



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA
ANUAL DE AGUA EN EL ACUÍFERO ARROYO SECO
(2607), 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	6
3.1 Provincia fisiográfica	6
3.2 Clima	6
3.3 Hidrografía.....	7
3.4 Geomorfología.....	7
4 GEOLOGÍA	8
4.1 Estratigrafía	8
4.2 Geología estructural.....	10
5 HIDROGEOLOGÍA	12
5.1 Tipo de acuífero.....	12
5.2 Piezometría.....	12
5.3 Comportamiento hidráulico	12
5.3.1 Profundidad al nivel estático.....	12
5.3.2 Elevación del nivel estático.....	13
6 CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	14
7 BALANCE HIDROMETEOROLÓGICO	14
8 BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	16
8.1 Entradas.....	16
8.1.1 Recarga vertical (Rv).....	17
8.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	17
8.1.3 Recarga inducida (Ri).....	17
8.2 Salidas	17
8.2.1 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh).....	17
8.2.2 Bombeo (B)	18
8.3 Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$	18
9 DISPONIBILIDAD	18
9.1 Recarga total media anual (R)	19
9.2 Descarga natural comprometida (DNC)	19
9.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	19
9.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)	20
10 BIBLIOGRAFÍA	21

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 Arroyo Seco, definido con la clave 2607 por la Comisión Nacional del Agua, comprende una superficie aproximada de 2,485 km², localizada en la porción norte del estado de Sonora, limita al norte con los Estados Unidos de Norteamérica. Dentro del área de la República Mexicana colinda al sur con el acuífero de Caborca, al este con el de Río Altar mientras que al oeste colinda con los acuíferos de Sonoyta y Los Chirriones (figura 1)

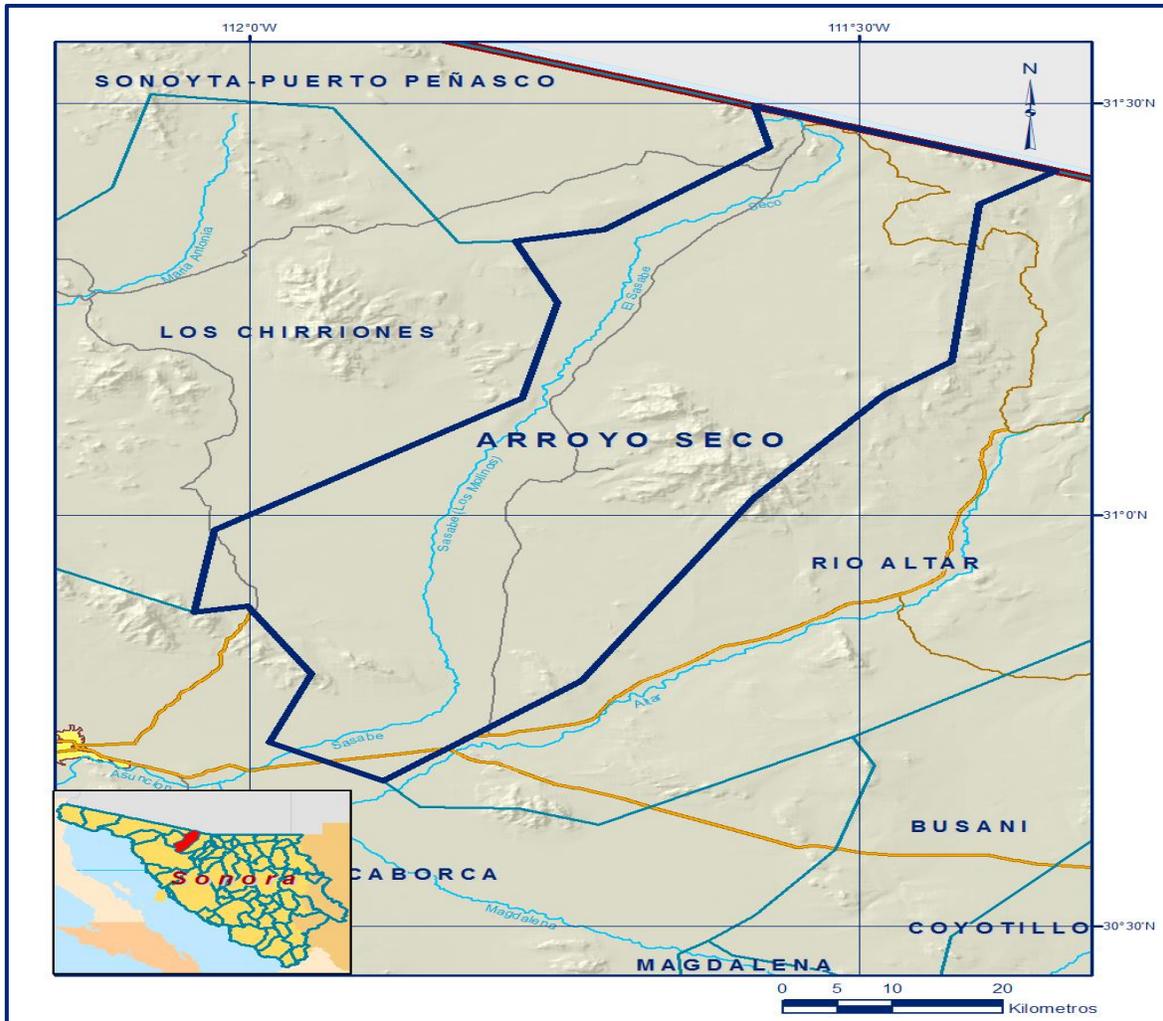


Figura 1. Localización del acuífero

Los municipios involucrados en el área del acuífero, en forma parcial son: Altar, Oquitoa, Saric y Tubutama. Entre las principales poblaciones que se localizan en el área, en el municipio de Altar se encuentra prácticamente el 50% de la cabecera municipal denominada Altar, así como las poblaciones de: San Marcos, San Plácido, Las Delicias y La Laguna entre otros, respecto al municipio de Saric, se encuentran: La Mojonera, El Sasabe, La Ladrillera, Luisillo y La Nopalera, en general se puede considerar que la población de este municipio solo participa dentro del área en aproximadamente un 50%. En el municipio de Tubutama se localizan los poblados de San Juan y El Mezquite.

En cuanto al municipio de Oquitoa en esta área están conformadas por zonas con poblaciones que deben ser muy pequeñas.

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

ACUÍFERO 2607 ARROYO SECO							OBSERVACIONES
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	111	24	6.8	31	22	37.1	
2	111	25	27.5	31	11	11.4	
3	111	28	49.3	31	8	42.7	
4	111	35	13.7	31	1	9.8	
5	111	43	40.9	30	47	51.4	
6	111	53	28.2	30	40	36.1	
7	111	59	4.3	30	43	24.1	
8	111	57	15	30	48	23.6	
9	112	0	9.9	30	53	20.0	
10	112	2	46.1	30	52	53.2	
11	112	1	46.6	30	58	53.8	
12	111	46	38.1	31	8	30.0	
13	111	44	50.5	31	15	26.8	
14	111	46	58.3	31	19	55.8	
15	111	42	34.2	31	20	48.1	
16	111	34	23.9	31	26	48.1	
17	111	35	9.9	31	29	46.4	DEL 17 AL 18 POR EL LIMITE INTERNACIONAL
18	111	20	18.2	31	25	19	
1	111	24	6.8	31	22	37.1	

1.2 Situación administrativa del acuífero

Dentro de los límites del acuífero se localizan dos zonas de veda, la primera publicada el 18 de octubre de 1962, mediante el decreto que establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de agua del subsuelo en la zona que comprende la región de Altar, Pitiquito y Caborca.

En su artículo segundo menciona que la veda a que se refiere dicho decreto, queda comprendida en la tercer clasificación del artículo 11 del reglamento de la ley de 29 de diciembre de 1958 en materia de aguas del subsuelo.

Excepto cuando se trate de alumbramiento de aguas para usos doméstico, desde la vigencia de este Decreto, nadie podrá extraer aguas del subsuelo dentro de la zona vedada ni modificar los aprovechamientos existentes sin previo permiso escrito de la autoridad del agua.

Esta dependencia podrá conceder el permiso únicamente en los casos en que de los estudios relativos se advierta que no se causarán los perjuicios que con el establecimiento de la veda tratan de evitarse.

La segunda veda publicada el 19 de septiembre de 1978, en el Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos del estado de Sonora, para el mejor control de las extracciones, alumbramiento y aprovechamiento de las aguas del subsuelo en dicha zona.

Excepto cuando se trate de extracciones para uso doméstico y de abrevadero que se realicen por medios manuales, desde la vigencia del presente Decreto nadie podrá efectuar obras de alumbramiento de aguas del subsuelo dentro de la zona vedada, sin contar previamente con el correspondiente permiso de construcción otorgado por la autoridad del agua, ni extraer o aprovechar las mencionadas aguas, sin la concesión o asignación que expida también, según el caso, la propia autoridad.

El acuífero Arroyo Seco pertenece a la Región Administrativa II Noroeste, así como al Consejo de Cuenca 3 Alto Noroeste, no cuenta con un Comité Técnico de Aguas Subterráneas. De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 2.

2 ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

Actualización de los Datos de la Red de Medición Piezométrica de los Acuíferos: Río Altar, Arroyo Seco, Busani, Coyotillo, La Tinaja, Magdalena y Río Alisos. Universidad de Sonora, del Departamento de Geología.

El objetivo principal es conocer de manera exacta la posición actual del nivel estático de los acuíferos que forman parte del área de estudio; así como el establecer una red de monitoreo simplificada y confiable para la obtención de información hidrogeológica y piezométrica de los acuíferos; así como el censo de aprovechamientos existentes, para disponer de una red de pozos de monitoreo de niveles para establecer un programa anual para futuros estudios piezométricos en la misma

Se presenta el estudio piezométrico y una propuesta de Red de Monitoreo Piezométrico de los acuíferos, 2608 Río Altar, 2607 Arroyo Seco, 2609 Búsani, 2610 Coyotillo, 2611 La Tinaja, 2612 Magdalena y 2613 Río Alisos, ubicados en la parte media y alta de la Cuenca Río Concepción–Arroyo Cocóspera, en el extremo noroeste del estado de Sonora, México.

Se presenta el levantamiento de la piezometría de un total de 244 aprovechamientos, ubicados en los acuíferos mencionados.

Fisiográficamente el área forma parte de la Provincia Basin and Range. En la región se presenta una columna litológica muy completa con rocas metamórficas del Precámbrico en la base, seguidas de rocas sedimentarias del Paleozoico; volcánicas y sedimentarias del Mesozoico y volcánicas del Terciario inferior.

La parte alta de la columna la constituyen rocas sedimentarias clásticas del Terciario y Cuaternario, que a su vez alojan las zonas acuíferas del área.

Se presenta la información del censo y análisis del REPGA a la fecha de su realización por cada acuífero, así como estadísticas del uso del agua, tipo de aprovechamiento, profundidad de los pozos y diámetro de descarga.

Se presenta delimitación de las zonas acuíferas y mapas de ubicación de aprovechamientos, e isolíneas de profundidad y elevación del nivel estático.

3 FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia fisiográfica

El acuífero Arroyo Seco se encuentra contenido en la provincia fisiográfica denominada Llanura Sonorense y en la Subprovincia Sierras y Llanuras Sonorenses.

3.2 Clima

El clima de la región donde se localiza el acuífero de Arroyo Seco es del tipo BSh seco semicálido, asimismo, presenta hacia la zona suroeste un clima de tipo Bwh muy seco semicálido.

En la tabla 2 se presenta la precipitación y la temperatura media anual de la única estación climatológica localizada dentro del acuífero, y que se ubica en el extremo norte.

Como puede apreciarse en esta tabla el período de observación es muy limitado, por lo que para obtener la temperatura y precipitación medias anuales se utilizarán el mapa de isotermas y el mapa de isoyetas normales de la CNA, de acuerdo con lo establecido en la Norma para el cálculo de la disponibilidad.

Tabla 2. Valores medios de precipitación y temperatura registrados en estaciones climatológicas

	Estación	Precipitación media anual mm/año		Temperatura media anual °C	
		Promedio	Años con datos	Promedio	Años con datos
26095	Sasabe, Saric (DGE)	235.4	4	14.7	4

Con base a la información de la carta de temperaturas medias anuales de INEGI la temperatura media anual en el acuífero es del orden de 20° C. De acuerdo con la información de Isoyetas Normales Anuales de la República Mexicana, los valores se encuentran de 300 a 375 mm/año, por tanto el promedio es del orden de 350 mm/año. De acuerdo con la información de datos registrados en la estación “Pitiquito” la evaporación media anual en esa área es del orden de 2,842.9 mm.

3.3 Hidrografía

La principal corriente superficial la forma el río Seco, que se forma de la unión de varios ríos, entre el más importante se encuentra el arroyo Sásabe y El Fresnal, los cuales escurren desde la frontera con Estados Unidos de Norteamérica; el río Seco continua su escurrimiento hasta las inmediaciones del poblado de Pitiquito, donde ligeramente aguas arriba de las estaciones hidrométricas Pitiquito I y II, a una altitud de 300 m desemboca al río Asunción, el cual a su vez es tributario del río Concepción. Otro cauce que converge al río Seco en el área es el río San Juan.

La topografía de la cuenca del río Seco es suave salvo en la zona de sus orígenes. La cuenca es árida y prácticamente carente de vegetación. De acuerdo con los criterios de la hidrología superficial, el acuífero Arroyo Seco pertenece a la Región Hidrológica No. 8 Sonora Norte. Pertenece a la Subregión 8 B, Río Concepción. Cuenca del Río La Concepción. En el área existen algunos canales y obras afines para el riego, no se tiene algún vaso de almacenamiento de importancia, adicionalmente existen aprovechamientos de agua subterránea consistentes en pozos.

3.4 Geomorfología

El área que incluye este acuífero es principalmente dominada por lomeríos suaves y una zona plana en la porción centro-sur; sin embargo, en la zona centro se tienen elevaciones importantes con una orientación NW-SE que adelgazan la zona acuífera al sur del poblado de San Rafael.

En la zona norte también se tiene zonas escarpadas en el área del poblado de La Constitución; mientras que en la porción sur, también sobresalen algunas elevaciones importantes donde predominan rocas sedimentarias. Dentro de la zona plana del sur sobresalen las localidades de Los Gavilanes, San Enrique, San Bernardo, San Marcos, Estiguar, El Pinito, entre otros.

4 GEOLOGÍA

En este apartado se abordan los levantamientos geológicos que integran la estratigrafía regional, la geología estructural y del subsuelo (figura 2).

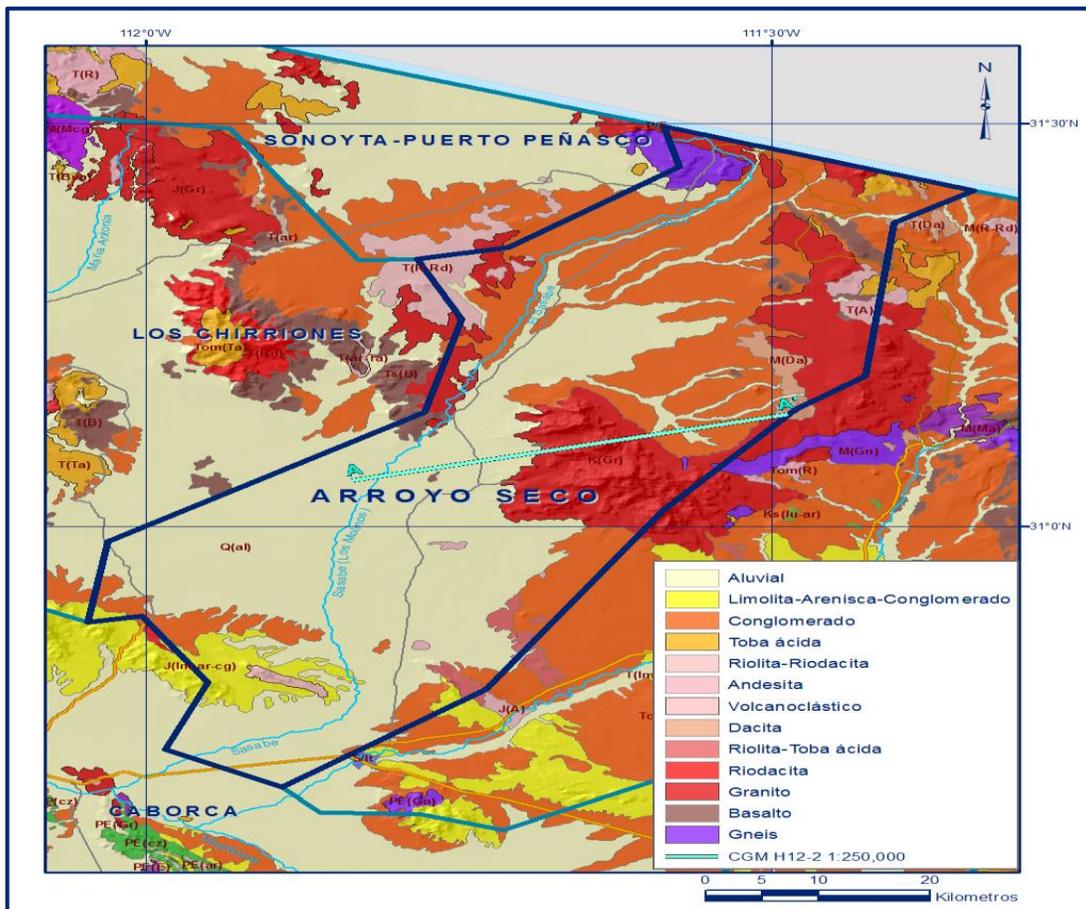


Figura 2. Geología general del acuífero

4.1 Estratigrafía

Los afloramientos litológicos presentes en el área que abarca este acuífero comprenden rocas desde el Mesozoico y hasta el Reciente, así como unidades semiconsolidadas y no-consolidadas que representan el cuerpo del mismo.

MESOZOICO

Las rocas correspondientes a esta Era dentro del área tienen afloramientos ampliamente distribuidos, sobre todo en los límites de ésta.

Por una parte, en la esquina noroccidental se presentan localmente gneisses mesozoicos; mientras que por otra, en la porción sur, aflora una secuencia volcanoclástica ácida Jurásica. También en la porción sur afloran rocas sedimentarias mesozoicas, principalmente areniscas, lutitas y calizas, pertenecientes al Grupo Bisbee del Cretácico.

Las rocas ígneas mesozoicas están representadas por un cuerpo intrusivo de composición granítica que predomina en el límite centro oriental del área, principalmente en el rancho El Batamote; así como por rocas volcánicas intermedias (andesitas-dacitas) que afloran en las inmediaciones de Rancho Nuevo.

CENOZOICO

Las rocas cenozoicas comprendidas dentro del acuífero Arroyo Seco corresponden a afloramientos de rocas volcánicas intermedias y ácidas terciarias, cuyos afloramientos locales se distribuyen a lo largo de toda el área, sobre todo al norte de San Rafael. En la parte alta del área, al norte del poblado La Constitución, se presentan una serie de afloramientos de basaltos cenozoicos asociados a lavas andesíticas de la misma edad.

Los sedimentos Plio-Cuaternarios representan gran parte de la superficie del área y representan las zonas de mayor importancia en la conformación de este acuífero. Estos están constituidos por arenas, gravas, limos y arcillas, los cuales han sido incluidos en dos unidades. Por un lado, se tienen sedimentos gruesos (conglomerado cenozoico) asociados a los depósitos de bajada que se tienen en la porción norte del área y que reflejan la actividad erosiva en las principales elevaciones.

Por otro, se tienen los depósitos fluviales (aluvión del Cuaternario) donde dominan las arenas y las gravas que han sido transportadas y depositadas por las diferentes corrientes superficiales del área. Éstos últimos predominan en la porción sur. Se incluye el resumen estratigráfico encontrado en la bibliografía consultada, en la tabla 3.

Tabla 3. Estratigrafía y unidades hidrogeológicas

EDAD	SIMBOLOGIA	DESCRIPCION
CUATERNARIO	Reciente	Depósitos aluviales y eólicos poco o nada consolidados (Qal) y (Q _{eo}).
	Pleistoceno	Basaltos Cuaternarios (Qb).
TERCIARIO	Plioceno	Depósitos detríticos continentales con basaltos interestratificados (Tsv).
		Formación Baucarit (Tsc).
	Mioceno	Tobas riolíticas con interestratificación de basalto, tobas y piroclásticos (Tiv).
	Eoceno	Estratos vulcanoclásticos. FM. Elenita, FM. Henrieta y FM. La Mesa.
	Paleoceno	Intrusivos graníticos, granito Cananea y Fanglomerado La Caridad. (Tivc) y (Mi).
CRETÁCICO	Superior	Intrusivos graníticos y capas vulcanoclasticas areniscas, lutitas y calizas. Grupo Cabullona (Mi), (Ksv) y (Kss).
	Inferior	Calizas, lutitas, areniscas y conglomerados. Grupo BISBEE, Grupo Ceja, Grupo Azulitos, FM. El Palmar y FM. Morita (Kis), FM. Tarahumara (Kiv).
JURÁSICO	Superior	Calizas conglomerados areniscas y lutitas. FM. El Batamote, FM. Sasabe y FM. Chanate (Jss).

4.2 Geología estructural

Los principales eventos tectónicos que han afectado a través del tiempo geológico al estado de Sonora se pueden considerar en orden cronológico los siguientes:

La Orogenia Mazatzal, de edad Proterozoico Temprano, que se corresponde con un proceso de metamorfismo regional (Complejos metamórficos Bámori e indiferenciado). La depositación de la secuencia carbonatada-clástica del Proterozoico Tardío en zonas de plataforma de aguas someras y la prolongación hacia el sur del Geosinclinal Cordillerano. Posteriormente, viene una estabilidad tectónica durante el Paleozoico, depositándose secuencias sedimentarias de facies de plataforma en distintas partes del Estado.

Como fase subsecuente sobrevino una depositación de cuenca ligada a un arco magmático, originado como consecuencia de la subducción de litósfera oceánica en el margen occidental de Norteamérica, durante el Triásico Tardío-Jurásico Temprano, produciendo un evento de metamorfismo regional que transforma la secuencia durante el Jurásico Medio-Tardío.

Durante el Cretácico Inferior se inicia una transgresión marina, con una fase compresiva durante el Cretácico Medio, que provoca el plegamiento de la secuencia del Cretácico Inferior y terrenos de la franja volcánica Jurásica. En el intervalo del Cretácico Inferior al Terciario Inferior se presenta la Orogenia Laramide, con una etapa magmática asociada. Este evento origina el emplazamiento de un importante conjunto volcánico-plutónico durante el Terciario Temprano-Cretácico Tardío.

La tectónica distensiva que origina la apertura del Golfo de California y la formación de la Provincia de Sierras y Valles Paralelos se considera del Mioceno Temprano. La denudación tectónica con eventos compresivos menores, erupciones por fisuras profundas y acción continua de fuerzas exógenas, producen el desarrollo de depósitos no consolidados de aluviones y terrazas del Mioceno hasta el Reciente.

Las estructuras más antiguas presentes en la región están caracterizadas por fallas de cabalgadura de edad mesozoica y probablemente de mayor edad, que sobreponen unidades más antiguas sobre otras más jóvenes.

Estas cabalgaduras tienen vergencias predominantemente hacia el noreste y han sido identificadas principalmente en las sierras del sur del área donde afloran rocas precámbricas, paleozoicas y mesozoicas.

El área se caracteriza por sierras y valles paralelos producidos por la distensión terciaria (Basin and Range). En este contexto, se generaron cuencas de graben y semi-graben que son limitadas por fallas normales de ángulo alto (65° - 85°) con una orientación predominante NNW-SSE. Otras estructuras importantes son las fallas normales de ángulo bajo (15°) o fallas de Detachment que se manifiestan principalmente en la sierra La Madera al oriente del poblado de Imuris, así como en las sierras al oeste de Magdalena. Estas estructuras son resultado del evento distensivo del "Metamorphic Core Complex".

Estos dos últimos eventos geológicos han producido un fracturamiento importante en las rocas pre-terciarias. Si bien es cierto que no se tienen identificadas estructuras recientes que afecten los sedimentos cenozoicos del área, los cauces de los ríos pudieran corresponder al lineamiento de estructuras sepultadas.

5 HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

La interpretación y análisis de información disponible de cortes litológicos, se concluyó que el acuífero se encuentra contenido principalmente en materiales granulares no consolidados. Este acuífero funciona como libre. Debajo de las capas granulares, se encuentran estratos de conglomerados no consolidados que representan la segunda unidad hidrogeológica de interés. Por el contenido arcilloso, el acuífero contenido en estas formaciones funciona localmente como acuífero semiconfinado y se caracteriza por existir aprovechamientos con gastos no mayores a 15 l/s, por lo que se puede asignar de acuerdo con los materiales una transmisividad de 0.001 m²/s.

5.2 Piezometría

Con base en la información en el área del acuífero se distinguió entre los diferentes comportamientos de niveles. Una vez analizada la potenciometría, fue posible separar aquellos pozos que muestran el comportamiento típico del acuífero superior, apoyado principalmente en norias y pozos someros, así como en la freaticimetría de la parte Alta y Media de la cuenca Río Concepción-A. Cocóspera.

Igualmente se seleccionó una muestra representativa de pozos que bombean el acuífero regional y que muestran un comportamiento característico, a esta se le denominó Red de Monitoreo Piezométrico. Para obtener la red de monitoreo se discretizó el área con un mallado que se fue ajustando, de acuerdo con la cantidad y calidad de la información piezométrica.

5.3 Comportamiento hidráulico

El análisis del comportamiento hidráulico del almacenamiento subterráneo comprende las configuraciones del nivel estático.

5.3.1 Profundidad al nivel estático

Se observa que la profundidad del nivel estático más somero se encontró, en una pequeña área, en la parte media-alta al noreste del acuífero con 5 m de profundidad, y el más profundo en la parte media-baja al suroeste del acuífero con 48 m de profundidad, concentrándose de manera importante en la zona de mayor extracción de agua para uso en la agricultura en el área de las localidades de San Enrique, El Tetabiate, Campo Oslo y Campo Palo Fierral (figura 3).

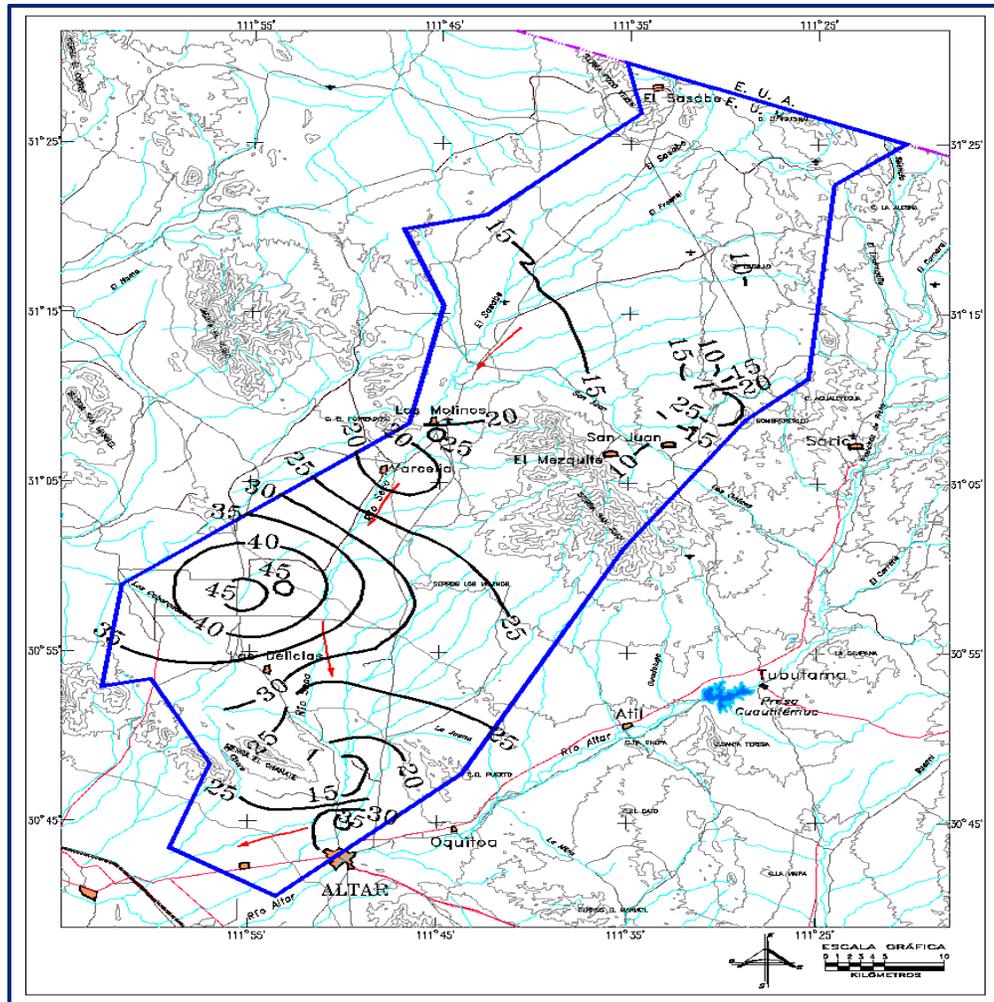


Figura 3. Curvas de igual profundidad al nivel estático en m (2004)

5.3.2 Elevación del nivel estático

A partir de determinar las cotas de los diferentes aprovechamientos en el acuífero, la máxima elevación del nivel estático se localiza en el ejido Las Ladrilleras en la parte media-alta al norte del acuífero con 1064 msnm y la más baja se tiene en la parte baja, al sur del rancho Los Olivos con 397 msnm.

Por otro lado, se observa un cono entre el ejido Los Molinos y el rancho Los Ortiz con una elevación del nivel estático de 420 msnm en la parte media-baja del acuífero, que, aunque la concentración y explotación de los pozos en esa zona no son excesivas, se desarrolla este cono debido a la permeabilidad baja del material presente. Tomando como base esta configuración, se tiene un flujo subterráneo con dirección general al suroeste del acuífero (figura 4).

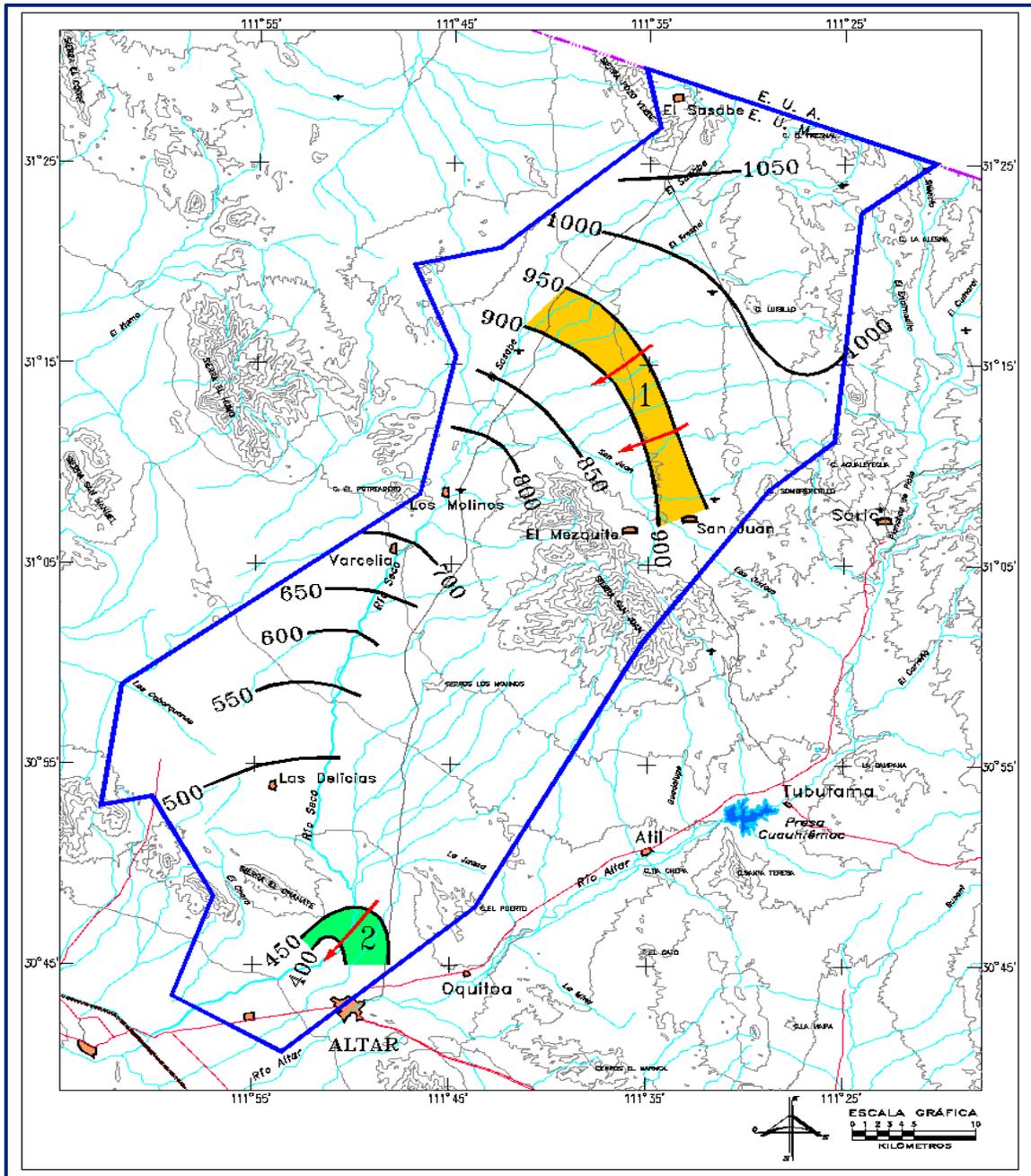


Figura 4. Curvas de igual elevación del nivel estático en msnm (2004)

6 CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

No se tiene información de censo, sólo se dispone de la información del REPDA donde se tiene que hay un volumen registrado de $28.9 \text{ m}^3/\text{año}$ al 31 de diciembre de 2005.

7 BALANCE HIDROMETEOROLÓGICO

El orden de magnitud del coeficiente de infiltración por lluvia se obtuvo través de un balance de agua superficial, para el cual se aplicó la siguiente expresión:

Infiltración = precipitación – evapotranspiración - escurrimiento

Para determinar la evapotranspiración real (ETR), se hizo uso de la fórmula de Coutagne que indica:

COUTAGNE	$ETR = P - \chi P^2$
Donde:	
ETR= Evapotranspiración m/año	
P = precipitación en m/año	
$\chi = 1/(0.8 + 0.14 t)$	
t = temperatura en °C	

En nuestro caso la precipitación promedio anual, de toda el área, es de 350 mm/año, la temperatura promedio anual es de 20° C, valores que una vez sustituidos en la ecuación anterior, dan un valor de 316.0 mm, que multiplicado por el área de 2,485 km² da un volumen total evapotranspirado de 785.2 hm³/año.

El volumen de escurrimiento anual en esta región es muy escaso, el cual es del orden de 62.6 hm³/año el cual como no se dispone de información hidrométrica se calculó con ayuda del coeficiente de escurrimiento que se obtiene a través de la expresión que se enuncia enseguida.

$$Ce = K (P-250)/2000+(K-0.15)/1.5$$

Donde:

Ce = Coeficiente de escurrimiento

K es un parámetro en función del tipo de suelo.

En nuestro caso el valor de K es del orden de 0.24, que corresponde a un suelo permeable con cubierta vegetal de menos del 50%, este procedimiento es recomendado por la CNA con la NOM-011-CNA-2000, para estimar volúmenes de escurrimiento cuando no se dispone de datos hidrométricos, sustituyendo valores el coeficiente de escurrimiento resulta ser del orden de 0.072, el cual multiplicado por el volumen de lluvia da un valor de 62.6 hm³/año.

Sustituyendo valores en la ecuación que se planteó anteriormente para obtener el volumen infiltrado se tiene:

$$\text{Infiltración} = 869.7 - 785.2 - 62.6 = 21.9 \text{ hm}^3/\text{año}$$

Al dividir el volumen anual promedio infiltrado, entre el volumen anual promedio precipitado, que en nuestro caso es de 869.32 hm³/año, se obtiene el coeficiente de infiltración, el cual resulta del orden de 0.0252.

Los valores que resultaron del balance hidrometeorológico se presentan en la tabla 4.

Tabla 4. Balance hidrometeorológico

	hm ³ /año	
Volumen llovido	869.7	
Volumen evapotranspirado	785.2	90.28%
Escorrentamiento superficial	62.6	7.20%
Infiltración	21.9	2.52%

8 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:

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

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:

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

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 anualmente por el almacenamiento del acuífero.

8.1 Entradas

Las entradas al acuífero Arroyo Seco, están integradas básicamente por las recargas naturales (Eh y Rv) y las recargas inducidas.

8.1.1 Recarga vertical (Rv)

La recarga natural por lluvia en el área de valle del acuífero es de **16.0 hm³/año**, al considerar la precipitación de 350 mm/año, sobre un área de 1820 km² y un coeficiente de infiltración de 0.0252, obtenido del balance hidrometeorológico.

8.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

Se tienen entradas por flujo subterráneo en el noreste de la zona (figura 6), calculada entre las equipotenciales 950 y 900 msnm y según la tabla 5 estimado en **12.1 hm³/año**.

Por lo que la recarga natural resulta de 28.1 hm³/año (Millones de metros cúbicos anuales).

Tabla 5. Entradas por flujo subterráneo

Entradas							
CELDA	ANCHO	LARGO	h ₁ -h ₂ (m)	GRADIENTE HIDRÁULICO	TRANSMISIVIDAD (T)	CAUDAL	VOLUMEN
	(m)	(m)		(i)	m ² /s	m ³ /s	hm ³ /año
1	23,000	3,000	50	0.01667	0.0010	0.383	12.09
						Total	12.09

8.1.3 Recarga inducida (Ri)

La recarga inducida está constituida principalmente por la infiltración vertical debida a los volúmenes de agua utilizados en el riego, así como los de fugas de los sistemas de agua potable, los cuales en total son del orden de 29.0 hm³/año, y aplicando un coeficiente de infiltración de 0.15, se tiene una recarga inducida de **4.3 hm³/año**.

Por lo tanto, la recarga total resulta de **32.4 hm³/año** (Millones de metros cúbicos anuales).

8.2 Salidas

8.2.1 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

La descarga por flujo horizontal se estimó en **3.5 hm³/año**, de acuerdo con la tabla No. 6 y la configuración de elevación del nivel estático mostrado en la figura 6.

Esa salida se observa en la porción sur.

Tabla 6. Salidas por flujo subterráneo

Salidas							
CELDA	ANCHO	LARGO	h ₁ -h ₂ (m)	GRADIENTE HIDRÁULICO	TRANSMISIVIDAD (T)	CAUDAL	VOLUMEN
2	8,500	3,750	50	0.01333	0.0010	0.113	3.5
						Total	3.5

8.2.2 Bombeo (B)

Según el REPDA el volumen de extracción de este acuífero es del orden de **28.9 hm³/año**.

8.3 Cambio de almacenamiento ΔV(S)

Considerando la información del balance, el acuífero de Arroyo Seco no presenta cambio de almacenamiento. Los valores del balance de aguas subterráneas se presentan en la tabla 7.

Tabla 7. Balance hidrogeológico

	hm ³ /año
Recarga lluvia	16.0
Flujo horizontal	12.1
Recarga natural	28.1
Recarga inducida	4.3
Recarga total	32.4
Extracción bruta	28.9
Flujo horizontal	3.5
Descarga total	32.4
Minado	0.0

9 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

9.1 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 **32.4 hm³/año**, que corresponden a la suma de la recarga natural y la recarga inducida.

9.2 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, se considera inexistente, por lo que su valor es de **0.0 hm³ anuales. DNC = 0.0 hm³ anuales.**

9.3 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 **33,946,160 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**.

9.4 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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 32.4 - 0.0 - 33.946160 \\ \text{DMA} &= -1.546160 \text{ hm}^3/\text{año.} \end{aligned}$$

El resultado indica que no existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario el déficit es de **1,546,160 m³ anuales**.

10 BIBLIOGRAFÍA

DOF. 5 de diciembre de 2001. Acuerdo por el que se establece y da a conocer al público en general la denominación única de los acuíferos reconocidos en el territorio de los Estados Unidos Mexicanos, por la Comisión Nacional del Agua, y la homologación de los nombres de los acuíferos que fueron utilizados para la emisión de títulos de concesión, asignación o permisos otorgados por este órgano desconcentrado.

Comisión Nacional del Agua, Sistema de Información Geográfica del Agua Subterránea (SIGMAS)

Diario Oficial de La Federación del 17 de abril de 2002, México.

Secretaría de Recursos Hidráulicos. Subdirección de Hidrología, 1969. Boletín Hidrológico No. 39, Región Hidrológica No. 8.