones de areniscas y depósitos volcánicos piroclásticos. Las unidades arriba descritas representan un sistema con condiciones de semiconfinado a libre en las márgenes del valle y manifiestan comunicación hidráulica con la secuencia volcánica fracturada que la infrayace.

S, tipo de suelo. Dentro de la Ciénega se acumulan suelos de tipo areno-arcillosos, en tanto que en las periferias del valle predominan los suelos arenosos y hacia las partes montañosas su distribución superficial representa un mínimo porcentaje. Este hecho se refleja en los índices DRASTIC para este parámetro, en donde los valores más bajos se encuentran en la zona de menor pendiente y los más altos en las zonas montañosas.

T, topografía. Apoyados en cartografía INEGI, así como de la medición en campo de pendiente, se obtuvieron datos referidos a los distintos grados de pendientes para el área de estudio, mismas que no superaron el 15 %. Para el parámetro de topografía los índices DRASTIC más altos se encuentran en el valle y los valores más bajos se hallan hacia las estribaciones de las partes montañosas.

I, impacto a la zona no saturada. Al igual que la distribución de unidades hidrogeológicas, los índices DRASTIC más bajos para este parámetro se ubicaron, específicamente en donde predominan someramente materiales areno-arcillosos; en tanto que los índices más altos se definieron en unidades hidrogeológicas formadas por materiales fracturados.

C, conductividad hidráulica. Parámetro obtenido por correlación directa con materiales cuyos valores son conocidos y que ofrecen similitud con el tipo de litología presente en la región. Así, los valores obtenidos en el área han sido mayores para medios fracturados que para medios granulares, esta misma respuesta se ve en la distribución de los índices DRASTIC, sin embargo algunas

estructuras permeables como son las fallas regionales, tienen fuerte influencia en los valores altos de este parámetro.

La determinación del índice DRASTIQ involucra la multiplicación de cada uno de los 7 factores considerados, por la puntuación del rango y su suma total. Valores altos de la suma representan fuentes potenciales de contaminación del agua subterránea o una gran vulnerabilidad del acuífero. El mínimo total del índice es 26 en tanto que el máximo es 260.

Para un área dada, cada factor está relacionado con una escala de 1 a 10, no asignando valores de clase cero a ninguno de los elementos, siguiendo la Primera Ley de la Vulnerabilidad "toda el agua subterránea es susceptible de contaminarse".

Una vez que todos los factores han sido asignados a un rango, éste es multiplicado por el peso asignado y el número resultante es sumado como se indica a continuación:

$$D D_w + R R_w + A A_w + S S_w + T T_w + I I_w + C C_w = I_{\text{DRASTIC}}$$

Los pesos de importancia para los factores DRASTIC, son los siguientes: de 5, para el factor D; de 4 para el factor R; de 3 puntos para el factor A; para el tipo de suelo (S), es de 5 puntos; será de 3 puntos para el factor T; para el factor I, es de 4 puntos y finalmente de 2 puntos para el referido a la conductividad hidráulica (Q). (Aller et al, 1985).

D R A S T I C. Dado que el plano de vulnerabilidad DRASTIC es el resultado de la suma aritmética de los siete parámetros, los valores altos son provocados por valores altos de cada uno de ellos. En la Fig. 5.1, se observa como los valores más bajos (130) se encuentran hacia las zonas de menor pendiente en la ciénega de Chápala y los valores altos (220) se ubican hacia la zona considerada como de recarga y en las proximidades de algunas estructuras con carácter permeable como son las fallas geológicas regionales.

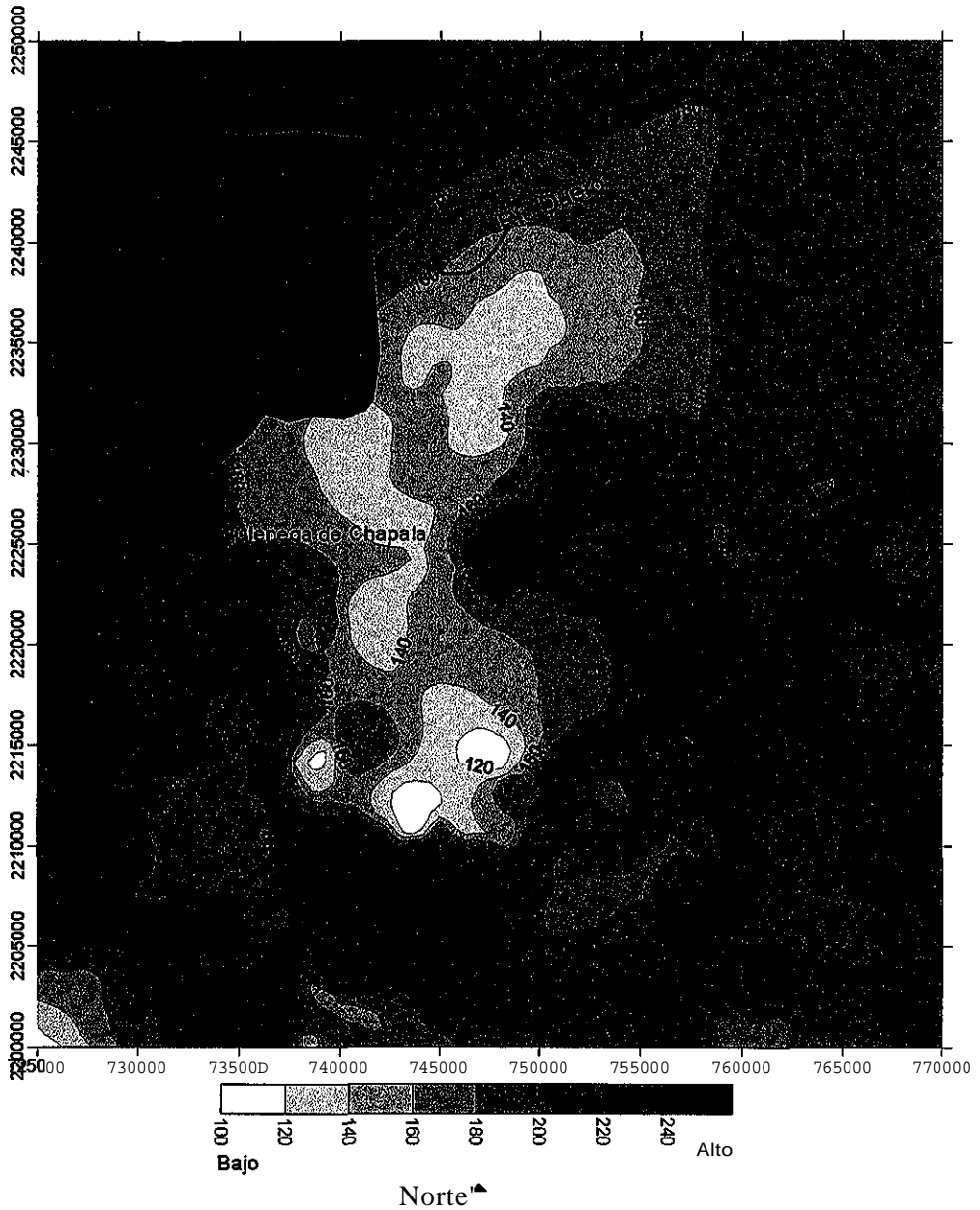


Fig. 5.1 Plano de vulnerabilidad DRASTIC para la región de la Ciénega de Chápala, Mich.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

El papel que juegan estas estructuras regionales es más que evidente en la Ciénega y se correlaciona con lo obtenido por Silva, et al. (1999, 2000) para el caso del valle de Tangancícuaro, en donde fallas geológicas regionales asumen un papel preponderante en el concepto de vulnerabilidad acuífera.

6. SUSTENTABILIDAD HÍDRICA

La gestión integral del recurso hídrico promueve el manejo y desarrollo coordinado del agua, con el fin de maximizar el bienestar social y económico resultante, de manera equitativa, sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas involucrados.

Martínez, 2001, reflexiona en torno a que todo ser humano debe tener acceso seguro al agua para satisfacer sus necesidades de consumo, saneamiento, producción de alimentos y de energía, a un costo razonable. El abastecimiento de agua para la satisfacción de estas necesidades básicas debe realizarse en armonía con la naturaleza.

Existen varias interpretaciones en torno al concepto de desarrollo sustentable, algunas se centran en los aspectos físicos del mismo; otras, de carácter económico, se enfocan al manejo óptimo del recurso obteniendo el máximo beneficio lo que se traduce en crecimiento económico necesario para mitigar la pobreza; sin embargo, algunos argumentan que el "desarrollo sustentable" es un término contradictorio y que la vía para combatir la pobreza no es el crecimiento sino la redistribución de la riqueza.

El analizar el estado actual que guarda el recurso hídrico en la Ciénega en función de la demanda de un servicio, es un factor importante para inferir las futuras tendencias de su oferta-demanda; en este caso, el desarrollo sustentable significa conservación del agua eliminando su uso irracional, mejorando su rendimiento y calidad.

El papel que juegan estas estructuras regionales es más que evidente en la Ciénega y se correlaciona con lo obtenido por Silva, et al. (1999, 2000) para el caso del valle de Tangancícuaro, en donde fallas geológicas regionales asumen un papel preponderante en el concepto de vulnerabilidad acuífera.

6. SUSTENTABILIDAD HÍDRICA

La gestión integral del recurso hídrico promueve el manejo y desarrollo coordinado del agua, con el fin de maximizar el bienestar social y económico resultante, de manera equitativa, sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas involucrados.

Martínez, 2001, reflexiona en torno a que todo ser humano debe tener acceso seguro al agua para satisfacer sus necesidades de consumo, saneamiento, producción de alimentos y de energía, a un costo razonable. El abastecimiento de agua para la satisfacción de estas necesidades básicas debe realizarse en armonía con la naturaleza.

Existen varias interpretaciones en torno al concepto de desarrollo sustentable, algunas se centran en los aspectos físicos del mismo; otras, de carácter económico, se enfocan al manejo óptimo del recurso obteniendo el máximo beneficio lo que se traduce en crecimiento económico necesario para mitigar la pobreza; sin embargo, algunos argumentan que el "desarrollo sustentable" es un término contradictorio y que la vía para combatir la pobreza no es el crecimiento sino la redistribución de la riqueza.

El analizar el estado actual que guarda el recurso hídrico en la Ciénega en función de la demanda de un servicio, es un factor importante para inferir las futuras tendencias de su oferta-demanda; en este caso, el desarrollo sustentable significa conservación del agua eliminando su uso irracional, mejorando su rendimiento y calidad.

Para la región, se propone una metodología, que pueda ser aplicada en otras regiones, encaminada a determinar estrategias de manejo y operatividad de un acuífero, con criterios de sustentabilidad, específicamente a lo concerniente con la extracción del agua subterránea. A través de la definición de un "índice de Veda" (esquema de restricción a la apertura de nuevos aprovechamientos), esta proposición, involucra a seis parámetros específicos.

En primer termino fue considerado, en igual circunstancia, la densidad de pozos y el régimen de extracción, dado la directa relación entre ambos factores; existe una irregular distribución de pozos en la Ciénega, pudiendo encontrar zonas en donde la existencia de aprovechamientos es muy alta, o bien el caso opuesto, amplias áreas en donde no existen pozos. Los rangos de extracción, están proporcionalmente definidos por la concentración de pozos.

La calidad química del agua subterránea es también de especial importancia ha considerar; el problema asociado a este concepto, ha tenido efectos negativos sobre todo en el ámbito agropecuario, principal actividad económica de la Ciénega.

La calidad de los suelos, también representa un aspecto de relevancia. El proceso de ensalitramiento de suelos es cada día mayor, estimándose que cerca de 5000 ha, presentan serios problemas de salinidad y sodicidad (CNA,2000), lo que ha repercutido en significativas mermas económicas a los agricultores por la disminución en sus índices de productividad. De hecho tierras que hace apenas 5 años reportaban cosechas de trigo de hasta 9 ton/ha, en el ciclo otoño-invierno/2000, sus índices de productividad han disminuido en más del 50%.

Los niveles de abatimiento del agua subterránea, de igual manera es importante tomar en cuenta, ya que es un indicador de la existencia de problemas, que se puedan asociar a un aprovechamiento inadecuado del recurso. En la Ciénega, si bien actualmente los niveles piezométricos registrados, son muy someros y los rangos de abatimiento no son alarmantes, ya existen sitios en donde los mismos han llegado al 0.75 m/año.

La subsidencia, es un fenómeno que esta presente con mayor frecuencia en zonas con características lacustres, ejemplos de ello son el D. F., Salamanca, Querétaro, Aguascalientes, Celaya y Morelia, en donde los problemas asociados a este aspecto, han representado perdidas económicas cuantiosas. Para la zona, los niveles de hundimientos son bajos, pudiéndose asociar estos a sitios en donde la extracción y presencia de pozos es alta.

En la tabla 6.1, se describe cada uno de los factores considerados, con sus respectivos valores de peso, escala y rango:

Tabla 6.1

Factor: Densidad de Pozos		Factor: Volumen de Extracción		Factor: Nivel de Hundimiento	
Escala	Rango (No/4km2.)	Escala	Rango (m ³ / año)	Escala	Rango (m/ año)
0.3	0-4	0.3	<156,000	0.3	1
0.6	5-9	0.6	156,000-534,000	0.6	2
1.0	>9	1.0	>534,000	1.0	3
Escala	Rango	Escala	Rango (m/ año)	Escala	Rango (m/ año)
0.3	1	0.3	0.0-0.5	0.3	0.0-0.05
0.6	2	0.6	0.5-1.0	0.6	0.05-0.10
1.0	3	1.0	>1.0	1.0	>0.10

A continuación, se realiza un análisis detallado de cada factor:

Densidad de Pozos.

Con el análisis de este factor, se delimitan claramente aquellas zonas con mayor concentración de pozos o el caso contrario en donde la existencia de ellos es mínima, esto conlleva a proponer nuevas reglas de operatividad encauzadas a una distribución mas homogénea de los actuales aprovechamientos.

Por su importancia en el esquema de manejo del agua subterránea en la Ciénega, el peso otorgado a este aspecto fue el máximo con un valor de 5.

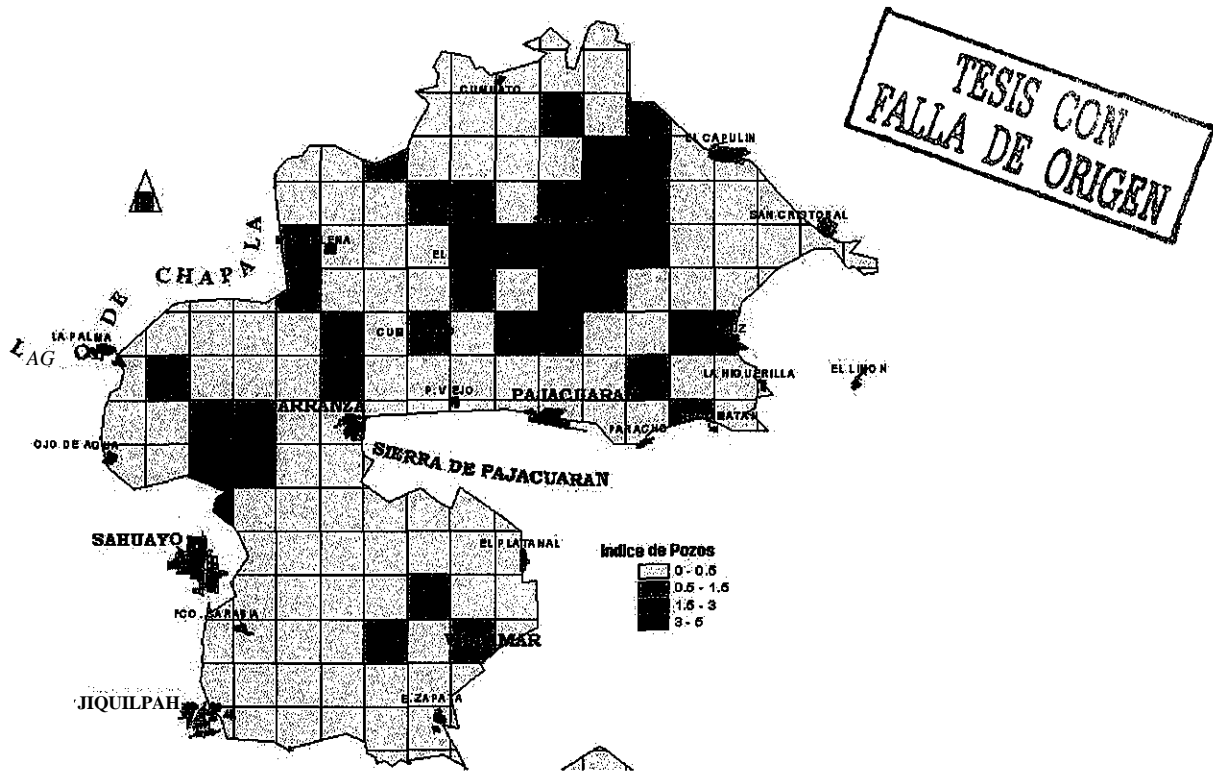
El censo de pozos actualizado, indica que en la zona de estudio existen aproximadamente 425 pozos (CNA-2000), existiendo una concentración de ellos por área de 4 km², que varían desde cero hasta un total de 17.

En la Tabla 6.2 se especifican las Categorías y rangos definidos para este factor.

Tabla 6.2

Categoría	Rango (No. pozos/4km ²)
Baja	0-4
Moderada	5-9
Alta	>9

La distribución del índice de densidad de pozos (obtenido del producto del peso por el valor normalizado o escala), se observa en la Fig. 6.1.



Norte^A

Fig. 6.1 Distribución del índice de densidad de pozos para la Ciénega de Chácala.

Destacando la región sur, de la Ciénega, específicamente hacia la zona de Jiquilpan y Emiliano Zapata, como la de menor valor. Por el contrario hacia el norte de la ciudad de Sahuayo y en el área de El Fortín y San Gregorio (porción norte-centro) se ubican los valores máximo, con índices que sobrepasan los 3 puntos, presentándose en esta zona en específico una alta sobreposición de los dominios de pozos.

Régimen de Extracción

Muy relacionado con el factor anterior, el peso otorgado a este factor de igual manera fue de 5, delimitándose niveles de extracción por áreas de 4 km². Para obtener los datos correspondientes a este concepto, se tomaron en cuenta los volumen autorizados en los títulos de concesión para cada pozo, información existente en los archivos de la CNA-Sahuayo; siendo verificados en campo algunos

puntos de control. Actualmente de la Ciénega se extrae por bombeo de pozos 22.676 Mm³/año.

De estos datos se definieron tres rangos de extracción mostrados en la tabla 6.3

Tabla 6.3

Clase (Índice)	Consumo (KcmH) (m ³ /jntO)	Lsi (lk)
Bajo	< 156,000	0.3
Medio	156,000-534,000	0.6
Alto	> 534,000	1.0

En la Fig. 6.2, se delimitan las distintas zonas del índice del régimen de extracción:

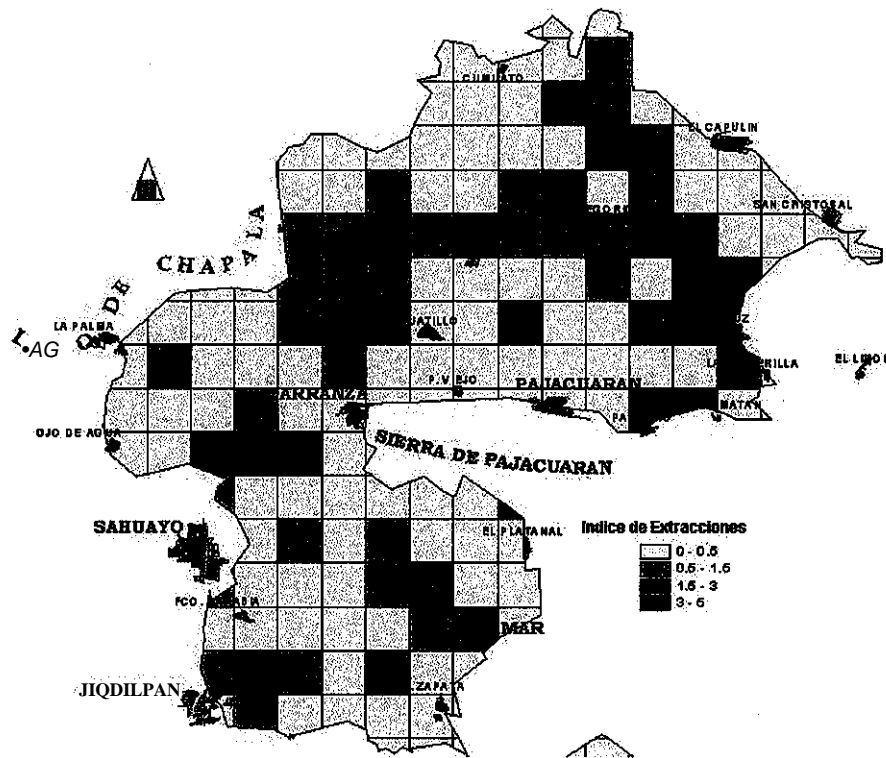


Fig 6.2. Distribución del índice de extracción en la Ciénega de Chápala, siendo el rango mayor de 3-5.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Se destaca la porción norte de la Ciénega, como la que registra los valores máximos, específicamente hacia el poblado de San Gregorio, siendo coincidente con el parámetro de densidad de pozos.

Calidad química del agua

Este factor, es de igual manera muy relevante dentro de la obtención del índice de veda, ya que esta demostrado, que el uso intensivo del agua subterránea de mala calidad que se explota en distintas zonas de la Ciénega, ha afectado directamente la productividad agrícola en ejidos como el de Pajacuarán, La Magdalena, Federal Michoacana, Venustiano Carranza y Cumuatillo entre otros, provocando pérdidas económicas. Por ello el peso en importancia otorgado de 4.

Fueron determinados tres tipos de intervalos para este parámetro, siguiendo los criterios de Palacios y Aceves (1970):

Recomendable(tipo1), Condicionada (tipo 2), No recomendable (tipo 3).

Las características de cada una de ellas se presentan en la tabla 6.4

Tabla 6.4

Tipu	Clasificación	be (mci/l)	Sp (mg/l)	CE (µmhos/cm)	RAS (Sfnn-q/l)
1	KULUUKJILLULI	<5	<5	<750	<10
2	Condicionada	5-15	5-15	750-2250	10-25
3	No Recomendada	>15	>15	>2250	>25

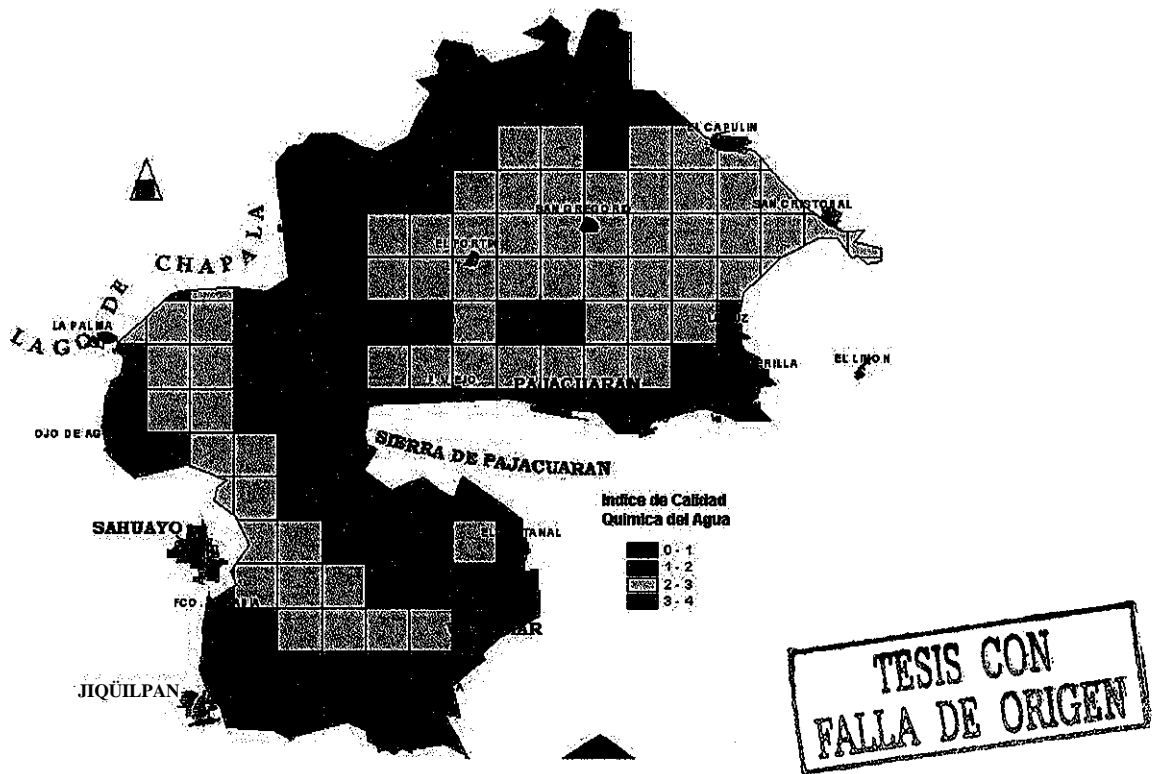
Se: Salinidad efectiva; Sp: Salinidad potencial CE: Conductividad eléctrica; RAS: Relación de adsorción de sodio

El agua de tipo 1, es aquella que de acuerdo a las condiciones propias de la Ciénega su afectación es mínima a los suelos, no presentando restricción al desarrollo de los cultivos.

El tipo 2, es agua que puede ser utilizada en actividades agrícolas con ciertas restricciones, específicamente en la selección del tipo de cultivos, que deberán ser resistentes a estos rangos de salinidad y sodicidad, ejemplos de ellos son la alfalfa, zanahoria, sorgo, trigo, cebolla, etc, muy comunes en la región. Aunado a lo anterior es necesario que se cuente con un drenaje parcelario eficiente.

El tipo 3, es un agua no recomendable para su uso en actividades agrícolas, ya con esos valores el riesgo de degradación de los suelos por procesos de salinización y sodificación se ve altamente acelerado, de hecho áreas que han estado sometidas a estas condiciones, en tan solo 5 años, presentan rangos de productividad que se han visto reducidos en mas de un 60 %.

En la Fig. 6.3, se puede ver la distribución del índice obtenido para este factor.



Norte ^

Fig. 6.3. Distribución del índice de calidad química del agua en la Ciénega de Chapala.

Sobresaliendo aquella franja de buena calidad que coincide con la periferia del contorno volcánico, con valores que no superan los dos puntos. De hecho ya se menciona con anterioridad la estrecha relación que se da entre el medio acuífero y su asociación directa con la calidad del agua, quedando demostrado que el acuífero volcánico en explotación es el que ofrece las mejores condiciones en cuanto a este factor se refiere.

Calidad del Suelo.

Tomando en consideración el estudio de clasificación de suelos realizado por la SRH, 1972, en el cual se determinaron 5 series de suelos, así como por datos más recientes sobre la calidad de los mismos, (CIIDIR-MICH,2000), se definió un esquema de clasificación que se presenta en la tabla 6.5.

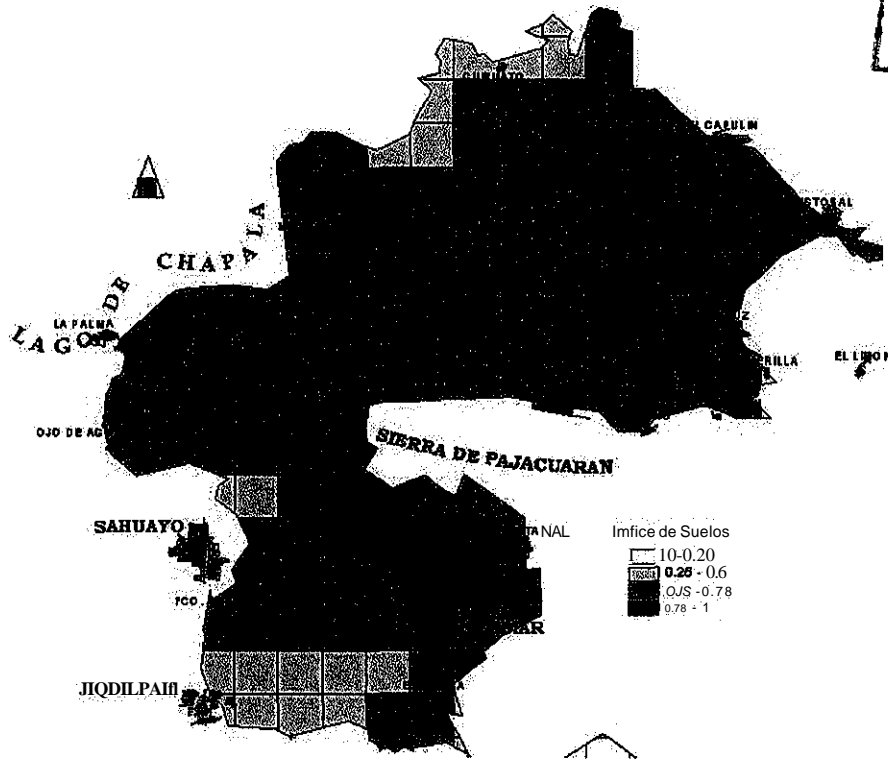
Tabla 6.5

Tip	Categoría	Serie	Grado de salinidad	Cl (kg/ton)	pH	W.L.P.
1	Bueno	5	Bajo	<2000	<8.2	0.3
2	Regular	1,2,3	Ligero	2000-4000	8.2-8.5	0.6
3	Malo	4	Alto	>4000	>8.5	1.0

Series: 1. Cumuatülo; 2. Junco; 3. Pajacuarán; 4. Guaracha; 5. Jiquilpan

En la Fig. 6.4, se observa la distribución del índice de este parámetro, quedando bien definidas tres zonas que a continuación se describen:

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Norte-*

Fig. 6.4 Distribución del índice de suelo, para la Génega de Chápala.

En la zona definida como Tipo 1, con índices del orden de 0.25 a 0.6, se desarrolla una magnífica agricultura, con altos rangos de productividad, representa el 10% de la Ciénega, destacando cultivos como cebolla, fresa, jitomate, papa y granos básicos como maíz y sorgo.

La zona tipo 2, comprende el 86% de la Ciénega y su índice alcanza los 0.74 puntos, se desarrolla la mayor parte de la actividad agrícola de la misma, con productividades que paulatinamente se han visto afectadas sobre todo por un uso intensivo de aguas subterránea de mala calidad.

Finalmente la zona tipo 3, con un índice superior a 0.75 puntos, se corresponde con el área de influencia de la región geotérmica de Los Negritos, al norte de la comunidad de Villamar, en la porción sureste de la Ciénega, siendo agriculturas de temporal, destacando por su baja productividad.

Abatimiento del Nivel Estático.

En la zona de estudio, la profundidad de los niveles estáticos son muy someros, mostrando una variación entre 1.2 m como mínimo hasta los 16 m como máximo en algunas pequeñas áreas localizadas en la porción suroeste de la Ciénega, registrándose, en los mismos, rangos de abatimiento para en año 2000 inferior a 1.0m.

En la tabla 6.6 se describen las categorías y rangos de este factor:

Tabla 6.6

Categoría y rango	Rango de abatimiento (m)	Índice
Bajo	0.0-0.5	0.3
Medio	0.5-1.0	0.5
Alto	>1.0	1.0

Siendo la zona más ampliamente distribuida aquella en la que los valores no superan los 0.5 m., destacando lugares, con valores del orden de 1m, que registra el mayor índice de concentración de pozos y por ende de extracción. El régimen de abatimiento de igual manera refleja una distribución similar a los rangos de la profundidad del nivel estático. Para este caso, el nivel jerárquico otorgado o peso es de 3. En la Fig. 6.5, se observa la variación regional del índice correspondiente.

Los valores máximos, se localizan muy próximos a la ciudad de Jiquilpan, siendo el rango de 0.8-1, el más ampliamente distribuido.

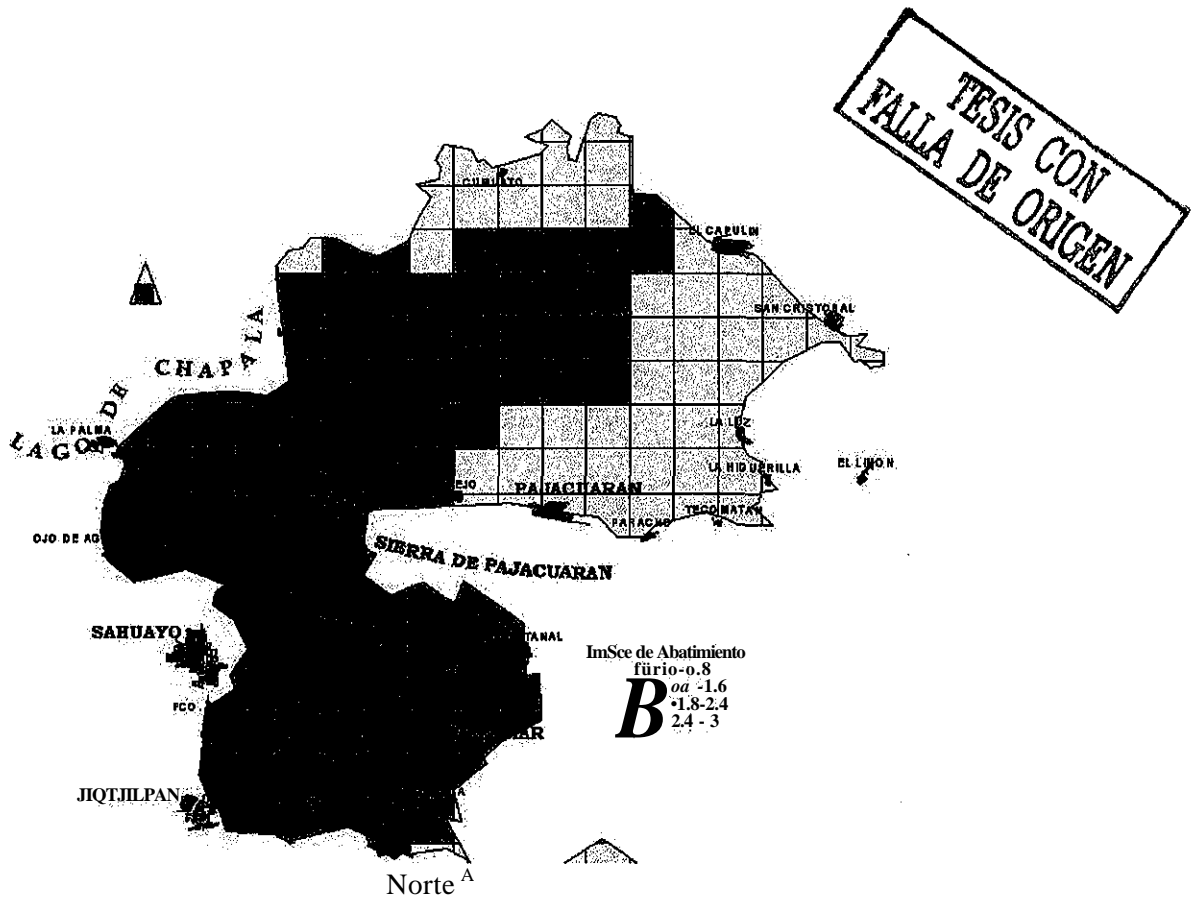


Fig. 6.5 Distribución del índice de abatimiento en la Ciénega de Chapala.

Subsidencia

La problemática que encierra la existencia de verdaderas áreas en proceso de hundimiento en diversas zonas urbanas del país (Morelia, Salamanca, Celaya, Cd. Guzmán, etc.), con la presencia de agrietamientos superficiales que afectan la infraestructura existente, justifica la necesidad de estudiar a fondo este fenómeno, ya que en gran medida se maneja la hipótesis de que dicha manifestación bien se puede asociar a un proceso de extracción de agua subterránea excesivo, asociado esto a una componente tectónica. Garduño, et al. (2000)

En sitios en donde se tiene sospecha de la probable existencia de fallas geológicas y en el que se pretende realizar obras civiles importantes, es en definitiva primordial tomarlo en consideración, ya que de su conocimiento (origen y evolución) será viable emitir propuestas de acción de tipo preventivo que permitan dar seguridad al usuario de las mismas.

En la tabla 6.7, se exponen los rangos y categorías a considerar:

Tabla 6.7

Categoría y rangos para el factor de subsidencia		
Categoría	Rango (m/año)	Escala
Baja	0.0-0.05	0.3
Moderada	0.05-0.10	0.6
Alta	>0.10	1.0

En la Ciénega de Chápala, el fenómeno de subsidencia no representa peligro alguno para la infraestructura existente, de hecho no se presenta (Fig. 6.7) ya que el acuífero no está en una fase de desequilibrio que pudiera acelerar dicho proceso; sin embargo y dada la experiencia en otra zonas del país es importante su consideración para los fines que se persiguen en este estudio.

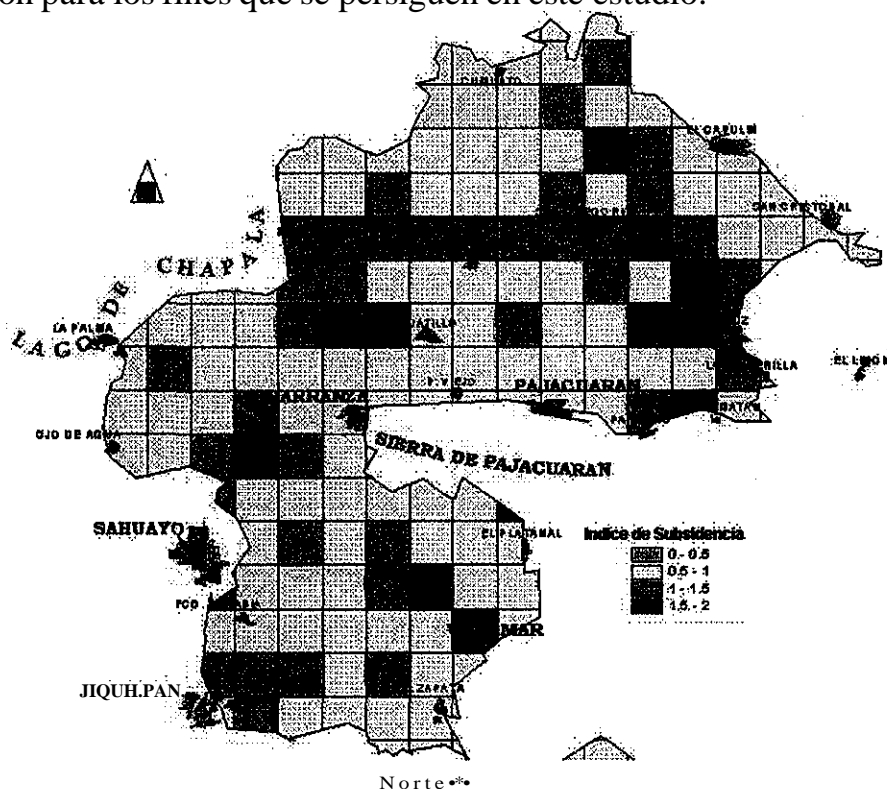


Fig.6.7 Distribución del índice de subsidencia, en la Ciénega de Chápala.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Finalmente, se procede a la suma aritmética de cada uno de los índices obtenidos por cada factor, generando para cada cuadrante un valor único al que se denominó índice de Veda del Acuífero.

Los valores obtenidos estuvieron en el rango de 0.1 a 14.6, con lo anterior, se propone tres niveles de índices de veda bajo los criterios expuestos en la tabla 6.8.

Tabla 6.8

Índice de Veda del Acuífero (IV) y sus niveles de restricción		
Índice de Veda (IV)	Restricción	Rango
1	Sin Restricción	0.1-5.1
2	Condicionada	5.1-8.9
3	Restricción Total	8.9-14.6

Considerando con un IV-1, las zonas en las cuales es factible la explotación del acuífero, cuidando que para estas áreas, se respeten las distancias mínimas entre pozos, así como atender aspectos relacionados con sus diseños constructivos.

Las áreas con un índice IV-2, de restricción controlada, sólo podrán ser factibles de explotación cuando se demuestre que se ha trabajado adecuadamente en el diseño del pozo; la profundidad mínima ha alcanzar por los pozos será superior a los 200m, a efector de explotar el acuífero volcánico, sellando el estrato superior de tipo lacustre, que permita garantizarla extracción de agua de buena calidad.

Paralelamente, se hace importante impulsar la implementación de técnicas agrícolas modernas que permitan mayor racionalidad en el manejo del recurso, ejemplo de ellas son los sistemas de fertirrigación.

Finalmente, áreas con IV-3, no es recomendable ningún tipo de explotación del acuífero, dado su alto grado de deterioro en el que se encuentra el recurso; en este caso estas regiones deberán ser sometidas a un plan de recuperación de corto plazo a través de estimular un política nueva operativa que contemple el cierre de fuentes de extracción, el rediseño de pozos y la recuperación de suelos salinos.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Como se observa en la Fig. 6.7, un alto porcentaje (43%) de la Ciénega de Chápala presenta condiciones muy altas de inequidad y vulnerabilidad, manifestándose por la explotación de agua de mala calidad (malos diseños de pozos), existencia de altas concentraciones de pozos en áreas pequeñas y un alto grado de sobreposición de dominios entre pozos. Por el contrario, aquellas zonas que son coincidentes con el contorno volcánico muestran mejores perspectivas de explotación.

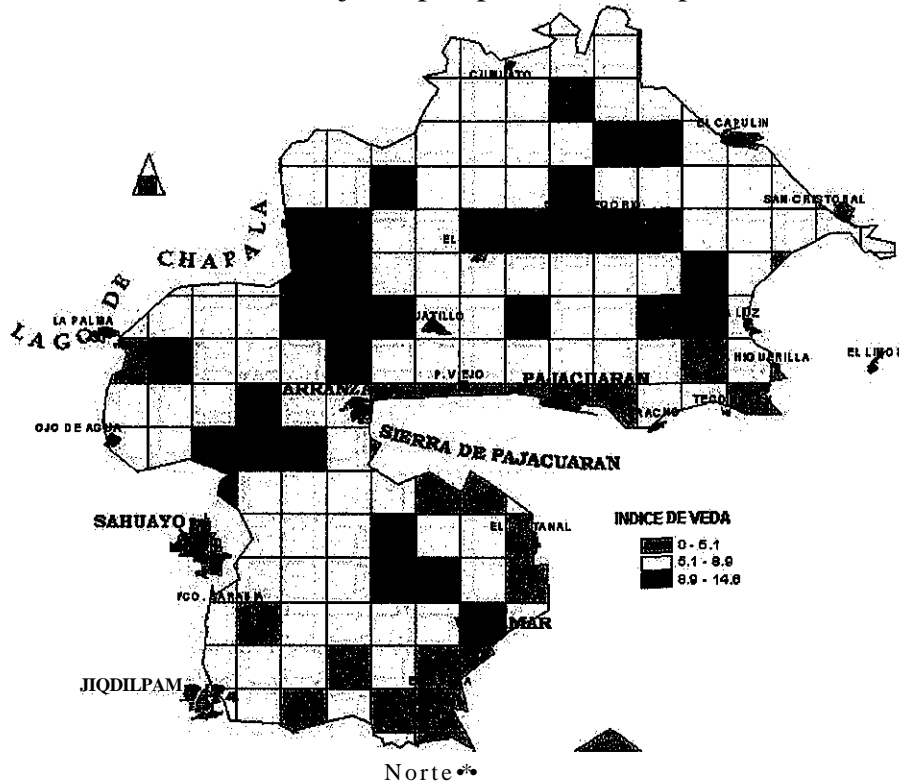


Fig.6.7 Esquema general de distribución del índice de Veda para la Ciénega de Chápala. Los valores máximos representan áreas con mayores restricciones de explotación.

El *índice de Veda del Acuífero* (IV), pretende incidir en el manejo científico del recurso hídrico, fomentando políticas y reglas sustentables de operatividad, basados principalmente en el conocimiento que se tiene del estado que guarda el acuífero.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las crisis recurrentes de escasez de agua para todos los usos, provocada por la disminución de caudales en las principales fuentes superficiales de la región, ha ocasionado que en los últimos diez años, el acuífero local, sea sujeto de una mayor explotación, convirtiéndose el agua subterránea en la principal fuente de abasto para el desarrollo de las actividades económicas de la zona.

El acuífero de la Ciénega puede clasificarse como un sistema semiconfinado en la parte central y libre en las márgenes. Los cortes litológico de algunos pozos, así como información geofísica, permiten confirmar esta hipótesis. El origen de los sedimentos lacustres, también la corroboran, ya que toda la Ciénega está conformada por sucesiones continuas de grano fino a muy fino.

El problema asociado a la calidad química del agua subterránea, ha tenido efectos negativos sobre todo en el ámbito agropecuario, que es la principal actividad económica de la Ciénega. Los procesos de salinización de suelos son cada día mayores, estimándose que cerca de 5, 000 ha, presentan serios problemas de salinidad y sodicidad, lo que ha provocado significativas mermas económicas a los agricultores por la disminución en sus índices de productividad; como ejemplo de esto, tierras que hace apenas 5 años, reportaban cosechas de trigo de hasta 9 ton/ha, en el ciclo otoño-invierno/2000, sus índices de productividad disminuyeron en más del 50%.

El actual régimen de explotación del acuífero de la Ciénega de Chápala, en relación directa con las diferentes variables cuantificadas de entradas y de salidas resultó con excedente para el año del 2000 en 267.869 Mm³. Sin embargo y a efecto de contar con mayor rango de credibilidad, sería recomendable evaluar para un periodo anual más dicho balance, en virtud de que en esta ocasión, no fue posible la cuantificación de flujos verticales ascendentes (evidenciados en la Ciénega por el termalismo existente), y la recarga lateral. Es por ello que estos valores obtenidos son solo preliminares y representativos para el tiempo medido.

Con la generación de información morfométrica, con valores de densidad de disección del relieve en rangos de 0.2 a 2.2 km/km²; así como de la disección de fracturamiento con rangos de 0.2 a 2.6 km/km², se definieron aquellas áreas que juegan un papel importante en el proceso de recarga del acuífero local, destacando en este sentido la Sierra de Pajacuarán; o bien zonas cuyos rangos de disección son bajos y cuyo papel hidrodinámico sería el de zonas de descarga, como es el área propia de la Ciénega.

En el funcionamiento hidrodinámico prevaleciente en la región, destaca la existencia de un gradiente piezométrico del Lago hacia el acuífero. Los flujos relacionados con procesos hidrotermales también se presentan asociados al alto grado de fracturamiento del contenedor volcánico. No se cuenta con suficiente información sobre parámetros hidrodinámicos como conductividad hidráulica o transmisividades, mucho menos de coeficientes de almacenamiento o de dispersión.

Las tendencias piezométricas de los acuíferos de las inmediaciones de un lago, permiten postular hipótesis sobre los flujos preferenciales; En la Ciénega, la piezometría es más que ilustrativa, los gradientes indican flujos del lago hacia el acuífero; del mismo modo los gradientes de concentraciones de fósforo y de cloruros muestran condiciones semejantes, es decir del lago hacia el acuífero. Influye de igual manera el hecho de que al lago este en una posición altitudinal mayor que la propia Ciénega.

Un esquema sustentable de gestión de recursos hidráulicos debería partir de un adecuado conocimiento del marco físico. La existencia de mapas geológicos, de vulnerabilidad acuífera y también de índices de veda pueden apoyar la legalización de pozos, industrias, basureros u otras fuentes potenciales de contaminación, de ahí su importancia.

Como la Ciénega es compartida por diferentes municipios sería recomendable una gestión conjunta del recurso subterráneo en la que los organismos operadores coordinen sus actividades en concordancia con las políticas estatales y federales.

Esta situación incide en la reformulación de una cultura del agua la cual debería promoverse no sólo a nivel población sino también institucional.

El método Kosinski, ofreció buenas perspectivas para obtener valores representativos de la transmisividad, dándole una mayor utilidad a la información geoelectrica. Aunque la fundamentación teórica sea de carácter empírico la validez de estos resultados, con todas sus restricciones, justifica su implementación a efecto de tener un mayor conocimiento en la distribución de los parámetros de un sistema acuífero, aunque sea de manera aproximada, lo cual permite parametrizar un modelo funcional del cual pudiera derivarse un modelo matemático computacional en una región como la Ciénega de Chápala.

La propuesta metodológica para la definición de El índice de Veda del Acuífero, ofreció buenos resultados, pretendiendo regular y hacer recomendaciones sobre el diseño del pozo, profundidad e intervalo ranurado óptimo, ubicación adecuada y caudal apropiado, en los casos en que se permita la perforación de un pozo. Debería ser una de las bases para emitir esquemas operativos sustentables del manejo del agua subterránea de la Ciénega de Chápala.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. Acworth, R. I., and Jankowski, J. 1997. The Relation Between Bulk Electrical Conductivity and Dry land Salinity in the Narrabri Formation at Breeza, Liverpool Plains New South Wales, Australia. / *Hydrogeology* Vol. 5, No.3
2. Aller, L.T., Bennet, J. H., Lehr, R.J., Petty, and G. Hackett. (1985). DRASTIC; A Standard System for Evaluation Groundwater Pollution using Hydrogeologic Setting, Publication EPA/600/2-85/081 US EPA, 622pp.
3. Alian, J. R, Nelson S.A., Luhr J.F., Carmichael I.S.E., Wopat M. and Wallace P.J. 1991. Pliocene-recent rifting in SW México and associated volcanism: an exotic terrain in tite making, in Dauphin, J.P., and Simoneit, B.R.T., eds., The Gulf and the Peninsular Province of the California's: American Association of Petroleum Geologists Memoir 47, p.425-445.
4. Anderson, M. P., and Munter J. A., 1981. Seasonal reversal of groundwater flow around lakes and the relevance to stagnation points and lakes budget. *Water Resource Researc/i.17(4)*,1134-1150.
5. APHA- AAWWA-WEF, 1998 Standard Methods, 1998 "20* edition,
6. Astier, J. L., 1975, Geofísica aplicada a la hidrología, trad. Ángel Río, Paraninfo, Madrid.
7. Braticevics D. and Karanjac J. 1999. GWW, Software Ver. 1.10, for United Nations. New York
8. Brown, A.G. and Bradley, C, 1995. *Geomorphology and Groundwater*. Convergence and diversification. Cap.1.Ed.Wiley. pp. 15-17.
9. CÜDIR-MICH, 2000 "Reportes técnicos sobre análisis de suelos en diversas localidades de la ciénega de Chápala" Reporte Interno. México.
10. Comisión Nacional del Agua (CNA), 1990, "Estudio Geohidrológico en la zona de Tesistan-Atemajac, Estado de Jalisco", Informe, Ariel Consultores S.A. México.
11. CNA, 1991 "Estudio Geohidrológico en la Región de Ocotlán, Jal." Gerencia de Estudios y Proyectos. México.
12. CNA, 1993, "Plan Maestro de la cuenca Lerma - Chápala". Documento de referencia. México.

13. CNA, 1997. Censo de pozos profundos de la Ciénega de Chápala, Distrito de riego No.24. México.
14. CNA, 2000. "Censo de aprovechamientos de aguas subterráneas". Documento Interno. México.
15. Cooley, R. L., 1974. Finite element solutions for the equations of ground waters flow. Univ. of Nevada Desert Res. *Inst. Hidr. and water Res.* Publ.18,134 p.
16. Curtís B. And Kelly W.E., 1990. Resistivity-recharge relationships-field study. *Journal of Hydrology* 118:39-53.
17. Custodio y Llamas,1976, Hidrología Subterránea, Tomo I, Ed. Omega. Barcelona.
18. Davis, S. N. and De Wiest, R.J., 1966. Hydrogeology. John Wiley and Sons Inc., New York pp. 15-45.
19. De Anda J., Shear,H., Maviak, U., and Riedel G., 2000. Phosphorus Balance in Lake Chápala, (México) *Journal of Great lake Res.* 26 (2) p.129-140
20. Delgado-Granados, H. and Urrutia-Fucugauchi, J. 1985, The structure of the Chápala Graben, México, EOS, Trans. Am, Géophys. Union, vol. 66, no. 46, p. 1090
21. Delgado-Granados, H. y Urrutia-Fucugauchi, J., 1986. Tectónica cuaternaria del Lago de Chápala. VIH Convención Geológica Nacional. Resúmenes, 18-19.
22. Delgado-Granados, H, 1991. Características del rift de Chápala. Primer Congreso Mexicano de Mineralogía. Memorias de la Conv. Sobre la Evolución Geol. de Mex., pp 40-41
23. Delgado-Granados, H. 1992. Geology of the Chápala Rift. [Ph.D. Thesis], Faculty of Science, Tohoku University, Japan, 283 p.
24. Delgado-Granados, H., Urrutia-Fucugauchi, J., Hasenaka T. And Ban M., 1995. Southwestward volcanic migration in the western Trans-Mexican Volcanic Belt during the last 2 Ma. *Geofis. Internacional.*, 34,341-352
25. Domenico, P.A. and Schwartz, T. W.,1990. *Physical and Chemical Hydrogeology*: Jhon Wiley.
26. Foster, S and Hirata, R., 1991 Determinación del Riesgo de contaminación de aguas subterráneas. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), Lima, Perú, 1991,81 pp.

27. Freeze, R.A.1969. Theoretical analysis of regional groundwater flow: Canadian dept. of Energy, Mines and Resources, Sci. Ser. No.3,
28. Frohlich, R.K. and Kelly, W.E., 1985. The relation Between hydraulic transmisivity and transverse resistance in a complicated aquifer of glacial outwash deposits. /. *Hydrology*, 79: 215-229.
29. Frohlich, R.K.,1996. Electric - hydraulic conductivity correlation infractured crystalline bedrock: Central Landfill, Rhode feland, USA, /. *Appl.Geophys.* 35,249-259.
30. García, E., 1988; Modificaciones al sistema de clasificación climática de Koppen.Ed. Ind. México.
31. Garduño, V.H.,Corona Ch., Israde A.. E., Mennella L., Arreygue, E., Bigioggero B. and Chiesa S., 1999, Carta Geológica del Estado de Michoacán, Esc:l: 250 000.UMSNH-IIM.
32. Garduño V.H., Arreygue E. and Rodríguez G.2000. Mapa de riesgos de Salamanca, Guanajuato. UMSNH-1IM, Mpio. Salamanca. Rep. Técnico
33. Garduño, V.H. Spinnler, J.,and Ceragioli, E. 1993. Geological and struclural study of the Chápala rift, State of Jalisco, México. *GeofJnt* 32 (3) 487-499.
34. Instituto de Ingeniería-UNAM, 1973; Estudio Limnológico del Lago de Chápala. Reporte. México.
35. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), 1993. Estudio Hidrogeoquímico e isotópico de la zona de Toluquilla-Ocotlan-La Barca en el estado de Jalisco. 150 p. Informe Técnico. México
36. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI), 2000, "Censo nacional de población y vivienda ".México.
37. Jorgensen, G.D. and Petricola M.,1995. Research borehole-geophysical logging in determining geohydrologic properties. *Groundwater* 33, (4) 589-596
38. Kalinski, J.R., 1993. Combined use of geoelectric sounding and profiling to quantify aquifer protection properties. *Groundwater* 31, (4). 538-544
39. Kelly W.E. and Frohlich, R.K., 1985. Relation between aquifer electrical and hydraulic properties. *Groundwater* 23, (2) 182-188.
40. Kelly W.E.; Gorma, T. and Curtís B. 1989. Relationships between the unsaturated electric and saturated hydraulic properties of soils. *Journal ofHydrology* 109:115-123.

41. Koefoed, O., 1979. Geosounding Principles,!. Elsevier Scientific Publishing Company. Amsterdam-Oxford- New York.
42. Kosinski, W. and Kelly, W. E., 1981 Geoelectric sounding for predicting aquifer properties. Ms. Thesis, Univ. Of Rhode island, Kingston.
43. L. Hubp, Aceves, y Córdova,1985, Las zonas más activas en el Cinturón Volcánico Mexicano (entre Michoacán y Tlaxcala) *Geofísica Internacional* 24,, 83-96
44. Martínez A. P., 2001. La Cuenca Lerma-Chapala en el contexto de la gestión integral del agua. Memorias. Foro: Rescatemos Chápala. CHDIR-MICHOACAN.
45. Mazac, O., 1988. Application of geophysical methods in describing spatial variability of saturated hydraulic conductivity in the zone of aeration. *J. of Hydrology*, 103:117-126.
46. Mazac, O-, Kelly, W.E. and Landa I., 1985. A hidrogeophysical model for relations between electrical and hydraulic properties of aquifers. *J. of Hydrology*, 79:1-19.
47. Moore G., Marone C, Carmichael I. S. E. and Renne P., 1994. Basaltic volcanism and extensión near the intersection of the Sierra Madre volcanic province and the Mexican Volcanic Belt. *Geol. Soc. Amer. BulL*, v. 106, p. 383-394
48. Munter, J. A. and Anderson, M. P., 1981. The use of groundwater flow models for estimatirtg lake seepage rates: *Groundwater*, 19.608-616.
49. Palacios V. O. and Aceves N. E., 1970. Instructivos para el muestreo, registro de datos e interpretación de la calidad del agua para riego agrícola. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México.
50. Park S.K. and Dickey K.S., 1989. Accurate estimation conductivity of water from geoelectrical measurements- a new way to correct for clay. *Groundwater* 27 (6), 786-792.
51. Pasquare, G. and Zanchi, A., 1985. Cenozoic volcanism and tectonics in western-central México. *Kend. Accad. Naz. Linca*. 95:1-9.
52. Ponzini, G., 1984. Empirical relation between electrical transverse resistance and hydraulic transmissivity. *Geoexploration* 22; 1-15
53. Remson, I., 1971. Numerical methods in subsurface hydrology: Wiley-Interscience, 389 p.N.Y.

54. Rijkswaterstaat, the Netherlands 1975. Standard Graphs for Resistivity Prospecting. Published by EAEG.
55. Romero, D. A. 1990, Caracterización geoelectrica del sistema acuífero del valle de San Luis Potosí. Tesis Lic, Fac. Ing. UNAM-México.
56. Rosas, E. J., Urrutia, F. J. And Maciel, F. 1989. Geología del extremo oriental del graben de Chápala, breve discusión sobre su edad : zonas geotérmicas Ixtlán de los Hervores- Los Negritos. México. Geotermia Rev. Mex. Géoc.,V.5,1,p. 3-18.
57. Rosas, E. J. y Urrutia, F. J. 1992. Magnetoestratigrafía volcánica de la zona geotérmica Ixtlán de los Hervores - Los Negritos, Michoacán, México: Resultados preliminares. *Geof. Int* 31 (4). p.431-442.
58. Rosas, E. J., 1997. Tectónica extensional en el occidente de la Faja Volcánica Trans-Mexicana, Tesis Doctoral, UNAM- Instituto de Geofísica, IIOP.
59. Schimschal, U. 1981. The relationship of geophysical measurement to hydraulic conductivity at the Brantley damsite, New México. *Geoexploration*, 19:115-125.
60. Servin, H. J. H., Hernández, J.R., 1992. Determinación de los valores de transmisividad a partir de los datos geoelectricos en los valles de Yautepec -Cuautía Edo. de Morelos, Tesis Lic. IPN-México.
61. Silva, (2000) Estudios geohidrológicos y geofísicos en diversas localidades de la Ciénega de Chápala. Reportes internos. México
62. Silva, Ramos y Ochoa,. 1999. "Marco hidrogeológico regional y vulnerabilidad acuífera del lago de Camécuaro (parque nacional), Michoacán. Reporte Interno. CUDIR-MICH.
63. Silva, Ochoa y Ramos,. 2000. "Geología aplicada en al ubicación del relleno sanitario del municipio de Zamora, Mich". Reporte Interno. CUDIR-MICH. México.
64. Soil Moisture Equipment Corp., 1991. 2800 K1 operating instructions. Santa Barbara, California, 27pp.
65. SPP-INEGI, 1988. Cartas Hidrológicas Colima, Morelia y Guadalajara. Esc: 1:250 000.
66. SRH, 1972, "Salinidad de suelos en el Distrito de Riego 024", reporte interno de la CNA.
67. Waitz, P., 1906. Le Volcan de Colima. Cong. Geol. ínter. (X) México. Guia Excur., 13p.

68. Winter, C.T., 1976. Numerical simulation analysis of the interaction of lakes and groundwater. *U.S. Geol. Surv. Prof. Pop.* 1001,1-45.
69. Yadav, G. S. 1995. Relating hydraulic and geoelectric parameters of Jayant aquifer, India. *Journal of Hydrology*, 167:23-38.
70. Yadav, G.S., and Abolfazli H., 1998. Geoelectrical sounding and their relationship to hydraulic parameters in semiarid regions of Jalore, northwestern India. *Journal of Applied Geophysics* 39:35-51.