



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO CHURUMUCO (1613), ESTADO DE
MICHOACÁN**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | GENERALIDADES..... | 2 |
| | Antecedentes..... | 2 |
| 1.1 | Localización..... | 2 |
| 1.2 | Situación administrativa del acuífero..... | 3 |
| 2 | FISIOGRAFÍA..... | 4 |
| 2.1 | Provincia fisiográfica..... | 4 |
| 2.2 | Clima..... | 5 |
| 2.3 | Hidrografía..... | 6 |
| 2.4 | Geomorfología..... | 6 |
| 3 | GEOLOGÍA..... | 7 |
| 3.1 | Estratigrafía..... | 7 |
| 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..... | 12 |
| 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 a través de 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 Churumuco, definido con la clave 1613 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción sur del estado de Michoacán, entre las coordenadas geográficas 18° 31' y 18° 55' de latitud norte y 101° 8' y 101° 52' y abarca una superficie de 1810.06 km².

Limita al norte con los acuíferos de La Huacana y Tacámbaro-Turicato, al este con Lázaro Cárdenas, pertenecientes al estado de Michoacán; al sur con el acuífero Coahuayutla, del estado de Guerrero (figura 1).

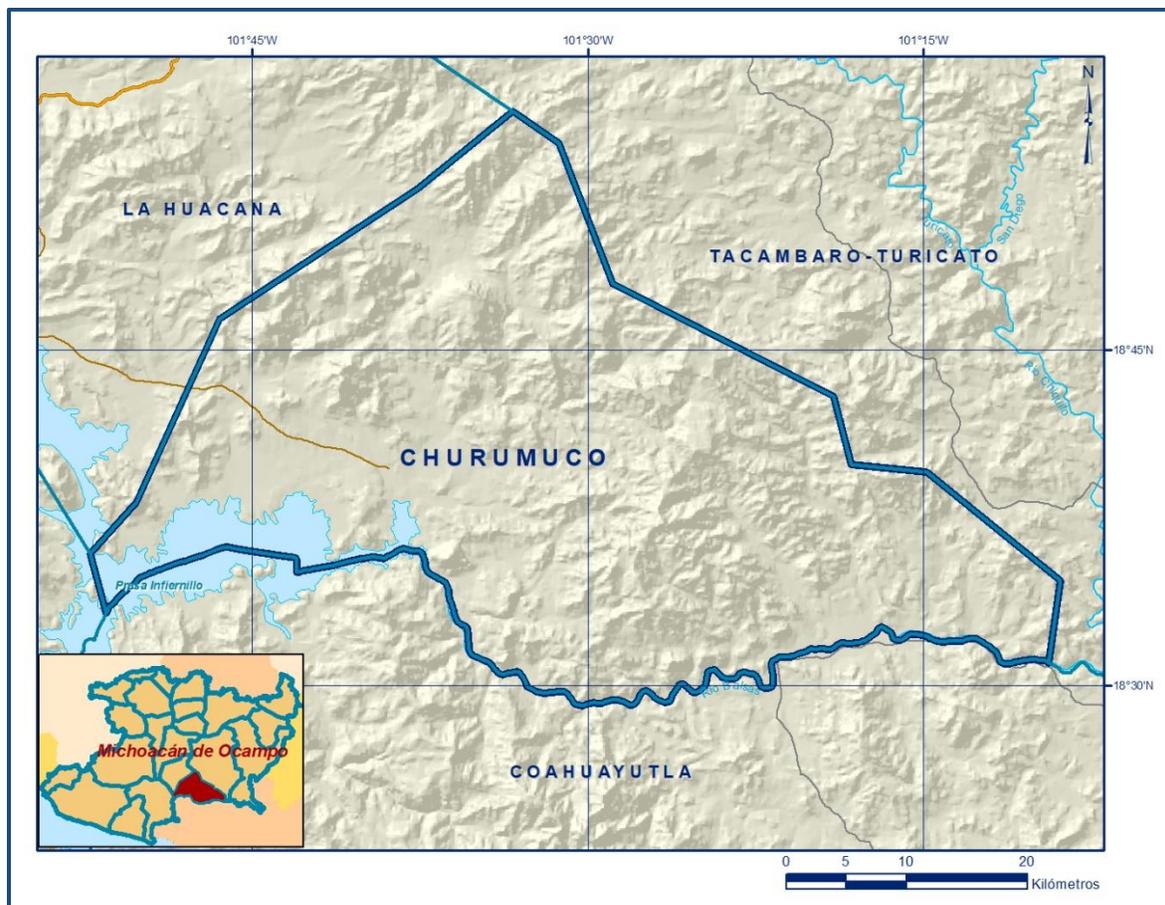


Figura 1. Localización del acuífero

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

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero Churumuco pertenece al Organismo de Cuenca IV Balsas y es jurisdicción territorial de la Dirección Local en Michoacán. El acuífero se encuentra totalmente vedado y sujeto a las disposiciones del “Decreto de veda por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos en la zona del Bajo Balsas, estableciéndose veda por tiempo indefinido para la extracción, alumbramiento y aprovechamiento de aguas del subsuelo en dicha zona”, publicado en el Diario Oficial

de la Federación el 27 de junio de 1975. Esta veda se clasifica como tipo II, en la que la capacidad de los mantos acuíferos sólo permite extracciones para usos domésticos. De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 4.

El acuífero pertenece al Consejo de Cuenca del Río Balsas instalado el 26 de marzo de 1999.

Tabla 1. Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada del acuífero

| ACUIFERO 1613 CHURUMUCO | | | | | | | |
|-------------------------|----------------|---------|----------|---------------|---------|----------|----------------------------------|
| VERTICE | LONGITUD OESTE | | | LATITUD NORTE | | | OBSERVACIONES |
| | GRADOS | MINUTOS | SEGUNDOS | GRADOS | MINUTOS | SEGUNDOS | |
| 1 | 101 | 9 | 23.4 | 18 | 31 | 2.2 | DEL 1 AL 2 POR EL LIMITE ESTATAL |
| 2 | 101 | 51 | 33.4 | 18 | 33 | 14.4 | |
| 3 | 101 | 52 | 15.4 | 18 | 35 | 56.1 | |
| 4 | 101 | 50 | 11.8 | 18 | 38 | 12.6 | |
| 5 | 101 | 46 | 29.4 | 18 | 46 | 24.3 | |
| 6 | 101 | 37 | 38.0 | 18 | 52 | 13.1 | |
| 7 | 101 | 33 | 21.4 | 18 | 55 | 40.5 | |
| 8 | 101 | 31 | 17.4 | 18 | 54 | 15.2 | |
| 9 | 101 | 28 | 54.1 | 18 | 47 | 58.5 | |
| 10 | 101 | 19 | 11 | 18 | 42 | 56.8 | |
| 11 | 101 | 18 | 13.0 | 18 | 39 | 54.7 | |
| 12 | 101 | 14 | 50.8 | 18 | 39 | 34.7 | |
| 13 | 101 | 8 | 53.0 | 18 | 34 | 42.5 | |
| 1 | 101 | 9 | 23.4 | 18 | 31 | 2.2 | |

2 FISIOGRAFÍA

2.1 Provincia fisiográfica

El acuífero se encuentra completamente en la provincia fisiográfica denominada Sierra Madre del Sur, en las subprovincias fisiográficas Cordillera Costera del Sur y una pequeña porción en su extremo suroriental en la Depresión del Balsas.

La Sierra Madre del Sur se originó por el choque de las placas tectónicas Cocos y Norteamericana, está caracterizada por ser un sistema montañoso complejo disectado por corrientes fluviales que en su trayectoria labran valles y llanuras con cañadas, cuyas alturas varían de 150 msnm (presa Infiernillo y la ribera del Río Balsas), hasta casi 2,000 msnm. Se localiza al sur de México y se extiende a lo largo de 1,200 km, desde el sur de Jalisco hasta el Istmo de Tehuantepec en Oaxaca, con una dirección preferencial de noroeste a sureste; en ella nacen varias corrientes que desembocan en el Océano Pacífico y en su vertiente interior se localizan las cuencas de los ríos Balsas, Verde y Tehuantepec. Es la provincia de mayor complejidad

geológica, en ella se encuentran rocas ígneas, sedimentarias y en mayor abundancia rocas metamórficas. Su representación dentro del acuífero se manifiesta con una serie de prominencias topográficas que adquieren sus mayores elevaciones en la parte norte, en donde configuran barrancas y hondonadas, así como cimas que alcanzan altitudes de casi los 2,000 msnm.

La subprovincia Cordillera Costera del Sur, constituye la franja central de la provincia y se caracteriza por estar constituida por rocas sedimentarias, ígneas y metamórficas. Está orientada de manera paralela a la línea de costa por más de 650 km, abarca parte del estado de Michoacán, cruzando todo el estado de Guerrero y parte del estado de Oaxaca. Se encuentra limitada al norte por la Escarpa Limítrofe del Sur, al este por la Depresión del Balsas, al oeste por la Depresión del Tepalcatepec y al sur por los lomeríos de la Costa del Sur.

La subprovincia Depresión tiene como límites al norte la provincia fisiográfica Eje Neovolcánico, al sur está bordeada por la subprovincia Cordillera Costera del Sur, al oeste las subprovincias Neovolcánica Tarasca, Escarpa Limítrofe del Sur y la Cordillera Costera del Sur, y al este la subprovincia Sierra y Valles Guerrerenses (INEGI, 1991). Está conformada por “profundos y sinuosos valles a lo largo de los cuales los ríos Balsas y Tepalcatepec han ido labrando las sierras en algunas partes de 3000 m de altura dándole a esta cuenca una topografía muy abrupta” (Raisz, 1964). En general en las regiones topográficamente más altas está conformada por calizas y conglomerados que muestran un aspecto redondeado, con drenaje ampliamente espaciado; mientras que, por otro lado, los valles, laderas y partes bajas están constituidas por lutitas, areniscas, limolitas y rocas ígneas que conforman lomeríos con pendientes muy suaves y con un drenaje bien desarrollado.

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 predominan tres tipos de climas, en la parte norte el cálido subhúmedo Aw0(w) con un rango de temperatura de 22° a 24°C, en el centro el semiseco muy cálido BS1(h')w(w) con temperatura promedio de 26°C y en la parte sur seca muy cálida BS0(h')w(w) con temperaturas que oscilan entre los 28° y 30°C.

Para la determinación de las condiciones climatológicas, se utilizaron los datos de 6 estaciones que tienen influencia en el área del acuífero, Los Pinzanes, Turicato y La Pastoría en Guerrero, así como Coahuayutla, Zirándaro y Aractichanguio en Michoacán. Con un periodo de registro que comprende 1981-2018 y utilizando el método de polígonos de Thiessen, se determinaron que los valores promedio anuales de temperatura y precipitación potencial son **27.5°C y 756.8 mm**, respectivamente.

El patrón de lluvias es marcadamente estacional y se concentra en los meses de junio a septiembre.

2.3 Hidrografía

El acuífero se ubica en la Región Hidrológica 18 Balsas; casi en su totalidad dentro de la cuenca Río Bajo Balsas y solo un área de 19 km² está comprendida en la cuenca Río Tacámbaro.

El patrón de drenaje que predomina es de tipo dendrítico, controlado por el río Balsas, hacia el este existen varias corrientes que drenan directamente al río entre los que destacan el río Buenavista, Las Ceibas y río La Caña, mientras que al oeste drenan hacia la cola del vaso conformado por la presa Infiernillo, como el arroyo Carrizalito, las Milpillas y las Higueras.

Dentro de sus límites se ubica la presa El Cueramal cuya capacidad de almacenamiento es de 23.7 hm³ para el riego de 975 ha; hacia el sur colinda con el río Balsas y con el vaso de la presa Infiernillo.

2.4 Geomorfología

El paisaje geomorfológico de la zona se caracteriza por estar constituido por sierras, lomeríos y valles intermontanos estrechos; las laderas de las barrancas y valles, definen pendientes mayores de 35%.

La región debe sus rasgos particulares estructurales y geológicos a la relación con la Placa de Cocos que es una de las más activas. En cuanto a las características geomorfológicas, se presentan diferentes grados de resistencia a la erosión, las unidades de menos resistencia se caracterizan por su morfología en forma de hondonadas y valles, mientras que las que presentan mayor resistencia constituyen las mayores elevaciones. El relieve está constituido por sierras complejas y

generalmente cumbres tendidas, disectadas por corrientes fluviales con lomeríos, así como, algunas llanuras con cañadas y algunas mesas con cantiles grandes. Dentro de los puntos más sobresalientes están la sierra Atijo, las mesas El Malpaís, Los Argos, Sanguátaro, Redonda, Atravesada, los cerros: El Mirador, Picacho, Tzicuindio y el Pelón.

3 GEOLOGÍA

La Sierra Madre del Sur (SMS) está compuesta por bloques corticales distintos, delimitados por fallas principales y caracterizados por conjuntos litológicos diferentes (Campa y Coney, 1983). Con base en las variaciones litológicas, Campa y Coney (1983) y Sedlock et al. (1993) subdividieron la SMS en terrenos tectono-estratigráficos, caracterizados por historias sedimentarias y tectónicas diferentes, que fueron amalgamados sucesivamente, durante el Paleozoico y el Mesozoico, mediante acreciones múltiples, a lo largo de la margen continental pacífica de Norte América. En la última década, el detalle creciente en la estratigrafía y las estructuras mayores del sur de México ha llevado muchos autores a modificar parcialmente la distribución y la nomenclatura de los terrenos del sur de México (Talavera-Mendoza y Guerrero-Suástegui, 2000; Dickinson y Lawton, 2001; Keppie, 2004; Talavera-Mendoza et al., 2007; Centeno-García et al., 2008). Es por esta razón que la extensión geográfica, el número, los límites y los nombres de los terrenos varían considerablemente dependiendo de los autores.

Regionalmente la zona queda ubicada dentro del elemento estratotectónico denominado Guerrero, que en este sector se encuentra constituido por una secuencia que tiene como basamento rocas metamórficas del Jurásico, las cuales se encuentran cubiertas por secuencias marinas del Cretácico asociadas a un arco volcánico; sobre éstas se depositaron secuencias volcánicas y vulcanoclásticas cenozoicas y cuaternarias; estas últimas asociadas al vulcanismo de la Sierra Madre Occidental y de la Faja Volcánica Transmexicana.

La distribución general de las distintas unidades litológicas se muestra en la figura 2.

3.1 Estratigrafía

Estratigráficamente la base está representada por una secuencia vulcanosedimentaria constituida por brecha volcánica andesítica y conglomerado-arenisca de la Formación Acuyo, las cuales forman parte del arco Zihuatanejo y éste a la vez conforma parte del terreno Guerrero. La cubierta corresponde a la secuencia

volcánica andesítica-riolítica, de edad Cenozoico correlacionada con la Sierra Madre Occidental. Los depósitos del Cuaternario están representados por limos y arcillas que conforman el aluvión.

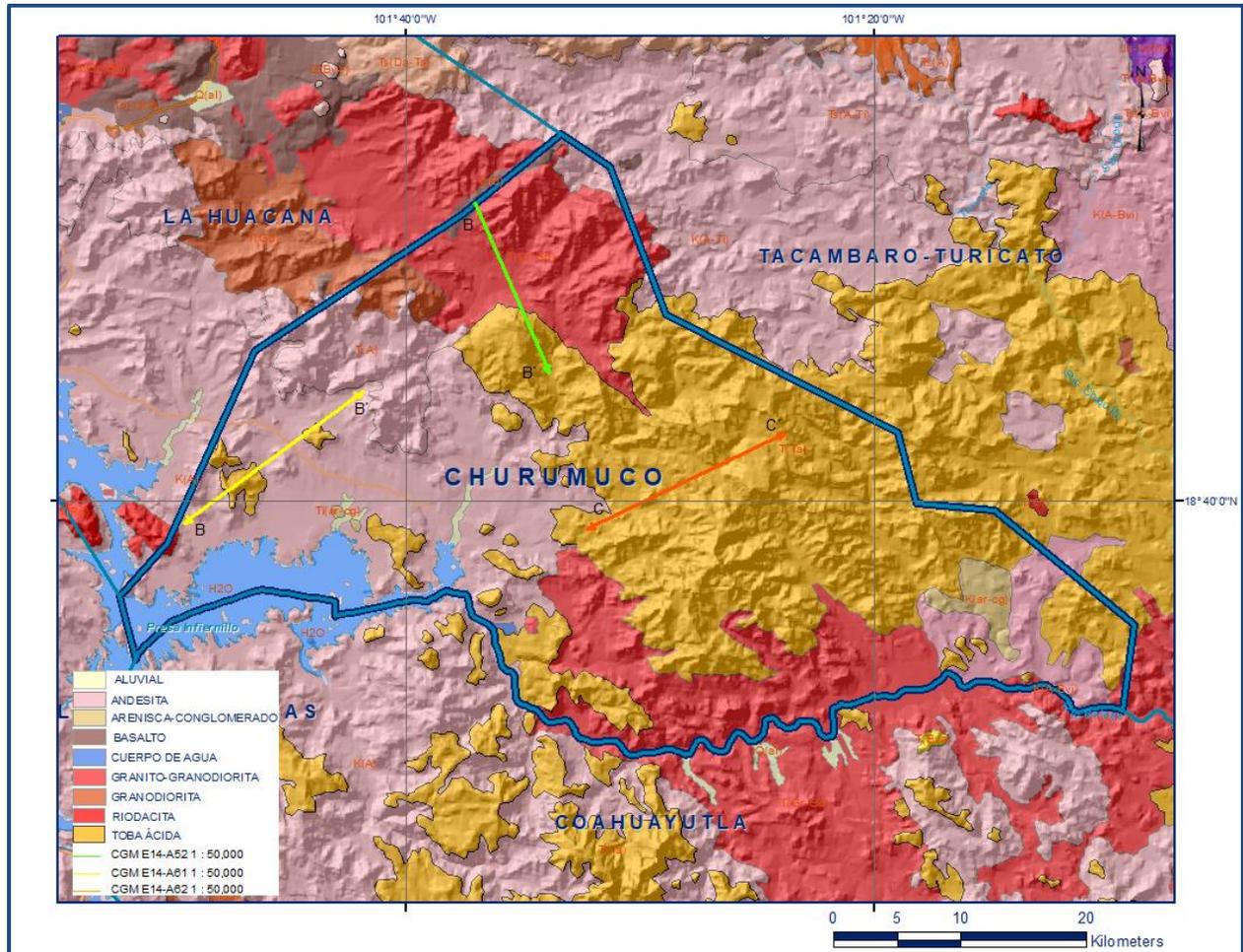


Figura 2. Geología general del acuífero

Arco Zihuatanejo

Localmente está conformado por brecha volcánica andesítica (KiBvA) y terrígenos de la Formación Acuyo (KiCgp-Ar), es una potente sucesión de rocas volcánicas de composición basáltica andesítica, en las que se intercalan capas de grauvaca y limolitas volcánicas. Los afloramientos de la brecha andesítica se encuentran en el norte, presentan textura microcristalina, constituida por mineras esenciales de plagioclasa, piroxenos alterándose a hematita y calcita como secundarios; la edad de la unidad litológica está completamente definida, no obstante, en la carta Acuyo, con base en su posición estratigráfica, tentativamente se le asigna una edad del Cretácico

Inferior. La Formación Auyo aflora en el centro del acuífero, constituida principalmente por arenisca volcánica de grano mediano, graduando a arenisca gruesa; localmente los estratos presentan espesores de 0.2 a 1.2 m, con rumbo e inclinación variando de N50°-75E, con base a las elaciones de campo definidas en la carta Auyo (CRM-UAG,1996), y su asociación genética con el arco Amengarcuaro, se le asigna una edad de Cretácico Inferior.

Sierra Madre Occidental

Localmente, la base está representada por brecha y lava andesítica (TeoBvA-A), le sobreyace riolita y flujos riolíticos (TomR-BvR). La primera es una unidad volcanoclástica andesítica, constituida predominantemente por brecha prioclástica andesítica y lavas de la misma composición, en algunos puntos petrográficamente se ha clasificado como latita, atribuyendo esta variación a la posibilidad de una diferenciación magmática local. Se ha confirmado que dentro de este paquete andesítico se intercalan flujos riolíticos.

La riolita-brecha riolítica (TomR-BvR), es considerada la culminación del magmatismo félsico, el cual precedió al vulcanismo intermedio ya descrito; sus afloramientos se pueden observar en la parte central del acuífero; la unidad volcánica félsica está conformada por flujos riolíticos ascendente y brechas de la misma composición. Por su posición y por no estar afectada por el intrusivo, se le asigna una edad del Oligoceno tardío al Mioceno.

Afectando a ambas secuencias aflora, ampliamente, un intrusivo de composición granito granodiorita (ToGr-Gd), de edad oligocénica, forma parte del batolito Michoacán-Guerrero; en el distrito minero de Inguarán reportan dos edades isotópicas, la primera en biotita, por K/Ar, con 35.6 ± 0.8 Ma; por otra parte, Petróleos Mexicanos obtuvo edades que varían de 29 ± 1 hasta 38 ± 3 Ma, ubicándolo dentro del Oligoceno.

Rocas ígneas intrusivas

Afloran al centro, sur y este del acuífero, que consistente en un batolito que aflora al norte y sur, constituido por granitos y granodioritas; se ha considera que es un mismo intrusivo con diferenciaciones locales, así mismo este intrusivo está afectado por diques aplíticos de edad posterior.

Rocas extrusivas

Estas rocas afloran en la parte centro del acuífero, aparecen en dos períodos, la primera de ellas en el Cretácico y están constituidas en su gran mayoría por andesitas, posteriormente se depositaron rocas volcánicas del Cenozoico, constituidos por tobas ácidas.

Depósitos Aluviales

Corresponden con sedimentos continentales transportados por las principales corrientes fluviales y están constituidos principalmente por arenas, arcillas y limos, producto de la desintegración de las rocas preexistentes. Se localizan en las riberas de los afluentes a la presa Infiernillo. Se le asigna una edad del Holoceno.

3.2 Geología estructural

El contexto geológico definido por los distintos eventos que han dado origen al acuífero Churumuco, está asociado al establecimiento y evolución del denominado Terreno Guerrero, el cual en el Cenozoico fue cubierto por dos potentes secuencias de materiales volcánicos asociados, la más antigua perteneciente a la Sierra Madre Occidental y la segunda perteneciente a la Faja Volcánica Transmexicana.

El elemento estratotectónico denominado Terreno Guerrero, en los límites de los estados de México, Guerrero y Michoacán, está integrado por los llamados subterrenos Zihuatanejo, Huetamo, Arcelia y Teloloapan. El acuífero se ubica en la denominada Unidad Huetamo.

Estructuralmente se determinó un dominio de deformación frágil, representado por sistemas de fallamiento normal, los de mayor longitud de orientación NW 25°-45° SE; paralelos a éstos se asocian otros de menor extensión, relacionados con la mineralización cuprífera de la región. Se tiene otro sistema bien definido con SW, sensiblemente perpendicular al primero, al cual desplaza. Entre las fallas principales se encuentra la falla Buena Vista, de tipo normal, presenta un rumbo de 45° W e inclinación de 45° al NE, con una longitud de 238 km. Asociada a esta falla lateral regional, al noroeste, se encuentra la falla Atijo interpretada como falla lateral derecha, su rumbo es de N 43° W con longitud de 2.5 km.

Dentro de un modelo de geosinclinal, el arco Zihuatanejo (Amengarícuaro), representaría al eugeosinclinal, desarrollado en un ambiente de cuenca antes o

después de la convergencia de la placa Farallón con Norteamérica, durante el Jurásico tardío-Cretácico temprano, el análisis geoquímico de las andesitas muestra firma isotópica de arco oceánico (carta Acuyo), lo cual corrobora la aplicación del modelo. La Formación Acuyo, constituido por una alternancia de conglomerados y arenisca constituye parte del mismo modelo, depositados por flujos de gravedad; esta sedimentación se desarrolló en una facies proximal de “apron”, representando parte del abanico medio.

Numerosas fracturas tanto izquierdas como derechas han sido observadas en la región.

Al sur de la región, en el límite con el estado de Guerrero, se determinó un dominio de deformación frágil, representado por el sistema de fallamiento normal, los de mayor longitud presentan una orientación NW 25-45° SE; paralelos a éstos se asocian otros de menor extensión, relacionados con la mineralización cuprífera de la región.

3.3 Geología del subsuelo

De acuerdo con la geología superficial y por correlación con el acuífero vecino de Coahuayutla, se determina que el acuífero está constituido, en su porción superior, por sedimentos aluviales, fluviales y conglomerados, mientras que la porción inferior está conformada por rocas ígneas de composición riolíticas (figura 3). Esta unidad constituye el acuífero regional que tiene mayor potencial hidrogeológico.

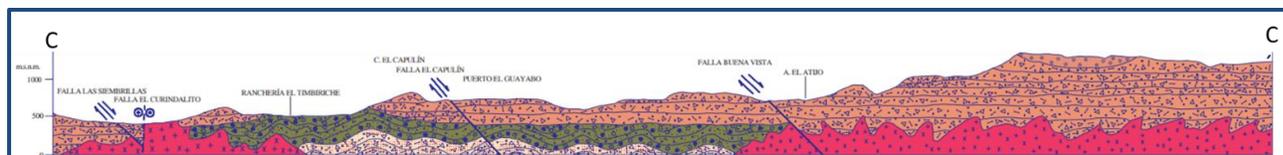
El medio fracturado está asociado a la zona de alteración de las rocas intrusivas principalmente.



Fuente: Carta Geológico-Minera E14-A61 “Las Cañas”. Esc. 1:50,000 (SGM,1996)



Fuente: Carta geológico-Minera E14-A52 “Zárate”. Esc. 1:50,000 (SGM,1996)



Fuente: Carta geológico-Minera E14-A62 "Churumuco". Esc. 1:50,000 (SGM,1996)

Figura 3. Secciones geológicas esquemáticas

4 HIDROGEOLOGÍA

4.1 Tipo de acuífero

Las evidencias geológicas permiten establecer la presencia de un acuífero de **tipo libre** heterogéneo, constituido, en su porción superior, por un medio granular poroso conformado por los depósitos aluviales, fluviales y conglomerados de granulometría diversa, no consolidados y semi-consolidados, originados a partir del intemperismo y erosión de las diversas unidades geológicas que afloran en la zona, estos materiales presentan permeabilidad media a baja y se ubican en los cauces de los ríos y arroyos, así como en el gran valle que se conformó en las inmediaciones de la porción inferior se aloja en un medio fracturado constituido por rocas volcánicas, vulcanosedimentarias y sedimentarias, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento y alteración. El flujo subterráneo está definido por el río Balsas y por el vaso de la presa Infiernillo.

5 BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

Debido a la poca información piezométrica actual e histórica en la superficie que cubre el acuífero y a que se encuentra dispersa en espacio y tiempo; hace imposible extrapolarla para elaborar configuraciones del nivel estático que permitan el planteamiento de un balance de aguas subterráneas tradicional. Por lo tanto, se optó por plantear un balance hidrometeorológico en el área de balance de **1,729.6 km²** del acuífero, para estimar de manera conservadora el volumen de agua susceptible de infiltrarse para recargar al acuífero.

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:

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

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:

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

5.1 Entradas

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

5.1.1 Recarga vertical (R_v)

La recarga vertical total que recibe el acuífero (volumen susceptible de infiltrarse) se obtuvo mediante el planteamiento de un balance hidrometeorológico para toda 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 cubierta por el acuífero se obtiene al multiplicar su área ($1,729.6 \text{ km}^2$) por la lámina de precipitación media anual (756.8 mm):

$$V_{LL} = 1,729.6 \text{ km}^2 (0.7568 \text{ m}) = 1,309.0 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

Para la estimación de la evapotranspiración real se utilizó la ecuación empírica de Coutagne, considerando el valor medio anual de precipitación de 756.8 mm y

temperatura de 27.5 °C. Coutagne propuso la ecuación siguiente para calcular la evapotranspiración real:

| | |
|-------------------------------|----------------------|
| COUTAGNE | $ETR = P - \chi P^2$ |
| Donde: | |
| ETR= Evapotranspiración m/año | |
| P = precipitación en m/año | |
| $\chi = 1/(0.8 + 0.14 t)$ | |
| t = temperatura en °C | |

La fórmula sólo es aplicable para valores de la precipitación media anual (P) comprendidos entre $1/8\lambda$ y $1/2\lambda$, en la que ETR y P se expresa en metros, y T en °C. Si P es menor que $1/8\lambda$ la ETR es igual a la precipitación, es decir, no existe escurrimiento; si la precipitación es mayor que $1/2\lambda$ la ETR es prácticamente independiente de P y su valor está dado por $ETR = 0.20 + 0.035 T$. Aplicando la ecuación de Coutagne se obtiene una lámina de evapotranspiración real de **634.0 mm anuales**. Por lo tanto el volumen de ETR es:

$$V_{ETR} = 1,729.6 \text{ km}^2 (0.634 \text{ m}) = 1,096.6 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

Para determinar el volumen de escurrimiento debido a la lluvia se utilizó el método establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, publicada en el Diario Oficial de la Federación, de fecha 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. El volumen anual medio de escurrimiento natural es igual a la precipitación media anual por el área y por un coeficiente de escurrimiento.

Para determinar el valor de escurrimiento, la normatividad establece la siguiente relación:

$$\begin{array}{ccccccc} \text{VOLUMEN ANUAL DE} & & & & & & \\ \text{ESCURRIMIENTO} & & & & & & \\ \text{NATURAL DE LA} & = & \text{PRECIPITACION} & * & \text{AREA DE LA} & * & \text{COEFICIENTE DE} \\ \text{CUENCA} & & \text{ANUAL DE LA} & & \text{CUENCA} & & \text{ESCURRIMIENTO} \\ & & \text{CUENCA} & & & & \end{array}$$

El coeficiente de escurrimiento (C_e) 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, Geografía e Informática, 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 (C_e), 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

$$C_e = K (P-250) / 2000$$

Si K es mayor que 0.15

$$C_e = K (P-250) / 2000 + (K - 0.15) / 1.5$$

Donde:

P = Precipitación anual;

C_e = Coeficiente de escurrimiento anual;

K = Parámetro que depende del tipo, uso y cubierta del 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 |
| Pasizal: | | | |
| % 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 | CARACTERÍSTICAS | | |
| 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 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 Churumuco, predominan los siguientes tipos de suelo: cuerpos de agua, Feozem, Fluvisol, Litosol, Luvisol, Regosol y Vertisol que se clasifican en dos tipos de suelo: B y C (figura 4).

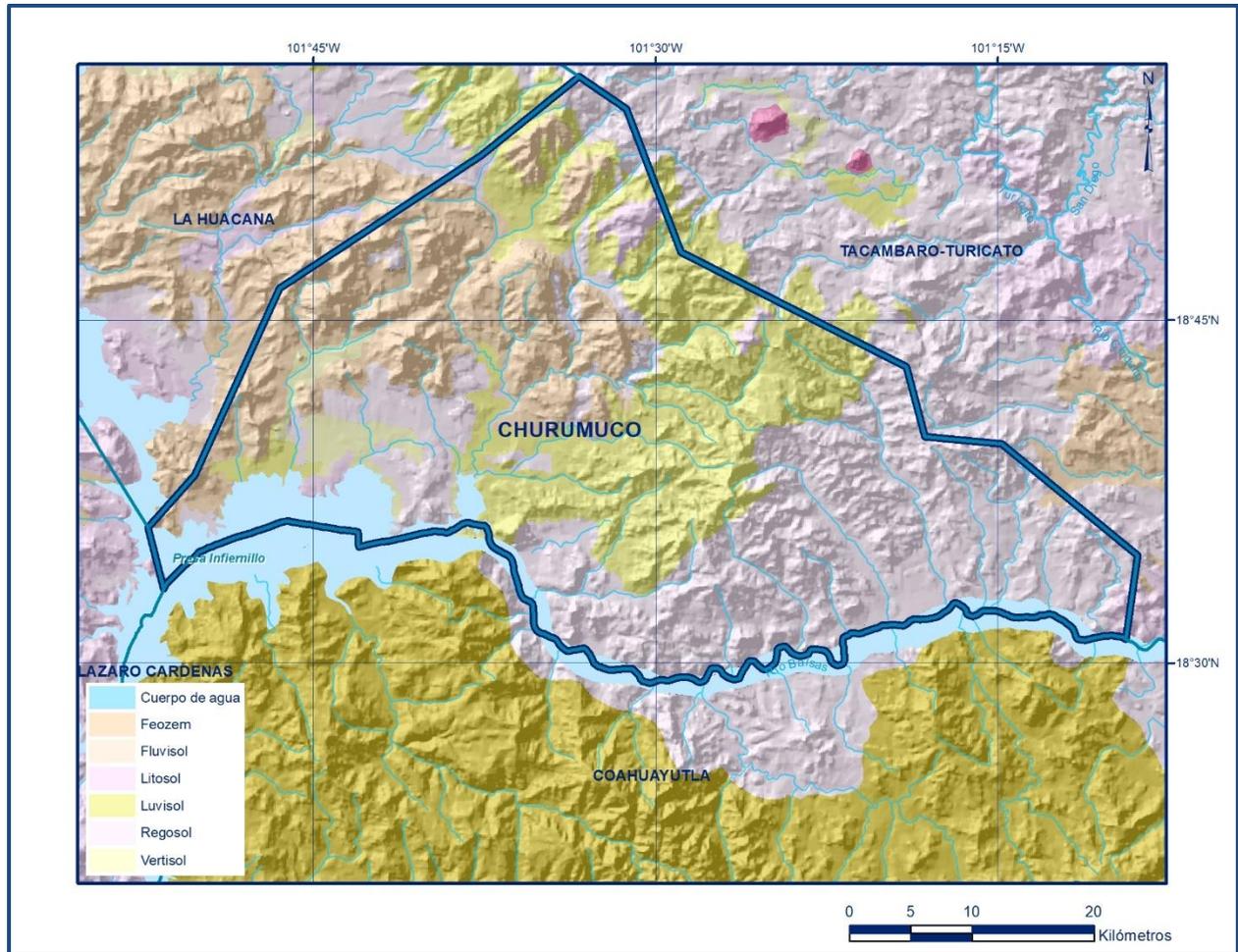


Figura 4. Tipo de suelo

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: agricultura, asentamientos humanos, selva, bosque, cuerpos de agua, otros tipos, pastizal, selva y sin vegetación aparente (figura 5).

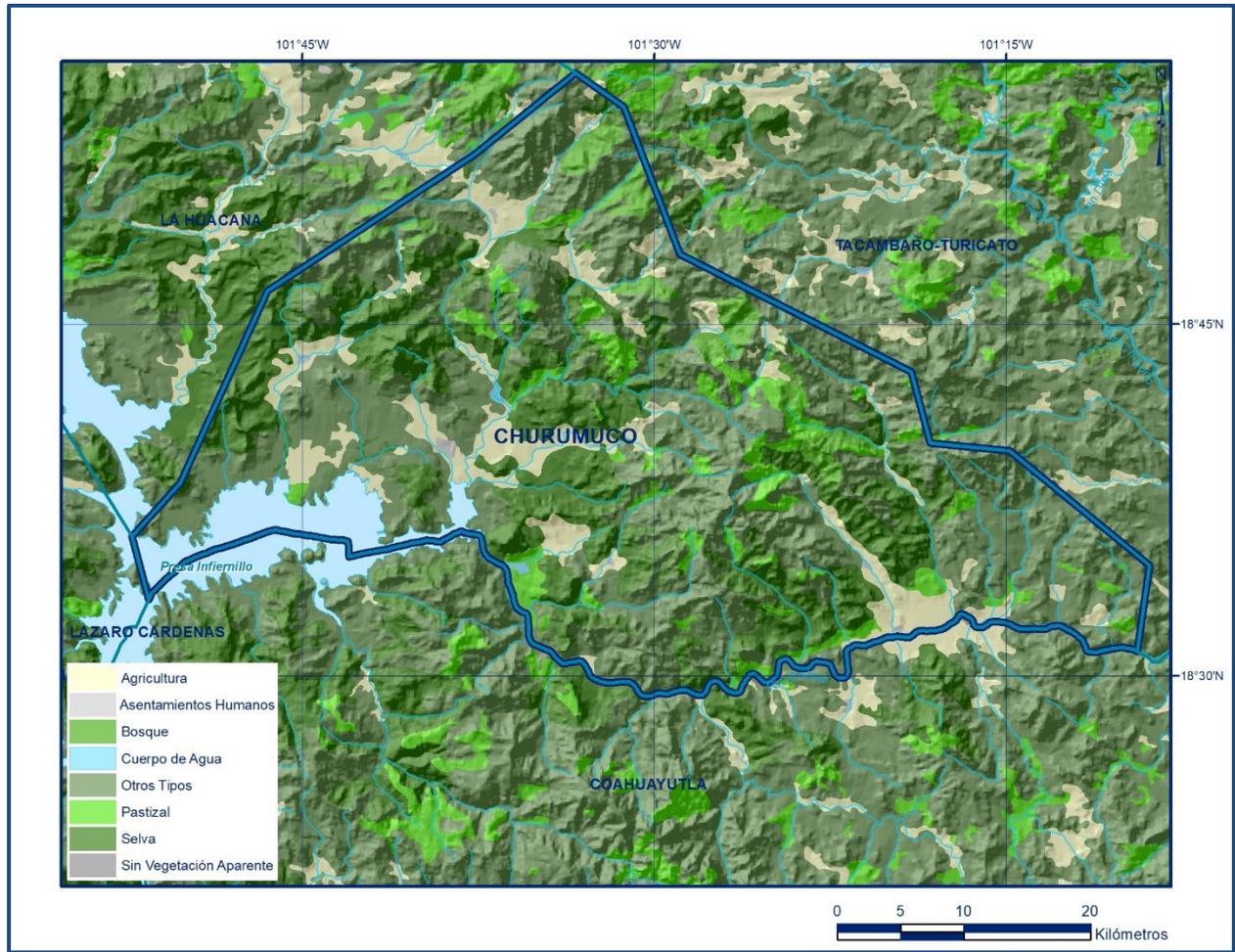


Figura 5. Uso del suelo

De esta manera, el valor de K se obtuvo como promedio ponderado y es igual a 0.25, valor que se aplicó en la siguiente ecuación para obtener el coeficiente de escurrimiento (C_e):

$$C_e = K (P-250)/2000 + (K-0.15)/1.5$$

$$C_e = 0.130$$

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

$$V_{ESC} = 0.130 (1,309.0 \text{ hm}^3) = 170.1 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

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

$$\begin{aligned}V_{INF} &= V_{LL} - V_{ETR} - V_{ESC} \quad (2) \\V_{INF} &= 1,309.0 - 1,096.6 - 170.1 \\V_{INF} &= 42.3 \text{ hm}^3 \text{ anuales}\end{aligned}$$

Al dividir el volumen promedio anual infiltrado, entre el volumen anual promedio precipitado, que es 1,309.0 hm³/año, se obtiene el coeficiente de infiltración de 0.0323. De acuerdo con lo anterior, el volumen susceptible de infiltrarse es de 42.3 hm³/año en los 1,729.6 km² de superficie del acuífero.

Por lo que la **Rv = 42.3 hm³ anuales**

5.2 Salidas

Las salidas de agua subterránea estimadas en este balance son las siguientes:

La descarga del acuífero ocurre principalmente por bombeo (B), y por la descarga de manantiales (Dm) existentes.

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 **0.8 hm³ anuales**, a la fecha de corte del 30 de diciembre del 2022.

5.2.2 Descarga a través de manantiales (Dm)

De acuerdo con información de 2017, se identificó la existencia de 51 manantiales, que en conjunto descargan **35.6 hm³ 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:

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

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

6.1 Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde a la suma de los volúmenes que ingresan al acuífero en forma de recarga vertical. Para este caso, el valor estimado de la recarga total media anual que recibe el acuífero es de **42.3 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 están comprometidos 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 **35.6 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 **821,571 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos e 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 aguas subterráneas.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 42.3 - 35.6 - 0.821571 \\ \text{DMA} &= 5.878429 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible de **5,878,429 m³ anuales** para otorgar en nuevas concesiones.

7 BIBLIOGRAFÍA

Servicio Geológico Mexicano, 1996. Carta Geológico-Minera E14-A52 "Zárate". Escala: 1:50,000.

Servicio Geológico Mexicano, 1996. Carta Geológico-Minera E14-A61 "Las Cañas". Escala: 1:50,000.

Servicio Geológico Mexicano, 1996. Carta Geológico-Minera E14-A62 "Churumuco". Escala: 1:50,000.