

***Actualización de la disponibilidad media anual  
de agua en el acuífero Chapala (1428), Estado  
de Jalisco***

*Publicada en el Diario Oficial de la Federación*  
*20 de abril de 2015*

# Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea

Publicada en el diario oficial de la federación el 20 de Abril de 2015

El artículo 22 segundo párrafo de la Ley de Aguas Nacionales (LAN), señala que para el otorgamiento de una concesión o asignación, debe tomarse en cuenta la disponibilidad media anual del agua, que se revisará al menos cada tres años; sujetándose a lo dispuesto por la LAN y su reglamento.

Del resultado de estudios técnicos recientes, se concluyó que existe una modificación en la disponibilidad de agua subterránea, debido a cambios en el régimen natural de recarga, volumen concesionado y/o descarga natural comprometida; por lo que se ha modificado el valor de la disponibilidad media anual de agua.

La actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea publicada en este documento corresponde a una fecha de corte en el **Registro Público de Derechos de Agua al 30 de junio de 2014.**

**CDLXXXIV REGIÓN HIDROLÓGICO-ADMINISTRATIVA "LERMA-SANTIAGO-PACÍFICO"**

| CLAVE | ACUÍFERO | R  | DNCOM | VCAS | VEXTET | DAS | DÉFICIT |
|-------|----------|--|-------|------|--------|-----|---------|
|       |          | CIFRAS EN MILLONES DE METROS CÚBICOS ANUALES |       |      |        |     |         |

**ESTADO DE JALISCO**

|      |         |      |      |           |      |          |          |
|------|---------|------|------|-----------|------|----------|----------|
| 1428 | CHAPALA | 65.6 | 23.2 | 36.338669 | 18.4 | 6.061331 | 0.000000 |
|------|---------|------|------|-----------|------|----------|----------|

R: recarga media anual; DNCOM: descarga natural comprometida; VCAS: volumen concesionado de agua subterránea; VEXTET: volumen de extracción de agua subterránea consignado en estudios técnicos; DAS: disponibilidad media anual de agua subterránea. Las definiciones de estos términos son las contenidas en los numerales "3" y "4" de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015.



***Comisión Nacional del Agua***  
***Subdirección General Técnica***  
***Gerencia de Aguas Subterráneas***  
***Subgerencia de Evaluación y***  
***Ordenamiento de Acuíferos***

**DETERMINACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE  
AGUA EN EL ACUÍFERO CHAPALA (1428),  
ESTADO DE JALISCO.**

**México, D.F., marzo de 2009**

## CONTENIDO

|   |    |
|---|----|
| 1. GENERALIDADES .....                                    | 2  |
| Antecedentes .....  | 2  |
| 1.1. Localización.....                                    | 2  |
| 1.2. Situación administrativa del acuífero .....          | 4  |
| 2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD .....    | 5  |
| 3. FISIOGRAFÍA.....                                       | 8  |
| 3.1. Provincia fisiográfica.....                          | 8  |
| 3.2. Clima .....  | 8  |
| 3.3. Hidrografía.....                                     | 9  |
| 3.4. Geomorfología.....                                   | 10 |
| 4. GEOLOGÍA .....   | 10 |
| 4.1. Estratigrafía .....                                  | 11 |
| 4.2. Geología Estructural.....                            | 14 |
| 4.3. Geología del Subsuelo .....                          | 15 |
| 5. HIDROGEOLOGÍA .....                                    | 15 |
| 5.1. Tipo de acuífero.....                                | 15 |
| 5.2. Parámetros hidráulicos .....                         | 15 |
| 5.3. Piezometría .....                                    | 16 |
| 5.4. Comportamiento hidráulico .....                      | 17 |
| 5.4.1. Profundidad al nivel estático.....                 | 17 |
| 5.4.2. Elevación del nivel estático.....                  | 18 |
| 5.4.3. Evolución de nivel estático .....                  | 19 |
| 5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea ..... | 20 |
| 6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA .....          | 20 |
| 7. BALANCE DE AGUA SUBTERRÁNEA .....                      | 20 |
| 7.1. Entradas .....                                       | 21 |
| 7.1.1. Recarga vertical .....                             | 21 |
| 7.1.2. Flujo subterráneo horizontal .....                 | 22 |
| 7.1.3. Recarga inducida .....                             | 23 |
| 7.2. Salidas.....   | 24 |
| 7.2.1. Evapotranspiración.....                            | 24 |
| 7.2.2. Bombeo.....  | 25 |
| 7.2.3. Flujo subterráneo horizontal .....                 | 26 |
| 7.3. Cambio de almacenamiento .....                       | 26 |
| 8. DISPONIBILIDAD .....                                   | 27 |
| 8.1. Recarga total anual.....                             | 27 |
| 8.2. Descarga natural comprometida.....                   | 28 |
| 8.3. Volumen concesionado de aguas subterráneas .....     | 28 |
| 8.4. Disponibilidad de aguas subterráneas .....           | 28 |
| 9. BIBLIOGRAFIA Y REFERENCIAS .....                       | 29 |

## **1. GENERALIDADES**

### **Antecedentes**

La Ley de Aguas Nacionales (LAN) y su Reglamento contemplan que la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) debe publicar en el Diario Oficial de la Federación (DOF), la disponibilidad de las aguas nacionales, en el caso de las aguas subterráneas esto debe ser por acuífero, de acuerdo con los estudios técnicos correspondientes y conforme a los lineamientos que considera la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000 “Norma Oficial Mexicana que establece el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales”. Esta norma ha sido preparada por un grupo de especialistas de la iniciativa privada, instituciones académicas, asociaciones de profesionales, gobiernos estatales y municipales y de la CONAGUA.

La NOM establece para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas la realización de un balance de las mismas donde se defina de manera precisa la recarga, de ésta deducir los volúmenes comprometidos con otros acuíferos, la demanda de los ecosistemas y el volumen concesionado vigente en el Registro Público de Derechos del Agua (REPD).

Los resultados técnicos que se publiquen deberán estar respaldados por un documento en el que se sintetice la información, se especifique claramente el balance de aguas subterráneas y la disponibilidad de agua subterránea susceptible de concesionar.

La publicación de la disponibilidad servirá de sustento legal para la autorización de nuevos aprovechamientos de agua subterránea, transparentar la administración del recurso, planes de desarrollo de nuevas fuentes de abastecimiento, resolver los casos de sobreexplotación de acuíferos y la resolución de conflictos entre usuarios.

### **1.1. Localización**

El acuífero Chapala, definido con la clave 1428 en el Sistema de Información Geográfica para el Manejo del Agua Subterráneas (SIGMAS) de la CONAGUA, se localiza en la parte central del estado de Jalisco, entre los paralelos 20° 10' y 20° 23' de latitud norte y los meridianos 102° 45' y 103° 30' de longitud oeste. Colinda al norte con los acuíferos Cajititlán y Poncitlán, al noroeste con Huejotitlán, al noreste con Ocotlán, al oeste con Lagunas y al este con el acuífero La Barca, todos ellos pertenecientes al estado de Jalisco. Hacia el sur, su límite natural es el Lago de Chapala. Figura 1, cubre una superficie aproximada de 353 km<sup>2</sup> conforme a la poligonal que lo delimita.

Abarca gran parte de los municipios Chapala, Jocotepec y Poncitlán, una porción inferior de los municipios de Tuxcueca e Ixtlahuacán de los Membrillos, y en menor proporción parte de los municipios de Teocuitatlán de Corona, Zacoalco de Torres.

La poligonal simplificada que delimita el acuífero se encuentra definida por los vértices cuyas coordenadas se muestran en la tabla 1.

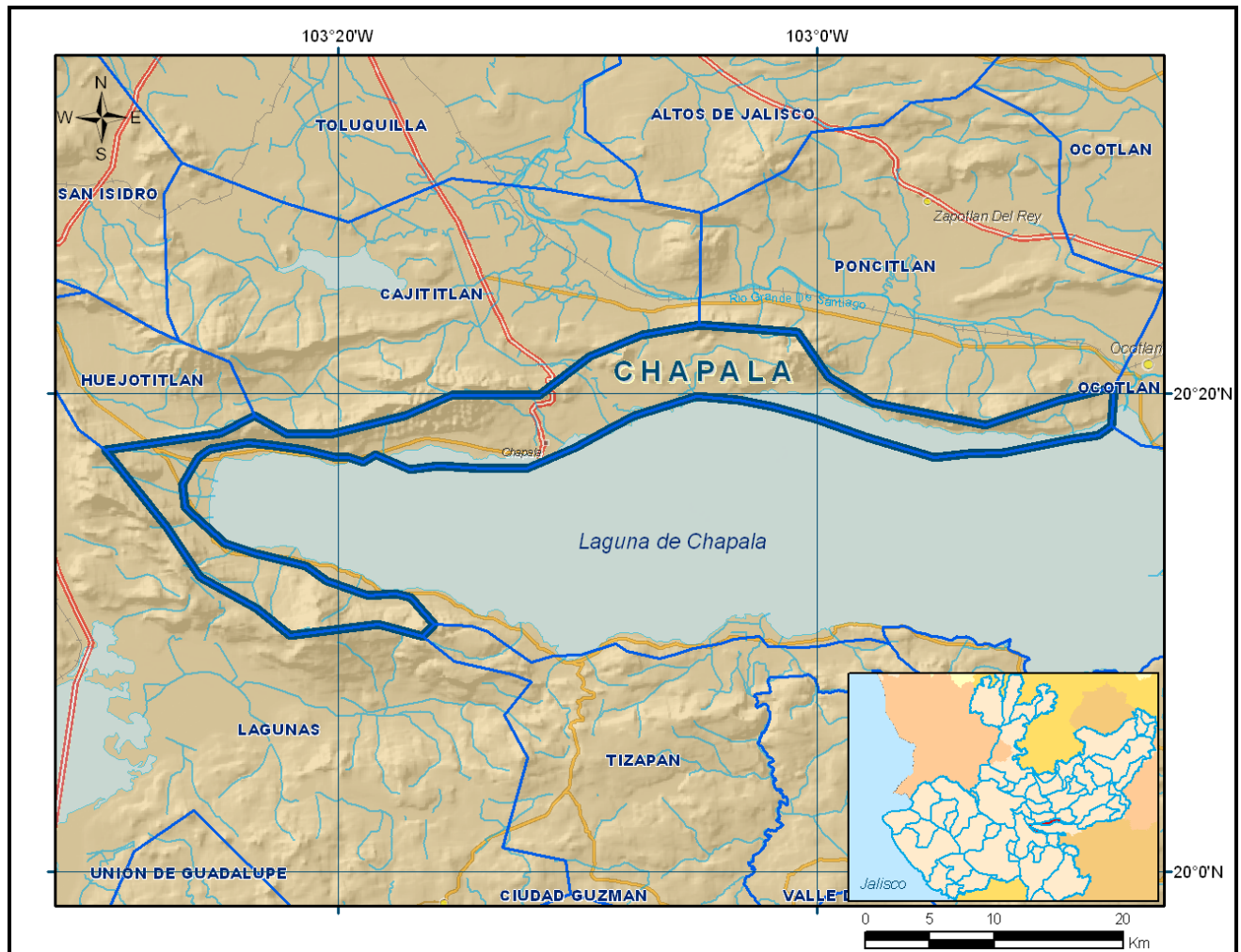


Figura 1. Localización del acuífero

Tabla 1. Coordenadas de la poligonal simplificada que delimita el acuífero

**ACUIFERO 1428 CHAPALA**

| VERTICE | LONGITUD OESTE |         |          | LATITUD NORTE |         |          | OBSERVACIONES                                |
|---------|----------------|---------|----------|---------------|---------|----------|--|
|         | GRADOS         | MINUTOS | SEGUNDOS | GRADOS        | MINUTOS | SEGUNDOS |  |
| 1       | 102            | 47      | 37.2     | 20            | 20      | 16.7     |  |
| 2       | 102            | 47      | 43.3     | 20            | 18      | 38.8     | DEL 2 AL 3 POR LA ORILLA DEL LAGO DE CHAPALA |
| 3       | 103            | 16      | 0.0      | 20            | 10      | 20.5     |  |
| 4       | 103            | 16      | 27.5     | 20            | 9       | 50.0     |  |
| 5       | 103            | 18      | 20.6     | 20            | 10      | 20.5     |  |
| 6       | 103            | 22      | 0.7      | 20            | 9       | 53.0     |  |
| 7       | 103            | 23      | 23.2     | 20            | 11      | 0.3      |  |
| 8       | 103            | 25      | 46.9     | 20            | 12      | 19.8     |  |
| 9       | 103            | 27      | 9.5      | 20            | 14      | 25.1     |  |
| 10      | 103            | 29      | 42.3     | 20            | 17      | 37.7     |  |
| 11      | 103            | 24      | 54.9     | 20            | 18      | 20.5     |  |
| 12      | 103            | 23      | 29.4     | 20            | 19      | 3.3      |  |
| 13      | 103            | 22      | 6.8      | 20            | 18      | 17.4     |  |
| 14      | 103            | 20      | 19.8     | 20            | 18      | 17.4     |  |
| 15      | 103            | 17      | 13.3     | 20            | 19      | 3.3      |  |
| 16      | 103            | 15      | 17.2     | 20            | 19      | 55.3     |  |
| 17      | 103            | 11      | 37.1     | 20            | 19      | 55.3     |  |
| 18      | 103            | 9       | 28.7     | 20            | 21      | 33.1     |  |
| 19      | 103            | 7       | 20.3     | 20            | 22      | 25.1     |  |
| 20      | 103            | 4       | 56.6     | 20            | 22      | 52.6     |  |
| 21      | 103            | 0       | 49.0     | 20            | 22      | 34.2     |  |
| 22      | 102            | 59      | 32.5     | 20            | 20      | 41.1     |  |
| 23      | 102            | 57      | 42.5     | 20            | 19      | 36.9     |  |
| 24      | 102            | 52      | 58.2     | 20            | 18      | 41.9     |  |
| 25      | 102            | 49      | 48.6     | 20            | 19      | 43.0     |  |
| 1       | 102            | 47      | 37.2     | 20            | 20      | 16.7     |  |

## 1.2. Situación administrativa del acuífero

El acuífero pertenece al Organismo de Cuenca VIII “Lerma-Santiago-Pacífico”. Su territorio completo se encuentra sujeto a las disposiciones del decreto de veda tipo II “*que declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos de la zona circunvecina a la veda de los Valles de Atemajac, Tesistán y Toluquilla*”, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 07 de abril de 1976.

De acuerdo a la Ley Federal de Derechos vigente para el 2009, los principales municipios Chapala, Ixtlahuacán de los Membrillos, Poncitlán, Jocotepec y Tuxcueca se ubican en la zona de disponibilidad 6, y Zacoalco de Torres y Teocuitatlán de Corona en zona de disponibilidad 8.

El usuario principal del agua es el doméstico. En el acuífero no se localiza Distrito de Riego alguno, ni tampoco se ha constituido a la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS). El acuífero se ubica dentro de la Comisión de Cuenca (15B) Propia del Lago de Chapala y dentro del Consejo de Cuenca (15) Lerma-Chapala, instalado el 28 de enero de 1993.

## **2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD**

De 1973 al 2004, han sido diversos los estudios formales realizados en el acuífero Chapala o en áreas aledañas que lo incluyen, de carácter regional o local, a diferente nivel de detalle, con objetivos distintos. Existen además numerosos reportes sobre trabajos aislados de perforación de pozos los que integrados dentro del contexto de la cuenca constituyen información muy valiosa.

Los objetivos y principales conclusiones de los más importantes son los siguientes:

### **Geohidrología de los valles de Atemajac, Tesistán, Ameca, Ahualulco y San Marcos, Jal. 1973. Realizado por la empresa Ariel Constructores para la SRH.**

El censo de aguas subterráneas registró en total 2549 aprovechamientos, de los cuales 1493 son pozos, 894 norias y 162 manantiales. Se estima que de los citados alumbramientos se extraían alrededor de  $153.6 \text{ hm}^3/\text{año}$ , lo que representa un caudal medio instantáneo de  $5.51 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Respecto al uso a que se destinaban las aguas alumbradas, ocupan en primer lugar los usos municipal y doméstico (54%); seguido de los usos agrícola e industrial con 22 y 15% respectivamente, y el restante 9% se reparte entre los usos ganaderos, agropecuario, avícola y sin especificar.

El Valle de Atemajac establece comunicación geohidrológica, aunque muy precaria, hacia el oriente con el valle de Ocotlán, a través de una estrecha faja de terreno por donde se desarrolla el río Santiago, entre los cerros de El Molino y Picacho. Se aprecia un parteaguas hidrodinámico que divide el flujo subterráneo en el valle de Ocotlán, que sigue direcciones opuestas, uno alimenta al valle de Atemajac, siguiendo la dirección del río Santiago y la otra hacia el oriente, hasta el poblado de Ocotlán, donde se aprecia un cono de abatimiento piezométrico producto de una sobreexplotación local conjunta de los pozos de la empresa CELANESE y los que abastecen de agua potable a la citada población.

En los valles de Ahualulco y Ameca, el flujo subterráneo converge hacia la porción central del valle de Ameca, procedente de todas direcciones, para finalmente tomar rumbo poniente, siguiendo sensiblemente el cauce del río Ameca, dren superficial y subterráneo de esta unidad geohidrológica.

La evolución piezométrica 1970-1973 sólo se puede estudiar en los valles de Atemajac y Tesistán. La tendencia general es de recuperación de los niveles piezométricos, pero este fenómeno pudiera estar enmascarado por la última temporada de lluvias, que se caracterizó por ser larga y abundante.



**Estudio Geológico Regional de la Cuenca Lacustre del Altiplano Mexicano (área Jalisco-Michoacán). Realizado en 1975 por la empresa Casther, S. A., para la SRH.**

El área del estudio está comprendida en la región sur-central de Jalisco y noroccidental del estado de Michoacán. La cuenca más importante es la Fosa de Chapala. En esta fosa y principalmente en la región conocida como Ciénega de Chapala se han perforado gran número de pozos, cuyas profundidades son variables; los más profundos han llegado a poco más de 200 m. Tomando en cuenta los espesores expuestos en el flanco norte de la fosa y en consideración que se trata de una fosa con fallas escalonadas y con hundimiento central, se han estimado espesores para la Formación Chapala en el centro de la cuenca, del orden de 500 a 600 m. Lo anterior podría significar que en esta cuenca solamente han sido explotados los acuíferos superiores.

Las fosas de Zacoalco, Sayula y Zapotlán, en tiempo de lluvias se cubren por una delgada sábana de agua; en el estiaje, se convierten en inmensas playas ensalitradas, no aptas para ningún cultivo ni para pastoreo.

En los que se han denominado Valles Altos de Jalisco, las aguas de los ríos corren torrencialmente en épocas de lluvias y es urgente su control mediante la construcción de pequeñas presas. Los vasos así contruidos servirían no únicamente para el almacenamiento de aguas en la superficie, sino también para lograr su infiltración hacia los acuíferos.

**Actualización del Estudio Geohidrológico de la zona conurbada de Guadalajara, Jalisco. Cuencas Toluquilla, Atemajac y Cajititlán. 1996. Realizado por la empresa GEOEX, S.A., para la CNA.**

El promedio de la precipitación anual es de 700 mm, mientras que el promedio de infiltración es del 15%. En la cuenca de Atemajac aparecen una gran cantidad de manantiales. La principal galería filtrante corresponde a Los Colomos, donde es aprovechado un caudal de 250 lps y otro tanto es despreciado al fluir hacia el río Atemajac.

En la cuenca de Cajititlán, tramo Atotonilquillo – Las Pintas es por la única zona donde existen salidas de agua superficial y subterránea hacia el Río Grande de Santiago que fue evaluada en 4 hm<sup>3</sup>/año.

Las principales unidades geológicas corresponden a las tobas de caída libre (arenas de pómez) que forman un acuífero libre en toda la cuenca de Atemajac y poniente de Toluquilla, enmarcadas en la Unidad Jalisco. Los depósitos lacustres constituyen el acuitardo.

El basamento geohidrológico está formado por basaltos y andesitas de la Unidad San Gaspar. Los diques de la Unidad Tatepozco son barreras impermeables al flujo del agua subterránea, su composición son rocas metaígneas.

El agua subterránea de los principales acuíferos pertenece a la familia  $\text{NaHCO}_3$ , sódico bicarbonatada con bajos contenidos de sólidos totales disueltos. El agua subterránea bajo la zona urbana incrementa sus concentraciones de aniones y cationes, con mayor concentración de Cloro, posiblemente debido a las fugas de la red de agua potable.

La red de flujo manifiesta que las salidas de agua subterránea en las cuencas de Atemajac y Toluquilla son exclusivamente mediante la extracción por bombeo. Solamente en el acuífero de Cajititlán, existen salidas subterráneas hacia el Río Grande de Santiago.

Al considerar de manera integral las magnitudes de recarga y descarga en los tres sistemas acuíferos, la ecuación de balance manifiesta un déficit, esto es  $241.4 \text{ hm}^3/\text{año}$  en todas las formas de entradas de agua y  $285.5 \text{ hm}^3/\text{año}$  en todas las formas de descarga de agua, resultando un cambio de almacenamiento negativo para los sistemas acuíferos de  $\Delta V(S) = -44.1 \text{ hm}^3/\text{año}$ .

**Reactivación de la red de medición piezométrica en el acuífero Cajititlán, Jal. 2004.  
Realizado por la empresa Hidroconstrucción y Consultoría, S.A., para la CNA**

La zona más importante y extensa de recarga del acuífero son las sierras El Travesaño y El Ixtle conformadas por rocas volcánicas basálticas y andesitas fracturadas, depositadas en una cuenca hidrográfica de gran extensión y de alta densidad de escurrimientos superficiales que descargan y recargan una importante zona de areniscas y conglomerados (ar-cg) localizado en la "Y" donde inicia el valle aluvial entre las poblaciones de Ixtlahuacán de Los Membrillos, Buenavista y Santa Rosa. Esta zona importante del acuífero amplía su recarga proveniente de las rocas basálticas fracturadas de las sierras San Francisco, localizadas al sur de la población de Atequiza y Atotonilquillo, contribuyendo de manera muy importante a la potencialidad acuífera del valle.

De acuerdo con la configuración piezométrica de los pozos (nodos) se observa bien definidas las zonas de recarga y descarga del agua subterránea, así como las direcciones del flujo, precisamente donde se tiene la mayor densidad de pozos, correspondiendo principalmente a la porción SE de la población de Tlajomulco de Zúñiga y la NE de La Calera.

En el área SE de la población de Tlajomulco, donde se localizan dos pozos de la embotelladora de aguas minerales y otros de agua potable de fraccionamientos, se identifica el efecto hidrodinámico de flujo inducido a la formación de un cono de abatimiento de importancia con la influencia de estos bombeos.

**Elaboración de los documentos de respaldo de la disponibilidad media anual de agua en los acuíferos (1413) Altos de Jalisco, (1436) Arenal, (1428) Chapala, (1429) Tizapán y (1447) Yahualica, en el estado de Jalisco. 2007. Realizados por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, para la CNA.**

El objetivo fue contar con los documentos técnicos de respaldo que sirvan de consulta rápida para conocer la disponibilidad media anual de agua del Acuífero (1428) Chapala, del Estado de Jalisco, ajustándose a lo establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000.

Los resultados y conclusiones de este estudio fueron la base para la elaboración del presente documento, por lo que sus conclusiones y resultados se analizan en los apartados correspondientes.

### **3. FISIOGRAFÍA**

#### **3.1. Provincia fisiográfica**

El acuífero Chapala, según el INEGI (1991), se localiza en la provincia fisiográfica Eje Neovolcánico, subprovincia Chapala, caracterizadas por la presencia predominante de rocas volcánicas de naturaleza basáltica riolítica y las secuencias piroclásticas asociadas, por sedimentos lacustres y aluvión; a escala regional presentan diversas topoformas, desde relieves escarpados y cañadas a laderas tendidas, mesetas, llanos, valles y depresiones.

Estos rasgos fisiográficos tienen profunda influencia sobre el desarrollo, comportamiento y capacidad del acuífero Chapala, así como en la calidad de las fuentes del subsuelo.

La subprovincia Chapala alcanza una magnitud significativa en fallamiento asociado con manifestaciones volcánicas y grabens (áreas hundidas entre sistemas de fallas). Se tiene aquí a 1,500 msnm el mayor lago del país, cuyas aguas ocupan un enorme graben ubicado entre sistemas de grandes fallas este-oeste y otras más pequeñas dirigidas burdamente de norte a sur. Por otro lado, el vulcanismo se desarrolló a lo largo de algunas líneas de fallas y levantó las sierras que bordean el lago. El resultado es un paisaje de origen unitario pero de morfologías combinadas que aportan una notable singularidad a la provincia.

#### **3.2. Clima**

De acuerdo con los datos de las ocho estaciones climatológicas seleccionadas, Atequiza, Chapala, El Fuerte, Jocotepec, Poncitlán, Tuxcueca, Amacueca y Mezcala, con registros de 1979 a 2006, el

clima es templado subhúmedo con 17.43° C de temperatura media anual, 701.82 mm de precipitación, régimen de lluvias de junio a octubre y 1448.48 mm de evaporación potencial.

Los vientos dominantes se presentan con dirección noroeste, durante 13 días al año se esperan heladas.

Julio es el mes de mayor precipitación con 185.78 mm, febrero es el que registra la menor lámina con 3.87 mm. Mayo es el más caluroso con 20.21° C y enero el más frío con 14.10° C.

La evaporación potencial mínima es de 964.22 mm, la cual se presentó en 1993 y la máxima de 2009.20 mm en 1989. Durante el mes de abril la evaporación llega a su límite superior con 180.88 mm y la mínima ocurre en diciembre con 80.80 mm.

### **3.3. Hidrografía**

El acuífero se ubica en la Región Hidrológica Lerma-Santiago, subregión Jalisco Bajo Lerma, cuenca hidrográfica RH12-D Lago de Chapala.

Esa región es la más importante del estado no sólo por abarcar el 50% de la entidad sino por estar incluido el 70% de su población y la mayor parte del desarrollo industrial. Sobresalen los ríos Grande Santiago, Zula y Lerma.

El Lago de Chapala tiene alrededor de 8000 hm<sup>3</sup> de capacidad, es el más grande de la República Mexicana y la principal fuente de abastecimiento de agua potable a la zona conurbada de Guadalajara, con el 60% del total aportado.

La región hidrológica abarca 125,555 km<sup>2</sup> de superficie, el 30% corresponde a la cuenca del Lerma, 8% al embalse del lago y 62% a la del río Santiago.

El Lago de Chapala hasta la época porfirista abarcaba 164 659 ha, tenía 5 800 hm<sup>3</sup> de capacidad de almacenamiento; entre 1902 y 1910, se abrieron 50 000 ha al desarrollo agrícola, 45 000 en el estado de Michoacán y 5 000 en Jalisco, para tal fin se encauzó el río Lerma desde la desembocadura del río Duero hasta el lago, se construyó la presa Poncitlán y se levantó un bordo en la ribera del lago desde Jamay, Jal., hasta La Palma, Mich.

De 1900 a la actualidad el mayor almacenamiento del Lago se midió en septiembre de 1926 con 9663 hm<sup>3</sup> a la cota 99.33 m, el mínimo en junio de 1955 con 954 hm<sup>3</sup> a la cota 90.80 m y el promedio es 5 463 hm<sup>3</sup> a la cota 95.65 m.

### **3.4. Geomorfología**

En la subprovincia de Chapala se distinguen 4 regiones o sectores:

1. Una región occidental con importantes sistemas de fallas noroeste-sureste y norte-sur que han generado grabens con esos mismos rumbos y que forman los vasos de los lagos Atotonilco, Zacoalco, San Marcos y Sayula, situados a una altitud promedio de 1,350 msnm.
2. El propio Lago de Chapala y las Sierras de Laderas de Escarpe de falla que lo circundan, más su extensión de Ciénega ubicada al este: La Ciénega de Chapala. El lago, bastante somero, es mantenido fundamentalmente por los aportes del río Lerma al que recibe en el extremo oriental.
3. Las sierras afalladas y llanos al norte de los lagos.
4. Las sierras afalladas y la región de lomeríos al sur de los lagos.

Dentro de los límites del acuífero, el 29.44% corresponde a relieve semiplano, de lomeríos y laderas con 1 570 a 1 700 msnm de elevación; el 46.78% a zonas accidentadas cuya altitud varía de 1 700 a 2 700 msnm; el lago Chapala y la superficie plana ocupan el 23.78%, a la cota 1 500 a 1 570 msnm.

## **4. GEOLOGÍA**

El marco geológico está conformado principalmente por rocas del Plioceno-Mioceno que corresponden a una secuencia de tobas y brechas volcánicas de composición basáltico andesítica, tobas y derrames de origen ácido riolítico, así como a sedimentos lacustres constituidos por estratos de arcilla y diatomeas, arena fina y gruesa, con cantos rodados y material piroclástico, dispuesta en alternancia discordante en grandes extensiones de terreno.

Los depósitos lacustres pertenecen a la formación Chapala, tienen más de 500 m de grosor según cortes de pozos, sus afloramientos reflejan la estructura del graben sobre el que se encuentran, se observan con amplitud importante inclinados al noreste, sobreyacen a basaltos del Paleógeno-Neógeno y están cubiertos por basaltos de olivino del Reciente.

Los basaltos superiores agrupan derrames y piroclásticos de estructura cónica, así como lavas de naturaleza andesítica basáltica, con drenaje radial y poca erosión; la aspereza de sus materiales y la ausencia de suelos lateríticos revela el carácter reciente de estos eventos, tienen espesor muy

variado probablemente de poco más de 500 m cerca de los aparatos volcánicos, afloran ampliamente dentro del área del acuífero.

Se observan también conglomerados de piedemonte compuestos por fragmentos de basalto y andesita no consolidados, mal clasificados, con bajo grado de redondez y tamaño de guijarros a arenas. El aluvión de edad Holoceno, está formado por arena, limo y arcilla, se encuentra en las márgenes del Lago. La Figura 2 muestra la geología general del acuífero.

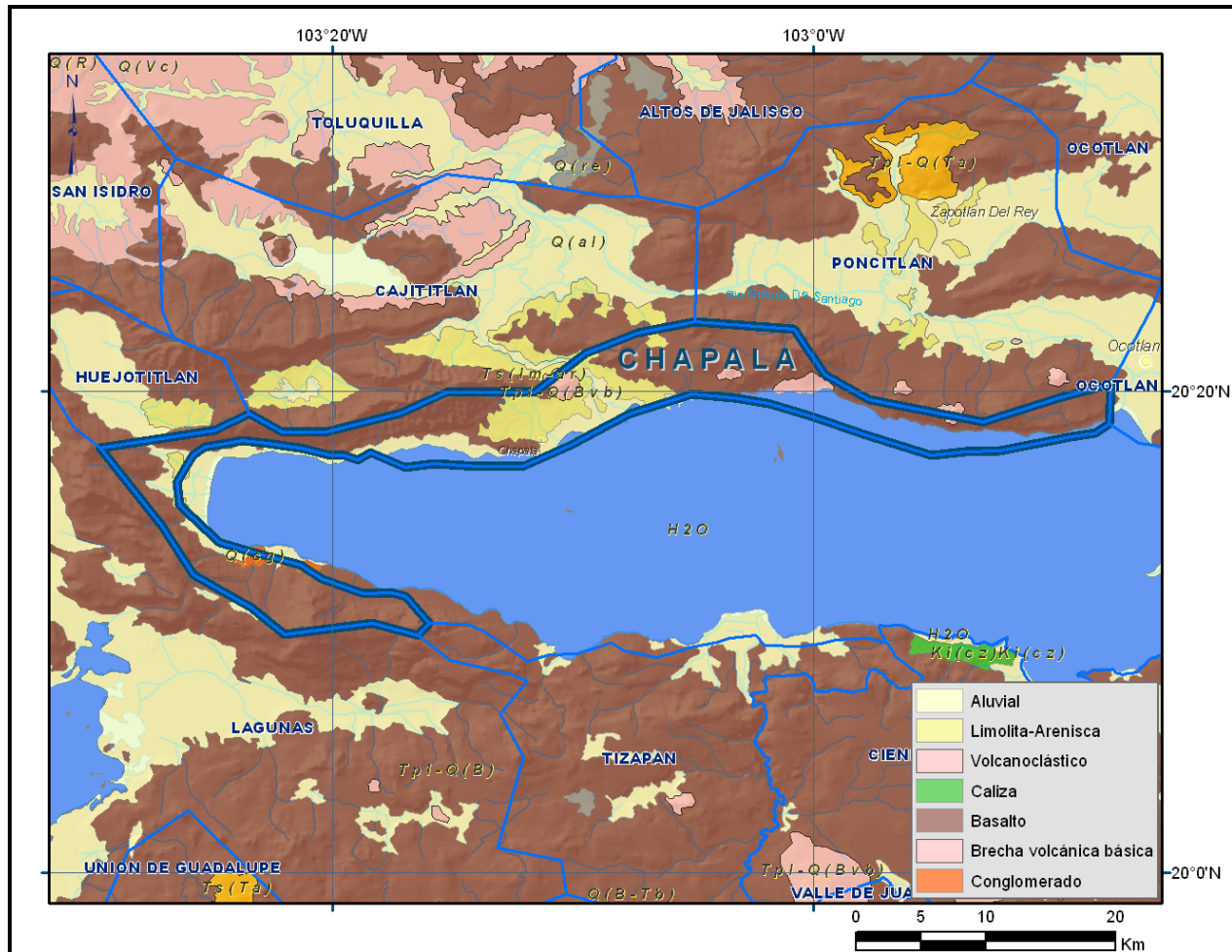


Figura 2. Mapa Geológico

#### 4.1. Estratigrafía

##### Cretácico

Rocas sedimentarias y volcanosedimentarias: Secuencia del Terreno Guerrero constituido por arenisca roja y conglomerado de clastos de toba y caliza, infrayace a conglomerado, arenisca e intercalaciones de ignimbrita riolítica de la formación Tepalcatepec, sobre la que descansan calizas

de estratos gruesos y estructura masiva, a su vez cubiertas por una sucesión piroclástica de composición riolítica denominada toba Tapalpa; se encuentra intrusionada por cuerpos batolíticos.

Rocas ígneas intrusivas, granito y granodiorita: Afloran al suroeste y noreste de la sierra La Laja así como en otros lugares de la cuenca, son de grano fino a medio y color gris oscuro y amarillento, intrusionan a areniscas, limolitas y basaltos inferiores.

#### Paleógeno-Neógeno sedimentario

Limolitas, areniscas y conglomerados: Se encuentran en forma alternada con estructura irregular, tienen textura fina a media, color rojo o verde, están expuestas en grandes superficies, forman cerros redondeados, ostentan drenaje desarrollado dendrítico, se observan en bancos delgados e intrusionadas por cuerpos graníticos, son cubiertas por brecha riolítica y derrames de basalto, poseen poco más de 400 m de espesor, contienen cuarzo, y cubren a esquistos.

#### Paleógeno-Neógeno lacustre

Sedimentos continentales que ocupan las riberas del Lago, se trata de una alternancia de arcilla color blanco verdoso, arena fina a gruesa y gravilla pumíticas, clásticos de escoria y vidrio volcánico, dispuestos en capas delgadas y de mediano espesor con estructura laminar, bien estratificadas o estratificación cruzada, están cubiertas por riolitas fluidales, sobreyacen a derrames basálticos, limolitas y arcillas.

Arenas y Gravas: Forman lomeríos bajos y aplanados con drenaje dendrítico espaciado y predominancia de material grueso, arena tobácea, clásticos volcánicos y horizontes de arcilla, limo y diatomeas, bien clasificadas, de poco grosor y estructura laminar, están intemperizadas, cubren a basaltos, areniscas y limolitas.

#### Paleógeno-Neógeno volcánico

Distribuido en el 90% de la superficie del acuífero, está representado por riolita, basalto, toba y vidrio volcánico, forma mesetas, volcanes y domos, presenta cambios litológicos laterales, acúñamiento y adelgazamiento de espesor.

#### Paleógeno riolítico

Las riolitas se encuentran en la parte inferior de la secuencia volcánica, consisten de lava fluidal en parte esferulítica, color rosa, blanco, rojizo y negro, cubiertas por basaltos.

#### Paleógeno basáltico

Alternancia de derrames de basalto de olivino, toba, brecha y arena tobácea. Tienen color negro, gris oscuro y grano fino, intemperizan en matices rojizos, están cubiertos por caliza de origen

lacustre, arenas y gravas, boleos de pie de monte y abanicos aluviales, su alteración produce arcilla laterítica, tienen de 500 a 600 m de grosor, se observan en pseudoestratos con estructura lajeada e interestratificados con areniscas y conglomerados, cubren a riolitas fluidales, son intrusionados por granito y presentan drenaje rectangular dendrítico.

#### Neógeno basáltico

Caracterizado por grandes estrato volcanes localizados en la porción norte, sur y oriente, forman estructuras cónicas con drenaje radial.

#### Neógeno riolítico

Consisten de brechas y riolitas fluidales color café claro y gris rosado, pseudoestratificadas, que cubren a tobas pumíticas y basaltos del Paleógeno e infrayacen a vidrios volcánicos riolíticos y tobas más jóvenes; tienen estructura masiva densa poco fracturada, crean aparatos dómicos rodeados por basaltos Recientes. Al igual que las rocas volcánicas anteriores abundan manifiestamente participando de manera fundamental en el marco geológico del agua subterránea.

Tobas: Serie de tobas soldadas pumíticas compuestas por vidrio volcánico color gris amarillento o café grisáceo oscuro, definen pequeñas lenguas y mesetas con drenaje desarrollado dendrítico, son cubiertas por basaltos y vidrio riolítico, descansan en riolitas y capas de fragmentos angulosos de pómez, se observan con 6 a 70 m de espesor como tobas vítreas color blanco compuestas por partículas brechoides de pumita y obsidiana de forma alargada, embebidas en matriz arenosa, de estructura masiva laminar; en su parte inferior las tobas llegan a encontrarse interdigitadas con derrames de basalto.

La unidad comprende además tobas riolíticas color negro con fragmentos de basalto y vidrio volcánico, de matriz pumítica soldada; otras porciones de su base están constituidas por arena y grava tobácea color café amarillento y por material pumítico con intercalaciones de estratos delgados de limo y arcilla. Se encuentran ampliamente distribuidas.

Vidrio riolítico: Vidrio volcánico denso tipo perlita, con obsidiana color negro a gris claro, estructura cerrada o esferulítica, hasta 100 m de espesor y textura vitrífida color gris claro y cristales de cuarzo. En algunas partes intrusiona en forma de diques, cubre a riolitas, depósitos lacustres, tobas pumíticas, basaltos, arenas y gravas pumíticas, intemperizan en color café rosado, subyacen a basaltos Recientes, describen relieves ondulados de lomerío. Afloran al norte del acuífero Chapala y en otras zonas de la región.



## Cuaternario

Comprende conos cineríticos y basaltos, distribuidos en el lado noroccidental del acuífero y en otros sectores. Los basaltos están constituidos por una sucesión de derrames, cubren a riolitas fluidales y vidrios volcánicos.

Arenas pumíticas: Arenas y gravillas pumíticas color blanco, distribuidas extensamente, forman lomeríos de 30 a 50 m de altura bien redondeados con drenaje dendrítico espaciado, en capas poco plegadas; cubren a riolitas, vidrio volcánico, basalto andesítico, tobas soldadas y conos cineríticos, su parte inferior presenta estructura tobácea color café amarillento, interdigitada con lentes de grava.

Se encuentran repetidamente, con espesor variable, en capas delgadas, medianas y gruesas, bien estratificadas con horizontes de arcilla.

Pie de monte: Se desarrollan en las estribaciones de sierras, están constituidos por arena, grava y bloques mal clasificados, de composición mayoritariamente volcánica.

Depósitos de llanura de inundación: Comprenden arcilla y limo color negro, están distribuidos en el extremo noroeste, en las márgenes del río Santiago.

Lacustres: Están localizados en la porción suroeste del acuífero, corresponden a sedimentos superiores de las lagunas Atotonilco, San Marcos, Zacoalco, Sayula y Chapala, se forman en capas delgadas de arcilla y limo con costras de sal, poseen color gris claro y oscuro.

Abanicos aluviales: Alternancia de cantos, grava y arena, se localizan en las estribaciones de las sierras, son de naturaleza basáltica.

Depósitos fluviales: Se circunscriben a los cauces de arroyos y ríos, están formados por limo, arena y grava.

Aluvión: El aluvión rellena las planicies y valles, posee bajo grado de consolidación y algunas decenas de metros de espesor máximo, está constituido por arena, limos y arcilla.

## 4.2. Geología Estructural

Caracterizada por movimientos tectónicos intensos que dieron origen a pilares y fosas donde se acumularon materiales sedimentarios y volcánicos, así como las masas de agua de los actuales

lagos, el mayor exponente estructural corresponde al graben Chapala, delimitado entre la falla Techaluta, otras de menor orden de su lado oriental y por el graben Citala, al norte.

#### **4.3. Geología del Subsuelo**

El subsuelo del acuífero está constituido por intercalación de boleos y fragmentos compactos de roca, arena, arcilla, clásticos y gravilla, empacados en arcilla arenosa, así como derrames, brechas y escoria de basalto con variado grado de compacidad, fracturamiento, alteración y lajeamiento, por limo y suelo, boleto, bloques y fragmentos rocosos, cantos rodados y partículas de roca.

La estructura y geometría del subsuelo es visiblemente irregular, predominan rocas volcánicas y sedimentos lacustres en la parte inferior, y rocas basálticas y depósitos de granulometría, compactación, clasificación y origen diverso, del reciente, en la parte intermedia superior; que en conjunto alcanzan cientos de metros de espesor y extensas áreas de afloramiento.

### **5. HIDROGEOLOGÍA**

#### **5.1. Tipo de acuífero**

A escala regional es un acuífero libre de características hidráulicas heterogéneas, constituido por un medio granular, en su parte media superior, y por material volcánico y lacustre en su tramo inferior; localmente puede comportarse como semiconfinado con carga hidráulica por encima de la superficie del terreno.

#### **5.2. Parámetros hidráulicos**

Dentro de los trabajos para realizar los documentos de 2007, a partir de 24 pruebas de aforo y 5 de bombeo a gasto constante; se obtuvieron la conductividad hidráulica, el coeficiente de transmisividad, las pérdidas de formación y construcción, así como el grado de eficiencia del pozo de bombeo.

En ambos ensayos se aplicaron los criterios de interpretación de *Jacob*, de donde se obtiene el siguiente comportamiento hidráulico general.

### ***Transmisividad (T)***

En la porción occidental fluctúa de  $0.1$  a  $7.0 \cdot 10^{-3}$ , de  $0.5$  a  $10.0 \cdot 10^{-3}$  en la zona central y entre  $0.5$  y  $5.0 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  en el lado este.

El promedio aritmético es  $4.81$  a  $1.340 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ .

### ***Coeficientes de almacenamiento y rendimiento específico (S y Sy)***

En el área de influencia del bombeo de la prueba del pozo No. 236, el coeficiente de almacenamiento resulto de  $1.86 \cdot 10^{-2}$ , valor asociado con un acuífero semiconfinado.

Para tiempos largos de bombeo a escala regional se podría esperar que el acuífero se comporte como libre, con  $0.15$  de rendimiento específico.

### ***Conductividad hidráulica ( $K_H$ )***

La permeabilidad varía entre  $0.2$  y  $5.0 \cdot 10^{-5}$  en el flanco oeste del acuífero, entre  $0.05$  y  $5.0 \cdot 10^{-5}$  en su porción central, y entre  $0.5$  y  $4.0 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$  en su sector oriente.

El promedio aritmético es  $2.15 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ . El coeficiente de permeabilidad adopta valores intermedios aceptables para obtener moderado o buen rendimiento de pozos; no obstante, también hay valores tan bajos como  $0.05 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$  que corresponden a pozos negativos con litología constituida por rocas volcánicas de estructura densa compacta, o por depósitos predominantemente arcillosos.

## **5.3. Piezometría**

Para la realización de los documentos de 2007, se visitaron los aprovechamientos localizados dentro de los límites del acuífero, de los cuales se obtuvo información piezométrica para la elaboración de las configuraciones del nivel del agua subterránea, este recorrido se realizó durante los meses de noviembre y diciembre de 2007.

También se usaron niveles del agua subterránea anteriores disponibles de obras cuya ubicación o numeración se correlaciona con la notación actual asignada.

## 5.4. Comportamiento hidráulico

### 5.4.1. Profundidad al nivel estático

Para diciembre de 2007 el nivel estático se encontraba entre 6 y 40 m de profundidad en el límite occidental, entre 10 y 40 m en el lado sur, de 5 a 50 m en la porción central, y entre 3 y 20 m de profundidad en el sector centro oriental del acuífero, Figura 3.

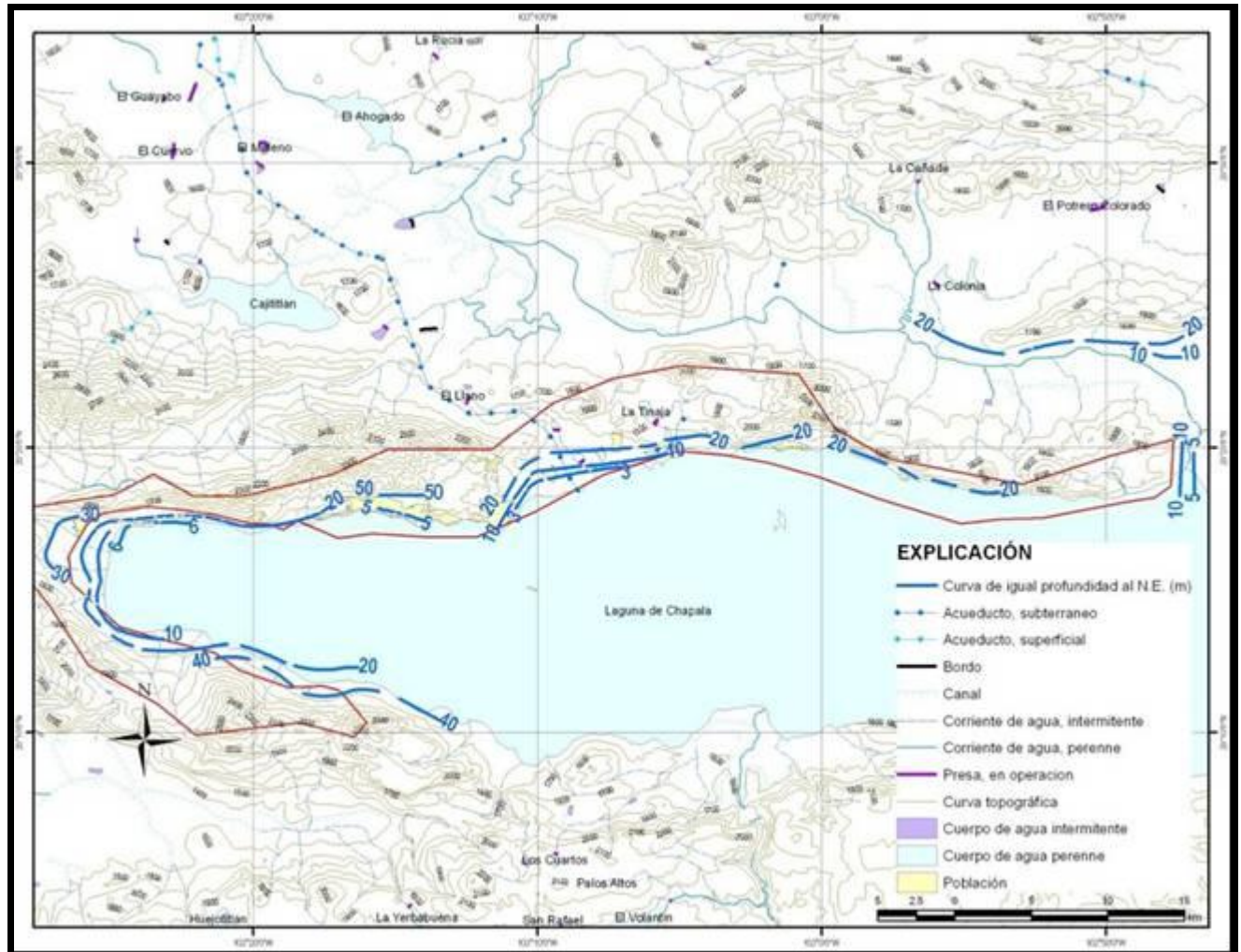


Figura 3. Profundidad al nivel estático (m), 2007

#### 5.4.2. Elevación del nivel estático

La configuración de niveles estáticos en diciembre de 2007 (Figura 4), muestra que el flujo subterráneo procede de las sierras volcánicas limítrofes permeables y descarga al Lago, que sus entradas y salidas se representan bajo una condición de equilibrio estable, que las depresiones piezométricas provocadas por bombeo no tienen influencia significativa en el esquema general de flujo y que las equipotenciales 1 520 y 1 525 msnm corresponden a las envolventes regionales del lago.

El gradiente hidráulico fluctúa de  $10 \cdot 10^{-2}$  a  $10 \cdot 10^{-3}$  ó menos.

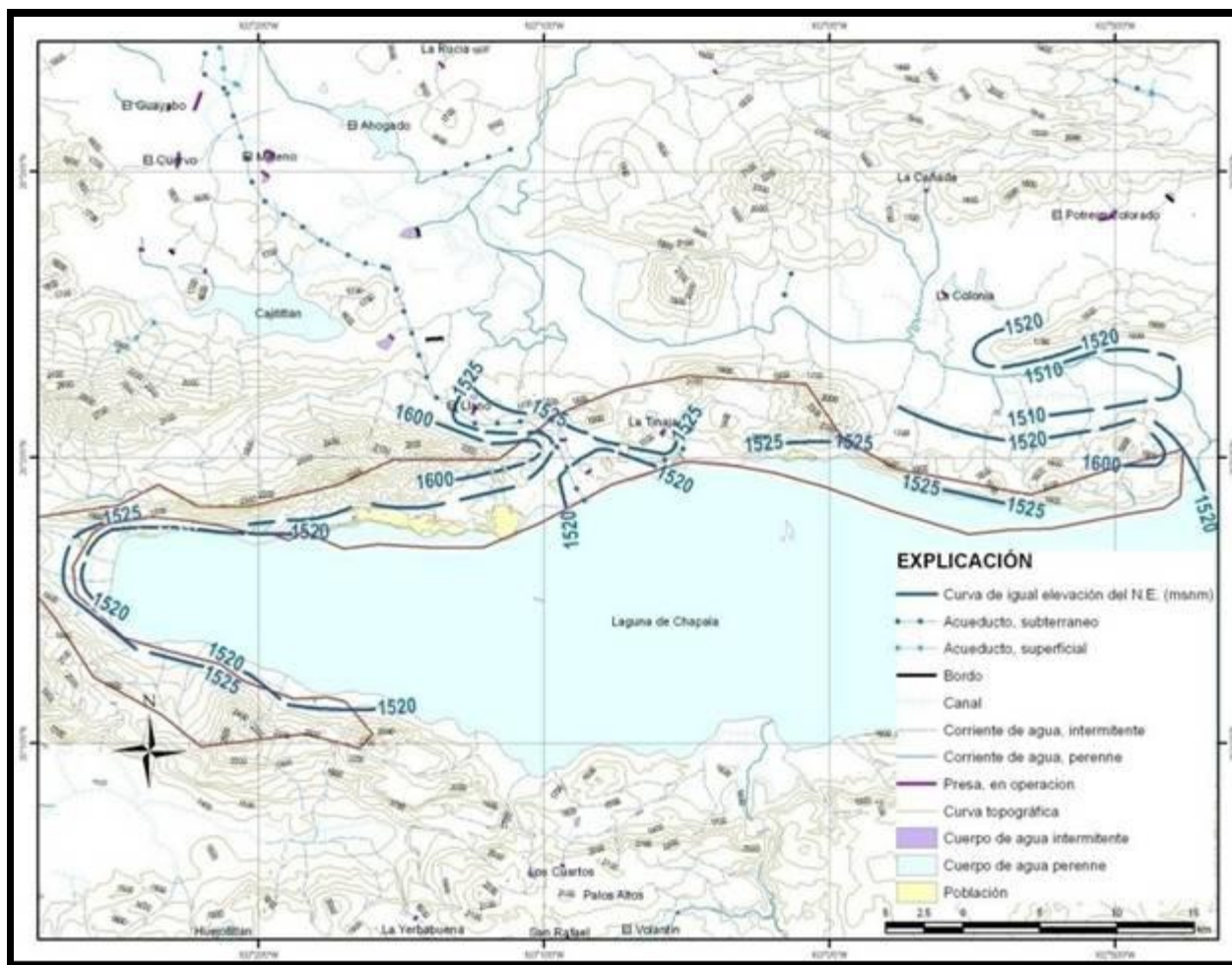


Figura 4. Elevación de nivel estático (msnm), 2007.



### 5.4.3. Evolución de nivel estático

En la parte occidental del acuífero se concentra la mayoría de pozos y se observan evoluciones piezométricas que van de unos cuantos decímetros a pocos metros de abatimiento.

En general, la evolución anual promedio resulta como se ilustra en la Figura 5 con recuperación, abatimiento y posición constante de nivel. El descenso medio es 0.3 m/año.

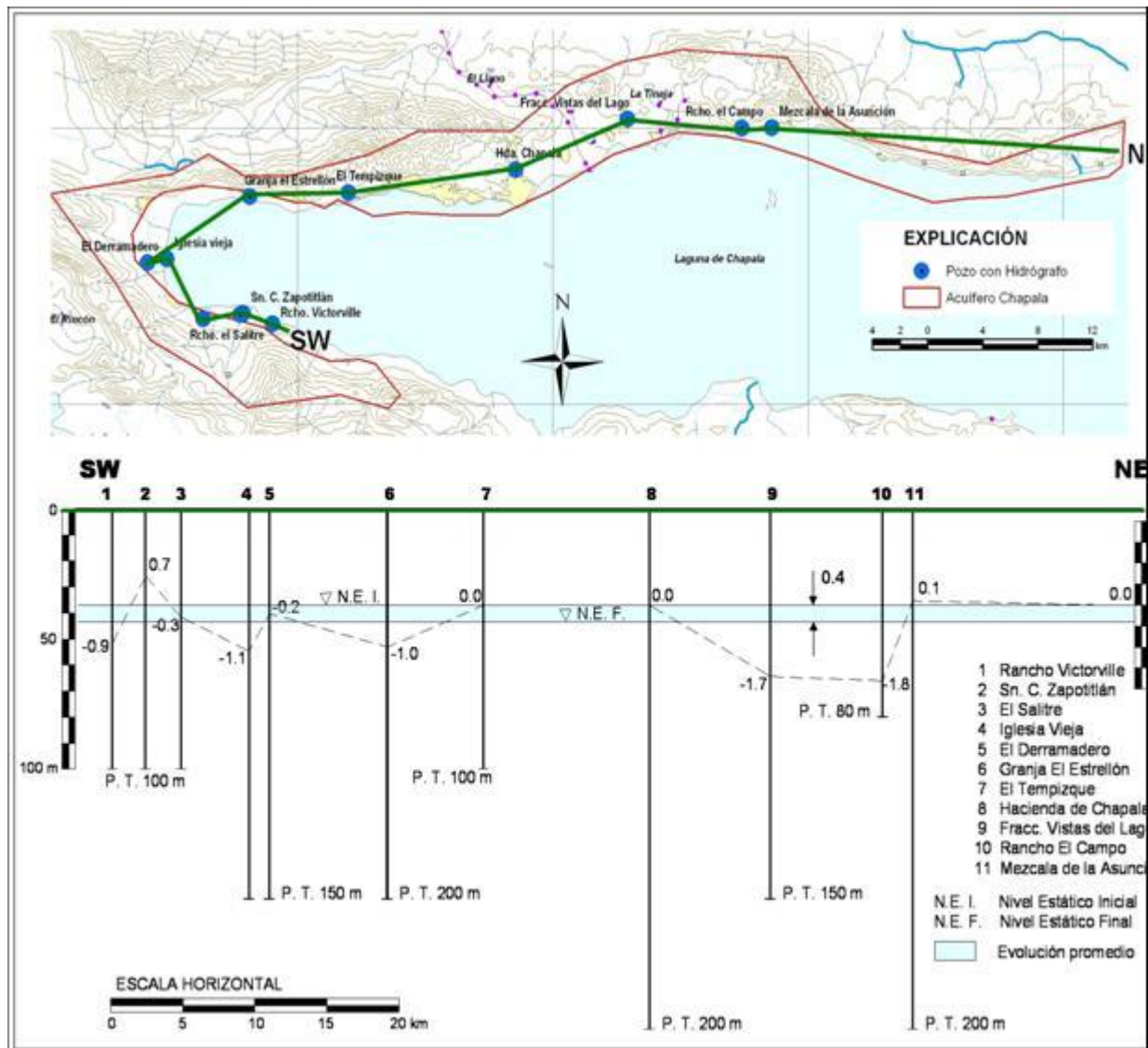


Figura 5. Evolución de niveles estáticos

## **5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea**

Para realizar los documentos del 2007, se obtuvieron muestras de agua que permitieron conocer algunos parámetros de la calidad del agua.

El 70% de los análisis de agua resultaron dentro de la familia cálcica magnésica bicarbonatada, las muestras corresponden a las zonas central y suroeste del acuífero, tiene amplia distribución espacial.

El 20% del resto de las muestras son de tipo sódico bicarbonatada, corresponden al lado occidental de la cuenca. En el lado poniente del acuífero el agua es sódico sulfatada clorurada.

La conductividad eléctrica varía 248 y 2390 con 746  $\mu\text{mho/cm}$  de promedio aritmético. La salinidad del agua subterránea varía de 158 a 1831 con promedio de 583 ppm de SDT. La dureza fluctúa entre 31 y 629 con promedio de 167 ppm de  $\text{CaCO}_3$ , corresponde a aguas duras.

El RAS es una forma de clasificación de agua para fines de riego, resulto tipo C2-S1 en los sectores poniente y noreste, significa mínimo riesgo de sodio y salinidad; de clase C2-S1 con baja relación de adsorción de sodio y peligrosidad media de salinidad, corresponde a la parte suroccidental de la cuenca; y C3-S1 y C4-S1 que representan alto y muy alto peligro de salinidad y peligro reducido de sodicidad, en la porción central y oeste del acuífero.

## **6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA**

De acuerdo al censo realizado en 2007, como parte de los trabajos de campo para realizar los documentos de respaldo, se censaron 396 obras, la extracción total es de 18.4  $\text{hm}^3/\text{año}$ , 51.14% se destina a agua potable y uso doméstico, 23.07% para riego, 2.62% son obras que tienen más de un uso, 0.62% se aplica en servicios, 0.43 % se emplea en avicultura y porcicultura, 6.28 % a fines industriales y 15.84% no tienen uso definido.

## **7. BALANCE DE AGUA SUBTERRÁNEA**

La diferencia entre la suma total de las entradas (recarga), y la suma total de las salidas (descarga), representa el volumen de agua perdido o ganado por el almacenamiento del acuífero, en el periodo de tiempo establecido.

La ecuación general de balance, de acuerdo a la ley de la conservación de la masa es como sigue:

$$\text{Entradas (E)} - \text{Salidas (S)} = \text{Cambio de almacenamiento}$$

Aplicando esta ecuación al estudio del acuífero, las entradas quedan representadas por la recarga total, las salidas por la descarga total y el cambio de masa por el cambio de almacenamiento de un acuífero:

$$\text{Recarga total (Rt)} - \text{Descarga total (Dt)} = \text{Cambio de almacenamiento } (\pm \Delta V_s)$$

$\Delta V_s$  es el cambio de almacenamiento definido como  $\Delta V_s = A_B * h_N * S$ ,  $A_B$  es el área de balance geohidrológico,  $h_N$  es la evolución de nivel estático promedio relativa al intervalo y área considerados, positivo cuando sufre recuperación y negativa en caso contrario,  $S$  es el coeficiente de almacenamiento.

## 7.1. Entradas

La recarga total que recibe el acuífero está constituida por la recarga natural, integrada por la recarga vertical ( $R_v$ ) que se produce por efecto de la infiltración de la lluvia que se precipita en el valle y a lo largo de los escurrimientos, y la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de una recarga por flujo horizontal subterráneo ( $E_h$ ), y la recarga incidental o inducida que se origina por la infiltración del agua que se destina a las actividades agrícolas, principalmente, y por las fugas en las redes de abastecimiento de agua potable o del drenaje, en las poblaciones.

### 7.1.1. Recarga vertical

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que se tiene información para calcular el cambio de almacenamiento ( $\Delta V$ ), así como las entradas y salidas por flujo subterráneo, su valor será despejado de la ecuación de balance:

$$R_v + E_h + R_i - B - S_h - ETR = \pm \Delta V(s)$$

De esta manera, despejando la recarga vertical:

$$R_v = B + ETR + S_h - \Delta V(s) - E_h - R_i$$



### 7.1.2. Flujo subterráneo horizontal

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas altas del área se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través de los piedemonte, para posteriormente llegar a recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos.

El cálculo de entradas por flujo horizontal se realizó con base en la Ley de Darcy, partiendo de la configuración de elevación del nivel estático para 2007 (Figura 4) y de los valores de transmisividad obtenidos de la interpretación de las pruebas de bombeo efectuadas en pozos distribuidos en la zona, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$Q = BiT$$

Donde:

B: Ancho (m) del canal de flujo

i: Gradiente hidráulico ( $i = (h_2 - h_1) / L$ ); h y L son la diferencia y distancia respectivamente entre las equipotenciales (h) que conforman el canal de flujo.

T: Transmisividad ( $m^2/s$ ) en el canal de flujo.

La figura 6, muestra la red de flujo subterráneo, en donde se marcaron los canales de flujo para el cálculo de entradas y salidas horizontales, para noviembre de 2007.

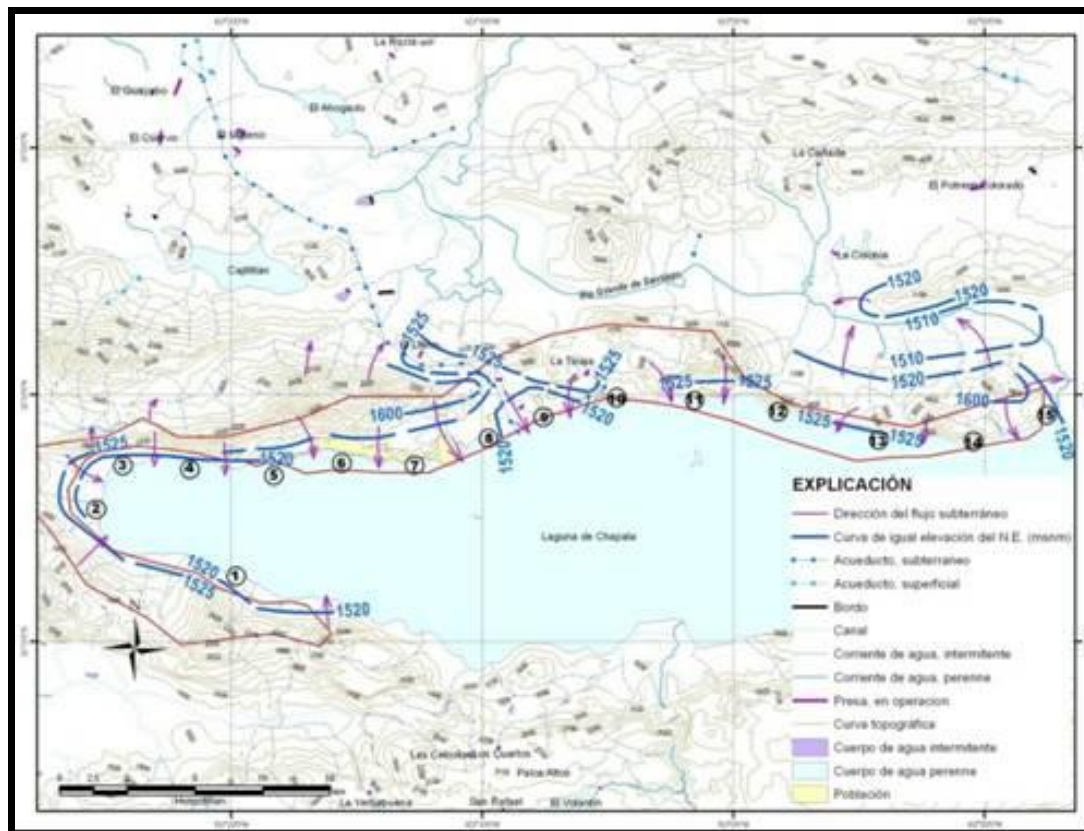


Figura 6. Red de flujo subterráneo del acuífero Chapala.

La Tabla 2 presenta los parámetros, el gasto y volumen anual de cada canal, así como el total resultante.

Tabla 2. Cálculo de entradas horizontales subterráneas

| CANAL | LONGITUD<br>L<br>(km) | ANCHO<br>B<br>(km) | h<br>(m) | Gradiente i<br>(m) | T<br>(m <sup>2</sup> /s) * 10 <sup>-3</sup> | CAUDAL Q<br>(m <sup>3</sup> /s) | VOLUMEN<br>(hm <sup>3</sup> /año) |
|-------|-----------------------|--------------------|----------|--------------------|---|---------------------------------|-----------------------------------|
| E1    | 1.324                 | 17.14              | 9.0      | 6.799              | 0.75  | 0.08740                         | 2.756                             |
| E2    | 1.721                 | 6.07               | 9.0      | 5.229              | 7.00  | 0.22218                         | 7.007                             |
| E3    | 1.589                 | 5.4                | 9.0      | 5.665              | 2.00  | 0.06118                         | 1.929                             |
| E4    | 1.059                 | 4.63               | 9.0      | 8.501              | 2.00  | 0.07872                         | 2.482                             |
| E5    | 1.721                 | 5.66               | 9.0      | 5.229              | 1.00  | 0.02960                         | 0.933                             |
| E6    | 1.125                 | 4.37               | 18.0     | 16.000             | 1.75  | 0.12236                         | 3.859                             |
| E7    | 1.081                 | 4.24               | 20.0     | 18.497             | 1.50  | 0.11764                         | 3.710                             |
| E8    | 2.649                 | 4.89               | 13.5     | 5.097              | 1.02  | 0.02542                         | 0.802                             |
| E9    | 2.384                 | 4.05               | 13.5     | 5.663              | 1.75  | 0.04014                         | 1.266                             |
| E10   | 1.324                 | 6.04               | 22.5     | 16.997             | 0.75  | 0.07700                         | 2.428                             |
| E11   | 1.590                 | 4.5                | 22.5     | 14.151             | 0.50  | 0.03184                         | 1.004                             |
| E12   | 1.590                 | 7.07               | 22.5     | 14.151             | 0.50  | 0.05002                         | 1.578                             |
| E13   | 1.590                 | 5.66               | 22.5     | 14.151             | 0.50  | 0.04005                         | 1.263                             |
| E14   | 1.590                 | 5.66               | 22.5     | 14.151             | 0.50  | 0.04005                         | 1.263                             |
| E15   | 1.590                 | 3.34               | 13.5     | 8.491              | 1.25  | 0.03545                         | 1.118                             |
|       |                       |                    |          |                    |   | <b>1.05904</b>                  | <b>33.4</b>                       |

La entrada total por flujo horizontal es **Eh = 33.4 hm<sup>3</sup> / año.**

### 7.1.3. Recarga inducida

Aun en sistemas de riego muy eficientes, un cierto volumen de agua aplicada en el riego no es usado como uso consuntivo, se infiltra y eventualmente alcanza la superficie del agua subterránea. Esta contribución al acuífero se le conoce como retorno de riego. Para este caso, se aplican a la agricultura de riego aproximadamente 4.24 hm<sup>3</sup>/año y considerando que el 20% de este volumen retorna al acuífero en forma de recarga inducida, los que representa 0.848 hm<sup>3</sup>/año de recarga por retornos de riego.

El volumen destinado para el uso público-urbano es de 9.39 hm<sup>3</sup>/año, considerando que un 30% del volumen total utilizado retorna al acuífero por fugas en las redes de abastecimiento, la recarga resulta de 2.817 hm<sup>3</sup>/año. Por lo tanto el total de la Recarga inducida es de **3.7 hm<sup>3</sup>/año.**

## **7.2. Salidas**

Se trata de los volúmenes de agua, ya sean naturales o extraídos, que pierde el sistema acuífero. Para el Acuífero Chapala las descargas están representadas por el bombeo (B); descarga por evaporación (ETR); Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh) y por flujo base a través de ríos o manantiales (Qb).

### **7.2.1. Evapotranspiración**

Este parámetro es la cantidad de agua transferida del suelo a la atmósfera por evaporación y transpiración de las plantas, por lo tanto es considerada una forma de pérdida de humedad del sistema. Existen dos formas de Evapotranspiración: la que considera el contenido de humedad en el suelo y la que toma en cuenta la etapa de desarrollo de las plantas (Evapotranspiración Potencial y la Evapotranspiración Real), el escurrimiento y el volumen de evapotranspiración real (ETR). Este parámetro es utilizado para la recarga potencial de infiltración.

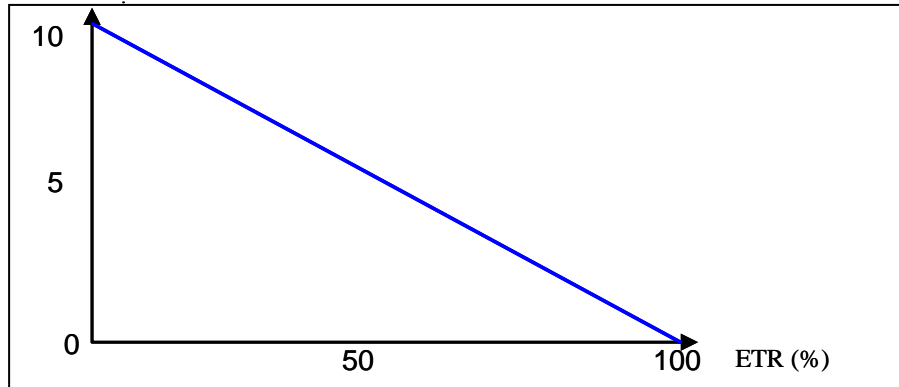
La evapotranspiración tiene dos componentes: la evaporación directa del agua subterránea y la transpiración de las plantas. La primera tiene lugar, donde aflora la superficie freática, así como en las áreas adyacentes a ésta, donde la misma superficie está poco profunda. En el subsuelo, el agua puede ascender, a partir del nivel freático, hasta una altura ("la altura capilar") cuyo valor depende del tamaño de los poros o fisuras; en los materiales granulares esa altura es inversamente proporcional al tamaño de los granos, variando entre unos cuantos decímetros en las gravas, y cerca de tres metros en los materiales limo-arcillosos. Este mecanismo de descarga se presenta en la zona donde los niveles freáticos están a profundidades no mayores a 10 metros.

El acuífero presenta niveles freáticos someros con profundidades menores a los 10 m, que se considera el límite de extinción para que se produzca el fenómeno de evapotranspiración. Se aplicó el método de Turc para calcular que la lámina de evapotranspiración real es de 595.0 mm anuales, considerando valores medios anuales de temperatura de 17.43° C y precipitación de 701.82 mm.

El cálculo de la evapotranspiración corresponde con aquella pérdida de agua freática somera y que se aplica al balance de aguas subterráneas, considerando que el concepto tiene influencia hasta una profundidad máxima de 10 m, bajo el siguiente proceso:

En zonas donde el nivel estático se encuentra a una profundidad menor a 10 m, se calcula el valor de ETR exclusivamente para estas zonas de niveles someros y se pondera el valor del volumen obtenido, partiendo de una relación lineal inversa entre la profundidad al nivel estático (PNE) y el % de ETR. Suponiendo una profundidad límite de extinción de 10 m para el fenómeno de ETR, a

menor profundidad mayor será el % de ETR, de tal manera que a 10 m el valor de ETR es nulo y a 0 m el valor es del 100 %, a 5 m el 50%, a 2 m el 80% etc.



De la configuración de profundidad al NE mostrada en la figura 3, correspondiente a diciembre de 2007, se observan valores menores a 10 m; se calcula el área entre ellas y se toma el valor promedio (entre las curvas de 2 y 3 metros el valor promedio será 2.5, por ejemplo). El resultado de multiplicar el valor promedio por el área entre las curvas, deberá ponderarse de acuerdo a la relación lineal mencionada anteriormente, en este caso particular como el valor medio de profundidad es de 4.0 m, se multiplicará por 0.60 (que significa que a esta profundidad, el 60 % es susceptible de evapotranspirarse. Lo mismo se hace para cada área comprendida entre dos curvas de profundidad menor a 10 m. Al final se obtendrá la suma de los volúmenes evapotranspirados.

El valor de esta variable se estimó en **10.6 hm<sup>3</sup> anuales**, considerando un área de evapotranspiración de 29.58 km<sup>2</sup>, en la que la profundidad media es de 4.0 m.

$$29.58 \text{ km}^2 (0.595 \text{ m}) (0.60) = 10.6$$

La evapotranspiración ocurre principalmente en la ribera del Lago, con 98.6 km de perímetro y 300 m de faja con nivel freático somero susceptible de evapotranspirarse.

### 7.2.2. Bombeo

La extracción por bombeo es de **18.4 hm<sup>3</sup>/año**.

### 7.2.3. Flujo subterráneo horizontal

Análogamente al cálculo de entradas por flujo subterráneo horizontal, la tabla 3 presenta el cálculo de las salidas laterales.

Tabla 3. Cálculo de salidas por flujo horizontal.

| CANAL | LONGITUD<br>L<br>(km) | ANCHO<br>B<br>(km) | h<br>(m) | Gradiente i<br>(m/km) | T<br>(m <sup>2</sup> /s) * 10 <sup>-3</sup> | CAUDAL Q<br>(m <sup>3</sup> /s) | VOLUMEN<br>(hm <sup>3</sup> /año) |
|-------|-----------------------|--------------------|----------|-----------------------|---|---------------------------------|-----------------------------------|
| E1    | 1.059                 | 19.04              | 10.0     | 9.443                 | 0.70  | 0.12586                         | 3.969                             |
| E2    | 1.377                 | 6.74               | 10.0     | 7.262                 | 5.00  | 0.24473                         | 7.718                             |
| E3    | 1.271                 | 6.00               | 10.0     | 7.868                 | 2.00  | 0.09442                         | 2.978                             |
| E4    | 0.847                 | 5.14               | 10.0     | 11.806                | 2.00  | 0.12137                         | 3.827                             |
| E5    | 1.377                 | 6.29               | 10.0     | 7.262                 | 1.00  | 0.04568                         | 1.441                             |
| E6    | 0.900                 | 4.86               | 20.0     | 22.222                | 1.50  | 0.16200                         | 5.109                             |
| E7    | 0.865                 | 4.71               | 25.0     | 28.902                | 1.50  | 0.20419                         | 6.439                             |
| E8    | 2.119                 | 5.43               | 15.0     | 7.079                 | 1.00  | 0.03844                         | 1.212                             |
| E9    | 1.907                 | 4.50               | 15.0     | 7.866                 | 1.50  | 0.05310                         | 1.674                             |
| E10   | 1.059                 | 6.71               | 25.0     | 23.607                | 0.75  | 0.11880                         | 3.747                             |
| E11   | 1.272                 | 5.00               | 25.0     | 19.654                | 0.50  | 0.04914                         | 1.550                             |
| E12   | 1.272                 | 7.86               | 25.0     | 19.654                | 0.50  | 0.07724                         | 2.436                             |
| E13   | 1.272                 | 6.29               | 25.0     | 19.654                | 0.50  | 0.06181                         | 1.949                             |
| E14   | 1.272                 | 6.29               | 25.0     | 19.654                | 0.50  | 0.06181                         | 1.949                             |
| E15   | 1.272                 | 3.71               | 15.0     | 11.792                | 1.00  | 0.04375                         | 1.380                             |
|       |                       |                    |          |                       |   | <b>1.50232</b>                  | <b>47.3</b>                       |

El total de salidas horizontales es de **47.3 hm<sup>3</sup>/año**.

### 7.3. Cambio de almacenamiento

La evolución de niveles estáticos promedio en el ciclo 2006–2007 resulta 0.3 m de abatimiento para el acuífero Chapala; es decir,  $A_c = 355.6 \text{ km}^2$ ,  $\bar{a} = -0.30 \text{ m}$ ;  $S_y = 0.10$  y  $\Delta V_s = A_B * h_N * S_y$ .

Sustituyendo:  $\Delta V_{sy} = (355.6) * (-0.30) * (0.10) = -10.668 \text{ hm}^3/\text{año} = \mathbf{-10.7 \text{ hm}^3/\text{año}}$

El signo negativo significa pérdida de agua de las reservas dinámicas almacenadas.

Para ciclos subsecuentes de balance estas pérdidas podrían disminuir, desaparecer o revertirse, llegando a presentarse recuperación de niveles, ganancia en el almacenamiento subterráneo y volúmenes disponibles mayores.

#### **Solución a la ecuación de balance**

$$R_v = B + ETR + Sh - \Delta V(s) - E_h - R_i$$

Sustituyendo términos:

$$R_v = 18.4 + 47.3 + 10.6 - 10.7 - 33.4 - 3.7 = 28.5 \text{ hm}^3/\text{año}$$

Por lo tanto, la recarga total es igual:

$$R_t = R_v + E_h + R_i = 28.5 + 33.4 + 3.7 = 65.6 \text{ hm}^3/\text{año}.$$

## **8. DISPONIBILIDAD**

La disponibilidad media anual de agua subterránea se obtiene de aplicar el procedimiento y la metodología de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000, fracción relativa a las aguas subterráneas; se determina por medio de la expresión:

$$DAS = R_t - DNCOM - VCAS$$

Donde:

|                |   |
|----------------|---|
| DAS            | Disponibilidad anual media de agua subterránea en el acuífero   |
| R <sub>t</sub> | Recarga total anual   |
| DNCOM          | Descarga natural comprometida                                   |
| VCAS           | Volumen de agua subterránea concesionado e inscrito en el REPDA |

### **8.1. Recarga total anual**

La  $R_t$  es la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero tanto en forma de recarga natural como inducida.

$$R_t = R_v + E_h + R_i = 28.5 + 33.4 + 3.7 = 65.6 \text{ hm}^3/\text{año}$$

## 8.2. Descarga natural comprometida

Se determina sumando los volúmenes de agua concesionados de manantiales y caudal base de ríos que están comprometidos como agua superficial pero que son alimentados por aguas subterráneas, y las descargas que se deben preservar para no afectar a acuíferos adyacentes, sostener el gasto ecológico y prevenir la migración de agua de mala calidad hacia fuentes del subsuelo que están siendo aprovechadas.

Se asume el 40% de la evapotranspiración y de las salidas horizontales subterráneas.

$$\text{DNCOM} = 40\% (\text{ETR} + \text{Sh})$$

$$\text{DNCOM} = 40\% (\text{ETR} + \text{Sh}) = 4.24 + 18.92 = \mathbf{23.2 \text{ hm}^3 / \text{año}}$$

El 60% del volumen de ETR y Sh aprovechable racionalmente como parte de la disponibilidad no es inmediato porque el incremento del bombeo generalmente es gradual como también la propagación de los efectos del bombeo no es instantánea hacia la sección de entrada y salida laterales.

Aprovechar una parte de estas descargas naturales, inicialmente a consta del almacenamiento subterráneo, podría ocasionar incrementos de recarga por potenciales aumentos de gradiente y de la capacidad receptora del acuífero.

## 8.3. Volumen concesionado de aguas subterráneas

El volumen anual concesionado al **31 de marzo de 2009** por el Registro Público de Derechos de Agua, REPDA, es **27'529,638 m<sup>3</sup>**.

## 8.4. Disponibilidad de aguas subterráneas

Está representada por el volumen anual promedio disponible en un acuífero al que tendrán derecho de explotar, usar o aprovechar los usuarios, adicionalmente a la extracción ya concesionada y a la descarga natural comprometida, sin poner en peligro los ecosistemas.

Se obtiene como la diferencia entre el volumen de recarga total, la descarga natural comprometida y el concesionado e inscrito en el REPDA.

$$\text{DAS} = \text{Rt} - \text{DNCOM} - \text{VCAS}$$

$$\text{DAS} = 65.6 - 23.2 - 27.529638 = \mathbf{14.870362 \text{ hm}^3 / \text{año}}$$

El resultado indica que existe actualmente un volumen de **14'870,362 m<sup>3</sup> anuales** para otorgar nuevas concesiones.

Cabe hacer la aclaración de que el cálculo de la recarga media anual que recibe el acuífero, y por lo tanto de su disponibilidad, se refiere a la porción del acuífero en la que actualmente existe información hidrogeológica para su evaluación. No se descarta la posibilidad de que su valor sea mayor; sin embargo, no es posible en este momento incluir en el balance los volúmenes de agua que circulan a mayores profundidades que las que actualmente se encuentran en explotación. Conforme se genere mayor y mejor información, especialmente la que se refiere a la piezometría y pruebas de bombeo, se podrá hacer una evaluación posterior.

Se recomienda el monitoreo continuo y sistemático de los niveles piezométricos, calidad del agua y control hidrométrico de los pozos.

## 9. BIBLIOGRAFIA Y REFERENCIAS

Comisión Nacional del Agua. 1996. Actualización del Estudio Geohidrológico de la zona conurbada de Guadalajara, Jalisco. Cuencas Toluquilla, Atemajac y Cajititlán. Realizado por la Compañía GEOEX, S.A.

Comisión Nacional del Agua. 2004. Reactivación de la red de medición piezométrica en el acuífero Cajititlán, Jal. Realizado por la Compañía Hidroconstrucción y Consultoría, S.A.

Comisión Nacional del Agua 2007. Elaboración de los documentos de respaldo de la disponibilidad media anual de agua en los acuíferos (1413) Altos de Jalisco, (1436) Arenal, (1428) Chapala, (1429) Tizapán y (1447) Yahualica, en el estado de Jalisco. (1428) Chapala. Realizado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Subcoordinación de Hidrología Subterránea, Coordinación de Hidrología.

Secretaría de Recursos Hidráulicos. 1973. Geohidrología de los Valles de Atemajac, Tesistán, Ameca, Ahualulco y San Marcos, Jal. Realizado por la Compañía Ariel Constructores, S.A. de C.V.

Secretaría de Recursos Hidráulicos. 1975. Estudio Geológico Regional de la Cuenca Lacustre del Altiplano Mexicano (área Jalisco-Michoacán). Realizado por la Compañía Casther, S. A.