

Vega-Granillo, E.L.; Cirett-Galán, Samantha; De la Parra-Velasco, M.L.; y Zavala-Juárez, Raúl, 2011, Hidrogeología de Sonora, México, *in* Calmus, Thierry, ed., Panorama de la geología de Sonora, México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Boletín 118, cap. 8, p. 267–298, 12 figs., 2 tablas.

Capítulo 8

HIDROGEOLOGÍA DE SONORA, MÉXICO

*Eva Lourdes Vega-Granillo**,
*Samantha Cirett-Galán**,
*María Luisa de la Parra-Velasco** y
*Raúl Zavala-Juárez**

RESUMEN

El estado de Sonora se ubica en una franja que incluye a los grandes desiertos del mundo, la cual se caracteriza por cambios climáticos extremos, con valores altos de temperatura y evaporación y bajos de precipitación, escurrimiento e infiltración. La precipitación promedio anual en Sonora es de 336 mm, que resulta muy baja comparada con las de Tabasco (2,318 mm), Chiapas (2,093 mm) y Campeche (1,641 mm) en el sureste de México. Adicionalmente, si se compara la lámina anual precipitada con la evaporada de 2,254 mm, se tienen por tanto, escurrimientos mínimos, por lo que la mayoría de los ríos y arroyos permanecen secos durante gran parte del año. El producto de la lámina anual por la superficie del Estado, da un volumen precipitado de 64,894 Mm³ (millones de metros cúbicos), del cual se evaporan 58,095 Mm³ (89.52%), escurren 4,444 Mm³ (6.85%) y se infiltran para recargar los acuíferos 2,355 Mm³ (3.63%).

La escasez de agua superficial en Sonora provoca que el recurso subterráneo sea la principal fuente de suministro. En la actualidad, debido a un manejo no sustentable, los acuíferos ubicados a lo largo de la costa se encuentran en estado de sobreexplotación y con problemas de intrusión salina.

Del balance entre descarga y recarga se concluye que de los 15 acuíferos estudiados por la Comisión Nacional del Agua, 11 de ellos presentan déficit de agua, siendo los más afectados los de la Costa de Hermosillo, Valle del Mayo y Río Sonora. Los acuíferos bajo los ríos Yaqui, Cocoraque, Fronteras y Moctezuma, aun tienen agua subterránea disponible.

Se ha determinado que los contaminantes principales del agua subterránea son desechos industriales, agrícolas, mineros e intrusión salina. Entre los contaminantes detectados se encuentra arsénico, bario, manganeso, compuestos nitrogenados, plaguicidas y sales.

Palabras clave: Hidrogeología, Sonora, México.

* Universidad de Sonora, Departamento de Geología, Rosales y Blvd. Luis Encinas,
Hermosillo, Sonora 83000.
E-mail: (lvega@geologia.uson.mx)

ABSTRACT

The state of Sonora is located along a strip that includes the great deserts of the world, which is characterized by extreme climate changes, with high values of temperature and evaporation and low rates of rainfall, runoff and infiltration. The average annual precipitation of Sonora is 336 mm, which is very low compared with those in Tabasco (2,318 mm), Chiapas (2,093 mm) and Campeche (1,641 mm) of southeastern Mexico. Considering that in Sonora the annual evaporation amount is about 2,254 mm, the runoff is virtually minimal, therefore the majority of the rivers and streams remain dry most of the year. Based on the surface of Sonora, the precipitation volume is 64,894 Mm³ (millions of cubic meters), from which 58,095 Mm³ (89.52%) evaporate, 4,444 Mm³ (6.85%) drain off and 2,355 Mm³ (3.63%) infiltrate to recharge aquifers

The scarcity of surface water in Sonora causes that the underground resource is the main source of supply. At present, due to unsustainable management, aquifers located along the coast are in a state of overexploitation and present saline invasion problems.

From the groundwater balance between discharge and recharge it can be concluded that from the 15 aquifers studied by the Comisión Nacional del Agua (National Water Commission), 11 have water deficit, being the most affected those of the Costa de Hermosillo, Valle del Mayo and Rio Sonora. The aquifers below the Yaqui, Cocoraque, Fronteras, and Moctezuma rivers, still have groundwater available.

Major pollutants of the groundwater are industrial, agricultural and mining waste, along with saline intrusion. Among the contaminants detected are arsenic, barium, manganese, nitrogen compounds, pesticides and salts.

Keywords: Hydrogeology, Sonora, México.

INTRODUCCIÓN

El estado de Sonora comprende varias zonas hidrogeológicas, que varían desde el desierto al NW hasta las regiones montañosas en la porción oriental del Estado. Los principales ríos, el Yaqui y el Sonora, presentan direcciones de flujo de N a S, modificando su curso en la porción central del Estado, hacia el Golfo de California al poniente. El río más caudaloso, el Yaqui, que con sus tributarios (Aros, Bavispe, Fronteras y Moctezuma) se ubica en la provincia hidrogeológica de la Sierra Madre Occidental, tiene una longitud de 680 km y la cuenca hidrológica donde se ubica, aporta el 82% del escurrimiento en Sonora. Otros ríos de menor caudal son los fronterizos: Colorado, Santa Cruz y San Pedro y los ríos Concepción, Sonora, Mátape y Mayo, que nacen en las provincias hidrogeológicas Cuencas Aluviales del Norte y Sierra Madre Occidental y vierten sus aguas hacia el Golfo de California, siendo la mayoría captadas por presas. Las presas con mayor capacidad

de almacenamiento, que son hidroeléctricas y se usan para riego agrícola, son la Lázaro Cárdenas, Plutarco Elías Calles y Álvaro Obregón, que se localizan sobre el río Yaqui y se utilizan para riego agrícola y generar energía eléctrica (Figura 1).

El clima refleja las condiciones atmosféricas promedio más representativas a lo largo del tiempo y se expresa generalmente en términos de lluvia y temperatura. En Sonora, el clima varía de muy seco (San Luis Río Colorado, Caborca) a seco (Hermosillo, Cd. Obregón) en la zona costera, de seco a semiseco en la región intermontana y fronteriza (Sahuaripa, Nogales) y de subhúmedo a templado en las partes altas montañosas (Yécora) (INEGI, 2000). La época más cálida en Sonora es del 15 de junio al 15 de julio y la más fría del 15 de diciembre al 15 de enero. En un análisis climatológico del Estado (1968-2002), se reporta que 1984 fue el año más lluvioso con 581.5 mm y 1998 el menos lluvioso, con 242.5 mm. Un factor favorable para las precipitaciones, son los ciclones tropicales que ingre-

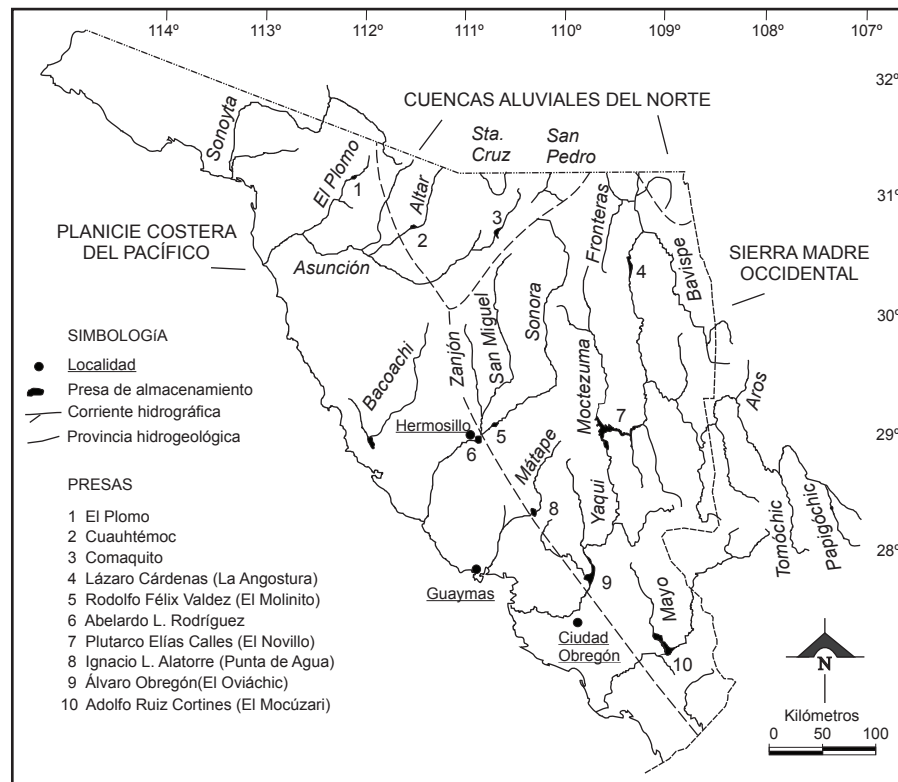


Figura 1. Ríos y provincias hidrogeológicas de Sonora.

san a Sonora provenientes del Pacífico oriental y que se presentan de agosto a octubre. La distribución histórica (1949-2004) señala 24 ciclones, que equivale a 1 ciclón cada 2.33 años. Las temperaturas en el Estado, en ocasiones son extremas, como la máxima registrada en Hermosillo de 48.5°C en julio de 1998, y la mínima de -3.0°C en enero de 1971 (Barrón-Félix, 2005).

La observación, vigilancia y medición constante de las condiciones atmosféricas está a cargo del Servicio Meteorológico Nacional, que en Sonora cuenta con alrededor de 150 estaciones climatológicas, cinco observatorios, una radiosonda y un radar. Para el presente estudio, fueron seleccionadas 11 estaciones climatológicas por su distribución a lo largo del Estado, analizando los datos existentes de los años de 1980 a 2004 (Tabla 1).

La precipitación media anual en Sonora es de 336 mm (1980–2004), en un rango de 70 a 500 mm (Tabla 1). Las lluvias más abundantes ocurren durante el verano, en los meses de julio a septiembre, en tanto que las menos copiosas, generalmente se presentan en mayo (Figura 2). En las estaciones analizadas, la distribución

estacional de las lluvias fue de: EFM = 15%, AMJ = 5%, JAS = 58% y OND = 22%. En el periodo analizado, se reportó una precipitación máxima de 789.9 mm (2000) en la estación Bacanuchi, mientras que la mínima fue de 31.2 mm (2001) en la estación Agua Prieta.

El mapa de isoyetas muestra que los menores volúmenes precipitados ocurren en patrones paralelos a la planicie costera del Golfo de California y se van incrementando hacia la zona montañosa de la Sierra Madre Occidental, en la porción oriental del Estado (Figura 3).

Considerando los datos de las estaciones, se obtuvo una temperatura promedio anual de 21°C en Sonora (Tabla 1). Los extremos históricos (1980–2004) muestran que la temperatura máxima fue de 48.0°C registrada en las estaciones Caborca (junio, 1981) y Palo Verde (junio, 1980) y la mínima de -10.0°C, captada por el termómetro de la estación Nogales (diciembre, 1987). La temperatura es un factor que influye sobre la evaporación y la precipitación. La evaporación potencial en las estaciones analizadas, puede ser hasta seis veces mayor que la precipitación (Tabla 1), calculándose el promedio anual en el Estado en 2,254 mm. El patrón de compor-

Tabla 1. Registro meteorológico de las estaciones.

NOMBRE DE LA ESTACIÓN	COORDENADAS		AÑOS DE REGISTRO	PRECIPITACIÓN	TEMPERATURA	EVAPORACIÓN
	GEOGRÁFICAS			(PROMEDIO ANUAL)		
	X	Y		(mm)	(°C)	(mm)
Agua Prieta	636366	3467246	80-04	377	18	2165
Bacadéhuachi	665970	3293986	80-04	487	20	1849
Bacanuchi	523958	3388442	80-02	494	18	1791
Caborca	389368	3398524	80-04	310	22	2421
El Carrizal	428612	3218182	80-00	161	22	2678
El Orégano	527535	3233694	80-01	411	23	1763
Navojoa	653684	2996444	80-04	441	24	2536
Nogales	504757	3466360	87-04	486	18	1895
Palo Verde	462916	3185712	82-04	230	23	2599
Pto. Peñasco	257285	3465472	86-04	74	23	2319
Sonoyta	324988	3526962	80-04	220	22	2774
PROMEDIO				336	21	2254

CONAGUA (2006)

tamiento de la evaporación, sin embargo, ocurre en sentido contrario al de la lluvia, evaporándose los mayores volúmenes en la planicie costera del Golfo de California y los menores hacia las partes topográficamente altas del Estado, en la Sierra Madre Occidental (Figura 4).

Los datos de precipitación, temperatura y evaporación muestran que la región está caracterizada por cambios climáticos extremos, típicos de la franja donde se ubican los grandes desiertos del mundo.

El desarrollo del estado de Sonora requiere agua para todas sus actividades. Es evidente que se usarán en primer término, los recursos superficiales que, sin embargo, no se han manejado adecuadamente, ya que existe preocupación porque no llueve, pero cuando sucede, no se toman medidas para retener el recurso, cosechar o reusar el agua.

La escasez de agua superficial y su contaminación hace que el recurso subterráneo cobre gran importancia. Por ello, en este artículo, se describe de manera sucinta los acuíferos, así como su ubicación en las regiones hidrológicas (superficie) y en las provincias hidrogeológicas (subsuelo). Se ha tratado de incluir la

información más reciente de los principales acuíferos de Sonora, dividida por temas que incluyen: hidrología superficial, hidrogeología, parámetros hidrogeológicos, y disponibilidad y calidad de agua.

REGIONES HIDROLÓGICAS Y PROVINCIAS HIDROGEOLÓGICAS

México se ha dividido en 37 regiones hidrológicas que contienen cuencas cuyas aguas drenan hacia las vertientes occidental, oriental e interior. Estas regiones han sido agrupadas por la Comisión Nacional del Agua en 13 regiones hidrológico-administrativas, formadas por agrupaciones de cuencas que respetan los límites municipales, para facilitar la integración de información socioeconómica (CONAGUA, 2010).

Sonora se ubica en la Región II Noroeste, que comprende cinco regiones hidrológicas: RH-7, 8, 9, 10 y 34 (Figura 5), siendo las cuatro primeras cuencas exorreicas de la vertiente occidental que drenan sus aguas hacia el Golfo de California, y la última es una pequeña parte de una cuenca endorreica de la vertiente interior, que drena hacia el estado de Chihuahua.

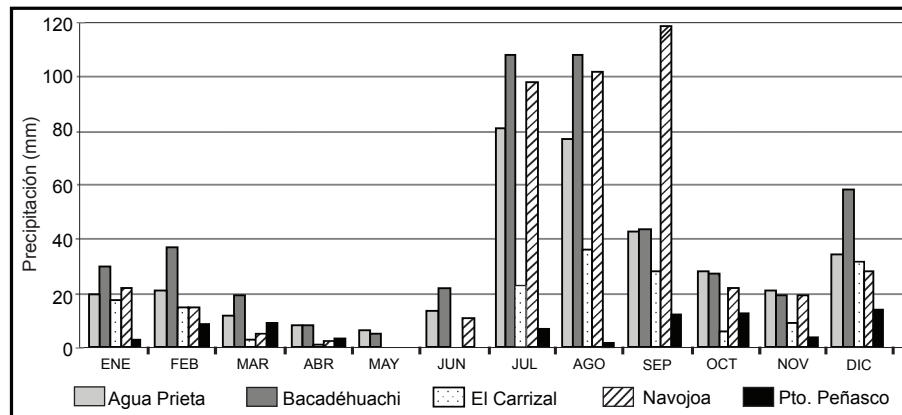


Figura 2. Precipitación promedio mensual (mm).

La región más importante es la RH-9 Sonora Sur, ya que tiene un área de 117,363 km² y aporta el 76% del volumen total precipitado al año, así como el 82% del escurrimiento total registrado en el Estado. Por otra parte, la RH-8 Sonora Norte recibe el 17% de la precipitación anual del Estado; sin embargo, el escurrimiento es mayor en la RH-10 Sinaloa, que representa el 9.6% del total anual (Tabla 2).

A diferencia de las provincias fisiográficas, en cuya formación influyen la tectónica, las estructuras, la litología, la erosión y la sedimentación, la clasificación de provincias hidrogeológicas se debe no sólo a la fisiografía y homogeneidad geológico-estructural, sino a propiedades hidráulicas de los materiales, como la capacidad de transmitir (permeabilidad, conductividad hidráulica, transmisividad) y almacenar (coeficiente de almacenamiento, porosidad, rendimiento específico) un fluido.

Velázquez-Aguirre y Ordaz-Ayala (1993-1994) propusieron 11 provincias hidrogeológicas para México, de las cuales tres se ubican en Sonora: Planicie Costera del Pacífico, Sierra Madre Occidental y Cuencas Aluviales del Norte; su límite aproximado se muestra en algunas figuras. A continuación se describe brevemente cada una de ellas.

PLANICIE COSTERA DEL PACÍFICO

Esta provincia tiene un área total de 104,491 km², cubriendo alrededor del 46% del estado de Sonora. Comprende la parte occidental de los estados de Sonora, Sinaloa y Nayarit. Limita al N con los EUA, al S y

W con el Océano Pacífico, y al E con la Sierra Madre Occidental. En Sonora incluye parte de las provincias fisiográficas Llanura Sonorense y Llanura Costera del Pacífico. Las elevaciones topográficas van desde el nivel del mar hasta los 1,190 msnm en la Sierra del Pinacate, en la porción noroeste del Estado.

Esta provincia tiene forma alargada y contiene planicies costeras formadas por sedimentos arenosos que se introducen al continente, los cuales sobreyacen a rocas intrusivas y metamórficas del Mesozoico y a rocas volcánicas del Cenozoico. Los sedimentos provienen de los ríos que bajan de la Sierra Madre Occidental hacia el Golfo de California. Estos ríos formaron deltas en la costa, siendo los más grandes los de los ríos Yaqui y Fuerte hacia el N y el del Río Grande de Santiago hacia el S.

Los acuíferos más importantes de Sonora se asocian precisamente a estos deltas cercanos a los litorales. Los mayores espesores se ubican en sedimentos continentales y marinos, intercalados con derrames basálticos, con buena porosidad y permeabilidad. Subyaciendo a los acuíferos aluviales, se encuentra la Formación Báucarit, constituida por conglomerados de origen continental, con una permeabilidad de media a baja, disminuida por el contenido de arcillas compactas.

La transmisividad de los acuíferos varía de 0.00011574 a 0.0011574 m²/s, su conductividad hidráulica de 5.78 X 10⁻⁵ a 0.0011574 m/s, su lámina de recarga de 5-50 mm/a y su producción o gasto por pozo, de 5-150 L/s. Los niveles estáticos están a más de 100 m de profundidad (Velázquez-Aguirre y Ordaz-Ayala, 1991-1994).

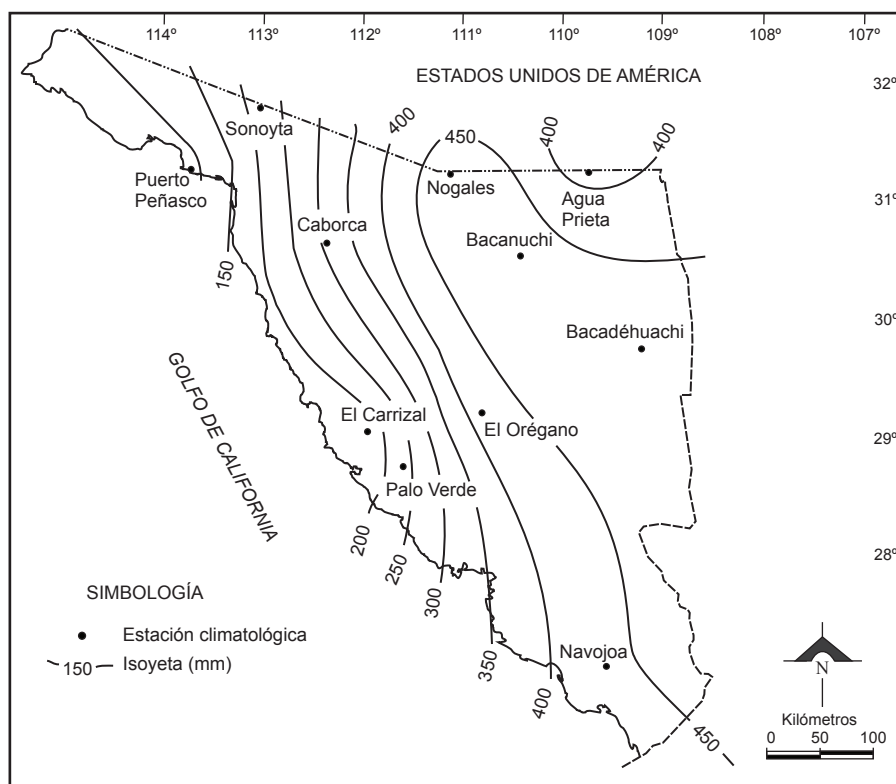


Figura 3. Precipitación promedio anual (mm).

SIERRA MADRE OCCIDENTAL

Esta provincia cubre cerca de 358,845 km² del territorio nacional, ocupando el 45% del Estado; recibe el mismo nombre de la provincia fisiográfica en la cual se halla. La Sierra Madre Occidental se localiza casi enteramente en México, pero comparte una pequeña parte con los EUA. Tiene una orientación general NW-SE y termina en las cercanías del Eje Neovolcánico. Se caracteriza por cañones y elevadas mesetas formadas por la extrusión a gran escala de material volcánico del Paleógeno y parte inferior del Neógeno, con espesores hasta de 1,800 m, que se depositaron sobre rocas sedimentarias más antiguas. Las mayores elevaciones en Sonora llegan hasta los 2,620 msnm y van disminuyendo gradualmente hacia las planicies costeras al poniente.

Los ríos descargan hacia el Golfo de California y son perennes (río Yaqui) o intermitentes (ríos Sonora, Mátape y Mayo). Sus cauces se originan en esta provincia y tienen una orientación general N-S pero, al salir de ella para dirigirse al mar, giran hacia el SW debido a las estructuras tectónicas que han afectado a la región.

Los mayores volúmenes de precipitación en el Estado se registran en esta provincia pero, debido a la baja permeabilidad de las rocas que afloran a lo largo de los cauces y al poco espesor de los acuíferos de la región, un gran volumen escurre hacia las partes bajas, recargando los acuíferos adyacentes de la Provincia Costera del Pacífico, como son los de la Costa de Hermosillo, Guaymas, Yaqui y Mayo. Por tanto, es poca la explotación del agua del subsuelo en la provincia de la Sierra Madre Occidental, utilizándose en pequeños poblados y actividades agrícolas y ganaderas de pequeña escala.

Los más grandes volúmenes de escurrimiento en Sonora también se registran en esta provincia y drenan hacia el Golfo de California. Los principales ríos son el Yaqui, con un volumen de escurrimiento de 2,404 Mm³/a; el Mayo con 863 Mm³/a; y el Sonora con 204 Mm³/a (INEGI, 2000).

Acerca de las características hidráulicas de los principales acuíferos de esta provincia, se tienen transmisividades que varían de 0.0011574 a 0.11574 m²/s, conductividades hidráulicas de 0.00011574 a 0.00578

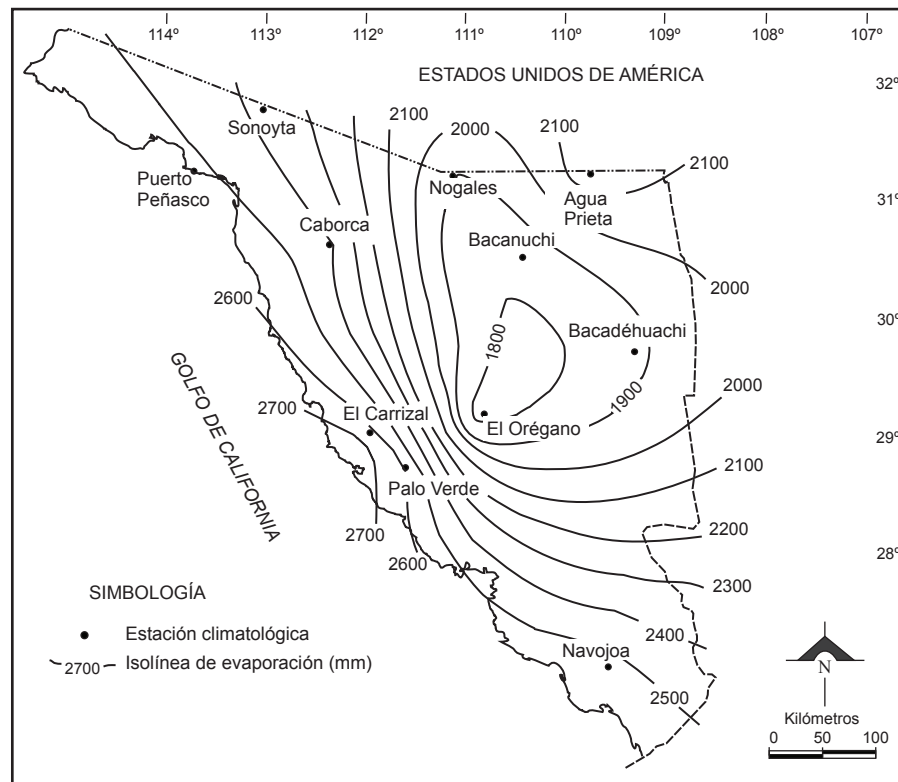


Figura 4. Evaporación promedio anual (mm).

m/s, láminas de recarga de 10–100 mm/a y producción por pozo de 5–50 L/s (Velázquez-Aguirre y Ordaz-Ayala, 1993–1994).

CUENCAS ALUVIALES DEL NORTE

Esta provincia hidrogeológica cubre aproximadamente el 9% del territorio sonorense, siendo su área total en el territorio nacional de 205,000 km². La provincia fisiográfica correspondiente es la de Sierras y Llanuras del Norte que también se encuentra en EUA. Esta provincia consiste en extensos valles aluviales (principalmente de conglomerados), relativamente planos, separados por sierras alargadas y discontinuas (rocas sedimentarias paleozoicas y mesozoicas y volcánicas cenozoicas). La fisiografía de cuencas con planicies aluviales extensas es producto del rápido hundimiento de las rocas preexistentes durante el Paleógeno tardío y Neógeno. La orientación de las sierras es N-NW y divide el área en varias cuencas, regadas por los ríos Santa Cruz, San Pedro, Fronteras y algunos afluentes del Río Bavispe.

La lluvia en la zona se relaciona con la altitud del terreno. Los volúmenes precipitados son rápidamente infiltrados en el suelo, por lo que no forman corrientes superficiales con gastos importantes, encontrándose el agua sólo cuando llueve y en ciertos tramos de los ríos.

Los acuíferos se encuentran en grabens rellenos de sedimentos del Cenozoico, a veces de tipo libre o confinado por la intercalación de rocas volcánicas, cuyos espesores varían de 300 a 2,000 m. En esta provincia, se han encontrado depósitos evaporíticos (yeso, anhidrita, halita) asociados a cuencas cerradas y a la facies de sedimentos finos.

Los valores de recarga y descarga son pequeños y, al igual que en los acuíferos de la Sierra Madre Occidental, la precipitación tiene una rápida influencia en los acuíferos, que se refleja en el incremento de los niveles de agua en los pozos.

Los valores hidráulicos incluyen transmisividades que van de los 0.0001157 a los 0.023 m²/s, conductividades hidráulicas de 0.00011574 a 0.002314 m/s, láminas de recarga de 5-50 mm/a y producciones por pozo de 10-150 L/s.

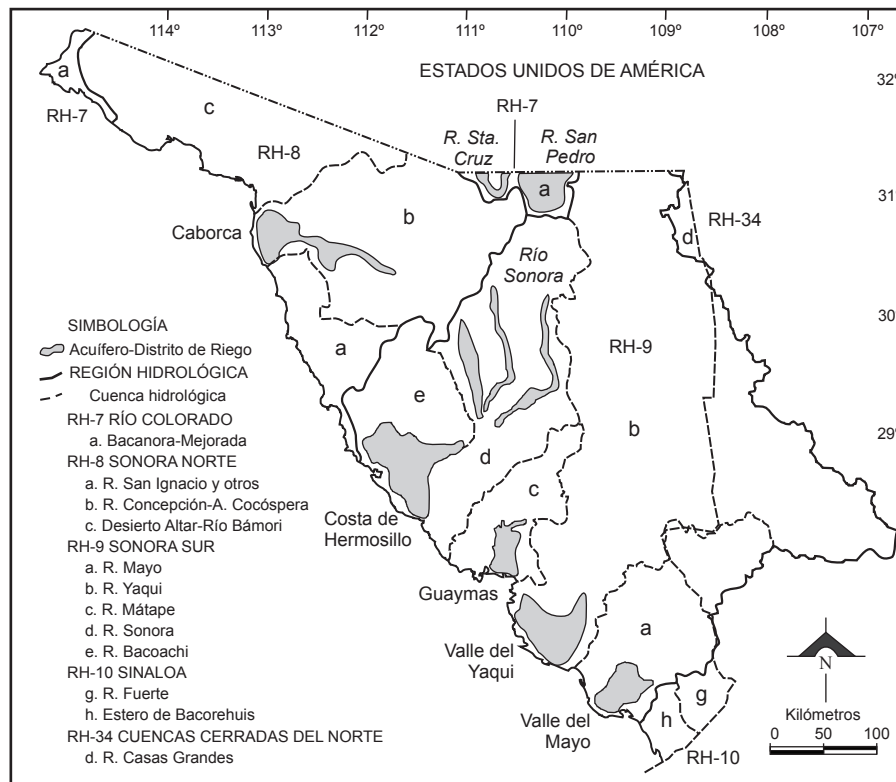


Figura 5. Regiones hidrológicas, cuencas hidrológicas y acuíferos.

ACUÍFEROS DE SONORA

Los acuíferos se clasifican en granulares, de grietas o cársticos, estando la mayoría de las investigaciones hidrogeológicas enfocadas a los primeros, debido a su elevado grado de isotropía y homogeneidad. Los acuíferos granulares (de poros, aluviales, o no consolidados) se forman a partir de material depositado por procesos físicos en el cauce de un río o en una planicie de inundación.

En el estado de Sonora, la CNA (2005a) tiene clasificados 60 acuíferos que, de acuerdo con su localización geográfica, 17 son costeros, 10 fronterizos y el resto intermontanos. Los acuíferos de los valles de San Luis Río Colorado, Los Vidrios y Sonoyta-Puerto Peñasco son, al mismo tiempo, costeros y fronterizos (Figura 6).

Los acuíferos más importantes del Estado, en cuanto a extensión y disponibilidad de agua, están en la Planicie Costera del Pacífico; sin embargo, debido a la gran explotación a que han sido sometidos, se encuentran sobreexplotados y con intrusión salina, como

los de Caborca, Costa de Hermosillo, Valle de Guaymas y San José de Guaymas. Los acuíferos fronterizos ubicados en la provincia Cuencas Aluviales del Norte, aunque no suministran grandes volúmenes de agua, cobran importancia debido a que su uso y manejo debe realizarse de común acuerdo entre México y EUA. Por último, los acuíferos ubicados en la Sierra Madre Occidental, aunque de menor escala, son vitales para el desarrollo pecuario y agrícola de las poblaciones serranas.

CABORCA

Hidrología superficial

El acuífero de Caborca (CA) donde se desarrolla el Distrito de Riego 037 Altar-Pitiquito-Caborca, se ubica al noroeste del estado de Sonora en la cuenca del Río Concepción, en la RH-8 Sonora Norte y tiene un área de 1,932 km² (Figura 5). La precipitación media anual es menor que los 150 mm y la evaporación promedio anual supera los 2,000 mm (Herrera *et al.*, 2002).

Tabla 2. Volúmenes de lluvia y escurrimiento por regiones

REGIÓN HIDROLÓGICA	ÁREA (km ²)	VOLUMEN PRECIPITADO ANUAL (x10 ³ m ³)	VOLUMEN ESCURRIDO ANUAL (x10 ³ m ³)
RH-7	4,767	1,435	103
RH-8	54,857	11,255	227
RH-9	117,363	49,421	3,661
RH-10	4,150	2,385	430
RH-34	915	398	23
TOTAL	182,052	64,894	4,444

INEGI (2000)

Hidrogeología

Las rocas que afloran en la cuenca varían en edad del Mesozoico al Cenozoico. Las rocas mesozoicas tienen una amplia distribución y consisten en rocas ígneas (granodiorita, granito, diorita, monzonita y volcánicas metamorfozadas), sedimentarias (conglomerado, arenisca y brecha) y metamórficas. Las rocas cenozoicas son ígneas extrusivas de composición ácida y básica, que varían del Paleógeno-Neógeno al Cuaternario (derrames basálticos, depósitos aluviales, fluviales y suelos residuales).

Las sierras que rodean al acuífero, están formadas por rocas ígneas intrusivas y sedimentarias impermeables del Mesozoico. Al pie de las sierras, se encuentran depósitos de talud formados por clásticos gruesos (arena cuarzosa procedente de rocas intrusivas) que favorecen la infiltración del agua de lluvia hacia la planicie aluvial o valle.

El aluvión cuaternario constituye el acuífero granular de tipo libre, cuyas fronteras impermeables son las sierras formadas por rocas ígneas y metamórficas. Este aluvión tiene el espesor mayor en el centro del área y el menor en el norte y sur de la cuenca donde, además, contiene un gran porcentaje de arcilla derivada de sedimentos tobáceos que disminuyen su permeabilidad (Ojeda-De la Cruz, 1994).

Parámetros hidrogeológicos

La transmisividad varía de 0.008258 m²/s en la zona poniente a 0.0117 m²/s en la zona central. El coeficien-

te de almacenamiento fue calculado en 0.00378 para el poniente y en 0.0023 para el centro (TMI, 1975 in Ojeda-De la Cruz, 1994).

Disponibilidad de agua

Diversos valores de recarga han sido estimados para este acuífero: 370 Mm³/a (Montgomery Watson, 1997 in Moreno-Vázquez, 2000), 490 Mm³/a (INEGI, 2000) y de 379 Mm³/a, calculados a través del Modflow, cuya procedencia es 87 Mm³ de flujo horizontal, 31 Mm³ de flujo vertical y 261 Mm³ de aguas de retorno agrícola (Herrera *et al.*, 2002).

En el año 1999, el volumen de extracción se realizaba a través de 887 pozos, siendo éste de 660.10 Mm³/a, del cual, 648.70 Mm³ se empleaban para uso agrícola, 9.80 Mm³ para uso público, 1.50 Mm³ para uso doméstico y 0.10 Mm³ para uso industrial (Reyes-Martínez y Quintero-Soto, 2009).

De acuerdo con Herrera *et al.* (2002), un volumen anual promedio de extracción de 500 Mm³ fue usado para regar superficies agrícolas de 65,000 ha (1970) a 30,000 ha (2001), a través de 832 pozos. Debido a que las extracciones han sido mayores que los volúmenes de recarga, la condición del acuífero es de sobreexplotación.

La profundidad promedio de los niveles estáticos ha variado de 43 m en 1970 a 67 m en 2001. Sin embargo, en el año 2001 se registraron profundidades estáticas mayores que 120 m y dinámicas mayores que 140 m (Herrera *et al.*, 2002). El mapa de elevación de niveles estáticos elaborado con datos de CONAGUA

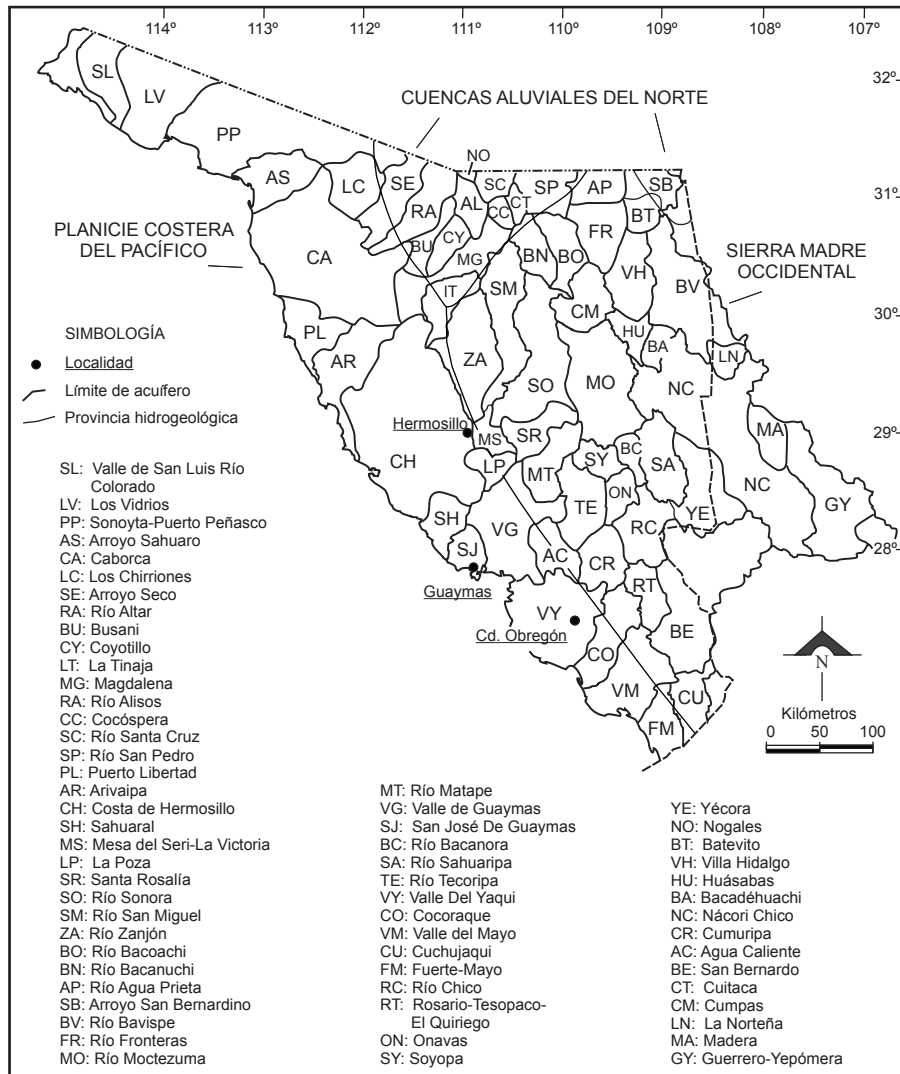


Figura 6. Acuíferos y provincias hidrogeológicas de Sonora.

(2006) muestra un flujo normal hacia el mar, aunque en la línea de costa el gradiente hidráulico está invertido, formándose un cono de abatimiento con valores negativos hasta de -35 mbnm (Figura 7).

Calidad del agua

Celaya (2005) menciona que las aguas de los municipios de Caborca y Pitiquito presentan dureza y salinidad. La Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL, 1994) analizó metales pesados (Fe, Cu, Cd, Mn, Pb, Cr, Zn y As) en dos pozos de la cuenca del río Concepción, encontrando en la estación Caborca agua subterránea de calidad aceptable para consumo humano, excepto

para los valores de plomo que exceden la Norma Oficial Mexicana (NOM, 1994).

Moreno-Vázquez (1995) menciona que, en 1989, Caborca descargaba un volumen de $3.5 \text{ Mm}^3/\text{a}$ de aguas negras, con un volumen de contaminante de $2,566 \text{ kg/d}$ DBO (demanda bioquímica de oxígeno) por $47,520$ habitantes. Este contaminante orgánico es vertido a las tierras agrícolas sin ningún tratamiento, aunque en Caborca existen lagunas de oxidación, pero que no operan de manera eficiente o total (SEDESOL, 1994).

Las aguas residuales producidas por la agricultura del Distrito Caborca no alcanzan a llegar al mar, por lo que se infiltran al subsuelo con su carga de plaguicidas, afectando los acuíferos. La contaminación por agroquí-

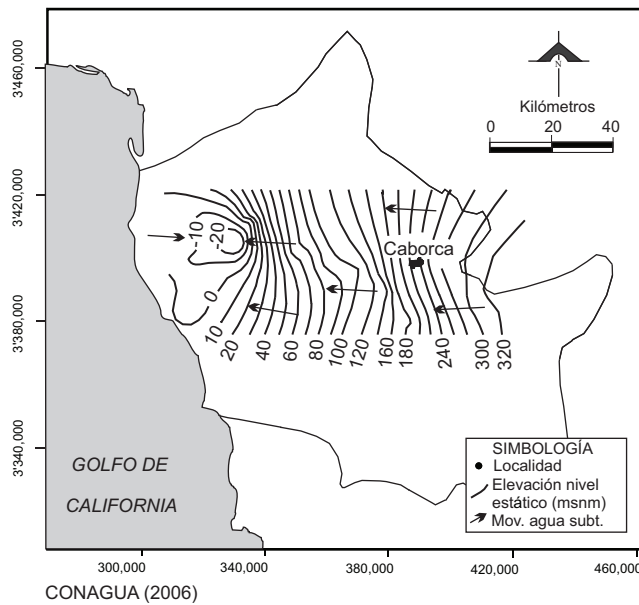


Figura 7. Mapa piezométrico del acuífero de Caborca en el año 2006.

micos (compuestos organofosforados y piretroides en menor escala) fue de 15,218 kg/a en el distrito de riego de Caborca, aunque no se conoce qué cantidad escurre o se infiltra en la cuenca. Otra fuente potencial de aguas residuales es la industria porcícola, produciéndose el 92% de la contaminación del Estado en Hermosillo, Cajeme, Navojoa, Huatabampo, Etchojoa, Bácum y Caborca (Moreno-Vázquez, 1995). En la operación del rastro municipal de Caborca, se descargan aguas residuales de manera directa a la cuenca del río Asunción (SEDESOL, 1994).

Espinoza-Ojeda (2003) tomó muestras de 23 pozos (siete agrícolas y 16 para uso doméstico) con profundidades que varían de 30 a los 372 m, así como muestras de orina de habitantes de la ciudad de Caborca, las cuales analizó por As, Ba, Cd, Cu, Fe, Mn, Mo, Pb, Sr, V, Zn, encontrando concentraciones por debajo de los límites establecidos por la NOM (1994), excepto en ocho pozos, cuatro de los cuales son para uso doméstico y contienen >0.010 mg/L As. La concentración de As es mayor en orina que en el agua de los pozos, siendo los valores promedio de 0.08115 mg/L. El mismo autor concluye que el As no aumenta con la profundidad y que los problemas de salud detectados, como fluorosis, diabetes e hipertensión, no se pueden relacionar con el As, que se presenta de manera incipiente en el agua potable. Advierte que los citados elementos

pueden llegar a la población al consumir cultivos regados con agua contaminada, por lo que recomienda la reubicación de pozos.

Recientemente, Celaya (2005) menciona problemas de dureza y salinidad en los municipios de Caborca y Pitiquito y de flúor en Tubutama. Propone buscar alternativas tecnológicas para mejorar la calidad del agua, capacitar a los organismos operadores, hacer análisis en campo, mejorar las fuentes de abastecimiento, elaborar proyectos para encontrar nuevas fuentes y tratar las aguas residuales.

COSTA DE HERMOSILLO

Hidrología superficial

El Distrito de Riego 071 Costa de Hermosillo (CH) se ubica en la parte central de la costa del Estado, en la porción baja de la cuenca del río Sonora, en la RH-9 Sonora Sur y tiene un área aproximada de 2,833 km² (Figura 5). Su precipitación varía de 75 a 200 mm, y las temperaturas medias anuales se encuentran entre 22 y 24°C (UNISON, 2000).

Hidrogeología

En este acuífero se determinaron cuatro unidades geohidrológicas y el basamento: (1) Unidad superior, con profundidad variable hasta de 340 m, que consiste en sedimentos de ambiente fluvial, no consolidados (arena, grava y arcilla escasa de color café). (2) Unidad media A, con espesor de 200 a 560 m, que consiste en sedimentos no consolidados (limo, arcilla gris y azul, arena con horizontes arcillo-arenosos con fósiles marinos); a esta unidad se le llama "arcilla azul", se le asigna al Mioceno superior y posiblemente corresponda a sedimentos lacustres continentales. (3) Unidad media B, de 200 m de espesor, que consiste en sedimentos no consolidados a semiconsolidados (arena, grava, arcilla), y que se encuentra solamente al E de Siete Cerros. (4) Unidad inferior, con un espesor aproximado de 624 m, que es la unidad estratificada más profunda que se ha encontrado (arena, grava y arcilla semiconsolidadas con algunas intercalaciones de basalto y riolita) habiéndose sólo hallado en un pozo perforado en el área; en el

subsuelo, se halla sobre el basamento granítico, y en la superficie la unidad posiblemente corresponda a partes de unidades vulcanosedimentarias miocénicas y más jóvenes o a la Formación Báucarit. Por su parte, el basamento se ha hallado a diferentes profundidades, hasta de 1,182 m, consistiendo en granito y granodiorita del Cretácico Superior y en toba andesítica, toba riolítica y derrames de riolita del Paleógeno (UNISON, 2001).

Estudios recientes consideran un solo acuífero, de tipo libre, producto de la infiltración de los ríos Bacoachi y Sonora. Éste limita al N con materiales no consolidados, que constituyen la zona de recarga del acuífero; al NE, con los cerros Grande, Siete Cerros y El Mariachi; al E, con los cerros Gorgus, La Puerca y El Tordillo; al SE, con los cerros La Recortada, La Panocha y Oliva; al S, con los cerros La Morada y Cerro Prieto; y al W, con el Golfo de California (UNISON, 2000).

Parámetros hidrogeológicos

La transmisividad varía de 0.005 a 0.42 m²/s, siendo mayor en el centro y el NE del acuífero, y menor hacia la línea de costa y el NW por la presencia de capas arcillosas. Al oriente de Bahía Kino, la transmisividad oscila entre 0.005 y 0.069 m²/s, y al SW del acuífero varía de 0.0025 a 0.035 m²/s.

El coeficiente de almacenamiento calculado a través de pruebas de bombeo, varía de 7.5×10^{-7} a 7.2×10^{-3} . Los valores reportados están entre 0.0002 a 0.00011 al oriente de Bahía Kino, y entre 0.00006 a 0.00019 en el suroeste del distrito de riego. El rendimiento específico estimado va de 0.1 o 10% (UNISON, 2000).

Disponibilidad de agua

Inicialmente, la recarga media anual del acuífero fue calculada en 350 Mm³/a, considerando como las principales fuentes a la precipitación, las aguas de retorno agrícola y el aporte por infiltración de los ríos Sonora y Bacoachi (Matlock *et al.*, 1966; ACSA, 1968 *in* Castro-García, 1998).

Posteriormente, con datos de 1997 a 2001, se calculó la recarga total al acuífero en 250 Mm³/a, de los cuales 152 Mm³/a corresponden a agua dulce y 98 Mm³/a a agua salada. Del agua dulce, 73 Mm³/a pro-

vienen de recarga vertical y 79 Mm³/a de entrada horizontal; el agua salada entra horizontalmente del mar. Se tienen 527 Mm³/a de extracciones por bombeo, lo que da un cambio de almacenamiento de -277 Mm³/a. La condición del acuífero es que está sobreexplotado (UNISON, 2001).

La extracción de agua subterránea se inicia en la Costa de Hermosillo a partir de 1946, habiendo variado en los diferentes ciclos de 100 a 1,150 Mm³/a, propiciando la inversión del gradiente hidráulico, ya que se registran niveles estáticos negativos desde 1956. El mapa, realizado para este trabajo con datos de CONAGUA (2006), muestra curvas equipotenciales concéntricas alrededor de un gran cono de abatimiento en la porción central del acuífero con valores hasta de -64 mbnm (Figura 8).

Calidad del agua

El agua subterránea en la Costa de Hermosillo varía desde dulce hasta agua de mar, de acuerdo con los valores de conductividad eléctrica (CE) en un rango de 200 a 40,500 μ S/cm, predominando el agua dulce y salobre. La principal familia de agua en la línea de costa es la clorurada, variando entre cálcica, sódica y cálcico-sódica. En la zona de recarga, la familia dominante es la bicarbonatada sódica, seguida de bicarbonatada cálcica. De acuerdo con su composición isotópica, el agua del acuífero somero tiene un origen meteórico, pero también existe agua antigua atrapada debajo de este acuífero, cuyas edades varían de 26,000 a 30,000 años (UNISON, 2001).

El problema más grave de contaminación del agua subterránea en el acuífero de la Costa de Hermosillo es la intrusión marina. Usando datos de 1970, Andrews (1981) aplicó un modelo de flujo y transporte para simular este fenómeno con dos alternativas de manejo: (1) reubicar los pozos moviéndolos tierra adentro y (2) reducir la cantidad de agua bombeada mejorando la eficiencia de riego. El mismo autor concluyó que la intrusión salina es esencialmente irreversible debido a la magnitud de los abatimientos y de los gradientes hidráulicos producidos. De acuerdo con Cardona-Benavides *et al.* (2005), la salinidad varía de 360 a 2,800 mg/L, estando asociado el último valor a mezcla con

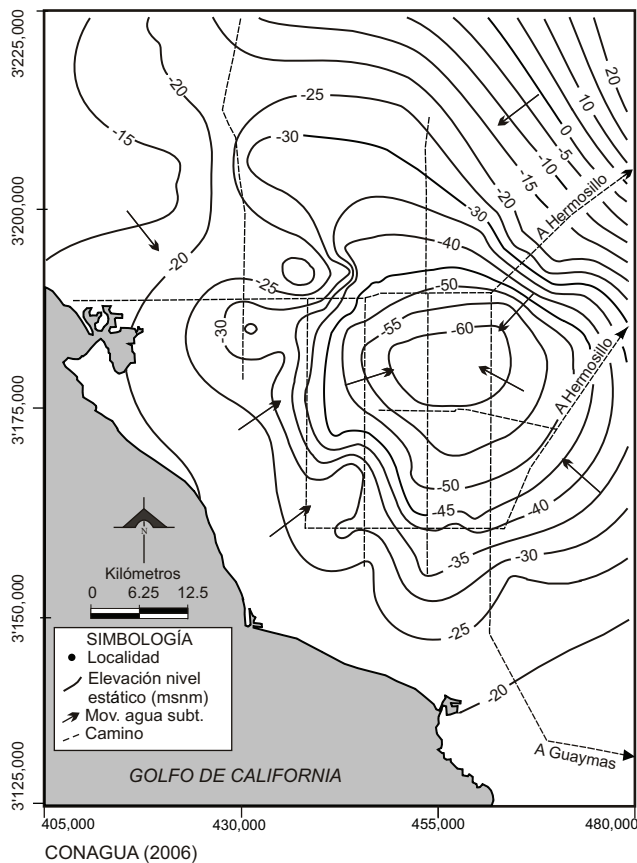


Figura 8. Piezometría de la Costa de Hermosillo en el año 2006.

agua de mar. Estos últimos autores reportan dos tipos de contaminación en el acuífero: fuentes que descargan sustancias producto de la irrigación de cultivos usando aguas residuales, con pesticidas, fertilizantes y residuos de granjas, y fuentes naturales que incluyen la intrusión de agua salina.

GUAYMAS

Hidrología superficial

En el acuífero de Guaymas (VG), se encuentra ubicado el Distrito de Riego 084, en la porción central de la costa de Sonora. El valle de Guaymas constituye la parte baja de la cuenca del río Mátape en la RH-9 Sonora Sur y su área acuífera es de 844 km² (Figura 5). La precipitación media anual es de 320 mm y la evaporación potencial media anual es alrededor de ocho veces mayor. La temperatura media oscila entre 15 y 30°C (TMI, 1975).

Hidrogeología

Se ha identificado dos unidades acuíferas: el acuífero superior, con un espesor promedio de 160 m, constituido de capas interdigitadas de grava, arena y arcilla; y el acuífero inferior, con unos 180 m de espesor, formado por intercalaciones de grava, arena, arcilla y conglomerado. Ambos acuíferos están separados por una capa de arcilla azul con macrofósiles, cuyo espesor es de 160 m cerca de la costa, acuñándose hacia la parte alta del valle de Guaymas. Los sedimentos descansan sobre un basamento de rocas ígneas y metamórficas (TMI, 1975). Por su lado, Herrera-Revilla *et al.* (1985) concluyen que no existe un acuífero inferior aprovechable en el valle de Guaymas.

Estudios más recientes de Campos *et al.* (1984) in Roldán-Quintana *et al.* (2004) reportan la presencia de cuatro unidades estratigráficas: (1) cerca de superficie, conglomerado y arena en aluvión y suelo residual (espesor de 30-200 m); (2) unidad arcillosa y areno-arcillosa con horizontes calcáreos (100-500 m de espesor); (3) conglomerado y arena en probable discordancia con el basamento (200 m espesor aproximado); (4) rocas volcánicas (basalto, toba riolítica y granófidio).

El valle de Guaymas forma parte de la cuenca hidrográfica del río Mátape. Tiene forma alargada con orientación N-S, quedando limitada al E por la sierra El Bacatete; al W por las sierras Santa Úrsula, La Pasión, La Ventana y Libre; al N parcialmente por las sierras Libre, Carrizal y Moradillas; y al S por el Golfo de California. Las sierras funcionan como fronteras al flujo del agua subterránea, mientras que el basamento o frontera inferior, consiste en basaltos y granito. El flujo de agua subterránea proviene del N, alimentado por las lluvias y escurrimientos de las sierras y, posiblemente, por entradas subterráneas de la cuenca del río Sonora. Otra parte del flujo procede del E, de las formaciones basálticas fracturadas de la sierra El Bacatete (ACSA, 1968).

Roldán-Quintana *et al.* (2004) llaman "Graben de Empalme" a una estructura formada durante la apertura del Golfo de California, limitada por dos fallas con rumbo N-S: una en la porción oriental de la sierra Santa Úrsula y otra en la occidental de El Bacatete. Estas sierras consisten en rocas volcánicas félsicas a intermedias del Mioceno (11-23 Ma) que cubren discordan-

temente a rocas intrusivas del Cretácico Superior (63 Ma). Derrames de basalto de 8.5 Ma cubren a las rocas anteriores. En el área, fueron identificados dos eventos de extensión: el primero, de entre 24 y 11 Ma, se asocia al evento de Cuencas y Sierras y se caracteriza por fallas N30°-40°W que afectan a las rocas volcánicas; y el segundo se relaciona con la apertura del Golfo de California, con fallas N-S y desplazamiento a rumbo.

Parámetros hidrogeológicos

La transmisividad del acuífero superior varía de 0.001 a 0.071 m²/s y para el inferior se calculó en 0.02 m²/s (TMI, 1975). La simulación numérica realizada por Herrera-Revilla *et al.* (1990), obtuvo valores de transmisividad generados por la calibración, de 0.005 m²/s en una franja paralela a la costa y en los bordes de la sierra Santa Úrsula, los cuales aumentan hasta 0.03 m²/s en la parte alta y en el centro del valle. El valor final del coeficiente de almacenamiento fue de 0.012 y el de la porosidad efectiva de 0.01 en un espesor de 200 m de acuífero.

Disponibilidad de agua

La recarga media anual fue estimada en 100 Mm³, de los cuales 40 provienen de agua de retorno agrícola, 30 del N como entradas horizontales subterráneas, 20 de flujos ascendentes del acuífero inferior y los 10 restantes proceden de infiltración vertical por agua de lluvia (INEGI, 1993; CNA, 2002a).

Diversos modelos matemáticos se han aplicado al acuífero de Guaymas, los que han utilizado valores de recarga distintos, como el de Herrera-Revilla *et al.* (1985) de 100 Mm³/a, el de López-Ibarra (1993) de entre 72 y 86.4 Mm³/a, el de Tapia-Padilla (2000) de 72 Mm³/a y el de Borgo-Valdez (2002) que varía de 40 a 100 Mm³/a.

Respecto a los niveles estáticos de agua, de 1967 a 1975 descendieron de -5 a -25 mbnm provocando un fuerte cono de abatimiento cerca de Maytorena, donde se concentra la mayoría de los pozos. Para el año 2006, se observa que el agua subterránea se mueve perpendicularmente a patrones concéntricos, pero con abatimientos que llegan hasta los -43 mbnm (Figura 9).

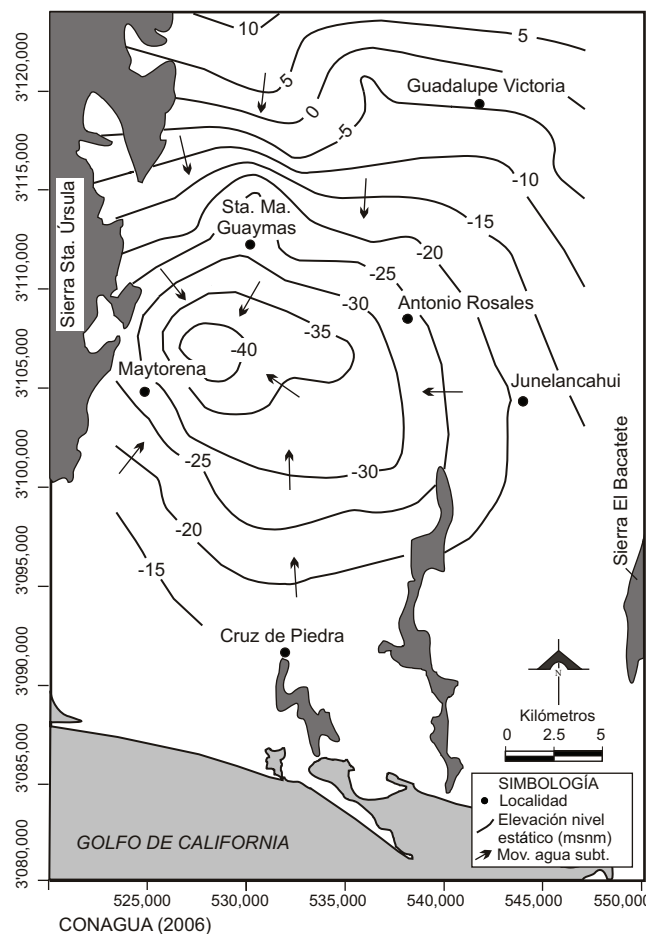


Figura 9. Elevación de niveles estáticos del Valle de Guaymas en el año 2006

Esta excesiva explotación y el abatimiento de los niveles de agua provocaron la inversión del gradiente hidráulico y la consecuente entrada de agua de mar al continente, incrementándose la franja salina de 6 km en 1950 a 20 km en 2002. La condición del acuífero, por tanto, es de sobreexplotación.

Calidad del agua

A lo largo de las costas del estado de Sonora, es un hecho la contaminación del mar por aguas residuales urbanas, agrícolas e industriales vertidas sin tratamiento alguno, como en las inmediaciones de Guaymas, que descarga de 180 a 200 L/s, de los cuales el 65% proviene de drenaje urbano y el 35% de la industria asentada en la bahía. El gobierno del Estado se propuso sanear la bahía, con planes para el 2005 de cero

descargas urbanas y para el 2009 de cero descargas industriales. También, ha invertido en el tratamiento de aguas negras a través de lagunas de oxidación, jornadas sabatinas de limpieza, programa de playas limpias y rehabilitación de infraestructura hidráulica, entre otros (CNA, 2005b).

Respecto al agua subterránea, Rodríguez-Castillo *et al.* (1985) citan tres zonas con anomalías positivas de temperatura: las sierras Santa Úrsula y El Bacate, limitadas por las fallas N-S, y el centro del valle de Guaymas. El gradiente térmico es de 9°C/100 m, alcanzando temperaturas >40°C en algunos pozos. La composición química del agua es producto de la mezcla de agua dulce de origen meteórico con agua salobre de origen marino; su concentración de cloro varía de 20 a 3000 mg/L y ninguna muestra sobrepasa los límites máximos permisibles para As (0.002-0.010 mg/L) y B (0.10-0.30 mg/L).

Otros estudios reportan la presencia de Ba en las aguas subterráneas de Guaymas con valores que varían de 1.9 mg/L (Vega-Granillo, 1992) a 5.6 mg/L (Montes de Oca-Ponce de León, 1989). Los dos autores antes mencionados concluyen que el agua subterránea tiene una ocurrencia natural y que la dirección de su movimiento es de SW a NE (curvas de isovalores de Cl y SO₄ y piezometría); es decir, del Golfo de California hacia el continente.

Castillo-Gurrola *et al.* (2002) aplicaron sondeos eléctricos verticales que les permitieron definir la presencia de dos frentes de intrusión salina: uno localizado en el poblado Las Guásimas, al SE del valle de Guaymas, y el otro a lo largo de la falla Santa Úrsula, al W del valle, con una extensión aproximada de 9 km. Los autores antes citados señalan que es notorio el deterioro de la calidad del agua subterránea y de los suelos agrícolas, en una franja costera de alrededor de 15 km de anchura.

Los análisis físico-químicos en la porción sur de la cuenca del río Mátape, clasifican aguas de la familia sulfatada-clorurada cálcico-magnésica variando a sódica, siendo en general de mala calidad para consumo humano y agrícola. Las aguas de la porción norte de la cuenca varían de bicarbonatada cálcico-magnésica a sódica y son de buena calidad para todos los usos (Vega-Granillo *et al.*, 2004).

VALLE DEL YAQUI

Hidrología superficial

El acuífero del Valle del Yaqui (VY) cuenta con una superficie de 1,966 km², sobre la que se ha desarrollado el Distrito de Riego 041 Río Yaqui, en la parte baja de la cuenca del río Yaqui, la más grande e importante de Sonora (Figura 5). El río Yaqui nace en la provincia hidrogeológica de la Sierra Madre Occidental y su cuenca aporta 2,404 Mm³ de escurrimiento al año, que corresponde al 82% del total estatal (INEGI, 2000). La precipitación media anual es de 352 mm, su temperatura media anual es de 22.6°C, la evaporación potencial es de 2,061.51 mm y la evapotranspiración promedio anual es de 370.4 mm (UNISON, 2003a).

Hidrogeología

En el acuífero del Valle del Yaqui, se distingue tres unidades hidrogeológicas: el basamento rocoso totalmente impermeable, una segunda unidad semipermeable de conglomerado y suelo residual sobre la anterior, y una tercera unidad de material aluvial muy permeable que cubre a la anterior.

El basamento está constituido por rocas calcáreas paleozoicas, granito y rocas volcánicas cretácicas (andesita interestratificada con conglomerado y arenisca) y rocas volcánicas cenozoicas (basalto, andesita y riolita).

La unidad semipermeable está formada por conglomerado, arenisca y conglomerado. Su importancia es secundaria, desde el punto de vista de la recarga.

La unidad hidrogeológica más importante está constituida por depósitos del Cuaternario, que cubren toda la planicie del valle, donde se aloja el acuífero regional, y consta de material aluvial y depósitos de talud de granulometría (grava, arena, limo) y transmisividad variables. Su espesor, calculado mediante cortes litológicos de pozos, es en la parte norte y próxima a la presa Álvaro Obregón del orden de los 25 m, alcanzando los 400 m en el centro-sur del valle. La recarga del acuífero proviene de la infiltración de ríos, presas, red de canales de riego y precipitación. La descarga ocurre verticalmente por bombeo de pozos para uso agrícola y doméstico, flujo subterráneo horizontal hacia la red de

drenaje agrícola, río Yaqui, arroyo Cocoraque y hacia el mar (González-Enríquez, 1999).

Existen dos acuíferos independientes en el valle del Yaqui: uno superior, de tipo libre, y debajo, uno regional, que en partes es libre, semiconfinado y confinado, cuya extensión es amplia y su espesor y composición variables (UNISON, 2003).

Parámetros hidrogeológicos

La transmisividad consignada por González-Enríquez (1999) para las rocas calcáreas del basamento es de baja a nula ($< 0.003 \text{ m}^2/\text{s}$), y para las rocas graníticas varía de media a baja. Por otro lado, en el estudio de la UNISON (2003a), se consideró un valor de rendimiento específico de 0.11 para la capa superior (espesor de 1 a 5 m, acuífero libre en medio poroso) y capas inferiores (espesor de 35 a 50 m, acuífero semiconfinado en sedimentos continentales), y de 0.9 para el resto de los materiales. La transmisividad fue de $0.0259 \text{ m}^2/\text{s}$, calculada como el promedio aritmético de los valores obtenidos en 142 pruebas de bombeo, y la conductividad hidráulica media se calculó en $8.46 \times 10^{-5} \text{ m/s}$.

Disponibilidad de agua

El balance hidrológico superficial del río Yaqui resultó negativo, ya que se calcularon 798.44 Mm^3 de precipitación, $5,283.21 \text{ Mm}^3$ de evaporación potencial, 822.80 Mm^3 de evapotranspiración real y -24.36 Mm^3 de precipitación en exceso o escurrimiento. La recarga vertical (1996-2002) se estimó en $646.73 \text{ Mm}^3/\text{a}$, procedente en su mayoría de infiltración de canales no revestidos y, en menor escala, de infiltración de agua de riego agrícola (UNISON, 2003a).

Con datos de CONAGUA (2006), se elaboró un mapa de elevación de niveles estáticos con valores que van de 0.6 hasta 62 msnm, en el que se observa, en distintos lugares, conos de abatimiento, pero también de recuperación (Figura 10). Los abatimientos son producto de las extracciones por bombeo, cuyo promedio fue de 227.68 Mm^3 de 1969 a 2001 y de 352 Mm^3 de 2000 a 2001 (UNISON, 2003a).

De acuerdo con el INEGI (2000), la condición del acuífero es de equilibrio, consignando una recarga de

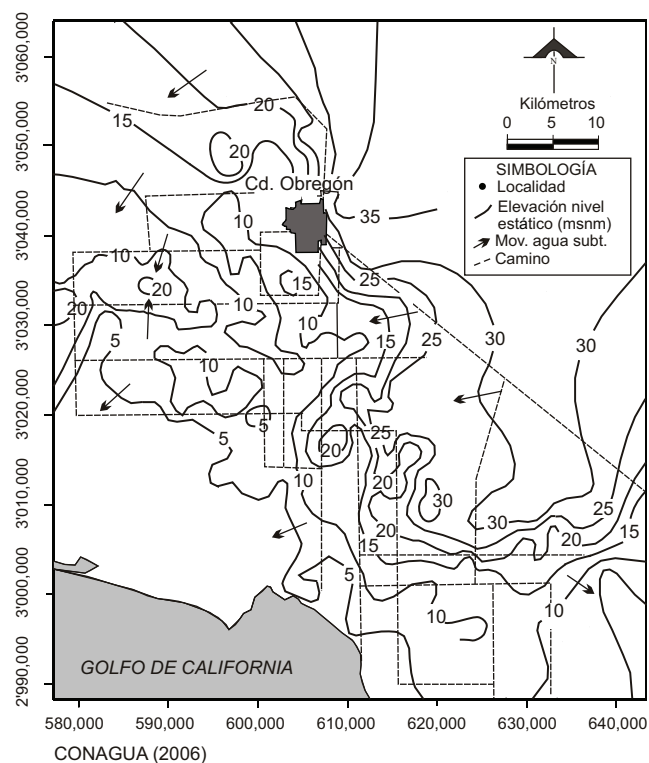


Figura 10. Configuración del nivel estático del Valle del Yaqui en el año 2006.

$415.50 \text{ Mm}^3/\text{a}$ y una descarga por bombeo de $354.00 \text{ Mm}^3/\text{a}$.

Calidad del agua

La calidad del agua superficial del río Yaqui es adecuada para diversos usos, pero la contaminación se concentra en las partes bajas de la cuenca, lo que afecta los desarrollos acuícolas y pesqueros de la costa. Se calcula que los canales que captan las aguas de retorno agrícola drenan $15,474 \text{ L/s}$ hacia las costas de los municipios de Guaymas, Bácum, Cajeme y Etchojoa (Celis-Salgado, 1992).

El agua subterránea está contaminada por agroquímicos y salinidad. Se ha detectado plaguicidas (α , β y γ -HCH, pp' DDT, pp' y op' DDE, endrín y diel-drín) en pozos de algunos ejidos (González-Enríquez y Canales-Elorduy, 1995). La salinidad varía de 2,500 a $5,000 \mu\text{S/cm}$ en 360 de los 900 pozos en operación, la que podría deberse a evapotranspiración, evaporitas o intrusión marina (Rangel-Medina *et al.*, 2005).

Además de lo anterior, se ha encontrado otros contaminantes, como Mn, en pozos del valle aluvial del río Yaqui, que surten agua a las ciudades de Guaymas y Empalme, y compuestos nitrogenados procedentes de actividades pecuarias (97.67%), agrícolas (1.49%), urbanas (0.52%) e industriales (0.32%), sobre todo en zonas con nivel freático somero y lixiviación de residuos sólidos urbanos, abajo del nivel freático (González-Enríquez y Canales-Elorduy, 1997; Arvizu-Núñez y González-Enríquez, 2005).

Rangel-Medina *et al.* (2005) ubican el agua dulce en áreas cercanas al cauce del río Yaqui, del arroyo Cocoraque y en los paleocauces del subsuelo, siendo las principales familias, de mayor a menor: sulfatadas sódicas, bicarbonatadas sódicas, cloruradas magnésicas y cloruradas cálcicas; además, existen aguas mixtas (mezcla de agua superficial y subterránea con fuentes naturales y antropogénicas). Los mismos autores analizaron isótopos estables (^{18}O y deuterio) y radiactivos (tritio y ^{14}C) en agua, identificando cuatro orígenes principales y edades que van desde agua moderna de infiltración reciente hasta de 24,340 años.

VALLE DEL MAYO

Hidrología superficial

En la superficie acuífera de 1,071 km² del Valle del Mayo (VM), se ha desarrollado el Distrito de Riego 038 Río Mayo, el cual se ubica en la parte baja de la cuenca del río Mayo, localizado en la RH-9 Sonora Sur (Figura 5). La precipitación media es de 517 mm/a, lo que da un volumen anual precipitado de 6,122 Mm³, siendo el volumen anual escurrido de 860 Mm³ considerando un coeficiente de escurrimiento del 14%. Este volumen es almacenado en la presa Adolfo Ruiz Cortines o El Mocúzari (INEGI, 1993, 2000; Canales-Elorduy y Robles, 1997; UNISON, 2003b).

Hidrogeología

Las formaciones que alojan al acuífero son de tipo sedimentario con permeabilidad alta y consisten en depósitos deltaicos de material aluvial (grava, arena, limo y arcilla) del Holoceno con derrames de basalto interes-

tratificados. Este relleno aluvial alcanza profundidades hasta de 400 m. También, contiene sedimentos evaporíticos, depositados en lagunas cerradas y pantanos, cerca de la línea de costa. El acuífero es de tipo libre, teniendo partes confinadas. El agua subterránea se mueve en general desde el N y NE hacia el SW (INEGI, 1993).

González-Enríquez (2002) realizó 56 sondeos eléctricos verticales (SEV's) en el valle del Mayo, encontrando que la altitud de la zona varía de 4 a 42 msnm, ubicándose las más bajas hacia la línea de costa. Las resistividades entre 30 y 110 $\Omega\text{-m}$, desde los -25 a -300 mbnm, corresponden a materiales granulares gruesos, posiblemente saturados con agua dulce. Se identifica como basamento del acuífero a rocas ígneas (basalto, andesita, granito) con resistividad mayor que 110 $\Omega\text{-m}$.

En el acuífero de San Bernardo, aguas arriba de la presa Adolfo Ruiz Cortines, existen rocas que van del Jurásico al Cuaternario. Estas últimas consisten en material no consolidado con posibilidades de almacenamiento altas, y en ellas se aloja el acuífero, el que aflora en pequeñas porciones de las márgenes del río. Otras partes del acuífero consisten en rocas sedimentarias, intrusivas y volcánicas, en su mayoría consolidadas y, en general, con baja capacidad de almacenamiento.

El acuífero de Rosario Tesopaco-El Quiriego, al NW de la presa Adolfo Ruiz Cortines, contiene pequeños afloramientos de un intrusivo granítico del Cretácico, rocas del Terciario (conglomerado polimíctico, arenisca, basalto, andesita, ignimbrita y toba riolítica) y afloramientos del Cuaternario en los cauces de los arroyos.

Desde el punto de vista hidrogeológico, las rocas cretácicas son consolidadas con baja posibilidad de almacenamiento, las sedimentarias terciarias son semi-consolidadas con posibilidades medias, las volcánicas terciarias son consolidadas con posibilidad baja de almacenamiento y las cuaternarias forman la unidad de material no consolidado con posibilidades altas (UNISON, 2003b).

Parámetros hidrogeológicos

La transmisividad se halla en un intervalo entre 0.004 y 0.13 m²/s (INEGI, 1993).

Disponibilidad de agua

La recarga media anual del acuífero es de 155 Mm³, proveniente en un 90% del agua de retorno agrícola y de la infiltración de canales, y en el 10% restante de infiltración de agua de lluvia. La descarga anual por bombeo es de 143 Mm³ con alrededor de 344 pozos. Los niveles estáticos han tenido descensos hasta de 15 m (1970-1987), pero también recuperaciones de 10 m. La profundidad del agua es de menos de 5 m en el N, S y SW del valle, y de hasta 60 m al oriente de Navojoa (INEGI, 1993). Los niveles estáticos son someros en la parte sur del valle, por lo que se recomienda realizar obras de drenaje para reducir las inundaciones y drenar las aguas subterráneas (Infante-Reyes, 1997). De acuerdo con estos datos, el acuífero tiene una condición de subexplotación (INEGI, 1993, 2000).

Calidad del agua

Predomina el agua de calidad tolerable, pero también puede hallarse dulce y salada. Los mayores contenidos de STD se ubican en el centro del valle y exceden los 3,000 mg/L (INEGI, 1993). Canales-Elorduy y Robles (1997) encontraron 4,000 mg/L en pozos exploratorios profundos y 90,000 mg/L en pozos de la línea costera, cerca de Yavaros.

Con el fin de tener más agua disponible para regar los campos, es práctica común entre los usuarios mezclar el agua subterránea de los pozos (1,160 mg/L STD en promedio) con agua de los canales que proviene de la presa (200 mg/L STD en promedio), aun a costa del incremento de la salinidad (Infante-Reyes, 1997).

Nueve familias de agua fueron determinadas en 42 muestras de pozos y manantiales, predominando la bicarbonatada mixta (26%), seguida de mixta (14%) y, en la misma proporción la clorurada-nitratada sódica, mixta y sulfatada sódica (12%). El calcio es un catión importante en el agua cercana al río Mayo, y representa agua con poco tiempo de residencia, infiltrada al subsuelo a partir del escurrimiento superficial. Respecto a la calidad del agua, existe contaminación por intrusión marina en los sedimentos lacustres de arcilla y limo expansivo que sobreyacen a arena fina. Se recomienda no generar conos de abatimiento cerca de la costa para

evitar la intrusión marina, así como la perforación de pozos de más de 200 m de profundidad, para tener agua aceptable para el uso agrícola (IMTA, 2004).

RÍOS SONORA, SAN MIGUEL Y ZANJÓN

Hidrología superficial

La cuenca del río Sonora se ubica en la porción centro-occidental del Estado, en la región hidrológica RH-9 Sonora Sur (Figura 5). Su rasgo hidrográfico más notable es el río Sonora, que nace al oriente de Cananea a una altitud de 2,400 msnm, cuyas aguas eran captadas anteriormente por la presa Abelardo L. Rodríguez, siendo en la actualidad la presa Rodolfo Félix Valdez (El Molinito) la que las almacena. Por su margen derecha se le une el río San Miguel, al cual se une, a su vez, el río Zanjón, corriendo ambos de N a S. En la parte alta de la cuenca se ubican las subcuencas y los acuíferos denominados Río Sonora, Río San Miguel y Río Zanjón. En la parte baja se localizan los de la Costa de Hermosillo y el Sahuaral (Figura 5). La ciudad de Hermosillo se localiza en la porción central de la cuenca y los acuíferos aledaños son Mesa del Seri-La Victoria y Santa Rosalía al E y La Poza al S.

La cuenca del río Sonora tiene una extensión de 26,010 km², con una precipitación media anual de 460 mm; el promedio mínimo de 1962 a 2003 fue de 145 mm en la estación El Carrizal y el máximo de 533 mm en Mazocahui. La temperatura media es de 21°C y la evaporación potencial media anual es de 2,031 mm, registrándose el valor más alto, de 2,936 mm, en la estación Presa Abelardo L. Rodríguez, y el más bajo, de 1,151 mm, en la estación Huépac (UNISON, 2005).

Hidrogeología

El modelo hidrogeológico propuesto por Herrera-Salazar y Vega-Granillo (2005), ubica al acuífero Río Sonora en un valle constituido por depósitos aluviales cuaternarios y por la Formación Báucarit (conglomerado, arenisca, limo) del Terciario, considerados como los principales transmisores y productores de agua, funcionando ambas unidades como acuíferos libres. Las montañas que limitan al valle están formadas por

rocas volcánicas terciarias (derrames de basalto y andesita, toba soldada riolítica), con buena permeabilidad debido a la presencia abundantes de fracturas, y rocas ígneas cretácicas (derrames de andesita, toba, brecha, granito, granodiorita), que por su intenso intemperismo y abundancia de fracturas pueden también ser buenas fuentes de recarga.

El amplio y alargado valle del río Zanjón fue producido por una fosa tectónica, limitada por fallas normales, producto de eventos tectónicos que van del Precámbrico al Holoceno. En la porción occidental de la fosa se tiene un frente batolítico (granito, granodiorita) y rocas sedimentarias (caliza), y en la oriental, un frente volcánico extrusivo (derrames de basalto y andesita, ignimbrita). La parte central está compuesta por sedimentos (conglomerado, grava, arena y arcilla). El acuífero es de tipo libre y se aloja en la Formación Báucarit, que consiste en depósitos de talud, conglomerado y depósitos aluviales eólicos, con espesores de 250 a 350 m, donde se emplazan la mayoría de los pozos que extraen el agua en esta cuenca. Los sedimentos se hallan sobreyaciendo a granodiorita, la cual se considera el basamento impermeable. El agua subterránea se mueve de las zonas montañosas o zona de recarga hacia el valle, y en éste el flujo es de N a S hacia la confluencia con el río San Miguel (GEG, 2000).

El río San Miguel fluye a través de un valle angosto y alargado. Afloran rocas metamórficas del Precámbrico y Paleozoico, rocas sedimentarias del Pérmico, Jurásico Superior y Cretácico, rocas ígneas prelamínicas y terciarias (intrusivo félsico a máfico, riolita, andesita) y rocas intrusivas del Paleógeno (granito, pórfido riolítico) agrupadas en el Batolito Aconchi. El acuífero granular, de tipo libre, se aloja en materiales granulares cuaternarios (guijarro, grava, arena, limo y arcilla) que rellenan el valle. Se considera que el acuífero tiene una condición de equilibrio, ya que los escurrimientos e infiltración del río San Miguel proveen de un gasto constante a los pozos agrícolas, que no presentan problemas de abatimiento en sus niveles de bombeo (CEA, 2004).

Parámetros hidrogeológicos

En la subcuenca del río Sonora, la transmisividad varía entre 0.001 y 0.084 m²/s (CNA, 2002b), en el río Zan-

jón de 0.0002 a 0.02 m²/s (CNA, 2002c), y en el río San Miguel están en el rango de 0.0001 a 0.072 m²/s (CNA, 2002d).

En la subcuenca del río Zanjón, los valores de transmisividad, obtenidos en el medio granular, van de 0.000117 a 0.0213 m²/s. La conductividad hidráulica va de 8.58 X 10⁻⁶ a 4.648 X 10⁻⁴ m/s (GEG, 2000). El coeficiente de almacenamiento calculado es de 0.053 (UNISON, 2005).

En la Mesa del Seri-La Victoria, la transmisividad está en un rango de 0.0018 a 0.083 m²/s en el acuífero superior, libre, y de 0.02 a 0.2 m²/s en el acuífero inferior, semiconfinado (UNISON, 2005).

Disponibilidad de agua

Según los datos de la CNA (2005a) hay déficit de agua en las subcuencas citadas, ya que la recarga media es menor que el volumen de extracción concesionado, siendo respectivamente de 66.60 y 115.43 Mm³/a en el río Sonora, 52.50 y 54.09 Mm³/a en el río San Miguel y 76.80 y 90.04 Mm³/a en el Zanjón.

El balance hidrológico superficial de la parte alta de la subcuenca del río Sonora permite calcular que el volumen de precipitación es de 1,839 Mm³/a, el de evapotranspiración de 1,631 Mm³/a, el de escurrimiento directo de 20 Mm³/a y el de infiltración o recarga natural, obtenido a partir de los anteriores, de 188 Mm³/a. Respecto al agua subterránea, la extracción se hace mayormente a través de norias (88%) y pozos (11%), siendo el resto manantiales, algunos de ellos termales. La profundidad de los niveles estáticos medidos en campo en el año 2004 es somera, ya que varía de 1.66 a 14.86 m. El mapa de UNISON (2005) muestra que el movimiento del agua subterránea es de N a S, siguiendo las cotas topográficas, encontrándose la mayor densidad de pozos a lo largo del cauce del río Sonora (Figura 11).

En la subcuenca del río Zanjón, se elaboró un balance de aguas subterráneas (1987-1999) que resultó negativo, debido a que la extracción por bombeo (104 Mm³) excedía en un 63% el valor de la recarga anual (65 Mm³) por infiltración vertical y flujo horizontal subterráneo. Del volumen extraído, 26 Mm³/a abastecen a la ciudad de Hermosillo ubicada en la parte baja

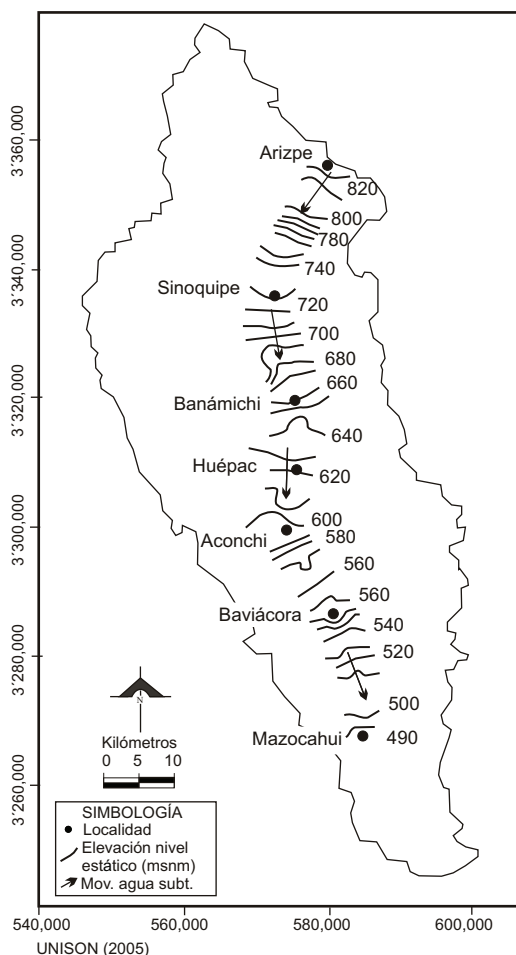


Figura 11. Niveles estáticos de una porción del río Sonora en el año 2004.

de la subcuenca (GEG, 2000). Por su parte, el balance hidrológico efectuado por la UNISON (2005) también resultó negativo, ya que las salidas por bombeo, flujo horizontal y evapotranspiración (121.6 Mm^3) fueron mayores que las entradas por infiltración de agua de lluvia, por ladera, flujo horizontal, recarga por río y retorno agrícola (92.83 Mm^3). La pendiente del agua subterránea es en general de N a S; el agua se extrae con alrededor de 515 aprovechamientos (69% pozos y 39% norias), y la profundidad de los niveles estáticos varía de 2 a 70 m, siendo su promedio de abatimiento anual de 5.5 m.

En la subcuenca del río San Miguel existen 1,301 aprovechamientos subterráneos, 27% de los cuales son pozos someros, 5% profundos y 68% norias. La evolución de los niveles piezométricos (1970-2004) en el

acuífero de Horcasitas, muestra zonas de abatimiento ampliamente distribuidas, con disminuciones anuales de 0.16 m, y se considera en equilibrio (UNISON, 2005).

Calidad del agua

La familia de agua predominante en las partes altas de las subcuencas de los ríos Sonora y San Miguel, es la bicarbonatada cálcica, mientras que en el valle del río Zanjón predomina la bicarbonatada cálcico-sódica (UNISON, 2005).

Se han detectado manifestaciones hidrotermales en las cercanías de la falla normal que pone en contacto una granodiorita cretácica con materiales granulares, desde el ejido La Victoria hasta San Pedro El Saucito. En pozos de más de 150 m de profundidad al N y E del rancho La Colmena fueron medidas temperaturas hasta de 42°C . Otros elementos encontrados en pozos de La Victoria, La Resolana y El Alamito, son F (1.8-3.6 mg/L) y As (0.056-0.084 mg/L), los cuales sobrepasan la norma de calidad para agua potable.

En general, el agua subterránea de las subcuencas es de buena calidad para consumo humano. La concentración de STD en el agua subterránea de la subcuenca del río Zanjón está en un rango de 224 a 2,746 mg/L, y la dureza total varía de 10 a 1,311 mg/L (moderadamente dura a dura), encontrándose el agua de mejor calidad en la zona de Pesqueira. En algunas poblaciones de la subcuenca del río San Miguel, las concentraciones de STD son superiores al límite máximo permisible; por ejemplo, en el área de San Pedro varían de 1,043 a 1,056 mg/L, y en la de Zamora de 1,254 a 1,338 mg/L. La dureza del agua va de blanda (La Victoria, San Pedro) a muy dura.

Se analizó diversos metales en el agua, siendo los valores máximos encontrados (en mg/L): As (0.114), Ba (1.87), Cd (0.024), Cr (0.056), Co (0.028), Cu (0.941), Fe (43.9), Pb (0.0129), Mn (4.97), Mo (0.129), Ni (0.342), Se (0.091), Sr (12.0), Tl (0.043), V (0.113) y Zn (2.0). De acuerdo con la NOM (1994) y la Agencia de Protección al Medio Ambiente (2000), el As, Ba, Cd, Cr, Fe, Pb, Mn, Ni, Se y Tl exceden los límites máximos permisibles para consumo humano (UNISON, 2005).

Río SANTA CRUZ

Hidrología superficial

El acuífero del río Santa Cruz (SC), en la frontera norte del estado de Sonora, se clasifica como parte de la región hidrológica RH-7 Río Colorado (Figura 5). Tiene un área de 872 km², una precipitación media anual de 451 mm, una temperatura media anual de 17.8°C y una evapotranspiración real anual de 419 mm (Cervera-Gómez, 1995).

Hidrogeología

En la cuenca del río Santa Cruz, se presentan afloramientos que van del Precámbrico al Holoceno. La sierra San Antonio se considera frontera impermeable de la cuenca y limita la corriente principal que es el río Santa Cruz. Los valles están formados por conglomerado y aluvión.

Aflora en esta cuenca diorita del Precámbrico cubierta por el conglomerado terciario, estando afectada por cuerpos intrusivos del Cretácico Superior. Se considera que la posibilidad de esta cuenca de contener acuíferos sea baja, pero su permeabilidad puede aumentar por intemperismo.

En las sierras San Antonio y El Pinito, se encuentran cuerpos intrusivos graníticos de dimensiones batolíticas emplazados durante el Cretácico Tardío, que afectan rocas mesozoicas y paleozoicas. Estas rocas impermeables tienen posibilidad de incrementar su permeabilidad por intemperismo o en zonas con mayor número de fracturas.

Después de un largo período de erosión de los intrusivos graníticos, se depositan rocas volcánicas de composición félsica y andesítica que consisten en derrames de lava, toba, brecha volcánica e ignimbrita, de mediana permeabilidad debido a cambios en su textura y densidad de fracturas.

En la sierra El Pinito se localizan depósitos vulcanosedimentarios terciarios (conglomerado y arena con matriz arcillosa), que son considerados impermeables por su alto contenido de arcilla.

Durante el Neógeno, las depresiones de la cuenca producidas por fallas N-S se rellenan con sedimentos

continentales acarreados por los ríos, de gran espesor y correlacionables con la Formación Báucarit (23–6 Ma), que consisten en arena conglomerática y conglomerado poco consolidado, en ocasiones intercalados con derrames de basalto. Se consideran de baja a media permeabilidad por su moderada consolidación (Tapia-Padilla, 2005).

Los depósitos aluviales del Cuaternario se ubican en los valles intermontanos por donde fluye el río Santa Cruz. Tienen poco espesor y son sedimentos no consolidados con buena porosidad granular y permeabilidad. En esta zona se llama “Aluvión Joven” a depósitos superficiales del Holoceno y Pleistoceno, que consisten en grava, arena, limo y arcilla no consolidados a pobremente consolidados, con bloques y caliche ocasionales (ADWR, 2001).

El aluvión del Cuaternario junto con el conglomerado del Neógeno constituyen el acuífero de la zona, que se considera de tipo libre, pero localmente confinado. El agua subterránea se mueve de N a S en la porción oriental de la cuenca y de S a N en la occidental; a semejanza de la corriente superficial, que nace en EUA, se interna a México y luego vuelve a su país de origen (Cervera-Gómez, 1995).

Parámetros hidrogeológicos

La conductividad hidráulica de la formación Aluvión Joven fue calculada en 0.00129 m/s (Cervera-Gómez, 1995); los valores usados en la modelación matemática varían de 1×10^{-7} a 3×10^{-5} m/s y los valores del coeficiente de almacenamiento varían en un rango de 0.086 a 0.144 (Tapia-Padilla, 2005).

Disponibilidad de agua

El río Santa Cruz nace en Arizona, se dirige hacia el S hasta entrar a México, gira al N y regresa a los Estados Unidos. La población de ambos Nogales usan sus aguas para uso urbano, pero en el de Arizona la problemática se centra en mejorar la calidad del agua y la contaminación ambiental, mientras que en el de Sonora se preocupan por aumentar la cantidad de agua disponible y por contar con el servicio (Pineda-Pablos, 1998). La ciudad de Nogales, Sonora, ha obtenido re-

cursos para reparar y expandir su red de agua potable y alcantarillado, ampliando sus servicios. Sin embargo, el futuro no parece muy brillante, ya que si se continúa incrementando el uso del agua, habrá conflictos entre las zonas urbana y rural, así como con el vecino país, por la sobreexplotación de los acuíferos compartidos (Ingram, 1998).

Cervera-Gómez (1995) elaboró un balance hidrológico superficial de la cuenca con resultados positivos, dando un volumen precipitado de 596.26 Mm³/a, de escurrimiento directo de 27.3 Mm³/a, de escurrimiento base de 4.78 Mm³/a y de evapotranspiración real de 553.75 Mm³/a. El potencial de almacenamiento se calculó en 24.22 Mm³/a.

Por su parte, Tapia-Padilla (2005), aplicando el programa Modflow a la porción occidental del acuífero del río Santa Cruz, calculó una recarga vertical por precipitación de 9.69 Mm³/a, aportación vertical superficial del cauce del río de 4.34 Mm³/a, salida lateral subterránea de 1.54 Mm³/a, evapotranspiración de 9.30 Mm³/a y drenado del acuífero hacia el río de 4.35 Mm³/a, valores muy parecidos a los de otros autores (Técnicas Geológicas y Mineras, 1989; Cervera-Gómez, 1995).

La profundidad del nivel estático varió de 3 a 9 m de 1963 a 1989 (Técnicas Geológicas y Mineras, 1989 *in* Tapia-Padilla, 2005) pero, en general, la variación en la cuenca es de 1 a 25 m (INEGI, 1993). La modelación de Tapia-Padilla (2005) muestra que el agua subterránea se dirige hacia el lecho del río, lo que indica que el acuífero está alimentando al río; esto se evidencia por la presencia de agua en ciertos tramos del río, aun en ausencia de lluvias, como en Mascareñas y San Lázaro (Figura 12).

La extracción media anual en la cuenca es de 26 Mm³ y la recarga de 25.6 Mm³, por lo que se considera que el acuífero tiene una condición de equilibrio (INEGI, 1993).

Calidad del agua

La calidad del agua en la cuenca del río Santa Cruz es dulce, con contenidos de STD que rara vez sobrepasan los 350 mg/L (INEGI, 1993). En concordancia, la CNA (2005c) publica que el contenido de STD es menor que 1,000 mg/L.

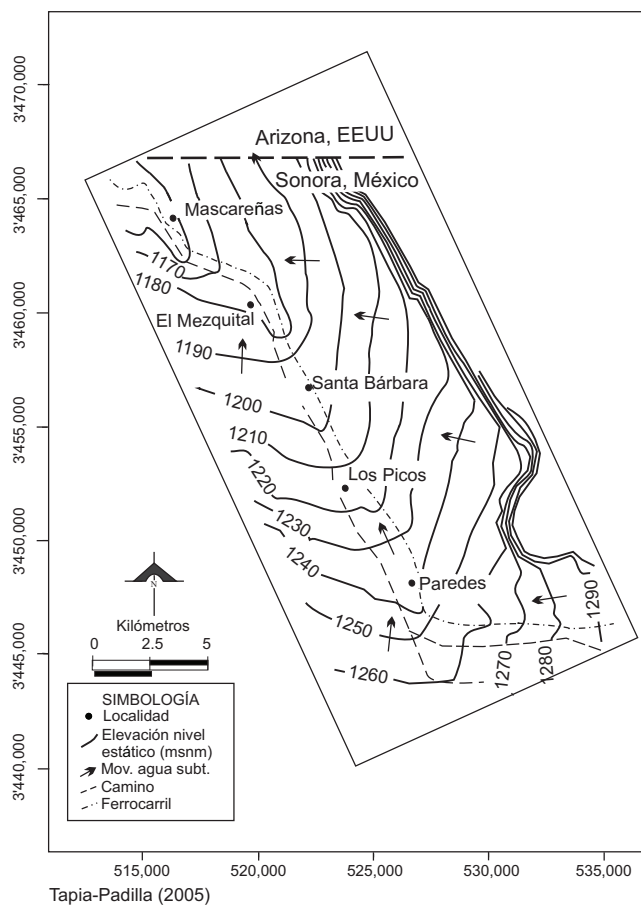


Figura 12. Piezometría de la porción occidental del río Santa Cruz en el año 1989.

Respecto a las descargas industriales, el 43% se localizó en 14 municipios del Estado, correspondiendo 255,000 m³/a a la ciudad de Nogales. Las actividades principales son la industria alimenticia, la manufacturera electrónica y la química. Asimismo, estos residuos industriales han afectado a los acuíferos de la zona (Celis-Salgado, 1992). Un muestreo realizado en 1988 en Nogales puso de manifiesto que tanto las aguas superficiales como los sedimentos contenían concentraciones arriba de la NOM (1994) de As, solventes tóxicos y compuestos químicos, comunes en las maquiladoras. También, se detectó niveles por arriba de la norma de bacterias coliformes fecales en el sistema de abastecimiento de agua municipal. Cabe mencionar que los residuos de la industria maquiladora se almacenan o desechan en acuíferos, drenaje y basureros, lo que amplía su peligrosidad (Moreno-Vázquez, 1995).

*Río SAN PEDRO**Hidrología superficial*

La cuenca del río San Pedro se localiza al NE del estado de Sonora, en la frontera entre México y EUA, formando parte de la RH-7 Río Colorado (Figura 5). El río San Pedro nace en la sierra Los Ajos, fluye hacia EUA uniéndose al río Gila en Winkelman, Arizona. Éste, a su vez, se une al río Colorado en Yuma, Arizona, el que desemboca en el Golfo de California, en el límite entre los estados de Baja California y Sonora.

En México, la cuenca tiene un área de 1,900 km², la precipitación media anual en la estación Cananea es de 553 mm y la temperatura media anual es de 16°C, mientras que en la estación Nogales, cercana a la cuenca, la lluvia media anual es de 486 mm y la temperatura media es de 18°C (Tabla 1). El escurrimiento medio anual calculado es de 30.44 Mm³ (Contreras-Montijo, 1986).

Hidrogeología

De acuerdo con CAS (2000), la recarga natural se efectúa por infiltración a través de fracturas, fallas y diaclasas en las rocas que forman las montañas, y a través de los espacios porosos de los sedimentos del valle. En la zona norte de la cuenca, existen rocas de poca permeabilidad que pueden actuar como una barrera al flujo, con excepción de la salida del río San Pedro hacia EUA, o zona de descarga, tanto superficial como subterránea.

El agua subterránea fluye en dos medios: granular y fracturado. El medio granular contiene sedimentos del Neógeno y Cuaternario, que varían de no consolidados a poco consolidados, rellenando la fosa tectónica del valle del río San Pedro. Este material consiste en conglomerado polimíctico (espesor = 100-500 m) y aluvión relacionado con abanicos aluviales y sedimentos depositados en cauces de ríos (espesor <100 m).

El medio fracturado está formado por rocas sedimentarias marinas (arenisca del Cretácico Superior, caliza y arenisca del Cretácico Inferior) y rocas volcánicas consolidadas (toba ácida y toba ácida vulcanoclástica del Cretácico Superior, toba ácida, andesita y

riodacita del Paleógeno). El acuífero es heterogéneo, isótropo y muy probablemente de tipo libre.

Parámetros hidrogeológicos

Contreras-Montijo (1986) reporta un valor promedio de transmisividad de 0.00988 m²/s y de 0.0275 para el coeficiente de almacenamiento, a partir del análisis de las pruebas de bombeo mediante los métodos de Theis y Jacob y por recuperación. CAS (2000) calculó valores de transmisividad de 0.023 y 0.0004 m²/s y de 0.029 para el coeficiente de almacenamiento, los cuales son muy parecidos a los anteriores.

Disponibilidad de agua

Pineda-Pablos *et al.* (2007) analizan el manejo del agua en Cananea y mencionan que en 1999 la empresa minera transfirió el servicio urbano de agua al gobierno local, que no tiene suficientes recursos para mantenimiento; la recaudación es baja, la prestación del servicio es irregular y no existe planta de tratamiento de aguas negras. Los mismos autores proponen municipalizar el servicio de agua potable y drenaje y dotarlo de un nuevo marco institucional donde los directivos no sean políticos, sino que su elección esté sujeta a evaluaciones y avances.

Mediante el balance de agua subterránea (1985-1986) se calculó salidas horizontales subterráneas de 14.54 Mm³, una extracción por bombeo de 10.34 Mm³, un cambio de almacenamiento de 2.97 Mm³ y, despejando de la ecuación de balance, una recarga de 27.85 Mm³. Siendo la recarga mayor que la descarga, se consideró al acuífero subexplotado en esa fecha. Las entradas de agua subterránea provienen principalmente del SE y SW del valle, uniéndose en la porción central del mismo, donde también se recibe agua del NW y NE. Todo el flujo subterráneo continúa al N hacia los EUA (Contreras-Montijo, 1986).

Recientemente, Herrera-Carbajal (2005) realiza un balance hídrico (1997-2005) basado en la simulación con Modflow del acuífero, considerando como condiciones iniciales los niveles estáticos del año 1995. Entre las entradas anuales de agua subterránea, este autor obtuvo un volumen infiltrado por agua de lluvia de

35.61 Mm³, por agua de riego de 2.15 Mm³ y por retorno de aguas negras de 2.97 Mm³; como salidas anuales resultó un flujo base del río de 10.85 Mm³, una extracción por bombeo de 22.35 Mm³ y una evapotranspiración de 9.00 Mm³. El resultado del balance arroja cifras negativas de -1.46 Mm³, por lo que se considera que el acuífero se encuentra casi en equilibrio.

En los mapas de líneas equipotenciales de 1980 a 2000, se observa que los niveles estáticos varían de 1,450 msnm en la porción sur cerca de Cananea, disminuyendo hacia el N hasta la curva 1,300 msnm, lo que indica el movimiento del agua subterránea. En los mapas de evolución de niveles estáticos, se puede ver algunos conos de abatimiento hasta de -3 mbnm, sobre todo en la porción centro-oriental del valle del río San Pedro (CAS, 2000).

Calidad del agua

En el río San Pedro se ha reportado contaminación por metales pesados provenientes de la explotación de Cu que se hace en la mina de Cananea. Este río ha recibido constantemente desechos ácidos, así como descargas de aguas negras de origen doméstico e industrial de la ciudad de Cananea. Uno de los factores que propició en el pasado la contaminación del río, fue el desbordamiento de las presas de jales en época de lluvia. Por otra parte, los acuíferos de la cuenca han sido sometidos a sobreexplotación para cubrir los requerimientos de agua de la minera (Moreno-Vázquez, 1995).

Gómez-Álvarez *et al.* (1997) realizaron tres muestreos (1993-1994) en ocho estaciones a lo largo del cauce del río, analizando elementos mayores y metales pesados.

SONOYTA-PUERTO PEÑASCO Y CUCHUJAQUI

Estos acuíferos han cobrado importancia últimamente debido al desarrollo turístico y minero principalmente, por lo que se hace a continuación una breve descripción de ellos.

El acuífero de Sonoyta-Puerto Peñasco cuenta con 205 pozos que extraen un volumen de 32.5 Mm³/a, siendo el volumen concesionado de 36.4 Mm³/a. El 40% del agua extraída se usa en la agricultura, el 37% en uso urbano, hay un 17% de usos múltiples y el res-

tante 6% es de uso pecuario. Por otra parte, existen unidades geohidrológicas con bajas posibilidades de contener agua, constituidas por basalto, andesita y conglomerado del Cenozoico y gneiss y granito del Mesozoico. El aluvión y los depósitos eólicos cuaternarios tienen posibilidades altas de contener agua. La elevación de los niveles estáticos varía de 107 msnm a -3 mbnm cerca de Puerto Peñasco y los abatimientos van de -0.78 a -4.25 mbnm, aunque también hay zonas con recuperación (CEA, 2007).

La cuenca del río Cuchujaqui drena hacia el sur, al estado de Sinaloa, con una pendiente general fuerte. El arroyo principal es el llamado Álamos, que recorre 88 km desde el NE de Álamos a la presa Josefa Ortiz de Domínguez (Sinaloa) y recibe como tributarios a los arroyos Cuchujaqui y Güirocoba (CONAGUA, 2005). El acuífero de Cuchujaqui, de tipo libre, suministra agua a los poblados del municipio de Álamos a través de 234 pozos. La calidad del agua es muy buena en toda la cuenca, presentando valores menores que 600 mg/L de sólidos totales disueltos. Se tiene casos puntuales de contaminación por nitratos. Se identificó cuatro familias de agua: bicarbonatada cálcica, bicarbonatada sódica, bicarbonatada cálcico-sódica y bicarbonatada-clorurada sódica. Asimismo, se reconoció cuatro unidades geohidrológicas: aluvial, conglomerado, terrazas y roca compacta. La unidad aluvial y la terraza fluvial son las más importantes para la acumulación y explotación del agua subterránea. Para el acuífero, se calculó un volumen anual escurrido de 98.6 Mm³ y una evapotranspiración anual de 27.7 Mm³. Cuenta con una disponibilidad media anual de agua subterránea de 22.3 Mm³ como resultado de restar a la recarga total media anual de 49.7 Mm³, una descarga natural comprometida de 19.5 Mm³, y un volumen anual concesionado e inscrito en el RE-PDA de 2.5 Mm³. La condición del acuífero es de equilibrio o subexplotado (CONAGUA, 2005).

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El agua es indispensable para el desarrollo de las actividades del hombre; sin embargo, su uso y manejo no siempre se han dado de una manera sustentable. Al tratar el tema del agua, se debe considerar dos aspectos: su cantidad y su calidad.

De la cantidad de agua superficial y subterránea disponible en México, el 76.8% se usa en actividades agrícolas; el 14.0% en abastecimiento público; el 4.1% en la industria autoabastecida y el 5.1% en termoeléctricas (CONAGUA, 2010).

La disponibilidad de agua depende del volumen que se precipita, del que escurre por los ríos y del que se infiltra al subsuelo para recargar los acuíferos. Como estos volúmenes son bajos en el NW del país, es muy común hablar de escasez de agua y sequía (temporada seca). El estado de Sonora se ubica en una franja que incluye a los grandes desiertos del mundo, caracterizada por cambios climáticos extremos, con valores altos de temperatura y evaporación y bajos de precipitación, escurrimiento e infiltración. La precipitación promedio anual en Sonora es de 336 mm, que resulta muy baja comparada con las de Tabasco (2,318 mm), Chiapas (2,093 mm) y Campeche (1,641 mm) en el SE de México. Adicionalmente, si se compara la lámina anual precipitada con la evaporada de 2,254 mm, se tiene, por tanto, escurrimientos mínimos, por lo que los ríos y arroyos, en su mayoría, permanecen secos durante gran parte del año.

El producto de la lámina anual por la superficie del Estado, da un volumen precipitado de 64,894 Mm³, del cual se evaporan 58,095 Mm³ (89.52%), escurren 4,444 Mm³ (6.85%) y se infiltran para recargar los acuíferos 2,355 Mm³ (3.63%), cantidad que no es suficiente para igualar las extracciones.

La escasez de agua superficial en Sonora, hace que el recurso subterráneo cobre gran importancia, siendo la principal fuente de suministro los acuíferos ubicados a lo largo de la costa que, debido a un manejo no sustentable, se encuentran en estado de sobreexplotación y con problemas de intrusión salina.

La sobreexplotación se produce cuando la extracción de agua de un acuífero se realiza a un ritmo mayor que el de su recarga media. De la información de descarga y recarga de 15 acuíferos publicada por la Comisión Nacional del Agua, 11 de ellos presentan déficit de agua (Los Chirriones, Búsani, Coyotillo, Magdalena, Costa de Hermosillo, Río Sonora, Río San Miguel, Río Zanjón, Valle de Guaymas, San José de Guaymas y Valle del Mayo), siendo los más afectados los de la Costa de Hermosillo, Valle del Mayo y Río Sonora. Los

acuíferos bajo los ríos Yaqui, Cocoraque, Fronteras y Moctezuma aun tienen agua subterránea disponible (INEGI, 2000; CNA, 2005a).

Respecto a la calidad del recurso subterráneo en Sonora, existe contaminación debida principalmente a desechos industriales, agrícolas, mineros e intrusión salina. En Caborca, se ha detectado la presencia de As en al menos cuatro pozos de uso doméstico, así como de plaguicidas usados en la agricultura. En Guaymas, la principal limitante para usar el agua es la salinidad, producto de la intrusión salina que ha afectado una franja costera de 15 km. También se ha detectado Ba en agua potable por arriba de la norma y en algunas manifestaciones termales, favorecidas por fallas profundas. En el valle del Yaqui se reportan dos fuentes principales de contaminación: la presencia de plaguicidas en pozos de agua potable y la salinidad debida a evapotranspiración por niveles freáticos someros, evaporitas o intrusión marina. Se han encontrado otros elementos contaminantes, como Mn, en pozos del valle aluvial del río Yaqui, que surten de agua a las ciudades de Guaymas y Empalme, así como compuestos nitrogenados producidos mayormente por granjas porcícolas.

En el valle del Mayo se ha detectado salinidad alta, perjudicial para los cultivos que, según algunos investigadores, se debe a intrusión marina, lo cual aun no se ha probado.

En la cuenca del río Sonora, se tiene agua de buena calidad en la parte alta (subcuenas de los ríos Sonora, Zanjón y San Miguel), aunque algunos elementos (As, Ba, Cd, Cr, Fe, Pb, Mn, Ni, Se, Tl) distribuidos a lo largo de la misma exceden los límites máximos permisibles para consumo humano. En los acuíferos aledaños a la ciudad de Hermosillo (Mesa del Seri-La Victoria), existen manifestaciones termales y elementos como F y As. En la parte baja de la cuenca, donde se ubica la Costa de Hermosillo, la contaminación más grave es por fuentes naturales (intrusión marina), seguida por las aguas de retorno agrícola que llevan pesticidas, fertilizantes y residuos de granjas, habiéndose detectado bacterias coliformes fecales en el agua subterránea bajo zonas agrícolas regadas con aguas negras sin tratamiento.

En el acuífero del río Santa Cruz, en general, el agua es de buena calidad; sin embargo, en los munic-

pios con gran desarrollo industrial, como Nogales, se evidencia contaminación por As, solventes tóxicos y compuestos químicos procedentes de las maquiladoras, los que se desechan sin tratamiento alguno en acuíferos, el drenaje y basureros.

En las aguas superficiales del río San Pedro, se registran valores altos de CE, SO_4 y metales pesados, en áreas cercanas a las minas de Cu de la región. También se tienen descargas de aguas negras de origen doméstico e industrial hacia el río. El agua subterránea, por su lado, ha sufrido explotación intensiva con el fin de surtir a las minas.

Con el fin de mejorar la cantidad y calidad del agua que se requiere en zonas desérticas, como en Sonora, diversas acciones se han llevado a cabo, tanto por parte de las dependencias oficiales encargadas de su administración, como por parte de los usuarios e investigadores. Las dependencias han realizado estudios de hidráulica, hidrogeología, erosión, etc., los cuales debieran estar disponibles al público. Los usuarios que han sufrido los efectos de la sequía a través de tandeos de agua, disminución de sus dotaciones agrícolas, etc., tienen ahora una mayor conciencia y educación, por lo que hacen un uso más cuidadoso del agua. Por su parte, los investigadores siguen elaborando propuestas, haciendo estudios, impartiendo cursos de actualización, etc., que coadyuvan al conocimiento del recurso hidráulico, del cual dependen todas nuestras actividades vitales. Algunos estudios incluyen modelación matemática de acuíferos, construcción de barreras de pozos de extracción, inyección de agua para detener la intrusión salina, balances hídricos y gestión integral del agua en cuencas.

El Programa de Desarrollo Regional Frontera Norte (CNA-SEGOB, 2001-2006), propone las acciones siguientes para mejorar el uso y manejo del agua: fomentar la eficiencia en la agricultura, lograr un manejo integral y sustentable del agua en cuencas y acuíferos, disminuir los efectos de inundaciones y sequías, ampliar la cobertura y calidad de los servicios de agua potable y alcantarillado, y fomentar el reuso, promoviendo la participación de todos los usuarios del sector hidráulico (agricultores, ganaderos, industriales, ciudadanos, políticos, investigadores, etc.).

Finalmente, lo que proponen Pineda-Pablos *et al.* (2007) para Cananea, es aplicable a todos los organis-

mos que administran el agua, los cuales deberían tener un nuevo marco institucional donde el nombramiento de sus directivos no tenga carácter político, sino que esté sujeto a evaluación y avance de su desempeño. Asimismo, ellos sugieren que las tarifas y cobros del agua no dependan tampoco de decisiones políticas, sino de mecanismos de información, evaluación y vigilancia independientes.

RECONOCIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Dr. José Luis Moreno Vázquez de El Colegio de Sonora por la revisión del presente artículo y sus atinadas sugerencias.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrews, R.W., 1981, Salt-water intrusion in the Costa de Hermosillo, Mexico—a numerical analysis of water management proposals: *Ground Water*, v. 19, núm. 6, p. 635–647.
- Ariel Construcciones, S.A. (ACSA), 1968, Estudio hidrogeológico completo de los acuíferos del valle de Guaymas, Sonora: México, D.F., Informe técnico, tomos I y II, anexos I y II (inédito).
- Arizona Department of Water Resources (ADWR), 2001, Santa Cruz Active Management Area 1997-2001 Hydrologic Monitoring Report: Arizona, Hydrology Division, 44 p. (inédito).
- Arvizu-Núñez, Jesús y González-Enríquez, Rodrigo, 2005, Contaminación por lixiviados de un vertedero de residuos sólidos urbanos en una zona del acuífero del valle del Yaqui, Sonora: Asociación Geohidrológica Mexicana, V Congreso Nacional de Aguas Subterráneas, Hermosillo, Son., p. 29. (resumen).
- Barrón-Félix, M.R., 2005, El clima en Sonora, Conferencia impartida en el Departamento de Geología de la Universidad de Sonora: Hermosillo, Comisión Nacional del Agua, Gerencia Regional Noroeste, Septiembre 8, presentación en PowerPoint, 39 p. (inédita).
- Borgo-Valdez, Guadalupe, 2002, Modelación del avance de la intrusión salina en el acuífero del valle de Guaymas utilizando el programa Sharp: Hermosillo, Universidad de Sonora, División de Ingeniería, tesis de maestría, 75 p. (inédita).
- Canales-Elorduy, A.G., y Robles-Contreras, Fabián, 1997, Acuífero del valle del Mayo: Universidad de Sonora, I Seminario de Acuíferos Costeros de Sonora, Hermosillo, p. 90–92 (resumen).
- Cardona-Benavides, Antonio; González-López, Araceli; Lugo-Silva, Hugo; y Pérez-Morán, Arturo, 2005, Contaminación difusa del agua subterránea en el acuífero Costa de Hermosillo: Asociación Geohidrológica Mexicana, V Congreso Nacional de Aguas Subterráneas, Hermosillo, Son., p. 38.
- Castillo-Gurrola, José; Morales-Montaña, Mariano; Vega-Granillo, E.L.; Ríos-Angulo, M.A.; Muñoz-Caballero, Gloria; Sando-

- val-Inda, Rebeca; Rodríguez, J.C.; Martínez-Retama, Silvia; Ibarra-Córdova, Rubén; y Borgo-Valdez, Guadalupe, 2002, Disponibilidad y planeación del recurso agua en el municipio de Empalme, Sonora: Hermosillo, SIMAC-CONACYT, Clave: 990106512, informe técnico, 102 p. (inédito).
- Castro-García, J.A., 1998, Modelo numérico de intrusión salina en la costa de Hermosillo, Sonora, con base en estudios geofísicos: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica, tesis de maestría, 95 p. (inédita).
- Celaya, J.L., 2005, Panorama general de la calidad del agua en Sonora, COAPAES: Hermosillo, Foro 1, Agua hoy, agua de una vez por todas, Organizado por el PRI-Sonora, Auditorio del Centro de las Artes, Universidad de Sonora, 2 y 3 de Diciembre 2005, presentación en PowerPoint, 14 diapositivas (inédita).
- Celis-Salgado, Patricia, 1992, Diagnóstico de la contaminación del agua en el estado de Sonora: Hermosillo, Ecología, Recursos Naturales y Medio Ambiente en Sonora, p. 165–187.
- Cervera-Gómez, L.E., 1995, Estudio de balance de agua en la Cuenca Binacional del Río Santa Cruz: Nogales, Sonora: El Colegio de la Frontera Norte, informe técnico, 84 p. (inédito).
- CEA, 2004, Estudios y proyectos para la rehabilitación y mejoramiento de pequeñas áreas hidroagrícolas productivas en la Cuenca del Río San Miguel, dentro del municipio de Rayón, Sonora: Hermosillo, Comisión Estatal del Agua, <http://www.ftpcea.com/docs/estudios/09_rehabilitacion_rayon_informe.pdf>, acceso libre, fecha de consulta 26 de junio de 2007, 26 p. (en línea).
- CEA, 1995, Clasificación de acuíferos y disponibilidad de aguas subterráneas en el estado de Sonora: Hermosillo, Comisión Nacional del Agua, Gerencia Estatal en Sonora, Subgerencia Administración del Agua, informe técnico, 94 p. (inédito).
- CEA, 2007, Disponibilidad de agua del acuífero Sonoyta-Puerto Peñasco: Hermosillo, Comisión Estatal del Agua, Comunicación personal, Junio 2007.
- CNA, 2006, Programa Nacional Hidráulico 2001–2006, El agua—un recurso estratégico y de seguridad nacional: México, D.F., Comisión Nacional del Agua <http://sgh.conagua.gob.mx/site/upload/archivo/Agua_Recurso_3.pdf>, acceso libre, fecha de consulta 6 de noviembre de 2010, p. 45–57 (en línea).
- CNA, 2002a, Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Valle de Guaymas, Estado de Sonora: México, D.F., Comisión Nacional del Agua, Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas, Subgerencia de Evaluación y Modelación Hidrogeológica, <http://www.cna.gob.mx/eCNA/Espaniol/Programas/Subdirecciones/HtmlGAS/disp_gas/pdf_docs/Valle%20de%20Guaymas.pdf>, acceso libre, fecha de consulta 14 de septiembre de 2006, 27 p. (en línea).
- CNA, 2002b, Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Río Sonora, Estado Sonora: México, D.F., Comisión Nacional del Agua, Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas, Subgerencia de Evaluación y Modelación Hidrogeológica, <http://www.cna.gob.mx/eCNA/Espaniol/Programas/Subdirecciones/Html-GAS/disp_gas/pdf_docs/Rio%20Sonora.pdf>, acceso libre, fecha de consulta 14 de septiembre de 2006, 42 p. (en línea).
- CNA, 2002c, Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Río Zanjón, Estado Sonora: México, D.F., Comisión Nacional del Agua, Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas, Subgerencia de Evaluación y Modelación Hidrogeológica, 30 p. <http://www.cna.gob.mx/eCNA/Espaniol/Programas/Subdirecciones/Html-GAS/disp_gas/pdf_docs/Rio%20Zanjón.pdf>, acceso libre, fecha de consulta 14 de septiembre de 2006 (en línea).
- CNA, 2002d, Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Río San Miguel, Estado de Sonora: México, D.F., Comisión Nacional del Agua, Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas, Subgerencia de Evaluación y Modelación Hidrogeológica, <http://www.cna.gob.mx/eCNA/Espaniol/Programas/Subdirecciones/Html-GAS/disp_gas/pdf_docs/Rio%20San%20Miguel.pdf>, acceso libre, fecha de consulta 14 de septiembre de 2006, 38 p. (en línea).
- CNA, 2005a, Disponibilidad media anual: México, D.F., Comisión Nacional del Agua, Acuíferos del Estado de Sonora, Menú principal-Disponibilidad-Agua subterránea <<http://www.cna.gob.mx/eCNA/Espaniol/Directorio/Default.aspx>>, acceso libre, fecha de consulta 19 de abril de 2006 (en línea).
- CNA, 2005b, Programa Ambiental 2000-2006, Restauración ambiental de la Bahía de Guaymas: Comisión Nacional del Agua, Hacia el Foro Mundial del Agua, Hermosillo, Sonora, presentación en PowerPoint, 41 p. (inédita).
- CNA, 2005c, Salinidad del agua subterránea de Sonora (Cuenca del Río Santa Cruz): México, D.F., Comisión Nacional del Agua, <<http://www.cna.gob.mx/eCNA/Espaniol/Directorio/Default.aspx>>, Menú principal-Calidad-Red de agua subterránea, acceso libre, fecha de consulta 18 de abril de 2006 (en línea).
- CONAGUA, 2005, Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Cuchujaqui (2643), Estado de Sonora: México, D. F., Comisión Nacional del Agua, Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas, Subgerencia de Evaluación y Modelación Hidrogeológica, informe técnico, 25 p. (inédito)
- CONAGUA, 2006, Datos meteorológicos y de paros de bombeo de los acuíferos de Caborca, Costa de Hermosillo, Guaymas y El Yaqui: Hermosillo, Comisión Nacional del Agua, Gerencia Estatal en Sonora, Subgerencia Administración del Agua, archivos digitales (inéditos).
- CONAGUA, 2010, Estadísticas del agua en México: Comisión Nacional del Agua, <http://www.agua.org.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=11169:estadisticas-del-agua-en-mexico-edicion-2010&catid=1128:estadisticas&Itemid=100062>, acceso libre, fecha de consulta 9 de noviembre de 2010, 257 p. (en línea).
- CNA, 2001-2006, Programa Nacional Hidráulico 2001-2006, El agua—un recurso estratégico y de seguridad nacional: México, D.F., Comisión Nacional del Agua <http://sgh.conagua.gob.mx/site/upload/archivo/Agua_Recurso_3.pdf>, acceso libre, fecha de consulta 6 de noviembre de 2010, p. 45–57 (en línea).

- CAS (Consultores en Agua Subterránea), 2000, Actualización del estudio geohidrológico de las cuencas del Río San Pedro y norte del Río Sonora en Cananea, Son.: Grupo México, Mexicana de Cananea, Memoria, 9, 4 p.
- Contreras-Montijo, F.M., 1986, Comportamiento del acuífero del Río San Pedro, Cananea, Sonora: Hermosillo, Universidad de Sonora, Departamento de Geología, tesis profesional, 42 p. (inédita).
- Espinoza-Ojeda, Eligio, 2003, Evaluación de riesgo a la salud por exposición a arsénico en agua potable en poblados de la costa agrícola de H. Caborca, Sonora: Hermosillo, México, Universidad de Sonora, División de Ingeniería, tesis de maestría, 79 p. (inédita).
- GEG, 2000, Estudio de actualización geohidrológica del acuífero del Valle del Río Zanjón, Municipios de Carbó, San Miguel de Horcasitas y Hermosillo, Sonora: Geofísica de Exploraciones Guysa, Asociación Cuenca Zanjón, informe técnico, 264 p. (inédito).
- Gómez-Álvarez, Agustín; Villalba-Atondo, A.I.; y Romero-Acosta, A.A., 1997, Estudio de la contaminación por metales pesados en el agua superficial del río San Pedro, Sonora, México: Universidad de Sonora, Departamento de Geología, Boletín, v. 14, núm. 2, p. 1–16.
- González-Enríquez, Rodrigo, 1999, Modelo hidrogeológico conceptual del acuífero del Valle del Yaqui, Sonora: Universidad de Sonora, Departamento de Agricultura y Ganadería, III Seminario de Acuíferos Costeros de Sonora, Empalme, Sonora, p. 73–77 (resumen).
- González-Enríquez, Rodrigo, 2002, Geofísica de los acuíferos costeros del sur de Sonora *en*: Universidad de Sonora, Departamento de Agricultura y Ganadería, VI Seminario de Acuíferos Costeros de Sonora, Poblado Morelos (La Atravesada), Sonora, p. 17–19 (resumen).
- González-Enríquez, Rodrigo, y Canales-Elorduy, A.G., 1995, Contaminación por plaguicidas en el acuífero del Valle del Yaqui, *in* Restrepo, I., ed., Agua, salud y derechos humanos: México, D.F., Comisión Nacional de Derechos Humanos, p. 203–219.
- González-Enríquez, Rodrigo, y Canales-Elorduy, A.G., 1997, Alternativas para reducir la presencia de manganeso en el agua potable para Guaymas-Empalme, procedente del acuífero del valle aluvial del Río Yaqui, Sonora, México: Universidad de Sonora, Departamento de Agricultura y Ganadería, I Seminario de Acuíferos Costeros de Sonora, Hermosillo, p. 83 (resumen).
- Herrera-Carbajal, Socorro, 2005, Estudio hidrológico de la Cuenca del Río San Pedro, Sonora, utilizando el Modflow: Hermosillo, Universidad de Sonora, División de Ingeniería, tesis de maestría, 109 p. (inédita).
- Herrera, J.C.; Unland, H.; Pulido, L.; Zavala, M.; Ojeda, W.; y De León, B., 2002, Tecnificación y reconversión productiva del distrito de riego 037 Altar-Pitiquito-Caborca, Sonora <<http://chac.imta.mx/instituto/historial-proyectos/rd/2002/RD3-Tecnificacion.pdf>>, acceso libre, fecha de consulta 8 de noviembre de 2010, p. 55-61 (en línea).
- Herrera-Revilla, Ismael; Cruickshank-Villanueva, Carlos; Yates, Robert; y Munch, D.E., 1985, Ampliación a la modelación matemática de las fuentes de abastecimiento para el suministro de agua en bloque a las ciudades de Guaymas, Empalme y San Carlos, Sonora: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México-Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, informe técnico, 86 p. (inédito).
- Herrera-Revilla, Ismael; Rodríguez-Castillo, Ramiro; Medina-Bañuelos, Rodrigo; y Hernández-García, Guillermo, 1990, Simulación de alternativas de explotación del acuífero del Valle de Guaymas, Sonora: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica, informe técnico, 24 p. (inédito).
- Herrera-Salazar, J.E., y Vega-Granillo, E.L., 2005, Modelo conceptual y balance hidrológico superficial de la parte alta de la Subcuenca Río Sonora-Banamichi, *in* Rodríguez-R., R.; López-D., R.; y Castro-L., J.: Actas INAGEQ, v. 11, núm. 1, p. 14 (resumen).
- Infante-Reyes, J.A., 1997, Estudio geohidrológico de los acuíferos en el Valle del Río Mayo, Sonora: Universidad de Sonora, I Seminario de Acuíferos Costeros de Sonora, Hermosillo, p. 85-89. (resumen).
- Ingram, Helen, 1998, El abastecimiento de agua en las ciudades del desierto—conflictos entre la sustentabilidad del medio ambiente, los valores de la comunidad y los imperativos económicos: El Colegio de Sonora, Foro Hermosillo y el Agua—infraestructura hidráulica, servicios urbanos y desarrollo sustentable, Pineda-Pablos, Nicolás (comp.), Hermosillo, 13 de marzo de 1998, 145 p.
- IMTA, 2004, Actualización del estudio geohidrológico del Valle del Mayo, Sonora: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, TH-0417, Martínez-Morales, Manuel, Historial de proyectos <<http://chac.imta.mx/instituto/historial-proyectos/listado-th.php?anio=2004>>, acceso libre, fecha de consulta 8 de noviembre de 2010 (en línea).
- INEGI, 1993, Estudio hidrológico del Estado de Sonora: México, D.F., Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, Secretaría de Programación y Presupuesto, 81 p.
- INEGI, 2000, Síntesis de Información Geográfica del Estado de Sonora: Aguascalientes, Ags., Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, Secretaría de Programación y Presupuesto, 88 p.
- Leyva-Martínez, J.P., 2005, Determinación de los volúmenes de extracción de agua subterránea con base en el consumo de energía eléctrica en pozos de la Costa de Hermosillo: Asociación Geohidrológica Mexicana, Hermosillo, Sonora, V Congreso Nacional de Aguas Subterráneas, p. 79 (resumen).
- López-Ibarra, J.A., 1993, Aplicación de un modelo numérico al acuífero de Guaymas, Sonora: Ciudad Obregón, Sonora, Instituto Tecnológico de Sonora, Departamento de Ingeniería Civil, tesis profesional, 128 p. (inédita).
- López-Tánori, Alberto, 2002, Construcción de redes de flujo para calcular gastos subterráneos del acuífero del Valle de Guaymas, Sonora: Hermosillo, Universidad de Sonora, Departamento de Ingeniería Civil, tesis profesional, 69 p. (inédita).
- Montes de Oca-Ponce de León, J.F., 1989, Detección de la presencia de bario en el agua subterránea en la franja costera del Valle de Guaymas, Sonora: Hermosillo, Universidad de So-

- nora, Escuela de Agricultura y Ganadería, tesis profesional, 67 p. (inédita).
- Moreno-Vázquez, J.L., 1995, El agua en Sonora—escasa, mal utilizada y contaminada, *in* Restrepo, I., ed., Agua, salud y derechos humanos: México, D.F., Comisión Nacional de Derechos Humanos, p. 221-257.
- Moreno-Vázquez, J.L., 2000, Apropiación y sobreexplotación del agua subterránea en la Costa de Hermosillo 1945-2000: Guadalajara, Universidad de Guadalajara, Centro de Investigaciones y Estudios Superiores, tesis doctoral, 393 p. (inédita).
- NOM, 1994, NOM-127-SSA1-1994: Salud ambiental, agua para uso y consumo humano—límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización: Norma Oficial Mexicana <<http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/127ssa14.html>>, acceso libre, fecha de consulta 9 de noviembre de 2010 (en línea).
- Ojeda-De la Cruz, Arturo, 1994, Explotación futura del acuífero del Valle de Caborca, Sonora: Monterrey, Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Civil, tesis de maestría, 111 p. (inédita).
- Pineda-Pablos, Nicolás, 1998, Comentarios al artículo de Helen Ingram, Nancy K. Laney y David M. Gillilan, 1995, *Divided Waters: Bridging the U.S.-Mexico Border*, The University of Arizona Press, Tucson, Arizona, 262 p.: Región y Sociedad, v. 9, núm. 15, p. 187-193.
- Pineda-Pablos, Nicolás; Browning-Aiken, A.; y Wilder, M., 2007, Equilibrio de bajo nivel y manejo urbano del agua en Cananea, Sonora: Revista Frontera Norte, Enero-Junio, v. 19, 39 p.
- Rangel-Medina, Miguel; Minjárez-Sosa, J.I.; Monreal-Saavedra, Rogelio; Gutiérrez-Heredia, R.E.; y Grijalva-Noriega, F.J., 2005, Geoquímica de la salinidad y origen del agua subterránea en el acuífero del Valle del Yaqui, Sonora, México: Asociación Geohidrológica Mexicana, V Congreso Nacional de Aguas Subterráneas, Hermosillo, p. 113-114 (resumen).
- Reyes-Martínez, Amelia, y Quintero-Soto, M.L., 2009, Problemática del agua en los distritos de riego por bombeo del estado de Sonora: Revista Digital Universitaria, v. 10, núm. 6,., <<http://www.revista.unam.mx/vol.10/num8/art51/art51.pdf>>, acceso libre, fecha de consulta 9 de noviembre de 2010, 19 p (en línea).
- Rodríguez-Castillo, Ramiro; Prol-Ledesma, R.M.; Durazo, Jaime; y Flores-M., Leticia, 1985, Estudio tectónico, geoquímico y geotérmico del acuífero del Valle de Guaymas, Son.: México, D. F., Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica, Departamento de Exploración, informe técnico, 61 p. (inédito).
- Roldán-Quintana, Jaime; Mora-Klepeis, Gabriela; Calmus, Thierry; Valencia-Moreno, Martín; y Lozano-Santa Cruz, Rufino, 2004, El graben de Empalme, Sonora, México—magmatismo y tectónica extensional asociados a la ruptura inicial del Golfo de California: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 21, núm. 3, p. 320-334.
- SEDESOL (Secretaría de Desarrollo Social-Delegación Sonora), 1994, Diagnóstico preeliminar de la calidad del agua de la cuenca del río Concepción-Arroyo Cocóspera en el municipio de Magdalena de Kino, Sonora: Hermosillo, Estudios Sociales, Revista de Investigación del Noroeste, v. 9, p. 103-139.
- Tapia-Padilla, Gabriela, 2000, Formulación de un modelo preliminar para el estudio de intrusión salina en el acuífero del Valle de Guaymas: Hermosillo, Universidad de Sonora, Departamento de Ingeniería Química y Metalurgia, tesis profesional, 54 p. (inédita).
- Tapia-Padilla, Gabriela, 2005, Aplicación de Modflow para la simulación hidrogeológica estacionaria de una porción de la Cuenca del Río Santa Cruz, Sonora: Hermosillo, Universidad de Sonora, División de Ingeniería, tesis de maestría, 97 p. (inédita).
- Técnicas Geológicas y Mineras, 1989, Estudio de evaluación de la disponibilidad de agua y definición de explotación en el Valle del Río Santa Cruz con fines de abastecimiento de agua a la ciudad de Nogales, Son.: CNA, Contrato VI-89-313-D, 173 p., *in* Tapia-Padilla, Gabriela, 2005, Aplicación de Modflow para la simulación hidrogeológica estacionaria de una porción de la Cuenca del Río Santa Cruz, Sonora: Hermosillo, Universidad de Sonora, División de Ingeniería, tesis de maestría, 97 p. (inédita).
- TMI (Técnicas Modernas de Ingeniería), 1975, Interpretación de datos y determinación del potencial actual del acuífero en la Costa de Guaymas, Sonora: México, D. F. Secretaría de Recursos Hidráulicos, Contrato I.C.S. 75-2, Tomos I, II y III, X-7 p.
- UNISON (Universidad de Sonora), 2000, Estudio geohidrológico del comportamiento del acuífero mediante la realización de pruebas de bombeo y conceptualización a detalle de la intrusión salina en el acuífero de la Costa de Hermosillo: México, D. F., Comisión Nacional del Agua, Tomos I y II, V-6 p.
- UNISON (Universidad de Sonora), 2001, Estudio de cuantificación de la recarga del acuífero “Costa de Hermosillo”, Municipio de Hermosillo, Sonora: México, D. F., Comisión Nacional del Agua, Contrato SGT-GRNO-SON-01-026-CE-13, Tomos I y II, XII-7 p.
- UNISON 2003a, Estudio de actualización geohidrológica del acuífero “Valle del Yaqui”, Municipio de Cajeme, Sonora: Hermosillo, Universidad de Sonora, Informe final, Dto. Riego Río Yaqui, 147 p. (inédito).
- UNISON, 2003b, Piezometría y censo de aprovechamientos de los acuíferos ubicados en las partes medias de las cuencas de los ríos Yaqui y Mayo, Sonora: Hermosillo, Universidad de Sonora, Informe final, 65 p. (inédito).
- UNISON (Universidad de Sonora), 2005, Estudio geohidrológico de las Subcuencas de los Ríos Sonora, Zanjón, San Miguel, Mesa del Seri-La Victoria y Cuenca Bacoachito: Hermosillo, Comisión Estatal del Agua, Informe final, 11-9 p. (inédito).
- Vega-Granillo, E.L., 1992, Estudio hidrogeoquímico de la Cuenca del Río Mátape, Sonora con énfasis en la presencia de bario: Ciudad Obregón, Sonora, Instituto Tecnológico de Sonora, Maestría en Ingeniería (Administración de Recursos Hidráulicos), tesis de maestría, 81 p. (inédita).
- Vega-Granillo, E.L.; Canales-Elorduy, A.G.; Varela-Campos, Gabriel; y Quiñonez-Pineda, J.A., 2005, Control de la intrusión salina por medio de barreras de pozos: Universidad de Sono-

ra, Departamento de Geología, 30 Semana Cultural, Hermosillo, p. 3-4 (resumen).

Vega-Granillo, E.L.; Ochoa-Landín, M.E.; Durán-Calles, G.Y.; y Ruiz-Vega, F.L., 2004, Nuevos datos sobre la calidad del agua subterránea de la Cuenca del Río Mátape (2000-2004): Actas INAGEQ, v. 10, núm. 1, p. 2-7 (resumen).

Velázquez-Aguirre, Luis, y Ordaz-Ayala, Anselmo, 1993-1994, Provincias hidrogeológicas de México: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, v. 52, núms. 1-2, p. 15-33.

Vega G., E.L., Canales E., A.G., Varela C., G., Quiñonez, J.A., 2005, Control de la intrusión salina por medio de barreras de pozos (resumen), en 30 Semana Cultural Departamento de Geología: Hermosillo, Son., 3-4.

Vega G., E.L., Ochoa L., M.E., Durán C., Y., Ruiz V., F.L., 2004, Nuevos datos sobre la calidad del agua subterránea de la Cuenca del Río Mátape (2000-2004) (resumen) en Actas INAGEQ, 10(1), 2-7.

Velázquez, L. y Ordaz, A., 1993-1994, Provincias hidrogeológicas de México: México, D.F., Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Tomo L11, No. 1 y 2, 15-33.

GLOSARIO DE HIDROGEOLOGÍA

Acuífero: Roca o sedimento en una formación, grupo de formaciones, o parte de una formación que está saturada y es suficientemente permeable para transmitir cantidades económicas de agua a pozos y manantiales.

Acuífero libre o no confinado: Acuífero en el cual no hay capas confinantes entre la zona de saturación y la superficie. Debe haber un nivel freático.

Acuífero confinado: Acuífero que está sobreyacido por una capa confinante, la cual tiene una permeabilidad hidráulica significativamente más baja que la del acuífero.

Acuífero semiconfinado: Acuífero confinado por una capa de baja permeabilidad que permite que el agua se mueva lentamente a través de ella. Durante el bombeo del acuífero, la recarga al acuífero puede ocurrir a través de la capa confinante.

Acuitardo: Unidad de baja permeabilidad que puede almacenar agua subterránea y también transmitirla lentamente de un acuífero a otro.

Acuífero sobreexplotado: Embalse subterráneo en el cual la extracción de agua se ha hecho a un ritmo mayor que el de la recarga media del mismo.

Agua residual: Agua de composición variada proveniente de las descargas de usos municipal, industrial, comercial, agrícola, pecuario, doméstico y, en general, de cualquier otro uso.

Caudal o gasto: Es el volumen de líquido que pasa a través de una sección por unidad de tiempo (L^3T^{-1}).

Coefficiente de almacenamiento: Volumen de agua liberado o añadido a un acuífero por unidad de superficie del acuífero y por unidad de variación de carga hidráulica (adimensional).

Conductividad eléctrica: Capacidad de una sustancia de conducir la corriente eléctrica; es la inversa de la resistencia. Se mide en siemens por metro ($S \cdot m^{-1}$).

Conductividad hidráulica: Coeficiente de proporcionalidad que describe la tasa a la cual el agua puede moverse a través de un medio poroso. Para determinarla se debe considerar la densidad y la viscosidad cinemática del agua. También se le conoce como permeabilidad hidráulica.

Contaminación del agua: Acción y efecto de introducir materia o inducir condiciones en el agua que impliquen una alteración de su calidad perjudicial en relación con sus usos posteriores o función ecológica.

Cuenca hidrológica: Área rodeada por un parteaguas dentro de la cual todos los escurrimientos confluyen para formar una sola corriente y que se extiende aguas abajo hasta el punto en que cruza el parteaguas.

Demanda bioquímica de oxígeno (DBO): Mide el oxígeno disuelto utilizado por los microorganismos para degradar biológicamente la materia orgánica (M/T).

- Descarga de un acuífero:** Volumen de agua que en un tiempo dado sale del embalse subterráneo naturalmente (manantial, evapotranspiración, alimentación a ríos o al mar), o artificialmente (norias o pozos).
- Escasez de agua:** Poca cantidad de agua.
- Escurrimiento:** Volumen o caudal de agua que pasa por un punto determinado en un tiempo dado ($L^3 T^{-1}$).
- Evaporación:** Fenómeno físico en el que el agua pasa de líquido a vapor. Se mide a través de tanques de evaporación o evaporímetros (L). La evapotranspiración es la consideración conjunta de evaporación y transpiración (fenómeno biológico por el que las plantas pierden agua a la atmósfera). Se mide con lisímetros (L).
- Infiltración:** Volumen de agua (lluvia, ríos o recarga artificial) que atraviesa la superficie del terreno en un tiempo dado y ocupa los poros del suelo o roca (L).
- Intrusión marina o salina:** Penetración del agua del mar en un acuífero costero. Movimiento de agua salada tierra adentro, desplazando al agua dulce.
- Isótopos del agua:** Los isótopos estables pesados de oxígeno (^{18}O) y deuterio (2H o D) se usan como trazadores del origen del agua subterránea, dado que su contenido se conserva, una vez que el agua entra al acuífero.
- Modelo matemático de un acuífero:** Representación virtual del medio físico en una computadora que, mediante las operaciones adecuadas, calcula la evolución de los niveles de agua y el flujo producido en los incrementos de tiempo solicitados.
- Nivel freático:** Profundidad a la que se halla la cima del agua freática; es decir, el agua acumulada en el subsuelo que se puede aprovechar por medio de pozos (del griego φρέατος [freatos]; pozo).
- Noria:** Aprovechamiento de gran diámetro y poca profundidad que se utiliza para extraer agua subterránea.
- Origen meteórico:** Procedencia de las aguas debido a la acción de meteoros o agentes atmosféricos o climáticos actuales o pasados.
- Parteaguas:** Límite entre cuerpos superficiales de agua. Se representa por un área topográficamente alta.
- Permeabilidad intrínseca:** Propiedad de un medio poroso que permite el movimiento de líquidos y gases bajo la acción combinada de la gravedad y la presión. Se mide en darcies (D) o milidarcies (mD).
- Porosidad:** Relación entre el volumen de intersticios en una muestra dada de un medio poroso (suelo) y el volumen bruto del medio poroso, incluidos los huecos (%).
- Precipitación:** Agua meteórica que se acumula sobre la superficie terrestre, en cualquier estado (lluvia, nieve, granizo, rocío y escarcha). Se registra en pluviómetros o pluviógrafos instalados en estaciones climatológicas (L) y se expresa como precipitación total anual (suma de la precipitación de todos los meses del año) o precipitación media (promedio de la precipitación total).
- Provincia fisiográfica:** Formación, o conjunto de ellas, en la que influyen la tectónica, las estructuras, la litología, la erosión y la sedimentación.
- Provincia hidrogeológica:** Formación o estrato acuífero que se deposita en similares condiciones geológicas y geomorfológicas.
- Recarga natural:** Volumen de agua que entra en un embalse subterráneo (acuífero) durante un período de tiempo, debido a la infiltración de las lluvias o de un curso de agua.

Región hidrológica: Superficie de una cuenca o de un conjunto de ellas con características hidrológicas similares.

Rendimiento específico o porosidad eficaz: Volumen de agua que se puede obtener de un medio poroso saturado; es igual al volumen de agua drenada por gravedad entre el volumen total (%).

Sequía: Reducción temporal notable del agua y la humedad disponibles, por debajo de la cantidad normal o esperada para un período dado. La sequía es temporal y la aridez es una característica climática permanente de regiones con lluvia escasa.

Tipos de río: Intermitente (el que tiene escurrimiento superficial solamente en alguna época del año), perenne o permanente (el que tiene un escurrimiento superficial que no se interrumpe en ninguna época del año, desde donde principia hasta su desembocadura).

Transmisividad o transmisibilidad: Tasa a la cual el agua, de una densidad y viscosidad predominan-

tes, es transmitida a través de un ancho unitario de un acuífero o capa confinante bajo un gradiente hidráulico unitario. Está en función de las propiedades del líquido, del medio poroso y del espesor de este último ($L^2 T^{-1}$).

Unidad geohidrológica: Región con similaridad, tanto en las características físicas de las unidades litológicas que la forman, como en su comportamiento en el subsuelo. Se clasifica por el material que contiene: consolidado (roca), no consolidado (suelo) y por su grado de permeabilidad (baja, moderada, alta).

Uso del agua: Empleo específico que se da al agua; por ejemplo, agrícola (agua del territorio nacional destinada a la actividad de siembra, cultivo y cosecha de productos agrícolas) o doméstico (agua del territorio nacional destinada al uso particular de las personas y del hogar, riego de jardines, árboles y abrevadero de animales domésticos que no constituya una actividad lucrativa).
