

SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO VALLE DE SAN LUIS RÍO COLORADO
(2601), ESTADO DE SONORA**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1	GENERALIDADES.....	2
	Antecedentes	2
1.1	Localización.....	2
1.2	Situación administrativa del acuífero.....	4
2	ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD.....	5
3	FISIOGRAFÍA	7
3.1	Provincias fisiográficas.....	7
3.2	Clima.....	7
3.3	Hidrografía.....	8
3.4	Geomorfología.....	9
4	GEOLOGÍA	10
4.1	Estratigrafía.....	12
4.2	Geología estructural	13
4.3	Geología del subsuelo	13
5	HIDROGEOLOGÍA.....	15
5.1	Tipo de acuífero	15
5.2	Parámetros hidráulicos	16
5.3	Piezometría	16
5.4	Comportamiento hidráulico.....	17
5.4.1	Profundidad al nivel estático	17
5.4.2	Elevación del nivel estático	17
5.4.3	Evolución al nivel estático.....	19
5.5	Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	19
6	CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA.....	20
7	BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	21
7.1	Entradas	22
7.1.1	Recarga vertical (Rv)	22
7.1.2	Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)	22
7.1.3	Recarga inducida (Ri).....	23
7.1.4	Retornos de riego (Rr)	23
7.1.5	Recarga a través de canales de riego (Rc)	24
7.2	Salidas.....	25
7.2.1	Extracción por bombeo (B)	25
7.2.2	Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)	25
7.3	Cambio de almacenamiento (ΔV_S).....	26
8	DISPONIBILIDAD.....	27
8.1	Recarga total media anual (R).....	28
8.2	Descarga natural comprometida (DNC).....	28
8.3	Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)	28
8.4	Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)	29
9	BIBLIOGRAFÍA	30

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 Valle de San Luis Río Colorado, definido con la clave 2601 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción noroeste del Estado de Sonora, entre las coordenadas geográficas 31° 38' y 32° 29' de latitud norte, y 114° 17' y 115° 03' de longitud oeste, cubriendo una superficie de 4397 km².

El área del acuífero tiene como límites: al norte la Mesa la Fortuna, Mesa de Yuma, y el valle de Yuma pertenecientes al estado de Arizona, EUA; al oriente el acuífero Los Vidrios donde se extiende el Desierto de Altar y la zona Volcánica de la reserva ecológica “El Pinacate” en el estado de Sonora; hacia el sur el Golfo de California, y al poniente el acuífero Valle de Mexicali y el Delta del Río Colorado y la zona de inundación del Golfo de California que son parte del municipio de Mexicali, B.C. (figura 1).



Figura 1. Localización del acuífero

Geopolíticamente el acuífero se localiza dentro del municipio San Luis Río Colorado.

La poligonal simplificada que delimita el 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 2601 VALLE DE SAN LUIS RIO COLORADO							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	114	48	43.8	32	29	39.5	DEL 1 AL 2 POR EL LIMITE INTERNACIONAL
2	114	20	35.0	32	21	8.0	
3	114	25	13.7	32	10	58.7	
4	114	17	49.4	31	48	22.8	
5	114	25	6.2	31	38	12.8	DEL 5 AL 6 POR LA LINEA DE BAJAMAR A LO LARGO DE LA COSTA
6	114	48	14.4	31	49	10.3	DEL 6 AL 7 POR EL LIMITE ESTATAL
7	115	3	9.0	32	14	41.4	DEL 7 AL 1 POR EL LIMITE ESTATAL (POR EL CAUCE DEL RIO COLORADO)
1	114	48	43.8	32	29	39.5	

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero pertenece al Organismo de Cuenca II Noroeste y se encuentra sujeto a las disposiciones de dos decretos de veda. El primero rige en todo el acuífero, excepto en la porción perteneciente al Distrito de Riego 014 “Río Colorado”, se denomina Municipio de San Luis Río Colorado, este territorio se encuentra sujeto a las disposiciones del *“Decreto por el que se amplía, la zona vedada para el alumbramiento de aguas del subsuelo a que se refiere el Decreto de 16 de noviembre de 1955, a toda el área y extensión geopolítica del Municipio de San Luis Río Colorado, Son.”*, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) del 22 de marzo de 1969. Este decreto es de tipo III, en las que la capacidad de los mantos acuíferos permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.

El segundo decreto se denomina Distrito de Riego Río Colorado, rige en la porción occidental del acuífero, que pertenece a dicho distrito de riego, este territorio se encuentra sujeto a las disposiciones del *“Decreto que establece normas y especificaciones para el aprovechamiento de aguas en el Distrito de riego del Río Colorado”*, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 16 de diciembre de 1955. Este acuerdo es de tipo I, en las que no es posible aumentar las extracciones sin peligro de abatir peligrosamente o agotar los mantos acuíferos.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 3.

No se ha constituido hasta la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS). En la porción sur del acuífero se localiza parte de la Reserva de la Biósfera Alto Golfo de California y Delta del Río Colorado y en pequeñas porciones al este del acuífero se localiza la Reserva de la Biósfera El Pinacate y Gran Desierto de Altar, ambas reservas con fecha de decreto del 10 de junio de 1993.

2 ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la zona que comprende el acuífero se han realizado varios estudios hidrogeológicos de evaluación, entre los que podemos mencionar los siguientes, en orden cronológico:

ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO COMPLETO DE LOS ACUÍFEROS DEL VALLE DE MEXICALI, B.C. Y MESA DE SAN LUIS, SON., elaborado por la empresa Ariel Construcciones, S.A., para la Secretaría de Recursos Hidráulicos, en 1968. Su objetivo fue determinar el potencial del acuífero.

Las actividades de campo, entre las cuales se puede mencionar el censo, hidrometría, piezometría, perforación de pozos, pruebas de bombeo e interpretación geofísica, sentaron las bases para estudios posteriores. Concluye que la extracción de agua subterránea era del orden de los 1100 hm³ anuales y que los niveles del agua subterránea han descendido gradualmente, causando abatimientos en la parte central y sur, favoreciendo el incremento de la salinidad en el valle.

RESUMEN DEL ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DEL VALLE DE MEXICALI, B.C. Y MESA ARENOSA DE SAN LUIS, SON., elaborado para la Secretaría de Recursos Hidráulicos, Dirección General de Estudios, en 1972.

Cuya conclusión más importante es que el Valle de Mexicali mostraba ya efectos de sobreexplotación, con ritmo anual de abatimiento promedio de 0.5. En la porción sur del Valle de Mexicali ya se presentaban niveles de explotación por debajo del nivel medio del mar, lo que implicaba un riesgo inminente a la intrusión marina. Por otra parte, Los acuíferos de la Mesa de San Luis Río Colorado se encontraban inexplorados, perdiendo un flujo de 100 hm³/año en su región oriental.

Recomienda cambiar la distribución del bombeo, trasladando pozos de la parte media del Valle de Mexicali a la Mesa Arenosa, en un volumen igual a la sobreexplotación del valle de Mexicali, es decir, 400 hm³/año.

INFORME DEL ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO PRELIMINAR EN EL AREA DE LOS VIDRIOS - SAN LUIS RÍO COLORADO, elaborado por la empresa GYCSA, para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), en 1981. Cuyo objetivo fue determinar el potencial del acuífero.

ASPECTOS GEOHIDROLÓGICOS DEL DISTRITO DE DESARROLLO RURAL 002, RÍO COLORADO, elaborado la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), en 1987. Cuya conclusión más importante fue la realización de uno de los primeros ejercicios de recarga artificial al acuífero, mediante la infiltración de parte de los excedentes del Río Colorado.

ESTUDIO DE GEOFÍSICA DE RESISTIVIDAD Y GEOHIDROLOGÍA COMPLEMENTARIA EN LA MESA ARENOSA DE SAN LUIS RÍO COLORADO Y EN LA REGIÓN COSTA RICA, MUNICIPIO DE CABORCA, EN EL ESTADO DE SONORA.

Elaborado por la Comisión Nacional del Agua, en 1990. Este estudio aporta información geofísica valiosa como resultado de la realización e interpretación de sondeos eléctricos verticales.

ESTIMACIÓN DE LAS RECARGAS Y ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL ACUÍFERO DEL VALLE DE MEXICALI, elaborado por la Comisión Nacional del Agua, a través de su Gerencia Estatal en Baja California, en 1991. El cual concluye que, para el caso de la Mesa Arenosa de San Luis Río Colorado, la recarga por flujo subterráneo ascendía a 282 hm³ anuales, provenientes de Yuma, Arizona.

ACTUALIZACIÓN DEL ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DE LA CUENCA BAJA DEL RÍO COLORADO, B.C., elaborado por la empresa Consultores en Infraestructura y Servicios, S.A. de C.V., para la Comisión Nacional del Agua en 1996. Este estudio consideró la construcción de un modelo de simulación hidrodinámica para analizar el comportamiento de los niveles del agua subterránea ante diferentes escenarios de explotación y manejo del acuífero. Como resultado de esto, se recomienda reducir el volumen de extracción para recuperar los niveles del agua subterránea y mitigar los efectos de la sobreexplotación.

ACTUALIZACIÓN DEL ESTUDIO HIDROGEOLOGICO DEL ACUÍFERO DE SAN LUIS RÍO COLORADO, MUNICIPIO DE SAN LUIS RÍO COLORADO, SONORA, elaborado por la Universidad de Sonora mediante convenio con la Comisión Nacional del Agua, en 2005. El objetivo principal de este estudio fue actualizar el conocimiento de las condiciones geohidrológicas para establecer un diagnóstico de la evolución de los niveles de agua y contar con la información geohidrológica necesaria para determinar la recarga media anual del agua subterránea y su disponibilidad.

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

3 FISIOGRAFÍA

De acuerdo a la clasificación de las Provincias Fisiográficas de INEGI (1997), la zona se encuentra ubicada dentro de la Provincia Desierto Sonorense. Los aspectos fisiográficos del área fueron extraídos de la carta fisiográfica descrita por INEGI, 1990.

La región está constituida predominantemente por campos de dunas semilunares tipo barján, que constituyen la Mesa Arenosa de San Luis Río Colorado, con la ladera abrupta y los cuernos del lado opuesto (sotavento) al que recibe los vientos dominantes, así como la gran extensión del Desierto de Altar. Los campos de dunas son interrumpidos al oriente del delta y al norte de la bahía de San Jorge por lomeríos de rocas metamórficas del Precámbrico.

3.1 Provincias fisiográficas

La Provincia del Desierto Sonorense está dividida en dos Subprovincias y una discontinuidad: Sierras y Llanuras Sonorenses, Desierto de Altar y Sierra del Pinacate. De manera particular, el área pertenece a la Subprovincia del Desierto de Altar, que comprende una superficie de 11,556 km² en el estado de Sonora; se caracteriza por ser un desierto arenoso con altitudes menores de 200 m, abarcando parte de los municipios San Luis Río Colorado, Puerto Peñasco y General Plutarco Elías Calles. Hacia la región occidental se localiza el mayor delta del país: el del río Colorado, que cruza la subprovincia en sentido norte-sur, tiene un ancho promedio 90 km y una longitud aproximada de 140 km hasta su desembocadura.

3.2 Clima

De acuerdo con el INEGI (1994), que considera la clasificación de Köppen, sólo existe un tipo de clima en la región que comprende el acuífero: muy seco (BW_{hw} (x')) con régimen de lluvias en verano, porcentaje de lluvia invernal mayor de 10, semicálido con invierno fresco y temperatura media anual (TMA) mayor de 18° C.

Para la determinación de las características climatológicas de la región se analizó la información de 4 estaciones climatológicas: Riito S.L.R.C, Ejido Islitas, Colonia Zacatecas y San Luis Río Colorado, todas ellas alrededor del área.

Todas las estaciones registran una temperatura media por arriba de los 20° C. El menor valor se presenta en la estación de Riíto S.L.R.C. con 21.5° C y el máximo en San Luis Río Colorado con 22.8° C. Para estas estaciones los meses más cálidos son en Julio y Agosto y los más fríos en Diciembre y Enero. La temperatura media anual es de 22.1° C. El valor de la precipitación media anual es de 58 cm. Los valores de evaporación potencial en las estaciones varían entre 1690 y 2350 mm, registrándose el menor valor en la estación Colonia Zacatecas y el mayor en la estación San Luis Río Colorado.

3.3 Hidrografía

El área queda comprendida en las Regiones Hidrológicas Sonora Norte (RH8) y Río Colorado (RH7). La región RH7 comprende la Cuenca Bacanora-Mejorada (A), la cual a su vez tiene a las Subcuencas Sánchez Mejorada (a) en la parte oriental y Bacanora-Monumento (b) en la parte occidental. La región RH8 se presenta en la región oriental y está representada por la Cuenca Desierto de Altar – Río Bámori (C) y la subcuenca Desierto de Altar (c).

El agua superficial proviene de E.U.A. y es captada por la presa Morelos, ubicada en la frontera internacional; se destina principalmente al uso agrícola y para abastecimiento de agua potable. Esta agua a su vez es mezclada con el agua subterránea extraída de la batería de pozos de Mesa Arenosa de San Luis, para disminuir el contenido de sólidos totales disueltos. Los pozos localizados en la margen izquierda del Río Colorado, situados en el valle, extraen agua subterránea destinada a riego agrícola, y en menor proporción a uso doméstico.

Cuenca Bacanora-Mejorada (A)

Se localiza en la porción occidental del área, cubriendo un área de 1,512 km² que comprende al valle de Mexicali. Su continuación al norte se interna en territorio de EUA; hacia el oeste abarca del estado de Baja California. Hacia el este limita con la Cuenca Hidrológica de Desierto de Altar y al sur con el Golfo de California.

Este valle es regado principalmente por las aguas del Río Colorado que son encausadas por medio de canales. El agua es entregada en el límite internacional México-EUA, en la presa Morelos y se conducen a través del valle por canales principales revestidos y por canales secundarios no revestidos, para su uso principal en la agricultura. Esta parte del valle pertenece al estado de Sonora y es administrada por los usuarios del Distrito de Riego 014, a través de los Módulos 1, 2 y 3.

Cuenca Desierto de Altar (C)

Se localiza en la porción oriental del área cubriendo un área de 2,940 km², conocido como el Desierto de Altar y la zona volcánica del Pinacate. Los límites de esta cuenca son al norte la frontera con los EUA, hacia donde amplía su área; al oeste la Cuenca Bacanora-Mejorada; al este y suroeste la Cuenca San Ignacio y otras, y al sur el Golfo de California.

Presenta topografía regular, a excepción de los afloramientos volcánicos del pinacate y sierras de roca metamórfica e ígnea que alcanzan alturas de hasta 680 m, como el Cerro Pinto y la Sierra El Rosario.

En el área se localizan algunas corrientes intermitentes en las porciones noreste y sur, que no muestran en buen desarrollo debido a la alta permeabilidad de los depósitos que conforman sus lechos.

3.4 Geomorfología

La geomorfología analizada establece que la región se sitúa en una etapa de madurez, debido a la presencia de grandes llanuras y sierras aisladas que así lo manifiestan. La geomorfología es el resultado de la intrusión de rocas graníticas, la actividad volcánica y la deposición de sedimentos de diferente origen, afectados por las fuerzas tectónicas que provocaron el fallamiento de las rocas Paleozoicas, Mesozoicas y Cenozoicas, aunados al sistema de fallas de San Andrés.

Las unidades geomórficas identificadas son el delta del río Colorado, ubicado al oeste, así como el aparato volcánico de Cerro Prieto, y la Mesa Arenosa de San Luis ubicada al este.

Los flancos que marcan las unidades orogénicas están compuestos al oeste por la Sierra de los Cucapás que pertenece a la serranía sudcaliforniana; al este se extiende la Mesa Arenosa de San Luis Río Colorado en donde el único rasgo sobresaliente es la Sierra El Rosario (al noreste se localizan las Sierras La Tinaja y Gila).

La Mesa de San Luis continúa su extensión hasta llegar al complejo volcánico El Pinacate; al norte se extiende el valle y la meseta los cuáles son limitados por las sierras de Cargo Muchacho y Chocolate Mountains, las cuales tienen un lineamiento noroeste-sureste. Al sur se localiza el Golfo de California que ha formado una gran llanura de inundación por la acción de las mareas.

Las unidades geomorfológicas de segundo orden han sido modeladas por acciones internas continentales, se encuentran representadas por las Sierras Montañosas, como son: el Cerro El Centinela, Sierras de Los Cucapás y El Mayor, que presentan una alineación noroeste-sureste, ubicadas al poniente del área; al oriente sobresale la Sierra El Rosario, la cual tiene su continuación al norte de la Sierra Las Tinajas y Gila.

En cuanto a las unidades geomorfológicas de tercer orden, una de ellas se manifiesta por los relieves originados por la actividad volcánica, formando geoformas típicas de aparatos volcánicos como el volcán de Cerro Prieto, ubicado a 10 km al oriente de la Sierra de Los Cucapás. Esta prominencia tiene forma casi circular y sus flancos están surcados por arroyos en configuración radial, que desaparecen en las planicies formadas por depósitos lacustres y eólicos. Al oriente, fuera del área se localiza el complejo volcánico El Pinacate.

La geoforma principal del área son las Mesas de San Luis y la Mesa de Andrade en E.U.A., que consisten de superficies formadas por depósitos eólicos, conformando barchanes o médanos que se caracterizan por tener configuraciones de media luna, con sus cuernos tendidos a sotavento, haciendo a este lado cóncavo en el plano y el lado de barlovento convexo.

La geoforma de mayor extensión es la Llanura, que comprende el Valle de Mexicali, ubicado sobre la margen derecha del gran Delta del Río Colorado. Dentro del delta, generado por la acción fluvial, existen las terrazas aisladas entre los cauces de arroyos abandonados.

Las terrazas aluviales de mayor antigüedad se localizan en la parte poniente del Valle. Se encuentran rodeando a las sierras Los Cucapás y El Mayor, presentándose en una franja alargada de gran longitud, con superficies primordialmente planas, de hasta 15 m de altura con respecto a la Llanura, donde se limitan taludes ligeramente inclinados.

4 GEOLOGÍA

El área que comprende el acuífero está dominada por sedimentos del Paleógeno-Neógeno y Cuaternario (depósitos eólicos) representados por arcillas de la formación Bousse. Los depósitos del Reciente (conglomerados, arenas, gravas, arcillas y depósitos de pie de monte) son transportados por los ríos Gila y Colorado. Se identifican tres diferentes depósitos en la zona, de tipo aluvial, eólico y lacustre.

Al sur del área se encuentra aflorando aluvión, así como areniscas del Cenozoico. En pequeños afloramientos de la porción nororiental se observan afloramientos de calizas del Paleozoico, así como mármol y granito de la misma edad. Hacia el norte se presentan afloramientos de mármol, gneis y calizas del Paleozoico (figura 2).

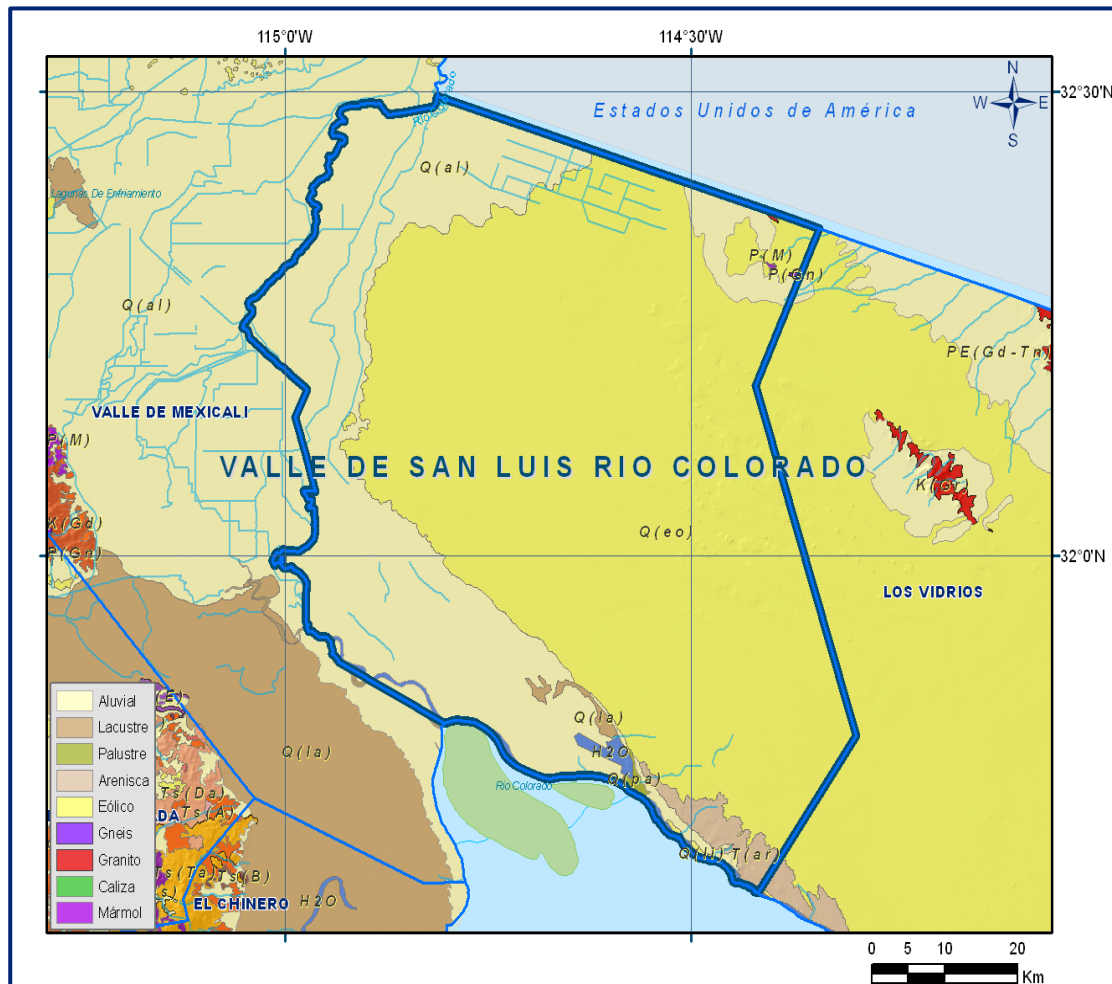


Figura 2. Geología general del acuífero

La porción occidental del valle de Mexicali, se caracteriza en gran parte por las terrazas aluviales y macizos montañosos de la sierra de Los Cucapás y Sierra El Mayor, que presentan una orientación NW-SE, donde se observa un complejo montañoso de granitos, esquistos, calizas y cuarcitas, formando un levantamiento tectónico que muestra fallas en sus flancos.

Dentro de la planicie, muy cerca de la sierra de Los Cucapás, aflora el volcán Cerro Prieto, formación basáltica, que descansa discordantemente sobre arenas finas y limos. Esta zona presenta importante actividad geotérmica.

4.1 Estratigrafía

A continuación se hace una breve descripción de las unidades geológicas que se encuentran en el área:

PALEOZOICO METAMÓRFICO

Está constituido principalmente por gneis y esquistos, que aflora en el cerro del Viejo, Sierra Tinajas Altas (que se continúan en las montañas Gila), al Sur del Ejido Joaquín Amaro, así como al norte de la Sierra del Viejo.

CRETÁCICO

Se caracteriza por afloramientos de rocas ígneas intrusivas como granitos, granodioritas, dioritas, etc., cuyos afloramientos se presentan en las inmediaciones del merendero La Joyita y El Sahuaro, en la Sierra El Rosario y al noroeste del ejido Reforma Agraria.

PALEÓGENO-NEÓGENO (Eoceno)

Sobreyacen a las rocas ígneas intrusivas y está constituido por sedimentos continentales (gravas y areniscas) con algunas intercalaciones de capas calcáreas.

No se encuentra aflorando en el área, pero su presencia en el subsuelo se identificó en el pozo Exxon 1, que se localiza al oeste del acuífero.

Oligoceno-Mioceno

Las rocas volcánicas extrusivas del Oligoceno y Mioceno se encuentran aflorando al norte y noreste del Cerro del Viejo y están constituidas por basaltos, andesitas, riolitas, y dacitas.

En ocasiones asociados a los depósitos del Eoceno.

Mioceno – Plioceno

Caracterizado por una fuerte depositación de sedimentos marinos constituidos por lutitas, areniscas y areniscas conglomeráticas.

Formación Bousse (Plioceno)

El único afloramiento conocido se presenta en el área de Yuma, está constituido por areniscas y arcillas con escaso contenido de fósiles, principalmente corales y moluscos.

CUATERNARIO

Está representado principalmente por las dunas de los desiertos de Altar y Yuma, que sobreyacen a los sedimentos aluviales más recientes constituidos por: gravas, arenas y arcillas, que a su vez sobreyacen a los representados por depósitos fluviales y aluviales de los ríos Colorado y Gila los cuales están conformados por: boleos, gravas, arenas y aglomerados.

4.2 Geología estructural

La Cuenca de Altar está afectada por la gran falla de San Andrés que hace diez millones de años originó la separación de la península de Baja California.

Es la más extensa, ya que se desarrolla a lo largo de 1,050 kilómetros con un ancho muy variable, desde menos de 1,000 m, hasta 15,000 m en lugares donde se entrelaza con líneas de fallas secundarias. Origina movimientos tectónicos regionales junto con la falla de San Jacinto, la cual es considerada la rama más activa de la falla de San Andrés.

En la parte noreste del área se encuentra la Falla Algodones la cuál cruza por el oeste el ejido Joaquín Amaro, con una dirección NW-SE; ésta se origina en el Desierto de Yuma, adentrándose en el Desierto de Altar.

Estudios más recientes, mencionan que en la porción centro-sur de la Mesa Arenosa de San Luis se localiza la Cuenca de Altar, limitada hacia el sur por la falla Cerro Prieto y al norte por la falla de Altar al norte, ambas con direcciones NW-SE. Esta última falla fue inferida mediante estudios geofísicos y correlaciones estratigráficas.

4.3 Geología del subsuelo

La definición de la geología del subsuelo está basada en cortes litológicos y registros geofísicos de siete pozos profundos ubicados dentro del Desierto de Altar y el Valle de Mexicali, con los cuales se realizó una reconstrucción litológica a detalle de la secuencia estratigráfica cortada, la cual varía de 3000 a 5300 m.

La información que proporcionan los cortes litológicos de pozos no incluye los primeros 200 m de la secuencia, por lo que fue necesario realizar un análisis complementario con la información de cortes litológicos de pozos de observación, proporcionada por la Comisión Nacional.

Las unidades identificadas de la base a la cima, son las siguientes:

Unidad A (Secuencia de lodos marinos). Sobre el basamento granítico se ubica una secuencia de lodos marinos de hasta 900 m de espesor y de posible edad Mioceno Tardío-Plioceno Temprano.

El contacto con el basamento granítico puede ser tectónico o deposicional.

Unidad B (Secuencia transicional marina-fluvial). Una secuencia rítmica de lodos, arenas y limos de hasta 2,200 m de espesor sobreyace a los depósitos marinos y marcan el arribo de los sedimentos deltáicos del Río Colorado a esta parte del Golfo de California. La alternancia se interpreta como depósitos en la zona de transición marino-fluvial del delta. Esta unidad muestra la geometría de la progradación deltaica sobre la cuenca.

Unidad C (Secuencia transición-fluvial). La cuenca de Altar constituyó, hasta épocas recientes, parte de la planicie fluvial del Río Colorado. Este periodo de progradación está representado por la secuencia de arenas no consolidadas con un espesor promedio de 1000 m que incluyen gravas de facies de canal y lodos de la planicie de inundación, en el pozo Jicawi se presenta un espesor de hasta 3400 m.

Unidad BC (Basamento cristalino). La información litológica de los pozos de observación, indica que la cuenca de la Mesa Arenosa de San Luis Río Colorado, es parte del sistema fluvio-deltaico del Río Colorado, tal como se definió en la Unidad A con la información de pozos profundos.

En las secciones esquemáticas, que se muestran más adelante, se observa que el relleno sedimentario está constituido de arena, grava y gravilla con lentes de arcilla en sus primeros 200 a 300 m; sin embargo, en los pozos cercanos al Golfo y al cauce del Río Colorado, los intervalos de arcilla entre la arena llegan a ser muy potentes, lo que indica una variación de largo plazo en el ambiente de depósito.

Con la información geológica y geofísica recopilada, además de varias secciones estratigráficas se definieron tres unidades sedimentarias (*Unidad 1, 2 y 3*) en los primeros 300 m, que corresponden estrictamente a la secuencia de transición-fluvial (Unidad A) definida en un principio con base en la información de cortes litológicos de los pozos profundos. Dichas unidades se describen a continuación:

Unidad 1. Unidad no consolidada constituida principalmente por arenas que varían desde grano fino a medio. Se presenta en la parte superficial y varía en espesor desde 4 (pozo IV-1) y hasta 26 m (pozo IV-12).

Corresponde posiblemente a sedimentos característicos de ambientes fluviales y aluviales.

Unidad 2. Compuesta por arena, grava y gravilla no consolidadas, contiene el registro sedimentario de las facies fluviales del Río Colorado. La litología está dominada por arena de grano medio a grueso que contiene intercalaciones de arcilla y grava. Esta secuencia sugiere un ambiente fluvial caracterizado por facies de canales y barras de canal. Presenta un espesor máximo de 150 m, en el pozo G4-6, y con un espesor mínimo de 36 m en el pozo IV-4.

Unidad 3. Esta unidad presenta potentes paquetes de grava y gravilla arenosa, lo cual sugiere que fueron depositados en un ambiente aluvial de alta energía, posiblemente en las laderas de los cerros antiguos. Registra un espesor mínimo de 90 m, en el pozo IV-4, y máximo de 198 m en el pozo G4-5.

5 HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

El sistema fluvio-deltáico del Río Colorado ha desarrollado potentes depósitos sedimentarios, que varían en espesor de 600 hasta posiblemente 4000 m y que conforman el medio granular del acuífero. Estos sedimentos son de diversa granulometría, desde arena, grava y limo hasta arcilla, con una distribución errática y una estratificación ocasionalmente oblicua. Estas características sedimentológicas y las variaciones de permeabilidad de los materiales, originan condiciones anisotrópicas, tanto en sentido vertical y horizontal como en la dirección del flujo subterráneo; por lo anterior se deduce que el sistema funciona como acuífero libre.

Las rocas metamórficas e ígneas intrusivas forman el basamento, fronteras y barreras laterales al flujo subterráneo, el cual fue identificado a 3200 m de profundidad mediante perforaciones exploratorias realizadas fuera del área.

En el área del acuífero estas rocas se presentan como afloramientos aislados.

5.2 Parámetros hidráulicos

En 2005 se ejecutaron 13 pruebas de bombeo de corta duración, tanto en etapa de abatimiento como de recuperación.

De acuerdo con los resultados de su interpretación, se observa que los valores representativos de transmisividad varían de 6.9×10^{-3} a $3.2 \times 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$, con un valor promedio de $7.4 \times 10^{-2} \text{ m/s}$. Para el caso de la conductividad hidráulica, su valor oscila entre 7.7×10^{-5} y $4.0 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ (tabla 2).

Tabla 2. Resultados de la interpretación de las pruebas de bombeo

PARAMETROS HIDRAULICOS					
CLAVE	X	Y	Z	T (m ² / s)	K (m/s)
194	697123	3594763	23.077	2.07×10^{-2}	1.15×10^{-4}
196	705824	3596870	28.641	1.03×10^{-1}	5.74×10^{-4}
219	700238	3593180	25.234	1.72×10^{-1}	9.59×10^{-4}
238	701201	3589808	24.297	2.73×10^{-2}	1.95×10^{-4}
254	692842	3583179	20.447	3.02×10^{-2}	1.67×10^{-4}
255	697095	3583970	21.573	2.96×10^{-2}	2.11×10^{-4}
268	692149	3573904	17.241	2.02×10^{-2}	1.12×10^{-4}
273	687738	3575138	17.206	2.34×10^{-2}	1.30×10^{-4}
275	690055	3577947	17.091	6.89×10^{-3}	4.92×10^{-5}
287	692129	3564281	15.838	1.39×10^{-2}	7.72×10^{-5}
644	696319	3578044	18.905	1.86×10^{-2}	1.03×10^{-4}
I-4	718679	3592544	32.46	3.24×10^{-1}	4.05×10^{-3}
I-8	724342	3590650	32.45	1.75×10^{-1}	1.58×10^{-3}
* PRUEBAS DE RECUPERACION					

5.3 Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea se consideró la información disponible para 1999 y 2005.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

La profundidad al nivel estático para agosto de 2005, varía entre 6 y 43 m, con un valor promedio de 22 m. De manera general, las mayores profundidades al nivel estático registran al norte del acuífero, en la batería de pozo y las menores hacia la costa (figura 3).

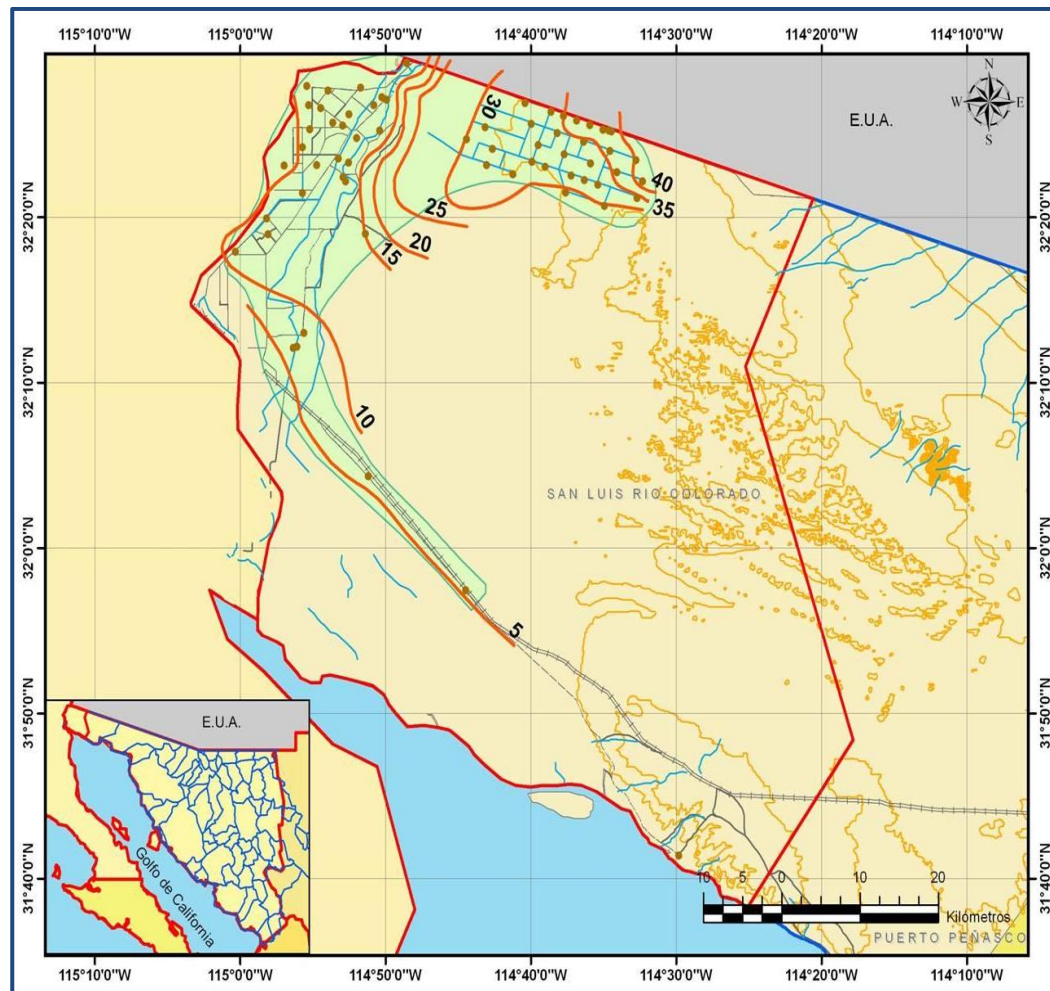


Figura 3. Profundidad al nivel estático en m (2005)

5.4.2 Elevación del nivel estático

Para agosto del 2005, la elevación del nivel estático en el acuífero oscila entre 12 y 62 msnm, con una elevación promedio 38.29 msnm.

Con base en las elevaciones del nivel estático obtenidas, se trazaron las curvas de isovalores de elevación del nivel estático (figura 4), de donde se desprende que las mayores elevaciones se presentan en la porción norte-noreste del acuífero, y las menores hacia la línea de costa.

Mediante estas curvas equipotenciales es posible identificar una dirección preferencial del flujo subterráneo de norte a sur, sin embargo la batería de pozos de la ciudad de San Luis Río Colorado induce un movimiento del agua subterránea en sentido contrario. La falta de información piezométrica en la porción de los EUA dificulta el trazo de las curvas en la porción de la frontera internacional. Sin embargo, es de esperar una inducción del flujo procedente del territorio de los EUA, hacia la batería de pozos (figura 4).

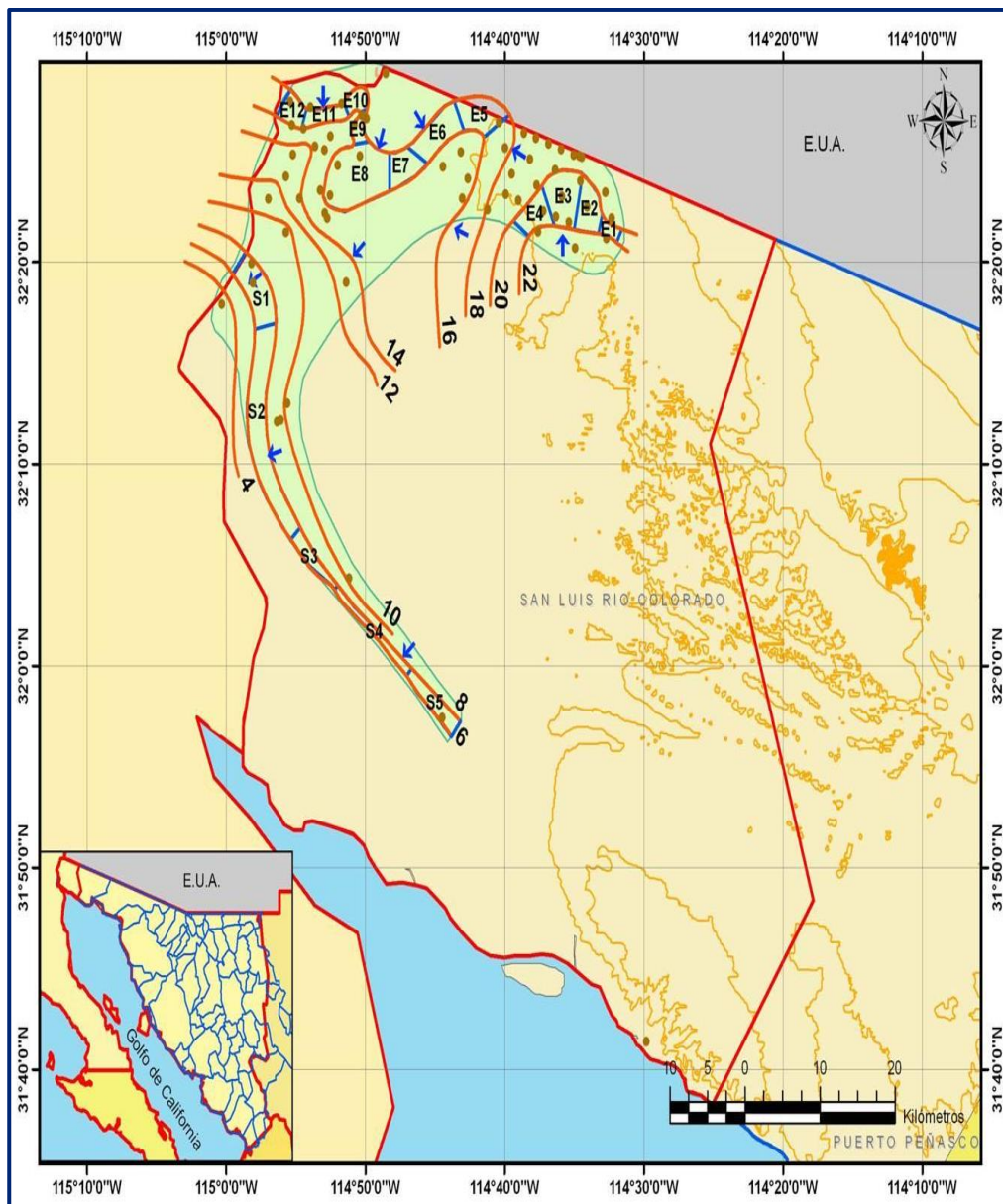


Figura 4. Elevación del nivel estático en msnm y dirección de flujo subterráneo (agosto 2005)

5.4.3 Evolución al nivel estático

Para la configuración de evolución del nivel estático fue utilizada la información del año de 1999 por ser la que mejor se puede correlacionar con la información del 2005. De esta manera, se observa que para este periodo de 6 años, los abatimientos máximos de 8 m se registran al suroeste del acuífero. También se registran valores puntuales de recuperación, en la zona de la Mesa Arenosa (figura 5).

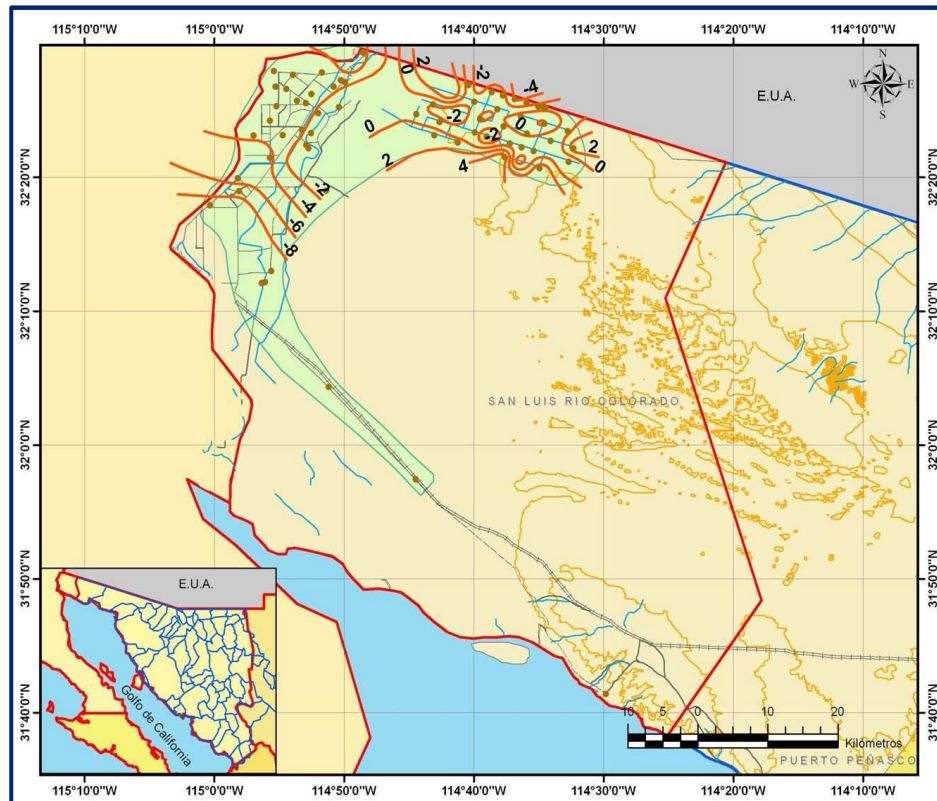


Figura 5. Evolución del nivel estático en m (1999-2005)

De manera general, en el acuífero se registra un abatimiento medio de 1.3 m para el periodo analizado, lo que representa un ritmo anual de abatimiento de 22 cm.

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

En 2005 se tomaron muestras de agua en 25 pozos para su análisis físicoquímico correspondiente. Los valores de Sólidos Totales Disueltos (STD) varían de 746 a 2610 mg/l.

De acuerdo con el contenido de STD, el 36% de las muestras (9) se clasifican como agua dulce y el 64% restantes (16) como agua salobre.

Los valores de conductividad eléctrica oscilan entre 1,140 y 3,820 $\mu\text{S}/\text{cm}$ con promedio de 2,123. Los sitios de muestreo clasificados como *agua salobre* se ubican en la porción noroeste del área, entre el ejido Hidalgo e Islita, entre el ejido Independencia y Mesa Rica, dos pertenecientes al Distrito de Riego 014 y un aprovechamiento muy aislado ubicado en el poblado Golfo de Santa Clara, ubicado al sur del área. Los aprovechamientos restantes se han clasificado de tipo *agua dulce*, se ubican principalmente en la porción norte del área de estudio en el Distrito de Riego 014, en el municipio de San Luis Río Colorado y en la porción W-SW.

Con respecto a las familias químicas del agua, se identifican las siguientes, en orden de importancia: Clorurada-Sódica (Cl-Na); Clorurada-Sulfatadas-Sódica (Cl-SO₄-Na) y Sulfatada- Clorurada- Sódica (SO₄-Cl-Na).

Las familias del agua presentes en la región son típicas de agua de mala calidad. Una fuente importante de aporte de estos iones son las áreas agrícolas. La calidad del agua del acuífero también es afectada por el cauce del Río Colorado que aporta una gran cantidad de sales, principalmente sulfatos, que acarrea desde su cuenca alta. Otro factor muy importante del incremento en la concentración de sodio, es la alta evaporación que se registra en la zona.

En conclusión, se considera que, de manera general, la calidad del agua en el acuífero es mala, debido a que en el 64% de los sitios muestreados la concentración de sólidos totales disueltos clasifica al agua subterránea como agua salobre. Adicionalmente, la dureza total las ubica en el rango de aguas duras a muy duras. Estas condiciones imponen serias restricciones para el uso agrícola y para dotación de agua potable. Las concentraciones de metales en el acuífero son en general bajas, excepto en el contenido de fierro y manganeso, cuyas concentraciones en algunos aprovechamientos de las regiones norte y noroeste sobrepasan los límites máximos de las normas mexicanas.

6 CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con el censo de aprovechamientos realizado en el 2005, existen en el acuífero un total de 144 pozos; de los cuales 77 se ubican en el valle de San Luis, margen izquierda del Río Colorado, pertenecientes a las unidades 1, 2 y 3 del Distrito de Riego 014 “Río Colorado” y los 67 restantes a la batería de pozos que se ubica en la Mesa Arenosa, localizada de San Luis Río Colorado, de la cual se extrae agua para el abastecimiento de las ciudades de San Luis Río Colorado, Tecate, Tijuana y Ensenada.

El volumen de extracción estimado es de **263.5 hm³ anuales**, de los cuales 92.5 (35.1 %) son para uso público-urbano, 170 hm³ (64.5%) para uso agrícola y 1 hm³ restante (0.4 %) para uso doméstico.

7 BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

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

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

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

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

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

El balance de aguas subterráneas se consideró el periodo 1999- 2005, en una superficie de 856 km², que corresponde a la zona donde se localizan los aprovechamientos del agua subterránea. De esta manera la ecuación de balance propuesta es la siguiente:

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

Donde:

R_v: Recarga vertical

E_h: Entradas por flujo subterráneo horizontal

R_i: Recarga inducida, que equivale a **R_i = R_r + R_c + R_{fap}**

R_r: Retornos de riego

R_c: Recarga a través de canales de riego

R_{fap}: Recarga por fugas en la red de agua potable y alcantarillado

B: Bombeo

S_h: Salidas por flujo subterráneo horizontal

ΔV(S): Cambio de almacenamiento

De esta manera, sustituyendo valores, se obtiene la siguiente ecuación:

$$R_v + E_h + R_r + R_c + R_{fap} - B - S_h = \pm \Delta V(S) \quad (2)$$

7.1 Entradas

La recarga total que recibe el acuífero (R) ocurre por tres procesos naturales principales: por infiltración de agua de lluvia en el valle e infiltración en canales (Rv), infiltración por recarga inducida (Ri) y entradas por flujo subterráneo (Eh).

De manera inducida, se produce recarga debido a la infiltración de los excedentes del agua destinada al uso agrícola (Rr) y la infiltración a lo largo de la red de canales que distribuyen agua para uso agrícola (Rc) y la recarga por fugas en la red de agua potable y alcantarillado (Rfap).

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), entradas y salidas por flujo subterráneo y se considera que la recarga vertical por infiltración de agua de lluvia tiende a ser nula debido a la escasa lámina de precipitación media anual, el valor que se despejará de la ecuación será una componente más de la recarga inducida, identificada como recarga por infiltración de las fugas en la red de agua potable y alcantarillado (Rfap).

De esta manera, despejando la recarga por infiltración de las fugas en la red de agua potable y alcantarillado (Rfap) se obtiene lo siguiente:

$$R_{fap} = B + S_h \pm \Delta V(S) - R_v - E_h - R_r - R_c \quad (3)$$

7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

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

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

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

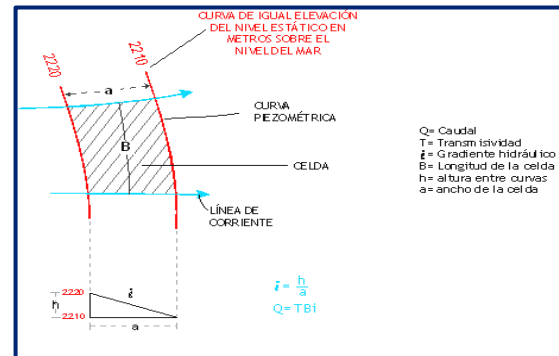
Donde:

Q = Gasto;

T = Transmisividad;

B = Longitud de la celda;

i = Gradiente hidráulico;



Las celdas se trazan a partir de la configuración de elevación del nivel estático (figura 4), se trazan el número de celdas que sean convenientes según la zona y se calcula en flujo a través de cada una de ellas. El volumen que ingresa al acuífero de forma horizontal, es de **155.2 hm³/año**.

Tabla 3. Cálculo de entradas por flujo subterráneo

No de Celda	B (m)	dh (m)	dl (m)	T (m²/s)	i = dh/dl	Q (m³/s)	Q (hm³/año)
E1	2402	2	1121	0.175	0.001784121	7.50E-01	23.6
E2	2843	2	3826	0.175	0.000522739	2.60E-01	8.2
E3	3370	2	4650	0.175	0.000430108	2.54E-01	8.0
E4	3765	2	2550	0.175	0.000784314	5.17E-01	16.3
E5	4769	2	3139	0.151	0.000637146	4.59E-01	14.5
E6	5907	2	2494	0.151	0.000801925	7.15E-01	22.5
E7	3482	2	2965	0.151	0.000674536	3.55E-01	11.2
E8	6990	2	3950	0.151	0.000506329	5.34E-01	16.8
E9	2976	2	1328	0.073	0.001506024	3.28E-01	10.3
E10	1138	2	2055	0.073	0.000973236	8.11E-02	2.6
E11	4803	2	1371	0.073	0.001458789	5.13E-01	16.2
E12	2683	2	2469	0.073	0.000810045	1.59E-01	5.0

TOTAL (hm³/año) 155.2

7.1.3 Recarga inducida (Ri)

En esta variable se incluyen los volúmenes de infiltración de agua que se producen por concepto de retornos del riego (**Rr**), el volumen que se infiltra a lo largo de la red de canales de distribución parcelaria en las unidades 1, 2 y 3 del distrito de riego (**Rc**) y el volumen que se pierde por fugas en la red de agua potable y alcantarillado (**Rfap**).

7.1.4 Retornos de riego (Rr)

En el acuífero San Luis Río Colorado, la zona agrícola tiene una superficie aproximada de 17,142 has, que se localizan a lo largo del cauce del río Colorado.

Los cultivos principales son trigo (40%), sorgo (23%), hortalizas (11%), algodón (9%), alfalfa (7%) y otros (10%).

El uso consuntivo promedio ($\overline{UC}$) se calculó como:

$$\overline{UC} = \frac{\sum_{i=1}^3 A_i UC_i}{\sum_{i=1}^3 A_i}$$

Donde A_i y UC_i son el área y el uso consuntivo del cultivo i . La estimación del uso consuntivo por cultivo se realizó mediante la fórmula de Blaney–Criddle modificada por Phelan (Aguilera y Martínez, 1996).

Si $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ para el trigo, sorgo, hortalizas, algodón, alfalfa y otros, respectivamente, se tiene:

$$\overline{UC} = \frac{(6950 \text{ ha} \times 900 \text{ mm}) + (3880 \text{ ha} \times 703 \text{ mm}) + (1944 \text{ ha} \times 600 \text{ mm}) + (1490 \text{ ha} \times 750 \text{ mm}) + (1160 \text{ ha} \times 1008 \text{ mm}) + (1718 \text{ ha} \times 600 \text{ mm})}{17142 \text{ ha}} = 786 \text{ mm}$$

Por el método de balance hídrico, la lámina de recarga por retorno de riego (R_r), se calcula como:

$$R_r = P + L_r - \overline{UC}$$

En donde L_r es la lámina de riego aplicada, la cual se obtiene como el cociente de la extracción para uso agrícola (170,000,000 m³/año) y la superficie regada (17,142 ha), arrojando un valor de 991.72 mm. La lámina de precipitación en el acuífero es de 68.4 mm. De esta manera:

$$R_r = 68.4 + 991.72 - 785.59 = 274.52 \text{ mm}$$

Multiplicada por el área total de riego, la recarga por retornos de riego es de **47.1 hm³/año**.

7.1.5 Recarga a través de canales de riego (Rc)

El volumen derivado a la red de canales, tanto de agua tanto superficial como subterránea, se obtuvo directamente del aforo y asciende a 350 hm³ anuales.

De acuerdo con los registros históricos de medición y observación reportados para esta porción del Distrito de Riego (1990), de la medición de la diferencia de volúmenes entre las cabezas de medición de entrega en los linderos fronterizos y la entrega en los módulos y en la parcela, se obtiene un coeficiente de pérdida del 12 %.

De este coeficiente, se considera que el 37% se evapora y el 62.5 % restante se infiltra al acuífero. De esta manera, las pérdidas totales equivalen a 42 hm³/año. Por lo que el volumen de recarga a través de la red de canales es de **26.2 hm³/año**.

La recarga inducida en el uso agrícola es la suma de los retornos de riego (47.1 hm³/año) y la infiltración a través de los canales de riego (26.2 hm³/año), por lo que el volumen estimado es de **73.3 hm³/año**. La recarga por efecto de la infiltración de las fugas en la red de agua potable y alcantarillado será la componente de la recarga inducida que se estimará como incógnita en la ecuación de balance.

7.2 Salidas

De acuerdo con el modelo conceptual definido, la descarga del acuífero ocurre principalmente por salidas subterráneas hacia el mar (Sh) y bombeo (B). Respecto a la evapotranspiración (ETR), en el acuífero San Luis Río Colorado, existen algunas pequeñas zonas donde la profundidad al nivel del agua subterránea es menor a 10 m, pero éstas se encuentran desprovistas de cobertura vegetal, por lo tanto, no aplica el cálculo de ETR.

Tampoco existen zonas en las que la profundidad al nivel estático sea menor a 3 m, por lo que no es posible que se produzca evaporación directa del agua freática. Por lo tanto, **ETR = 0**

7.2.1 Extracción por bombeo (B)

Como se mencionó en el apartado de censo e hidrometría el volumen de extracción real promedio es de **263.5 hm³ anuales**.

7.2.2 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

El cálculo de las salidas subterráneas se realizó de la misma manera que las entradas subterráneas, utilizando el plano de elevación del nivel estático (figura 4). Los resultados indican que el volumen total de salidas subterráneas asciende a **32.5 hm³/año**.

Tabla 4. Cálculo de salidas por flujo subterráneo

No de Celda	B (m)	dh (m)	dl (m)	T (m ² /s)	i = dh/dl	Q (m ³ /s)	Q (hm ³ /año)
S1	6640	2	2694	1.73E-02	0.00074239	8.89E-02	2.8
S2	7414	2	2117	1.39E-02	0.000944733	9.74E-02	3.1
S3	6748	2	1075	1.39E-02	0.001860465	1.75E-01	5.5
S4	11336	2	610	1.39E-02	0.003278689	5.17E-01	16.3
S5	7412	2	1348	1.39E-02	0.00148368	1.53E-01	4.8
TOTAL (hm ³ /año)							32.5

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

El cambio de almacenamiento representa el volumen ganado o drenado por acuífero y se calcula a partir de la evolución piezométrica observada en el área de balance y del coeficiente de almacenamiento.

Para la determinación de este término se consideró la evolución piezométrica del acuífero en el intervalo de tiempo que comprende el periodo 1999 – 2005 (figura 5), determinando la variación del almacenamiento mediante la siguiente expresión:

$$\Delta V(S) = S * A * h$$

Donde:

$\Delta V(S)$: Cambio de almacenamiento en el período analizado

S: Coeficiente de almacenamiento promedio de la zona de balance

A: Área de influencia de curvas de igual evolución del nivel estático (km²)

h: Valor de la variación piezométrica en el período (m)

Como consecuencia de la explotación del recurso, la posición de los niveles piezométricos ha descendido propiciando una variación negativa del almacenamiento.

El volumen de agua drenado en el intervalo analizado fue de -355.0 hm³, que equivalen a **-59.2 hm³/año**.

Tabla 5. Cálculo del cambio de almacenamiento

Evolución (m)	Valor medio (m)	Area (km ²)	S*	$\Delta V(s)$ h(m ³ /año)
- 6 a - 8	-7	65	0.2	-91
- 4 a - 6	-5	85	0.2	-85
- 2 a - 4	-3	190	0.2	-114
0 a - 2	-1	245	0.2	-49
-2	-2	40	0.2	-16
Total para el periodo 1999-2005 =				-355
Promedio anual =				-59.2

Solución de la ecuación de balance

Una vez calculados los valores de las componentes de la ecuación de balance, el único parámetro que falta por determinar es la recarga por efecto de la infiltración de las fugas en la red de agua potable y alcantarillado (R_{fap}). Sustituyendo los valores en la ecuación de balance en la expresión (3), obtenemos lo siguiente:

$$R_{fap} = B + Sh \pm \Delta V(S) - R_v - E_h - R_r - R_c \quad (3)$$

$$R_{fap} = 263.5 + 32.5 - 59.2 - 0 - 155.2 - 47.1 - 26.2$$

$$R_{fap} = 8.3 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

Por lo tanto el valor de la recarga inducida (R_i) es de:

$$R_i = R_r + R_c + R_{fap}$$

$$R_i = 47.1 + 26.2 + 8.3$$

$$R_i = 81.6 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

De esta manera, el valor de la recarga total (R) es igual a la suma de las entradas:

$$R = R_v + E_h + R_i$$

$$R = 0 + 155.2 + 81.6$$

$$R = 236.8 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

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 **236.8 hm³/año**.

8.2 Descarga natural comprometida (DNC)

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

Para este caso, su valor es de **DNC = 32.5 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 **292,228,164 hm³ 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.

$$\begin{aligned}\text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 236.8 - 32.5 - 292.228164 \\ \text{DMA} &= -87.928164 \text{ hm}^3/\text{año}.\end{aligned}$$

El resultado indica que no existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario el déficit es de **87,928,164 m³ anuales**.

9 BIBLIOGRAFÍA

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, 1981. Informe del Estudio Geohidrológico Preliminar en el Area de Los Vidrios - San Luis Río Colorado, realizado por la empresa GYCSA.