



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO CIHUATLÁN (1433), ESTADO DE
JALISCO**

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	5
3. FISIOGRAFÍA.....	5
3.1 Provincia Fisiográfica	5
3.2 Clima.....	6
3.3 Hidrografía.....	7
3.4 Geomorfología.....	7
4 GEOLOGÍA.....	8
4.1 Estratigrafía.....	9
4.2 Geología estructural	11
4.3 Geología del subsuelo	12
5 HIDROGEOLOGÍA.....	12
5.1 Tipo de acuífero	12
5.2 Parámetros hidráulicos.....	13
5.3 Piezometría	13
5.4 Comportamiento hidráulico.....	13
5.4.1 Profundidad al nivel estático	13
5.4.2 Elevación del nivel estático.....	14
5.4.3 Evolución del nivel estático	15
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	16
6 CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	16
7 BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	17
7.1 Entradas	17
7.1.1 Recarga vertical (Rv).....	18
7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	18
7.1.3 Recarga inducida (Ri)	19
7.2 Salidas.....	20
7.2.1 Extracción por bombeo (B).....	20
7.2.2 Descarga de manantiales (Dm)	20
7.2.3 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)	20
7.2.4 Evapotranspiración (ETR).....	21
7.3 Cambio de almacenamiento (ΔVS).....	22
8 DISPONIBILIDAD	23
8.1 Recarga total media anual (R).....	23
8.2 Descarga natural comprometida (DNC).....	24
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)	24
8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)	24
9 BIBLIOGRAFÍA	26

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 Cihuatlán, definido con la clave 1433 en el Sistema de Información Geográfica para el Manejo del Agua Subterránea de la CONAGUA, se localiza en la porción suroccidental del estado de Jalisco, entre los paralelos 19°10' y 19°25' de latitud norte y los meridianos 104°28' y 104°45' de longitud oeste, abarcando una superficie aproximada de 461 km². Limita al norte con el acuífero La Huerta, al este y noreste con el acuífero Cuautitlán, al oeste y noroeste con el acuífero Miguel Hidalgo, todos ellos pertenecientes al estado de Jalisco, al sureste con el acuífero Marabasco, perteneciente al estado de Colima y finalmente al sur con el Océano Pacífico (figura 1).



Figura 1. Localización del acuífero

Geopolíticamente la mayor parte de la superficie del acuífero se localiza dentro del municipio Cihuatlán, pequeñas áreas de su extremo norte pertenecen a los municipios La Huerta y Cuautitlán de García Barragán. La poligonal simplificada que delimita el acuífero se encuentra definida por los vértices cuyas coordenadas se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada del acuífero

ACUIFERO 1433 CIHUATLAN							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	104	35	21.3	19	24	36.1	
2	104	35	27.9	19	23	43.0	
3	104	33	1.9	19	22	49.9	
4	104	28	3.1	19	22	3.4	
5	104	28	56.2	19	20	17.2	
6	104	32	22.0	19	18	57.5	
7	104	33	1.9	19	17	11.3	
8	104	33	15.1	19	16	11.6	
9	104	30	35.8	19	15	58.3	
10	104	29	9.5	19	15	25.1	
11	104	28	19.5	19	14	39.2	
12	104	27	57.7	19	14	26.9	DEL 12 AL 13 POR EL LIMITE ESTATAL
13	104	41	29.5	19	10	24.2	DEL 13 AL 14 POR LA LINEA DE BAJAMAR A LO LARGO DE LA COSTA
14	104	42	27.4	19	13	20.1	
15	104	42	59.3	19	13	45.5	
16	104	43	6.0	19	15	58.3	
17	104	44	12.4	19	19	57.3	
18	104	43	19.3	19	22	23.3	
19	104	40	39.9	19	22	49.9	
20	104	37	54.0	19	23	23.1	
21	104	36	54.2	19	24	56.0	
1	104	35	21.3	19	24	36.1	

1.2. Situación Administrativa del acuífero

El acuífero Cihuatlán pertenece al Organismo de Cuenca Lerma-Santiago-Pacífico Su territorio completo se encuentra vedado y sujeto a las disposiciones de dos decretos de veda. El primero de ellos rige en la mayor parte de su superficie y es el “Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos y se establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento, extracción y aprovechamiento de las aguas del subsuelo en la parte que corresponde a los Municipios de Tomatlán, La Huerta, Cihuatlán y Tonalá, Jal.”, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 21 septiembre de 1984. Esta veda es tipo II, en la que la capacidad de los mantos acuíferos sólo permite extracciones para usos domésticos.

El segundo está vigente en el extremo norte del acuífero y es el “Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos en zonas no vedadas en diversos Municipios del Estado de Jalisco y se establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento, extracción y aprovechamiento de las aguas del subsuelo en todos los Municipios del Estado de Jalisco”, publicado en el DOF el 07 de diciembre de 1987.

Esta veda es tipo III, en la que la capacidad de los mantos acuíferos permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros. De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 2. El uso principal del agua subterránea es el agrícola. El uso principal del agua es el agrícola. En el territorio que cubre el acuífero se localiza la unidad de riego “Cihuatlán”. No se ha constituido hasta la fecha Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la superficie que comprende el acuífero se han realizado algunos estudios hidrogeológicos, algunos de cobertura regional. El único estudio que abarcó la superficie completa del acuífero es el que se describe a continuación:

ESTUDIO PARA DETERMINAR LA DISPONIBILIDAD DE LOS ACUÍFEROS, VALLE DE GUADALUPE, PRIMO VERDAD, LA HUERTA, MIGUEL HIDALGO, CIHUATLÁN, 20 DE NOVIEMBRE, CUQUÍO, COLOTLÁN, TECOLOTLÁN, TOMATLÁN, TEQUILA Y LA BARCA, EN EL ESTADO DE JALISCO. Elaborado por la Universidad Nacional Autónoma de México para la Comisión Nacional del Agua en 2010. El objetivo general de este estudio fue determinar las condiciones geohidrológicas de los acuíferos mediante el análisis de la evolución de los niveles del agua; obtener información necesaria para calcular su recarga y evaluar la disponibilidad media anual de agua subterránea; así como conocer el número y distribución de las captaciones de agua subterránea existentes en la zona.

Mediante la realización de actividades de campo, que incluyeron censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría de las extracciones, de pruebas de bombeo sondeos geofísicos y reconocimientos geológicos; fue posible plantear el balance de aguas subterráneas. Este estudio fue 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

De acuerdo a la clasificación fisiográfica del INEGI, el área que cubre el acuífero Cihuatlán se encuentra ubicado dentro del sector occidental de la Provincia Fisiográfica Sierra Madre del Sur, subprovincia Sierras de la Costa de Jalisco y Colima.

Está situado en una zona de traslape de tres grandes provincias fisiográficas que le confieren fuertes contrastes topográficos y un ambiente tectónico complejo: el contacto entre la Sierra Madre Occidental y el Eje Neovolcánico; entre la Sierra Madre Occidental y la Sierra Madre del Sur, y entre la Sierra Madre del Sur y el Eje Neovolcánico. Estas zonas particulares definen la diversa litología, geología y morfología del territorio jalisciense.

La Provincia Sierra Madre del Sur inicia en la frontera entre los estados de Jalisco y Nayarit hasta el estado de Oaxaca cubriendo un área de 258,274 km², aunque dentro del territorio jalisciense su extensión es aproximadamente de 246 km de longitud.

Limita al norte con la Faja Volcánica Transmexicana; al sur, con el Océano Pacífico y al oriente, con las provincias de Sierras y Valles del Sureste y la parte sur de la Planicie Costera del Golfo (Velázquez y Ordaz, 1992). Su zona más prominente es muy angosta, formando un espinazo montañoso marginal hacia la costa.

3.2 Clima

De acuerdo con la clasificación de Köppen modificada por Enriqueta García en 1964, para las condiciones de la República Mexicana, los climas predominantes para el acuífero Cihuatlán son de tipo cálido subhúmedo con lluvias en verano. La climatología es homogénea, sus variaciones anuales varían del clima predominantemente semiseco con invierno y primavera secos, al cálido, sin estación invernal bien definida. Sobre su frontera norte se encuentra una franja estrecha, correspondiente al clima A(w2).

Hacia el sur y hasta la mitad de la cuenca predomina la clasificación A(w0), en tanto que, en el extremo sur, sobre la costa del Pacífico el clima pertenece a la clasificación A(w1). Las tres categorías corresponden al clima tipo cálido subhúmedo con lluvias en verano. Este grupo es el más cálido de los que se distribuyen en la entidad, que dominan en la cuarta parte de su territorio.

Para la determinación de las variables climatológicas se cuenta con información de las estaciones climatológicas que tienen influencia en el área del acuífero. Con estos datos y utilizando el método de los Polígonos de Thiessen, se determinaron valores de precipitación y temperatura media anual de **1,107 mm** y **25.3 °C** respectivamente. De igual manera, con respecto a la evaporación potencial, se obtuvo un valor de **2,055.5 mm anuales**.

El régimen pluvial presenta, en términos generales, dos períodos de ocurrencia, uno en verano de junio a agosto, cuando se registran los valores más altos, y otro de lluvias que abarca de febrero a abril, con precipitaciones menos significativas.

En cuanto a la distribución mensual de la temperatura media, mayo es el mes más cálido, en tanto que el mes de enero registra la menor temperatura media.

3.3 Hidrografía

El acuífero Cihuatlán se encuentra ubicado en la Región Hidrológica 15 “Costa de Jalisco”, sobre la cuenca del Río Chacala-Purificación, la cual cuenta entre sus principales recursos hidrológicos, a los ríos: Marabasco (también conocido como Chacala o Cihuatlán y oficialmente río Minatitlán), Purificación, San Nicolás y Cuitzmala.

La corriente principal es el río Marabasco, perteneciente a la subcuenca Marabasco–Minatitlán, que representa el límite entre los estados de Jalisco y Colima. Se localiza en el ejido El Centinela, a 46 km al noroeste de Manzanillo. Se origina en la reserva de la biosfera “Sierra de Manantlán”, con una dirección sur-suroeste y desemboca en la laguna Puerto Navidad. Entre los afluentes principales están los arroyos Chanequehahuil, Las Compuertas y el río Cuzalapa. El río Marabasco o Minatitlán, en su paso por el municipio Cihuatlán, recibe las aguas residuales de actividades industriales del Consorcio Minero Benito Juárez-Peña Colorada y de la laguna de jales. No existen obras hidráulicas importantes dentro de la cuenca, sólo la presa “Las Parotas”, que deriva 30 hm³ a la unidad de riego Cihuatlán. El agua superficial se destina preferentemente para el uso agrícola y en menor escala al uso doméstico y pecuario.

3.4 Geomorfología

El relieve montañoso de la Sierra Madre del Sur muestra varias etapas de deformación, siendo más evidente la intrusión de cuerpos graníticos en las rocas metasedimentarias (Ferrari et al., 1997), sedimentarias, ígneas preexistentes y secuencias vulcanosedimentarias.

Las rocas sedimentarias constituyen sierras plegadas y bloques colgados, mientras que el relieve de las rocas vulcanosedimentarias e ígneas es de sierras complejas con pendientes escarpadas.

Para los cuerpos intrusivos, el relieve es abrupto en zonas poco erosionadas y se exhiben como cerros de topografía suave en zonas erosionadas, llegando a presentar un intemperismo esferoidal. La región se encuentra en una etapa de madurez avanzada dentro del ciclo geomorfológico (INEGI, 2001).

Los accidentes topográficos son abruptos, especialmente en el extremo norte del acuífero donde las elevaciones oscilan entre 400 y 800 msnm. La diferencia en la altitud respecto de la zona costera es aproximadamente de 400 m. La elevación más prominente es el cerro de Santa María, con una altitud aproximada de 700 msnm, además de otras elevaciones menores como el cerro Las Mulas y el cerro Prieto.

4 GEOLOGÍA

La geología superficial muestra una presencia predominantemente granítica en la porción central y oriental del acuífero, que hacia el extremo norte están cubiertas por rocas ígneas extrusivas ácidas y a su vez cubren calizas. Hacia la porción suroccidental se encuentra bien definida una gran extensión compuesta de materiales aluviales, sobre los que se interpone una franja granítica que los atraviesa en dirección de la bahía de Barra de Navidad (figura 2).

La geología regional está representada por secuencias vulcanosedimentarias, metamórficas, sedimentarias e ígneas, ubicadas en un rango cronoestratigráfico comprendido entre el Mesozoico y el Cenozoico (INEGI, 2001).

El desarrollo de un arco volcánico insular en el Cretácico Temprano originó en la región costera un mar marginal provocando la formación rocosa híbrida que asocia calizas, derrames andesíticos, depósitos vulcanoclásticos y tobas de grandes espesores.

En esta misma época, la línea costera sufrió desplazamientos debido a fluctuaciones en el basamento regional, depositándose calizas de plataforma, especialmente en dirección del municipio de La Huerta.

La Sierra Madre del Sur constituye una gran estructura morfológica formada por un conjunto de bloques montañosos de diferente composición litológica, discontinuos y valles de diferentes dimensiones, con un basamento de rocas metamórficas que fueron desplazadas durante el Jurásico, así como de rocas volcánicas y vulcanoclásticas del Cretácico Temprano y del Neógeno.

En particular, sobre la cuenca de Cihuatlán inciden las dos subregiones geomorfológicas de la Sierra Madre del Sur: la Planicie Costera y las Sierras Transversales.

La primera es una franja de 25 km de ancho compuesta principalmente de aluvión cuaternario limoso, la segunda está constituida por una serie de cadenas montañosas y valles compuestos de calizas y dolomías del Cretácico, con abundante desarrollo de carsticidad, con un espesor aproximado de 2,800 m, así como mesetas y valles altos de rocas sedimentarias continentales del Neógeno, aluvión del Holoceno y depósitos de sedimentos piroclásticos del Cuaternario.

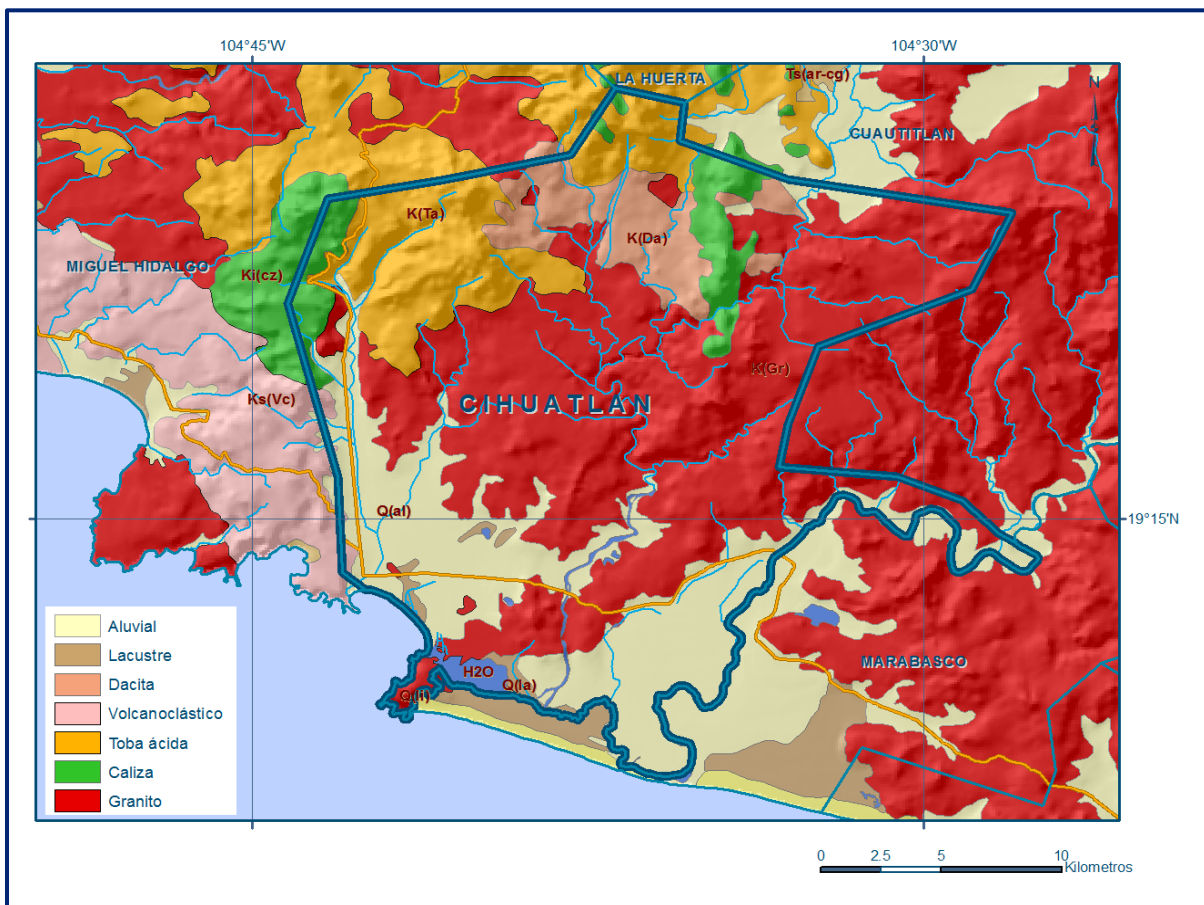


Figura 2. Geología general del acuífero

4.1 Estratigrafía

La secuencia estratigráfica que aflora en esta región está constituida por sedimentos cuya edad varía del Jurásico al Reciente. A continuación, se describen las distintas unidades litológicas, de la más antigua a la más reciente.

En el área afloran elementos del Terreno Guerrero (Campa y Coney, 1983), éstos son el subterreno Zihuatanejo y una cuenca trasarco que posiblemente corresponda el subterreno Huetamo (Carta Geológica-Minera "Manzanillo" E13-2-5, Escala: 1:250,000, SGM, 2000). La unidad más antigua corresponde a cuarcitas y metasedimentos que, aunque sus límites son tectónicos tanto con rocas cretácicas y cenozoicas, en la carta Colima subyacen a la Formación Alberca (Berriasiano-Hauteriviano), lo que permite ubicarla como Jurásico Superior (?). Existen afloramientos de un paquete de rocas andesíticas de textura afanítica, tobas y brechas, que pueden corresponder al macizo volcánico del arco de Zihuatanejo al cual se le asigna edad de Aptiano-Albiano.

También se presenta una unidad constituida por brecha andesítica compuesta por fragmentos subangulosos a subredondeados de andesita, cementados por una matriz areno-arcillosa; aunque su edad aún no es precisa, por su composición se puede inferir que es derivada del macizo volcánico, por lo que se le asigna tentativamente una edad Aptiano. Esta unidad es conocida como Brecha Jalisco. Como cubierta de este macizo se tienen tres unidades que la Formación Tepalcatepec constituida por una secuencia vulcanosedimentaria de areniscas, tobas andesíticas, conglomerados, lutitas y lodolitas calcáreas y lentes de caliza, cuya edad determinada por fósiles es de Aptiano-Cenomaniano: Su cambio de facies lateral está representado por la Formación Madrid, constituida por calizas y lutitas de edad Aptiano Superior-Albiano.

Cubriendo indistintamente a estas unidades se tiene un paquete constituido por yesos en la base y calizas de plataforma hacia la cima de edad Albiano-Cenomaniano. También se ha relacionado como cubierta del arco a la Formación Cerro de La Vieja constituida por un conglomerado con fragmentos subangulosos a semiredondeados de caliza y andesita, en una matriz areno-arcillosa, cuya edad asignada corresponde al Turoniano-Coniaciano, debido a que localmente se observa en concordancia estructural con las rocas subyacentes.

Correspondiente al Campaniano-Paleoceno se tiene una secuencia volcánica constituida por tobas de composición riolítica (KsTpaTR), que han sido datadas en la carta Puerto Vallarta y se han obtenido edades isotópicas que fluctúan entre 65 a 80 Ma. Las secuencias volcánicas de la Sierra Madre Occidental están representadas por andesitas y tobas andesíticas de edad Eoceno (TeoA) y por tobas riolíticas (TomTR), domos riolíticos (TomR) y tobas riolíticas y riolitas (TomTR-R) de edad Oligoceno-Mioceno.

Representando al Cinturón Volcánico Transmexicano existen rocas basálticas de edad Plioceno (TplB). Las unidades más recientes están constituidas por un conglomerado polimíctico y areniscas del Pleistoceno (QptCgp-Ar) y por aluviones, suelos residuales, palustres, lacustres y arenas finas de playa del Holoceno (Qal).

Se determinaron tres fases de intrusión, la primera corresponde al emplazamiento de rocas granítico-granodioríticas con diferenciación hasta tonalitas que conforma el Batolito de Tomatlán, con edades isotópicas entre 73 a 99 Ma para los granitos y de 93 +/- 78 Ma para las tonalitas que la ubican en el Cretácico Superior y que afectan claramente a las unidades volcánicas y vulcanosedimentarias que conforman el Arco Zihuatanejo (?), una intrusión diorítica-tonalítica con edades entre 54.9+/-2 a 66.9+8 Ma que la ubican en el Paleoceno y un último evento de composición monzonítica de posible edad Oligoceno.

4.2 Geología estructural

Dentro de la provincia de la Sierra Madre del Sur, las secuencias metamórficas del Jurásico, vulcanosedimentarias y sedimentarias del Cretácico fueron comprimidas por efecto de cuerpos graníticos, que las plegaron, fracturaron, afallaron, metamorfosearon y mineralizaron; dichos eventos se han relacionado a la subducción y fusión parcial asociados a uno o más límites convergentes de placas (Morán, 1984). Los cuerpos intrusivos provocaron en las rocas sedimentarias calcáreas, al igual que en las secuencias vulcanosedimentarias y metamórficas, la formación de bloques colgados de diversas dimensiones. De este modo, dichos cuerpos intrusivos se han denominado conjunto batolítico de Jalisco, cuyo ambiente geotectónico es de raíz de arco (Ortega, 1992); tiene una migración temporal del Cretácico al Terciario Inferior; y espacial de la región costera a las zonas internas continentales; los del Terciario Inferior se muestran en el noreste y centro del estado en forma de troncos y diques.

La deformación frágil está representada por un sistema de fallas laterales sinestrales y dextrales la mayoría de las cuales han sido reactivadas como normales conservando aún una componente lateral, ocasionalmente llegan a formar pilares y fosas con los grabens de Autlán-El Grullo y el de Minatitlán, este sistema se presenta en dos direcciones siendo el más conspicuo el NW 40°-60 SE y el secundario NE 30°-60° SW, también se observan, aunque con menor incidencia y de menor extensión, estructuras con orientación E-W y N-S que afectan indistintamente a rocas intrusivas como a las rocas vulcanosedimentarias.

La deformación compresiva está representada por pliegues anticlinales y sinclinales que sólo son observables en las rocas vulcanosedimentarias de la cubierta cretácica (anticlinal Amacuatitlán y anticlinal Toxin); en las rocas del macizo volcánico no es muy clara esta deformación.

4.3 Geología del subsuelo

De acuerdo con la información geológica y geofísica recaba en el acuífero y por correlación con acuíferos vecinos, es posible definir que el acuífero se encuentra alojado, en su porción superior, en los sedimentos fluviales que constituyen el lecho y la llanura de inundación de los ríos Marabasco, Purificación, San Nicolás y otros arroyos tributarios, así como en la unidad de areniscas y conglomerados. Esta es la unidad que se explota actualmente para satisfacer las necesidades de agua de la región.

Los depósitos granulares y conglomeráticos tienen varios cientos de metros de espesor y fueron, en gran parte, el relleno de depresiones o cuencas formadas en fosas tectónicas que se produjeron durante la revolución Laramídica.

La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas volcánicas (principalmente andesitas y tobas), brechas, rocas vulcanosedimentarias, así como calizas y rocas graníticas que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento y alteración. Este es un acuífero que aún no sido explorado.

Las fronteras al flujo subterráneo y el basamento geohidrológico del acuífero están representadas por las mismas rocas volcánicas y graníticas cuando a profundidad desaparece el fracturamiento y la alteración.

5 HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

Las evidencias geológicas, geofísicas e hidrogeológicas permiten definir la presencia de un acuífero **tipo libre**, heterogéneo y anisótropo, tanto en sentido horizontal como vertical, constituido por sedimentos aluviales, fluviales y eólicos depositados tanto en los subálveos de las corrientes fluviales como en la planicie costera. Está constituido en su porción superior por sedimentos aluviales de granulometría variada, areniscas y conglomerados, cuyo espesor puede alcanzar varios cientos de metros en el centro de los valles. La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas ígneas entre las que destacan andesitas, tobas, brechas, rocas vulcanosedimentarias, rocas carbonatadas y graníticas, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento.

5.2 Parámetros hidráulicos

Como parte de las actividades del estudio realizado en 2010, se llevaron a cabo 5 pruebas de bombeo de corta duración, en etapa de abatimiento y recuperación. Para su análisis e interpretación se utilizaron los métodos de Theis y Jacob-Cooper.

De los resultados de su interpretación, se establece que los valores de transmisividad varían de **5.2 a 24.0 x 10⁻³ m²/s**, con un promedio de **14.6 x 10⁻³ m²/s**, en las zonas compuestas de una combinación de sedimentos aluviales y formaciones fracturadas de rocas ígneas, y de **0.25 a 4.75 x 10⁻³ m²/s**, con un promedio de **2.5 x 10⁻³ m²/s**, en los depósitos de sedimentos aluviales en la costa.

Ninguna de las pruebas de bombeo contó con pozo de observación, por lo que no fue posible obtener valores del coeficiente de almacenamiento.

5.3 Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, únicamente se cuenta con la información recabada de las actividades del estudio realizado en 2010.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

De acuerdo con la configuración de profundidad al nivel estático para el año 2010, mostrada en la figura 3, la profundidad al nivel estático varía de 4 a 12 m, aumentado gradualmente, por efecto de la topografía, de la zona costera hacia el noreste, conforme se asciende topográficamente a lo largo del cauce de los ríos.

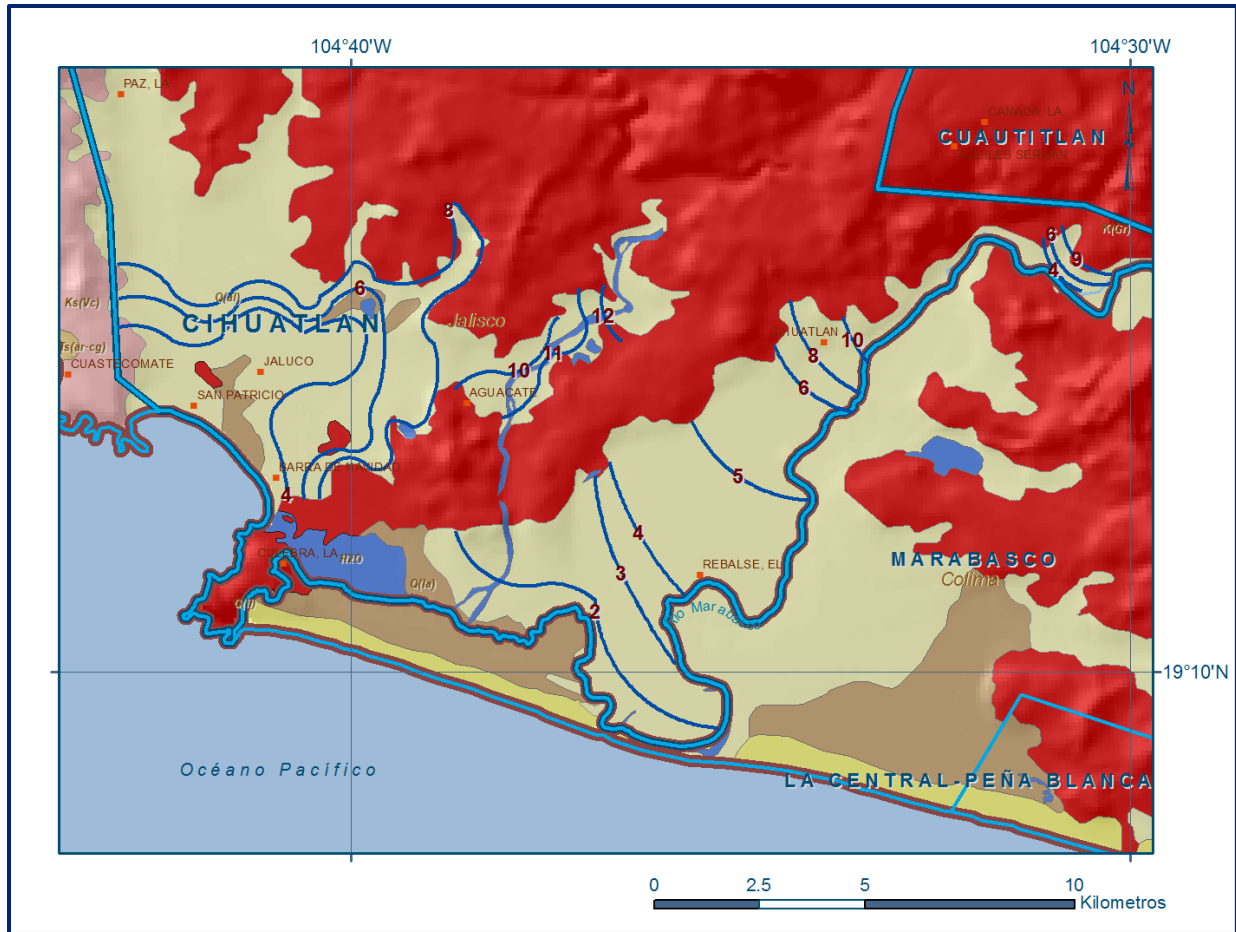


Figura 3. Profundidad al nivel estático en m (2010)

5.4.2 Elevación del nivel estático

De acuerdo con la configuración de elevación del nivel estático para el año 2010, que se muestra en la figura 4, se observa que la dirección preferencial del flujo subterráneo es noreste-suroeste, con valores que varían de 30 msnm, hacia las estribaciones de las sierras, a 2 msnm en las zonas cercanas a la costa.

De esta manera la configuración muestra el reflejo de la topografía, al igual que los valores de profundidad, lo que indica que el flujo subterráneo no ha sufrido alteraciones causadas por la concentración de pozos o del bombeo.

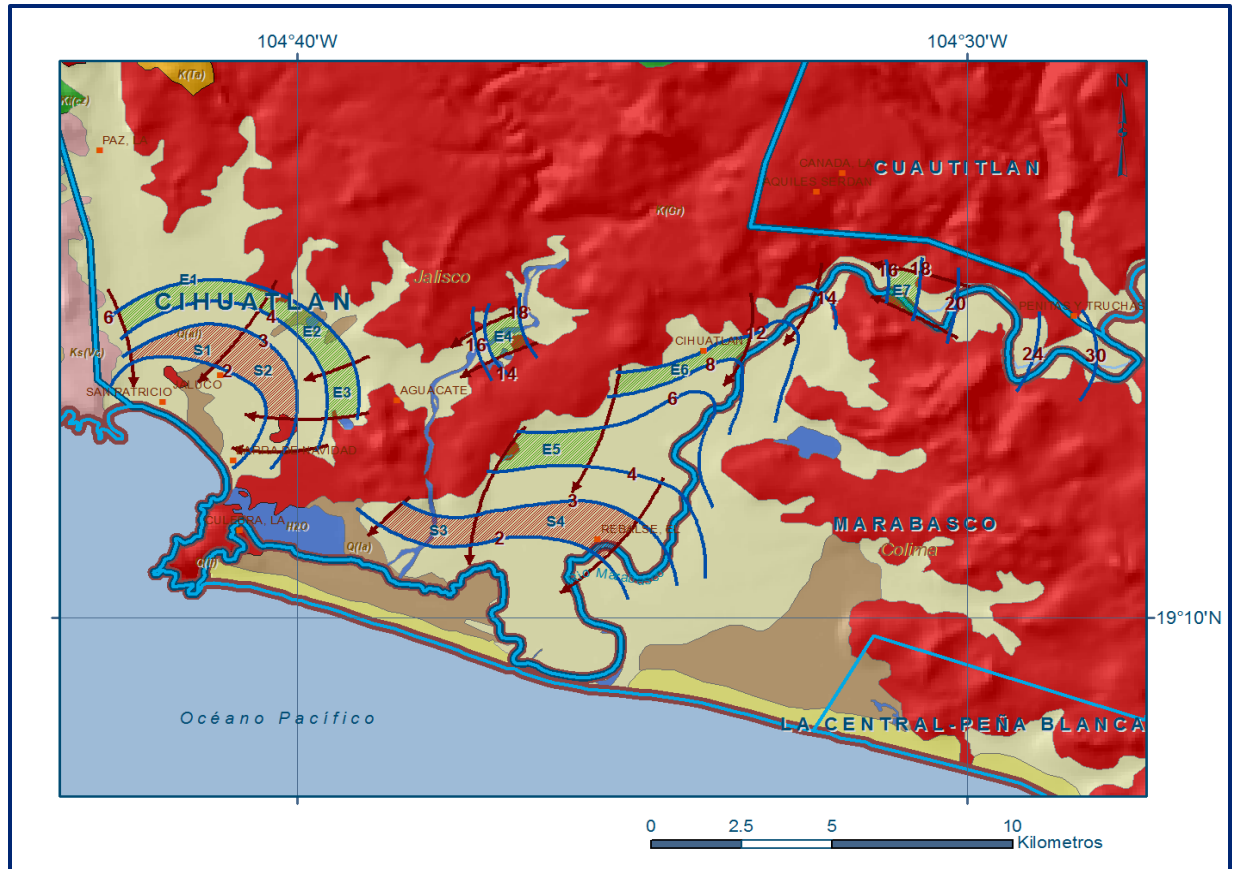


Figura 4. Elevación del nivel estático en msnm (2010)

5.4.3 Evolución del nivel estático

Con respecto a la evolución del nivel estático, no se cuenta con información piezométrica histórica que permita su configuración. Las escasas mediciones piezométricas recabadas en los recorridos de campo se encuentran dispersas en tiempo y espacio y no cubren en su totalidad la extensión superficial del acuífero.

Además, la configuración de la elevación del nivel estático no demuestra alteraciones del flujo natural del agua subterránea que indiquen la presencia de conos de abatimiento causados por la concentración de pozos.

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.

Las mediciones realizadas en el año 2010 serán el punto de partida para el establecimiento del monitoreo de los niveles del agua subterránea.

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en el año 2010, se tomaron 10 muestras de agua subterránea en aprovechamientos distribuidos en la zona de explotación, para su análisis fisicoquímico correspondiente.

Las determinaciones incluyeron parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos, iones mayoritarios, temperatura, conductividad eléctrica, pH, Eh, nitratos, dureza total, sólidos totales disueltos, coliformes fecales y totales, para identificar los procesos geoquímicos o de contaminación y comprender el modelo de funcionamiento hidrodinámico del acuífero. Los parámetros fisicoquímicos promedio son: temperatura 27.3 °C (21.14<T<29.73); pH 7.8 (8.1<pH<8.7); conductividad eléctrica 773 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ (375<CE<1635) y dureza total 267 mgL^{-1} (82<DT<500).

En la mayor parte del acuífero predominan las aguas suaves con dureza temporal y bajas concentraciones de calcio, magnesio y bicarbonatos. De acuerdo con los iones dominantes, El 70% de las muestras (n=14) pertenece a la familia cálcica bicarbonatada (Ca-HCO₃), que representa agua de reciente infiltración que ha estado en contacto con rocas volcánicas de composición basáltica.

Esta clasificación prevalece casi en todo el acuífero, exceptuando la zona de Melaque, Barra de Navidad y la frontera con el estado de Colima. En la porción del acuífero cercana a la costa, los análisis a las muestras de agua permiten clasificarlas como moderadamente suaves, de la familia clorurada bicarbonatada sulfatada (Cl-HCO₃-SO₄). Un parámetro adicional que ha cobrado relevancia es la presencia de boro disuelto, que en aguas subterráneas se asocia con un origen geotérmico.

El 90% de las muestras analizadas se sitúa dentro del rango permitido para uso doméstico o riego con una concentración promedio de 0.55 mg/l, sin embargo, el agua de los pozos: 314 y 280 rebasa las normas permisibles con concentraciones de 6.8 y 6.3 mg/l.

6 CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con la información del censo de aprovechamientos realizado como parte del estudio llevado a cabo en el 2010, se registró un total de 370 aprovechamientos, de los cuales 315 se encuentran activos y 55 inactivos por diferentes causas (clausurados, abandonados o fuera de operación).

El volumen total de extracción es de **29.6 hm³/año**, de los cuales 25.2 hm³/año (85.1 %) son para uso agrícola, 3.3 hm³/año (11.2 %) es para uso público-urbano, 0.5 hm³/año (1.7 %) para uso industrial y 0.6 hm³/año (2.0 %) para otros usos.

7 BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance se definió para el año 2010 en una superficie de 110 km², que corresponde a la zona donde se cuenta con información piezométrica y en la que se localiza la mayoría de los aprovechamientos subterráneos.

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 la siguiente:

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

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 del acuífero:

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

7.1 Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico del acuífero, la recarga total que recibe el acuífero (R) ocurre por tres procesos naturales principales: por infiltración de agua de lluvia en el valle, por infiltración de los escurrimientos de los arroyos principales, que en conjunto se consideran como recarga vertical (Rv), y por flujo subterráneo (Eh).

De manera inducida, la infiltración de los excedentes del riego agrícola, del agua residual de las descargas urbanas y de las fugas en la red de distribución de agua potable, constituyen otras fuentes de recarga al acuífero. Estos volúmenes se integran en la componente de recarga inducida (Ri).

7.1.1 Recarga vertical (Rv)

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

$$Rv + Ri + Eh - B - Dm - Sh - ETR = \pm \Delta V(S) \quad (1)$$

Donde:

Rv= Recarga vertical;

Ri= Recarga inducida (Ri)

Eh= Entradas horizontales por flujo subterráneo horizontal

B= Bombeo;

Dm= Descarga de manantiales;

Sh= Salidas horizontales por flujo subterráneo horizontal;

ETR= Evapotranspiración;

$\Delta V(S)$ = Cambio de almacenamiento;

De esta manera, despejando la recarga vertical, se obtiene la siguiente ecuación:

$$Rv = B + Dm + Sh + ETR - Eh - Ri \pm \Delta V(S) \quad (2)$$

7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del acuífero se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través del pie de monte, para posteriormente recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de explotación. La recarga al acuífero tiene su origen en la precipitación pluvial sobre el valle y en la infiltración de los escurrimientos superficiales.

Para su cálculo se utilizó la configuración de elevación del nivel estático correspondiente al año 2010, mostrada en la figura 4.

Con base en esta configuración se seleccionaron canales de flujo y se aplicó la ley de Darcy para calcular el caudal "Q" en cada uno de ellos, mediante la siguiente expresión:

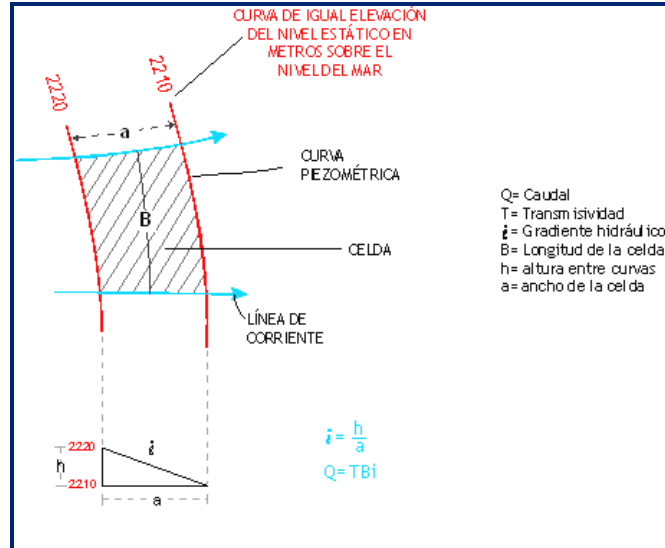
$$Q = B * i * T$$

Donde:

B: Largo del canal de flujo;

i: Gradiente hidráulico ($i = h_2 - h_1 / a$);

T: Transmisividad;



La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada uno de los canales establecidos. En la tabla 2 se pueden observar los valores obtenidos en cada celda y que el volumen total de entradas por flujo subterráneo asciende a **9.3 hm³/año**.

Tabla 2. Cálculo de las entradas por flujo horizontal (2010)

CANAL	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h ₂ -h ₁ (m)	Gradiente i (m)	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
E1	3870	645	2	0.003101	0.0050	0.0600	1.9
E2	2190	515	2	0.003883	0.0050	0.0425	1.3
E3	1290	775	2	0.002581	0.0050	0.0166	0.5
E4	1030	1160	2	0.001724	0.0050	0.0089	0.3
E5	2450	1160	2	0.001724	0.0050	0.0211	0.7
E6	3870	580	4	0.006897	0.0050	0.1334	4.2
E7	1160	1030	2	0.001942	0.0050	0.0113	0.4
Total entradas							9.3

Los valores de T utilizados para el cálculo de entradas y salidas subterránea se obtuvieron de los promedios obtenidos de la interpretación de pruebas de bombeo realizadas, adaptadas al espesor saturado de la región donde se localizan las celdas.

7.1.3 Recarga inducida (Ri)

Aún en sistemas de riego muy eficientes, un cierto volumen del agua aplicada en el riego no es usado como uso consuntivo, se infiltra y eventualmente alcanza la superficie freática, dependiendo de propiedades del suelo, de las condiciones climáticas y de la profundidad al nivel estático.

Esta contribución al acuífero se le conoce como retorno de riego y según Jacob Bear (1970) su valor varía entre el 20 y 40 % del volumen usado en la irrigación.

Debido a la falta de información confiable de láminas de riego por cultivo, por correlación con acuíferos vecinos, se consideró un 20% del volumen aplicado al uso agrícola que retorna al acuífero en forma de recarga inducida, considerando la profundidad somera al nivel del agua subterránea y permeabilidad media de los materiales que conforman el subsuelo.

Si consideramos que 25.2 hm³ anuales son para uso agrícola, 3.3 hm³ para uso público-urbano y que el 20% de este volumen retorna al acuífero, obtenemos un volumen de recarga inducida por retornos del riego de 5.0 y 0.7 hm³ para la infiltración de las pérdidas en los sistemas de distribución de agua potable y del alcantarillado, respectivamente.

Por lo tanto, el volumen total por recarga inducida asciende a **5.7 hm³/año**.

7.2 Salidas

Las descargas del acuífero ocurren principalmente por las salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh), las descargas de manantiales (Dm), el bombeo (B) y evapotranspiración (ETR). Por otra parte, dadas las condiciones hidrodinámicas del acuífero, no existen descargas por aportes del acuífero al flujo base de los ríos (Dfb).

7.2.1 Extracción por bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo calculado es de **29.6 hm³/año**.

7.2.2 Descarga de manantiales (Dm)

Del aforo de los manantiales ubicados dentro del territorio del acuífero, se estima que su descarga es del orden de 38.1 lps, que equivalen a **1.2 hm³/año**.

7.2.3 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

Las salidas subterráneas fueron calculadas de la misma manera como se evaluaron las entradas subterráneas, a partir de la configuración de elevación del nivel estático, mostrada en la figura 4, tal como se muestra en la tabla 3. El volumen total de salidas por flujo horizontal subterráneo asciende a **0.5 hm³/año**.

Tabla 3. Cálculo de salidas horizontales

CANAL	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h_2-h_1 (m)	Gradiente i (m)	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
S1	3225	1030	2	0.001942	0.001	0.0063	0.2
S2	1935	1290	2	0.001550	0.001	0.0030	0.1
S3	2320	900	1	0.001111	0.001	0.0026	0.1
S4	3870	1030	1	0.000971	0.001	0.0038	0.1
Total entradas							0.5

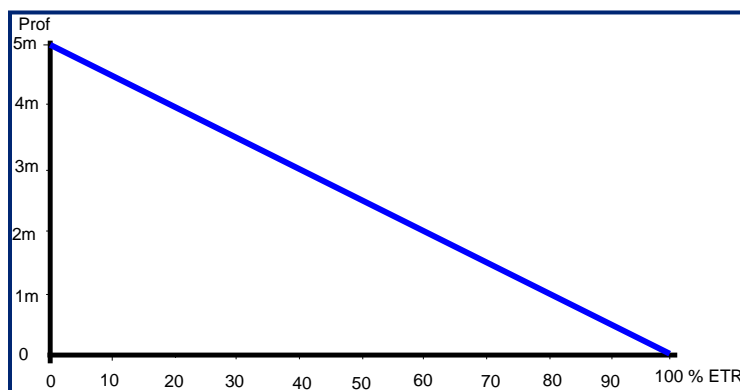
7.2.4 Evapotranspiración (ETR)

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 considera 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 como indicador de la recarga potencial por infiltración. Para la obtención de este parámetro se puede utilizar la ecuación empírica de Turc, que se muestra a continuación:

$$ETR(mm) = \frac{P(mm)}{\sqrt{0.90 + \left(\frac{P^2(mm)}{L^2}\right)}} \quad L = 300 + 25T + 0.05T^3$$

T (°C) =	25.3		
P(mm) =	1107	P ² =	1225449
L =	1742.21385	L ² =	3035309.1
ETR (mm)	969.5		

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 5 m, hasta la que penetra la vegetación en este tipo de climas, bajo el siguiente proceso: en zonas donde el nivel estático se encuentra a una profundidad menor a 5 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 5 m para el fenómeno de ETR, a menor profundidad mayor será el % de ETR, de tal manera que a 5 m el valor de ETR es nulo y a 0 m el valor es del 100 %, a 4 m el 20%, a 2 m el 60% etc.



De esta manera, la estimación del valor de la evaporación se calculó multiplicando el área donde tiene lugar el fenómeno por la lámina de evapotranspiración obtenida y por el porcentaje que le corresponde de acuerdo con la gráfica anterior.

Tomando en cuenta una superficie de 40 km² en la que la profundidad media al nivel del agua subterránea es de 3 m y una lámina de evapotranspiración obtenida de 969.5 mm, se tiene que la ETR = 40 km² (0.9695 m) (0.4) = 15.5. Por lo tanto; **ETR=15.5 hm³/año.**

7.3 Cambio de almacenamiento ($\Delta V(S)$)

Como se menciona en el apartado de evolución del nivel estático, no se dispone de información piezométrica para elaborar la configuración de la evolución del nivel estático para un periodo de tiempo.

Los escasos registros existentes recabados en los recorridos de campo se encuentran dispersos en tiempo y espacio y no cubren en su totalidad la extensión superficial del acuífero.

Por otra parte, debido a que el volumen de extracción es menor a la recarga que recibe el acuífero, todavía no se registran alteraciones en la dirección natural del flujo subterráneo ni conos de abatimiento.

Bajo estas consideraciones, se considera que la posición del nivel del agua subterránea no ha sufrido alteraciones importantes y el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo. Por esta razón, para fines del balance de aguas subterráneas, no existe cambio de almacenamiento en el acuífero. Por lo tanto, para fines del balance $\Delta V(S) = 0$

Solución a la ecuación de balance

Una vez calculados los valores de las componentes de la ecuación de balance, el único parámetro de los que intervienen y que falta por determinar es la infiltración vertical (Rv), el cual será calculado a partir de la ecuación (2)

$$\begin{aligned} Rv &= B + Dm + Sh + ETR - Eh - Ri \pm \Delta VS & (2) \\ Rv &= 29.6 + 1.2 + 0.5 + 15.5 - 9.3 - 5.7 + 0.0 \\ Rv &= 31.8 \text{ hm}^3/\text{año} \end{aligned}$$

Por lo tanto, el valor de la recarga total (R) es igual a la suma de todas las entradas:

$$\begin{aligned} R &= Rv + Eh + Rr \\ R &= 31.8 + 9.3 + 5.7 \\ R &= 46.8 \text{ hm}^3/\text{año} \end{aligned}$$

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:

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

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 **46.8 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.

Para este caso particular, se considera como descarga natural comprometida un volumen de **9.4 hm³ anuales**, de los cuales corresponden a las salidas subterráneas, a la descarga a través de los manantiales y del volumen evapotranspirado al 50 %, que se debe comprometer para preservar el ecosistema costero.

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 **39,954,114 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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 46.8 - 9.4 - 39.954114 \\ \text{DMA} &= -2.554114 \text{ hm}^3/\text{año.} \end{aligned}$$

El resultado indica que no existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario el déficit es de **2,554,114 m³ anuales**.

9 BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua, 2010. Estudio para determinar la disponibilidad de los acuíferos Valle de Guadalupe, Primo Verdad, La Huerta, Miguel Hidalgo, Cihuatlán, 20 de noviembre, Cuquío, Colotlán, Tecolotlán, Tomatlán, Tequila y La Barca, en el estado de Jalisco. Elaborado por la Universidad Nacional Autónoma de México.