

SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO BACADÉHUACHI (2654), ESTADO DE
SONORA**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1	GENERALIDADES.....	2
	Antecedentes	2
1.1	Localización.....	2
1.2	Situación administrativa del acuífero.....	4
2	ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD	4
3	FISIOGRAFÍA.....	5
3.1	Provincia fisiográfica	5
3.2	Clima	5
3.3	Hidrografía.....	6
3.4	Geomorfología.....	6
4	GEOLOGÍA.....	7
4.1	Estratigrafía	8
4.2	Geología estructural	10
4.3	Geología del subsuelo.....	11
5	HIDROGEOLOGÍA.....	11
5.1	Tipo de acuífero.....	11
5.2	Parámetros hidráulicos	12
5.3	Piezometría.....	12
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	17
7	BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	17
7.1	Entradas.....	18
7.1.1	Recarga vertical (Rv).....	18
7.1.2	Recarga Inducida (Ri)	19
7.1.2	Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	19
7.2	Salidas	22
7.2.1	Evapotranspiración Real (ETR)	22
7.2.2	Extracción por bombeo (B).....	23
7.2.3	Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)	24
7.2.4	Descargas naturales por manantiales (Dm).....	24
7.3	Cambio de almacenamiento (ΔVS)	24
8	DISPONIBILIDAD	25
8.1	Recarga total media anual (R).....	26
8.2	Descarga natural comprometida (DNC).....	26
8.3	Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	26
8.4	Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	27
9	BIBLIOGRAFÍA	28

1 GENERALIDADES

Antecedentes

La Ley de Aguas Nacionales (LAN) y su Reglamento contemplan que la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) debe publicar en el Diario Oficial de la Federación (DOF), la disponibilidad de las aguas nacionales, en el caso de las aguas subterráneas esto debe ser por acuífero, de acuerdo con los estudios técnicos correspondientes y conforme a los lineamientos que considera la “NORMA Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, Conservación del recurso agua- Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales”.

Esta norma ha sido preparada por un grupo de especialistas de la iniciativa privada, instituciones académicas, asociaciones de profesionales, gobiernos estatales y municipales y de la CONAGUA.

La NOM establece para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas la realización de un balance de las mismas donde se defina de manera precisa la recarga, de ésta deducir los volúmenes comprometidos con otros acuíferos, la demanda de los ecosistemas y el volumen de extracción de aguas subterráneas.

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

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

1.1 Localización

El acuífero Bacadéhuachi, definido con la clave 2654 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción noreste del Estado de Sonora, entre las coordenadas geográficas 29° 44' y 30° 07' de latitud, y 108° 55' y 110° 15' de longitud, cubriendo una superficie de 1002 km². Limita al norte con los acuíferos Río Bavispe y Villa Hidalgo, al oeste con Huásabas y al este y sur con Nácori Chico (figura 1).

Geopolíticamente cubre parcialmente territorio de los municipios Bacadéhuachi, Huásabas, Nácori Chico, Granados, Huachineras y Villa Hidalgo.

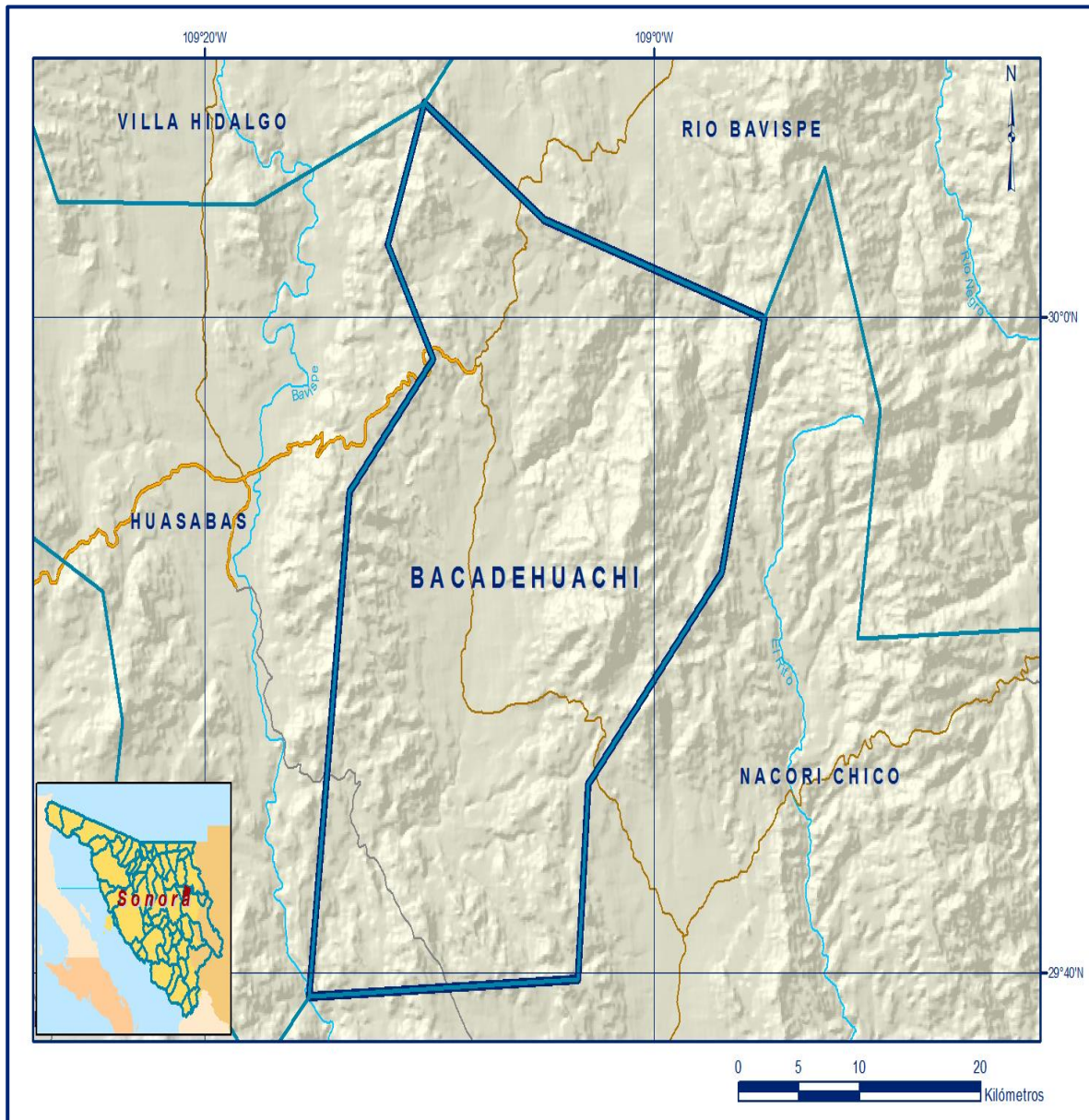


Figura 1. Localización del acuífero

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

Tabla 1. Coordenadas de la poligonal simplificada del acuífero

ACUIFERO 2654 BACADEHUACHI						
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE		
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS
1	109	4	53.5	30	2	58.9
2	108	55	5.7	29	59	59.5
3	108	56	59.8	29	52	14.1
4	109	2	57.0	29	45	45.4
5	109	3	23.2	29	39	48.2
6	109	15	22.0	29	39	16.3
7	109	13	34.5	29	54	41.8
8	109	9	51.0	29	58	44.3
9	109	11	53.1	30	2	14.7
10	109	10	14.7	30	6	33.8
1	109	4	53.5	30	2	58.9

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero Bacadéhuachi pertenece al Organismo de Cuenca Noroeste. Su territorio no se encuentra regido por ningún decreto de veda para aguas subterráneas.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 4.

Aunque el volumen de extracción es incipiente, el segundo uso principal del agua, después del sector pecuario, es el agrícola. En el acuífero no se localiza distrito o unidad de riego alguna, ni tampoco se ha constituido hasta la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2 ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

No existen estudios de evaluación geohidrológica realizados en la superficie que cubre el acuífero, ni en la región, ya que se trata de acuíferos intermontanos en los que la extracción del agua subterránea es incipiente y donde no existe competencia por su uso. Los únicos realizados son con fines de exploración minera.

ACTUALIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LOS ACUÍFEROS DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO YAQUI, MÁTAPE, ESTADO DE SONORA realizado por el Servicio Geológico Mexicano, en convenio con comisión nacional del agua, 2008. Este estudio realiza una evaluación preliminar de algunos acuíferos serranos del estado de Sonora, entre ellos Villa Hidalgo, incluyendo actividades de campo para el planteamiento del balance de aguas subterráneas: censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría y pruebas de bombeo.

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

3 FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia fisiográfica

El acuífero Bacadéhuachi se localiza en la porción noreste del Estado de Sonora, en la Provincia Fisiográfica Sierra Madre Occidental, en la Subprovincia Sierras y Cañadas del Norte. Esta subprovincia se caracteriza por un dominio de sierras ocasionalmente asociadas a valles.

La zona del acuífero está formada principalmente por sierras, que corresponden a altos estructurales, entre las cuales se localiza un valle intermontano con orientación preferente norte-sur. En las sierras dominan las rocas volcánicas ácidas, mientras que en los valles abundan los materiales sedimentarios continentales (conglomerados del Terciario y aluviones).

La zona se caracteriza por rocas sedimentarias, volcánicas e intrusivas, cuya topografía es abrupta en las sierras Los Ciriales y Huásabas, así como los cerros Colorado, Los Novillos, entre otros. La zona de valle se encuentra cubierta por sedimentos de la Formación Báucarit, depósitos del Pleistoceno y material granular del Holoceno, con una amplitud de 8 km por una longitud aproximada de 20 km.

3.2 Clima

De acuerdo a la clasificación de Köppen Modificada por E. García (1981), gran parte de la zona corresponde al grupo de climas secos, tipo semiseco, cuya precipitación media anual varía de 400 a 700 mm.

En la Sierra Los Ciriales, al noroeste del acuífero, se presenta el subgrupo de climas templados, el cual es característico de altitudes entre 1000 y 2000 msnm. De manera particular existen 3 subtipos de climas.

Semiseco templado BS1kw(x'). En el 47% del área se presenta este subtipo de clima, con un porcentaje de lluvia invernal mayor a 10.2. Se caracteriza por ser templado con verano cálido, una temperatura media anual de 12 a 18° C, con una temperatura media del mes más frío de entre 1 y 3° C.

Semiseco semicálido BS1hw(x'). A diferencia del subtipo anterior, es semicálido con invierno fresco y temperatura media anual mayor de 18° C. La temperatura media del mes más frío es menor a 18° C. El 48% del área presenta este clima.

Templados subhúmedos con lluvias en verano C(Wo)(x'). Solamente un 5.1% del área se caracteriza por este tipo de clima, se trata del más seco de los subhúmedos, con precipitaciones del mes más seco menores a 40 mm. El análisis climatológico se llevó a cabo en tres estaciones con influencia en el acuífero: Granados, Bacadéhuachi y Huásabas, ubicadas en las comunidades que llevan el mismo nombre. El acuífero Bacadéhuachi tiene una temperatura media anual de 26.2° C, una precipitación media anual de 470.8 mm, y una evaporación potencial es de 2,127 mm/año.

3.3 Hidrografía

El acuífero Bacadéhuachi queda comprendido dentro de la Región Hidrológica 9 Sonora Sur. Esta región tiene un relieve de contrastante altimetría, la mayoría de sus corrientes nacen en la Sierra Madre Occidental. Pertenece a la Cuenca Río Yaqui (B), Subcuenca Río Bavispe-Presa La Angostura.

La corriente superficial más importante del área es el Río Bacadéhuachi, de tipo intermitente. Nace en la Sierra los Ciriales, al este de la zona, para dirigirse en dirección norte hasta las inmediaciones del poblado Santo Domingo, después cambia su trayectoria al suroeste, pasando por la comunidad Bacadéhuachi, hasta el poblado San Gabriel, para después unirse al cauce del Río Bavispe, al suroeste del acuífero. Otras corrientes superficiales importantes son el Río Taraverachi, Río El Coyote, Río Huérigo y los arroyos Chino Lloroso, Colorado y La Galera.

La infraestructura hidráulica existente en este acuífero consiste de obras de captación de agua subterránea, en su mayoría norias con niveles estáticos de poca profundidad y pozos con la misma característica. Al sur del poblado Bacadéhuachi existen 2 presas derivadoras utilizadas principalmente para riego agrícola de cultivo como cebada, sorgo, maíz, avena y frijol por el método de gravedad.

3.4 Geomorfología

La geomorfología del área corresponde al ciclo de juventud avanzada, esto se observa por las reducidas distancias de una elevación a otra. Dentro del área existen altitudes de 2300 msnm en la Sierra Los Ciriales, al este del acuífero, de igual forma en los cerros La Flaca y otros.

Elevaciones de 2000 m se alcanzan al este y noreste del poblado de Santo Domingo, mientras que al noroeste hay elevaciones de hasta 1800 msnm (Cerro El Ranchito), de igual forma en el extremo poniente de la zona, se presentan elevaciones que varían entre 1400 y 1600 msnm. En su mayoría el drenaje superficial corresponde al tipo dendrítico, observándose principalmente en zonas de pie de monte y valle. Si bien en su nacimiento el Río Bacadéhuachi corresponde a un drenaje de tipo anular, ya que rodea en sentido antihorario la Sierra Los Ciriales, sus tributarios generan un drenaje de tipo radial divergente a las formaciones rocosas con relieve topográfico accidentado y elevaciones mayores.

4 GEOLOGÍA

El área donde se enmarca el acuífero Bacadéhuachi presenta un contexto geológico variado, afloran rocas cuyas edades varían desde el Mesozoico hasta el reciente. A continuación, se describen las unidades estratigráficas (figura 2). De manera general la secuencia mesozoica está formada principalmente por andesitas, mientras que las rocas cenozoicas se componen de tobas, riolitas y basaltos. Afloran rocas volcánicas como resultado de la influencia de la Sierra Madre Occidental.

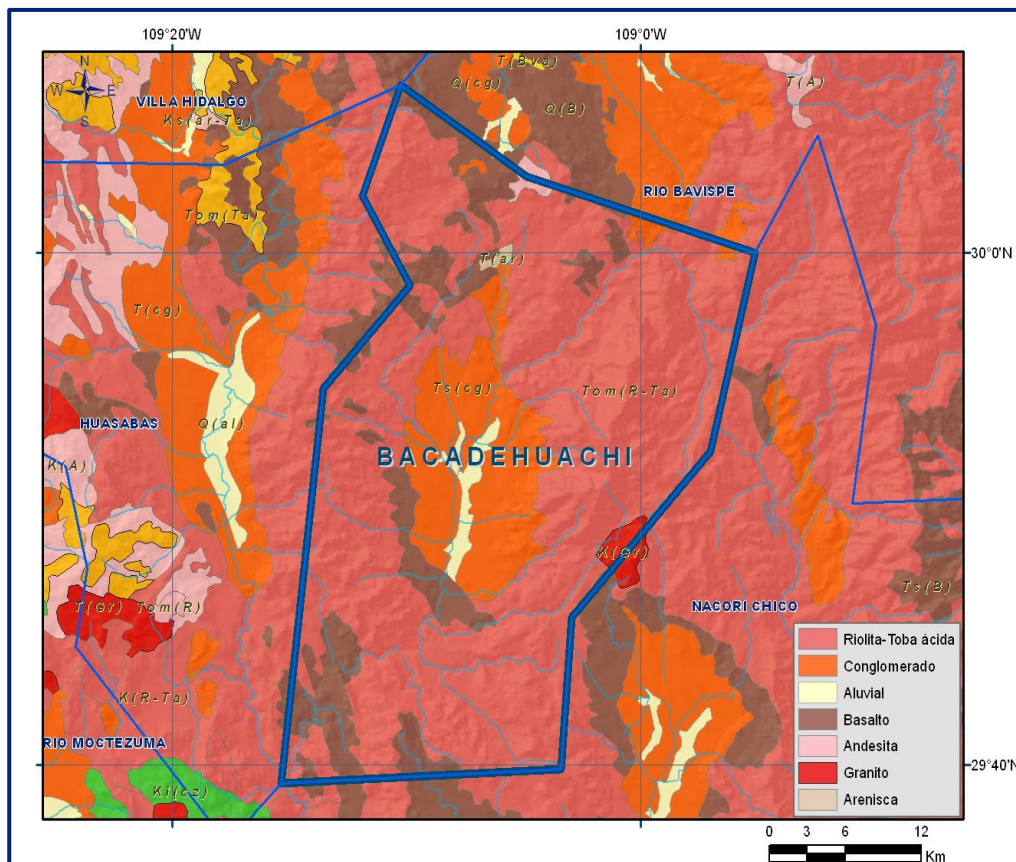


Figura 2. Geología general del acuífero.

4.1 Estratigrafía

Rocas Mesozoicas

Los afloramientos de esta edad se localizan al noroeste, suroeste y porción central del acuífero, cuyo rango de edad varía del Cretácico Superior al Terciario Inferior.

Granodiorita-Diorita (KsTeGd-D). Intrusivo que forma parte del Batolito Laramide, de color gris claro, de estructura compacta y textura porfirítica, con fenocristales de cuarzo, feldespatos alterados y micas. Los cristales son de grano medio y la matriz equiangular, fuerte presencia de plagioclasa subhedral con abundante cuarzo intersticial y biotita anhedral.

Su edad varía del Cretácico Superior al Eoceno. Sus afloramientos principales se localizan en la Sierra Los Ciriales, mientras que su grado de compactación y escaso fracturamiento generan una permeabilidad nula. Esta unidad opera como basamento hidrogeológico.

Andesita-Arenisca (KsTpa A-Ar). Unidad volcanosedimentaria que forma parte del Complejo Volcánico Inferior. Constituida principalmente por andesitas de color verde y textura afanítica, compacta, presentándose en algunas áreas como aglomerados andesíticos, además de toba andesítica, caliza, toba riolítica, brecha dacítica y arenisca tobácea. Aflora en el Cerro La Muralla, al este de Bacadéhuachi. Por su bajo grado de fracturamiento esta unidad se caracteriza por tener permeabilidad baja, aunque en zonas particulares donde se incrementa el fracturamiento funciona como zona de recarga.

Andesita-Toba Andesita (KsTe A-TA). Unidad volcanoclástica que constituye el Complejo Volcánico Inferior. Litológicamente compuesta por arenisca, toba andesítica, caliza, toba riolítica, brecha dacítica y arenisca tobácea, con espesor que varía entre 500 y 1500 m, correlacionable con la Formación Tarahumara. Aflora al noroeste y suroeste de la zona, donde sus características de fracturamiento hacen que tenga una permeabilidad que varía de media a baja.

Rocas Cenozoicas

Los afloramientos terciarios consisten de rocas intrusivas, volcánicas y sedimentarias continentales. En el Mioceno las características del volcanismo cambian fundamentalmente con la aparición de rocas básicas.

Un episodio distensivo se manifiesta por la formación de depresiones endorreicas que se rellenan con depósitos conglomeráticos, limos y arenas, así como depósitos de basaltos y tobas riolíticas (secuencia bimodal) que ocasionalmente se intercalan con las secuencias detríticas continentales. Finalmente, los procesos de erosión de las rocas preexistentes generan unidades sedimentarias recientes: gravas, arenas y limos en el acuífero.

Toba Riolita-Ignimbrita (To TR-Ig). Aflora en la Sierra Los Ciriales, formada por tobas riolíticas, ignimbritas y en la parte superior andesitas y tobas andesíticas. Desde el punto de vista geohidrológico esta unidad se considera de recarga debido a una moderada presencia de fallas y fracturas de rumbo preferente noreste-suroeste.

Secuencia Volcánica Ácida ToR-TR. Es una secuencia de rocas volcánicas representadas por aglomerados, riolitas, tobas riolíticas ignimbritas y brechas con permeabilidad media que generalmente forman largas mesetas de orientación noroeste-sureste, formando parte del evento volcánico oligomiocénico que dio lugar a la formación de la Sierra Madre Occidental, conocida como el Súper Grupo Volcánico Superior. Estas rocas se encuentran ampliamente distribuidas al poniente y sur poniente del acuífero, formando parte del medio fracturado que sirve de recarga al mismo, el espesor de esta secuencia posiblemente sea mayor de 1,000 m.

Secuencia Bimodal Andesita-Basalto (To A-B), Basalto (To B) (Tm B). Se denomina secuencia Bimodal a una serie de flujo de rocas volcánicas de composición andesítico-basáltico, basáltico y andesítico-riolítico que se presentan como andesitas basálticas y basaltos con ocasionales intercalaciones de tobas riolíticas que en algunos lugares sobrepasan los 500 m.

Las rocas andesíticas-basálticas afloran en las sierras Los Ciriales y Huásabas, donde la secuencia está formada por tobas riolíticas ignimbritas, en la parte superior andesitas y tobas andesíticas se encuentran en discordancia erosional sobre unidades más antiguas, a la vez que es sobreyacida en discordancia por la Formación Báucarit.

La unidad aflora al sur de la Sierra San Diego, mientras que el basalto del Mioceno se localiza en la parte sur del acuífero, al este de San Gabriel de los Castores, y forma parte de la Secuencia Bimodal, consistiendo litológicamente de andesita basáltica, alcanza un espesor de 500 m. Debido al fracturamiento se considerara como zona de recarga, con un potencial de extracción estimado entre 10 y 15 Ips.

Conglomerado polimíctico-Arenisca (Tm Cgp-Ar) y conglomerado polimíctico-Basalto (Tm Cgp-B).

Forman parte de la Secuencia sedimentaria volcanogénica continental (Formación Baucarit) consistente de conglomerados de color pardo claro que cambia por meteorización a pardo oscuro. Generalmente se encuentra bien estratificado, la composición de los clastos es heterogénea, los espesores pueden alcanzar hasta 300 m.

La erosión y el fallamiento normal son características comunes en estas rocas. Afloran en gran parte de la zona, presentan características acuíferas variadas debido a su extensión y espesor, con permeabilidad baja a impermeable, operando como confinante entre los depósitos granulares y la roca fracturada.

Conglomerado polimíctico (Qpt Cgp), depósitos aluviales (Qho al), aluvión (Q al).

Los sedimentos cuaternarios son producidos por intemperismo de las rocas preexistentes y son depositadas como abanicos aluviales y fluviales, a lo largo de ríos o arroyos y planicies de inundación activos. Las unidades consisten en conglomerados polimícticos, areniscas y limos que varían de consolidadas a poco consolidadas. Corresponde a sedimentos clásticos que forman terrazas continentales y se encuentra ampliamente distribuidos en la parte central del acuífero.

Los clastos de los conglomerados están por lo general bien redondeados, mientras que el aluvión es depositado como abanicos aluviales y fluviales a lo largo de ríos o arroyos y planicies de inundación activas, mismas que están constituidas por conglomerados de clastos de diferentes litologías, presentándose en forma de gravas, arenas y limos en menor cantidad. Debido a su granulometría y espesor representan un atractivo medio para aprovechamientos de bajo gasto.

4.2 Geología estructural

En la zona es común observar una sucesión de sierras altas y alargadas de rumbo preferencial noroeste-sureste, separadas por angostos valles intermontanos, afectadas a su vez por fallas normales. Se observan cuerpos batolíticos Laramídicos en la Sierra.

Los Ciriales, que alteran la disposición estructural de las secuencias del Cretácico y el Terciario.

Se observan fallas normales con orientación preferente noroeste-sureste, así como fallas laterales con la misma orientación. Las fracturas tienen orientación preferente noreste-suroeste, con una menor presencia de fracturas noroeste-sureste.

En algunos casos las fracturas constituyen los cauces de los principales arroyos, los cuales tienden a ser paralelos entre sí, o en su caso tienden a limitar una serie de estructuras semi-circulares y anulares que evidencian la presencia de cuerpos ígneos intrusivos.

Entre las fallas de tipo normal más importantes se encuentran: El Cajón, El Rito y Bacadéhuachi, mientras los sistemas de fracturas sobresalientes son: Bacadéhuachi, Huérigo y Nácori Chico.

El fenómeno distensivo reciente es responsable de la Falla Pitaycachi, que ha sido generadora de sismos importantes al noroeste de México. Por otro lado, el evento distensivo Terciario se evidencia por el fallamiento normal de rumbo preferencial noroeste sureste, truncado por fallas con orientación noroeste suroeste.

4.3 Geología del subsuelo

Con base en la información geológica e hidrológica es posible identificar la presencia de un acuífero que se encuentra alojado en un sistema granular no consolidado de origen aluvial, constituido por depósitos de gravas y arenas intercaladas con material de granulometría fina, con espesores de 50 m.

Debajo de este paquete aluvial, existe una unidad basáltica subyacida por una secuencia volcanogénica con permeabilidad baja y amplio espesor, subyacida por material conglomerático del Mioceno, opera como capa sello y genera un acuífero confinado en rocas volcánicas riolíticas. El basamento geohidrológico de la zona está conformado por intrusivos Laramídicos.

5 HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

En la zona de valle compuesta por depósitos granulares, donde están ubicados todos los aprovechamientos de la zona, se forma un acuífero heterogéneo, de **tipo libre**, donde la explotación se realiza mayormente en la zona de influencia del Río Bacadéhuachi, cuya planicie de inundación genera una permeabilidad alta ya que está formada por un conglomerado polimíctico del Cuaternario.

Las zonas de recarga, se encuentran en las porciones topográficamente elevadas que delimitan el acuífero, donde existen condiciones adecuadas de permeabilidad que propicien la infiltración de agua de lluvia, como es el caso de las sierras Los Ciriales, al este y Huásabas al oeste, las cuales forman parte de un medio fracturado, formado principalmente por materiales de origen volcánico tales como: riolitas, tobas riolíticas, basaltos y andesitas; tales unidades representan, en su mayoría importantes zonas de recarga. Cabe señalar, que los manantiales localizados en el área están relacionados a estos sistemas fracturados. En una menor proporción el acuífero se recarga por el agua de lluvia que precipita en el valle y por un escaso volumen de recarga por riego agrícola.

5.2 Parámetros hidráulicos

Durante la campaña de censo de aprovechamientos desarrollada en el estudio de 2008 se observó que los aprovechamientos que cuentan con equipos eléctricos y condiciones adecuadas para desarrollar pruebas de bombeo, están fuera de operación o en su defecto no cuentan con orificio para el monitoreo de los niveles del agua. Estas razones impidieron la ejecución de pruebas de bombeo.

Mediante recorridos de campo y observaciones geológicas se estimaron valores promedio de parámetros hidráulicos representativos del acuífero. Para el caso de la transmisividad se considera un valor promedio de **$1.2 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$** ($100 \text{ m}^2/\text{día}$) y conductividad hidráulica de **$5 \times 10^{-4} \text{ m/s}$** .

Los valores de transmisividad utilizados en las celdas de entradas y salidas horizontales del acuífero, fueron establecidos con base en las características litológicas, permeabilidad y espesor saturado. En el caso de las zonas de entradas y salidas se utilizó un valor de $350 \text{ m}^2/\text{día}$ (4.0×10^{-3}). Tal valor se establece con base en observaciones directas de campo en 2008, donde se hace referencia a material granular de permeabilidad alta con espesor aproximado de 100 m.

5.3 Piezometría

Con el propósito de conocer las condiciones piezométricas del acuífero, de manera paralela al censo de aprovechamientos desarrollado en 2008, se llevó a cabo una campaña de mediciones piezométricas, en la cual se obtuvieron los niveles estáticos en 26 aprovechamientos, de los cuales 25 corresponden a norias y 3 a pozos.

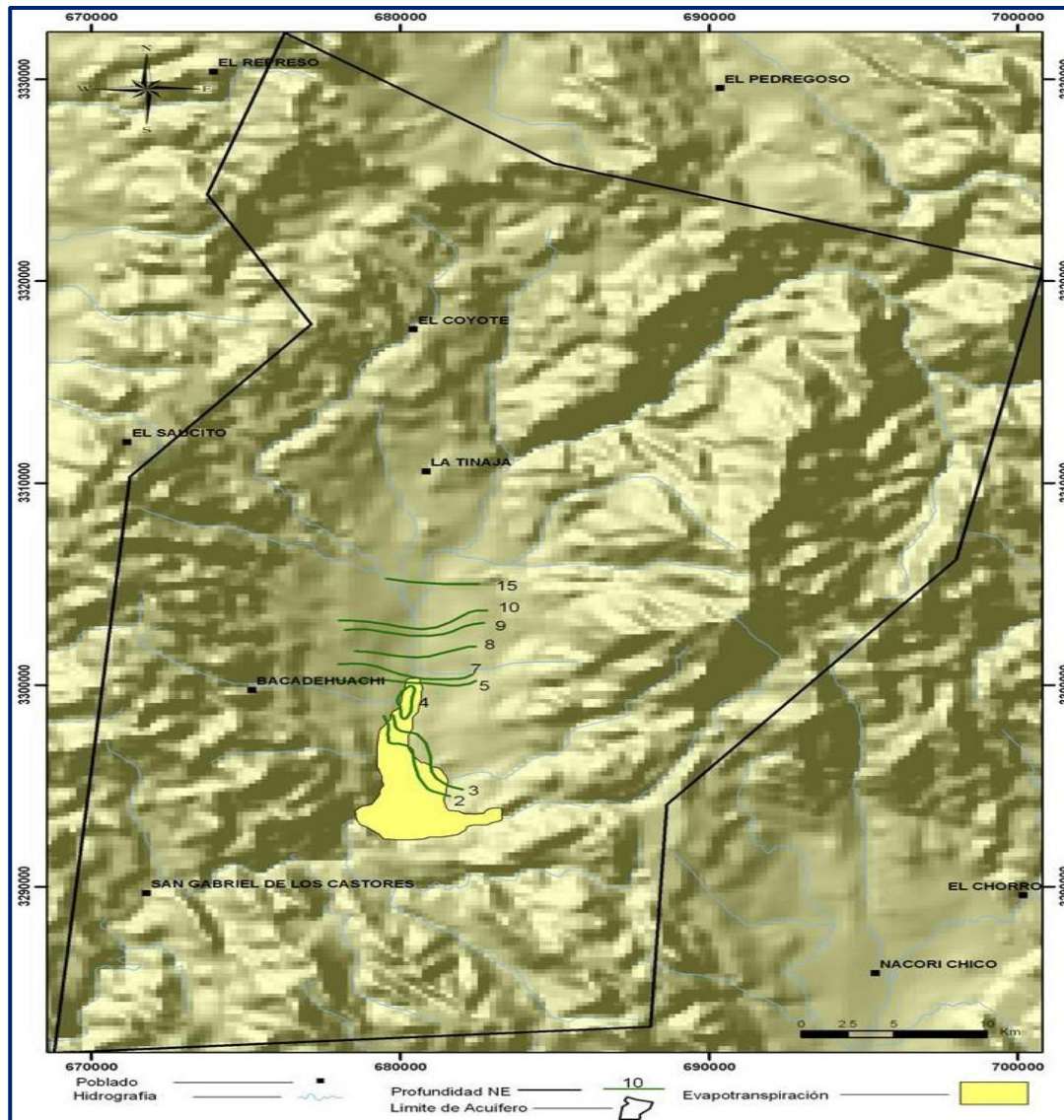


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2008) y zona de evapotranspiración

5.4.2 Elevación del nivel estático

La configuración de la elevación del nivel estático tiene un comportamiento similar a la profundidad del nivel estático, es decir, valores máximos se localizan en el extremo norte del valle, mismos que van decreciendo en dirección al sur.

Valores entre 690 y 700 msnm se registran al extremo norte, éstos decrecen hacia la parte central del valle registrándose equipotenciales con valores entre 680 y 685 msnm, por último, valores mínimos se observan al extremo sur del valle, en la zona donde se calculó el valor de las salidas horizontales del acuífero, con valores entre 600 y 670 msnm (Figura 5).

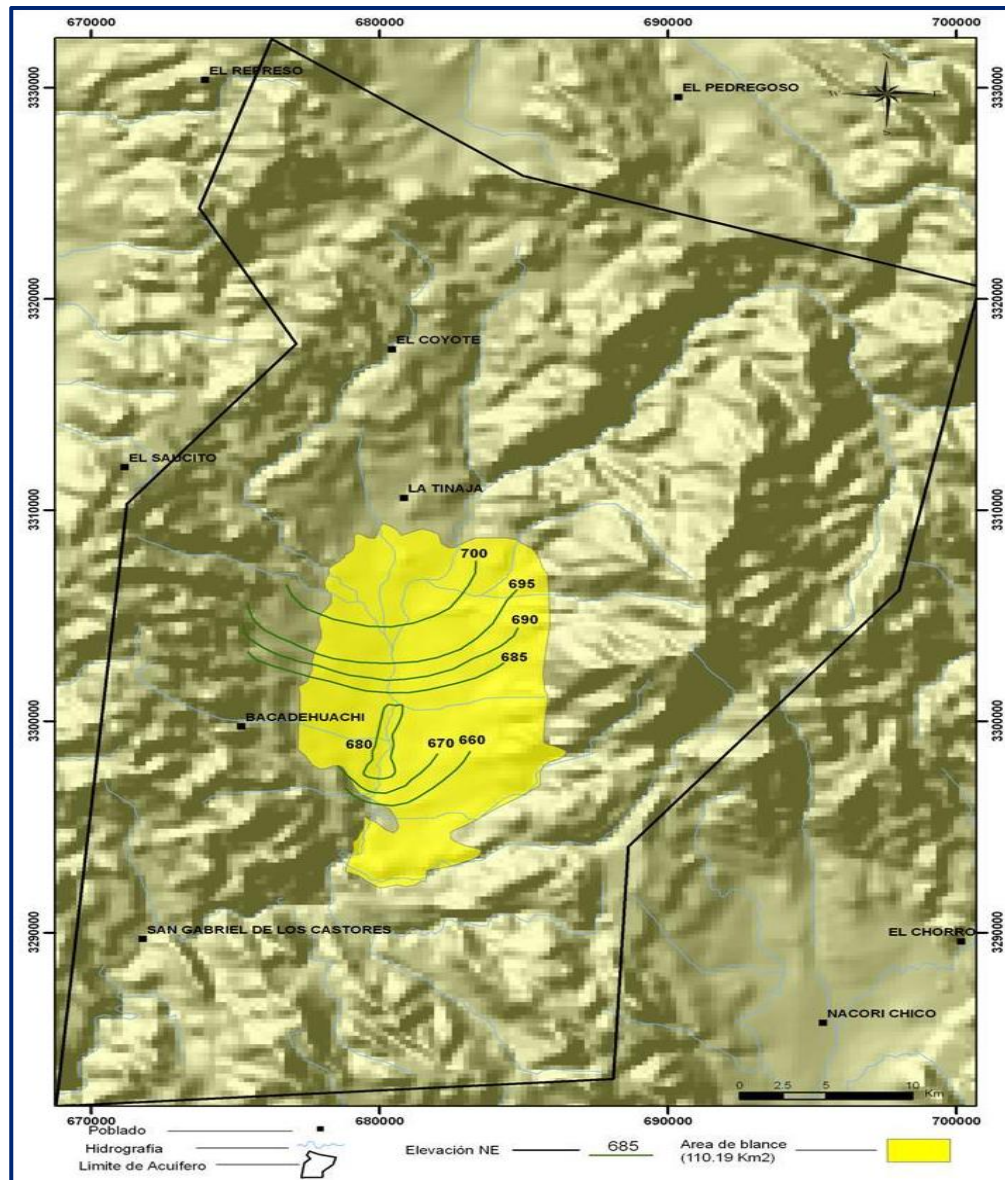


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2008) y zona de balance

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 estudios previos se encuentran dispersas en tiempo y espacio y no cubren en su totalidad la extensión superficial del acuífero.

Aunado a esto, la configuración de la elevación del nivel estático no muestra alteraciones del flujo natural del agua subterránea que indiquen la presencia de conos de abatimiento causados por la concentración de pozos y/o del bombeo.

El volumen de extracción se ha estimado en 1.9 hm³ anuales, valor que es inferior a la recarga más conservadora que pudiera estimarse. Por estas razones, se puede afirmar que las variaciones en el nivel del agua subterránea no han sufrido alteraciones importantes en el transcurso del tiempo, por lo que el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo.

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Durante la campaña de censo de aprovechamientos efectuada en 2008, se tomó muestra de agua subterránea en igual número de aprovechamientos, de éstos, 9 corresponden a norias y una mina inundada. Al momento del muestreo se determinaron diversos parámetros físico-químicos: temperatura, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos, salinidad, oxígeno disuelto, ph, Eh, así como carbonatos y bicarbonatos.

En laboratorio se analizaron iones principales y elementos traza, en orden alfabético: aluminio, arsénico, bario, bicarbonato, boro, calcio, cadmio, carbonato, cloruro, cobalto, cromo, cobre, fluoruro, hierro, mercurio, potasio, litio, magnesio, manganeso, sodio, plomo, selenio, sílice, sulfato, vanadio, zinc. El agua subterránea es predominantemente del tipo cálcico bicarbonatado, esto indica que gran parte del agua subterránea en la zona es de reciente infiltración que fluye principalmente a través de sedimentos aluviales como los que rellenan la zona de valle donde se aloja el acuífero Bacadéhuachi.

Las características granulométricas presentes en la zona de valle, donde está alojado el mayor potencial del acuífero, permiten que el acuífero sea dinámico y con tasas altas de infiltración, lo cual permite mantener una buena calidad en la mayor parte del agua subterránea, donde se encuentran valores de pH cercanos a la neutralidad.

En El Ranchito se registró la mayor concentración de sólidos totales disueltos, 586 mg/l, mientras que en el resto de los aprovechamientos la concentración variaba entre 140 y 160 mg/l, lo que confirma la presencia de un acuífero dinámico donde predomina el agua de reciente infiltración.

En el caso de los metales pesados no existe una problemática considerable, de acuerdo a la norma oficial vigente para calidad de agua "NOM-127-SSA1-2021 "Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua", publicada en el Diario Oficial de la Federación el 2 de mayo del 2022."

En la parte central del acuífero existen dos aprovechamientos con valores de fierro y aluminio fuera de norma, de igual forma el agua de la Mina La Esmeralda, ubicada al noreste del acuífero, presentó valores fuera de norma en fierro, aluminio y manganeso.

6 CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con el censo realizado en 2008, existen en el acuífero 40 aprovechamientos de agua subterránea, de los cuales 36 son norias, 2 pozos, una mina y un manantial. Del total, 26 se encuentran activos, de estos 23 corresponden a norias, 2 a pozos y un manantial.

Cabe mencionar que existe un número mayor de manantiales, sin embargo las condiciones climáticas en 2008 impidieron que fueran censados.

En cuanto a los resultados hidrométricos arrojados se calcula una extracción total anual de 1.972 millones de m^3 a través del bombeo en norias y pozos; adicional a este se contempla un gasto de 0.662 millones de m^3 anuales del agua proveniente de una serie de manantiales perennes enmarcados en zonas serranas, en materiales volcánicos con permeabilidades que varían de medias a bajas.

El volumen total extraído de **2.0 $hm^3/año$** , de los cuales 0.706 $hm^3/año$ (35.8%) son de uso pecuario, 0.599 $hm^3/año$ (30.4%) son de uso agrícola, 0.368 $hm^3/año$ (18.7%) público urbano, 0.299 $hm^3/año$ (15.2%) son de usos múltiples.

7 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.

El balance de aguas subterráneas en una superficie de 110 km^2 que corresponde a la zona donde se localizan los aprovechamientos de agua subterránea.

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 están representadas por la recarga total, las salidas por la descarga total y el cambio de masa por el cambio de almacenamiento:

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

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 agua destinada al uso agrícola, que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela; y del agua residual de las descargas urbanas, constituyen otra fuente de recarga al acuífero (Ri). Para este caso, dado que no existen poblaciones urbanas importantes y el riego agrícola es incipiente, para fines del balance se considera que no se presenta la recarga por retornos agrícolas.

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 definida por la expresión:

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

Donde:

Rv: Recarga vertical

Eh: Entradas por flujo horizontal

Ri: Recarga inducida

B: Bombeo

Sh: Salidas por flujo horizontal

ETR: Evapotranspiración real en niveles someros

Dm: Descarga natural

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

De esta manera, despejando la recarga vertical:

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

7.1.2 Recarga Inducida (Ri)

En esta variable se incluyen los volúmenes de infiltración de agua que se producen exclusivamente por concepto de los excedentes del riego, tanto de origen subterráneo como superficial, ya que en la región no existen asentamientos humanos importantes cuya infraestructura hidráulica pueda generar fugas en los sistemas de abastecimiento de agua potable y/o de alcantarillado.

La recarga inducida o retorno de riego del agua de origen subterráneo se determinó en función del volumen que se extrae del acuífero para uso agrícola, de manera general se estimó que un 20% de este volumen retorna al acuífero en forma de recarga inducida.

De acuerdo a la hidrometría estimada por SGM (2008), en el acuífero Bacadéhuachi se utilizan 0.6 hm³/año para uso agrícola, por lo cual se consideró **0.12 hm³/año** como un volumen representativo de recarga inducida por retornos de riego de agua de origen subterráneo.

En la zona del acuífero Bacadéhuachi parte del riego agrícola se lleva a cabo con agua superficial del río Bacadéhuachi y del arroyo La Galera, esto por medio de obras de derivación a través de una serie de canales.

En el caso de la Derivadora Bacadéhuachi (ó La Haciendita) se utilizan 0.2 hm³/año, mientras que en la Derivadora La Galera se emplean 0.1 hm³/año, resultando un total de 0.3 hm³/año, del cual se consideró que un 25% retorna al acuífero en forma de recarga inducida, es decir **0.08 hm³/año**. Al sumar ambos volúmenes que ingresan al acuífero en forma de recarga inducida se establece un valor total de **0.2 hm³/año**.

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 área de estudio 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.

La cuantificación del caudal de agua subterránea que participa como flujo de entrada subterránea horizontal al acuífero, para un período considerado, se realiza aplicando la Ley de Darcy a la red de flujo a través de una sección limitada por dos isolíneas equipotenciales y dos líneas de corriente, definidas en la configuración de elevación del nivel estático para el período analizado.

La ley de Darcy, se expresa de la siguiente manera:

El cálculo de entradas por flujo horizontal se realizó con base en la Ley de Darcy, partiendo de la configuración de elevación del nivel estático para el año 2008 (figura 6).

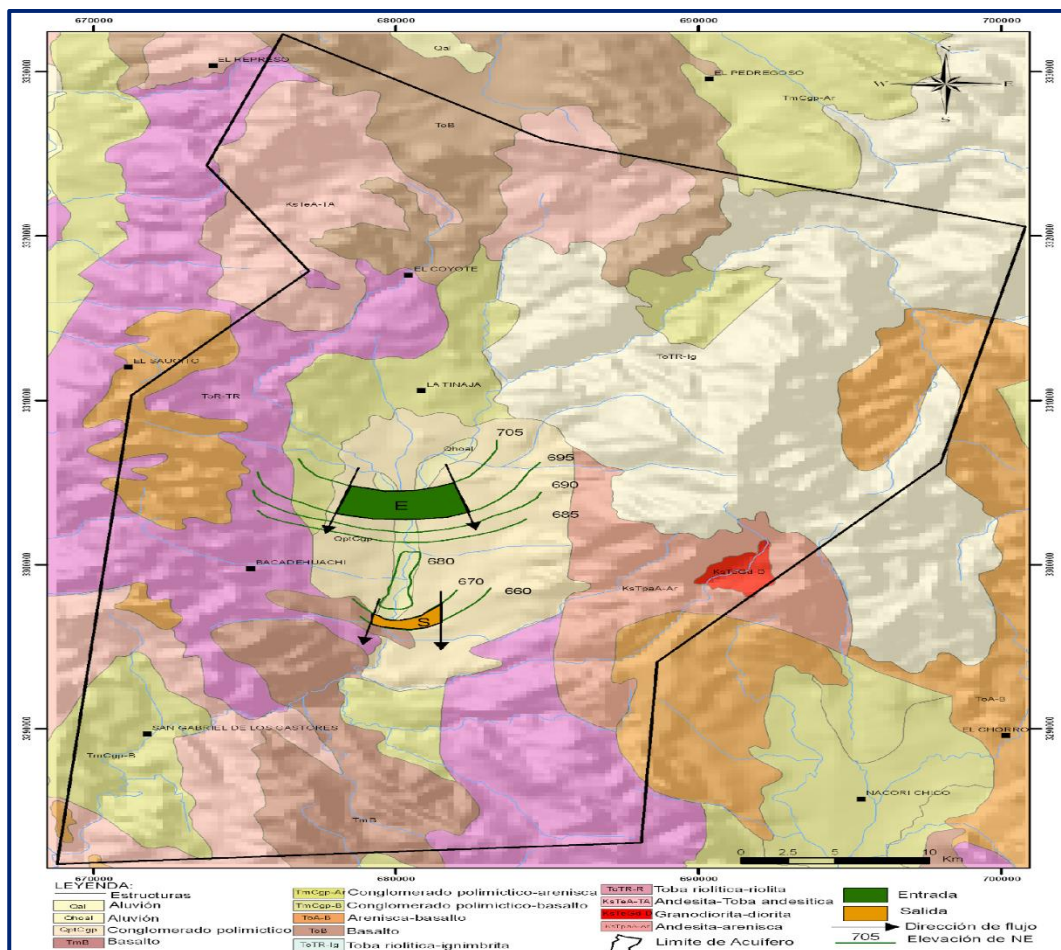


Figura 6. Celdas de entradas y salidas subterráneas

De acuerdo con la ecuación de Darcy para medios porosos:

$$Q = V \cdot A$$

Considerando una sección, con una longitud (B) y ancho (a), con una diferencia de alturas de (Δh). El área de la sección quedará definida por:

$$A = B \cdot a$$

Mientras que la velocidad será:

$$V = K \cdot i$$

Donde:

K= Coeficiente de permeabilidad o conductividad hidráulica.

i = Gradiente hidráulico ($\Delta h / \Delta L$) Δh y ΔL son la diferencia y distancia respectivamente entre las equipotenciales (h) que conforman el canal de flujo.

Sustituyendo en la ecuación de continuidad:

$$Q = B \cdot a \cdot K \cdot i$$

Ya que la transmisividad

$$T = K \cdot a$$

la ecuación queda reducida a:

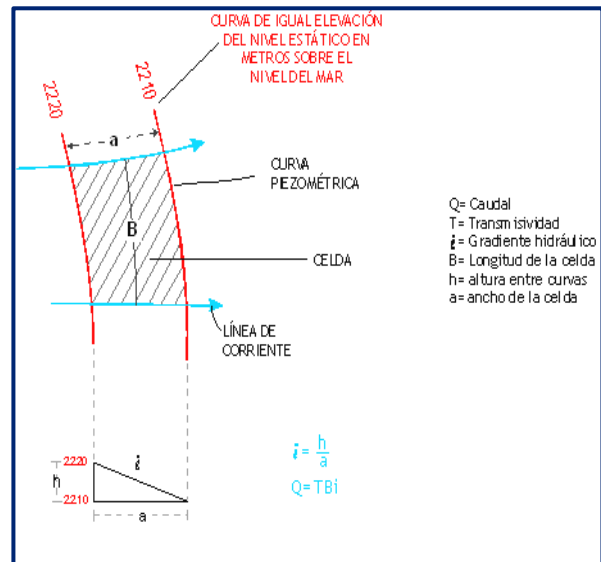
$$Q = T \cdot B \cdot i$$

Donde:

T = Transmisividad en m^2/s .

B= Longitud de la celda en m

i = Gradiente Hidráulico, en m



Para el cálculo es necesario conocer el espesor saturado del acuífero (b) y su coeficiente de permeabilidad (K), o bien, el valor de transmisividad (T). Los demás datos se obtienen de la piezometría. Las celdas se trazan a partir de la configuración de elevación del nivel estático y la geología, y se calcula el flujo a través de cada una de ellas.

El coeficiente K, se obtiene a partir de las pruebas de bombeo de las cuales se obtiene el valor de transmisividad (T), que es el producto de la conductividad hidráulica (K) por el espesor saturado:

$$T = K b$$

La celda de entrada subterránea al acuífero, localizada en la porción norte, se muestra en la figura 6. El valor de transmisividad utilizado de 150 m²/día, fue estimado con base en las características del subsuelo de la zona.

El cálculo del volumen de entrada subterránea a la zona de influencia del balance realizado en la zona de valle es de **2.5 hm³/año** (Tabla 2).

Tabla 2 Cálculo de entradas subterráneas al Acuífero Bacadéhuachi

CANAL	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	$h_z - h_1$	Gradiente i	T	CAUDAL Q	VOLUMEN
			(m)		(m ² /s)	(m ³ /s)	(hm ³ /año)
E	3540	1810	10	0.0055	0.004	0.0782	2.5
Total entradas							2.5

7.2 Salidas

Las descargas del acuífero están representadas por la evapotranspiración real, las salidas horizontales y el bombeo.

7.2.1 Evapotranspiración Real (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).

Dado que la lámina de precipitación pluvial media anual es del orden de los 470 mm y la temperatura promedio de 26.2° C, al aplicar el método empírico de Turc para estimar ETR, su valor resulta mayor que la precipitación media, invalidando el resultado.

En general, para climas áridos los métodos empíricos para estimar ETR (Turc, Coutagne, por ejemplo) se invalidan para valores inferiores a los 350 mm anuales, dependiendo del valor de la temperatura media anual.

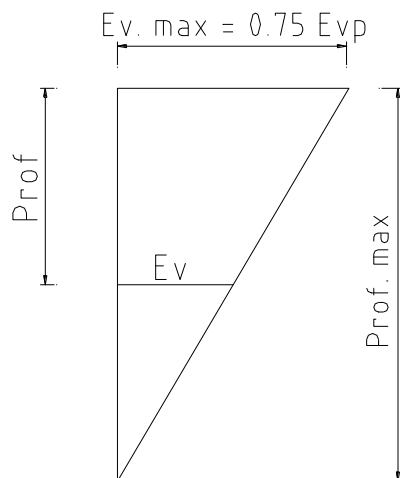
Para el caso particular de este acuífero, la evapotranspiración se presenta en los subálveos del Río Bacadéhuachi y el arroyo La Galera, entre otros de menor influencia en la zona, donde existen niveles freáticos someros y vegetación nativa.

En este caso se establece que la evaporación potencial promedio de la zona es de 2,217 mm anuales. Si se toma en cuenta que su valor se determina en un almacenamiento pequeño, se utiliza un factor de corrección de 0.75 (Saxton & McGuinness, 1982, p. 235).

Considerando que en una superficie 13.6 km² se presentan niveles freáticos someros (Figura 5), con un valor máximo de 4 m de profundidad de extinción, que corresponde en este caso a la profundidad de las raíces de la vegetación nativa y de la profundidad media al nivel estático en la zona de niveles freáticos someros, al considerar la variación que tiene la evaporación con respecto a la profundidad, la evapotranspiración es calculada de la siguiente manera:

$$ETR = [0.75 \text{ (Evaporación Promedio) (Área)}] / \text{Prof. máxima}$$

$$ETR [(0.75) (2.1 \text{ m}) (13.6 \text{ km}^2)]/4 = 5.3 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$



$$\frac{Ev}{Ev. \max} = \frac{(\text{Prof. max} - \text{Prof})}{\text{Prof. max}}$$

$$Ev = Ev. \max \left(1 - \frac{\text{Prof}}{\text{Prof. max}} \right)$$

$$\text{Vol } Ev = Ev \text{ (Area)}$$

El resultado de aplicar la fórmula anterior, da como resultado un valor de evapotranspiración de **5.3 hm³/año**.

7.2.2 Extracción por bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo y piezometría, el volumen total anual de extracción de agua subterránea asciende a **2.0 hm³**.

7.2.3 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

Existe una salida natural del acuífero en forma de flujo subterráneo horizontal, ésta se mantiene gracias a las buenas condiciones hidrogeológicas de la zona y debido a que no existe sobreexplotación que pueda invertir las direcciones de flujo subterráneo.

Las salidas subterráneas fueron calculadas de la misma manera como se evaluaron las entradas subterráneas, se generó una celda de salida a partir de la configuración de elevación del nivel estático para 2008 (Figura 6). El valor estimado de salida subterránea es de **2.7 hm³/año**, calculado en una sección próxima al extremo sur del área de balance. El cálculo del flujo de salida se presenta en la tabla 3.

$$Sh = 2.7 \text{ hm}^3/\text{año}$$

Tabla 3. Cálculo salidas horizontales

CANAL	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	$h_2 - h_1$	Gradiente i	T	CAUDAL Q	VOLUMEN
			(m)		(m ² /s)	(m ³ /s)	(hm ³ /año)
S	2411	1110	10	0.0090	0.0040	0.0868	2.7
						Total salidas	2.7

7.2.4 Descargas naturales por manantiales (Dm)

Se determina sumando los volúmenes de agua emanada de los manantiales y/o del caudal base de ríos. Para el caso del acuífero Bacadéhuachi se consideró sólo el volumen de agua que emana de varios manantiales, correspondiendo a **0.7 hm³/año**. El principal se ubica en la ranhería El Coyote, al norte del acuífero.

Se determina sumando los volúmenes de agua emanada de los manantiales y/o del caudal base de ríos. Para el caso del acuífero Bacadéhuachi se consideró sólo el volumen de agua que emana de varios manantiales, correspondiendo a **0.7 hm³/año**. El principal se ubica en la ranhería El Coyote, al norte del acuífero.

7.3 Cambio de almacenamiento (ΔVS)

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 registros existentes de estudios previos 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 lo tanto, $\Delta V(S) = 0$

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 por lluvia (R_v), por lo que despejando este término de la ecuación definida, se tiene:

$$R_v = Sh + B + ETR + D_n - \Delta V(S) - E_h - R_i \quad (2)$$

Sustituyendo valores:

$$R_v = 2.7 + 2.0 + 5.3 + 0.7 - 0.0 - 2.5 - 0.2$$

$$R_v = 8.0 \text{ hm}^3/\text{año}$$

$$R = R_v + E_h + R_i$$

$$R = 8.0 + 2.5 + 0.2$$

$$R = 10.7 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

8 DISPONIBILIDAD

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

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

Donde:

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

R = Recarga total media anual

DNC = Descarga natural comprometida

VEAS = Volumen de extracción de aguas subterráneas

8.1 Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero. Para este caso, su valor es de **10.7 hm³/año**.

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, su valor es de **DNC = 0.7 hm³ anuales**.

8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)

La extracción de aguas subterráneas se determina sumando los volúmenes anuales de agua asignados o concesionados por la Comisión mediante títulos inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (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 **1,842,291 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 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.

$$\begin{aligned}\text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 10.7 - 0.7 - 1.842291 \\ \text{DMA} &= 8.157709 \text{ hm}^3/\text{año}.\end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones. de **8,157,709 m³ anuales.**

9 BIBLIOGRAFÍA