



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO JAMAU (0229), ESTADO DE BAJA
CALIFORNIA**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1. GENERALIDADES.....	2
Antecedentes.....	2
1.1 Localización	2
1.2 Situación administrativa del acuífero	4
2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD	4
3. FISIOGRAFÍA.....	5
3.1 Provincia fisiográfica	5
3.2 Clima	5
3.3 Hidrografía.....	5
3.4 Geomorfología.....	6
4. GEOLOGÍA.....	6
4.1 Estratigrafía	7
4.2 Geología estructural	12
4.3 Geología del subsuelo.....	13
5. HIDROGEOLOGÍA.....	14
5.1 Tipo de acuífero.....	14
5.2 Parámetros hidráulicos	14
5.3 Piezometría.....	14
5.4 Comportamiento hidráulico.....	15
5.4.1 Profundidad al nivel estático.....	15
5.4.2 Elevación del nivel estático.....	16
5.4.3 Evolución del nivel estático	17
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 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	19
7.2 Salidas	20
7.2.1 Evapotranspiración (ETR).....	20
7.2.2 Bombeo (B)	22
7.2.3 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)	22
7.3 Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$	22
8. DISPONIBILIDAD	23
8.1 Recarga total media anual (R).....	23
8.2 Descarga natural comprometida (DNCOM).....	23
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	24
8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	24
9. BIBLIOGRAFÍA	26

1. GENERALIDADES

Antecedentes

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

Esta norma ha sido preparada por un grupo de especialistas de la iniciativa privada, instituciones académicas, asociaciones de profesionales, gobiernos estatales y municipales y de la CONAGUA. La NOM establece para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas la realización de un balance de las mismas donde se defina de manera precisa la recarga, de ésta deducir los volúmenes comprometidos con otros acuíferos, la demanda de los ecosistemas y el volumen de extracción de aguas subterráneas. Los resultados técnicos que se publiquen deberán estar respaldados por un documento en el que se sintetice la información, se especifique claramente el balance de aguas subterráneas y la disponibilidad de agua subterránea susceptible de concesionar.

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

1.1 Localización

El acuífero Jamau, definido con la clave 0229 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción norte del estado de Baja California, tiene una superficie aproximada de 731 km². Colinda al norte y este con el acuífero Laguna Salada, al sur con el acuífero La Trinidad y al oeste con el acuífero San Vicente (figura 1). Geopolíticamente se encuentra ubicado prácticamente en el municipio de Ensenada y una porción muy pequeña al noreste en el municipio de Mexicali.

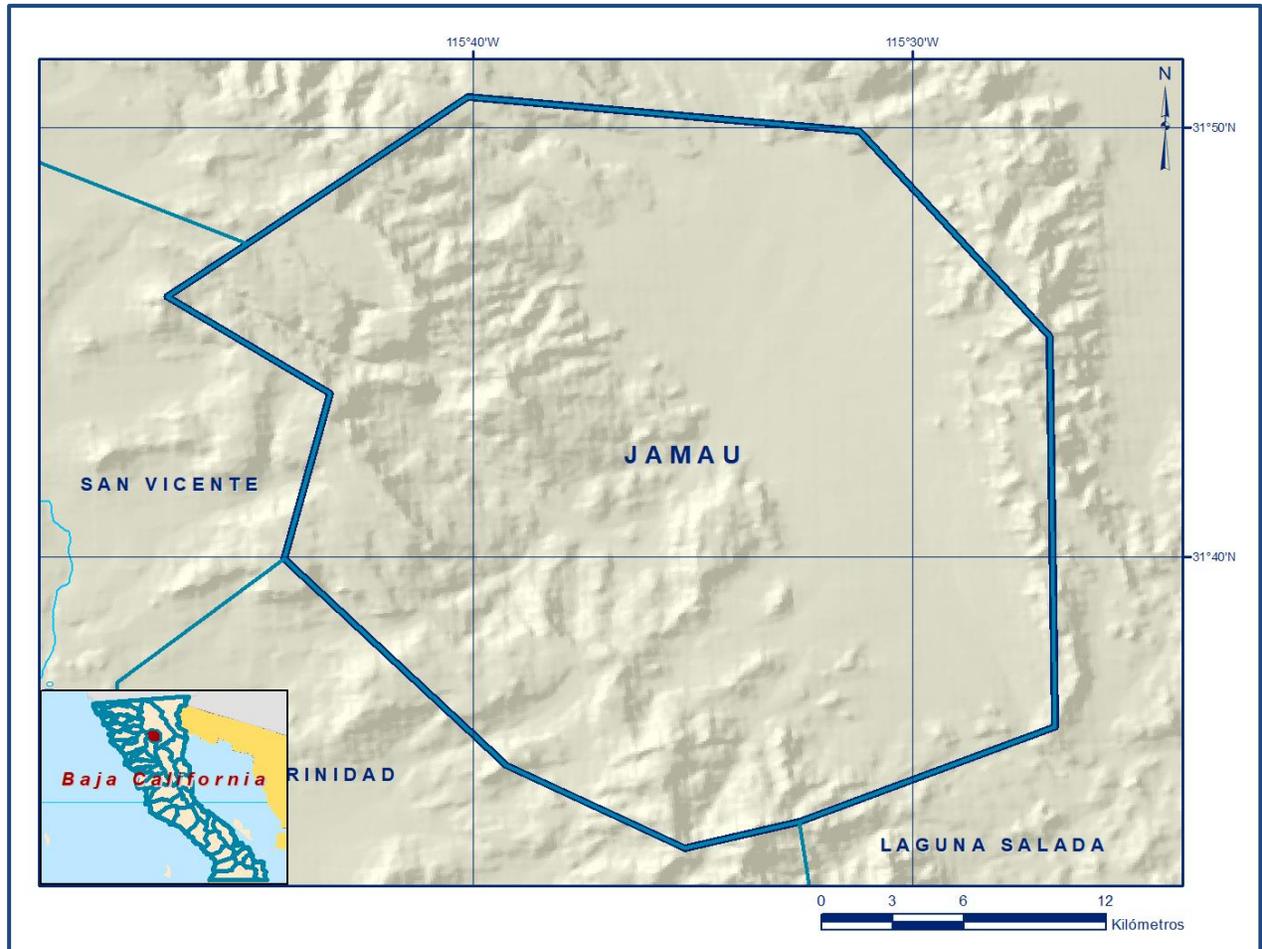


Figura 1. Localización del acuífero

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 0229 JAMAU							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	115	26	46.0	31	36	2.5	
2	115	32	35.4	31	33	50.6	
3	115	35	10.9	31	33	13.0	
4	115	39	15.1	31	35	8.2	
5	115	44	18.5	31	39	57.7	
6	115	43	15.2	31	43	48.4	
7	115	46	58.3	31	46	3.7	
8	115	45	8.0	31	47	17.7	
9	115	40	7.3	31	50	42.8	
10	115	31	12.6	31	49	54.2	
11	115	26	53.4	31	45	7.8	
1	115	26	46.0	31	36	2.5	

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero Jamau pertenece al Organismo de Cuenca I “Península de Baja California”. Su territorio se encuentra sujeto a las disposiciones del “Decreto por el que se establece veda para el alumbramiento de aguas del subsuelo en el Estado de Baja California”, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 15 de mayo de 1965. Este decreto se clasifica como tipo III que permiten extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.

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

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO DE PROSPECCIÓN EN EL VALLE DE JAMAU, ESTADO DE BAJA CALIFORNIA NORTE. Elaborado por la empresa Técnicas Modernas de Ingeniería, S.A. de C.V. en 1977. El objetivo de este estudio fue localizar los sitios más propicios para la exploración del agua subterránea.

ESTUDIO TÉCNICO PARA DETERMINAR LA DISPONIBILIDAD DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN 20 ACUÍFEROS DEL ESTADO DE BAJA CALIFORNIA. Elaborado por la empresa Sanx Ingeniería Integral y Desarrollo, S.A. de C.V. en 2008. El objetivo principal de este estudio fue plantear el balance preliminar de aguas subterráneas para determinar la disponibilidad, mediante la realización actividades de campo que incluyeron censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría y nivelación de brocales.

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

3. FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia fisiográfica

El valle de Jamau, se encuentra en la Provincia Fisiográfica de la Sierra Cristalina de Baja California Norte (Manual Álvarez Jr.). La zona del valle presenta elevaciones que van desde los 700 msnm en la porción sur hasta los 400 en la norte. Las sierras que bordean al valle son: la de Juárez, con elevaciones de 1700 a 1900 msnm ubicada al oeste y la sierra de las Tinajas al oriente, con elevaciones desde 400 a los 1000 msnm, aproximadamente.

El paisaje regional corresponde a un valle intermontano en una etapa morfológica de juventud, donde las sierras presentan topografía abrupta y el valle una pendiente considerable hacia el norte, donde el agua colectada por los cauces erosiona las formaciones de relleno del valle. El principal drenaje del valle lo constituye el Arroyo de Enmedio, a donde convergen la mayoría de los cauces formando un patrón de drenaje enrejado, constituido principalmente por un sistema de fracturamiento. Los cauces de los arroyos son de poco desarrollo, depositando espesores pequeños de arenas y gravas.

3.2 Clima

Con base en la clasificación de Köppen modificada por Enriqueta García (1964) para las condiciones particulares de la República Mexicana, el acuífero Jamau presenta las siguientes condiciones: Cs: Clima templado con lluvias en invierno; BWk(x'): Muy árido, templado; BWh(x'): Muy árido, semicálido; Cb's: Semifrío, subhúmedo con verano fresco.

De acuerdo con la información de la estación climatológica, Santa Isabel clave 066, ubicada dentro del área, la precipitación media anual es de 353.9 mm y la temperatura media anual para el periodo de 1968-1983 de 12.5° C. el mes más caluroso es julio con una temperatura promedio de 23.6° C y el más frío es diciembre con 5.1° C.

3.3 Hidrografía

El área en estudio se localiza en la Región Hidrológica 4 California Noroeste (Ensenada), Subregión Hidrológica Río Tijuana, cuenca del Arroyo Agua Dulce-Santa Clara dentro de la vertiente del Golfo de California.

La corriente principal es el arroyo Agua Dulce, que no tiene cauce bien definido, debido a las lluvias ocasionales no corren siempre por el mismo cauce; sin embargo, su desembocadura está frente a la Isla Miramar. El principal arroyo que drena la zona se conoce con el nombre de Arroyo de Enmedio, es de tipo intermitente y tiene su origen en las Sierras de Juárez y de las Tinajas alcanzando un desarrollo del orden de 25 km desde su nacimiento hasta el área del acuífero, con una cuenca de aproximadamente 300 km².

3.4 Geomorfología

Las condiciones geológicas y los esfuerzos tectónicos a los que estuvo sometida la península, dieron origen a la formación de un eje geológico estructural, el cual corre de forma paralela al estado y está integrado por la cordillera peninsular cuyo núcleo granítico masivo (batolito) aflora en el Norte y se oculta en el Sur bajo materiales volcánicos.

Este eje tiene la forma de un bloque alargado e inclinado hacia el Sureste; presenta un flanco abrupto hacia el Golfo de California, otro más suave hacia el Océano Pacífico, lo que determina la configuración alargada y angosta de la península. Esto ha dado lugar a la formación de una gran variedad de topofomas, tales como valles, llanuras, sierras.

El principal sistema orográfico de Baja California cruza longitudinalmente al Estado; se inicia al Norte, en la Sierra de Juárez y continúa al Sur con el nombre de Sierra de San Pedro Mártir, donde se divide en sierras más pequeñas, con diferentes nombres, hasta el límite con Baja California Sur.

La Sierra Cucapah constituye otro sistema orográfico, y se encuentra ubicada en forma paralela a la Sierra de Juárez, quedando entre ambas una depresión arenosa de baja permeabilidad llamada Laguna Salada la cual tiene una conexión como zona de recarga del acuífero Jamau ya los escurrimientos tienen una dirección de sur a norte.

4. GEOLOGÍA

Las principales rocas que afloran en la región son de tipo sedimentario, representadas predominantemente por depósitos aluviales del cuaternario, cuyo espesor probablemente sea del orden de 80 metros.

Subyaciendo a estos depósitos aluviales se encuentran rocas volcánicas, representadas principalmente por riolitas y basaltos del Paleógeno-Neógeno. Existen también afloramientos de rocas ígneas intrusivas (granitos) y metamórficas (esquistos) (figura 2).

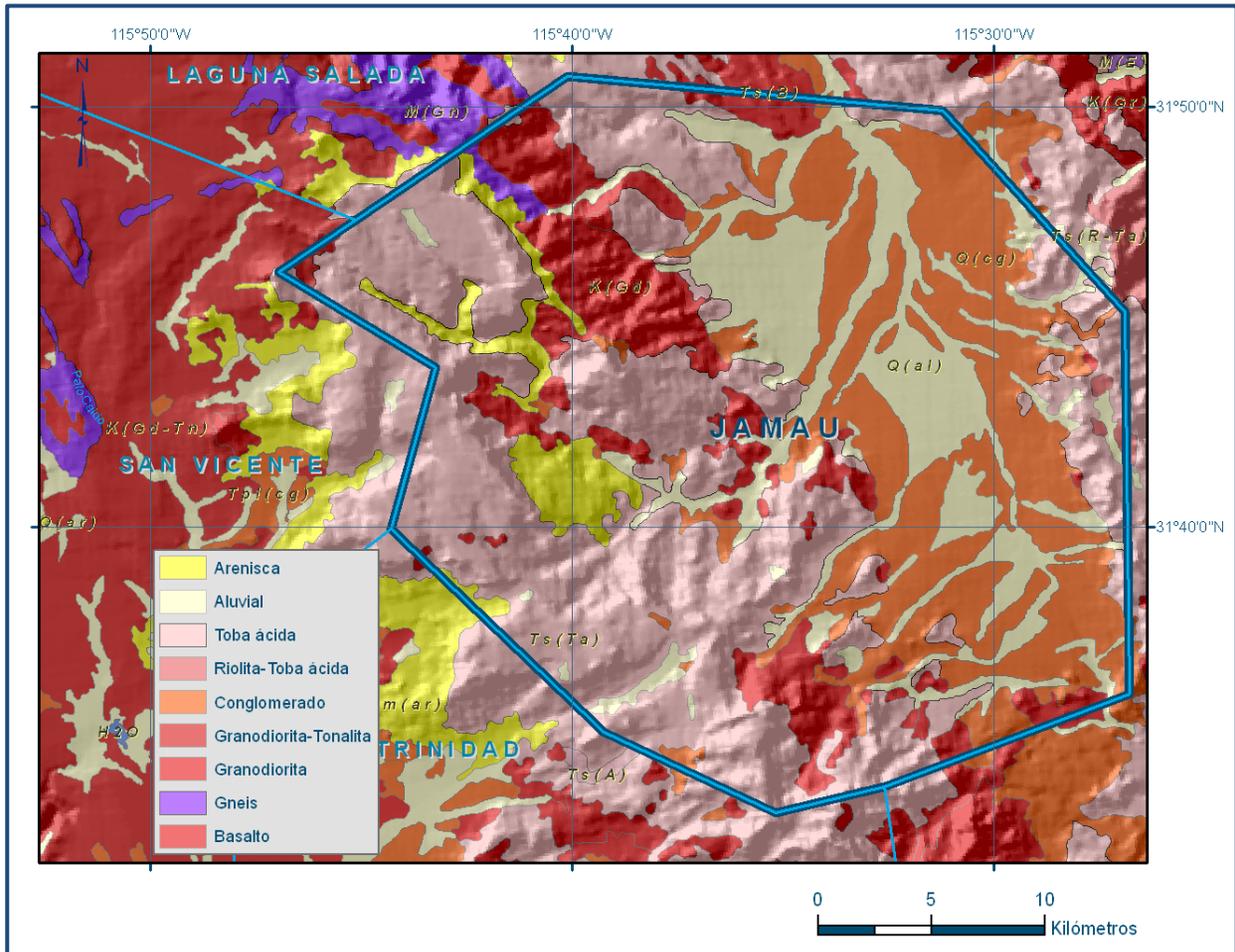


Figura 2. Geología general del acuífero

4.1 Estratigrafía

En el acuífero Jamau aflora una variedad de rocas sedimentarias, ígneas intrusivas y extrusivas, cuyo rango estratigráfico varía del Mesozoico (Triásico) al Cenozoico (Cuaternario).

Mesozoico. Constituyen las rocas más antiguas de la región, representadas por rocas metasedimentarias, intrusivas, metamórficas, vulcanosedimentarias e intrusivas batolíticas.

Rocas Metasedimentarias Prebatolíticas (TR). Con este símbolo se designa a una secuencia metasedimentaria de probable edad Triásico.

La localidad tipo de esta formación se encuentra en el poblado de Julián, Condado de San Diego, California, Estados Unidos, la cual consiste de lutitas, areniscas y conglomerados metamorfizados, con pequeños cuerpos de anfibolita y mármol. En el área que corresponde a Jamau la unidad consiste de una secuencia metasedimentaria en la cual se encuentran paquetes interdigitados de esquistos, filita, pizarras y predominando en algunas partes, gneis. En la secuencia prevalecen los colores oscuros, excepto gneis que muestran colores claros.

Rocas Intrusivas Metamórficas (Mp). Se designa a una serie de cuerpos litológicos en los cuales se encuentran mezcladas rocas metamórficas e intrusivas de probable edad Cretácico, rocas de edad más antigua con metamorfismo incipiente y zonas de intrusión con bandeamiento gnéisico, localizadas en los bordes de las masas intrusivas. En algunas áreas dentro de esta unidad, podrían localizarse masas magmáticas, aun cuando su presencia no es totalmente segura. Esta unidad consiste de rocas ortometamórficas derivadas de diorita, granodiorita y tonalita, en las cuales se reconoce mineralogía típica de las rocas intrusivas originales, pero en algunas áreas presenta arreglo gnéisico, mientras que en otras, minerales metamórficos de contacto, así como abundante epidota y ocasionalmente clorita.

Rocas Vulcano-sedimentarias (Kas, Kav). En el área, la unidad (Kas) correlacionada con la formación Alisitos (Gastil, 1975), consiste de rocas calcáreas y derrames de composición dacítica-riodacítica interestratificadas. Las calizas se presentan en estratos masivos o delgados, con predominio de los primeros, de color gris oscuro a claro, con lentes de limonitas calcáreas y algo de arcillas. Las calizas se muestran además silicificadas y algo metamorfizadas; su fracturamiento es intenso y en algunas áreas de aspecto lajoso. La unidad calcárea está también interestratificada con tobas líticas de composición ácida.

El miembro de la unidad (Kav) está formado por tobas, brechas y derrames de lava, cuya composición cambia de riodacítica a traquiandesítica. Se presenta en capas lenticulares de dacítica.

Se presenta en capas lenticulares de variados espesores; tiene zonas de oxidación y en los afloramientos abunda la epidota y la silicificación, su color varía de gris oscuro a rojo violáceo. Los derrames son de textura afanítica y ocasionalmente porfídica. En esta unidad y asociada a los derrames ácidos, existen algunas zonas de mineralización de cobre.

Rocas intrusivas (Kigia, Kigii). La unidad (Kigia) incluye a granitos, granodioritas, dioritas y tonalitas; a los primeros de la variedad muscovita, de color gris claro con tonos rojizos, se les encuentran muy fracturados y disgregados. Las granodioritas y tonalitas son de textura holocristalina, equigranular de grano grueso, de color gris claro con tonos blanquecinos, exhibiendo desarrollo pegmatítico con abundantes fenocristales de ortoclasa, muscovita y turmalina. La diorita es de color gris oscuro verdoso, de textura fanerítica de grano medio con cristales de hornblenda en gran cantidad y biotita. Dichas rocas intemperizan en forma esferoidal poco fracturadas, siendo común encontrar bloques de más de 4 m de diámetro.

La unidad (Kigii) representa a cuerpos de monzonita medianamente fracturas. Estas unidades litológicas afloran en la parte central del área conforme a una ancha faja orientada de Nor-noroeste a sur-sureste, con abundante fracturamiento. Estas rocas intrusivas se encuentran cortando a las unidades metasedimentarias prebatolíticas (T pbs) y subyacen a las diferentes unidades del Cenozoico.

Rocas Marinas-Continetales (Kilmar). Con este símbolo se designa a aquellos depósitos tanto marinos como continentales, correspondientes al Cretácico Superior. Los depósitos marinos se correlacionan según Beal (1948), con la formación Rosario, cuya localidad tipo se encuentra al sur del arroyo El Rosario, situado al este del poblado El Rosario. En su localidad tipo consiste de arenisca café de origen marino y arcilla gris a negra con lentes gruesos de conglomerados.

Las areniscas contienen capas delgadas de madera carbonizada y carbón, capas locales gruesas de arcillas color castaño oscuro, en un espesor mayor a los 750 metros. Regionalmente los afloramientos correlacionables con la formación Rosario se observan a lo largo de la costa occidental de la parte norte de la península, desde Rosario hasta el sur de Punta Las Canoas; el ancho mínimo de los afloramientos, casi todos cercanos a la costa, es de unos 2 km en el noroeste y se va ampliando hacia el sureste hasta la altura de Punta Baja.

Localmente es visible a lo largo de los cañones San Fernando y San Vicente, así como en la porción occidental con vista al Océano Pacífico.

Cenozoico. Unidades de edad Paleógeno-Neógeno se identifican en el área, representadas por las formaciones Tepetate, Comondú y Salada. El cuaternario también está presente y se identifica por unidades formacionales de carácter aluvial y de piemonte.

Mioceno (Tsar). Corresponde a una secuencia sedimentaria de edad incierta y probable ambiente continental que se podría correlacionar con las areniscas y conglomerados horizontales que se encuentran bajo las rocas volcánicas miocénicas. La unidad consiste fundamentalmente de areniscas de grano medio a grueso, sin fósiles, poco cementada y en algunos lugares conglomerática, constituida principalmente de fragmentos de roca, cuarzo y feldespatos; la cual en algunos afloramientos intemperiza en forma esferoidal. Los estratos por lo general son gruesos o masivos de estratificación graduada y fractura moderada; ocasionalmente se encuentra estratificación cruzada y grietas de desecación de lodos en algunas capas.

Neógeno (Tsa, Tsb). Con estos símbolos se designan a todas aquellas rocas volcánicas que afloran en el área y cuya edad podría variar de Mioceno al Plioceno, incluyendo las formaciones Pelones, Minitas, Pilares, Hornillas y Ricason, definidas por McFall en 1968 como pertenecientes al grupo Comondú, a su vez definido por Heim en 1922, así como a basaltos que coronan la secuencia volcánica de edad pliocénica sin nombre formacional.

La unidad (Tsa) consiste en gran porción de tobas y brechas riolíticas, con abundante pumicita y cristales rotos de cuarzo. Las tobas son líticas de tonos rosáceos y en algunos lugares presentan estructura columnar. Hacia el occidente la secuencia continúa predominantemente pumicítica, pero se encuentran intercalaciones de tobas arenosas de composición algo más intermedia, coronadas por derrames dacíticos o riolíticos son más bien escasos y en varias secciones no aparecen en lo absoluto. El espesor de las unidades se estima que puede variar entre 100 y 600 metros.

La unidad (Tsb) se encuentra formada por gran cantidad de derrames basálticos y acumulaciones locales de brechas y tobas básicas. El basalto varía en su composición, siendo el de olivino el más extendido, aun cuando en algunas áreas se presenta de labradorita.

La estructura más común es la vesicular pero localmente se encuentran estructuras columnares. Los derrames constituyen amplias mesetas, en contraste con las tobas y brechas que son comúnmente de dimensiones reducidas; las formas cónicas señalan los conductos de derrames de lava y flujo piroclástico.

El espesor de esta unidad varía desde unos 10 m o menos en aquellos lugares donde sólo se encuentra un derrame hasta cerca de 200 metros donde se acumularon varios de ellos sucesivamente. Esta unidad se originó durante el periodo volcánico explosivo y lávico que se inició a fines del Mioceno con carácter ácido y finalizó en el Plioceno Cuaternario de carácter básico.

Plioceno (Tsar-cg, Tscg). Se incluyen en la unidad del Plioceno, tanto rocas marinas como continentales que afloran en el área. Los estratos marinos de esta época han sido generalmente denominados "Formación Salada", definida por Dal en 1898, y cuya localidad tipo se encuentra en el rancho Salada, en el extremo sur de la planicie Magdalena.

La litología de la unidad (Tsar-cg) consiste de areniscas de grano medio a fino, areniscas calcáreas y conglomerados costeros formados por fragmentos de rocas volcánicas, incluidos en una matriz limosa o arcillosa con muy poco cementante, por lo que se desmoronan fácilmente con el golpe del martillo.

La litología de la unidad (Tscg) se constituye básicamente de conglomerados poco clasificados, mal cementados, con poca tenacidad, derivados de todas las rocas de unidades más antiguas incluidos en una matriz arenosa semideleznable. Las rocas marinas de esta unidad son de distribución restringida, aflorando en forma de lunares entre las continentales de amplia distribución en el área. Se encuentran preferentemente rellenando las partes bajas de Valles intermontanos.

El espesor de los estratos marinos de esta unidad se aproxima a 50 metros, con rápidos cambios laterales, y se van acuñando hacia el continente hasta desaparecer.

Las rocas continentales varían considerablemente de espesor, reduciéndose a cero hacia las sierras y engrosando hacia el centro de los valles, con espesor máximo considerado del orden de los 60 metros.

Depósitos No Consolidados (Qal). La unidad (Qal) incluye a los depósitos aluviales y de piedemonte del área, constituidos por arenas limpias de grano medio a grueso y por gravas bien graduadas.

Los clásticos se han derivado de rocas ígneas y metamórficas, con fragmentos de cuarzo lechosos, feldespatos y micas. Su espesor no se conoce con seguridad.

Complejo Metamórfico Paleozoico. Está constituido por mármoles, esquistos y gneis generados por dinamometamorfismo de alto grado en rocas sedimentarias, que provoca una foliación con rumbo de N70°W con 30 o 40 grados de inclinación hacia el NE.

Esta unidad representa el basamento regional de la península, con presencia de fósiles en metareniscas y en calizas levemente metamorfizadas, que sitúan a esta unidad dentro del Missisípico-Pensilvánico. Morfológicamente forma lomeríos de pendiente suave, en ocasiones interrumpidos por pequeños escarpes.

Depósitos Cuaternarios (Qr): Están principalmente constituidos por sedimentos continentales del tipo aluvial y marino de tipo costero, incluso depósitos deltaicos y de llanura de inundación.

Sus espesores son muy variados y se les encuentra rellenando valles y zonas bajas en toda la península, aunque sus mayores extensiones se localizan en el noreste de la misma.

4.2 Geología estructural

Las rocas que constituyen el área abarcan edades Cretácicas hasta recientes, representadas por rocas ígneas intrusivas, volcánicas, piroclásticas, sedimentarias y metamórficas. Estas últimas representan los sedimentos que rellenan la depresión tectónica y se encuentran constituidas por areniscas y conglomerados del Paleógeno-Neógeno y depósitos aluviales del reciente.

4.3 Geología del subsuelo

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

Unidad impermeable: Agrupa las rocas que conforman el basamento de la región, comprende rocas metamórficas ígneas intrusivas ácidas, volcánicas y piroclásticas. Funcionan como fronteras impermeables del valle y como colectoras del agua precipitada en las sierras, mediante su sistema de drenaje.

Unidad semipermeable: Constituida por areniscas y conglomerados con heterogeneidad de compactación, cementada superficialmente con caliche. Y presenta una pendiente topográfica hacia el norte del 1.12 %.

Unidad permeable: Constituido por espesores reducidos de arenas y gravas aluviales no saturados. Funcionan como receptoras del agua recolectada por los arroyos para cederla posteriormente a la unidad semipermeable.

Los materiales que rellenan la depresión topográfica consisten en areniscas y conglomerados con heterogeneidad en su compactación. La unidad presenta formas topográficas suaves, estratificación entrecruzada y una estructura sensiblemente horizontal con pendiente hacia el norte.

Los depósitos aluviales se encuentran ocupando los cauces de los arroyos, donde cubren espesores pequeños de arenas y gravas a la unidad de areniscas y conglomerados. La fuente de alimentación de agua para el acuífero de la unidad permeable, la constituyen las lluvias torrenciales que se precipitan sobre la cuenca tributaria.

El funcionamiento de la recarga se efectúa cuando el agua colectada por los arroyos, se infiltra en los sedimentos aluviales. Otra forma de alimentación se constituye por la infiltración directa del agua de lluvia, precipitada en la superficie de la unidad permeable. Debido al régimen torrencial de las precipitaciones pluviales y la considerable pendiente del valle (1.12%), el agua escurre superficialmente con altas velocidades. Esta situación impide una infiltración en los materiales permeables, descargando la mayor parte de este volumen hacia la cuenca de la Laguna Salada.

La unidad geológica permeable de las areniscas y conglomerados, presentan continuidad hacia cuencas vecinas, como ocurre en la cabecera del Arroyo de Enmedio al Sur de la cuenca y al sur de la salida hidrológica de la misma.

Esto significa posibles drenes de agua subterránea hacia otras cuencas, de presentar la zona de saturación del valle, elevaciones mayores que el basamento impermeable.

De acuerdo a la información proporcionada por un pozo situado a 9 km de la salida del valle, es de esperar espesores de material no saturado mayores de 80 m.

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

El acuífero Jamau, es de tipo **libre** y se encuentra dentro de una fosa tectónica de un sistema de fallas formada durante los movimientos epirogénicos del Mioceno.

Los bloques levantados topográficamente constituyen las sierras que circundan el valle de Jamau, las cuales están constituidas principalmente por rocas graníticas del Batolito Mesozoico. Estas rocas junto con las volcánicas y piroclásticas del Paleógeno-Neógeno, constituyen el basamento impermeable de la zona.

5.2 Parámetros hidráulicos

En el área no se han realizado trabajos previos que nos permitan definir las propiedades hidráulicas del acuífero, debido a esto, los parámetros se determinan de acuerdo a las características geohidrológicas de las formaciones que se presentan en el área clasificándose de la siguiente manera:

MATERIAL	T (m ² /s)
Areniscas y conglomerados con heterogeneidad de compactación, cementada superficialmente con caliche.	4.6x10 ⁻⁵
Arenas y gravas aluviales no saturadas.	5.6x10 ⁻⁶

5.3 Piezometría

No existe información piezométrica histórica. Para el análisis del comportamiento del acuífero únicamente se cuenta con información correspondiente al año 2008.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

La profundidad al nivel estático en la zona varía de 1 a 1.2 m esto sucede en las zonas con pequeños depósitos aluviales, ubicadas en el pie de las Sierras, existen además manifestaciones de manantiales a través de fracturas en las zonas cerriles (figura 3).

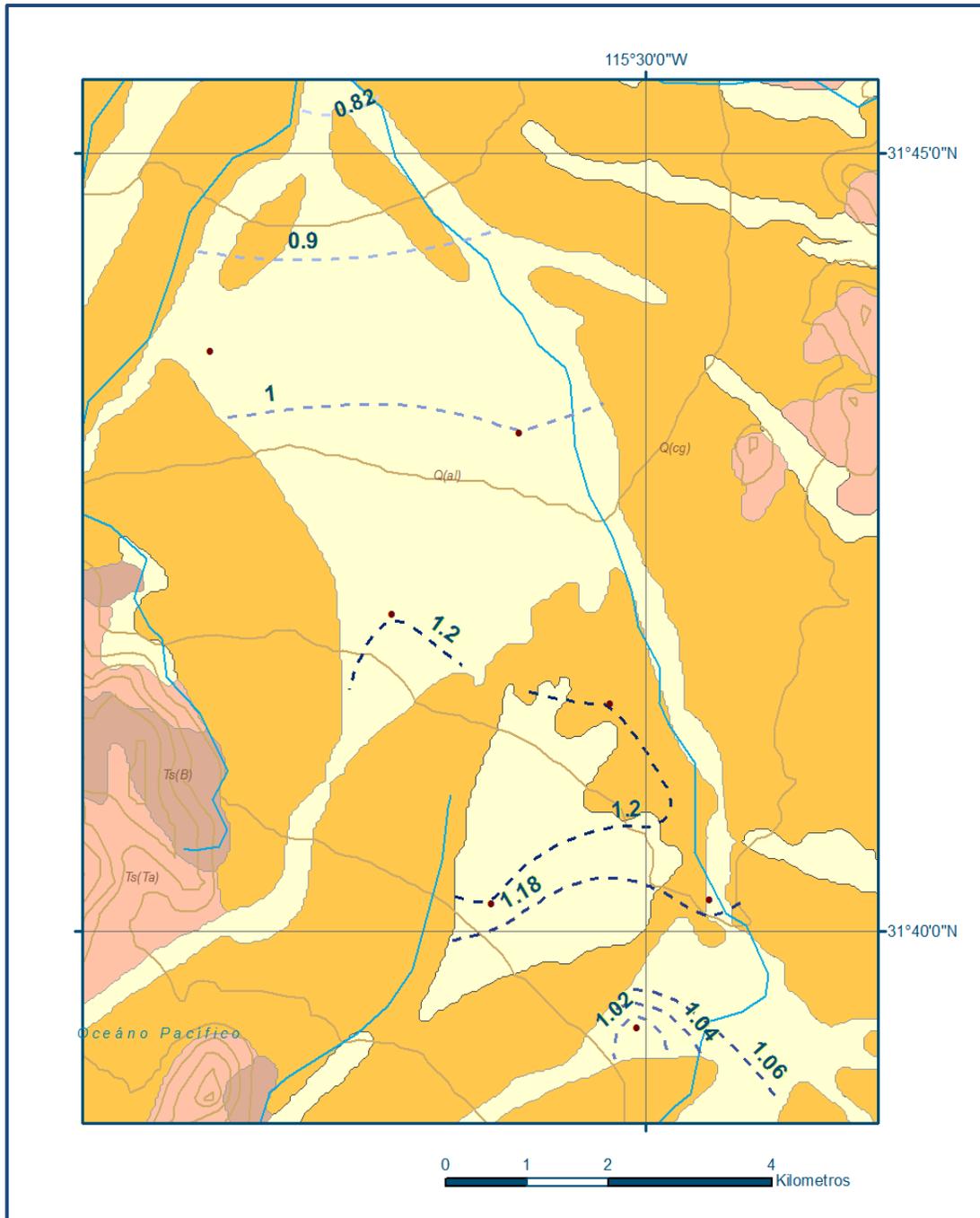


Figura 3. Profundidad al nivel estático en m (2008)

5.4.2 Elevación del nivel estático

La elevación del nivel estático es de 1,100 a 850 msnm aproximadamente, los valores disminuyen gradualmente hacia las partes planas donde existe una comunicación con la Laguna Salada localizada hacia el norte. La dirección del flujo es de noreste a suroeste (NE-SW). Actualmente prevalecen las condiciones originales, debido a la reducida extracción de agua (figura 4).

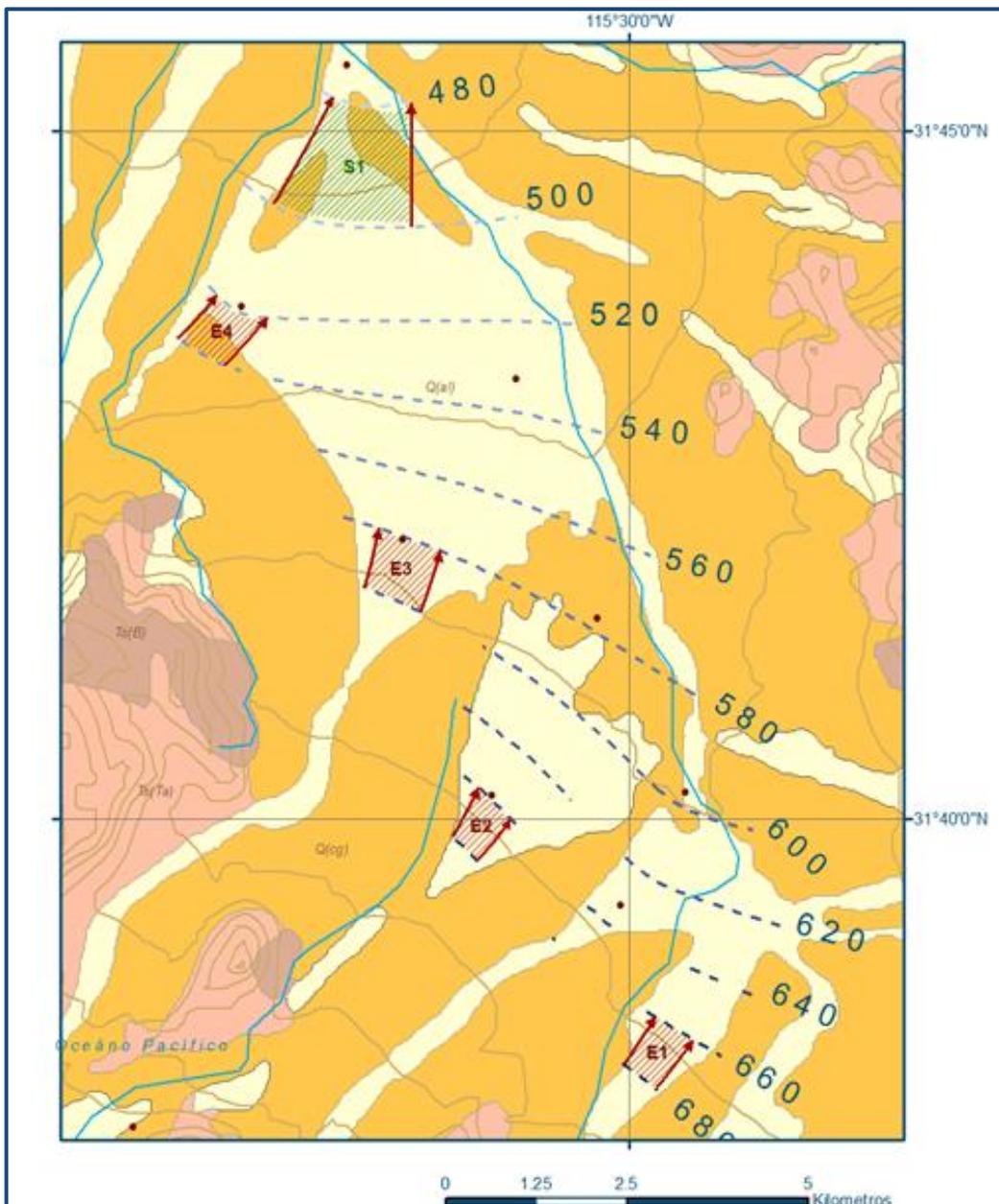


Figura 4. Elevación del nivel estático en msnm (2008)

5.4.3 Evolución del nivel estático

No existe información piezométrica que permita elaborar una configuración de evolución del nivel estático. Las mediciones piezométricas recabadas no son suficientes y no cubren en su totalidad la extensión superficial del acuífero. La incipiente extracción que se realiza no ha causado aún la alteración de las condiciones originales del régimen de flujo subterráneo.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

No existe un censo de aprovechamientos por lo que se considera el valor del volumen registrado e inscrito en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA). De acuerdo con esto, existen 7 aprovechamientos que en conjunto extraen un volumen anual de 149 010 m³. De ellos, 139 000 m³ (93%) se destinan a las actividades agrícolas y el resto para uso doméstico.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de agua subterránea se planteó para el año 2008, en una superficie de 48 km², que corresponde a la zona donde se cuenta con información piezométrica y en la que se localiza la mayoría de los aprovechamientos subterráneos.

La diferencia entre la suma total de las entradas (recarga) y la suma total de las salidas (descarga), representa el volumen de agua perdido o ganado por el almacenamiento del acuífero en el periodo de tiempo establecido.

La ecuación general de balance, de acuerdo a la ley de la conservación de masa se expresa como:

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

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

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

7.1 Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual definido para el acuífero, las entradas están integradas por la recarga natural que se produce por efecto de la infiltración de la lluvia que se precipita en el valle y a lo largo de los escurrimientos de los arroyos (R_v) y la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de una recarga por flujo horizontal subterráneo (E_h).

De manera inducida, la infiltración de los excedentes del riego agrícola y del agua residual de las descargas urbanas, constituyen otra fuente de recarga al acuífero. Estos volúmenes se integran en la componente de recarga inducida (R_i).

Para este caso, dado que no existen poblaciones urbanas importantes, el riego agrícola es incipiente y utiliza sistema tecnificado, no existe recarga inducida.

7.1.1 Recarga vertical (R_v)

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:

$$R_v + E_h - B - S_h - ETR = \pm \Delta V(S) \quad (1)$$

Donde:

R_v : Recarga vertical

E_h : Entradas por flujo subterráneo horizontal

B : Bombeo

S_h : Salidas por flujo subterráneo horizontal

ETR : Evapotranspiración real

$\Delta V(S)$: Cambio en el volumen almacenado

De esta manera, despejando la recarga vertical:

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

7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del área 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.

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 4). De acuerdo con la ecuación de Darcy para medios porosos, tenemos que:

$$Q = V \cdot A$$

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 tenemos que:

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

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.

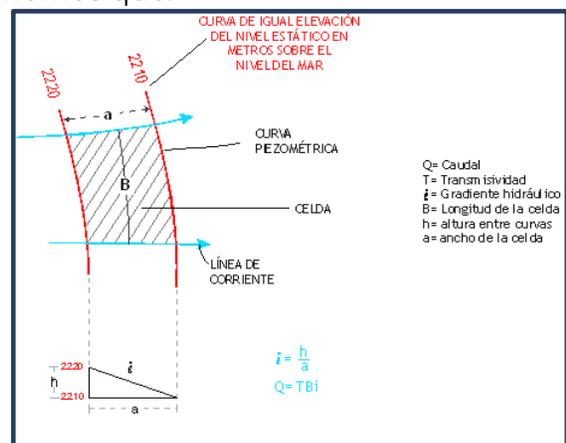


Tabla 2. Estimación del volumen de entrada por flujo subterráneo 2008

Celda	T (10 ⁻³ m ² /s)	B (10 ³ m)	i	Q (m ³ /s)	Vol ₁ anual (hm ³)
E ₁	2.083	0.510	0.02632	0.0280	0.9
E ₂	2.083	0.510	0.02649	0.0281	0.9
E ₃	2.083	0.760	0.02424	0.0384	1.2
E ₄	1.736	0.685	0.02564	0.0305	1.0

El volumen de entrada por flujo subterráneo horizontal (Eh) para 2008 es de **4.0 hm³**.

7.2 Salidas

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

7.2.1 Evapotranspiración (ETR)

Este parámetro es la cantidad de agua transferida del suelo a la atmósfera por evaporación y transpiración de las plantas, por lo tanto es considerada una forma de pérdida de humedad del sistema. Existen dos formas de Evapotranspiración: la que considera el contenido de humedad en el suelo y la que considera la etapa de desarrollo de las plantas (Evapotranspiración Potencial y la Evapotranspiración Real). El escurrimiento y el volumen de evapotranspiración real (ETR) son parámetros utilizados para estimar la recarga potencial por infiltración

Para la obtención de este parámetro se puede utilizar la ecuación empírica de Turc, que se muestra a continuación:

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

T (°C) =	17.8	P ² =	125245.21
P(mm) =	353.9	L ² =	1054703.53
L =	1026.9876		
ETR (mm)	350.6		

De esta manera, la estimación del valor de la evaporación se calculó multiplicando el área donde tiene lugar el fenómeno (profundidad al NE menor a 3 m, dentro del área de balance) por una lámina de agua equivalente a una fracción de la evaporación potencial media en las estaciones climatológicas (**2,340 mm** CONAGUA Organismo de Cuenca Baja California).

El valor de esa fracción varía entre un máximo de uno, cuando el nivel freático aflora, y cero cuando éste se halla a profundidades mayores a la altura de la franja capilar de los materiales predominantes entre la superficie del terreno y el nivel freático. Con estos valores se obtuvo una lámina evaporada para el año de análisis de acuerdo a la profundidad media al nivel estático (100, 200 y 300 cm), multiplicando finalmente por el área susceptible a la evaporación se obtuvo un volumen anual evaporado, para el año 2008 de **4.9 hm³**.

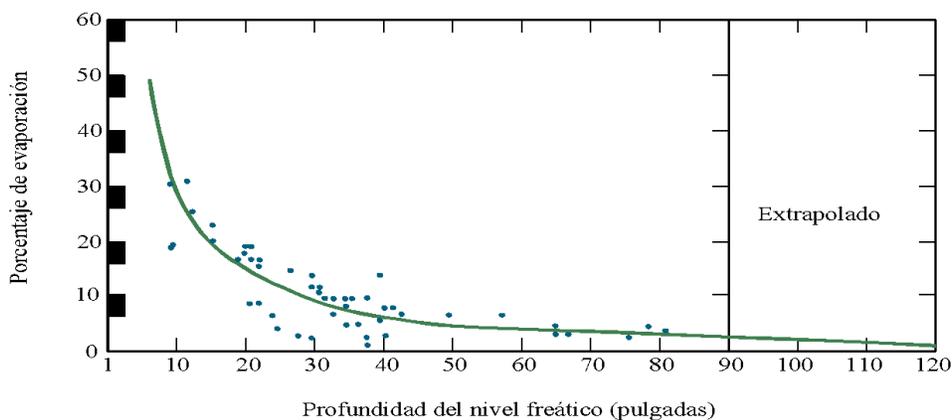


Figura 6. Evaporación del agua freática en función de la profundidad al nivel estático

Tabla 4. Volumen de evapotranspiración

Profundidad media al nivel estático (cm)	% de evaporación (estimado gráfica de White)	Lámina Evaporada en el acuífero (mm/año)	Lámina Evaporada en el acuífero de acuerdo a la profundidad (mm/día)	Área (Km ²)	Volumen de evapotranspiración (hm ³ /año)	Total Volumen de Evapotranspiración (hm ³ /año)
2008						
100	6.25	2,340	0.401	12.5	1.834	
200	3.75	2,340	0.240	34.94	3.066	
300	0.92	2,340	0.059	0.0	0.0	
						4.9

7.2.2 Bombeo (B)

De acuerdo con el valor reportado por el REPDA, se considera que el valor del bombeo es de **0.2 hm³/año**.

7.2.3 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

Las salidas subterráneas fueron calculadas de la misma manera como se evaluaron las entradas subterráneas, a partir de la configuración de elevación del NE presentada en la figura 4; el acuífero aunque no es un acuífero costero presenta una descarga hacia el norte, donde se localiza el acuífero Laguna Salada existiendo así una conexión hacia las partes más bajas de la laguna (tabla 5).

Tabla 5. Estimación del volumen de salida por flujo subterráneo 2008

Celda	T (10 ⁻³ m ² /s)	B (10 ³ m)	i	Q (m ³ /s)	Vol ₁ anual (hm ³)
S ₁	2.315	1.325	0.0188	0.0576	1.8

El cálculo de volumen total por flujo subterráneo horizontal (Sh) para el año 2008 es de **1.8 hm³**.

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

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, no se registran alteraciones en la dirección natural del flujo subterráneo ni conos de abatimiento. Bajo estas condiciones el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo. Por lo tanto para fines del balance de aguas subterráneas, **$\Delta VS = 0$**

Solución a la ecuación de balance

Una vez calculadas las componentes de la ecuación de balance, procedemos a evaluar la recarga vertical por lluvia e infiltraciones, mediante la expresión (2), que fue establecida con anterioridad:

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

$$Rv = 1.8 + 0.2 + 4.9 - 0.0 - 4.0$$

$$Rv = 2.9 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

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

$$\begin{aligned} R &= R_v + E_h \\ R &= 2.9 + 4.0 \\ R &= 6.9 \text{ hm}^3/\text{año} \end{aligned}$$

8. DISPONIBILIDAD

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

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

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 **6.9 hm³/año**, todos ellos son de recarga natural.

8.2 Descarga natural comprometida (DNCOM)

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 = 0.5 hm³ anuales**, que corresponde a las salidas subterráneas que aún presenta el acuífero.

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 **92,825 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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= \text{R} - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 6.9 - 0.5 - 0.092825 \\ \text{DMA} &= 6.307175 \text{ hm}^3/\text{año.} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones

de **6,307,175 m³ anuales.**

9. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua. 2005. Estudio para Actualizar la Disponibilidad Media Anual de las Aguas Nacionales Superficiales en las 85 (ochenta y cinco) Sub-regiones Hidrológicas de las 7 (siete) Regiones Hidrológicas de la Península de Baja California, Mediante la Aplicación de la NOM-011-CNA-2000. Universidad Autónoma de Baja California.

Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca Península de Baja California. 2008. Estudio Técnico para determinar la Disponibilidad de las Aguas Subterráneas en 20 acuíferos del estado de Baja California, elaborado por la empresa Sanx Ingeniería Integral y Desarrollo, S.A. de C.V.