



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA
GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO LAGUNA DE CHAPALA (0233), ESTADO
DE BAJA CALIFORNIA**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1. GENERALIDADES.....	2
Antecedentes.....	2
1.1 Localización.....	2
1.2 Situación administrativa del acuífero.....	4
2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD.....	4
3. FISIOGRAFÍA.....	7
3.1 Provincia fisiográfica.....	7
3.2 Clima.....	8
3.3 Hidrografía.....	8
3.4 Geomorfología.....	9
4. GEOLOGÍA.....	10
4.1 Estratigrafía.....	11
4.2 Geología estructural.....	14
4.3 Geología del subsuelo.....	14
5. HIDROGEOLOGÍA.....	15
5.1 Tipo de acuífero.....	15
5.2 Parámetros hidráulicos.....	16
5.3 Piezometría.....	16
5.4 Comportamiento hidráulico.....	16
5.4.1 Profundidad al nivel estático.....	16
5.4.2 Elevación del nivel estático.....	18
5.4.3 Evolución del nivel estático.....	18
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	19
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA.....	19
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	20
7.1 Entradas.....	21
7.1.1 Recarga vertical (Rv).....	21
7.1.2 Recarga Inducida (Ri).....	22
7.1.3 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	22
7.2 Salidas.....	23
7.2.1 Evapotranspiración (ETR).....	23
7.2.2 Bombeo (B).....	23
7.2.3 Salidas horizontales por flujo subterráneo (Sh).....	24
7.3 Cambio de almacenamiento (ΔVS).....	24
8. DISPONIBILIDAD.....	25
8.1 Recarga total media anual (R).....	25
8.2 Descarga natural comprometida (DNC).....	25
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	26
8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	26
9. BIBLIOGRAFÍA.....	28

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-2015, Conservación del recurso agua- Que establece las especificaciones y 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 de extracción de aguas subterráneas.

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 Laguna de Chapala, definido con la clave 0233 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción Sur del Estado de Baja California, tiene una superficie de 2,381 km², geográficamente se encuentra entre los 29° 53' y 29° 35' de latitud norte y entre los 114° 13' y 114° 47' de longitud oeste (figura 1).

Colinda al noroeste con el acuífero punta Canoas-San José, al noreste con Bahía de San Luis Gonzaga y Calamajue, al sureste con el acuífero La Bachata-Santa Rosalita, todos ellos del estado de Baja California, y al suroeste con el Océano Pacífico. Geopolíticamente queda comprendido dentro del municipio de Ensenada.



Figura 1. Localización del acuífero

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

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

ACUÍFERO 0233 LAGUNA DE CHAPALA							OBSERVACIONES
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	114	46	56.6	29	11	52.3	
2	114	41	57.1	29	17	25.0	
3	114	33	58.8	29	23	49.5	
4	114	26	32.0	29	34	25.0	
5	114	30	0.0	29	25	7.3	
6	114	35	32.0	29	22	43.3	
7	114	30	3.7	29	20	30.4	
8	114	30	53.1	29	17	51.7	
9	114	17	56.4	29	35	41.6	
10	114	13	11.4	29	35	6.9	
11	114	29	6.7	29	3	20.8	
12	114	13	37.8	28	55	21.1	
13	114	38	48.1	28	50	6.1	
14	114	21	49.3	28	48	7.1	DEL 11 AL 13 POR LA LINEA DE BAJAMAR A LO LARGO DE LA COSTA
1	114	46	56.6	29	11	52.3	

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero pertenece al Organismo de Cuenca I “Península de Baja California”. Su territorio completo se encuentra sujeto a las disposiciones del “Decreto por el que se establece veda para el alumbramiento de aguas del subsuelo en el estado de Baja California”, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 15 de mayo de 1965.

La veda a la que se refiere el decreto anterior, queda comprendida en la tercera clasificación del artículo 11 del reglamento de la ley del 29 de diciembre de 1956 en materia de aguas del subsuelo.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 4. El uso principal del agua subterránea es el doméstico. El acuífero forma parte del Consejo de Cuenca Baja California, instalado el 7 de diciembre de 1999. No existe Distrito o Unidad de Riego alguna, ni se ha constituido a la fecha un Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

El acuífero se localiza dentro de la Zona de Protección Forestal y Refugio de la Fauna Silvestre “Valle de los Cirios”, con fecha de Decreto 2 de junio de 1980.

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la zona que comprende el acuífero y la región aledaña se han realizado algunos estudios geohidrológicos. A continuación se mencionan los resultados y conclusiones más relevantes.

Perforación del pozo PBCESJP-1, del Ejido San José de Las Palomas, 1975, con máquina rotatoria directa, marca Winter Weis Portadril en el cual se midieron algunos parámetros hidráulicos tales como el nivel estático de 8.96 m y nivel dinámico de 49.60 m y un gasto máximo de 0.90 lps. Mediante la perforación se determinó la clasificación litológica del aprovechamiento.

Profundidad (m)	Descripción
0.0 a 1.0	Arcilla café
1.0 a 2.0	Gravas con arena gruesa
2.0 a 10.0	Gravas
10.0 a 14.0	Gravas con arena gruesa
14.0 a 20.0	Gravas con arena gruesa empacadas en una matriz arcillosa color café
20.0 a 22.0	Gravas con arena gruesa
22.0 a 24.0	Arena fina, calichosa
24.0 a 32.0	Gravillas con arena gruesa
32.0 a 44.0	Arena gruesa a fina con poca grava, empacadas en una matriz arcillosa color café
44.0 a 52.0	Gravas con arena gruesa ligeramente arcillosas
52.0 a 54.0	Gravas gruesas con poca arena
54.0 a 58.0	Basalto fracturado y alterado
50.0 a 70.5	Basalto

En este mismo año, se realizaron pruebas físico-químicas del agua para el mismo aprovechamiento y en base al análisis de las muestras se determinó que el contenido de sólidos totales es de 2131 ppm y una clasificación C₄-S₂.

Perforación del pozo Las Palomas, en 1976 por la Dirección General de Obras de Riego para el Desarrollo Rural, mediante el cual se obtuvieron las siguientes características litológicas:

Profundidad (m)	Litología
0.0 a 4.0	Arcillas marinas
4.0 a 8.0	Arenas Silicatadas de grano grueso
8.0 a 20.0	Gravillas
20.0 a 44.0	Arenas grises
44.0 a 48.0	Arenas empacadas por limos
48.0 a 70.0	Gravillas
70.0 a 85.0	Cantos rodados de origen granítico
85.0 a 100.0	Granito

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, 1979. Estudio Geohidrológico del área del Ejido San José de la Palomas, de las cuencas hidrográficas denominadas Puerto Canoas-Puerto de San José y Laguna Chapala-Las Palomas, donde se efectuó un reconocimiento geológico en todas las zonas con mayores posibilidades hidrogeológicas para la explotación de aguas tanto superficiales como subterráneas donde se encontraron diferentes tipos de unidades de rocas ígneas intrusivas y extrusivas, sedimentarias y metamórficas cuya exposición se ha determinado en 60, 35 y 5% respectivamente.

En la zona, se origina una precipitación media anual de 90 mm, considerada como una de las zonas de más baja precipitación en el país. Durante el recorrido por la zona, se pudieron identificar como escurrimientos o aguas superficiales los arroyos El Cuervito y San José, con un gasto total de 320 lps, cuatro lagunas temporales que almacenan un volumen total de agua de 2500 m³, cinco aguajes o manantiales (El Bateque, El Chileno, El Cuervito, Rancho San José y Las Delicias) con un gasto calculado de 10 lps.

En ese mismo año (1979), La Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Distrito de Riego No. 14, Río Colorado B.C. realizó un análisis físico-químico para determinar la calidad de agua que existe tanto superficial como subterránea, teniendo que el agua de mejor calidad se localiza en las zonas de las lagunas temporales, Santa María y Las Palomas (Codornices), con sólidos disueltos totales de 341, 949 y 1684 ppm, cuyas clasificaciones son de C₂-S₁, C₃-S₁ Y C₄-S₃, respectivamente, el resto de los aprovechamientos, tanto corrientes superficiales, aguajes y norias tuvieron un alto contenido de sólidos disueltos totales de 2020 como mínimo y 9443 ppm como máximo, con clasificación C₄-S₃ y generalmente como agua altamente salina.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Subdirección de Geohidrología y de Zonas Áridas, 1980. Estudio Geohidrológico de la Cuenca Laguna Chapala, de donde se determina que el origen del valle está ligado a la aparición de volcanes y se puede considerar como efecto de un tectonismo local, el material que constituye el basamento es de tipo granítico, por lo que en términos generales se considera impermeable, el espesor de los materiales de relleno es desconocido y existen posibilidades de flujo subterráneo fuera del área.

El drenaje es de tipo combinado, centrípeto en las áreas que alimentan a las diferentes lagunas y dendrítico en la porción norte, en la que nacen los arroyos de la Güija y Tinaja de Villegas, las cuales constituyen la principal fuente de recarga de la zona.

Las zonas de mayores posibilidades geohidrológicas son Puerto Canoas, Delicias o Datilar, Las Palomas (Arroyo El Sauz) y Boca del Carrizo. Se localizaron 24 abastecimientos, que corresponden a 2 pozos, 10 norias, 2 abrevaderos, 4 agujajes, 2 arroyos y 4 lagunas temporales.

Se tomaron 14 muestras de agua para hacer un análisis físico-químico y se midieron sus resistividades; en el análisis se determinó un alto contenido de sólidos disueltos totales, que es producto de la contaminación de minerales que se encuentran presentes en la zona o bien se deba a un lavado que hace el agua a las formaciones marinas del Paleógeno-Neógeno.

Comisión Nacional del Agua. Organismo de Cuenca Península de Baja California (2008). Estudio Técnico para determinar la Disponibilidad de las Aguas Subterráneas en 20 acuíferos del estado de Baja California. El objetivo principal de este estudio fue plantear el balance preliminar de aguas subterráneas para determinar la disponibilidad, mediante la realización actividades de campo que incluyeron censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría y nivelación de brocales. 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 área se localiza en la zona intermontana comprendida entre las sierras de Calamajúe y Columbia, quienes junto con las sierras de San Lino y San Francisquito entre otras, forman la sierra de Santa Catarina, la cual se prolonga en dirección Norte con el nombre de San Pedro Mártir y Sierra de Juárez, formando ya en conjunto el macizo montañoso central de la Península de Baja California en su porción Norte. A la cual se le denomina provincia fisiográfica Sierras de Baja California, Subprovincia de la Sierra Cristalina de Baja California (Manuel Álvarez Jr.).

3.2 Clima

De acuerdo al sistema de clasificación climatológica de Köeppen, modificado por E. García (1964) para adaptarlo a las condiciones climáticas de la República Mexicana, se tiene que el área presenta a nivel regional, las variantes que se describen a continuación:

BW_{hs}: Muy árido, semicálido, temperatura media anual entre 18 y 22° C, temperatura del mes más frío menor de 18° C, temperatura del mes más caliente mayor de 22° C.

Lluvias de invierno y precipitación invernal mayor al 36% del total anual.

BW_{h(x')}: Muy árido, semicálido, temperatura media anual entre 18° C y 22° C, temperatura del mes más frío menor de 18° C, temperatura del mes más caliente mayor de 22° C. Lluvias repartidas todo el año y porcentaje de lluvia invernal mayor al 18 % del total anual.

El acuífero presenta una precipitación anual muy variable para el periodo 1954-2007, el año que se registró la mayor precipitación total anual fue en 1978, con un valor de 416.2 mm, en tanto que el año en que se registró la menor precipitación total anual fue en 1963, con un valor de 6 mm.

Por otra parte, a nivel de precipitaciones medias mensuales para el periodo considerado, el mes en que se registró la mayor precipitación es el de diciembre con 7 mm, en tanto que el mes en que se registra la menor es junio con 0.2 mm. La estación climatológica de Punta Prieta, para el periodo de 1954-2007 indica una temperatura media anual de 19.5° C; en cuanto al mes más caluroso, este se presenta en el mes de agosto con una temperatura promedio de 26.4° C y el más frío es enero con 14.4° C. La precipitación promedio es muy baja, siendo del orden de los 86 mm anuales.

3.3 Hidrografía

El acuífero se localiza en la Región Hidrológica No. 2 “Baja California Centro Oeste”. La cuenca hidrográfica Laguna Chapala-Las Palomas, la constituyen tres arroyos de gran importancia con dirección E-W y un desarrollo total de cuenca de 2,229 km².

Arroyo La Pinta: Se ha considerado para este escurrimiento las zonas de Laguna Chapala y las Delicias, con una longitud de recorrido de 15 km y un rumbo E-W, hasta

llegar a la zona de la Laguna Chapala; en la que superficialmente se pierden todos los arroyos continuando con el mismo rumbo y a la distancia de 10 km se localiza la Laguna Delicias, dichas zonas tienen un área aproximada de 401 y 240 km², respectivamente, las cuales se consideran como subcuencas; siguiendo la misma dirección principia lo que se conoce con el nombre de Arroyo La Pintada, con un recorrido de 22 km; desde los límites con la subcuenca Delicias hasta la desembocadura con el Océano Pacífico, con una cuenca de 270 km², que en conjunto hacen una cuenca total de 911 km².

Arroyo El Sauz: Tiene su origen en la sierra Colombia en la parte media de la cuenca, con una longitud de recorrido sobre su cauce principal de 35 km, desde su nacimiento hasta la desembocadura, con rumbo E-W y una cuenca de 487 km².

Arroyo La Boca del Carrizo: Este arroyo tiene un recorrido sobre su colector principal de 55 km, desde su origen hasta su desembocadura. El nacimiento tiene lugar en la sierra de Colombia, inicia el recorrido de 15 km con rumbo N-S y continúa con dirección E-W hasta desembocar al Océano Pacífico, recorriendo una distancia de 40 km, con un desarrollo de 535 km².

En la cuenca se tienen otros dos arroyos, El Cardón y Los Ojitos; tienen una longitud sobre su colector principal de 20 y 26 km, una cuenca de 112 y 184 km² y un área acuífera de 4 y 7 km², respectivamente.

3.4 Geomorfología

El acuífero posee las características propias de las Sierras del Estado, como son un alto grado de intemperismo y erosión, fenómeno que se observa sobre todo en la porción oriental de la zona, la cual es menos abrupta que la porción occidental.

En las partes bajas se observan cinco pequeñas lagunas con un área de 3 a 6 km aproximadamente, de las cuales la denominada Chapala presenta la mayor superficie, según el grado importancia le siguen El Islote y La Güija, las dos restantes son de dimensiones pequeñas, por lo que probablemente anteriormente se encontraban unidas a las lagunas El Islote y La Güija. Estas lagunas se encuentran distribuidas en un valle con topografía suave, casi plana, su extensión es en dirección NW-SE con 15 km de longitud aproximadamente, y en dirección NE-SW es prácticamente la misma,

la parte central del valle tiene una superficie aproximada de 20 km², la altura media del valle sobre el nivel del mar es de 650 m.

El drenaje que se presenta en la zona es de tipo combinado, centrípeto en las áreas que alimentan a las diferentes lagunas y dendrítico en la porción Norte, en la que nacen los arroyos de la Güija y Tinaja de Villegas, los cuales constituyen la principal fuente de recarga de la zona, ambos son de escaso desarrollo y su longitud es de aproximadamente 25 km.

4. GEOLOGÍA

De acuerdo a las evidencias geológicas que se presentan en el área, incluyendo tanto morfológicas como estructurales e históricas, se pueden señalar que antes de la formación de las lagunas, el levantamiento de la zona se efectuaba en dirección sur-suroeste, contribuyendo al desarrollo del valle con la erosión y depósito de material clástico en las zonas bajas, mismo que fue acumulándose paulatinamente hasta llegar a ocultar parcialmente algunas de las estructuras altas.

Fue durante las últimas emisiones volcánicas del Cuaternario cuando el flujo de lava proveniente de la zona occidental invadió la región, originando altas estructuras que formaron barreras montañosas e interrumpieron el flujo superficial, cerrando el valle y propiciando la formación de la zona lagunar, aportando a la vez nuevos materiales de relleno, para la cuenca en formación, lo que contribuyó a aumentar el espesor de sedimentos del valle y dieron lugar a la formación de un acuífero constituido por materiales granulares muy finos (figura 2).

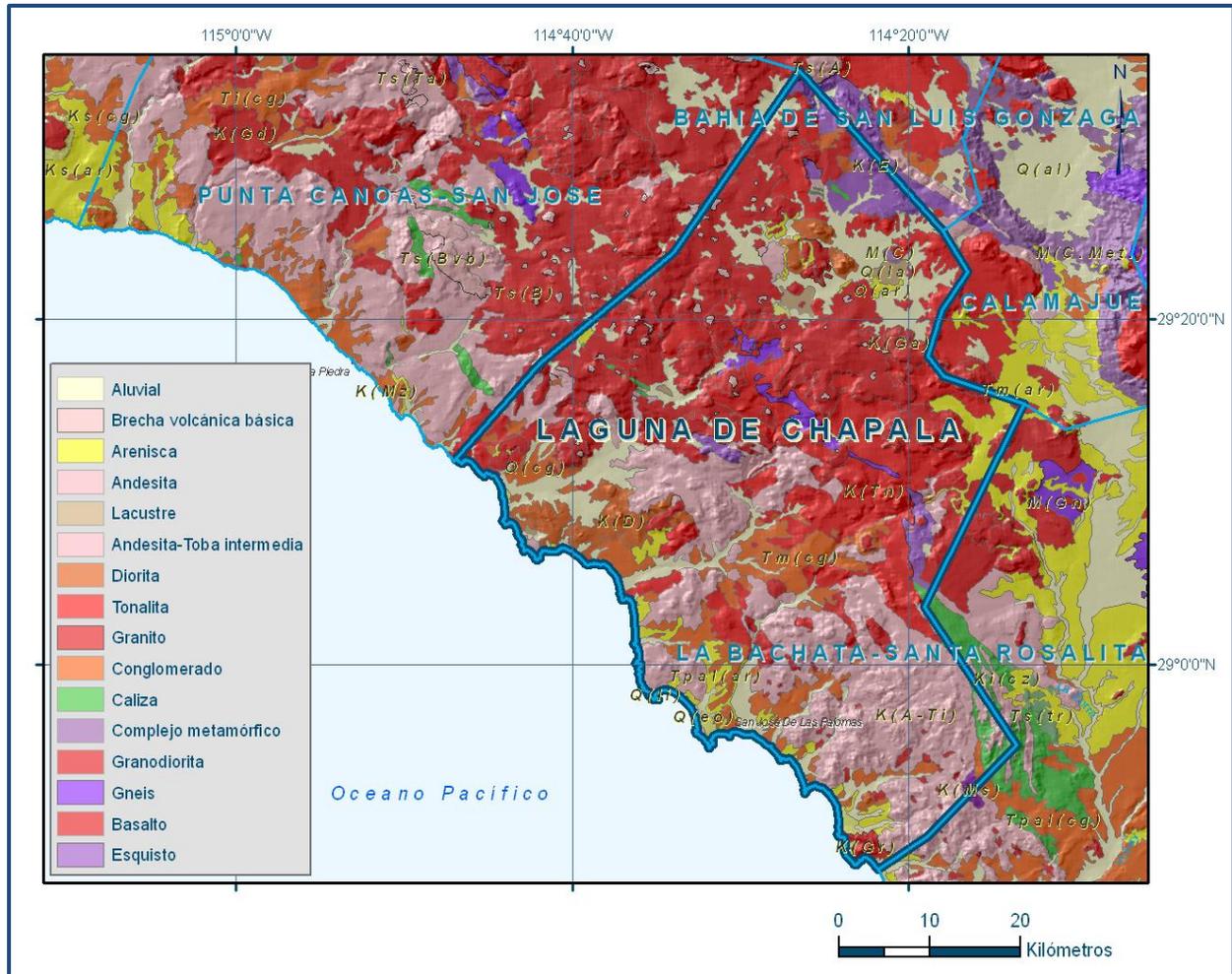


Figura 2. Geología general del acuífero

4.1 Estratigrafía

Pre-Cretácico. Está constituido por rocas metamórficas pre-batolíticas. Estas rocas afloran en áreas importantes hacia la mitad sur de la zona, particularmente bordean el valle de Calamajúe formado por la sierra del mismo nombre, que a su vez delimita al N-NE y N la cuenca endorreica de la Laguna de Chapala. Hacia el norte los afloramientos se reducen a algunos manchones pequeños.

Estas rocas son las más antiguas y se extienden en áreas actualmente cubiertas por rocas post-batolíticas. La naturaleza litológica de estas rocas es compleja; predomina un micaesquisto de grano fino, a veces medio, con moscovita visible, cortado por diques ácidos con textura pseudognéica, discordantes respecto a la esquistosidad y por multitud de filones pequeños (aplitas) cuarzo feldespáticos.

La naturaleza de la roca en ciertas partes parece corresponder más a un gneis, probablemente como consecuencia de cierta migmatización producida por la proximidad de la masa batolítica. Un análisis petrográfico en sección delgada del micaesquistos indica la presencia de cuarzo, algunas plagioclasas, biotita, moscovita, apatito y algunos circones con textura lepidoblástica.

Cretácico. Rocas plutónicas intrusivas ácidas: Granitos y granodioritas con estructura de batolitos. Estas rocas aparecen en toda el área, aflorando en extensiones considerables y extendiéndose debajo de las extrusivas post-batolíticas y de las sedimentarias.

Han sufrido relativamente un intenso intemperismo, presentándose en ocasiones profundamente alteradas y mostrando las formas redondeadas características de los granitos y rocas afines. Las rocas dominantes son el granito y la granodiorita, presentando frecuentemente cierta orientación de la mica, dándole una textura pseudo-gnéisica, que se expresa también en una tendencia de los afloramientos.

La mineralogía determinada, muestra una composición a base de cuarzo, plagioclasa sódica, feldespato potásico, biotita y moscovita, con trazas de hornblenda.

Paleógeno. Areniscas y conglomerados “Miocénicos” pre-volcánicos. En áreas importantes afloran areniscas y conglomerados, principalmente hacia la mitad del sur de la zona aunque están presentes en todas las cuencas, donde no siempre afloran por estar cubiertas por los derrames basálticos y/o por depósitos más recientes. Estas areniscas y conglomerados son como de la edad miocénica aunque por su carácter continental y ambiente de deposición no se han encontrado fósiles que permitan una correlación estratigráfica precisa. El espesor de estas areniscas y conglomerados es de unos 250 m aproximadamente.

Neógeno. Se encuentra conformado por basaltos y brechas volcánicas. En el área, las rocas volcánicas están representadas por basaltos y andesíticos, cubriendo grandes extensiones. Sobreyace a las areniscas y conglomerados miocénicos en muchas partes. No existen muchos aparatos volcánicos conservados de las erupciones que dieron origen a los basaltos y los que aparecen son de pequeño tamaño, lo que indica una lava de baja viscosidad.

La litología dominante corresponde a la de basaltos de olivino, con textura afanítica, a veces porfídica, con la plagioclasa visible a la lupa, con matriz vítrea más o menos abundante según el derrame, con estructura vesicular en la parte superior de los derrames, masiva y con cierta lajosidad en la parte media e inferior de las mismas.

Las vesículas no tienen relleno, son huecas y sin revestimiento de minerales en los bordes de las cavidades. El olivino que aparece en las láminas delgadas está parcialmente alterado, los otros minerales reconocidos son los comunes de estas rocas: augita. En general, los basaltos ocupan las partes elevadas bordeando las cuencas de escurrimiento. El espesor máximo estimado es de unos 350 m. El grado de fracturamiento y fallamiento no es muy intenso, existen algunos aparatos volcánicos muy bien conservados, con su cono cinerítico intacto que se cree corresponden a un vulcanismo más reciente, probablemente Cuaternario.

Cuaternario. Depósitos aluviales, areniscas conglomeráticas, piamontes, areniscas eólicas, basaltos y brechas volcánicas basálticas. Hacia las partes centrales bajas de las cuencas aparecen terrazas aluviales consolidadas, distinguiéndose bien de los depósitos aluviales que acompañan los cauces actuales. Estas terrazas aluviales son de areniscas y areniscas conglomeráticas, de edad probablemente Pleistocénica. La extensión que ocupan estas areniscas y areniscas conglomeráticas cuaternarias es considerable, siendo su presencia constante en todas las cuencas de escurrimiento delimitadas.

El espesor máximo que alcanzan es de unos 60-70m en la cuenca de la Laguna de Chapala pero en general no son muy potentes.

Litológicamente varían de un lugar a otro entre areniscas medias de selección regular, feldespáticas, arcillosas, de color café claro o rojizo con estratificación subparalela y entre cruzada; medianamente deleznales, con intercalaciones de niveles conglomeráticos y areniscas conglomeráticas, con cantos de subredondeados o subangulosos, polimícticos, con trozos de rocas metamórficas, intrusivas y volcánica, de cantos de cuarcita y de pegmatitas ácidas.

Existen otras areniscas que también se han incluido entre los depósitos cuaternarios, ubicados en las partes altas, asociadas estrechamente con depósitos de piamonte.

El menor transporte que en general han tenido condiciona la presencia de cantos más angulosos y una selección más pobre.

El grado de litificación en general es escaso, presentando gran susceptibilidad a la erosión. Su espesor no pasa de una decena de metros como máximo.

En la cuenca de la Laguna de Chapala aparecen superpuestas a las areniscas cuaternarias de origen aluvial descritas, algunas dunas consolidadas. Litológicamente son areniscas de grano medio a grueso, de selección regular, arcósicas, con estratificación cruzada de tipo cuneiforme, deleznales a medianamente deleznales, con escaso material cementante, de color amarillento.

Por último, aparecen en el entorno a los cauces actuales, depósitos aluviales constituidos por materiales sueltos, sin cohesión, sobreyaciendo a las terrazas aluviales más antiguas de las areniscas ya descritas y/o directamente sobre las rocas antiguas.

4.2 Geología estructural

Los fenómenos tectónicos que han afectado a la Península han provocado que en el área se observen fenómenos compresivos y distensivos que han sucedido en diferentes momentos de la historia geológica de la región.

Los fenómenos intrusivos han dado origen al emplazamiento de los batolitos y han comprimido a las rocas encajonantes, plegándolas y deformándolas. La existencia de etapas distensivas se evidencia por la existencia de fallas normales, la más importante de las cuales es la que aparece en el borde occidental de la Sierra de Calamajúe.

4.3 Geología del subsuelo

De acuerdo a la geología del área, se definen tres unidades hidrogeológicas, tomando en cuenta las características de permeabilidad y composición de cada una de ellas.

Unidad impermeable: Esta unidad se encuentra representada por rocas volcánicas de composición ácida e intermedia, representadas predominantemente por tonalita y granodiorita y rocas metamórficas que funcionan como basamento y barreras laterales.

Unidad semipermeable: Esta unidad se encuentra formando lomeríos y está representada por conglomerados, areniscas, limolitas y por algunos remanentes de calizas que en condiciones estratigráficas óptimas pueden funcionar como receptores de aguas subterráneas, este depósito se encuentra específicamente en la zona Boca del Carrizo.

Unidad permeable: Esta unidad se encuentra en las partes bajas topográficamente, rellenando principalmente los cauces de los arroyos, están representados predominantemente por depósitos no consolidados como aluviones, conglomerados, lacustres y eólicos.

Debido a sus características líticas se les ha considerado como almacenadores de agua subterránea; esta unidad se localiza en las zonas denominadas como Puerto Canoas, El Datilar (Las Delicias), Las Palomas (Arroyo El Sauz) y Boca del Carrizo, ya que en ellas se puede tener un mayor espesor de depósitos aluviales y conglomerados, el espesor promedio es de aproximadamente 100 m.

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

El acuífero es de tipo libre y se encuentra constituido por depósitos no consolidados representados por aluviones y conglomerados del Cuaternario, así como conglomerados poco consolidados del Paleógeno-Neógeno que desde el punto de vista hidrogeológico y debido a sus características clásticas son las únicas formaciones factibles para extraer agua subterránea.

El resto de los materiales establecidos como impermeables se encuentra constituido por rocas volcánicas, representadas predominantemente por tonalita y granodiorita y rocas metamórficas que actúan como basamento y fronteras laterales del área acuífera.

El origen del valle está ligado a la aparición de volcanes y se puede considerar como efecto de un tectonismo local, el material que constituye el basamento es de tipo granítico, por lo que en términos generales se considera impermeable, el espesor de los materiales de relleno es desconocido y existen posibilidades de flujo subterráneo fuera del área.

5.2 Parámetros hidráulicos

Actualmente no se han realizado pruebas de bombeo en los aprovechamientos de la región. Sin embargo, de acuerdo a estimaciones hidrogeológicas realizadas en 1975, con datos del uso, equipamiento y disponibilidad de los aprovechamientos y de los usuarios, se tienen valores de profundidad al nivel estático, profundidad al nivel dinámico, información de una prueba de bombeo, realizada en el Ejido San José de Las Palomas. Los parámetros hidráulicos de acuerdo a las características litológicas obtenidas de la prueba de bombeo y los parámetros estimados se presentan en la tabla 2.

Tabla 2. Parámetros hidráulicos

PBCESJP-1		
Nivel estático (ne)	8.96	m
Nivel dinámico (nd)	49.6	m
Gasto (Q)	0.9	lps
Abatimiento	40.64	m
Gasto específico (Qe)	2.2146×10^{-5}	lps/m
Transmisividad (T)	2.21×10^{-9}	m ² /s
Espesor (b)	5.4	m
Permeabilidad (k)	4.1×10^{-6}	m/s
(k)	0.4	m/día

5.3 Piezometría

No existe información piezométrica histórica. Para el análisis del comportamiento del acuífero únicamente se cuenta con la que se obtuvo del recorrido realizado en el mes de noviembre del 2008.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

La profundidad al nivel estático en la zona que cuenta con información piezométrica, no se alcanzó a medir debido a que la profundidad total de los aprovechamientos es menor a la profundidad estimada a que se encuentra el agua subterránea, la cual se extrapolo debido a la información de un pozo perforado en la carretera Santa Rosalía-Ensenada en el cual se encontró una profundidad al nivel estático a los 70 m aproximadamente.

En el área de explotación correspondiente al acuífero, la información piezométrica es reducida, limitándose a un aprovechamiento.

Por esta razón para obtener información confiable para la configuración de las líneas equipotenciales, se considera que la línea de costa en el área de explotación es la línea piezométrica que teóricamente es igual a 0 msnm. Adicionalmente, se considera que el área de explotación se constituye de materiales con cierta homogeneidad y sus propiedades hidráulicas se consideran isotrópicas. Con estas suposiciones se infiere que el gradiente hidráulico de la costa hacia niveles piezométricos superiores es uniforme generando una equipotenciales con tendencia paralela a la línea de costa. La profundidad al nivel del agua subterránea, dentro del área de explotación varía de los 71 m al sureste, hasta los 90 m en la porción norte (figura 4).

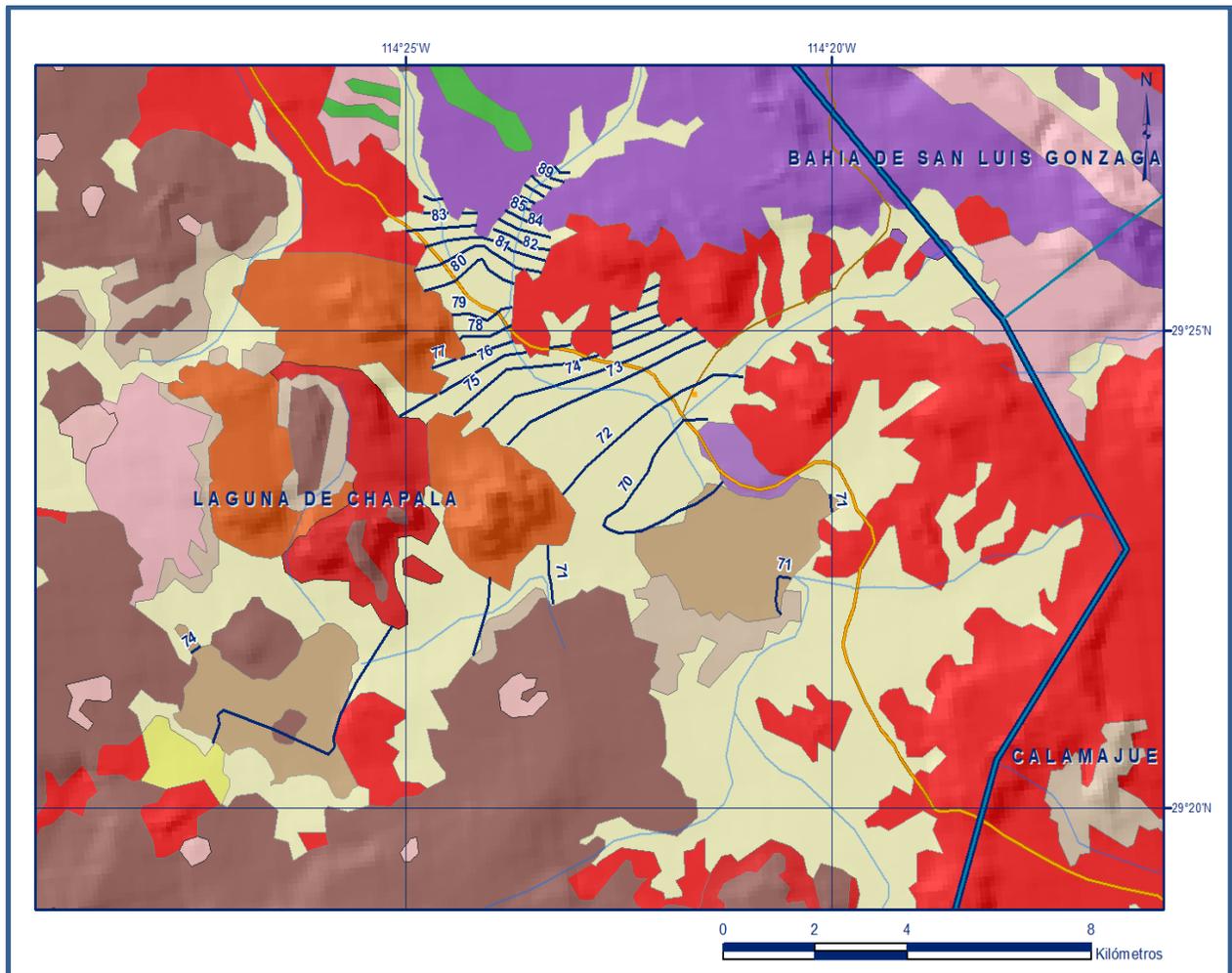


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2008)

5.4.2 Elevación del nivel estático

Con respecto a la elevación del nivel estático para el año 2008 (figura 5), se observan que los valores, muestran el reflejo de la topografía, evidenciando de esta manera que el flujo subterráneo en condiciones naturales no ha sufrido alteraciones importantes causadas por la concentración de pozos o del bombeo. Los valores de elevación varían de 580 a 600 msnm.

De esta manera, se establece que el flujo subterráneo muestra una dirección preferencial de norte a sureste de acuerdo al alineamiento de las fallas existentes.

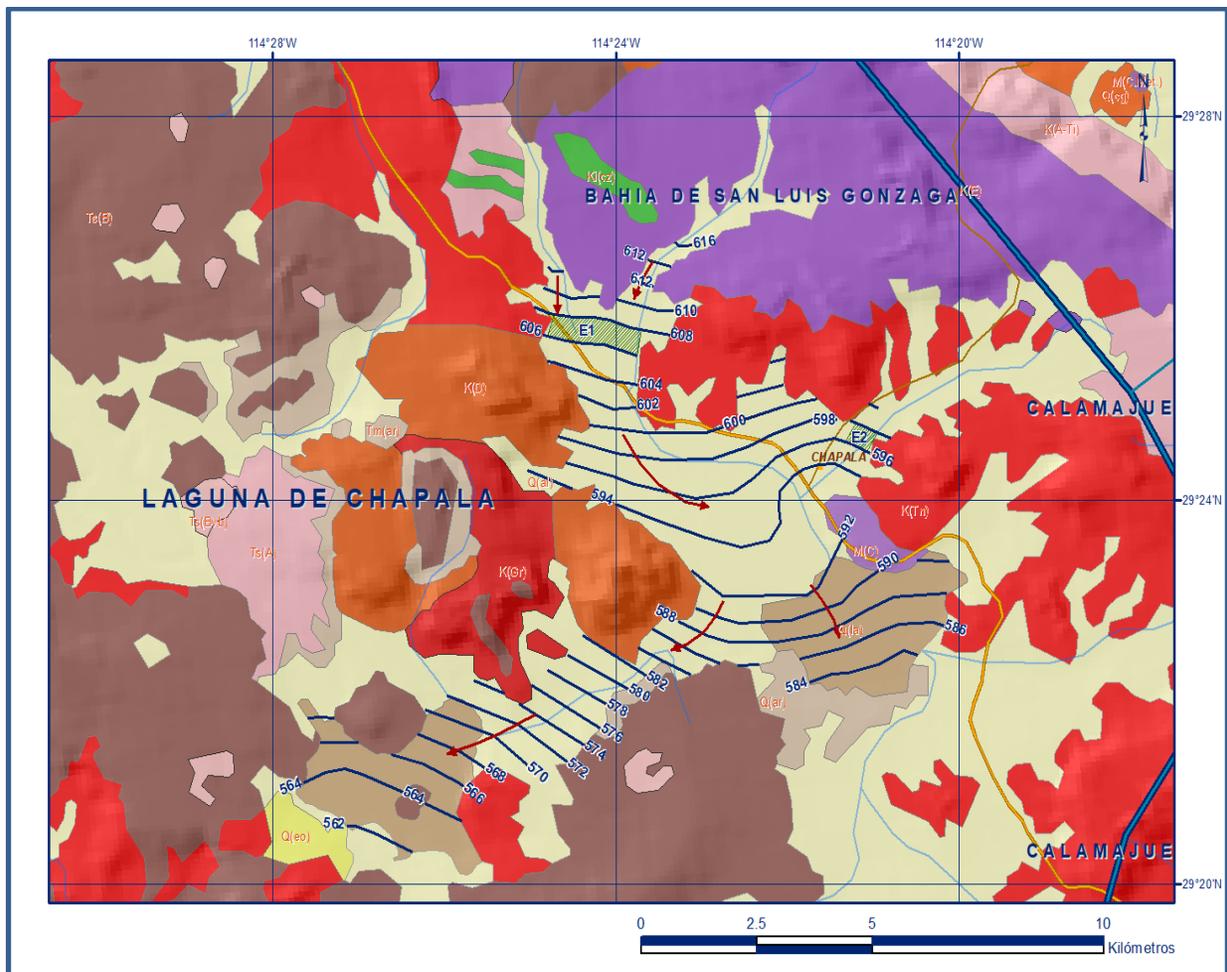


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2008)

5.4.3 Evolución del nivel estático

Con respecto a la evolución del nivel estático, no se cuenta con información piezométrica que permita elaborar una configuración.

Las escasas mediciones piezométricas recabadas no son suficientes y no cubren en su totalidad la extensión superficial del acuífero. Adicionalmente, aunque la configuración de la elevación del nivel estático está inferida, la incipiente extracción que se realiza no ha causado aún la alteración de las condiciones del estado inicial del régimen de flujo subterráneo.

El volumen de extracción es muy inferior al valor más conservador de la recarga que pudiera estimarse.

Por estas razones, se puede afirmar que las variaciones en el nivel del agua subterránea no han sufrido alteraciones importantes en el transcurso del tiempo, por lo que el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo.

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

De acuerdo con la información de los análisis fisicoquímicos de las muestras de agua, que se realizaron como parte de los trabajos de 1979, el agua de mejor calidad se localiza en las zonas de las lagunas temporales, Santa María y Las Palomas (Codornices), con sólidos disueltos totales de 341, 949 y 1684 ppm, cuyas clasificaciones son de C₂-S₁, C₃-S₁ y C₄-S₃, respectivamente, el resto de los aprovechamientos, tanto corrientes superficiales, aguajes y norias tuvieron un alto contenido de sólidos disueltos totales de 2020 como mínimo y 9443 ppm como máximo, con clasificación C₄-S₃ y generalmente como agua altamente salina.

Dentro del recorrido de campo realizado en el año 2008, no se pudo determinar la calidad del agua ya que no se encontró ningún sitio donde se pudiera tomar la muestra para analizarla, sin embargo debido a las características superficiales observadas en el área considerada como de explotación, se trata de una cuenca endorreica donde el agua subterránea es de mala calidad debido a la alta concentración de sales producto de la evaporación, concentración de sales y lavado de suelos ya que estos tienen características permeables muy pobres tratándose de material de grano fino a muy fino.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

En el área no existe un censo previo que reporte la cantidad de aprovechamientos ni el volumen de extracción para el acuífero, sin embargo, el REPDA, con fecha de corte

al 31 de marzo de 2009, manifiesta la existencia de 2 aprovechamientos, tomando en cuenta los datos respecto al volumen concesionado dentro del acuífero se obtuvo que el 46% del volumen es para uso pecuario y el 54% para uso doméstico, siendo este el de mayor consumo, y dando como resultado una extracción total de 0.006 hm³ de agua.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de agua subterránea involucra el registro de las entradas, salidas y el cambio en el almacenamiento, modificaciones que suceden en un volumen específico del acuífero en un determinado tiempo.

Las componentes que se requieren conocer en el área de balance para la definición de este en forma global incluyen; cambios en el almacenamiento, evapotranspiración, bombeo, caudal base, entradas y salidas por flujo subterráneo, descarga por manantiales, entre otras.

La diferencia entre la suma total de las entradas, y la suma total de las salidas, representa el volumen de agua perdido o ganado por el almacenamiento del acuífero, en el periodo de tiempo definido. La ecuación general de balance, de acuerdo a la ley de la conservación de masa se expresa como:

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

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:

$$\text{Recarga total – Descarga total = Cambio de almacenamiento}$$

En función de la disponibilidad de información se planteó el balance para el año 2008, ya que presenta mayor cobertura y confiabilidad en sus datos para cuantificar las componentes del balance para toda el área del acuífero. Cada componente del balance se cuantificó para un año, a partir de los valores medios. La incógnita seleccionada fue la recarga natural.

El agua del sistema acuífero tiene un movimiento general con sentido Norte-Sureste, y de esta manera se considera la presencia de salidas de agua por flujo subterráneo a través de fallas y fracturas. Con apoyo del monitoreo piezométrico y del análisis del mismo, se evidencia una entrada de agua al sistema a través de la porción Norte de la zona; además de la recarga por lluvia directa hacia el Valle. Por lo tanto, la ecuación de balance de agua subterránea para el acuífero Laguna de Chapala para el año 2008, se expresa de la siguiente manera:

$$\mathbf{Eh + Rv - (B + Sh + ETR) = \Delta V * Sy}$$

Donde:

Eh = Entradas horizontales por flujo subterráneo

Rv = Recarga vertical

B = Bombeo

Sh = Salidas horizontales por flujo subterráneo

ETR = Evapotranspiración

ΔV = Volumen drenado

Sy = Rendimiento específico

En base a las redes de flujo para el año 2008, el tipo de material sedimentario y espesores de este; se cuantificaron las componentes para el balance del sistema acuífero, delimitando así el área de balance, la cual comprende una superficie aproximada de 42.22 km².

7.1 Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual definido para el acuífero, las entradas están integradas por la recarga natural que se produce por efecto de la infiltración de la lluvia que se precipita en el valle, por las infiltraciones a lo largo del cauce y de la recarga por flujo horizontal subterráneo que se presenta a través de las zonas de pie de monte.

7.1.1 Recarga vertical (Rv)

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo, por lo que se seleccionó como incógnita en la ecuación de balance de agua subterránea. Por lo tanto su estimación se efectuó a partir de la ecuación de balance de la siguiente manera:

$$\mathbf{Rv = (\Delta V * Sy) + (B + Sh + ET) - Eh}$$

7.1.2 Recarga Inducida (Ri)

La recarga inducida se constituye principalmente por retorno de riego, infiltración de obras hidroagrícolas así como la infiltración de las redes de agua potable. En el área de balance, el volumen de agua subterránea explotado para uso agrícola es nulo, siendo que un 46% es para uso pecuario y el 54 restante para uso doméstico. Para el caso de infiltración de las redes de agua potable, también se consideran despreciables por el volumen destinado para este uso.

7.1.3 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

La estimación de esta componente se realizó utilizando la configuración de la elevación del nivel estático para el año 2008, en la cual se definieron las direcciones y celdas de flujo que junto con la transmisividad y el gradiente hidráulico, definieron los caudales que circulan en el acuífero (Tabla 3). Con base en la configuración se seleccionaron las celdas de flujo y se aplicó la ley de Darcy para calcular el caudal “Q” que recarga al acuífero. La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada una de las celdas establecidas.

$$Q = B * i * T$$

Donde:

B = Ancho (m) del canal de flujo

i = Gradiente hidráulico ($i = h_2 - h_1 / L$); h

L = Diferencia y distancia respectivamente entre las equipotenciales (h) que conforman el canal de flujo.

T = Transmisividad en el canal de flujo.

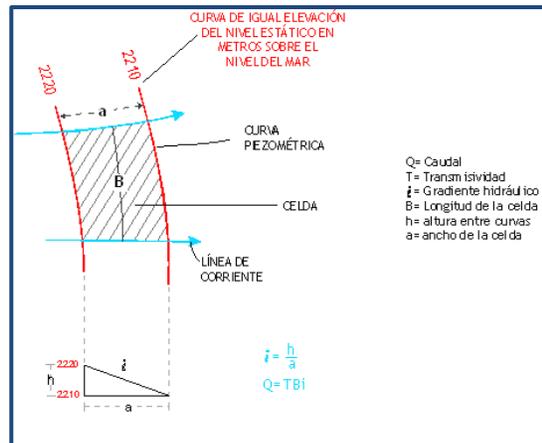


Tabla 4. Estimación del volumen de entradas horizontales por flujo subterráneo

Celda	T ($10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$)	B (10^3 m)	i	Q (m^3/s)	Vol. anual (hm^3)
ENTRADAS LATERALES					
E ₁	3.472	1.684	0.00441	0.0258	0.812
E ₂	2.778	0.418	0.00504	0.0058	0.184

El cálculo de volumen total por flujo subterráneo horizontal (Eh) para el año 2008 es de **0.997 \approx 1.0 hm^3** .

7.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente por bombeo (B), las salidas horizontales subterráneas hacia el mar (Sh) y la evapotranspiración (ETR). No existen manantiales ni descarga de flujo base a lo largo del arroyo.

7.2.1 Evapotranspiración (ETR)

La evapotranspiración se representa por la descarga de un acuífero a la atmósfera y tiene lugar por evaporación directa del agua freática somera o bien por la transpiración de la flora, que en esta zona no es significativa por el tipo de vegetación que existe.

Debido a la baja precipitación que se presenta en el área, se invalidaron los métodos empíricos para el cálculo de la evapotranspiración (Turc y Smith), ya que éstos son aplicables en regiones con valores mayores a los 300 mm, considerando además, que en el área considerada como de explotación no existe la presencia de niveles freáticos someros. Por lo tanto el valor de evapotranspiración tiende a ser **nulo**.

7.2.2 Bombeo (B)

De acuerdo con el recorrido de campo realizado en 2008 en el área de explotación, se determinó que no se encuentran aprovechamientos operando, por lo que para el año de balance se determinó una extracción por bombeo de acuerdo al REPDA de **0.006 $\text{hm}^3/\text{año}$** .

7.2.3 Salidas horizontales por flujo subterráneo (Sh)

Para calcular el volumen que se descarga naturalmente del área de balance por flujo subterráneo, se consideraron los parámetros hidráulicos del mismo y las configuraciones; el acuífero Laguna de Chapala es un acuífero costero, por lo que existe una zona a partir de la cual el espesor del acuífero va disminuyendo debido a la presencia de la zona de interfase agua marina-agua continental (tabla 5).

Tabla 5. Estimación del volumen de salida por flujo subterráneo

Celda	T ($10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$)	B (10^3 m)	i	Q (m^3/s)	Vol. anual (hm^3)
SALIDAS LATERALES					
S ₁	4.861	1.900	0.0040	0.0374	1.179
S ₂	2.083	0.185	0.0036	0.0014	0.044

El cálculo de volumen total por flujo subterráneo horizontal (Sh) para el año 2008 es de **1.223 \approx 1.2 hm^3** .

7.3 Cambio de almacenamiento (ΔV_S)

El cambio de almacenamiento se estima a partir de las evoluciones de los niveles estáticos como un mínimo se deben considerar dos periodos en este caso debido a que se carece de información en cuanto a datos piezométricos se considera un valor de cero para este componente.

Solución a la ecuación de balance

Una vez calculadas las componentes de la ecuación del balance, procedemos a evaluar la recarga vertical por lluvia e infiltraciones, mediante la expresión:

$$R_v = (\Delta V * S_y) + (B + Sh + ETR) - E_h$$

$$R_v = (0.0) + (0.006 + 1.2 + 0.0) - 1.0$$

$$R = 0.2 \text{ hm}^3/\text{año}$$

De esta manera, la recarga total media anual estará definida por la suma de la recarga vertical, y las entradas horizontales subterráneas.

$$R = R_v + E_h$$

$$R = 0.2 + 1.0$$

$$R = 1.2 \text{ hm}^3/\text{año}$$

8. DISPONIBILIDAD

Para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas, se aplica el procedimiento de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, Conservación del recurso agua-que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales; en su fracción relativa a las aguas subterráneas, menciona que la disponibilidad se determina por medio de la expresión siguiente:

$$\begin{array}{ccccccc} \text{DISPONIBILIDAD MEDIA} & = & \text{RECARGA} & - & \text{DESCARGA} & - & \text{EXTRACCIÓN DE} \\ \text{ANUAL DE AGUA DEL} & & \text{TOTAL} & & \text{NATURAL} & & \text{AGUAS} \\ \text{SUBSUELO EN UN} & & \text{MEDIA} & & \text{COMPROMETIDA} & & \text{SUBTERRÁNEAS} \\ \text{ACUÍFERO} & & \text{ANUAL} & & & & \end{array}$$

Donde:

DMA = Disponibilidad media anual de agua del subsuelo en un acuífero

R = Recarga total media anual

DNC = Descarga natural comprometida

VEAS = Volumen de extracción de aguas subterráneas

8.1 Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero. Para este caso, su valor es de **1.2 hm³/año**, todos ellos son de recarga natural

8.2 Descarga natural comprometida (DNC)

La descarga natural comprometida se determina sumando los volúmenes de agua concesionados de los manantiales y del caudal base de los ríos que está comprometido como agua superficial, alimentados por el acuífero, más las descargas que se deben conservar para no afectar a los acuíferos adyacentes; sostener el gasto ecológico y prevenir la migración de agua de mala calidad hacia el acuífero.

En este sentido la descarga natural comprometida se considera como un porcentaje de las salidas por flujo subterráneo horizontal el cual se estimó en un 50% con un volumen de **0.6 hm³/año**, el porcentaje se considera porque la zona no presenta un entorno ecológico el cual requiera de este recurso para sostenerse o bien mantenerse en equilibrio, además de que el acuífero se encuentra afectado naturalmente por intrusión marina, por lo que se propone controlar el bombeo dentro de la zona cercana

a la costa manteniendo los niveles de agua dulce por arriba del nivel del mar, para de cierta forma no incrementar la entrada de agua de mar hacia el área de explotación. Por lo tanto se considera que el volumen por descarga natural comprometida es de **DNC = 0.6 hm³/anuales**.

8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)

La extracción de aguas subterráneas se determina sumando los volúmenes anuales de agua asignados o concesionados por la Comisión mediante títulos inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA), los volúmenes de agua que se encuentren en proceso de registro y titulación y, en su caso, los volúmenes de agua correspondientes a reservas, reglamentos y programación hídrica, todos ellos referidos a una fecha de corte específica. En el caso de los acuíferos en zonas de libre alumbramiento, la extracción de aguas subterráneas será equivalente a la suma de los volúmenes de agua estimados con base en los estudios técnicos, que sean efectivamente extraídos aunque no hayan sido titulados ni registrados, y en su caso, los volúmenes de agua concesionados de la parte vedada del mismo acuífero. Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de **15,002 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022**.

8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)

La disponibilidad de aguas subterráneas, constituye el volumen medio anual de agua subterránea disponible en un acuífero, al que tendrán derecho de explotar, usar o aprovechar los usuarios, adicional a la extracción ya concesionada y a la descarga natural comprometida, sin poner en peligro a los ecosistemas. Conforme a la metodología indicada en la norma referida anteriormente, se obtiene de restar al volumen de recarga total media anual, el valor de la descarga natural comprometida y el volumen de extracción de aguas subterráneas.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 1.2 - 0.6 - 0.015002 \\ \text{DMA} &= 0.584998 \text{ hm}^3/\text{año.} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **584,998 m³ anuales**.

9. BIBLIOGRAFÍA