CONAGUA
COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUA EN EL ACUÍFERO CUAUTITLÁN (1431), 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. FISIOGRAFÍA 5
2.1 Provincia fisiográfica 5
2.2 Clima 5
2.3 Hidrografía 5
2.4 Geomorfología 7
3. GEOLOGÍA. 7
3.1 Estratigrafía 8
3.2 Geología estructural 10
3.3 Geología del subsuelo 11
4. HIDROGEOLOGÍA 12
4.1 Tipo de acuífero 12
5. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS 13
5.1 Entradas 13
5.1.1 Recarga vertical (Rv) 13
5.2 Salidas 19
5.2.1 Bombeo (B) 19
5.2.2 Descarga por manantiales (Dm) 19
6. DISPONIBILIDAD 19
6.1 Recarga total media anual (R) 20
6.2 Descarga natural comprometida (DNC) 20
6.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS) 20
6.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA) 21
7. BIBLIOGRAFÍA 22

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 Cuautitlán, definido con la clave 1431 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en el Estado de Jalisco, entre las coordenadas geográficas 19° 38' y 19° 14' de latitud norte, y 10° 36' y 103° 58' de longitud oeste, cubriendo una superficie de 1330.68 km^2.

Limita al noreste con el acuífero Autlán, al noroeste con el acuífero La Huerta y al suroeste con el acuífero Cihuatlán, estos pertenecientes al estado de Jalisco y al sur

con el acuífero Minatitlán y Marabasco, estos últimos pertenecientes al estado de Colima (figura 1).

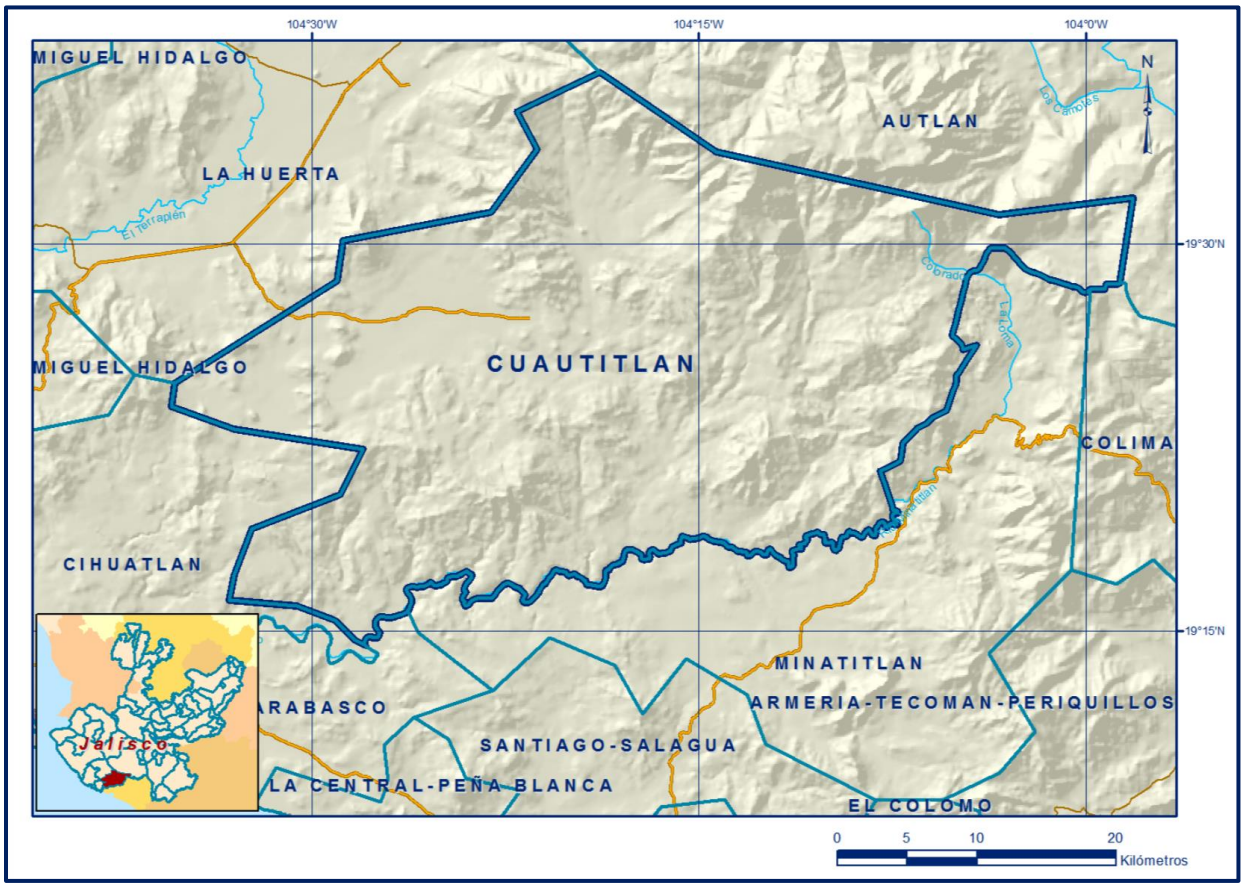


Figura 1. Localización del acuífero

Geopolíticamente se localiza principalmente en el municipio Cuautitlán de García Barragán, y parcialmente en los municipios Autlán de Navarro, Casimiro Castillo, Cihuatlán, La Huerta y Tolimán todos ellos pertenecientes al estado de Jalisco.

La poligonal que delimita el acuífero se encuentra definida por los vértices cuyas coordenadas se presentan en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**.

Tabla 1. Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada del acuífero

ACUIFERO 1431 CUAUTITLAN							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	104	18	52.1	19	36	39.7	
2	104	14	20.0	19	33	33.8	
3	104	3	22.8	19	31	7.7	
4	103	58	10.8	19	31	47.6	
5	103	58	42.1	19	28	27.6	
6	103	59	51.1	19	28	15.5	DEL 6 AL 7 POR EL LIMITE ESTATAL
7	104	26	17.8	19	15	44.7	DEL 7 AL 8 POR EL LIMITE ESTATAL
8	104	27	57.7	19	14	26.9	
9	104	28	19.5	19	14	39.2	
10	104	29	9.5	19	15	25.1	
11	104	30	35.8	19	15	58.3	
12	104	33	15.1	19	16	11.6	
13	104	33	1.9	19	17	11.3	
14	104	32	22.0	19	18	57.5	
15	104	28	56.2	19	20	17.2	
16	104	28	3.1	19	22	3.4	
17	104	33	1.9	19	22	49.9	
18	104	35	27.9	19	23	43.0	
19	104	35	21.3	19	24	36.1	
20	104	29	2.9	19	28	35.1	
21	104	28	49.6	19	30	8.0	
22	104	23	4.4	19	31	14.4	
23	104	21	18.2	19	33	40.4	
24	104	22	4.7	19	35	6.7	
1	104	18	52.1	19	36	39.7	

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero Cuautitlán pertenece al Organismo de Cuenca VIII "*Lerma – Santiago - Pacífico*". Su territorio se encuentra totalmente vedado y sujeto a la disposición de tres decretos, el primero 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 Diario Oficial de la Federación el 07 de diciembre de 1987; esta veda se clasifica como tipo III, en la que la capacidad de los mantos acuíferos permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros, el segundo decreto 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 el 21 de septiembre de 1984; esta veda se clasifica como tipo II, en la que la capacidad de los mantos acuíferos permite extracciones para uso doméstico y de abrevadero que se realicen por medio manuales, y el tercer decreto es el *"DECRETO por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos en los Municipios de*

Autlán de Navarro, El Grullo, El Limón y Tonaya, Jal.", publicado en el Diario Oficial de la Federación el 14 de marzo de 1978; esta veda se clasifica como tipo II, en la que la capacidad de los mantos acuíferos permite extracciones para uso doméstico y de abrevadero que se realicen por medio manuales.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 3 El uso principal del agua subterránea es agrícola. El acuífero pertenece al Consejo de Cuenca Costa Pacífico Centro.

2. FISIOGRAFÍA

2.1 Provincia fisiográfica

De acuerdo a la clasificación de las provincias fisiográficas realizada de INEGI, la superficie cubierta por el acuífero se localiza principalmente en la provincia Sierra Madre del Sur, subprovincia fisiográfica Sierra de la Costa de Jalisco y Colima.

2.2 Clima

De acuerdo con la clasificación de Köppen modificada por E. García, para las condiciones de la República Mexicana, en el área cubierta por el acuífero predomina el clima cálido subhúmedo.

Para la determinación de las condiciones climatológicas, se utilizaron los datos de 6 estaciones que tienen influencia en el área del acuífero, con un periodo de registro que va de 1996 a 2015; mediante el método de polígonos de Thiessen, se determinó que los valores promedio anuales de temperatura y precipitación son **23.3°C** y **989.0 mm**, respectivamente.

2.3 Hidrografía

El acuífero se ubica en la Región Hidrológica 15, Costa de Jalisco, en ella se encuentra principalmente la cuenca Río Marabasco A, aunque las cuencas Río Purificación, Canoas y Armería cubren el acuífero en menor proporción.

"La cuenca hidrológica Río Marabasco A, drena una superficie de 2,207.98 kilómetros cuadrados, y se encuentra delimitada al Norte y al Este por la región hidrológica número 16 Armería-Coahuayana, al Sur por la cuenca hidrológica Río Marabasco B y al Oeste por la cuenca hidrológica Río Purificación", de acuerdo a lo publicado en el Diario Oficial de la Federación en el año 2013. Esta cuenca tiene un volumen disponible

a la salida de 174.410 millones de metros cúbicos, de acuerdo a lo publicado en el DOF el 21 de septiembre de 2020.

"La cuenca hidrológica Río Purificación, drena una superficie de 2,247.54 kilómetros cuadrados, y se encuentra delimitada al Norte por la región hidrológica número 16 Armería-Coahuayana, al Sur por el Océano Pacífico, al Este por la cuenca hidrológica Río Marabasco A y al Oeste por la cuenca hidrológica Río Cuitzmala", de acuerdo a lo publicado en el Diario Oficial de la Federación en el año 2013. Esta cuenca tiene un volumen disponible a la salida de 253.039 millones de metros cúbicos, de acuerdo a lo publicado en el DOF el 21 de septiembre de 2020.

"La cuenca hidrológica Canoas drena una superficie de 1,302.3 kilómetros cuadrados, y se encuentra delimitada al Norte por la cuenca hidrológica El Rosario, al Sur por la cuenca hidrológica Armería, al Este por la región hidrológica número 12 Lerma-Santiago y al Oeste por la región hidrológica número 15 Costa de Jalisco", de acuerdo a lo publicado en el Diario Oficial de la Federación en el año 2013. Esta cuenca tiene un volumen disponible a la salida de 296.762 millones de metros cúbicos, de acuerdo a lo publicado en el DOF el 21 de septiembre de 2020.

"La cuenca hidrológica Armería drena una superficie de 2,208.7 kilómetros cuadrados, y se encuentra delimitada al Norte por la cuenca hidrológica Canoas, al Sur por el Océano Pacífico, al Este por la cuenca hidrológica Coahuayana 1 y al Oeste por la región hidrológica número 15 Costa de Jalisco", de acuerdo a lo publicado en el Diario Oficial de la Federación en el año 2013. Esta cuenca tiene un volumen disponible a la salida de 673.734 millones de metros cúbicos, de acuerdo a lo publicado en el DOF el 21 de septiembre de 2020.

El patrón de drenaje que predomina es de tipo dendrítico, controlado principalmente por las estructuras, la litología y morfología de las unidades en las que se emplaza.

Algunos ríos principales que conforman la región son La Colera, El Cafetal, Encino Prieto, Agua Fría, La Puerta de la Mina, El Naranjo, El Campanilo, Río Cuzalapa, entre otros.

2.4 Geomorfología

Es compleja la geomorfología de este acuífero, ya que se encuentra conformado por mesetas basálticas, valles intermontanos, valles ramificados, valles intermontanos con lomerío, mesetas basálticas, así como sierra alta compleja y sierra de cumbres tendidas.

3. GEOLOGÍA

Litológicamente el acuífero está constituido principalmente por rocas ígneas, predominando las intrusivas, compuestas por granito; al norte y este del acuífero hay presencia de extrusivas, como la toba ácida.

En menor proporción se identifican rocas sedimentarias como arenisca-conglomerado, calizas y vulcanosedimentarias, ubicadas principalmente hacia el norte y este del acuífero. Al norte del acuífero, en las laderas hay presencia de suelos aluviales (Figura 2).

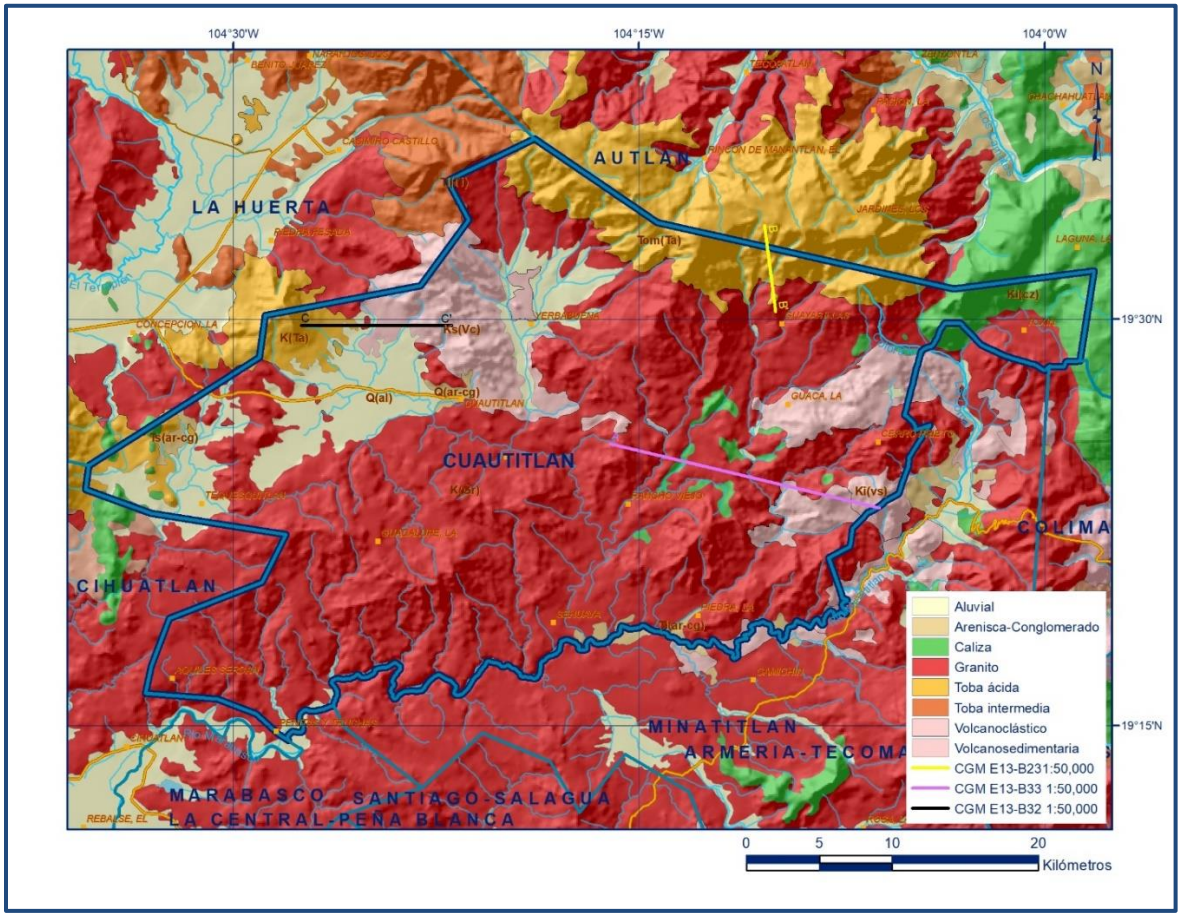


Figura 2. Geología general del acuífero

3.1 Estratigrafía

La secuencia de rocas expuestas en la región, cuyas edades varían del Cretácico al Reciente, se menciona a continuación:

Mesozoico
Cretácico -inferior
Barremiano – Aptiano – Albiano
Andesita – Brecha Andesítica (KbapA– BvA)

La unidad más antigua es la Formación Tecalitlán (KbapA-BvA) de edad Barremiano - Aptiano constituida en la base, por esquistos de biotita, la mayor parte de la unidad consiste de derrames, aglomerados, tobas y brechas de composición andesítica a dacítica.

Caliza Lutita (KapaCz– Lu) y Hornfels

Infrayace concordantemente a la Formación Tepalcatepec Inferior (KapaczLu) de edad Aptiano-Albiano, la cual está constituida en su base por una alternancia de calizas arcillosas, escasos horizontes fosilíferos y lutitas, en la cima por limolitas, con intercalaciones de andesita, intrusiona a su vez rocas de metamorfismo de contacto (Hf).

Toba andesítica – Toba dacítica (KapaTA– TDa)

También del Aptiano-Albiano se tiene la Formación Tepalcatepec Superior (KapaTA-TDa) constituida en la base por aglomerados y derrames andesíticos, en la parte media predominan las tobas y brechas de composición dacítica-andesítica y algunas intercalaciones de lentes de calizas arrecifales, en la cima se tienen brechas volcánicas, asociadas a tobas dacíticas, tobas riolíticas y areniscas epiclásticas, variando a tobas riodacíticas pseudoestratificadas.

Calizas (KaceCz)

Cubriendo concordantemente tanto a la Formación Tecalitlán como a la Formación Tepalcatepec Superior se tiene al miembro Ixtapa Calcáreo (KaceCz) del Albiano-Cenomaniano constituido por calizas masivas con horizontes fosilíferos, correlacionable con la Formación Aurora, formada por dos miembros; el primero de ellos constituido por calizas con escaso contenido fosilífero (foraminíferos), algunos horizontes de arcilla; constituyen estratos entre 0.20 y 0.50 m de espesor y una potencia de aproximadamente 80 m; sus rumbos varían de NW 15° - 30° SE y echados

de 38° - 68° SW y NE, el segundo miembro, se caracteriza por una estratificación que varía entre 0.50 y 2.0 m de espesor, con nódulos de pedernal y contenido fosilífero representado por rudistas; tiene una potencia de aproximadamente 200 m. Y sus rumbos varían de NE 30° a 80° SW, formando anticlinales normales y recumbentes.

Cretácico Superior
Turoniano – Coniaciano
Conglomerado polimíctico – Arenisca (KtcoCgp−Ar)

Cubriendo discordantemente a las formaciones Tepalcatepec Inferior y Tepalcatepec Superior se tiene a la Formación Cerro de la Vieja (KtcoCgp-Ar) de edad Turoniano-Coniaciano, constituida en su base por conglomerados pasando gradualmente a horizontes arenosos limolíticos.

Cenozoico
Paleógeno
Granodiortita – Diorita (TpaGd− D)

Intrusionando a las unidades anteriores, se tienen cuerpos granodioríticos con variaciones a diorita y microgranito (TpaGd-D) de textura fanerítica equigranular y estructura compacta con un poco de pirita diseminada, se le observa poco silicificado y propilitizado, que constituyen el Batolito de Manzanillo con edades isotópicas entre 72 a 63.5 Ma (Kohler H. et al., 1988) que la ubican dentro del rango Paleoceno.

Eoceno - Oligoceno
Toba ácida – riolita (TpgTa− R)

Posteriormente se tiene una unidad de tipo ácida constituida por riolitas, tobas riolíticas e ignimbritas, de color rosado con desarrollo de cristales de ortoclasa y algunos ferromagnesianos; subyace discordantemente a dos paquetes de rocas volcánicas que constituyen la provincia geológica de la Sierra Madre Occidental (Mc Dowell y Keiser, 1,977). El primero está constituido por un paquete ácido, representado por riolitas, ignimbritas, tobas riolíticas y dacitas; se presentan de color rosado a pardo, con texturas afanítica y tobácea, con estructura compacta. Se observa en porciones con cierto grado de fluidez, en las zonas de ignimbrita. Por su posición estratigráfica se le puede atribuir una edad del Oligoceno al Mioceno, por lo que se le puede correlacionar con la Serie Volcánica Superior de la Sierra Madre Occidental. Estas rocas actúan como rocas caja de algunos yacimientos. Generalmente se observa silicificada y en ocasiones caolinizada y oxidada. Es la última manifestación volcánica de la región.

Andesita (TpgA) - Aglomerado Andesítico (TpgA(Agl))

Descansando sobre esta unidad se encuentra una acumulación volcánica de composición andesítica, de color gris claro a gris verdoso, su textura varía de afanítica a porfídica y en algunas porciones tobáceas y aglomerática. Por su abundancia representa el evento volcánico más importante de la región. Se le atribuye una edad por posición estratigráfica del Oligoceno (Demant, 1978) y se puede correlacionar con la serie Volcánica inferior de la Sierra Madre Occidental.

Granito – granodiorita (Ks- Tpg(?)Gr- Gd)

La columna estratigráfica arriba mencionada, fue intrusionada por troncos y apófisis de composición granítica-granodiorítica, emplazados durante el Cretácico superior-Cenozoico inferior (Paleógeno) (Negendank, et al., 1,986). Estas rocas se presentan de color blanco a rosado, con textura fanerítica y equigranular, su estructura es compacta con porciones deleznables por efectos de alteración. Estas rocas se observan caolinizadas y oxidadas principalmente. Se encuentran actuando como roca encajonante de algunos yacimientos de tipo tabular.

Cuaternario

Aluvión (Qal)

Durante el Cuaternario se depositaron limos, arcillas, arenas y boleos, producto de la disgregación de las rocas existentes, originando acumulaciones al pie de las formas serranas, dando origen a los depósitos de aluvión existentes.

3.2 Geología estructural

Las estructuras del dominio frágil consisten de fallas normales y laterales conformando un sistema con dos direcciones NE-SW, NW-SE y algunas menos comunes de dirección N-S. Las estructuras más consistentes corresponden a las de orientación NE-SW, las cuales generalmente son normales y algunas con componente lateral, tales como falla El Mamey de tipo normal con componente Dextral con orientación NE450-60°SW con una deflexión hacia el NW en la parte central; tiene un buzamiento de 70° a 86° al NW, aflora a lo largo de 34 km; el graben de Minatitlán está delimitado al occidente por la falla Minatitlán y al oriente por la falla Las Truchas; tiene un rumbo general NE-SW y un corrimiento de 28 km y un ancho de 4 km en el centro; la falla Minatitlán es de tipo normal con componente Dextral, sigue un rumbo de NE430-62°SW en la parte suroeste y de NE10-25°SW en la porción noreste; el buzamiento es entre 53° a 82° al SE, tiene una longitud de 28 km. Las estructuras de

orientación NW-SE son también de tipo normal y algunas de ellas con componente lateral, las estructuras más importantes de este grupo son: la falla Jala de tipo normal con componente lateral sinestral, presenta un rumbo que varía de NW35°-50°SE con un buzamiento de 80° a 88° al NE, tiene una longitud de 30 kilómetros; falla Cuzalapa de tipo normal con corrimiento lateral dextral, con orientación de NW20°SE y un buzamiento de 60° a 88° al SW; falla La Encantada corresponde a una falla normal con componente Dextral de rumbo NW15°SE en la porción sur, con una deflexión de rumbo NE17°SW hacia la parte NE; su buzamiento es 88° al NE. De las estructuras de orientación N-S la más importante es la falla Ayotitlán, de tipo normal con rumbo general S-W e inclinación de 55° al W y es interrumpida por la falla El Mamey. Posteriormente y posiblemente durante el Mioceno se inicia la fase de relajamiento extensional originando fallas normales y laterales con dos direcciones NE-SW y NW-SE.

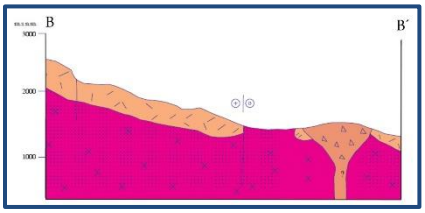
Falla Minatitlán

Entre el Jurásico tardío (?) y Cretácico inferior se desarrolla un arco insular, generando un macizo volcánico representado por la Formación Tecalitlán, con la presencia de cuencas aledañas donde se acumularon potentes paquetes de rocas vulcanosedimentarias, producto del vulcanismo, aporte de sedimentos y destrucción del macizo, relacionando estas secuencias a la Formación Tepalcatepec, cubriendo a estas secuencias vulcanosedimentarias se tienen calizas de tipo arrecifal de edad Albiano-Cenomaniano. A fines del Cretácico y principios del Cenozoico la región sufre una deformación compresiva (Orogenia Laramide) que origina plegamiento de las unidades preexistentes. En el Paleoceno se tiene emplazamiento de cuerpos intrusivos de composición granodiorítica-diorítica y en el Oligoceno se emplazan cuerpos intrusivos de composición granítica. Posteriormente y posiblemente durante el Mioceno se inicia la fase de relajamiento extensional originando fallas normales y laterales con dos direcciones NE-SW y NW-SE.

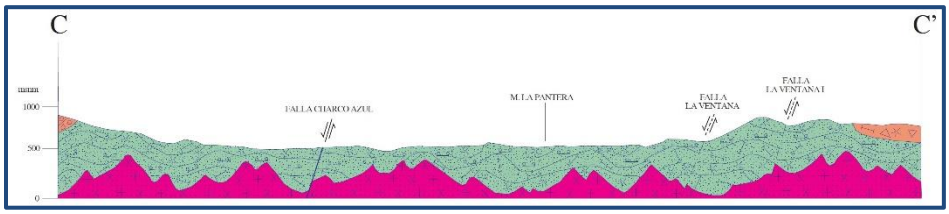
3.3 Geología del subsuelo

La porción inferior se aloja en un medio fracturado conformado por rocas intrusivas de composición granítica – granodiorítica, el cual constituye el Batolito de Manzanillo, donde a su vez se encuentran fallas normales y laterales, dadas estas características hace que la zona tenga un mayor potencial hidrogeológico. De acuerdo con la geología superficial se determina que el acuífero está constituido, en su porción superior, por depósitos recientes y suelo residual de granulometría variada, que

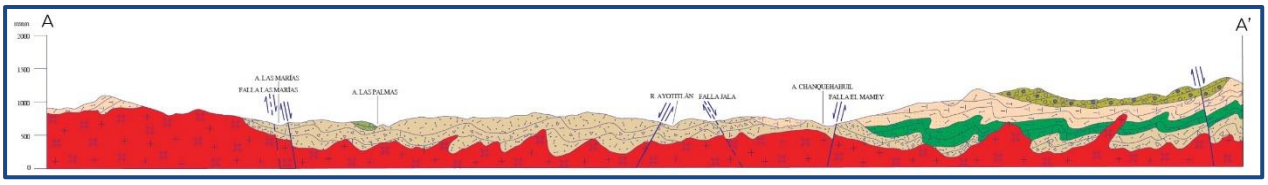
conforman el relleno del valle, en ciertas regiones constituyen la porción superior andesitas – brechas, tobas andesíticas, así como tobas dacíticas, y en menos proporción, sobreyace conglomerado polimíctico – arenisca. También, subyaciendo a estas unidades podemos encontrar calizas y lutitas (figura 3).



Fuente: Carta Geológico-Minera E13-B23 "El Chante". Esc. 1:50,000 (SGM, 1999)



Fuente: Carta Geológico-Minera E13-B32 "La Huerta". Esc. 1:50,000 (SGM, 2012)



Fuente: Carta Geológico-Minera E13-B33 "Minatitlán". Esc. 1:50,000 (SGM, 2002)

Figura 3. Secciones geológicas esquemáticas

4. HIDROGEOLOGÍA

4.1 Tipo de acuífero

De acuerdo con la información geológica, es posible definir la presencia de un acuífero de **tipo libre a semiconfinado**, heterogéneo y anisótropo, constituido en su porción superior por depósitos recientes, de granulometría variada, además de conglomerados. La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas volcánicas, principalmente de composición granodiorítica que pueden presentar permeabilidad secundaria por fracturamiento.

El basamento del acuífero está compuesto por una serie de rocas ígneas, impermeables ya que a mayor profundidad se pierde la porosidad secundaria.

5. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

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:

Entradas (E) - Salidas (S) = Cambio de masa

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

Recarga total - Descarga total = Cambio de almacenamiento

5.1 Entradas

Las entradas al acuífero Cuautitlán están integradas básicamente por la recarga natural que se produce por la infiltración de la lluvia (Rv).

5.1.1 Recarga vertical (Rv)

La recarga vertical total que recibe el acuífero (volumen susceptible de infiltrarse) se obtuvo mediante el planteamiento de un balance hidrometeorológico para la superficie del acuífero, mediante la siguiente expresión:

$$V_{LL} = V_{ETR} + V_{ESC} + V_{INF} \quad (1)$$

Donde:

V_{LL} = Volumen de lluvia;
V_{ETR} = Volumen evapotranspirado;
V_{ESC} = Volumen escurrido;
V_{INF} = Volumen infiltrado;

Por lo tanto, despejando el volumen infiltrado, se obtiene lo siguiente:

$$V_{INF} = V_{LL} - V_{ETR} - V_{ESC} \quad (2)$$

El volumen de lluvia que se precipita en la superficie del acuífero tomado en cuenta para el balance, se obtiene al multiplicar su área (1,322.8 km^2) por la lámina de precipitación media anual (989.0 mm):

V_{LL} = 1,322.8 km^2 (0.989 m) = 1,308.2 hm^3 anuales

Para la estimación de la evapotranspiración real se utilizó la ecuación empírica de Turc, considerando los valores promedio anual de precipitación de 989.0 mm y temperatura de 23.3 °C.

Turc a partir de observaciones realizadas en 254 cuencas distribuidas para todos los climas del mundo, reporta la expresión siguiente:

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

La limitación teórica para la utilización de la fórmula de Turc, es que la precipitación no debe ser menor a la relación 0.31L (469.6). En caso contrario se obtiene una ETR > P y para estos casos se debe considerar a ETR = P. De acuerdo con lo anterior, se obtiene un valor de lámina de evapotranspiración de **859 mm anuales.**

Por lo tanto, el volumen de la ETR (V_{ETR}) es:

V_{ETR} = 1,322.8 km^2 (0.859 m) = 1,136.3 hm^3 anuales

Para determinar el volumen de escurrimiento debido a la lluvia (V_{ESC}) se utilizó el método establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, publicada en el Diario Oficial de la Federación, con fecha del 27 de marzo de 2015, en la que se señala que para los casos en los que no se cuente con suficiente información para determinar el volumen anual de escurrimiento natural, se puede aplicar el método indirecto denominado precipitación-escurrimiento.

La normatividad establece que el volumen anual medio de escurrimiento natural es igual a la precipitación media anual por el área y por un coeficiente de escurrimiento:

VOLUMEN ANUAL DE ESCURRIMIENTO NATURAL DE LA CUENCA	**=**	**PRECIPITACION ANUAL DE LA CUENCA**	*****	**AREA DE LA CUENCA**	*****	**COEFICIENTE DE ESCURRIMIENTO**

El coeficiente de escurrimiento (Ce) se puede determinar, según la norma antes citada, en función del parámetro K que depende del tipo y uso de suelo, de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS).

Con apoyo de cartografía del Instituto Nacional de Estadística y Geografía, se clasifican los suelos de la cuenca en estudio, de acuerdo con los tres diferentes tipos: A (suelos permeables); B (suelos medianamente permeables); y C (suelos casi impermeables), que se especifican en la

Tabla 2 y se determina el uso actual del suelo.

En el caso de que, en la cuenca en estudio, existan diferentes tipos y usos de suelo, el valor de K se calcula como la resultante de subdividir la cuenca en zonas homogéneas para obtener el promedio ponderado.

Dependiendo del valor obtenido para K, el coeficiente de escurrimiento (Ce), se calcula mediante las fórmulas siguientes, en la que P es la precipitación media anual expresada en mm:

Si *K* resulta menor o igual que 0.15	Ce = *K* (P-250) / 2000
Si *K* es mayor que 0.15	Ce = *K* (P-250) / 2000 + (*K* –0.15) / 1.5

Donde:

P = Precipitación anual;

Ce = Coeficiente de escurrimiento anual;

***K* =** Parámetro que depende del tipo, uso y cubierta del suelo;

De acuerdo con la cartografía de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) escala 1:1,000,000 en la zona que comprende el acuífero Cuautitlán predominan los siguientes tipos de suelo: Andosol, Cambisol, Litosol y Regosol, que se clasificaron en tres tipos de suelo: A, B y C (figura 4).

En cuanto al uso de suelo, de acuerdo con la cartografía del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) escala 1: 250,000, en el área donde se localiza el acuífero hay al menos ocho usos de suelo diferentes: área agrícola, asentamientos humanos, bosque, cuerpo de agua, desprovisto de vegetación, otros tipos, pastizal y selva (figura 5).

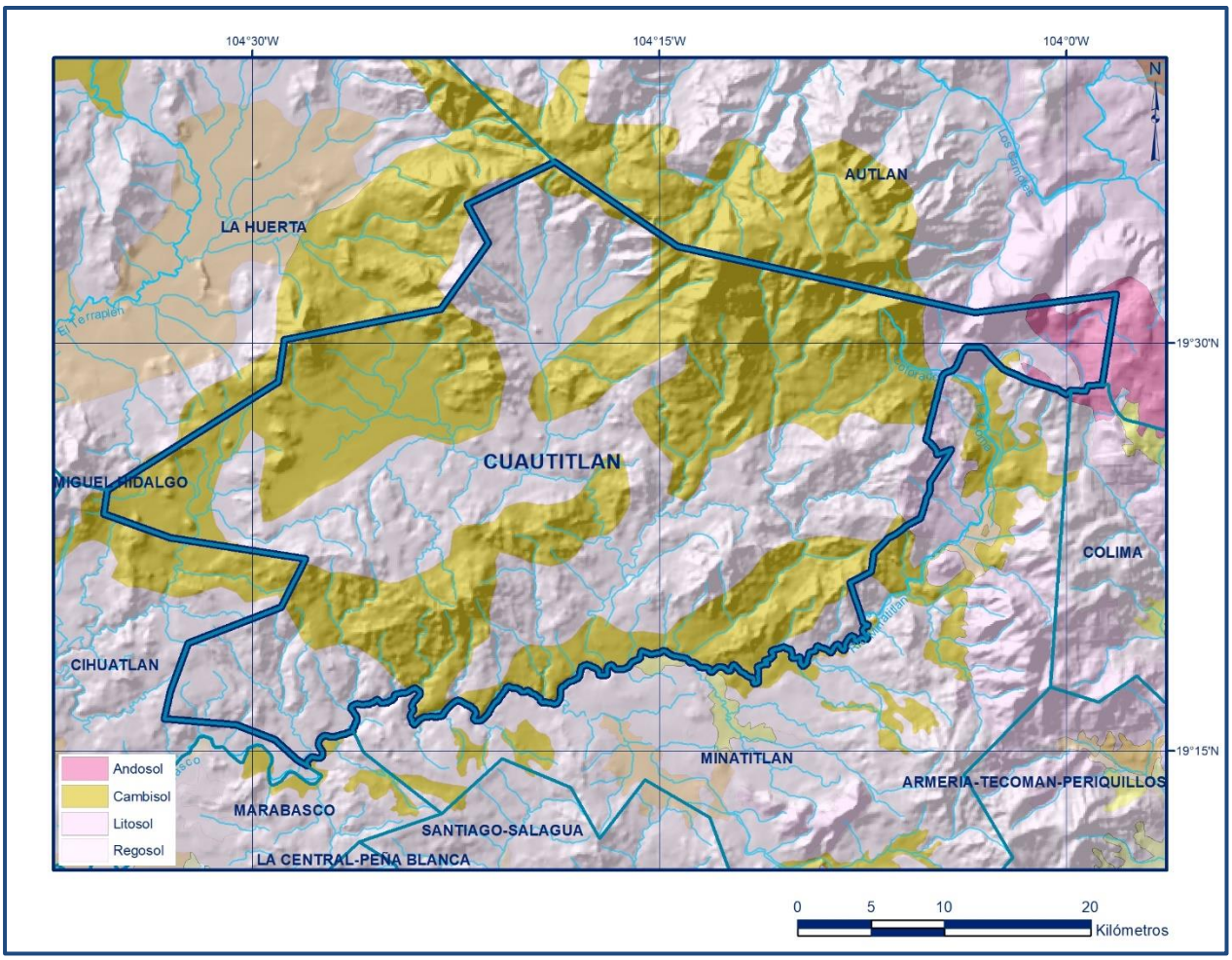


Figura 4. Tipo de suelo

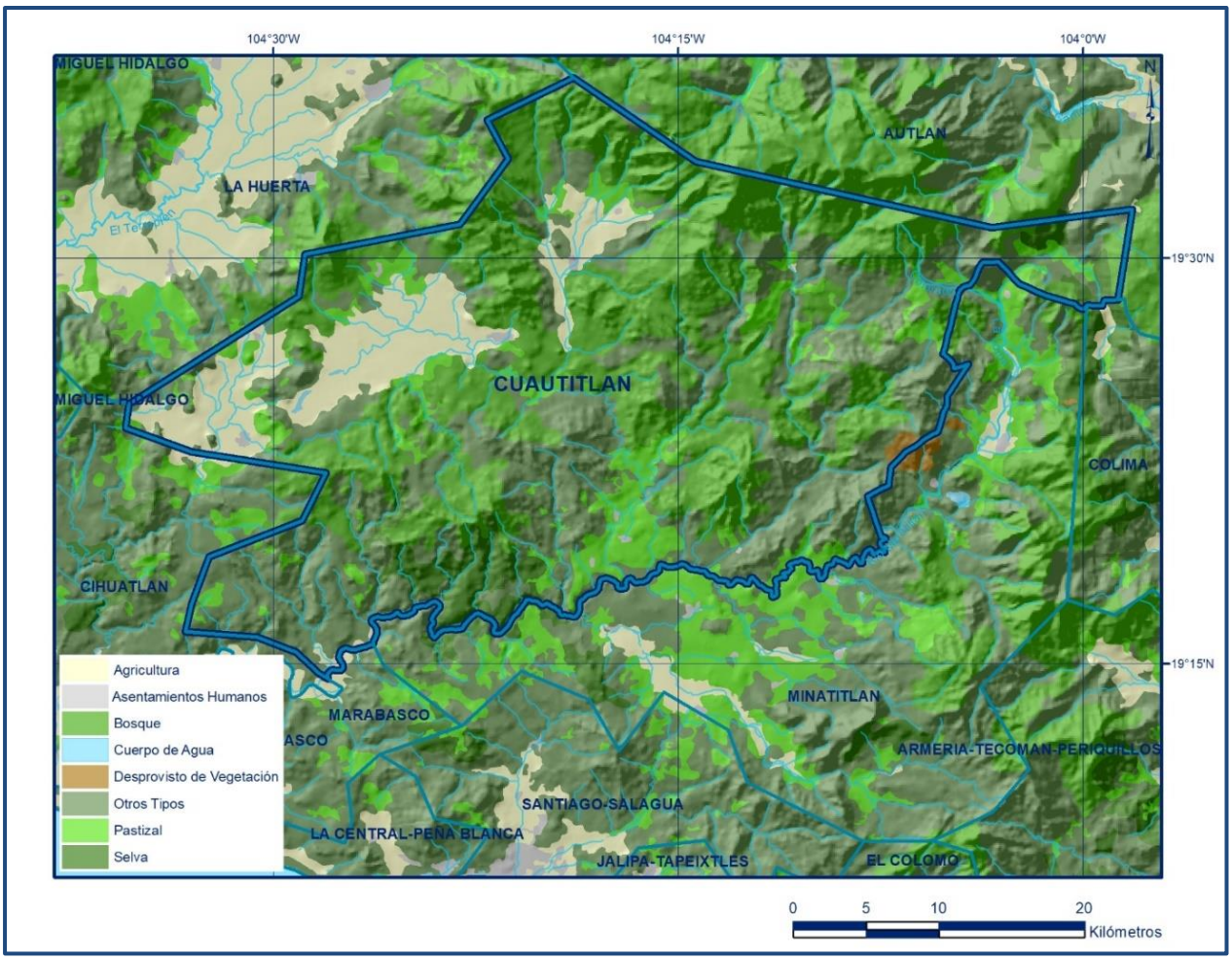


Figura 5. Uso de suelo

Tabla 2. Valores de K en función del tipo y uso del suelo

USO DE SUELO	TIPO DE SUELO A	TIPO DE SUELO B	TIPO DE SUELO C
Barbecho, áreas incultas y desnudas	0.26	0.28	0.3
Cultivos:			
En hilera:	0.24	0.27	0.3
Legumbres o rotación de pradera	0.24	0.27	0.3
Granos pequeños	0.24	0.27	0.3
Pastizal:			
% del suelo cubierto o pastoreo			
Más del 75% -poco-	0.14	0.2	0.28
Del 50 al 75% -regular-	0.2	0.24	0.3
Menos del 50% -excesivo-	0.24	0.28	0.3
Bosque:			
Cubierto más del 75%	0.07	0.16	0.24
Cubierto del 50 al 75%	0.12	0.22	0.26
Cubierto del 25 al 50%	0.17	0.26	0.28
Cubierto menos del 25%	0.22	0.28	0.3
Zonas urbanas	0.26	0.29	0.32
Caminos	0.27	0.3	0.33
Pradera permanente	0.18	0.24	0.3

TIPO DE SUELO	CARACTERISTICAS
A	Suelos permeables, tales como arenas profundas y loes poco compactos
B	Suelos medianamente permeables, tales como arenas de mediana profundidad; loes algo más compactos que los correspondientes a los suelos Tipo A; terrenos migajosos
C	Suelos casi impermeables, tales como arenas o loes muy delgados sobre una capa impermeable, o bien arcillas

De esta manera, el valor de K se obtuvo como promedio ponderado y es igual a 0.20, valor que se aplicó en la siguiente ecuación para obtener el coeficiente de escurrimiento (Ce):

$$Ce = K\,(P-250)/2000) + (K-0.15)/1.5$$

Ce = 0.109

Aplicando este coeficiente de escurrimiento al volumen de lluvia, se obtiene el volumen del escurrimiento:

V_{ESC} = 0.109 (1,308.2 hm^3) = 142.6 hm^3 anuales

Sustituyendo valores en la ecuación (2), se obtiene lo siguiente:

$$\mathbf{V_{INF} = V_{LL} - V_{ETR} - V_{ESC}\ (2)}$$
$$\mathbf{V_{INF} = 1{,}308.2 - 1{,}136.3 - 142.6}$$
$$\mathbf{V_{INF} = 29.3\ hm^3\ anuales}$$

Al dividir el volumen promedio anual infiltrado, entre el volumen anual promedio precipitado, que es de 1,308.2 hm^3/año, se obtiene el coeficiente de infiltración de 0.0224.

De acuerdo con lo anterior, el volumen susceptible de infiltrarse es de 29.3 hm^3/año en 1,322.8 km^2 de superficie del acuífero.

Por lo que la **Rv = 29.3 hm^3 anuales**

5.2 Salidas

Las salidas de agua subterránea estimadas en este balance son las siguientes:
La descarga del acuífero ocurre principalmente a través de bombeo (B) y manantiales (Dm).

5.2.1 Bombeo (B)

De acuerdo con los datos reportados por el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), se tiene registrado un volumen de extracción de **9.5 hm^3 anuales**, a la fecha de corte del 30 de diciembre del 2022.

5.2.2 Descarga por manantiales (Dm)

Se identificó la existencia de manantiales, que en conjunto descargan un volumen de **16.1 hm^3 anuales**.

6. 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:

DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUA DEL SUBSUELO EN UN ACUÍFERO	=	RECARGA TOTAL MEDIA ANUAL	-	DESCARGA NATURAL COMPROMETIDA	- EXTRACCIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

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

6.1 Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde a la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero. Para este caso la recarga total es de **29.3 hm³ anuales.**

6.2 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, su valor es de. **DNC = 16.1 hm³ anuales**, que corresponde a la descarga de manantiales.

6.3 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 (REPDA), 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 **9'517,533 m³ anuales,** que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre del 2022.**

6.4 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.

DMA = R – DNC – VEAS
DMA = 29.3 – 16.1 – 9.517533
DMA = 3.682467 hm³ anuales

El resultado indica que existe un volumen disponible de **3'682,467 m³ anuales** para otorgar nuevas concesiones.

7. BIBLIOGRAFÍA

Servicio Geológico Mexicano, (1999). Carta Geológico-Minera E13-B23 “El Chante”. Esc. 1:50,000. Jalisco.

Servicio Geológico Mexicano, (2012). Carta Geológico-Minera E13-B32 “La Huerta”. Esc. 1:50,000. Jalisco.

Servicio Geológico Mexicano, (2002). Carta Geológico-Minera E13-B33 “Minatitlán”. Esc. 1:50,000. Jalisco.

Secretaría de Gobernación, ACUERDO por el que se actualiza la disponibilidad media anual de agua subterránea de los 653 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, mismos que forman parte de las regiones hidrológico-administrativas que se indican, 7 de septiembre del 2020, (México).

Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Conjunto de datos vectoriales Fisiográficos, (2001), México: INEGI.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Conjunto de datos vectoriales Geológicos, Fallas fracturas, (2002), México: INEGI.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Conjunto de datos vectoriales de la carta de Uso del suelo y vegetación, Serie VI, (2017), México: INEGI.

Comisión Nacional del Agua, 2021, Cuencas, Cuencas (nacional), http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=cuencas

Comisión Nacional del Agua, 2021, Regiones Hidrológicas, Regiones Hidrológicas (nacional), http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=regionesHidrologicas