



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO EL CHINERO (0237), 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	5
3. FISIOGRAFÍA.....	5
3.1 Provincia fisiográfica	5
3.2 Clima	6
3.3 Hidrografía.....	6
3.4 Geomorfología.....	7
4. GEOLOGÍA.....	7
4.1 Estratigrafía	8
4.2 Geología estructural	11
4.3 Geología del subsuelo.....	11
5. HIDROGEOLOGÍA.....	12
5.1 Tipo de acuífero.....	12
5.2 Parámetros hidráulicos	13
5.3 Piezometría.....	13
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	15
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	16
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	16
7.1 Entradas.....	17
7.1.1 Recarga vertical (Rv).....	17
7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	17
7.2 Salidas	19
7.2.1 Evapotranspiración (ETR).....	19
7.2.2 Bombeo (B)	19
7.2.3 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)	19
7.3 Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$	19
8. DISPONIBILIDAD	20
8.1 Recarga total media anual (R).....	20
8.2 Descarga natural comprometida (DNC).....	21
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	21
8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	22
9. BIBLIOGRAFÍA	23

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 El Chinero, definido con la clave 0237 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción noreste del estado de Baja California, tiene una superficie aproximada de 2,522 km². Colinda al norte con el acuífero Valle de Mexicali, al Noroeste con el acuífero Laguna Salada, al oeste con Valle Chico-San Pedro Mártir, al sur con San Felipe Punta Estrella y al este con el Golfo de California (figura 1). Geopolíticamente se encuentra ubicado en el municipio de Mexicali.

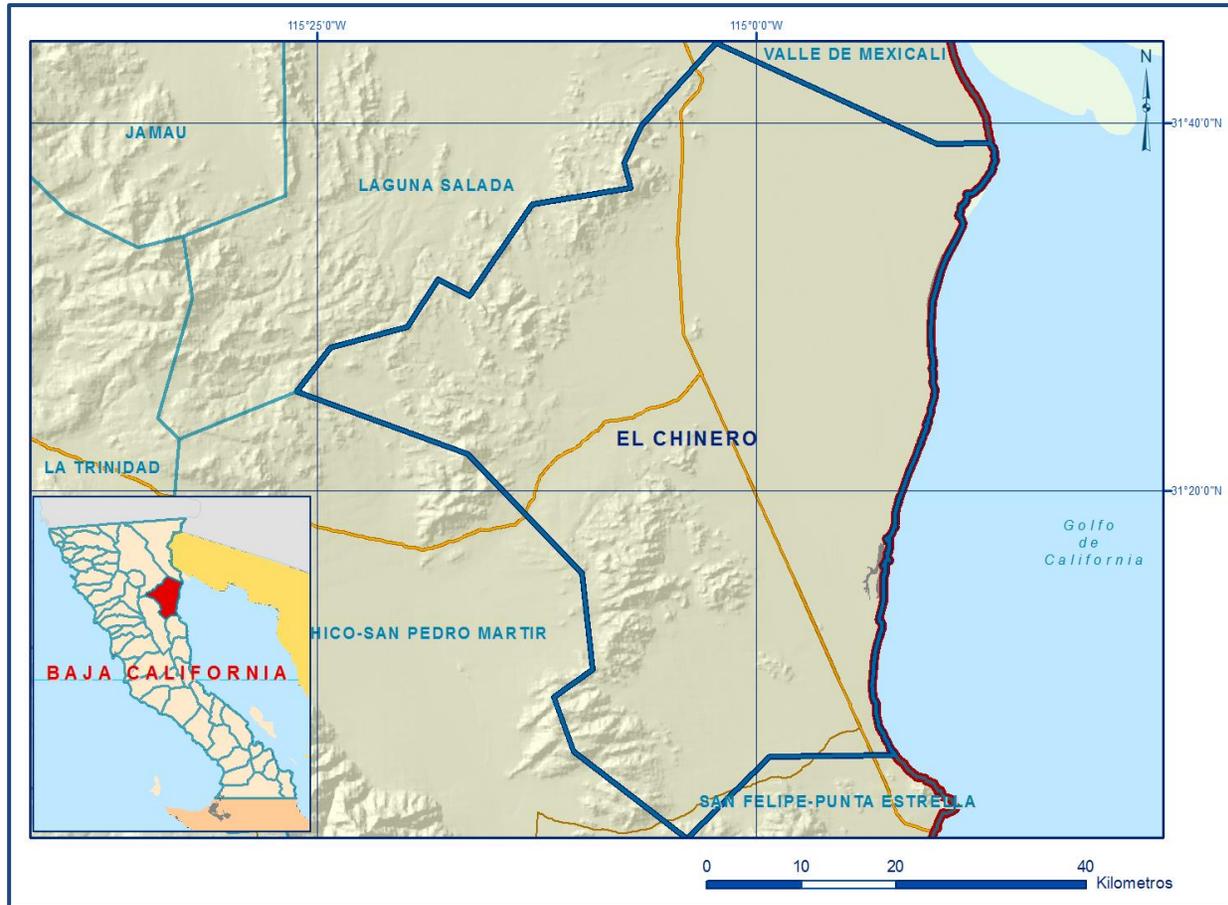


Figura 1. Localización del acuífero

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

Tabla 1. Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada del acuífero

ACUIFERO 0237 EL CHINERO							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	115	2	17.4	31	44	22.0	
2	114	49	45.7	31	38	52.3	
3	114	46	40.7	31	38	55.1	DEL 3 AL 4 POR LA LINEA DE BAJ AMAR A LO LARGO DE LA COSTA
4	114	52	6.6	31	5	35.3	
5	114	59	16.1	31	5	29.4	
6	115	3	57.9	31	1	10	
7	115	10	24.4	31	5	46.5	
8	115	11	30.9	31	8	44.7	
9	115	9	18.3	31	10	15.0	
10	115	9	55.3	31	15	30.1	
11	115	16	27.2	31	21	59.7	
12	115	26	9.5	31	25	23.7	
13	115	24	13.2	31	27	46.5	
14	115	19	50.9	31	28	53.9	
15	115	18	6.0	31	31	29.5	
16	115	16	19.3	31	30	36.2	
17	115	12	44.4	31	35	33.8	
18	115	7	10.2	31	36	27.7	
19	115	7	32.6	31	37	49.1	
20	115	6	32.6	31	39	52.3	
1	115	2	17.4	31	44	22.0	

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero El Chinero 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 3. El uso principal del agua subterránea es el de servicios. 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 DE EVALUACIÓN DE DISPONIBILIDAD Y CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN EL VALLE DE SAN FELIPE, B.C. PARA ABASTECIMIENTO A LA CIUDAD. Elaborado por EXYCO, S.A. en 1989. Se elaboró un balance de agua subterránea y se realizaron análisis físico-químicos en los que se identificó que el agua de la ciudad de San Felipe pertenece a una familia sódico-clorurada; debido a estas condiciones el agua que se extrae no se consideraba como potable ya que sobrepasaba los niveles de concentración de flúor indicados la SSA y OMS.

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 área se encuentra entre 2 grandes provincias fisiográficas Baja California y Montañas Sepultadas (Raisz, 1964).

La provincia fisiográfica de Baja California se encuentra hacia el occidente del acuífero está formada por montañas complejas constituidas por rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas que forman un gran bloque de pendiente suave hacia el Oeste y un frente Este abrupto el cual se encuentra dispuesto con una orientación NW-SE y se encuentra disectado por valles angostos de origen tectónico remodelado por la erosión.

La región oriental pertenece a la provincia fisiográfica Montañas Sepultadas, en la subprovincia fisiográfica del Desierto de Sonora y los rasgos que le caracterizan son planicies aluviales amplias interrumpidas por montañas complejas, aisladas y de orientación NW-SE, formadas por rocas de composición ígnea y metamórfica.

La región incluye grandes lagunas marginales e islas en costa y en desembocadura del río Colorado, así como una gran planicie constituida por sedimentos fluviales y marinos cubiertos parcialmente por arenas eólicas del desierto de Sonora.

La margen oriental de Baja California se desarrolla sobre la Llanura costera del Golfo, que comprende desde la frontera con Estados Unidos de América hasta la región del sur de Puertecitos aproximadamente. Entre las sierras peninsulares y el Golfo de California incluye varios rasgos geográficos importantes, como el delta del río Colorado, así como con las cuencas salobres de Laguna Salada y La Salada, sujeta a uno de los regímenes pluviales más bajos del país.

Subprovincia del Desierto de Altar. La subprovincia está constituida por un desierto arenoso, en ocasiones con campos de dunas semilunares y en otras con partes montañosas; la topografía comúnmente no excede los 200 m sobre el nivel medio del mar (INEGI, 1995), salvo donde se presentan extensiones de las Sierras Peninsulares, de orientación NW-SE, tal y como ocurre en Cucapah-El Mayor, Las Tinajas-Las Pintas y San Felipe-Santa Rosa.

3.2 Clima

Con base en la clasificación de Köppen modificada por Enriqueta García (1964) para las condiciones particulares de la República Mexicana, pertenece al subtipo Clima Muy Seco Cálido, BW(h') hw(x'), con lluvias en verano, que se desarrolla sobre la franja costera del Golfo de California, con una temperatura media anual superior a los 22° C, máximas de hasta 50° C en verano y mínimas de 4° C en invierno, un régimen de precipitación inferior a los 100 mm/año durante el verano.

3.3 Hidrografía

El acuífero pertenece a la Región Hidrológica 4 California Noroeste (Ensenada), Subregión Hidrológica Baja California Noreste y Río Colorado, cuenca del Arroyo Agua Dulce-Santa Clara Baja

En la zona la red hidrográfica está constituida por pequeños arroyos de tipo intermitente, que nacen en la sierra de San Pedro Mártir, teniendo una dirección de flujo hacia la costa, en la zona correspondiente al acuífero El Chinero solo existe un cuerpo de agua perenne que nace aproximadamente a 6.24 km de la línea de costa.

Algunos arroyos intermitentes nacen en el extremo Norte de la Sierra de San Felipe y otra a la altura del Cerro del Borrego, alcanzando un desarrollo del orden de 10 y 20 km, respectivamente, hasta su extinción en el Ejido Año de Juárez.

3.4 Geomorfología

En la parte septentrional de la zona se localizan dos geoformas pequeñas, una constituida por rocas extrusivas muy fracturadas de coloraciones rojizas y otra de por rocas metamórficas de colores oscuros, asociadas generalmente a granitoides. Al sur la Sierra de Santa Rosa y al Oeste la Sierra de San Felipe constituyen Sierras Altas de granitoides que están cubiertos localmente por una cubierta de rocas volcánicas.

Las sierras están separadas por cuencas estructurales rellenas por cientos de metros de rocas volcánicas primero y después por rocas sedimentarias de dos edades diferentes.

El drenaje es de tipo intermitente y pertenece a la vertiente del golfo de California, son de poca extensión, dispuestas en patrones de drenaje desintegrados que se pierden, generalmente antes de llegar al Golfo de California. En la parte central de esta porción desemboca el Río Colorado, de régimen permanente.

La provincia en general se ubica en una etapa de madurez geomorfológica, que es interrumpida solamente en la parte Oeste por el rejuvenecimiento regional asociado al levantamiento gradual del frente oriental de la Sierra San Pedro Mártir.

Para la porción Este es notable el depósito y formación del Delta del Colorado y el levantamiento de La Mesa del Desierto de Sonora. Es evidente el rejuvenecimiento local mostrado por las numerosas manifestaciones volcánicas básicas Pliocénicas, así como el movimiento de las fallas activas que mueven los valles actuales.

4. GEOLOGÍA

En la zona afloran rocas del Mesozoico y del Cenozoico, las primeras representadas por granitoides y rocas metamórficas con foliación cortados por patrones de diques (aplíticos, pegmatíticos o diabásicos) y de fallamiento de orientación NW-SE principalmente, que puede ser Mesozoico o Cenozoico.

Las rocas del Cenozoico son ígneas y su emplazamiento está asociado a la ruptura del continente y separación de la Península de Baja California, las rocas sedimentarias son de origen marino y su origen está asociado a las dos etapas de apertura del Golfo de California.



Figura 2. Geología general del acuífero

4.1 Estratigrafía

La estratigrafía en el área que comprende el acuífero es muy variada ya que se encuentra constituida por rocas de edades y composición diversa.

Las rocas metamórficas que se encuentran en la parte norte del área, están metamorfoseadas en fases de anfibolita, con variedades de gneises, esquistos y mármoles derivados de protolitos de origen sedimentario de edad Paleozoico. Las rocas que afloran se muestran en la figura 2.

Rocas Metamórficas

Los Gneises son de colores que varían del azul al negro, presentan textura granoblástica, vetillas de sílice y calcita, tienen foliación casi N-S con echado hacia el oriente y se encuentran intrusionados por plutones ácidos.

Los esquistos varían de color en tonos de verde, son de textura granoblástica su protolito es de origen sedimentario, presentan vetillas de calcita y foliación N-S con echado al oriente y se encuentran sumamente fracturados. Otra roca metamórfica que se observa es el mármol de coloración que va de gris a blanca, se encuentran muy fracturadas y dispuestas en estratos gruesos.

Rocas Ígneas Intrusivas

Tonalita K (Tn). Las tonalitas presentan textura fanerítica, son de color oscuro y forman parte de los batolitos de edad cretácica.

Granodiorita-Tonalita K (Gd-Tn). Unidad constituida por rocas de textura fanerítica con minerales como biotita, moscovita y turmalina, presentan intemperismo esferoidal y fracturamiento en bloques de regular tamaño, hacia el oeste del área se encuentra cortada por diques pegmatíticos y cubierta en partes por rocas del cenozoico, forma parte del Batolito de las Sierras Peninsulares.

Granodiorita K (Gd). Las unidades de granodioritas son de color gris claro de textura fanerítica con plagioclasas biotita, muscovita, turmalina y hornblenda. Esta unidad forma el núcleo que constituye a las Sierras de Juárez y San Pedro Mártir, formando montañas que corresponden a los batolitos de edad cretácica que afloran en Sonora y Baja California.

Rocas Ígneas Extrusivas

Estas rocas volcánicas son de probable edad pre-Mioceno, de composición intermedia a ácida y están abundantemente fracturadas. Las más abundantes son las tobas de composición andesítica a riolíticas. Su emplazamiento está relacionado con la deformación asociada con la ruptura continental.

Andesita Ts (A). Es una unidad constituida por derrames de lava andesítica de textura porfídica, se le observa fracturamiento moderado y tienen vetillas de calcita, forman

parte basal de los eventos volcánicos del Paleógeno-Neógeno y cubren a las rocas Cretácicas, se les asigna una edad del Neógeno.

Andesita-Brecha Volcánica Intermedia Ts(A-Bvi). Unidad constituida por la intercalación de andesitas con sus brechas volcánicas, presentan textura afanítica, están muy fracturadas y presentan pseudoestratificación masiva. Su tamaño varía y predominan los bloques en una matriz vítrea de composición andesítica.

Riolita Ts (R-Ta). Presentan textura esferulítica y afanítica, se encuentran dispuestas en pseudoestratos masivos, con fracturamiento en bloques de dimensiones regulares. Esta unidad constituye las últimas manifestaciones explosivas del evento volcánico del Paleógeno-Neógeno.

Rocas Sedimentarias. La secuencia sedimentaria es una serie de sedimentos marinos del litoral batial, depositados originalmente en el límite noroeste del proto-Golfo y del Golfo de California del Mioceno Tardío al Pleistoceno.

Arenisca Tm (ar). Unidad de areniscas depositadas en ambiente marino, son de grano medio, compuestas por cuarzo y fragmentos de pelecípodos con cementante calcáreo, presentan estratificación gradada y cruzada localmente, con estratos que van de delgados a medianos.

Conglomerado Tm (cg). Unidad compuesta por conglomerados polimícticos derivados de rocas ígneas y metamórficas con clastos subredondeados, contenidos en una matriz areno-arcillosa, presentan estratificación masiva, morfológicamente constituyen lomeríos altos modelados por la erosión fluvial.

Conglomerado Tpi (cg). Esta unidad está constituida por conglomerados que fueron depositados en un ambiente continental, son polimícticos, presentan mala selección y estratificación masiva, localmente tiene matriz arenosa y presentan lentes de arena.

Conglomerado Q (cg). Unidad constituida por acumulaciones de grava depositada en ambiente continental, presenta fragmentos subredondeados y varían de bloques a guijarros incluidos en una matriz arenosa, no se encuentran consolidados y son polimícticos, se le asignó edad Cuaternaria.

4.2 Geología estructural

La zona muestra evidencias de distintas etapas de deformación desde el Cretácico Tardío hasta la actualidad. Los eventos tectónicos relacionados con la evolución del margen occidental de Norteamérica desarrollaron estructuras por efectos compresivos durante la subducción y distensivos durante la ruptura del continente.

Las rocas de la región presentan por lo general foliación con dirección NW-SE, la deformación en rocas paleozoicas se relaciona a procesos metamórficos regionales de alto grado, con el desarrollo de plegamiento intenso y foliación, tal como se observa en los afloramientos al norte del área.

Las rocas graníticas de edad mesozoica que afloran hacia el occidente, muestran foliación y controles sobre el emplazamiento, asociados posiblemente a esfuerzos de compresión generados durante la subducción mesozoica, estas rocas son de composición ácida y están relacionadas con la fusión de la corteza continental.

En la zona se ha propuesto la existencia de fallamiento de gravedad de bajo y alto ángulo, sintética, antitética además de sistemas laterales con tendencia general Norte-Sur (N-S) a Noroeste-Sureste (NW-SE).

Los lineamientos observados en la zona presentan orientación NW-SE y NNW-SSE y son de carácter continental relacionados directamente con el sistema de fallas San Andrés.

4.3 Geología del subsuelo

De acuerdo con cinco sondeos Eléctricos Verticales obtenidos en 2005 y la geofísica permitió discriminar 3 capas genéricas con resistividades eléctricas distintivas de diferente potencial geohidrológico.

Unidad permeable. Presenta resistividades de 17 a 1900 ohm-m en la parte superficial de los sondeos correlacionables con capas de materiales granulares permeables (arena, gravillas, gravas, clásticos gruesos y cantos rodados) y capas de material compactado, areniscas y conglomerados, saturación acuífera.

Unidad semipermeable. Esta unidad presenta resistividades de 68 ohm-m (solo en el SEV-8) que se asocian con sedimentos granulares (arenas, gravillas, gravas con presencia de arcillas, con permeabilidad media a buena, saturados con agua salobre.

Unidad impermeable. Aquí se presentan resistividades de 160 a 1100 Ω m que son asociadas a capas de fondo de mayor granulometría, clastos gruesos, cantos rodados y rocas ígneas, con permeabilidad variable, dependiendo del fracturamiento y su alteración.

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

El acuífero presenta dos unidades geológicas, una de material consolidado con posibilidades bajas y un material granular de altas posibilidades.

La unidad de material consolidado se localiza hacia el noroeste del acuífero, esta unidad presenta permeabilidad baja y fracturamiento moderado, su factor de escurrimiento es alto y su capacidad de almacenamiento baja.

La otra unidad es de material no consolidado, constituida por conglomerados polimícticos y aluviones de bajo grado de compactación, estas rocas son comunes a lo largo de la línea de costa, aunque la mayoría de las veces son poco productivas.

El fracturamiento en la región es moderado y es paralelo al sistema de fallas de orientación NNW-SSE a NW-SE su influencia en la recarga del acuífero está condicionada al régimen pluvial. Las relaciones litológicas tampoco favorecen a la captación de agua, debido a su baja permeabilidad: las geoformas de las rocas del basamento Mesozoico y de las rocas volcánicas del Cenozoico, inducen porcentajes de escurrimiento alto, hasta alcanzar la zona del aluvión y depósitos recientes donde su infiltración es rápida para desfogar en el mar.

En particular las rocas sedimentarias antiguas (areniscas, conglomerados, calizas y lutitas, con sus alternancias) que dominan la zona, no parecen ser buenas almacenadoras de agua, debido a las características de los sedimentos que las constituyen.

Por tal motivo las mejores unidades hidrológicas las representan las rocas volcánicas debido a su fracturamiento y permeabilidad relativa, estas rocas están representadas por andesitas, riolitas y tobas.

De acuerdo al acomodo del depósito de materiales granulares donde se localizan los aprovechamientos del acuífero El Chinero es de tipo **libre**.

5.2 Parámetros hidráulicos

Con ayuda de los datos obtenidos de estudios anteriores, en el estudio geohidrológico realizado en 1989 se reporta la realización de cuatro pruebas de bombeo, tres en el área de San Felipe y una en el centro del valle. Los valores para la transmisividad varían de **4.88×10^{-3} a $7.38 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$** .

5.3 Piezometría

Para el análisis del comportamiento del acuífero únicamente se cuenta con información correspondiente al año 2008.

A partir de la medición de nivel estático en ellos, se realizó una extrapolación apoyada con la línea de costa y la elevación topográfica del terreno.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

De la configuración realizada para el año 2008 se observa que la profundidad al nivel estático varía entre 12 a 70 m observándose que hacia la línea de costa las profundidades disminuyen. A partir de esta franja hacia la costa la profundidad desciende hasta llegar al mar (figura 3).

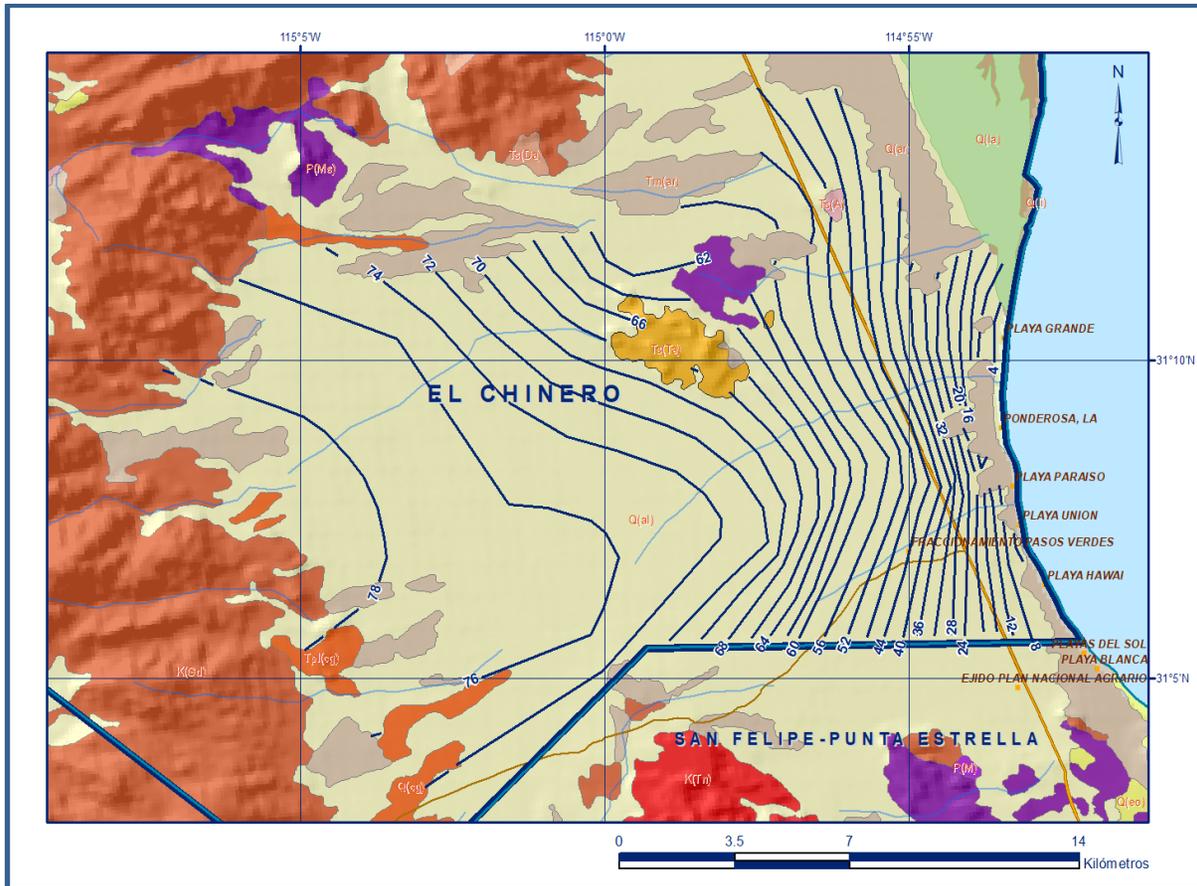


Figura 3. Profundidad al nivel estático en m (2008)

5.4.2 Elevación del nivel estático

La máxima elevación del nivel estático es de 210 msnm y se encuentra a 25 km de la costa en donde inician los afloramientos de granodiorita, a partir de entonces los valores disminuyen gradualmente hasta registrar los 10 a 4 km de la costa y continuar de la misma manera hasta el nivel cero de referencia que representa el nivel medio del mar.

Actualmente prevalecen las condiciones naturales, sin mostrar alguna alteración, debido a la reducida extracción de agua subterránea y a que su mala calidad natural limita su uso (figura 4).

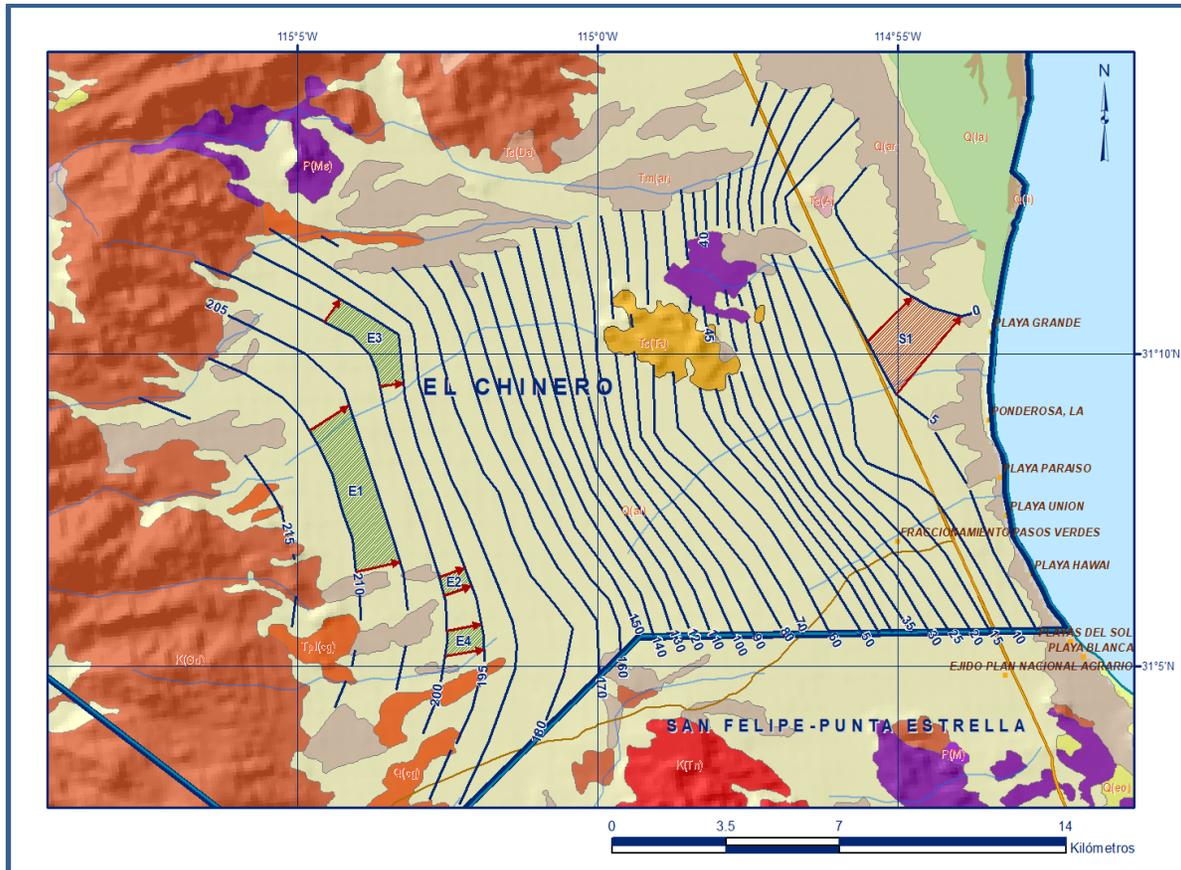


Figura 4. Elevación del nivel estático en msnm (2008)

5.4.3 Evolución del nivel estático

No existe información piezométrica que permita elaborar una configuración de evolución. Y aunque se puede inferir que se ha causado una pequeña alteración de las condiciones naturales del régimen de flujo subterráneo, 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

En el análisis hidrogeoquímico se determinaron parámetros como la conductividad eléctrica, potencial de hidrógeno, SDT, SST, sodio, potasio, calcio, magnesio.

Mediante un pozo perforado en rocas sedimentarias y comparando con los valores promedio de aguas subterráneas, se determinó que el contenido de iones de sulfato es superior a la media, mientras que el de carbonatos es inferior.

El agua en la zona se clasifica de tipo sulfatada-clorurada con $Ca > Mg$ en su mayor parte. Para los pozos perforados en rocas volcánicas y comparando con los valores promedio de aguas subterránea, el contenido de iones de sulfato es superior a la media mientras que el de carbonatos es similar; el contenido de cationes es inferior al de los aniones, las muestras indican abundancia relativa de Mg con respecto a Ca. Estas aguas son del tipo sulfatada-clorurada, con $Mg > Ca$.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

No fue posible realizar una estimación de los volúmenes de extracción por bombeo; 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 3.0 hm^3 . De ellos, 1.9 hm^3 (64%) se destinan al uso de servicios y 1.1 hm^3 (36%) para uso industrial.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de agua subterránea se planteó para el año 2008, en una superficie de 313.09 km^2 , 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 un acuífero:

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

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 se considera que 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:

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

Donde:

- R_v :** Recarga vertical
- E_h :** Entradas por flujo subterráneo horizontal
- B :** Bombeo
- Sh :** Salidas por flujo subterráneo horizontal
- ETR :** Evapotranspiración real
- $\Delta V(S)$:** Cambio en el volumen almacenado

De esta manera, despejando la recarga vertical:

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

7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (E_h)

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:

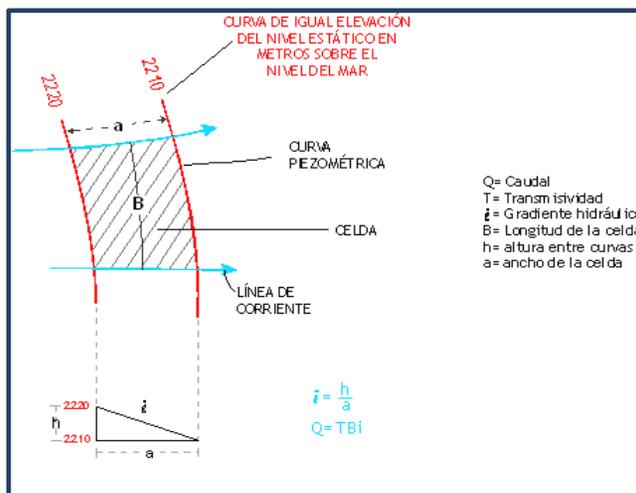
$$Q = T \cdot B \cdot i$$

Donde:

T = Transmisividad en m^2/s .

B = Longitud de la celda en m.

i = Gradiente Hidráulico, en m.



Partiendo de esta configuración se seleccionó un canal de flujo para calcular el caudal “Q” que recarga al acuífero. La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada una de las celdas establecidas (figura 4). El cálculo de las entradas subterráneas para el 2008 se presenta en la tabla 2.

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. anual (hm^3)
E ₁	2.431	4.600	0.00489	0.0547	1.7
E ₂	2.431	0.525	0.00662	0.0085	0.3
E ₃	2.431	2.890	0.00610	0.0428	1.4
E ₄	2.431	0.765	0.00513	0.0095	0.3
				TOTAL	3.7

El volumen total estimado como entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh) para el año 2008 es de **3.7 hm^3** .

7.2 Salidas

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

7.2.1 Evapotranspiración (ETR)

La evapotranspiración se representa por la descarga de un acuífero a la atmósfera y tiene lugar por evaporación directa del agua freática somera o bien por la transpiración de la flora, que en esta zona no es significativa por el tipo de vegetación que existe. Debido a la baja precipitación que se presenta en el área, se invalidaron los métodos empíricos para el cálculo de la evapotranspiración (Turc y Smith), ya que éstos son aplicables en regiones con valores mayores a los 300 mm, considerando además, que el área en la que no se tienen niveles freáticos someros donde pueda llevar a cabo este fenómeno.

Por lo tanto el valor de evapotranspiración tiende a ser **nulo**.

7.2.2 Bombeo (B)

De acuerdo con el valor reportado por el REPDA, se considera que el valor del bombeo es de **3.0 hm³/año**.

7.2.3 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

Las salidas subterráneas fueron calculadas a partir de la configuración de elevación del nivel estático (figura 6), de la misma manera como se estimaron las entradas subterráneas, El valor estimado es de **1.1 hm³ anual** (tabla 3).

Tabla 3. Volumen de salida por flujo subterráneo 2008

Celda	T (10 ⁻³ m ² /s)	B (10 ³ m)	i	Q (m ³ /s)	Vol. anual (hm ³)
S1	6.250	1.770	0.0031	0.0348	1.098

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

Se considera que el sistema se encuentra prácticamente en equilibrio, por lo que no se tiene un cambio del volumen almacenado considerando para este componente un valor de **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:

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

$$R_v = 1.1 + 3.0 + 0.0 - 0.0 - 3.7$$

$$R_v = 0.4 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

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

$$R = R_v + E_h$$

$$R = 0.4 + 3.7$$

$$R = 4.1 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

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 **4.1 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.

En este sentido la descarga natural comprometida se considera como un porcentaje de las salidas por flujo subterráneo horizontal el cual se estimó en un 20% con un volumen de **0.2 hm³/año**, el porcentaje se considera porque la zona no presenta un entorno ecológico el cual requiera de este recurso para sostenerse o bien mantenerse en equilibrio, además de que el acuífero se encuentra afectado naturalmente por intrusión marina, por lo que se propone controlar el bombeo dentro de la zona cercana a la costa manteniendo los niveles de agua dulce por arriba del nivel del mar, para de cierta forma no incrementar la entrada de agua de mar hacia el área de explotación.

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 **2,379,421 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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 4.1 - 0.2 - 2.379421 \\ \text{DMA} &= 1.520579 \text{ hm}^3/\text{año.} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **1,520,579 m³ anuales.**

9. BIBLIOGRAFÍA

Secretaria de Agricultura y Recursos Hidráulicos. 1989. Estudio de evaluación de disponibilidad y calidad del agua subterránea en el Valle de San Felipe, B.C. para abastecimiento a la ciudad. EXYCO, S.A. 1989.