



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO PLUTARCO ELÍAS CALLES (0315),
ESTADO DE BAJA CALIFORNIA SUR**

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.....	6
3.1 Provincia fisiográfica	6
3.2 Clima	6
3.3 Hidrografía.....	7
3.4 Geomorfología.....	7
4. GEOLOGÍA.....	8
4.1 Estratigrafía	9
4.2 Geología estructural	11
4.3 Geología del subsuelo.....	12
5. HIDROGEOLOGÍA.....	12
5.1 Tipo de acuífero.....	12
5.2 Parámetros hidráulicos	13
5.3 Piezometría.....	13
5.4 Comportamiento hidráulico.....	14
5.4.1 Profundidad al nivel estático.....	14
5.4.2 Elevación del nivel estático.....	15
5.4.3 Evolución del nivel estático	16
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea	17
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	19
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	19
7.1 Entradas.....	19
7.1.1 Recarga vertical (Rv).....	20
7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	20
7.2 Salidas	23
7.2.1 Evapotranspiración (ETR).....	23
7.2.2 Bombeo (B)	24
7.2.3 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)	24
7.3 Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$	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 Plutarco Elías Calles, definido con la clave 0315 por la Comisión del Agua, se localiza en la porción suroeste del estado de Baja California Sur, tiene una extensión 385 km² y una altitud máxima de 1,000 msnm. Colinda dentro del estado con los acuíferos El Pescadero al norte, San José del Cabo al este, Migriño al sur y sureste y con el Océano Pacífico al oeste (Figura 1). Geopolíticamente abarca parcialmente los municipios de La Paz y Los Cabos.



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 que delimita al acuífero

ACUÍFERO 0315 PLUTARCO ELÍAS CALLES							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	110	9	14.8	23	14	35.1	
2	110	1	18.4	23	20	5.1	
3	109	56	20.7	23	18	12.0	
4	109	55	43.2	23	17	15.5	
5	109	57	24.4	23	14	34.8	
6	109	57	17.9	23	12	44.6	
7	109	58	8.8	23	11	48.3	
8	109	59	46.6	23	11	28.2	
9	110	0	6.7	23	9	49.1	
10	110	3	15.7	23	4	46.8	
11	110	6	25.6	23	3	45.7	DEL VERTICE 11 POR LA LINEA DE BAJAMAR A LO LARGO DE LA COSTA
1	110	9	14.8	23	14	35.1	

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero Plutarco Elías Calles pertenece al Organismo de Cuenca I “Península de Baja California” y es jurisdicción territorial de la Dirección Local en Baja California Sur. Su territorio se encuentra sujeto a las disposiciones del “Acuerdo que establece el Distrito Nacional de Riego de Baja California Sur, declarando de utilidad pública la construcción de las obras que lo forma”, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 2 de julio de 1954 y por el “Decreto que establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la región meridional del Territorio Sur de Baja California”, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 6 de julio de 1954. Ambos decretos son de 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 2. El uso principal del agua subterránea es el doméstico y pecuario. En el acuífero 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

En la región que comprende el territorio que cubre el acuífero se han llevado a cabo algunos estudios geohidrológicos de evaluación, entre los más importantes podemos mencionar los siguientes:

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DEL VALLE DE TODOS SANTOS, TERRITORIO DE BAJA CALIFORNIA (VALLES DEL SUROESTE), elaborado por Técnicas Modernas de Ingeniería, S.A. para la Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH) en 1974.

El objetivo del estudio fue el conocer el funcionamiento hidráulico de los acuíferos y evaluar su potencial para determinar las condiciones de explotación y recarga que sirvieran de base para fijar una política adecuada de explotación de sus recursos.

Por lo que respecta al Valle de Plutarco Elías Calles, para entonces, se tenían perforadas 16 norias y 3 pozos con una extracción de 0.28 hm³/año. Se determinó una condición geohidrológica de equilibrio con un volumen de recarga de 0.29 hm³/año.

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DE LA CUENCA DE “VALLES DEL SUROESTE” EN EL ESTADO DE BAJA CALIFORNIA, elaborado por Acuplan, S.A. para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH) en el año de 1981. El objetivo del trabajo fue el definir las condiciones que prevalecían en ese momento en los acuíferos de los valles del suroeste de BCS, cuantificarlos y definir la salinidad del agua subterránea.

Indica que para esta fecha existían en toda esta región 152 captaciones correspondientes a 33 pozos, 107 norias, 2 manantiales y 10 sondeos exploratorios. Como parte de los trabajos de campo se realizaron 24 pruebas de bombeo mediante las cuales se obtuvo un coeficiente de transmisividad que varía entre 10^{-2} y 10^{-3} m²/s. Los caudales de extracción de los aprovechamientos variaban de 4.4 y 37.9 lps, con los que fue posible calcular caudales específicos entre 0.37 y 22.0 lps/m.

Por lo que corresponde al acuífero Plutarco Elías Calles, el valor de la extracción estimada ascendía a 0.622 hm³/año, no fue posible evaluar la recarga pero existían evidencias de que su valor era mayor que la extracción, por lo que se consideró que se encontraba en condición de sobreexplotación.

ESTUDIO PARA DETERMINAR LA FACTIBILIDAD DE EXTRACCIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA SALOBRE PARA SU DESALACIÓN EN LOS ACUÍFEROS DE: MIGRIÑO, PLUTARCO ELÍAS CALLES, EL PESCADERO, TODOS SANTOS Y CAÑADA HONDA, B.C.S., elaborado por Lesser y Asociados, S.A. de C.V. en 2007. El objetivo principal de este estudio fue determinar o actualizar el conocimiento del funcionamiento hidrodinámico de estos acuíferos. Las actividades de campo incluyeron censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría, nivelación de brocales, ejecución de pruebas de bombeo y obtención de muestras de agua subterránea para su análisis físico químico. Con la información aportada por estas actividades, fue posible plantear el balance de aguas subterráneas para determinar la recarga total media anual y, a partir de ella, determinar su disponibilidad correspondiente. Con base en los resultados del estudio, dada la escasez natural de agua en la región, se define la posibilidad de extraer agua subterránea salobre para su desalación, proponiendo los sitios apropiados para la extracción.

Este estudio fue la base para la elaboración de este documento, por lo que sus resultados y conclusiones se analizan en los apartados correspondientes.

3. FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia fisiográfica

De acuerdo con la clasificación de las provincias fisiográficas para la República Mexicana, realizada por Raisz (1964), el área se encuentra comprendida dentro de la Provincia Fisiográfica Baja California, Subprovincia Altiplanicie Meridional.

De acuerdo a la clasificación de las Provincias Fisiográficas del INEGI (1997), localmente, la zona se encuentra ubicada dentro de la subprovincia del Batolito Los Cabos, que se extiende al sur de las Llanuras Costeras de Baja California Sur y que está delimitada al sur por una falla geológica que la corta transversalmente, separándola de dichas llanuras costeras que se extienden hacia el norte por varios kilómetros.

3.2 Clima

Con base en los datos históricos de precipitación, temperatura y evaporación potencial de las estaciones climatológicas que se ubican en la porción sur de la península de Baja California, y con apoyo en la carta de climas, se observa que el clima de la región, a lo largo de la línea de costa, se clasifica como de tipo BW(h')hw(x'), que corresponde a un clima seco, semicálido, con lluvias en verano y una precipitación invernal entre 5 y 10.2%.

Este tipo de clima se modifica hacia los flancos de las elevaciones topográficas que se ubican tierra adentro, pasando a un clima BS_ohw(w) que es seco, muy cálido y cálido. Hacia las partes altas de las sierras, vuelve a cambiar el clima para presentar el tipo C(w_o), que pertenece a la gama de climas templados, subhúmedos, con lluvias en verano.

La temperatura media anual varía de 22° C mm que se registra en la costa, a 18° C en la parte alta de la sierra. De acuerdo con los datos registrados en la estación 03-040 ubicada al norte de Migriño la media anual registrada en su área de influencia es de 22° C.

Durante el periodo de noviembre-abril se presentan las temperaturas medias mínimas y medias máximas de 12° C y 27° C respectivamente, para la línea de costa, y de 6° C y 24° C, que se registran en las sierras. En el periodo de mayo-octubre, la temperatura media máxima en la zona costera es mayor de 33° C.

Los valores de precipitación varían de 200 mm, registrados en la zona costera, hasta los 600 mm en las zonas topográficamente más altas. De acuerdo con los registros de la estación 03-040, ubicada al norte de Migriño, la media anual registrada es de 258 mm. En la zona costera, durante el periodo de noviembre-abril se presentan precipitaciones menores de 50 mm, en tanto que valores que varían de 50 y 75 mm se registran en los flancos de las sierras. En contraste, para el periodo de mayo-octubre, la precipitación media varía de poco menos de 175 a 325 mm para ambas zonas: costera y flancos de las sierras, respectivamente. La región se caracteriza por presentar periodos de sequía prolongados, que son interrumpidos drásticamente por la incidencia de tormentas tropicales y huracanes.

3.3 Hidrografía

La zona se encuentra localizada dentro de la Región Hidrológica RH 3 “Baja California Suroeste (Magdalena)”. Forma parte de la Cuenca A, correspondiente a la vertiente que drena hacia el Océano Pacífico. El acuífero pertenece a la cuenca A “Arroyo Caracol - Arroyo Candelaria”, que incluye a los acuíferos de toda la porción suroeste de BCS, desde Las Pocitas-San Hilario hasta Migriño, y continúa al sur, casi hasta llegar a Cabo San Lucas.

La región se caracteriza por presentar condiciones de régimen de lluvias en verano con valores de precipitación bajos y escasez natural del agua, que ocasionalmente se ven alteradas debido a la presencia de huracanes. En ambos casos, los escurrimientos superficiales son de tipo intermitentes que generalmente desaparecen por infiltración hacia la planicie costera. No existen estaciones hidrométricas, ni infraestructura hidráulica para el almacenamiento de las corrientes superficiales

3.4 Geomorfología

Se distinguen 2 unidades geomorfológicas, (1) valles costeros y (2) sierras. Los valles tienen formas planas con ligera pendiente al mar, de dimensiones reducidas y drenaje denso de carácter intermitente, de tipo dendrítico y subdendrítico en las sierras y paralelo en los valles. En Plutarco Elías Calles, el valle es angosto con 4 km de ancho en su desembocadura al mar y hasta 5 km tierra adentro, donde se angosta en forma de triángulo hasta desaparecer. Hacia el oriente se encuentra rodeado por elevaciones topográficas constituidas esencialmente por rocas ígneas intrusivas y metamórficas y en menor proporción conglomerados.

Presenta geoformas variadas: redondeadas y de suave pendiente en la zona aledaña a la costa y elevaciones que se elevan hasta 1000 msnm en las sierras que delimitan el acuífero, ocasionalmente disectadas por numerosos arroyos. En la parte sur, destaca un pequeño valle que se abre 500 m en su desembocadura al mar, limitado al norte por el Cerro de la Ballena. Estos valles se encuentran rodeados por elevaciones topográficas constituidas esencialmente por rocas ígneas intrusivas, metamórficas y en menor proporción conglomerados. Presenta geoformas variadas: redondeadas y de suave pendiente en la zona aledaña a la costa, y elevaciones que varían de 400 a 600 msnm en las estribaciones de las sierras que delimitan el acuífero, disectadas por arroyos.

4. GEOLOGÍA

La columna geológica de la zona está constituida por rocas ígneas intrusivas, metamórficas, areniscas y conglomerados, cuyo registro estratigráfico comprende edades que varían del Mesozoico (Jurásico) al Cenozoico (Cuaternario). La distribución de las diferentes unidades litológicas se presenta en la figura 2.

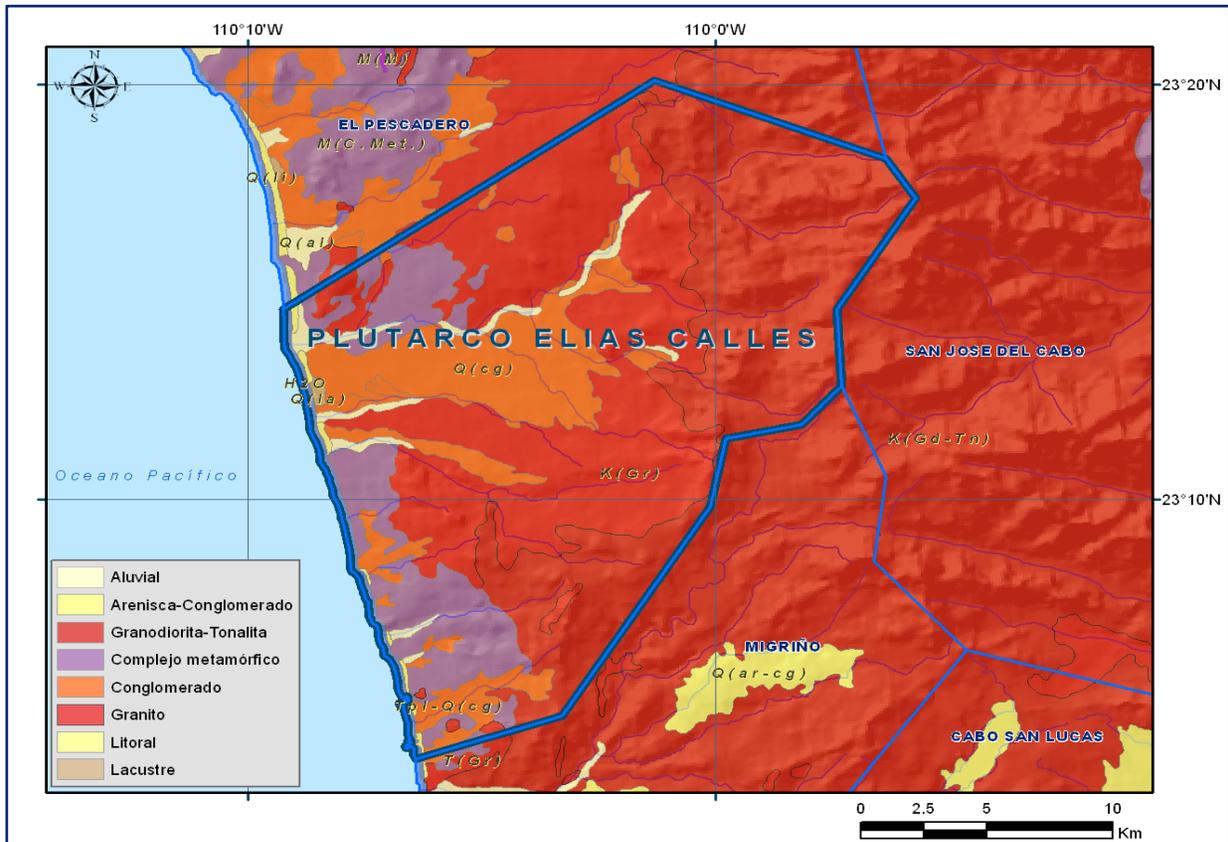


Figura 2. Geología general del acuífero

4.1 Estratigrafía

De acuerdo con la identificación de las unidades litológicas que afloran en la región, a continuación se presenta la descripción de las distintas unidades cronoestratigráficas:

Rocas Metamórficas Jurásicas

Esta unidad corresponde a metasedimentos (rocas sedimentarias metamorfoseadas) de posible edad Jurásico Superior (?) que afloran principalmente en el valle de Todos Santos, donde constituyen la mayor parte de las elevaciones topográficas. En el acuífero Plutarco Elías Calles sus afloramientos se ubican a lo largo de la zona costera, hacia los límites con el acuífero Migriño y con el acuífero El Pescadero.

Se trata de areniscas que fueron afectadas por metamorfismo regional de alta temperatura y baja presión, generando en algunos sitios un paragneis de anfibolita. Las rocas tienen un aspecto bandeado, de coloración gris verdoso a café óxido; es cortada por diques y dique-estratos de pegmatita y aplita con presencia de turmalina. El bandeamiento que presentan las rocas refleja cambios en su composición y textura, los cuales se pueden apreciar a escala microscópica.

En la porción nororiental de Todos Santos afloran filitas El Cardonoso, cuya edad también puede ser posiblemente Jurásico Superior. No se observan relaciones de campo, pero se infiere un contacto discordante con la unidad anterior. Las rocas presentan una estructura semicompacta de color pardo rojizo, textura de grano fino y esquistosidad bien desarrollada. Esta unidad se orienta en una franja de rumbo NW-SE que tiene continuidad hacia el norte de Todos Santos.

Posiblemente también del Jurásico afloran anfibolitas y esquistos en la región de El Pescadero, cuyas relaciones de campo con las unidades anteriores están enmascaradas por la presencia de intrusivos, aunque se infiere un contacto discordante con las filitas jurásicas. Las rocas son de grano fino, textura granular y estructura compacta, con tonalidades que varían de color pardo a verde.

Dentro de esta unidad se alojan cuerpos lenticulares de caliza recristalizada que afloran en forma de crestos con rumbo NE e inclinaciones hacia el NW.

Estos horizontes calcáreos por lo general siguen el rumbo de la foliación. Esta unidad, junto con la anfibolita y esquistos, se presentan como colgantes en granodioritas.

Granodioritas cretácicas

El área de exposición de estas rocas es la más grande dentro del acuífero, ya que se extiende desde las regiones topográficamente más altas hasta la línea de costa. Son rocas intrusivas de composición granodiorítica, de estructura compacta que presentan colores variados, generalmente en tono pardo-gris y textura fanerítica de grano medio.

Intrusiones de gabro, de la misma edad, afloran al NE de Todos Santos y al sureste de San Juan de Los Lagos. Estas rocas presentan estructura compacta, de color pardo con tonos verdes, y textura fanerítica a porfirítica.

Granitos cretácicos

Los afloramientos de estas rocas ígneas intrusivas se ubican en la zona costera, en los extremos norte y sur de la zona costera, en los límites con los acuíferos Plutarco Elías Calles, donde rodea a los afloramientos de rocas metamórficas, y Cabo San Lucas. Presentan estructura compacta y textura fanerítica.

Aluvión Cuaternario

A finales del Plioceno y durante el Pleistoceno, se depositaron discordantemente sedimentos que conforman terrazas continentales, constituidos por conglomerados polimícticos, semiconsolidados a consolidados. El Holoceno está representado por arenas y conglomerados polimícticos, arenas y limos, depósitos de aluvión y litoral, distribuidos en las zonas topográficamente bajas y sobre la costa.

Los escurrimientos superficiales han disectado las elevaciones topográficas, formando valles de dimensiones reducidas que se abren hacia la línea de costa. Estos valles se encuentran rellenos de materiales aluviales entre los que predominan las arenas, producto de erosión de los granitos, conglomerados y limos. Hacia la línea de costa, se presenta una angosta planicie constituida por sedimentos granulares de litoral, esencialmente arenas.

4.2 Geología estructural

La historia tectónica del Golfo de California y provincias peninsulares es muy compleja debido al hecho de estar ubicadas sobre una margen continental que ha sido afectada por varios procesos de convergencia y divergencia. Sin embargo, dos importantes eventos tectónicos regionales están expuestos en la región. Uno corresponde a la Orogenia Laramide, responsable del movimiento compresivo producto del choque de la placa Farallón con la placa Norteamericana, lo que dio origen a la intrusión de grandes masas ígneas (parte del Batolito Peninsular).

Un segundo evento tectónico se desarrolló del Mioceno Medio al Plioceno Temprano, cuando ocurrió la configuración del límite entre la placa Pacífica y la placa Norteamericana, lo que dio origen a la formación de la Cuenca de California, por medio de movimientos oblicuos extensionales con orientación NW-SE, modelando de esta manera un relieve peninsular gobernado por bloques escalonados, con sensible basculamiento hacia el poniente y fallas laterales dextrales. Este periodo es muy importante en la región, ya que se le asocia a la intrusión de estructuras tabulares de diferente composición.

Las estructuras antiguas se encuentran generalmente enmascaradas por la presencia de sedimentos recientes. Se observan plegamientos en las filitas, cuyo evento tectónico que les dio origen se interpreta como Laramídico (?). También se observan fracturas o fallas que sirvieron de conducto para el emplazamiento de yacimientos minerales y diques con rumbo NW-SE.

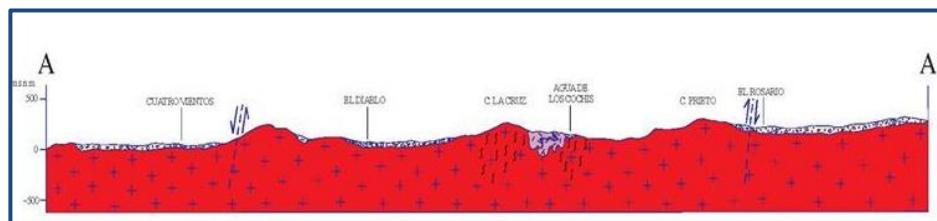
Es posible inferir algunas fallas dúctiles de carácter regional que pueden representar la continuidad de la falla La Paz, y algunas fallas paralelas con rumbo predominante NE-SW que limitan el bloque tectónico Los Cabos, ubicado en la porción occidental, cuyo origen podría estar relacionado al proceso tectónico extensivo.

La deformación dúctil se presenta con mayor frecuencia dentro de la granodiorita en la zona de influencia de la falla La Paz, el rumbo predominante de la foliación es NW, con inclinaciones hacia el SW y NE. Sin embargo, existen también foliaciones en dirección NE inclinadas hacia el NW. Estas dos direcciones de la foliación pueden ser interpretadas como resultado del mismo evento que generó las fallas dúctiles. Los yacimientos minerales metálicos están asociados a las áreas de mayor deformación dúctil dentro de la granodiorita.

4.3 Geología del subsuelo

La información de los cortes litológicos de pozos, las evidencias de campo y los registros eléctricos realizados en la región, permiten definir que el acuífero se aloja en los sedimentos aluviales que han sido transportados por los escurrimientos superficiales y depositados en los cauces de los arroyos y en la planicie costera. Su espesor varía de 10 a 60 m y conforma un acuífero de baja capacidad de almacenamiento debido a sus reducidas dimensiones, tanto en la vertical como en planta. Las fronteras al flujo subterráneo y el basamento están constituidas por las rocas ígneas intrusivas (granitos y granodioritas) y metamórficas. Las rocas graníticas eventualmente contienen fracturas y presentan alteración, generando la presencia de algunos manantiales, como los que existen en Migriño, Pescadero y Todos Santos.

En la figura 3 se muestra una sección geológica esquemática típica de la región suroccidental de Baja California Sur, que corresponde a la región de Pescadero, en la que se observa el escaso espesor de los acuíferos, subyacentes por la presencia de rocas ígneas intrusivas.



Fuente: SGM (2001). Carta Geológica Minera F12-B33 Todos Santos 1:50,000

Figura 3. Sección geológica esquemática

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

De acuerdo con la información geológica y piezométrica, es posible identificar que el acuífero Plutarco Elías Calles es de tipo **libre** y está constituido por sedimentos aluviales depositados tanto en los subálveos de los arroyos como en la planicie costera.

La granulometría de estos materiales varía de gravas a arcillas y su espesor promedio fluctúa entre 10 y 60 m, conformando un acuífero de reducidas dimensiones y poca capacidad de almacenamiento.

La permeabilidad del acuífero es media a baja, dependiendo del contenido de sedimentos arcillosos.

La recarga que recibe el acuífero procede de la infiltración directa de la lluvia sobre el valle, así como por la infiltración del agua superficial que escurre a través de los arroyos intermitentes, durante las lluvias. La descarga se produce de manera natural por flujo subterráneo hacia el mar y por evapotranspiración en pequeñas zonas que presentan niveles freáticos someros; de manera artificial se efectúa por medio de la extracción que se lleva a cabo por medio de las captaciones.

Aunque el valor de la precipitación pluvial media anual es bajo, la presencia ocasional de los huracanes tiene un efecto muy importante sobre la recarga de los acuíferos, siendo evidente en muchos casos la rápida recuperación de los niveles del agua subterránea.

5.2 Parámetros hidráulicos

Como parte de las actividades realizadas en el estudio de 2007, se ejecutaron 5 pruebas de bombeo en los acuíferos de la región suroccidental de Baja California Sur: dos en Todos Santos, una en Plutarco Elías Calles, una más en El Pescadero y la última en Cañada Honda. Adicionalmente, para el caso del acuífero Plutarco Elías Calles se tomaron en cuenta los resultados de 4 pruebas realizadas por la empresa de ACUAPLAN (1981).

De esta manera, los valores obtenidos de transmisividad varían de **2.6 a 84.8 x 10⁻³ m²/s**, para los acuíferos del suroeste de B.C.S considerados en el estudio realizado en el 2007, son consistentes con los reportados por las pruebas realizadas en estudios previos, las cuales reportan valores que oscilan entre 0.1 y 77.6 10⁻³ m²/s.

5.3 Piezometría

Con respecto a la información piezométrica, se dispone de información sobre configuraciones de la profundidad al nivel estático para los años de 1974, 1982 y 1994 y 2007. Debido a que, en términos generales, los valores de profundidad al nivel estático se han mantenido sin variaciones importantes durante el transcurso de las últimas tres décadas, únicamente se describen las configuraciones correspondientes al 2007.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

De la figura 4 se puede observar que los valores de profundidad al nivel estático para el 2007 varían desde algunos metros, en la zona costera y en las cercanías del arroyo Gaspareño, hasta 10 metros, conforme se asciende topográficamente. Como se mencionó anteriormente la profundidad al nivel estático se ha mantenido sin variaciones importantes en el transcurso de las últimas 3 décadas, debido principalmente a que la extracción que se realiza en el acuífero es incipiente.

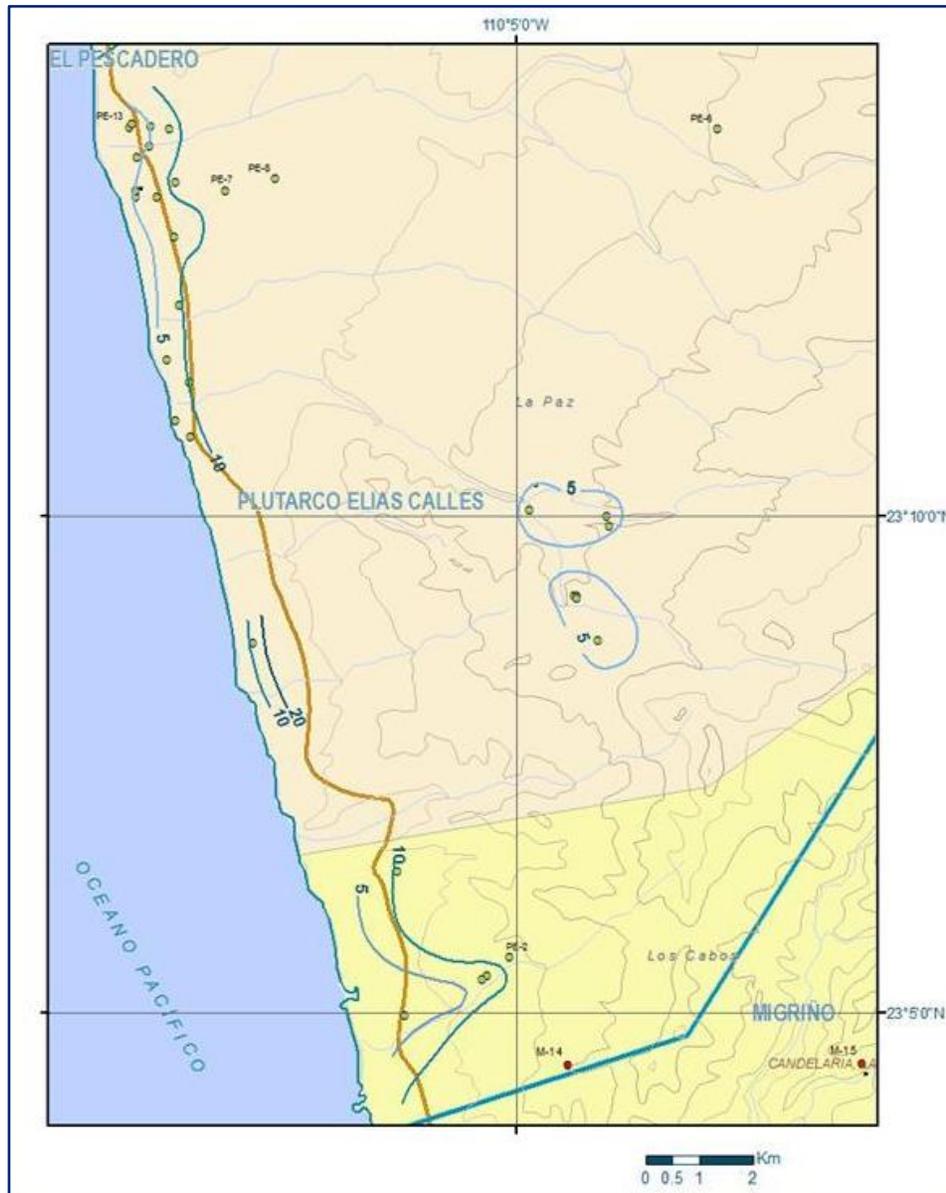


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2007)

5.4.2 Elevación del nivel estático

Con respecto a la elevación del nivel estático para el año 2007 mostrado en la figura 5, se observa que sus valores, en general se encuentran ligeramente arriba del nivel del mar en la zona costera mostrando un flujo subterráneo del este hacia el oeste, o sea de la sierra hacia el mar; el nivel se encuentra a entre 0 y 10 msnm.

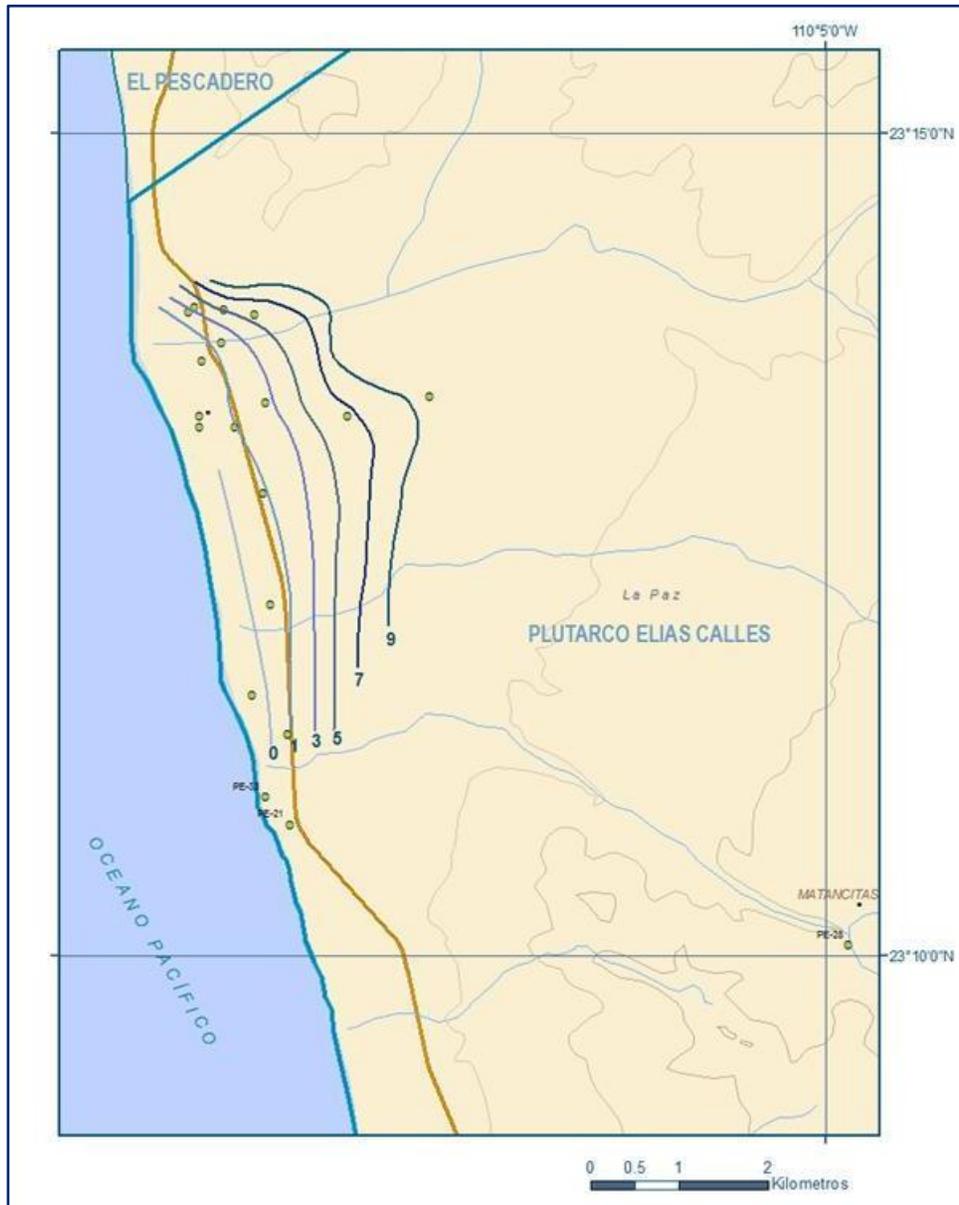


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2007)

5.4.3 Evolución del nivel estático

Con respecto a la evolución del nivel estático para el periodo 1996-2007, se observa que los valores varían de 1 a 4 m, para la zona cercana a la costa (figura 6), que representa un ascenso del nivel estático de 0.1 a 0.4 m anuales. Para el resto de la pequeña superficie del acuífero no se registran variaciones en la posición del nivel estático. El nivel estático responde de manera muy rápida al efecto de la recarga por lluvia. Aunque el valor de la precipitación pluvial es bajo, la incidencia de las lluvias ciclónicas que se presentan con frecuencia de 4 a 6 años en la región favorece su recuperación. Esto ha sido especialmente notable en el transcurso de los últimos 10 años.

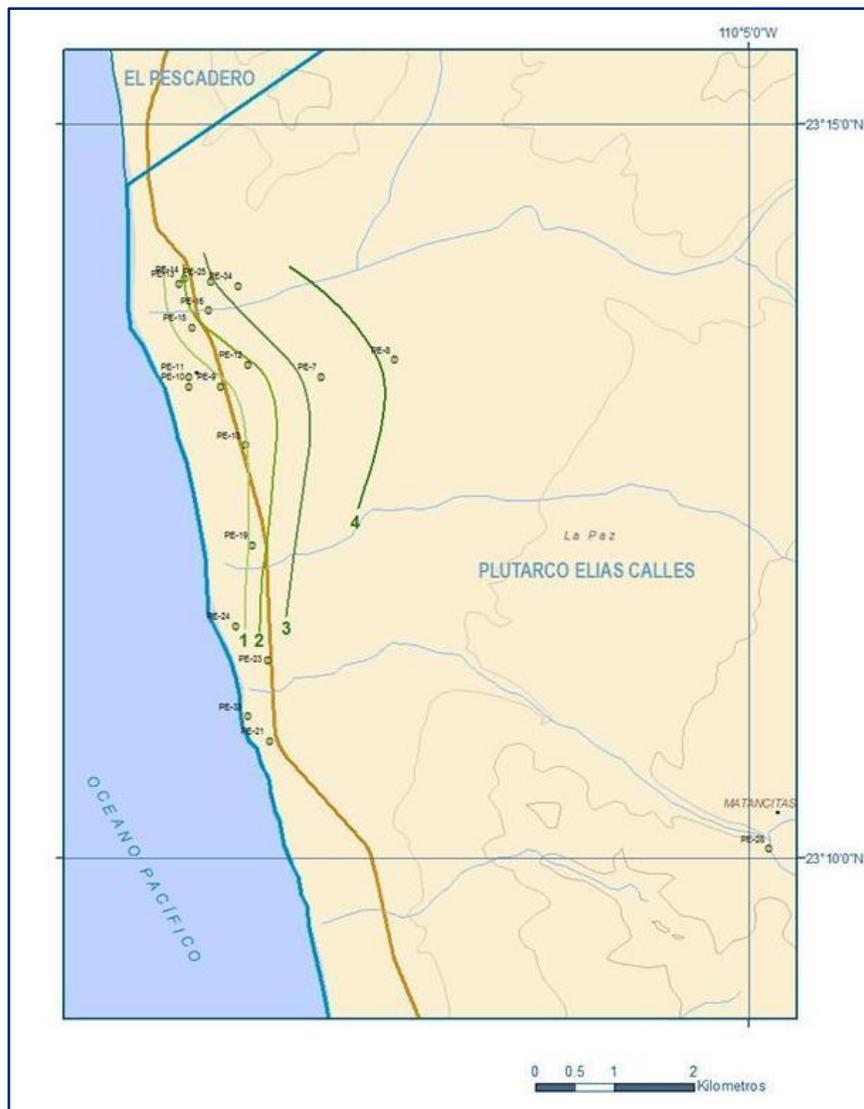


Figura 6. Evolución del nivel estático en m (1996-2007)

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en el año 2007, se tomaron muestras de agua en 11 aprovechamientos para su análisis fisicoquímico correspondiente.

Además de las mediciones hechas in situ, las determinaciones de laboratorio incluyeron iones mayoritarios, temperatura, conductividad eléctrica, pH, Eh, dureza total y sólidos totales disueltos. Adicionalmente, se determinó la concentración de bromo, yodo, estroncio, boro, litio sílice y arsénico.

Con respecto a la calidad del agua, tomando en cuenta los resultados de los análisis fisicoquímicos, se puede observar que los valores de Sólidos Totales Disueltos (STD) reportados para cinco muestras superan el máximo permisible de 1000 mg/lit establecido la Norma Oficial Mexicana 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, debido a su alto contenido de sodio y cloruro. Los valores de conductividad eléctrica indican la presencia de agua con poco más de 1000 $\mu\text{ohms/cm}$ en la franja costera del valle y valores de 2000 a 5000 $\mu\text{ohms/cm}$ en los aprovechamientos ubicados al sur del valle.

Con respecto a la concentración de metales y sílice, sus valores no sobrepasan los límites máximos permitidos por las normas mexicanas e internacionales

Por otra parte, de acuerdo con el criterio de Wilcox, que relaciona la conductividad eléctrica con la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), el agua extraída se clasifica como de salinidad media (C^2) a muy alta (C_4) y contenido bajo de sodio (S_1) a medio (S_2). De las 11 muestras analizadas, 10 se pueden clasificar de la siguiente manera: 3 se clasifican como C_2S_1 , 4 como C_3S_1 , 1 como C_3S_2 y 2 como C_4S_2 .

Esto indica que el agua subterránea es, en general, apta para el uso y consumo humano sin embargo existe riesgo en las zonas cercanas a la costa y para el riego agrícola deben llevarse a cabo prácticas de control de salinidad, ya que los aprovechamientos dedicados al uso agrícola tienen alto contenido salino y alta proporción de sodio intercambiable.

Con respecto a las familias del agua, predomina la sódico - clorurada, que indica la influencia de sales de origen marino, con una componente adicional mixta y bicarbonatada en algunos aprovechamientos cercanos a la población Plutarco Elías Calles.



Figura 7. Conductividad Eléctrica ($\mu\text{mhos/cm}$)

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con los resultados reportados en el último censo realizado en el año 2007, se registraron un total de 33 obras en el acuífero que aprovechan el agua subterránea, de las cuales 29 son norias y 4 pozos. Del total de obras, 20 están activas y las 13 restantes inactivas.

De las obras activas, 5 se destinan al uso agrícola, 8 al doméstico, 3 al doméstico-agrícola, 2 al doméstico-abrevadero, 1 al potable y 1 al doméstico-comercial. El volumen de extracción conjunta asciende a 1.0 hm³ anuales, destinados casi en su totalidad a satisfacer las necesidades del uso agrícola y doméstico.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de aguas subterráneas se planteó para el periodo 1996-2007, en una pequeña superficie de 6.7 km² del valle, en la que están dispersos los aprovechamientos. La diferencia entre la suma total de las entradas (recarga) y la suma total de las salidas (descarga), representa el volumen de agua perdido o ganado por el almacenamiento del acuífero en el periodo de tiempo establecido.

La ecuación general de balance de acuerdo a la ley de la conservación de la masa es la siguiente:

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

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

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

7.1 Entradas

Recarga

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 (Rv) y la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de una recarga por flujo horizontal subterráneo (Eh).

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

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

7.1.1 Recarga vertical (Rv)

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

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

Donde:

Rv: Infiltración por lluvia

Eh: Entradas por flujo subterráneo horizontal

B: Bombeo

Sh: Salidas por flujo subterráneo horizontal

ETR: Evapotranspiración real

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

De esta manera, despejando la recarga vertical:

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

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 2007 (figura 8), mediante la siguiente expresión:

$$Q = T * B * i$$

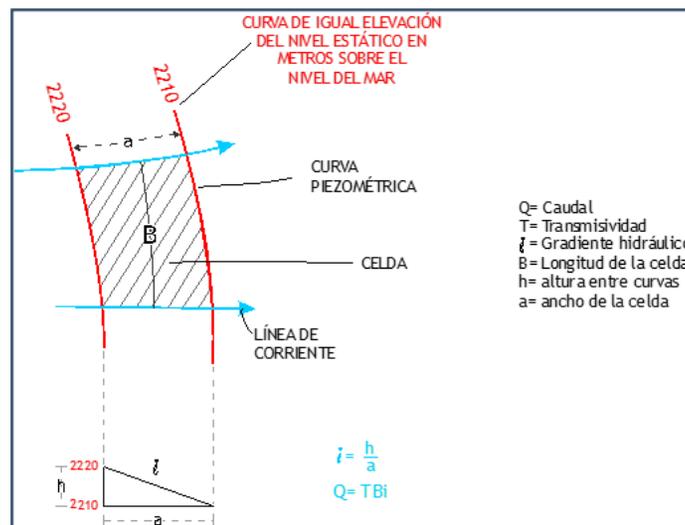
Donde:

Q = gasto que pasa por un determinado canal de flujo;

T = transmisividad;

B = ancho de la celda;

i = gradiente hidráulico



En esta configuración se seleccionaron canales o celdas de flujo y se aplicó la ley de Darcy para calcular el caudal “ Q ” que recarga al acuífero. La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada uno de los canales establecidos.

En la Tabla 2 se puede observar que para las celdas identificadas se presenta un flujo de entrada de **2.1 m³/año**.

Tabla.2. Cálculo de las entradas por flujo subterráneo horizontal

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h_2-h_1 (m)	Gradiente i	T (m^2/s)	CAUDAL Q (m^3/s)	VOLUMEN ($hm^3/año$)
E1	1821	336	2	0.0060	0.0015	0.01626	0.5
E2	1803	412	2	0.0049	0.0015	0.01313	0.4
E3	1290	252	2	0.0079	0.0015	0.01536	0.5
E4	1574	199	2	0.0101	0.0015	0.02373	0.7
TOTAL							2.1

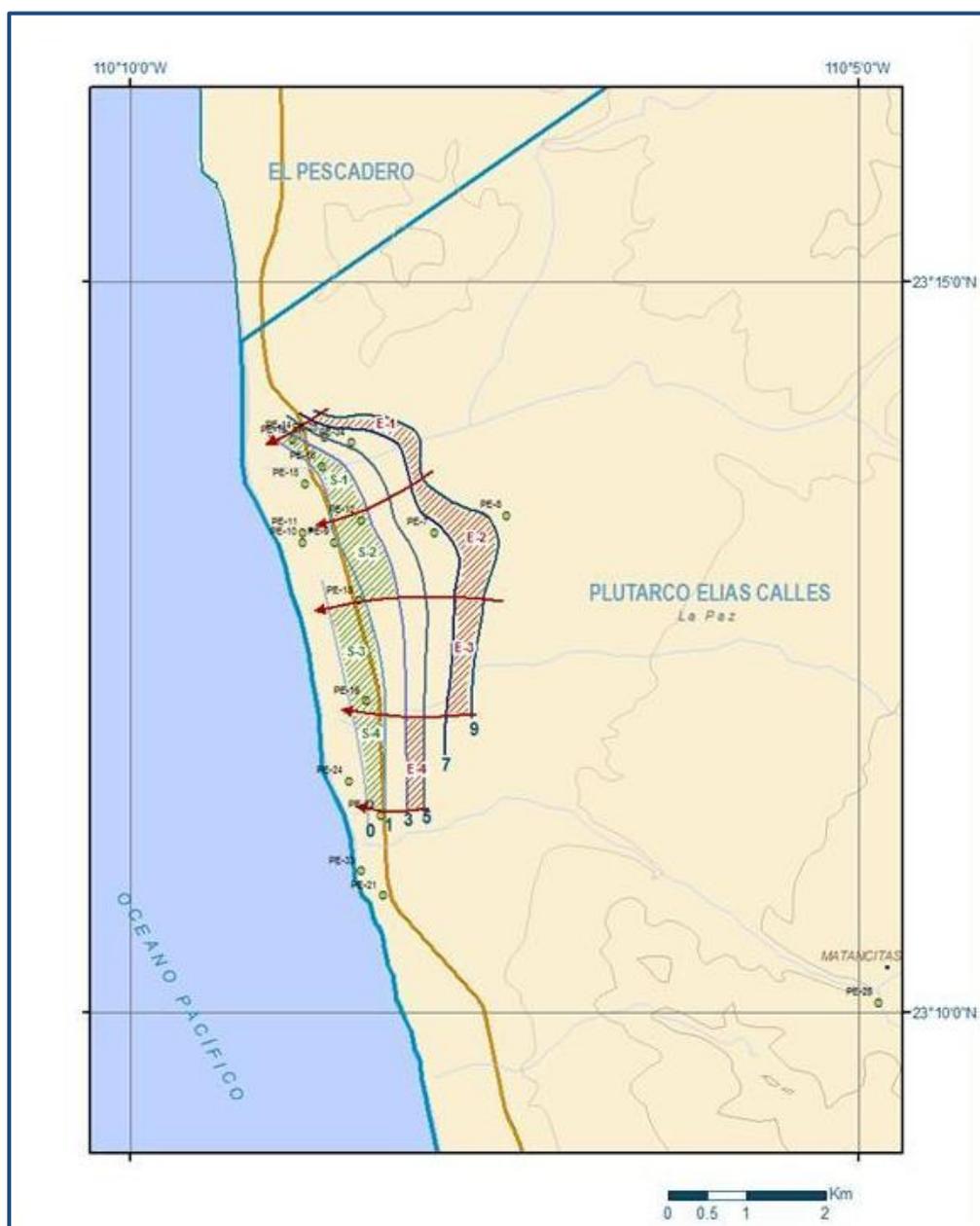


Figura 8. Red y celdas de flujo subterráneo

7.2 Salidas

7.2.1 Evapotranspiración (ETR)

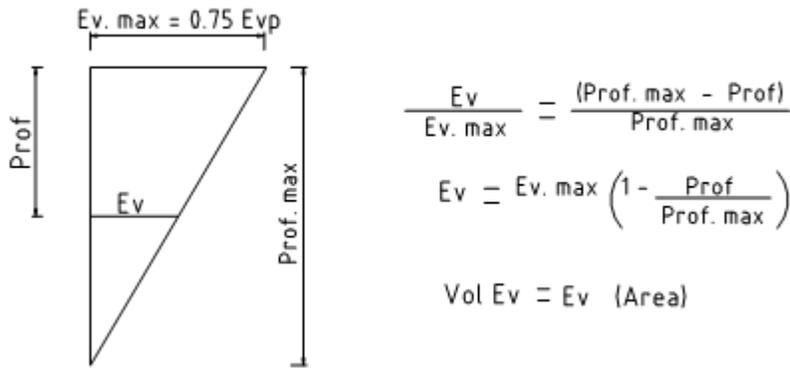
Este parámetro es la cantidad de agua transferida del suelo a la atmósfera por evaporación y transpiración de las plantas, por lo tanto es considerada una forma de pérdida de humedad del sistema.

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).

Dado que la lámina de precipitación pluvial media anual es del orden de los 258 mm, no podemos aplicar alguno de los métodos empíricos para estimar la evapotranspiración real, ya que éstos (Turc, Coutagne, por ejemplo) se invalidan para climas áridos con valores bajos de precipitación, generalmente inferiores a los 350 mm anuales, dependiendo del valor de la temperatura media anual; resultando valores superiores a la precipitación media.

Aunque el valor de la evapotranspiración se estima que es pequeño en este acuífero, dada la escasez natural del agua, se consideró importante estimar su valor para incluirlo en la recarga total que recibe el acuífero. Para el caso del acuífero Plutarco Elías Calles, la evapotranspiración se presenta en las proximidades del arroyo Candelaria y en la zona costera, donde existen niveles freáticos someros y vegetación nativa.

De los datos reportados por evaporímetros en la zona de Los Cabos se determina que la evaporación potencial promedio de la zona es de 1500 mm anuales. Si tomamos en cuenta que su valor se determina en un almacenamiento pequeño, usaremos un factor de corrección de 0.75 (Saxton & McGuinness, 1982, p. 235). Considerando que únicamente en una superficie 1.5 km² se presentan niveles freáticos someros, 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:



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

$$ETR [(0.75) (1.5 \text{ m}) (1.5 \text{ km}^2)]/4 = 0.4 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

El resultado de aplicar la fórmula anterior nos da como resultado un valor de evapotranspiración de **0.4 hm³/año**.

7.2.2 Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo asciende a **1.0 hm³**.

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 presentado en la figura 8. El valor estimado es de **1.4 hm³ anual**, tal como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Cálculo de salidas por flujo subterráneo horizontal

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h ₂ -h ₁ (m)	Gradiente i	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
S1	1300	270	2	0.0074	0.0017	0.01637	0.516
S2	1200	350	2	0.0057	0.0017	0.01166	0.3676
S3	1300	450	1	0.0022	0.0017	0.00491	0.1549
S4	1700	280	1	0.0036	0.0017	0.01032	0.3255
TOTAL							1.4

7.3 Cambio de almacenamiento ΔV(S)

Para el cálculo de este término se consideró la evolución piezométrica en el intervalo 1996-2007, mostrada en la figura 6.

Como se observa en ella, se han registrado valores de recuperación que representan un ascenso del nivel estático de 0.1 a 0.4 m anuales, en una pequeña zona de la región costera.

Para el resto de la superficie de este pequeño acuífero, no se han registrado variaciones importantes, debido principalmente a la presencia de las lluvias torrenciales en el transcurso de la última década, que han saturado su reducida capacidad de almacenamiento. Por lo tanto, se considera que para fines prácticos del balance, **$\Delta V(S) = 0.0 \text{ hm}^3/\text{año}$**

Solución de 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 recarga vertical (Rv).

De la ecuación (2), se tiene que:

$$\mathbf{Rv = B + Sh + ETR - \Delta V(S) - Eh \quad (2)}$$

Sustituyendo valores:

$$\begin{aligned} \mathbf{Rv} &= \mathbf{1.0 + 1.4 + 0.4 - 0.0 - 2.1} \\ \mathbf{Rv} &= \mathbf{0.7 \text{ hm}^3 \text{ anuales}} \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} \mathbf{R} &= \mathbf{Rv + Eh} \\ R &= 0.7 + 2.1 \\ \mathbf{R} &= \mathbf{2.8 \text{ hm}^3 \text{ anuales}} \end{aligned}$$

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:

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

Donde:

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

R = Recarga total media anual

DNC = Descarga natural comprometida

VEAS = Volumen de extracción de aguas subterráneas

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

8.2 Descarga natural comprometida (DNC)

La descarga natural comprometida se determina sumando los volúmenes de agua concesionados de los manantiales y del caudal base de los ríos que está comprometido como agua superficial, alimentados por el acuífero, más las descargas que se deben conservar para no afectar a los acuíferos adyacentes; sostener el gasto ecológico y prevenir la migración de agua de mala calidad hacia el acuífero.

Para el caso del acuífero se considera que el valor de la descarga natural comprometida es de **1.8 hm³ anuales**, de los cuales 1.4 hm³ anuales corresponden a la salida por flujo subterráneo hacia el mar para mantener la posición de la interfase marina y los 0.4 restantes a la evapotranspiración que debe comprometerse para preservar el ecosistema costero y la creación de zonas de protección a humedales. Por lo tanto **DNC = 1.8 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 **1,012,506 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022**.

8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)

La disponibilidad de aguas subterráneas, constituye el volumen medio anual de agua subterránea disponible en un acuífero, al que tendrán derecho de explotar, usar o aprovechar los usuarios, adicional a la extracción ya concesionada y a la descarga natural comprometida, sin poner en peligro a los ecosistemas.

Conforme a la metodología indicada en la norma referida anteriormente, se obtiene de restar al volumen de recarga total media anual, el valor de la descarga natural comprometida y el volumen de extracción de aguas subterráneas.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 2.8 - 1.8 - 1.012506 \\ \text{DMA} &= -0.012506 \text{ hm}^3/\text{año.} \end{aligned}$$

El resultado indica que no existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario el déficit es de **12,506 m³ anuales**.

9. BIBLIOGRAFÍA

Secretaría de Recursos Hidráulicos. 1974. Estudio Geohidrológico del Valle de Todos Santos, Territorio de Baja California (Valles del Suroeste). Elaborado por la empresa Técnicas Modernas de Ingeniería, S.A.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. 1981. Estudio Geohidrológico de la Cuenca de “Valles del Suroeste” en el estado de Baja California. Elaborado por la empresa Acuplan, S.A.