

***Actualización de la disponibilidad media anual
de agua en el acuífero Arroyo San Bernardino
(2630), Estado de Sonora***

*Publicada en el Diario Oficial de la Federación
20 de abril de 2015*

Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea

Publicada en el diario oficial de la federación el 20 de Abril de 2015

El artículo 22 segundo párrafo de la Ley de Aguas Nacionales (LAN), señala que para el otorgamiento de una concesión o asignación, debe tomarse en cuenta la disponibilidad media anual del agua, que se revisará al menos cada tres años; sujetándose a lo dispuesto por la LAN y su reglamento.

Del resultado de estudios técnicos recientes, se concluyó que existe una modificación en la disponibilidad de agua subterránea, debido a cambios en el régimen natural de recarga, volumen concesionado y/o descarga natural comprometida; por lo que se ha modificado el valor de la disponibilidad media anual de agua.

La actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea publicada en este documento corresponde a una fecha de corte en el **Registro Público de Derechos de Agua al 30 de junio de 2014.**

CLAVE	ACUÍFERO	R	DNCOM	VCAS	VEXTET	DAS	DÉFICIT
		CIFRAS EN MILLONES DE METROS CÚBICOS ANUALES					
ESTADO DE SONORA							
2630	ARROYO SAN BERNARDINO	13.5	0.0	3.931408	0.5	9.568592	0.000000

R: recarga media anual; DNCOM: descarga natural comprometida; VCAS: volumen concesionado de agua subterránea; VEXTET: volumen de extracción de agua subterránea consignado en estudios técnicos; DAS: disponibilidad media anual de agua subterránea. Las definiciones de estos términos son las contenidas en los numerales “3” y “4” de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015.



Comisión Nacional del Agua
Subdirección General Técnica
Gerencia de Aguas Subterráneas
Subgerencia de Evaluación y
Ordenamiento de Acuíferos

***DETERMINACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA
EN EL ACUÍFERO 2630 ARROYO SAN BERNARDINO,
ESTADO SONORA***

México, D.F. Marzo de 2009

CONTENIDO

1. GENERALIDADES.....	2
Antecedentes	2
1.1. Localización y vías de comunicación	2
1.2. Situación administrativa del acuífero.....	4
2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD.....	4
3. FISIOGRAFÍA	6
3.1. Provincias fisiográficas	6
3.2. Clima	6
3.3. Hidrografía.....	7
3.4. Geomorfología	8
4. GEOLOGÍA	8
4.1. Estratigrafía	8
4.2. Geología estructural	14
4.3. Geología del subsuelo	15
5. HIDROGEOLOGÍA.....	15
5.1. Tipo de acuífero.....	15
5.2. Parámetros hidráulicos	16
5.3. Piezometría	17
5.4. Comportamiento hidráulico	17
5.4.1. Profundidad al nivel estático.....	18
5.4.2. Elevación del nivel estático	18
5.4.3. Evolución del nivel estático	19
5.5. Hidrogeoquímica y Calidad del Agua	20
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	20
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	21
7.1. Entradas	21
7.1.1. Recarga Vertical (Rv)	21
7.1.2. Entradas por flujo horizontal (Eh)	22
7.2. Salidas.....	24
7.2.1. Evapotranspiración real (ETR)	24
7.2.2. Bombeo.....	25
7.2.3. Salidas por flujo horizontal (Sh).....	25
7.3. Cambio de almacenamiento	26
8. DISPONIBILIDAD.....	26
8.1. Recarga total media anual (Rt)	27
8.2. Descarga natural comprometida (DNCOM)	27
8.3. Volumen concesionado de aguas subterráneas (VCAS).....	27
8.4. Disponibilidad de aguas subterráneas (DAS).....	27
9. REFERENCIAS.....	29

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-2000 “Norma Oficial Mexicana que establece 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 concesionado vigente en el Registro Público de Derechos del Agua (REPDA).

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 y vías de comunicación

El acuífero Arroyo San Bernardino, definido con la clave 2630 en el Sistema de Información Geográfica para el Manejo del Agua Subterránea (SIGMAS) de la CONAGUA, se localiza en la porción noreste del Estado de Sonora, entre las coordenadas geográficas 30°0'0" y 31°20'24" de latitud, y 108°45'00 y 109°30'00" de longitud, cubriendo una superficie de 1673 km². Limita al norte con la frontera internacional entre México y EUA, al este con el acuífero Janos del estado de Chihuahua, al oeste con los acuíferos de Río Agua Prieta y al sur con el acuífero Batevito, ambos pertenecientes al estado de Sonora (figura 1).

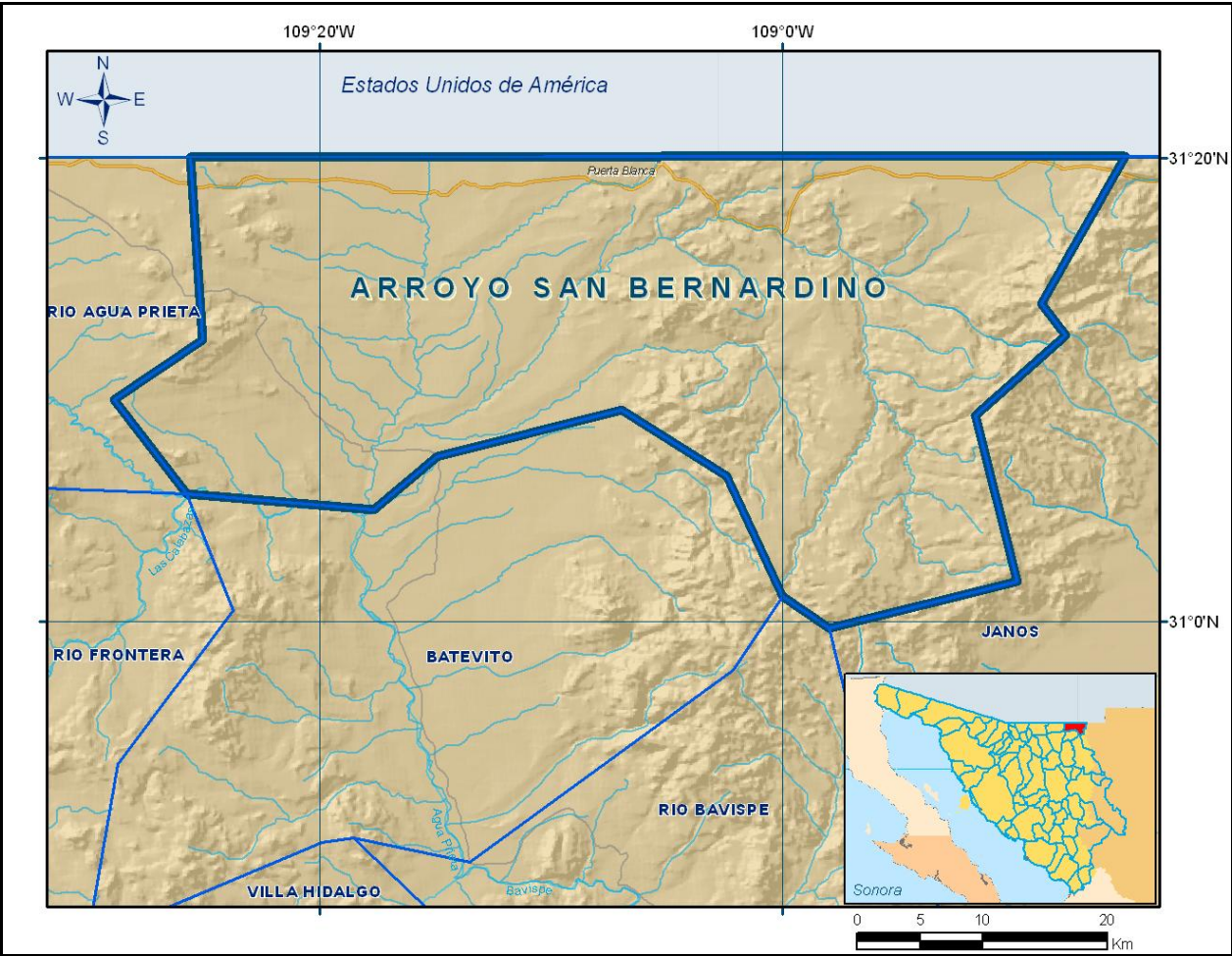


Figura 1. Localización del acuífero

Geopolíticamente cubre casi en su totalidad de territorio del municipio Agua Prieta y una muy pequeña área de su región suroeste se ubica en el municipio Fronteras. La poligonal simplificada que delimita el acuífero se encuentra definida por los vértices cuyas coordenadas se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Coordenadas de la poligonal simplificada que delimita el acuífero

ACUIFERO 2630 ARROYO SAN BERNARDINO							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	108	47	48.8	31	12	22.3	
2	108	51	41.8	31	8	53.1	
3	108	49	53.4	31	1	44.8	
4	108	58	1.3	30	59	44.8	
5	109	0	0.4	31	1	6.1	
6	109	2	25.3	31	6	16.3	
7	109	6	57.8	31	9	8.4	
8	109	14	55.9	31	7	8.9	
9	109	17	39.9	31	4	49.1	
10	109	25	43.9	31	5	30.1	
11	109	28	53.6	31	9	34.0	
12	109	25	4.3	31	12	8.6	
13	109	25	35.3	31	20	2.1	DEL 13 AL 14 POR EL LIMITE INTERNACIONAL
14	108	45	13.3	31	20	5.3	
15	108	48	51.1	31	13	44.4	
1	108	47	48.8	31	12	22.3	

1.2. Situación administrativa del acuífero

El Acuífero Arroyo San Bernardino pertenece al Organismo de Cuenca Noroeste y se encuentra sujeto a las disposiciones del *“Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos y se establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento, extracción y aprovechamiento, extracción y aprovechamiento de las Aguas del Subsuelo en la parte que corresponde a diversos Municipios del Estado de Sonora”*, publicado en el DOF el 24 de septiembre de 1984. Clasificado como veda tipo II que indica que la capacidad de los mantos acuíferos sólo permite extracciones para usos domésticos.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua (2009), el municipio Agua Prieta se localiza en la zona de disponibilidad 6 y el municipio Fronteras en zona de disponibilidad 7. Los usuarios principales del agua son los sectores agrícola y pecuario. En el acuífero no se localiza distrito o unidad de riego alguna, ni tampoco se ha constituido hasta la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En el área que cubre el acuífero Arroyo San Bernardino no se han realizado estudios de carácter hidrogeológico; sin embargo, existen algunos estudios llevados a cabo en la región, entre los cuales podemos mencionar los siguientes:

INFORME DE ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO PRELIMINAR EN EL ÁREA DE NOGALES-AGUA PRIETA, EN EL ESTADO DE SONORA, realizado para extinta Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH) a través de la empresa Geoexploraciones y Construcciones, S.A. en el año de 1980

En el estudio, se ejecutaron 30 Sondeos eléctricos de resistividad, de los cuales 26 se realizaron en el valle de Fronteras (perteneciente al acuífero Río Fronteras), y 4 en la zona del Río Santa Cruz. La profundidad de investigación fue de 300 a 500 m.

INFORME PRELIMINAR DE LOS SERVICIOS DE PROSPECCIÓN GEOHIDROLÓGICA EN LA ZONA DE SAN BERNARDINO EN EL ESTADO DE SONORA, realizado por la empresa: Geólogos Consultores, S.A., efectuado en 1983.

En el estudio se realizaron 30 Sondeos Eléctricos Verticales de resistividad para investigar a una profundidad de 300 m. De estos sondeos, 5 se llevaron a cabo en la zona del acuífero Río

Fronteras; los 25 restantes se distribuyeron en las zonas de Agua Prieta, Cuquiárachic, ejido 18 de Agosto, y en la carretera a Agua Prieta – Janos.

ATLAS DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y RED DE MONITOREO PIEZOMÉTRICO DEL ESTADO DE SONORA, realizado por la Universidad de Sonora, para la Comisión Nacional del Agua, en el 2005.

El estudio consistió en establecer una red de monitoreo piezométrico para cada acuífero que se encuentra bajo la administración de la gerencia regional noroeste, que incluye la totalidad del estado de Sonora y parte del Estado de Chihuahua. Además de planos temáticos (clima, precipitación, temperatura, geomorfología, vegetación, etc.), se incluyen planos de profundidad y elevación (mostrando las direcciones de flujo subterráneo). Constituye una buena obra de consulta general de los acuíferos.

ESTUDIO REGIONAL DE EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL ACUÍFERO AGUA PRIETA, MUNICIPIO DE AGUA PRIETA, SONORA, realizado por la empresa Investigación y Desarrollo de Acuíferos y Ambiente, para la empresa RAMMADSA, de Agua Prieta, Sonora, en el año 2007.

Este estudio se realizó con el propósito de evaluar la recarga media anual que recibe el acuífero. Como parte de las actividades de campo para el planteamiento y estimación de las componentes del balance de aguas subterráneas, se llevaron a cabo el censo de aprovechamientos, piezometría, nivelación de brocales de pozos, ejecución de sondeos geofísicos y toma de muestras de agua subterránea para su análisis fisicoquímico correspondiente.

SÍNTESIS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DEL ESTADO DE SONORA, ASÍ COMO EL ESTUDIO HIDROLÓGICO DEL ESTADO DE SONORA, 2007, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática elaboró en 2007 la. En estos estudios se describe de manera general el contexto geohidrológico del estado, de igual forma se presentan estadísticas por municipio de población, actividades económicas principales, etc.

ACTUALIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LOS ACUÍFEROS DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO YAQUI, MÁTAPE, ESTADO DE SONORA, 2008, Servicio Geológico Mexicano, en convenio con Comisión Nacional del Agua cuyo objetivo fue realizar una evaluación hidrogeológica preliminar de los acuíferos de estas cuencas, para determinar su recarga media anual y su disponibilidad.

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. Provincias fisiográficas

El territorio que comprende el acuífero se encuentra ubicado dentro de dos provincias fisiográficas; “Sierra Madre Occidental y Sierras y Llanuras del Norte (Raisz, 1964)”.

Provincia Sierra Madre Occidental

La Sierra Madre Occidental tuvo su origen en el Terciario Inferior, producto de la extrusión a gran escala de los materiales volcánicos predominantemente de tipo ácido; las topoformas son en general mesetas asociadas con cañones.

En la franja oriental existen cadenas montañosas y valles orientados en sentido noreste-suroeste, producto de los fallamientos que acompañaron a los procesos de levantamiento durante el Pleistoceno. En el área existen dos subprovincias; Sierras y Valles del Norte y Sierras y Cañadas del Norte. La primera abarca la Sierra La Ceniza, ubicada al oeste del acuífero, así como al Cerro Las Mulas. La segunda se destaca por tener sierras altas con cañadas, esto se observa al este de la zona, entre las sierras Minitas, Los Embudos y San Luis.

Provincia Sierras y Llanuras del Norte

Se caracteriza por tener dos subprovincias; Llanuras y Médanos del Norte y Sierra Alta. La porción central del acuífero se ubica dentro de la Subprovincia Llanuras y Médanos del Norte, extendida en un amplio valle intermontano, abarcando las localidades Dieciocho de Agosto, Oquita Montenegro, Cajón Bonito y San Bernardino. Al sureste del área, entre las comunidades San Francisco y Cerro Prieto, se ubica la Subprovincia Sierra Alta, extendiéndose por la Sierra Basomari y el Cerro Cabullona.

3.2. Clima

De acuerdo a la clasificación de Köppen, modificada por E. García (1981), el clima que predomina en la zona es **Semiseco Templado con Lluvias en Verano BS₁kw(x')**, con temperaturas medias anuales de 12 a 18°C y precipitaciones de 400-600 mm por año.

En el occidente del acuífero existe clima Seco Templado con Lluvias en Verano $BS_{0kw}(x')$, con una precipitación anual promedio de 300 a 350 mm.

Hacia el suroccidente se presenta clima Seco Semicálido con Lluvias en Verano $BS_{0hw}(x')$, con precipitaciones del orden de 300 a 450 mm. Al sureste el clima es Semifrío Subhúmedo con Lluvias en Verano, de Menor Humedad $C(E)(w_1)(x')$, temperaturas que varían de 8.0° a 12.0° C, y variación de la precipitación media anual de 500 a 700 mm.

El análisis climatológico se realizó con base en los datos obtenidos de dos estaciones climatológicas que tienen influencia en el acuífero.

La temperatura media anual registrada en la estación Agua Prieta, tomando como base información desde 1961 a 2007, es de 25.7° C, se determinó una precipitación media anual de 369 mm/año y se estima que la evaporación potencial es de unos 2120 mm/año.

3.3. Hidrografía

Las principales corrientes superficiales del Acuífero son los ríos San Bernardino y Cajón Bonito, ambos de tipo intermitente. El Río San Bernardino tiene una dirección norte sur; sus tributarios principales son los arroyos Guadalupe, Los Coyotes y El Colorado.

El Río Cajón Bonito nace en las sierras Pan Duro y San Luis, sus tributarios principales son los arroyos Las Chimeneas y El Diablo, tiene una dirección preferente de sur a norte para después hacer una deflexión rodeando al Cerro La Hoya para después adoptar un nuevo sentido de norte - sur; en las inmediaciones del poblado Cuchuverachi, se le integra el Arroyo Los Embudos para posteriormente ser interceptado por el Río San Bernardino, en la frontera del acuífero, y después formar parte del Río Agua Prieta.

El acuífero Arroyo San Bernardino se ubica dentro de la Región Hidrológica 9 Sonora Sur (RH-9). Esta región se caracteriza por el nacimiento de sus corrientes en la Sierra Madre Occidental. Se encuentra dentro de la Cuenca del Río Yaqui, en la Subcuenca Río Batevito.

No existe infraestructura hidráulica para el almacenamiento y aprovechamiento de las aguas superficiales. Sólo existen de obras de captación de agua subterránea, principalmente norias para de tipo norias, para el abastecimiento de las necesidades del uso doméstico y abrevadero, en menor cantidad existen pozos someros para el monitoreo de niveles, desde el punto de vista ecológico.

3.4. Geomorfología

Orográficamente el área está representada por sierras alargadas que se ubican en los flancos oriental y occidental, orientadas en sentido general norte-sur y noroeste-sureste, respectivamente; mientras que en la porción central existe un amplio valle con una pendiente suave. Las elevaciones del relieve terrestre de la región oscilan entre 900 y 2300 msnm. El punto más alto se ubica en el extremo noreste, en la Sierra Las Espuelas, con una elevación 2350 msnm.

En la zona se distinguen las siguientes unidades geomorfológicas: al este la Sierra San Luis, la cual sirve de parteaguas superficial del acuífero, al sureste la Sierra Las Espuelas, en la porción central se ubican la sierra Los Embudos y Las Minutas, mientras que al sur las sierras Pan Duro, Basomari y Pitaycachi; finalmente al noroeste se localiza la Sierra La Ceniza.

4. GEOLOGÍA

4.1. Estratigrafía

El área se caracteriza por presentar un contexto geológico variado; las unidades litológicas que afloran en la comprenden un registro estratigráfico del Jurásico al Reciente. A continuación se hace una breve descripción de ellas, en orden cronológico, de la más antigua a la más reciente, cuya distribución se observa en la Figura 2.

JURASICO SUPERIOR

Conglomerado Glance (JsKiCgp-Ar). Esta unidad forma parte del Grupo Bisbee, el cual engloba cuatro formaciones: Conglomerado Glance, Morita, Caliza Mural y Cintura. El Conglomerado Glance es una secuencia de rocas conglomeráticas que aflora en las faldas de la Sierra La Ceniza (ubicada al sur del acuífero). Está constituido por conglomerados polimícticos poco rodados con algunos horizontes de areniscas, presenta una coloración que varía de gris morado a café rosado-rojizo con cantos de intrusivos, esquistos precámbricos y en menor proporción, rocas volcánicas jurásicas, cuarcitas y calizas paleozoicas. Por su grado de compactación a la unidad se le asigna una permeabilidad predominantemente baja, aunque ocasionalmente el fracturamiento secundario puede incrementar su permeabilidad.

Formación Morita (Kap Ar-Lu). Se define como una serie alternada de capas de lutitas de color café rojizo y areniscas de coloración rojiza a gris; ocasionalmente presentan capas de areniscas conglomeráticas de grano anguloso y lentes de caliza impura.

Aflora en la porción suroeste del acuífero. Sobreyace concordantemente al Conglomerado Glance y es sobreyacida en concordancia por la Caliza Mural. Se le asigna permeabilidad media baja.

Formación Caliza Mural (Kapa Cz). Aflora al suroeste del acuífero, con una orientación preferente noroeste-sureste, constituida en su mayor parte por calizas con estratificación delgada en la base y gruesas en la cima, con abundante contenido fosilífero; ocasionalmente se presentan en la base algunas intercalaciones de areniscas y lodolitas de estratificación delgada. Sobreyace concordantemente a la Formación Morita y subyace de manera concordante y gradual a la Formación Cintura. Por sus componentes de grano fino, esta unidad es de permeabilidad baja, aunque sus horizontes arenosos ocasionan un aumento de la permeabilidad, de media a baja.

Formación Cintura (Ka Ar-Lu). Aflora al sur de la Sierra La Ceniza, con una dirección preferente noroeste-sureste, donde su espesor es mayor a los 500 m. Se trata de una intercalación en estratos delgados de areniscas y lutitas, con ocasionales horizontes de carbón y lutitas carbonosas, conglomerados y calizas; las areniscas son de color café rojizo a blanco, mientras que las lutitas presentan coloraciones que varían de gris verdoso a rojizo y negro.

La estratificación cruzada y rizaduras de corriente que las areniscas contienen en su base, los horizontes de carbón y lutitas carbonosas en la parte media de la formación, así como la presencia hacia la cima de horizontes con troncos de árboles petrificados, la distinguen de la Formación Morita. Por su alto grado de compactación y material de grano fino, presenta permeabilidad baja.

CRETÁCICO INFERIOR

Secuencia indiferenciada (KiCz-Ar). Serie de rocas sedimentarias marinas, indiferenciadas, correlacionables con el Grupo Bisbee; litológicamente, en su mayoría está constituida por areniscas de cuarzo, arcosas y feldespáticas, calizas, limolitas, lodolitas y escasos horizontes basales de conglomerados. Aflora en la porción central y occidental del acuífero, así como en la porción centro (noroeste de la Sierra Los Embudos). Otro de sus afloramientos principales se extiende en la parte norte de la Sierra Pitaycachi, así como al occidente de la Sierra Pan Duro, mientras que al oeste de la zona aflora en la Sierra La Ceniza. Hidrogeológicamente se considera que por su variación litológica, la unidad tiene una permeabilidad que varía de media a baja.

ROCAS INTRUSIVAS

Batolito Laramide (KsTpaD, KsTpgPmz, TpaMz y ToGr)

En general los intrusivos cretácicos de composición diorítica y granítico-granodiorítica se encuentran aflorando al norte y sur de la Sierra La Ceniza, la cual está conformada por cerros y lomas de escasa altura. La unidad formada por Diorita (KsTpaD), clasificada como diorita de anfíbol, presenta una coloración gris con manchas claras y oscuras de textura fanerítica, presenta minerales de feldespato, ferromagnesianos, minerales arcillosos y óxidos de hierro.

La unidad Granito (ToGr) clasificada como una metatonalita de biotita, microscópicamente presenta una coloración café claro a rojiza, de textura fanerítica con feldespatos, cuarzo y óxidos de hierro. Hacia el este de la Sierra Pitaycachi aflora dos plutones monzoníticos uno del Paleoceno y un pórfido monzonítico de finales del Cretácico superior.

CRETÁCICO SUPERIOR

Formación Mesa (KsA-Ar). Conjunto de rocas volcánicas y volcanoclásticas de composición andesítica, constituidas por aglomerados, tobas, flujos andesíticos y conglomerados, que en conjunto alcanzan un espesor de hasta 1500 m. Forman parte de la Sierra La Ceniza, donde se encuentran en contacto por falla normal con rocas marinas indiferenciadas del Cretácico Inferior, afectadas a su vez por un intrusivo de composición granítica de edad Oligoceno. En el Cerro Las Mulas infrayace discordantemente a rocas volcánicas ácidas del Oligoceno y la cubren discordantemente conglomerados polimícticos mal consolidados del Pleistoceno Inferior y gravas y arenas del Pleistoceno Superior. Presenta comportamiento errático en cuanto a su fracturamiento, por lo cual se le asigna una permeabilidad que varía de media a baja.

Grupo Cabullona (Ks Ar-Lu y Ks Cgp-TR). Es una potente secuencia de rocas detríticas con cantidades pequeñas de ceniza volcánica que descansan discordantemente sobre rocas del Cretácico Inferior. Consiste básicamente de areniscas, lutitas, limolitas y en menor escala horizontes y lentes conglomeráticos de color gris, verde, café y morado, ocasionalmente intercalados con tobas riolíticas de color gris-morado y más raramente niveles de flujos lávicos intermedios.

Las areniscas están dispuestas en estratos delgados a medios, muestran estratificación cruzada y alto contenido fosilífero (gasterópodos, pelecípodos, etc.); las limolitas y lutitas contienen flora de plantas carbonizadas. Al sur de la Sierra La Ceniza es cabalgada por la Formación Conglomerado Glance y sobreyace en discordancia a la Formación Cintura; está cubierta discordantemente por conglomerados polimícticos y gravas y arenas del Pleistoceno; al

norte de la Sierra La Ceniza está afectada por un intrusivo granítico del Oligoceno, la cubren en discordancia conglomerados polimícticos, gravas y arenas del Pleistoceno.

Conglomerado El Cemento (Ks Cgp-TR). Aflora al sur y sureste del Cerro Cabullona, así como al sureste del acuífero. Está constituida por fragmentos de intrusivo granítico megacristalino, posiblemente derivado del Granito Mesteñas, además de aglomerados y tobas epiclásticas de composición ácida, intensamente oxidadas. Por su grado de compactación, su permeabilidad es baja.

PALEÓGENO-NEÓGENO

Secuencia Volcánica Intermedia (TeoA-TA). Conformada por andesitas y en menor escala tobas andesíticas que afloran al norte de la Sierra La Ceniza, así como al sureste del poblado Santa Rosa y en algunos arroyos de la sierras San Luis y Los Embudos. Las andesitas presentan una coloración gris clara en roca fresca, intemperizan a un color café amarillento con texturas afaníticas y faneríticas, su mineralogía se compone de feldespatos, ferromagnesianos, minerales arcillosos y óxidos de hierro. En los afloramientos se observa que infrayace discordante a la secuencia volcánica ácida oligocénica, su contacto inferior se desconoce. Por el intenso fracturamiento que presenta, a esta unidad se le asigna una permeabilidad que varía de media a alta.

Secuencia Volcánica Ácida (ToTR-R, ToTR). Rocas volcánicas representadas por tobas riolíticas, ignimbritas, riolitas, riodacitas, traquitas, aglomerados y domos riolíticos. Forma parte del gran evento volcánico oligomiocénico que dio lugar a la formación de la Sierra Madre Occidental; aflora principalmente en las sierras San Luis, Los Embudos, Las Minutas, Panduro, Las Espuelas, Pitaycachi, y los cerros La Hoya (al centro norte del acuífero) y Las Mulas (límite oeste del área); el espesor de esta secuencia se estima que es mayor de 1000 m.

La principal relación estratigráfica en la base de esta unidad es con la secuencia sedimentaria del Grupo Bisbee, con la que tiene contacto tectónico por falla normal (Sierra Las Minutas) y sobreyaciéndola discordantemente se encuentran las sierras Pitaycachi, Panduro, Las Minutas y Los Embudos, donde también sobreyace a andesitas y areniscas correlacionables con la Formación Mesa del Cretácico superior.

La unidad se encuentra en contacto por falla normal y sobreyaciendo discordante a conglomerados y tobas del Grupo Cabullona; hacia la cima su principal relación estratigráfica es discordante con los depósitos continentales consolidados y no consolidados, además de rocas basálticas.

Hidrogeológicamente la unidad es de importancia ya que es una zona de recarga que aporta la mayor parte del agua que recarga al acuífero.

Formación Báucarit (TmCgp-B, Tm Cgp-Ar, TmCgp-TR). Secuencia de areniscas, conglomerados bien consolidados y arcillas bien estratificadas, cuya parte inferior contiene flujos de basaltos intercalados con aglomerados basálticos. Se considera producto de una sedimentación continental principalmente de ambientes fluviales y lacustres interestratificadas con rocas volcánicas ácidas, básicas e intermedias, su origen está íntimamente ligado a la distensión terciaria.

Aflora en la Sierra San Luis, en las márgenes de los ríos Los Embudos, Agua Prieta Cuchuverachi y Batevito, cerca del Rancho Los Jabalinas (ubicado al oeste de la Sierra Pitaycachi) y al sureste del Cerro La Cabullona. Sus afloramientos descasan sobre riolitas y tobas riolíticas elevadas, al sureste del Cerro La Cabullona se encuentra rellenando las depresiones causadas por la distensión terciaria limitada por la falla La Cabullona. El espesor aproximado en algunos afloramientos alcanza los 200m. Por su alto grado de compactación y material fino, a esta unidad se le considera sello, cuya función es generar fenómenos de confinamiento y semiconfinamiento acuífero.

Secuencia Volcánica Básica (Tm B-A). Se trata de una serie de rocas representadas por basaltos, andesitas, andesitas basálticas, así como aglomerados basálticos con ocasionales intercalaciones de tobas ácidas de naturaleza riolítica y riodacítica, donde su principal relación estratigráfica es con la secuencia volcánica ácida del Oligoceno. Dentro de la zona su afloramiento más importante se observa en la Sierra Basamori, cubriendo discordante a rocas correlacionables con el Grupo Bisbee y la Formación Báucarit; en la misma región, al sur del Cerro Cabullona, sobreyace discordante a la Formación Morita.

Generalmente su espesor aflorante no sobrepasa los 50 metros, a excepción de la Sierra Basamori donde alcanza 300 m; su ambiente de depósito es volcánico continental, ligado íntimamente a la distensión miocénica que produjo fallamiento regional normal con fisuras profundas. Por su fracturamiento y espesor a esta unidad se le asigna una permeabilidad que varía de media a alta.

CUATERNARIO

Conglomerados Polimícticos del Pleistoceno (Qpt Cgp). Unidad conglomerática polimíctica mal consolidada con escasos horizontes de limos y arenas, sus clastos están por lo general bien redondeados y son producto de erosión de rocas preexistentes, se presenta formando terrazas y depósitos de talud; los cuales se distribuyen principalmente en la porción central del acuífero, en llanuras intermontanas formando lomeríos. Sus afloramientos principales forman el Valle El

Riyito, con espesores aproximados de 50 m. Se encuentran cubriendo a la Formación Báucarit y unidades preterciarias, son cubiertos por depósitos aluviales de ríos, arroyos y planicies de inundación. Por su bajo grado de consolidación la permeabilidad asignada es alta.

Basalto (Qpt B). Basaltos de tipo toleítico alcalino, su principal afloramiento se ubica en la comunidad 18 de Agosto, cubre a un conglomerado polimítico mal consolidado, aflora en forma de cuerpos de poco volumen y espesor, orientados casi norte-sur. De permeabilidad alta.

Gravas y Arenas (Qptgv-ar). Unidad constituida por sedimentos de naturaleza litológica variable, que granulométricamente consiste de gravas, arenas, limos y arcillas, que en algunas ocasiones presentan estratificación débilmente marcada, aunque la mayor parte de las veces se presenta masiva. Estos depósitos se encuentran cubriendo discordantemente a las unidades preexistentes, rellenando depresiones y cuencas actuales y son considerados de edad Pleistoceno Superior. Su permeabilidad es alta.

Limos y Arenas (Qholm-ar). Constituida por depósitos aluviales no consolidados de arenas y limos que se han acumulado a lo largo de los valles principales; el tipo de componentes y la granulometría de la unidad varía ampliamente en toda el área, incluye a los depósitos aluviales de grano fino de la parte central de los valles, así como los depósitos de grano grueso de las fajas de pie de monte. La planicie aluvial de la porción occidental está caracterizada por la presencia de constituyentes de grano muy fino. La permeabilidad asignada es alta.

Aluvión (Q-al). Los depósitos superficiales cuaternarios se encuentran restringidos a los lechos de los ríos, planicies de inundación y arroyos; estos afloramientos consisten de gravas, arenas, limos y arcillas sin consolidar. El aluvión presenta permeabilidad alta.

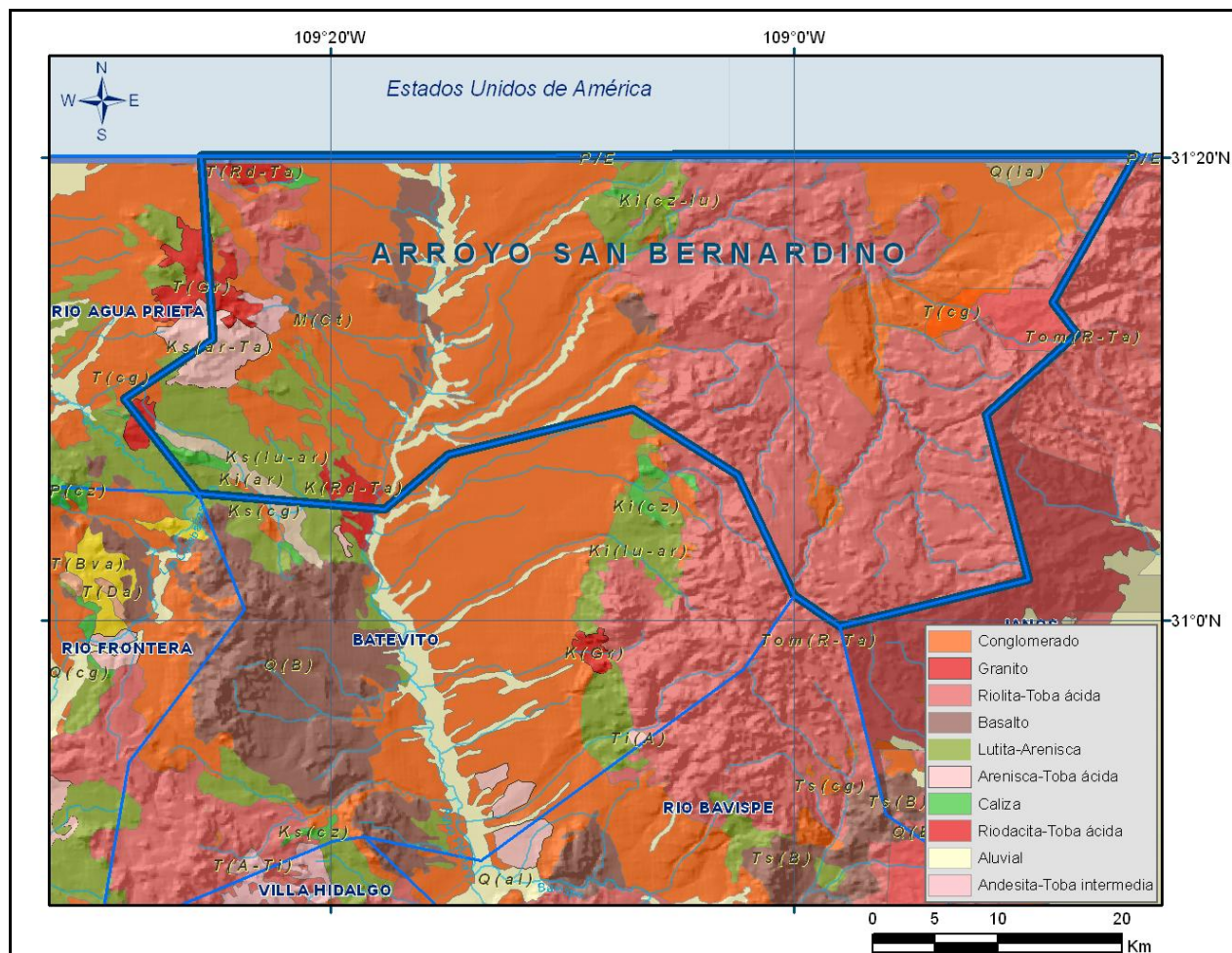


Figura 2. Mapa Geológico

4.2. Geología estructural

La zona se caracteriza por una sucesión de sierras altas alargadas de rumbo preferencial norte - sur y separadas por una fosa que corresponde al Valle El Riyito (San Bernardino-Batevito), limitado al oriente por las sierras Los Embudos, Las Minitas, Panduro y Pitaycachi, y al occidente por las sierras La Ceniza, El Caloso y Basomari. Dicha fosa se encuentra rellena de material clástico y es producto de la última etapa tectónica distensiva iniciada a partir del Terciario.

Una de las principales estructuras de la zona se localiza en el flanco occidental de la Sierra Las Minitas, se trata de una estructura simétrica aparentemente buzante al sureste con una extensión mayor de 5 km, su plano axial tiene una orientación noroeste 40° sureste; y el sinclinal Agua Zarca es el complemento sinforme del anticlinal Panduro con una orientación y longitud similar o igual a éste, esta estructura aparentemente termina al suroeste, donde se pierde casi en el contacto con la secuencia volcánica ácida terciaria de la Sierra Panduro, mientras que al noroeste es cortada normalmente por la falla aún activa Falla Pitaycachi.

La deformación frágil está representada por fallas normales de orientación noroeste-sureste, norte-sur y noreste suroeste. Las primeras estructuras originaron fosas y pilares con la orientación referida, las cuales fueron rellenadas por depósitos continentales conglomeráticos de la Formación Báucarit. En la porción noreste del Cerro Cabullona se presentan las fallas normales (El Caloso, San Marcos y Cabullona) con dirección noroeste-sureste, estas de orden distensivo, al igual que las márgenes del Río Cajón Bonito. En la Sierra Pitaycachi se encuentran las fallas Pitaycachi, Panduro y las Minitas; considerándose activas.

4.3. Geología del subsuelo

El acuífero que se explota actualmente se ubica en un medio granular no consolidado de gravas arenas y limos; por debajo de este, en el valle existe un paquete consolidado del Conglomerado Glance. Hacia el noreste del acuífero se encuentra un paquete de toba riolítica de gran potencia por el cual circula agua subterránea. En las sierras aledañas al valle, en la porción occidental de la zona, afloran paquetes de calizas, areniscas y lutitas de edad Cretácica, correspondientes al Grupo Cabullona; formaciones Mesa, Cintura, Morita y la Secuencia Indiferenciada; a través de las cuales el flujo subterráneo se mueve en su dirección natural hacia el valle.

El basamento y las fronteras al flujo subterráneo del acuífero están constituidos por el Conglomerado Glance que subyace al conglomerado polimíctico del Cuaternario, las unidades de baja permeabilidad de la Formación Báucarit y los intrusivos ílamídicos de composición granítica.

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1. Tipo de acuífero

De acuerdo con las unidades hidrogeológicas identificadas, es posible definir que el acuífero que actualmente se explota es de **tipo libre**, formado por una secuencia de depósitos aluviales constituidos principalmente por gravas, arenas y arcillas, de permeabilidad media, que se restringe a los cauces de los arroyos.

Debajo de esta secuencia y fuera de los cauces de los ríos y arroyos, el acuífero está conformado por conglomerados y una secuencia de rocas sedimentarias y volcánicas que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento.

El conglomerado polimíctico del Cuaternario presenta buenas posibilidades de explotación debido a su bajo grado de consolidación y los escasos horizontes de limos y arenas que presenta. Ambas unidades descansan sobre el Conglomerado Glance, el cual presenta baja permeabilidad.

La principal fuente de recarga es el agua de lluvia que se infiltra en las zonas topográficamente altas, donde existan condiciones de permeabilidad adecuadas, predominantemente en materiales riolíticos y basálticos, que afloran en las sierras Las Espuelas, San Luis, Las Minutas, Los Embudos, La Ceniza, Pitaycachi, Panduro y Basamori, cuyo flujo superficial y subterráneo recargan al valle principal. En menor proporción existe recarga por infiltración vertical del agua de lluvia que se precipita en el valle.

La Figura 3 representa una sección esquemática orientada este – oeste, donde se observa la distribución de unidades geológicas, evidenciando la zona acuífera granular y fracturada, así como las unidades que constituyen el basamento hidrogeológico.

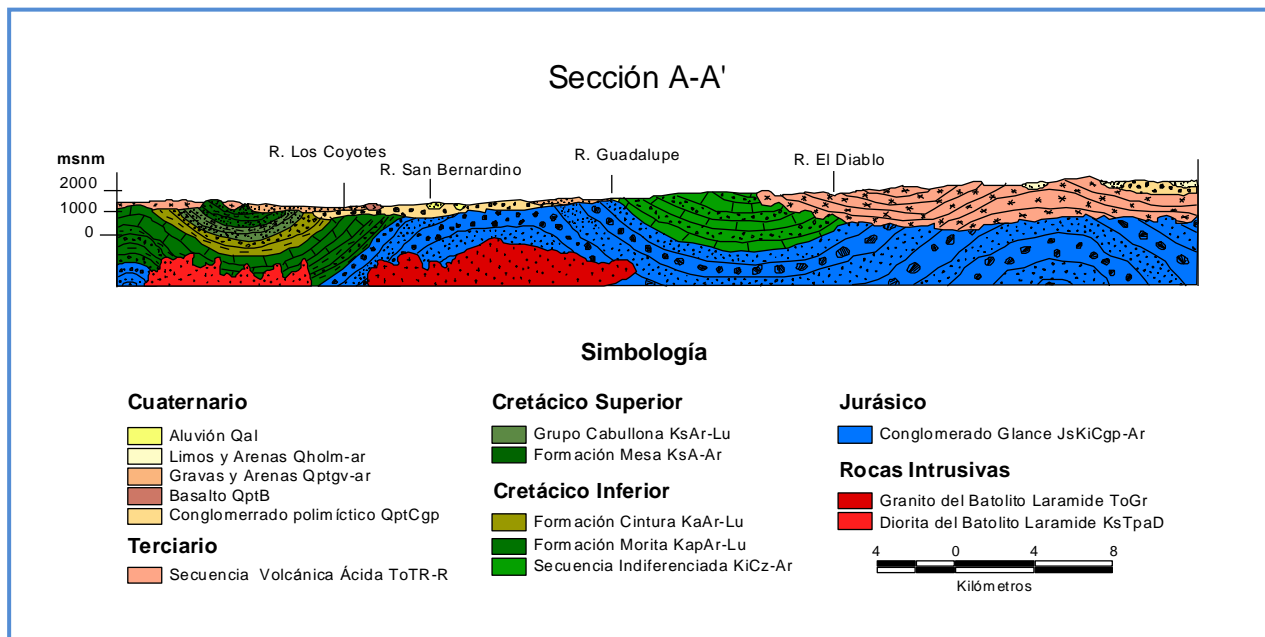


Figura 3. Sección geológica esquemática (orientada este-oeste) en el centro del acuífero

5.2. Parámetros hidráulicos

Durante la campaña de censo de aprovechamientos desarrollada en el estudio de 2008 se observó que los aprovechamientos que cuentan con equipos eléctricos y condiciones adecuadas para desarrollar pruebas de bombeo, están fuera de operación o en su defecto no cuentan con orificio para el monitoreo de los niveles del agua. Estas razones impidieron la ejecución de pruebas de bombeo.

Mediante recorridos de campo y observaciones geológicas se estimaron valores promedio de parámetros hidráulicos representativos del acuífero. Para el caso de la transmisividad se considera un valor promedio de $1.1 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ ($100 \text{ m}^2/\text{día}$) y conductividad hidráulica de $5.0 \times 10^{-4} \text{ m/s}$, valores que son consistentes e hidrogeológicamente correlacionables con los obtenidos en el estudio realizado en el 2007 para la empresa RAMMADSA.

Los valores de transmisividad utilizados en las celdas de entradas y salidas horizontales del acuífero, fueron establecidos con base en las características litológicas, permeabilidad y espesor saturado. En el caso de las entradas se utilizaron valores entre 9.0×10^{-4} y $1.5 \times 10^{-3} \text{ m/s}$, mientras que en la zona de salidas fue estimado un valor de $2.8 \times 10^{-3} \text{ m/s}$.

5.3. Piezometría

Para el análisis y la configuración de niveles piezométricos, así como la determinación del funcionamiento acuífero, se utilizaron los datos piezométricos recabados por SGM (2008) en 42 aprovechamientos del agua subterránea, de los cuales 27 corresponden a norias y 15 a pozos, diseminados en el acuífero

5.4. Comportamiento hidráulico

En el Acuífero San Bernardino existen dos principales zonas de recarga por flujo horizontal; al oriente, en las sierras Minitas, San Luís, Los Embudos y Panduro, al occidente, en la Sierra La Ceniza; donde las zonas elevadas se caracterizan por abundantes precipitaciones en época de lluvias, mismo que se infiltra al subsuelo para posteriormente viajar en dirección a la zona de valle. La velocidad y tiempo de tránsito del flujo subterráneo está íntimamente ligado a la litología y profundidad del nivel estático.

En la zona las condiciones de recarga natural no se han visto excedidas por el volumen extraído, lo anterior indica que el acuífero se encuentra en condiciones iniciales, es decir, no se han generado conos de abatimiento que inviertan las direcciones de flujo subterráneo. Por lo anterior el acuífero conserva su descarga natural por flujo subterráneo, la cual ocurre al suroeste de la zona, rumbo al Acuífero Batevito, a la altura de la comunidad Cuchuverachi.

Las mediciones y posteriores configuraciones piezométricas confirman lo expresado anteriormente, es decir, el flujo subterráneo mantiene la misma dirección que el superficial, de manera general no existen alteraciones del flujo natural del agua; sin embargo, no se descarta la posibilidad que localmente, en el extremo noroeste, las direcciones se hayan invertido, lo anterior debido a que al norte del acuífero, en el vecino país, existe una zona de riego intenso. Lo anterior no se pudo comprobar debido a la falta de aprovechamientos del lado mexicano.

5.4.1. Profundidad al nivel estático

La configuración de la profundidad al nivel estático (Figura 4) muestra la presencia de una zona somera en el cauce de los arroyos (subálveo), con niveles entre 1 y 8 m, localizados en su gran mayoría sobre las márgenes del arroyo Cajón Bonito. Es evidente la influencia de la topografía sobre la profundidad al nivel estático. Las menores profundidades se localizan en los subálveos de los arroyos y los mayores conforme se incrementa la elevación del terreno.

Profundidades entre 20 y 40 m se observan en la zona centro-occidente del valle. Valores más altos puntuales se registran en pozos perforados a mayor profundidad, en zonas topográficamente más levadas, sobre rocas volcánicas y conglomerados.

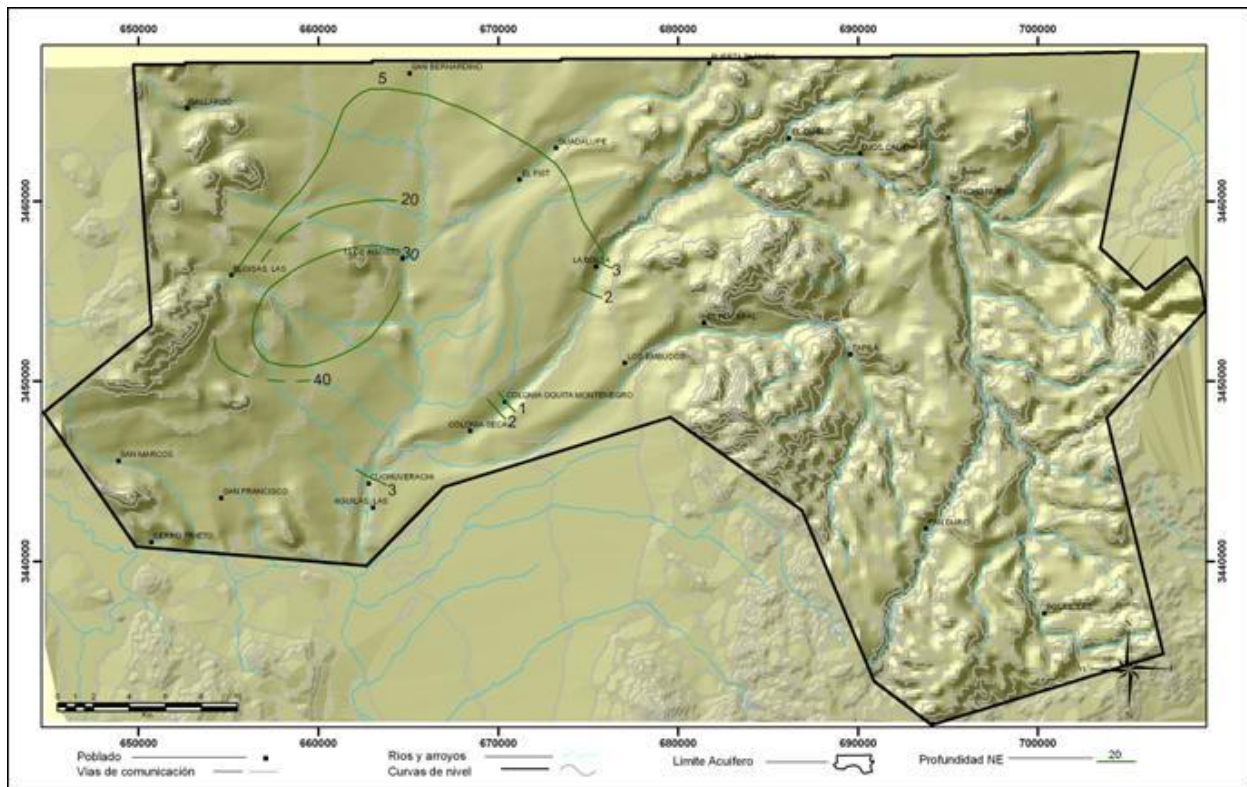


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2008)

5.4.2. Elevación del nivel estático

La configuración de curvas de igual elevación del nivel estático para el año 2008 (Figura 5) presenta elevaciones que varían desde 980 hasta 1230 msnm, los valores más altos se registran en la porción noreste del acuífero, en las inmediaciones del Rancho Puerta Blanca, mientras que las menores se ubican en la zona centro-sur, evidenciando de esta manera la



Con respecto a la evolución del nivel estático, no se cuenta con información piezométrica histórica que permita su configuración. Las escasas mediciones piezométricas recabadas en estudios previos se encuentran dispersas en tiempo y espacio y no cubren en su totalidad la extensión superficial del acuífero. Aunado a esto, la configuración de la elevación del nivel estático no muestra alteraciones del flujo natural del agua subterránea que indiquen la presencia de conos de abatimiento causados por la concentración de pozos y/o del bombeo. El volumen de extracción se ha estimado en 0.5 hm³ anuales, valor que es muy inferior a la recarga más conservadora que pudiera estimarse.

Por estas razones, se puede afirmar que 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

Durante la etapa de censo y piezometría efectuados en el 2008, se midieron en campo diversos parámetros fisicoquímicos como: temperatura, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos, salinidad, oxígeno disuelto, pH y Eh.

Dado que la mayor parte de los parámetros físicos y químicos medidos en 2008 presentan valores de pH cercanos a la neutralidad, así como valores bajos de Sólidos Totales Disueltos (STD), la mayor parte del agua subterránea está asociada a agua de reciente infiltración. De igual forma existen concentraciones elevadas de STD, sin embargo, se ubican en zonas puntuales donde la geología y sus procesos mineralógicos cambian la calidad del agua, la cual está asociada a un tiempo mayor de residencia y tránsito en el acuífero.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo al censo realizado en el 2008, se considera que existen 43 aprovechamientos de aguas subterráneas en el acuífero; de los cuales 27 son norias, 15 pozos y 1 manantial de estos, 27 está activos y los 16 restantes permanecen inactivos, ya sea por abandono, azolve y otras razones.

Del total de aprovechamientos, 14 (33%) son de uso pecuario, 10 (23%) ubicados en una reserva ecológica para el monitoreo de los niveles estáticos (no extraen agua); 6 (14%) de uso agrícola, 5 (12%) para uso doméstico y solo 1 pozo (2%) se emplea para el abastecimiento de agua potable, ubicado en el poblado de 18 de Agosto. Se estima que el valor de la extracción asciende a 0.45 hm³ anuales de los cuales 0.19 hm³ (42.2%) son para la agricultura; 0.14 hm³ (31.1%) para la reserva ecológica Rancho San Bernardino y los .12 hm³ (26.7%) restantes para uso pecuario. Los usos público-urbano y doméstico utilizan valores mínimos de agua.

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. El balance de aguas subterráneas se definió para una superficie de 554 km² que corresponde a la zona donde se localizan los aprovechamientos de agua subterránea.

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 están representadas por la recarga total, las salidas por la descarga total y el cambio de masa por el cambio de almacenamiento:

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

7.1. Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico del acuífero, la recarga total que recibe el acuífero (Rt) ocurre por tres procesos naturales principales: por infiltración de agua de lluvia en el valle, por infiltración de los escurrimientos de los arroyos principales, que en conjunto se consideran como recarga vertical (Rv), y por flujo subterráneo (Eh).

De manera inducida, la infiltración de los excedentes del agua destinada al uso agrícola, que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela; y del agua residual de las descargas urbanas, constituyen otra fuente de recarga al acuífero (Ri). Para este caso, dado que no existen poblaciones urbanas importantes y el riego agrícola es incipiente, para fines del balance se considera que no se presenta la recarga por retornos agrícolas.

7.1.1. Recarga Vertical (Rv)

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

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

Donde:

Rv: Recarga vertical

Eh: Entradas por flujo horizontal

B: Bombeo

Sh: Salidas por flujo horizontal

ETR: Evapotranspiración real en niveles someros

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

De esta manera, despejando la recarga vertical:

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

7.1.2. Entradas por flujo horizontal (Eh)

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del área de estudio 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 tienen su origen en la precipitación pluvial sobre el valle y en la infiltración de los escurrimientos superficiales.

La cuantificación del caudal de agua subterránea que participa como flujo de entrada subterránea horizontal al 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 isólinas 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:

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 5). De acuerdo con la ecuación de Darcy para medios porosos:

$$Q = V \cdot A$$

Considerando una sección, con una longitud (B) y ancho (a), con una diferencia de alturas de (Δh). El área de la sección quedará definida por:

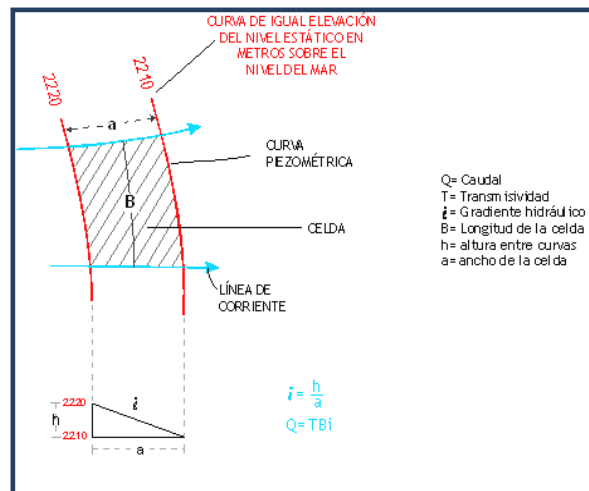
$$A = B \cdot a$$

Mientras que la velocidad será:

$$V = K \cdot i$$

Donde:

K= Coeficiente de permeabilidad o conductividad hidráulica.



i = Gradiente hidráulico ($\Delta h / \Delta L$) Δh y ΔL son la diferencia y distancia respectivamente entre las equipotenciales (h) que conforman el canal de flujo.

Sustituyendo en la ecuación de continuidad:

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

Ya que la transmisividad $T = K \cdot a$, la ecuación queda reducida a:

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

Donde:

T = Transmisividad en m^2/s .

B = Longitud de la celda en m

i = Gradiente Hidráulico, en m

Para el cálculo es necesario conocer el espesor saturado del acuífero (b) y su coeficiente de permeabilidad (K), o bien, el valor de transmisividad (T). Los demás datos se obtienen de la piezometría. Las celdas se trazan a partir de la configuración de elevación del nivel estático y la geología, y se calcula el flujo a través de cada una de ellas.

El coeficiente K , se obtiene a partir de las pruebas de bombeo de las cuales se obtiene el valor de transmisividad (T), que es el producto de la conductividad hidráulica (K) por el espesor saturado:

$$T = K b$$

En el área de balance se generaron 6 celdas de entrada enumeradas desde E1 hasta E6, como se puede observar en la Figura 5. Como resultado del análisis de celdas de flujo la recarga por flujo horizontal es $E_h = 8.4 \text{ hm}^3/\text{año}$, tal como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Cálculo de las entradas por flujo subterráneo

CANAL	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	$h_2 - h_1$	Gradiente i	T	CAUDAL Q (m^3/s)	VOLUMEN ($hm^3/año$)
			(m)		(m^2/s)		
E1	4356	1112	20	0.0180	0.0010	0.0783	2.5
E2	4460	1397	20	0.0143	0.0010	0.0639	2.0
E3	3336	1107	20	0.0181	0.0010	0.0603	1.9
E4	2394	1246	10	0.0080	0.0015	0.0288	0.9
E5	3177	1356	10	0.0074	0.0015	0.0351	1.1
Total entradas							8.4

7.2. Salidas

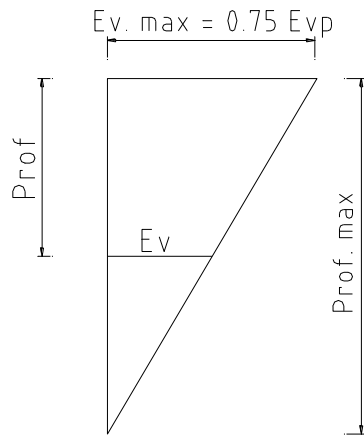
Se trata de los volúmenes de agua, ya sean naturales o extraídos, que pierde el sistema acuífero. Para el Acuífero Arroyo San Bernardino las descargas están representadas por Salidas Horizontales (Sh), bombeo (B) y descarga por evapotranspiración (ETR). En la zona no existen descargas naturales por flujo base ni manantiales.

7.2.1. Evapotranspiración real (ETR)

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

Dado que la lámina de precipitación media anual es del orden de los 369 mm y la temperatura promedio de 25.9 ° C, al aplicar el método empírico de Turc para estimar ETR, su valor resulta mayor que la precipitación media, invalidando el resultado. En general, para climas áridos los métodos empíricos para estimar ETR (Turc, Coutagne, por ejemplo) se invalidan para valores inferiores a los 350 mm anuales, dependiendo del valor de la temperatura media anual. Para el caso particular de este acuífero, la evapotranspiración se presenta en los subálveos de los arroyos San Bernardino y Cajón Bonito, donde existen niveles freáticos someros y vegetación nativa.

De los datos reportados por evaporímetros en la zona de Río San Pedro y Río Santa Cruz, se establece que la evaporación potencial promedio de la zona es de 2120 mm anuales. Si tomamos en cuenta que su valor se determina en un almacenamiento pequeño, usaremos un factor de corrección de 0.75 (Saxton & McGinness, 1982, p. 235). Considerando que en una superficie 26 km² se presentan niveles freáticos someros, con un valor máximo de 4 m de profundidad de extinción, que corresponde en este caso a la profundidad de las raíces de la vegetación nativa y de la profundidad media al nivel estático en la zona de niveles freáticos someros, al considerar la variación que tiene la evaporación con respecto a la profundidad, la evapotranspiración es calculada de la siguiente manera:



$$\frac{Ev}{Ev. \max} = \frac{(Prof. \max - Prof)}{Prof. \max}$$

$$Ev = Ev. \max \left(1 - \frac{Prof}{Prof. \max}\right)$$

$$Vol \text{ Ev} = Ev \text{ (Area)}$$

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

$$ETR = [(0.75) (2.1 \text{ m}) (26 \text{ km}^2)]/4 = 10.2 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

El resultado de aplicar la fórmula anterior, nos da como resultado un valor de evapotranspiración de **10.2 hm³/año**.

7.2.2. Bombeo

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo asciende a **0.5 hm³/año**

7.2.3. Salidas por flujo horizontal (Sh)

Las salidas subterráneas fueron calculadas de la misma manera como se evaluaron las entradas subterráneas, a partir también de la configuración de elevación del nivel estático para 2008 (Figura 5). El Valor estimado es **Sh= 2.8 hm³/año**, calculado en una sección próxima al extremo sur del área de balance; en la confluencia de los arroyos San Bernardino y Cajón Bonito, en las cercanías del poblado Cuhuverachi. El cálculo del flujo de salida se presenta en la tabla 3.

Tabla 3. Cálculo de salidas horizontales

CANAL	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h_2-h_1	Gradiente i	T	CAUDAL Q	VOLUMEN
			(m)		(m ² /s)	(m ³ /s)	(hm ³ /año)
S1	1823	1146	20	0.0175	0.0028	0.0891	2.8
					Total salidas		2.8

7.3. Cambio de almacenamiento

Como se menciona en el apartado de evolución del nivel estático, no se dispone de información piezométrica para elaborar la configuración de la evolución del nivel estático para un periodo de tiempo. Los registros existentes de estudios previos se encuentran dispersos en tiempo y espacio y no cubren en su totalidad la extensión superficial del acuífero. Por otra parte, debido a que el volumen de extracción es menor a la recarga que recibe el acuífero, todavía no se registran alteraciones en la dirección natural del flujo subterráneo ni conos de abatimiento.

Bajo estas consideraciones, se considera que la posición del nivel del agua subterránea no ha sufrido alteraciones importantes y el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo.

Por lo tanto $\Delta V(S) = 0$

Solución a la ecuación de balance

Una vez calculados los valores de las componentes de la ecuación de balance, el único parámetro de los que intervienen y que falta por determinar es la infiltración por lluvia (R_v), por lo que despejando este término de la ecuación definida, se tiene:

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

Sustituyendo valores:

$$R_v = 2.8 + 0.5 + 10.2 - 0.0 - 8.4$$

$$R_v = 5.1 \text{ hm}^3/\text{año}$$

Por lo tanto la recarga total es igual a $R_t = R_v + Eh$

$$R_t = 8.4 + 5.1$$

$$R_t = 13.5 \text{ hm}^3/\text{año}$$

8. DISPONIBILIDAD

Para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas, se aplica el procedimiento establecido por la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000, que establece la Metodología para calcular la disponibilidad media anual de las aguas nacionales, que en la fracción relativa a las aguas subterráneas, menciona que la disponibilidad se determina por medio de la expresión siguiente:

$$DAS = R_t - DNCOM - VCAS \quad (3)$$

Donde:

DAS = Disponibilidad media anual de agua subterránea en una unidad hidrogeológica.

Rt = Recarga total media anual.

DNCOM = Descarga natural comprometida.

VCAS = Volumen de agua subterránea concesionado e inscrito en el REPDA.

8.1. Recarga total media anual (Rt)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (Rt), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero. Para este caso particular, su valor **Rt = 13.5 hm³ anuales.**

8.2. Descarga natural comprometida (DNCOM)

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

Para el caso del Acuífero Arroyo San Bernardino, a pesar de que existe una salida por flujo subterráneo hacia el Acuífero Batevito, ésta fue evaluada en una zona ubicada a aproximadamente 6 km del límite entre ambos acuíferos y no existe infraestructura hidráulica para su aprovechamiento aguas abajo, en el acuífero vecino, por lo cual no se consideró como descarga natural comprometida.

8.3. Volumen concesionado de aguas subterráneas (VCAS)

El volumen anual de extracción, de acuerdo con los títulos de concesión inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), de la Subdirección General de Administración del Agua, con fecha de corte al **31 de marzo del 2009, es de 8'860,239 m³/año.**

8.4. Disponibilidad de aguas subterráneas (DAS)

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 Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000, se obtiene de restar al volumen de recarga total media

anual, el valor de la descarga natural comprometida y el volumen de aguas subterráneas concesionado e inscrito en el REPDA.

De acuerdo a la expresión (3), se tiene que:

$$DAS = 13.5 - 0.0 - 8.860239$$

$$DAS = 4.639,761 \text{ hm}^3/\text{año}$$

La cifra indica que existe un volumen disponible de **4'639,761 m³ anuales** para otorgar nuevas concesiones.

Cabe hacer la aclaración de que el cálculo de la recarga media anual que recibe el acuífero, y por lo tanto de la disponibilidad, se refiere a la porción del acuífero granular en la que existen aprovechamientos del agua subterránea e información hidrogeológica para su evaluación. No se descarta la posibilidad de que su valor sea mayor. Sin embargo, no es posible en este momento incluir en el balance los volúmenes de agua que circulan a mayores profundidades que las que actualmente se encuentran en explotación, ni en las rocas fracturadas que subyacen a los depósitos granulares. Conforme se genere mayor y mejor información, especialmente la que se refiere a la piezometría y pruebas de bombeo en pozos cercanos a los piedemonte, se podrá hacer una evaluación posterior.

9. REFERENCIAS

Comisión Nacional del Agua, 2005. *“Atlas de aguas subterráneas y red de monitoreo piezométrico del Estado de Sonora (2005)”*, realizado por la Universidad de Sonora.

Comisión Nacional del Agua-Servicio Geológico Mexicano, convenio de cooperación, 2008. *Actualización Hidrogeológica de los Acuíferos de la Cuenca Alta del Río Yaqui, Mátape, Estado de Sonora”*.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2007. Estudio hidrológico del estado de Sonora. Aguascalientes, Ags. p. 57-62.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2007. Síntesis de información geográfica estado de Sonora. Aguascalientes, Ags.

RAMMADSA, de Agua Prieta, Sonora, 2007. *“Estudio regional de evaluación hidrogeológica del acuífero Agua Prieta, Municipio de Agua Prieta, Sonora”* realizado por la empresa Investigación y Desarrollo de Acuíferos y Ambiente.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), 1980. *“Informe del Estudio Geohidrológico Preliminar en el área de Nogales-Agua Prieta, en el Estado de Sonora (1980)”*, realizado por la empresa Geoexploraciones y Construcciones, S.A.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, 1983. *“Informe Preliminar de los Servicios de Prospección Geohidrológica en la zona de San Bernardino en el Estado de Sonora (1983)”*, realizado por la empresa: Geólogos Consultores, S.A.

Servicio Geológico Mexicano, en convenio con Comisión Nacional del Agua, 2008. Actualización Hidrogeológica de los Acuíferos del Río Yaqui, Mátape, Sonora. Hermosillo, Sonora.