



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA
GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO COSTA DE HERMOSILLO (2619),
ESTADO DE SONORA**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1. GENERALIDADES	2
Antecedentes	2
1.1. Localización.....	2
1.2. Situación administrativa del acuífero	4
2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD.....	5
3. FISIOGRAFÍA	7
3.1. Provincia fisiográfica	7
3.2. Clima	8
3.3. Hidrografía	9
3.4. Geomorfología.....	9
4. GEOLOGÍA.....	10
4.1. Estratigrafía.....	12
4.2. Geología estructural	16
4.3. Geología del subsuelo.....	18
5. HIDROGEOLOGÍA.....	19
5.1. Tipo de acuífero.....	19
5.2. Parámetros hidráulicos.....	20
5.3. Piezometría	20
5.4. Comportamiento hidráulico	21
5.4.1. Profundidad al nivel estático	21
5.4.2. Elevación del nivel estático	22
5.4.3. Evolución del nivel estático	22
5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea	23
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA.....	24
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	24
7.1. Entradas.....	25
7.1.1. Recarga vertical (Rv).....	25
7.1.2. Entradas por flujo subterráneo horizontal de agua dulce (Ed).....	26
7.1.3. Entradas por flujo subterráneo horizontal de agua salobre (Ehs).....	27
7.1.4. Recarga incidental(Rr)	27
7.2. Salidas	28
7.2.1. Bombeo (B)	28
7.2.2. Salidas de agua salobre por bombeo (Ssb)	28
7.3. Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$	28
8. DISPONIBILIDAD.....	30
8.1. Recarga total media anual (R)	30
8.2. Descarga natural comprometida (DNC)	30
8.3. Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)	31
8.4. Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	31
9. BIBLIOGRAFÍA	32

1. GENERALIDADES

Antecedentes

La Ley de Aguas Nacionales (LAN) y su Reglamento contemplan que la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) debe publicar en el Diario Oficial de la Federación (DOF), la disponibilidad de las aguas nacionales, en el caso de las aguas subterráneas esto debe ser por acuífero, de acuerdo con los estudios técnicos correspondientes y conforme a los lineamientos que considera la “NORMA Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, Conservación del recurso agua- Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales”. Esta norma ha sido preparada por un grupo de especialistas de la iniciativa privada, instituciones académicas, asociaciones de profesionales, gobiernos estatales y municipales y de la CONAGUA.

La NOM establece para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas la realización de un balance de las mismas donde se defina de manera precisa la recarga, de ésta deducir los volúmenes comprometidos con otros acuíferos, la demanda de los ecosistemas y el volumen de extracción de aguas subterráneas.

Los resultados técnicos que se publiquen deberán estar respaldados por un documento en el que se sintetice la información, se especifique claramente el balance de aguas subterráneas y la disponibilidad de agua subterránea susceptible de concesionar.

La publicación de la disponibilidad servirá de sustento legal para la autorización de nuevos aprovechamientos de agua subterránea, transparentar la administración del recurso, planes de desarrollo de nuevas fuentes de abastecimiento, resolver los casos de sobreexplotación de acuíferos y la resolución de conflictos entre usuarios.

1.1. Localización

El acuífero Costa de Hermosillo, definido con la clave 2619 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción centro occidental del estado de Sonora, entre los paralelos 28°19'51" y 30°06'53" de latitud norte y 110°49'48" y 112°14'14" de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 15,300 km². Limita al oeste con el Golfo de California; al norte con los acuíferos Arivaipa, Caborca, Magdalena y La Tinaja; al noreste y este con Río Zanjón; al sureste con los acuíferos, Mesa del Seri-La Victoria y La Poza; al sur con Valle de Guaymas y Sahuaral; al oeste limita también con Arivaipa, todos

ellos pertenecientes al estado de Sonora. Al suroeste su límite natural es el Golfo de California (figura 1).

Geopolíticamente, la superficie del acuífero comprende la mayor parte del municipio de Hermosillo; parcialmente los municipios de Pitiquito y Carbó, aso como porciones menores de Guaymas, San Miguel de Horcasitas y La Colorada.



Figura 1. Localización del acuífero

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

Tabla 1. Coordenadas de la poligonal simplificada que delimitan al acuífero

ACUIFERO 2619 COSTA DE HERMOSILLO							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	112	2	27.5	28	52	55.5	
2	111	59	32.6	28	53	46.9	
3	112	3	48.0	29	5	29.9	
4	112	14	11.3	29	24	30.6	
5	112	6	44.2	29	28	59.8	
6	112	1	52.7	29	28	26.8	
7	111	51	24.5	29	43	40.9	
8	111	50	56.4	29	49	2.1	
9	111	49	10.9	29	52	27.9	
10	111	42	7.3	29	53	37.2	
11	111	39	40.1	29	59	45.5	
12	111	29	0.9	30	6	5.7	
13	111	22	55.5	30	6	51.6	
14	111	20	11.2	29	52	34.2	
15	111	23	38.8	29	49	22.8	
16	111	14	39.5	29	45	28.8	
17	111	8	3.7	29	39	22.3	
18	111	5	59.4	29	28	18.8	
19	110	58	18.0	29	11	31.5	
20	110	56	20.1	29	9	30.7	
21	110	56	41.3	28	58	47.5	
22	110	54	55.1	28	54	1.9	
23	110	56	25.3	28	49	13.9	
24	110	49	46.4	28	38	17.3	
25	110	55	28.7	28	31	41.5	
26	110	57	39.5	28	30	29.8	
27	111	3	38.8	28	26	47.6	
28	111	9	23.2	28	26	52.1	
29	111	12	10.4	28	33	37.0	
30	111	14	41.8	28	34	33.5	
31	111	18	56.2	28	28	15.4	
32	111	21	47.4	28	26	47.6	
33	111	27	19.6	28	19	50.0	DEL 33 AL 1 POR LA LINEA DE BAJAMAR A LO LARGO DE LA COSTA
1	112	2	27.5	28	52	55.5	

1.2. Situación administrativa del acuífero

El acuífero pertenece al Organismo de Cuenca Noroeste y al Consejo de Cuenca Alto Noroeste, instalado el 19 de marzo de 1999. Su territorio se encuentra totalmente vedado y sujeto a las disposiciones de cuatro decretos de veda. En la mayor parte rige "Decreto por el que se amplía el Distrito Nacional de Riego de la Costa de Hermosillo,

Estado de Sonora” publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 2 de marzo de 1963. Esta veda es tipo I en la que no es posible aumentar las extracciones sin peligro de abatir peligrosamente o agotar los mantos acuíferos.

En una superficie mayor, que se sobrepone sobre él área de la veda anterior, está vigente el *“Decreto por medio del cual se amplía la zona de veda para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la Costa de Hermosillo, Son.”*, publicado en el DOF el 2 de junio de 1967. Esta veda es tipo II, en la que la capacidad de los mantos acuíferos sólo permite extracciones para usos domésticos. En la región norte rige el *“Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos del Estado de Sonora, para el mejor control de las extracciones, alumbramiento y aprovechamiento de las aguas del subsuelo, en dicha zona”* conocido como Meridiano 110, publicado en el DOF el 19 de septiembre de 1978. Esta veda se clasifica como tipo II, en la que la capacidad de los mantos acuíferos sólo permite extracciones para usos domésticos. En una pequeña área del extremo sur rige el *“Decreto que establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas del subsuelo en los terrenos de la zona de Cieneguillas, Son.”*, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 2 de octubre de 1956. Esta veda es tipo III en la que la capacidad de los mantos acuíferos permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua, vigente para el año 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 1. El uso principal del agua subterránea es el agrícola. En la porción centro-sur de su territorio se localiza el Distrito de Riego 051 “Costa de Hermosillo”, y no se ha constituido a la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS). En la zona costera de Bahía de Kino se localiza el sitio RAMSAR “Humedales de la Laguna La Cruz”, decretado el 2 de febrero de 2013.

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la superficie que cubre el acuífero se han realizado algunos estudios geohidrológicos de evaluación, algunos de cobertura regional, entre los más importantes se distinguen los siguientes:

ESTUDIO PARA LA ESTIMACIÓN DE VOLÚMENES DE AGUA SUBTERRÁNEA EXTRAÍDOS PARA USO AGRÍCOLA EN LAS ZONAS DE: COSTA DE HERMOSILLO, SONORA Y JANOS CHIHUAHUA, APLICANDO TÉCNICAS DE PERCEPCIÓN REMOTA. Realizado en 1999 por el Colegio de Postgraduados de Chapingo para la Comisión

Nacional del Agua. Su objetivo general fue definir una metodología que permitió evaluar en forma rápida y regional las superficies agrícolas regadas, utilizando sensores remotos y las herramientas para medir esas áreas con la información que proporcionan las imágenes de satélite en varias bandas del espectro electromagnético, así como el software para su procesamiento mediante el uso de computadora.

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. Realizado en el año 2000 por Consultores en Ingeniería Geofísica, S.A. de C.V. (CIGSA). para la Universidad de Sonora. Sus objetivos fueron determinar la litología a detalle, las características hidráulicas del acuífero y la distribución espacial de la salinidad del agua subterránea en sectores específicos de la planicie costera del acuífero Costa de Hermosillo; y evaluarlo hidrológicamente y conceptualizar a detalle la intrusión salina y las perspectivas futuras del comportamiento de los niveles hidrodinámicos, así como el comportamiento de la intrusión salina en la zona costera.

ESTUDIO DE CUANTIFICACIÓN DE LA RECARGA DEL ACUÍFERO COSTA DE HERMOSILLO, MUNICIPIO DE HERMOSILLO, SONORA. Realizado en 2001 por la Universidad de Sonora, para la Comisión Nacional del Agua. Su objetivo principal fue plantear el balance de aguas subterráneas, definiendo y evaluando cada una de sus componentes, para determinar su disponibilidad y potencial. Señala el modelo conceptual de funcionamiento del acuífero e identifica la evolución de los volúmenes de extracción de agua subterránea. Incluye actividades de campo como: censo de aprovechamientos, nivelación de brocales, toma de muestras de agua para análisis fisicoquímicos y ejecución de prueba de bombeo.

SITUACIÓN ACTUAL DE LA INTRUSIÓN MARINA EN EL ACUÍFERO COSTA DE HERMOSILLO, SONORA. Informe interno elaborado en 2012 por la Gerencia de Aguas Subterráneas, SGT, CONAGUA. Es un documento que forma parte de una serie de 18, elaborados para los acuíferos costeros que presentan intrusión marina, con el propósito de atender el Programa Nacional Hídrico 2007-2012, que en su Objetivo 7 establece la necesidad de evaluar los efectos del cambio climático en el ciclo hidrológico y en la estrategia 3 de dicho objetivo menciona que se deberá promover y apoyar la investigación, el desarrollo y la transferencia tecnológica, en materia de medidas de adaptación ante el cambio climático y específicamente la elaboración de

estudios sobre vulnerabilidad, escenarios y posibles impactos y opciones de solución a la intrusión salina en acuíferos. Presenta información hidrogeológica general del acuífero que permite el análisis de los factores de vulnerabilidad a la intrusión marina, de acuerdo con una metodología de evaluación cuantitativa desarrollada por la misma Gerencia, definir las condiciones actuales y su posición. Adicionalmente, evalúa de manera conservadora el impacto económico de la intrusión marina.

INFORMACIÓN PIEZOMÉTRICA DEL ACUÍFERO COSTA DE HERMOSILLO, SONORA.

Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca Noroeste, 2019. Se utilizó la información piezométrica para la elaboración de las configuraciones del nivel estático.

3. FISIOGRAFÍA

3.1. Provincia fisiográfica

De acuerdo a la clasificación fisiográfica de Erwin Raisz (1959), modificada por Ordoñez (1964), el área que cubre la totalidad del acuífero se localiza en la Provincia Fisiográfica “Sierras Sepultadas”. Según la regionalización fisiográfica del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), el acuífero se localiza en la Provincia Fisiográfica Desierto o Llanura Sonorense, Subprovincia Sierras y Llanuras Sonorenses.

La Provincia Fisiográfica Sierras Sepultadas se caracteriza por presentar sierras con orientación NW-SE, que limitan valles rellenos por potentes espesores de conglomerados mal consolidados y material aluvial, producto de la tectónica distensiva del Terciario Medio que afectó al NW de México.

La Provincia Llanura Sonorense se extiende de sur a norte desde Arizona, EUA hasta el sur del estado de Sonora, abarcando gran parte de las regiones costeras. Gran parte de su extensión consta de sierras bajas paralelas de bloques fallados, orientadas burdamente nornoroeste-sursureste, y separadas unas de otras por llanuras cada vez más amplias y bajas hacia el Golfo de California. Presenta amplias superficies planas con suave pendiente hacia el mar, frente a las que destacan cerros profundamente erosionados, colinas y sierras bajas, rodeados de conos aluviales muy tendidos.

La Subprovincia Sierras y Llanuras Sonorenses es una de las dos que integran la provincia, está formada de sierras bajas separadas por llanuras. Las sierras son más elevadas varían de 700 a 1 400 msnm y son más estrechas (rara vez más de 6 km de ancho) en el oriente; y más bajas (de 700 msnm o menos) y más amplias (de 13 a 24 km) en el occidente. En ellas predominan las rocas intrusivas ácidas y en menor

proporción, en la región central, rocas volcánicas, metamórficas y calizas. Las llanuras representan alrededor de 80% de la subprovincia; están cubiertas en la mayor parte o en toda su extensión de amplios abanicos aluviales (bajadas) que descienden con pendientes suaves desde las sierras colindantes.

3.2. Clima

Con base en la clasificación y distribución de climas del INEGI (1998) y de acuerdo con los criterios de clasificación de Köppen, modificada por Enriqueta García (1981).

Se determina que el clima que predomina en la mayor parte de la superficie que cubre el acuífero es BWh(x') muy árido, semicálido, con temperatura media anual entre 18 y 22°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C y temperatura del mes más caliente mayor de 22°C.

Las lluvias se encuentran repartidas todo el año y el porcentaje de lluvia invernal mayor de 22°C al 18% del total anual. Hacia el sureste el clima es BW(h')(x'), muy árido y cálido con temperatura media anual mayor de 22°C y temperatura del mes más frío mayor de 18°C. Lluvias repartidas todo el año y porcentaje de lluvia invernal mayor al 18% del total anual.

En la porción norte el clima es BSoh(x') árido, semicálido con temperatura entre 18°C y 22°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C, temperatura del mes más cálido mayor de 22°C. Las lluvias repartidas todo el año y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.

El régimen pluvial presenta en términos generales dos periodos de ocurrencia, uno de junio a septiembre correspondiente a la temporada de verano que es cuando se registran los valores más altos y otro de lluvias invernales que abarca de diciembre a febrero, con precipitaciones menos significativas, provocadas principalmente por los frentes fríos que afectan la región. La temperatura media anual presenta valores extremos de 3°C como mínima y 40°C como máxima; la temporada de lluvias tiene lugar entre los meses de junio a octubre, destacando el mes de agosto como el más lluvioso.

Para la determinación de las variables climatológicas se cuenta con información de 10 estaciones climatológicas, 5 ubicadas dentro del acuífero: El Carrizal, María del Carmen, Campo Experimental UNISON, Bahía de Kino y Félix Gómez y 5 en su área de influencia: Pesqueira, Hermosillo I, Carbó, Zamorita y Torres; cuyo registro comprende

el periodo 1981-2015. Con base en esta información, se determina que los valores promedio anual de temperatura, precipitación y evaporación potencial son **22.3 °C**, **309 mm** y **2488 mm**, respectivamente.

3.3. Hidrografía

El acuífero Costa de Hermosillo se encuentra ubicado en su totalidad en la Región Hidrológica 9 “Sonora Sur”, dentro de las cuencas del Río Sonora y Río Bacoachi, subcuencas Laguna San Bartolo, El Carrizal, A. El Bajío, A. La Manga, A Los Pápagos y La Playa Noriega.

El rasgo hidrográfico más notable es el río Sonora, que se origina en la Sierra de Cananea, presenta una orientación N-S hasta el poblado de Mazocahui, en donde cambia bruscamente de dirección hacia el suroeste, hasta verter sus aguas en la presa Rodolfo Félix Valdez, que controla las avenidas provenientes de las partes altas y después son drenadas hacia la presa Abelardo L. Rodríguez y es ahí donde el río San Miguel se le une por su margen derecha.

El río San Miguel de Horcasitas nace al norte de la comunidad de Cucurpe, presenta una orientación N-S hasta las cercanías de Rayón, donde cambia al suroeste hasta la ciudad de Hermosillo; el afluente más importante es el río Zanjón captado por la margen derecha.

La parte baja de la cuenca del río Sonora es drenada por un sistema de arroyos con dirección NE-SW, siguiendo el patrón topográfico de la planicie deltaica.

En la cuenca del río Bacoachi su principal escurrimiento es el arroyo Bacoachi, el cual se origina en el flanco sur de la Sierra Jojoval hasta que su cauce desaparece poco antes de llegar a la costa, cerca de la playa San Bartolo.

3.4. Geomorfología

De acuerdo a la clasificación de Lugo Hubp (1990) el acuífero se localiza en la Provincia de Sonora. Se trata de una región que fue afectada por orogenias en el Precámbrico, el Paleozoico y el Mesozoico. En ella predomina una planicie aluvial y de pie de monte, sobre la que se asientan montañas, las cuales son de menores dimensiones, en área y altura, hacia la costa y aumentan hacia el oriente; producto de la deposición de los sedimentos acumulados por el río Sonora desde Hermosillo hasta la costa. El relieve consiste de una planicie con sedimentos aluviales, de pie de monte y eólicos

interrumpidos por conjuntos de inselbergs que presentan superficies residuales con laderas empinadas y en proceso de destrucción por movimientos de gravedad favorecidos por su pendiente y la meteorización física; predominan rocas ígneas intrusivas, rocas lávicas, metamórficas, calizas antiguas y conglomerados del Terciario.

La geomorfología del acuífero Costa de Hermosillo es producto de patrones geológicos estructurales resultante de la tectónica que han sufrido las rocas a través del tiempo geológico. Las grandes estructuras geológicas (fallas y estructuras) son las que controlan la mayoría de los cambios en la dirección de las principales corrientes de las cuencas, ya que los ríos siguen estas zonas de debilidad.

Estructuralmente la cuenca del río Sonora presenta como patrón regional un sistema de fallas paralelas en dirección general NW-SE, el cual corresponde al tipo Basin and Range Sonorense. La cuenca baja del río Sonora, tiene su máxima elevación topográfica cerca al nacimiento del río Bacoachi y el más bajo es el nivel del mar.

Es drenada por un sistema de arroyos consecuentes intermitentes, que han dejado marcas de drenaje orientadas NE-SW, siguiendo el patrón topográfico de la planicie deltaica. En la cuenca baja los afloramientos están cortados y sepultados por el relleno sedimentario de la planicie aluvial del Río Sonora, sin embargo, tanto al norte como al sur de ésta, se observa la continuidad del sistema estructural descrito por Couch y otros (1991).

4. GEOLOGÍA

A nivel regional afloran rocas con edades que varían del Precámbrico al Holoceno. Las rocas más antiguas se localizan en la porción noroeste, están representadas por un complejo metamórfico del Proterozoico Inferior (esquistos, gneises, cuarcitas y anfibolitas) y constituyen el basamento cristalino de la región. En la misma porción, aflora un segundo conjunto representado por granitoides del Proterozoico Medio constituido por un granito porfídico con deformación a augen gneis milonítico y por ortogneis cuarzo feldespático de biotita. En la Sierra de Mazatán ha sido fechado en $1,475 \pm 29$ Ma (Damon y Radelli, 1986) (figura 2).

En la porción noreste se presentan rocas intrusivas graníticas precámbricas, que intrusionan a la unidad anterior y que por sus características litológicas son correlacionables con el Granito Aibó, fechado por Anderson y Silver (1971) en 1,100 Ma. De esta misma edad, existen areniscas, calizas, areniscas y dolomías que afloran en las porciones centro-noreste, centro y centro-sureste. En la porción centro-noreste

Stoyanow (1942), con base en la identificación de restos fósiles de arrecifes de algas *Collenia*, las ubicó en el Proterozoico Superior. En la porción central se tienen afloramientos en la localidad Ranchito de Aguilar-La Palma, donde se les asignó una edad del Proterozoico Superior con base en la presencia de estromatolitos en las dolomías de la parte superior de la secuencia. La secuencia paleozoica que sobreyace discordantemente consiste principalmente de calizas y areniscas depositadas en un ambiente de plataforma. Sus afloramientos se agrupan en dos franjas: la primera con orientación NW-SE se extiende desde el poblado El Saucito hasta la ciudad de Hermosillo; la segunda franja tiene una orientación norte-sur y se extiende desde el oriente del Poblado Carbó hasta el Rancho Las Norias, ubicado al oriente de Hermosillo. Por su importancia destaca una tercera zona de remanentes paleozoicos localizados en la porción oriental de la carta, en las sierras de Aconchi, Mazatán y La Cañada. Las edades de estas rocas varían desde el Cámbrico hasta el Pérmico.

Las rocas mesozoicas que sobreyacen discordantemente están representadas por rocas con edades que varían desde el Triásico Medio al Cretácico Superior. El Triásico Medio está representado principalmente por areniscas y calizas que afloran en la Sierra La Flojera ubicada hacia el oriente de Hermosillo, donde fueron encontrados pelecípodos del género *Halobiasp.* (Rodríguez, 1981), con rango del Triásico Medio al Superior.

El Jurásico Inferior sobreyace discordantemente y está representado por dos secuencias; una vulcanosedimentaria constituida por andesitas y areniscas y otra sedimentaria representada por areniscas y calizas que afloran en el extremo noroeste y al noroeste de Hermosillo. Sobreyaciendo discordantemente aflora una secuencia de calizas, areniscas, limolitas y conglomerados en la base, en la zona del poblado Cerro de Oro, al suroeste del poblado de Rayón y como techos colgantes sobre el batolito terciario en la Sierra Los Locos, al sur y noreste del rancho Los Taraises. Esta unidad es asignada al Cretácico Inferior por su abundante contenido de fósiles en las calizas, principalmente braquiópodos y orbitolinas.

Algunos autores la correlacionan con las rocas del Grupo Bisbee debido a su similitud litológica y contenido fosilífero. Sobreyaciendo discordantemente a estas rocas afloran secuencias de rocas volcánicas y vulcanosedimentarias representadas por andesitas y areniscas, con horizontes de calizas del Cretácico Superior, que afloran hacia el extremo noreste y al noreste del poblado de Rayón. Sobreyaciendo concordantemente a esta unidad se tiene una secuencia de andesitas y tobas

andesíticas del Cretácico Superior-Senoniano, correlacionable con la parte media de la Formación Tarahumara (Wilson y Rocha, 1946).

Sobreyaciendo concordantemente a la secuencia anterior, aflora en el área del Cerro Santo Verde una unidad constituida principalmente por riolitas y tobas riolíticas de edad Paleoceno-Eoceno. Se considera correlacionable con la parte superior de la Formación Tarahumara.

Durante el Cretácico Superior-Eoceno las rocas preexistentes fueron afectadas por una serie de intrusiones, representadas por granitos-granodioritas, monzogranitos, dioritas-granodioritas, pórfidos riolíticos, granitos de carácter peraluminoso con moscovita primaria y pórfidos cuarzomonzoníticos y andesíticos que forman parte de intrusivos laramídicos. Estas rocas intrusivas están distribuidas en casi toda el área y constituyen principalmente la Sierra de Aconchi, elemento geomofológico principal de la región.

Durante el Oligoceno se deposita discordantemente sobre las unidades eocénicas, rocas andesíticas y sobreyaciendo concordantemente a éstas, aflora una secuencia volcánica de tobas riolíticas y riolitas distribuida en forma aislada en la porción noroeste y ampliamente en una franja de rumbo norte-sur al centro de la zona.

En el Mioceno durante el evento distensivo y debido a la erosión de los bloques levantados, se deposita una alternancia de conglomerados polimícticos, areniscas y escasos lentes de basalto, conocida como Formación Báucarit (Dumble 1900, King 1939), que aflora con poco basculamiento en varias localidades. Esta formación sobreyace en discordancia a las rocas volcánicas del Terciario, a la secuencia vulcanosedimentaria del Cretácico y a las rocas intrusivas laramídicas; se encuentra parcialmente cubierta al oriente de Hermosillo por flujos de basalto y tobas riolíticas de edad Terciario Tardío. Finalmente se presentan conglomerados polimícticos mal consolidados, así como depósitos aluviales y lacustres de edad Cuaternaria que cubren a la Formación Báucarit y en algunas localidades a otras rocas preterciarias (Carta Geológico-Minera "Hermosillo" H12-8. Escala 1:250,000. SGM, 1999).

4.1. Estratigrafía

La estratigrafía de las unidades que afloran en la superficie cubierta por el acuífero comprende rocas con edades que varían del Precámbrico al Holoceno y están constituidas por rocas sedimentarias, ígneas intrusivas y volcánicas.

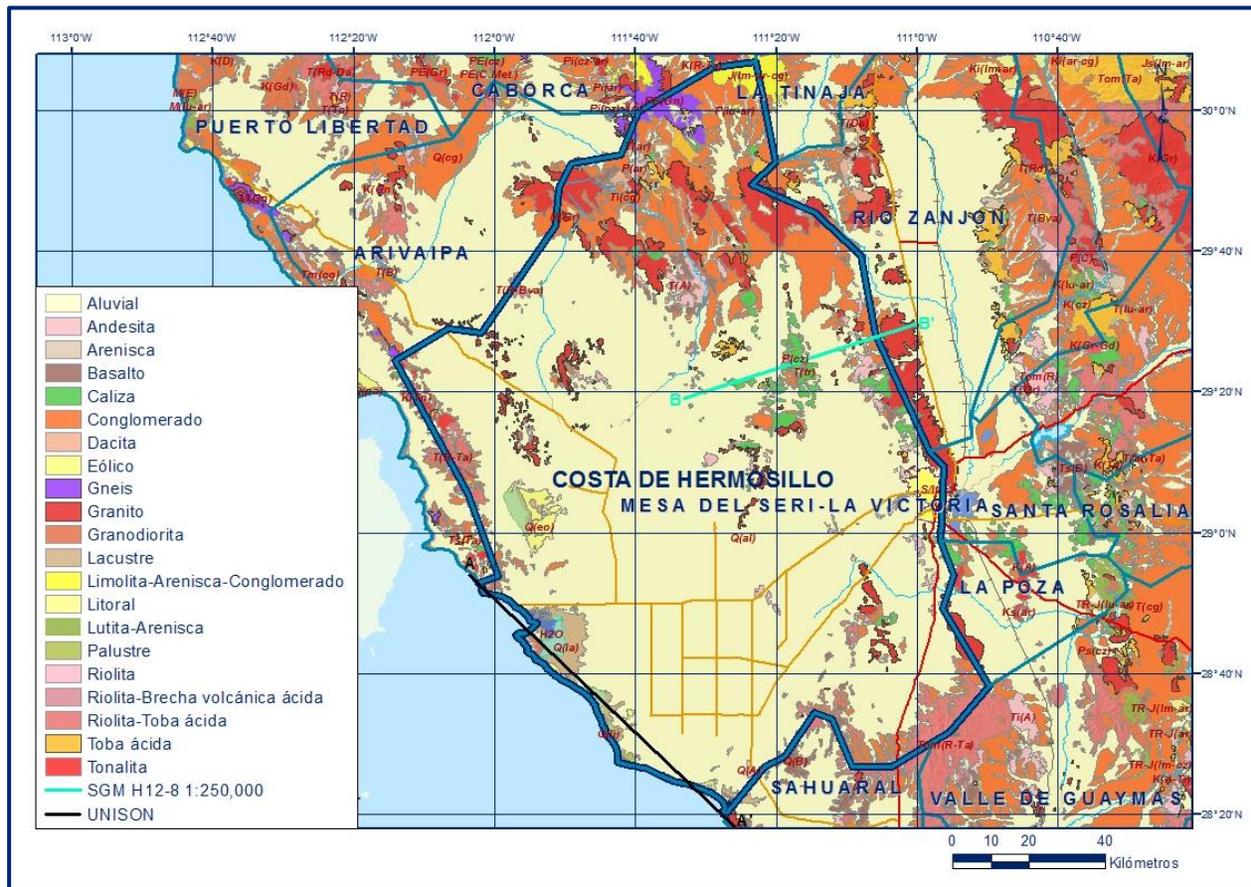


Figura 2. Geología general del acuífero

La descripción de las unidades litológicas expuestas en la superficie del acuífero fue realizada por el Servicio Geológico Mexicano en sus cartas Geológico Mineras “Hermosillo” y “Sierra Libre”, escala 1: 250,000. A continuación, se hace una breve descripción de cada una de ellas, de la más antigua a la más reciente:

PROTEROZOICO

Las rocas más antiguas afloran en el extremo norte del área, formando parte de un complejo metamórfico compuesto de esquistos, gneises, cuarcitas y anfibolitas. Estas rocas presentan un metamorfismo regional de grado hasta anfibolita y han sido asignadas tentativamente al Proterozoico Inferior (Hoffman 1989), aunque podrían ser un poco más antiguas. Están intrusadas por granitoides del Proterozoico medio, constituidos por un granito porfídico con deformación a augen gneismilonítico y por ortogneis cuarzofeldespático de biotita; estas rocas son equivalentes al “Granito Cananea”, fechado en 1,440 Ma (Anderson & Silver, 1977). Existen también rocas intrusivas graníticas precámbricas que intrusionan a la unidad anterior y que por sus

características litológicas son equivalentes al Granito Aibó, fechado por Anderson & Silver (1979) en 1,100 ma.

Todo este complejo ígneo-metamórfico es considerado el basamento y forma parte del cratón norteamericano.

A las rocas cristalinas anteriores les sobreyace en discordancia un conjunto sedimentario de plataforma somera compuesta de areniscas, calizas y dolomías; presentan fósiles arrecifales como *Collenia* y estromatolitos. Por su posición estratigráfica y su contenido faunístico, son asignadas al Proterozoico superior (Stoyanow, 1942).

PALEOZOICO

Está representado por rocas sedimentarias de plataforma somera: calizas y areniscas con o sin la presencia de lutitas y pedernal. Sus afloramientos se encuentran dispersos en el área del acuífero, desde el extremo norte en la Sierra de Santa Teresa, al oeste entre la Sierra Bacha y Sierra Seri, y en Hermosillo. Las edades de estas rocas varían del Cámbrico al Pérmico y se consideran discordantes sobre las rocas proterozoicas, aunque esta relación es dudosa, ya que puede existir una continuidad sedimentaria entre las rocas del Proterozoico Tardío y del Paleozoico.

MESOZOICO

TRIÁSICO

Representado por areniscas, calizas, limolitas y micro conglomerados que afloran en la Sierra La Flojera, cuya edad se ha asignado al Triásico Medio-Superior (Rodríguez-Castañeda, 1981). Al sur y al este se presentan paquetes de areniscas, calizas, lutitas y conglomerados a los que se ha incluido en el llamado Grupo Barranca; en esa región, estas rocas contienen niveles para la explotación de carbón mineral.

El contenido faunístico de esta secuencia en el área de San Marcial permiten asignarla al Triásico Superior-Jurásico Inferior (Wilson & Rocha, 1946). Es relevante hacer notar que, en el Cerro Prieto, Rodríguez-Castañeda (1981) menciona que las rocas triásicas contienen gran cantidad de terrígenos de origen volcánico, que representan la manifestación volcánica reportada en el Fanerozoico en esta región.

JURÁSICO

En el área las exposiciones de rocas jurásicas son escasas y espacialmente restringidas. En general, se pueden señalar tres zonas de exposición: en el extremo norte, en la costa y en la parte central, a unos 50 km al NW de Hermosillo. Está representado por dos unidades con base en su contenido litológico; una vulcanosedimentaria constituida por andesitas y areniscas y otra sedimentaria representada por areniscas, lutitas y calizas. Todas estas rocas han sido asignadas al Jurásico Inferior.

CRETÁCICO

Sobreyaciendo discordantemente a estas rocas afloran secuencias de rocas volcánicas de composición intermedia y vulcanosedimentarias: andesitas y areniscas con horizontes de calizas del Cretácico Superior, que afloran en la porción central. Sus exposiciones forman una franja orientada aproximadamente NW-SE. Otros afloramientos se localizan en el extremo sur al norte de Tastiota a unos 20 km al SE de Hermosillo. Estas rocas se correlacionan con la parte media de la Formación Tarahumara (Wilson&Rocha, 1946). Durante el cambio del Cretácico al Terciario esta región fue el escenario de una intensa actividad magmática, actualmente representada por una serie de rocas ígneas de afinidad granítica (granitos, dioritas y granitos-granodioritas), cuyas edades varían del Cretácico Tardío al Eoceno. Sin embargo. Desde un punto de vista petrogenético, se trata de una serie calcoalcalina emplazada en un ambiente de arco continental durante la "Orogenia Laramide". Para el área de Hermosillo varios autores han determinado edades de 64 Ma, la cual es aproximadamente la base del Paleoceno (Harland *et al.*, 1989).

TERCIARIO

En el Oligoceno se emplazaron importantes volúmenes de rocas volcánicas de composición félsica. Estas rocas se encuentran en afloramientos discontinuos, desde escasos kilómetros al oeste de Hermosillo, hasta el extremo norte del área. En algunas localidades, como en el norte del área de estudio, también existen andesitas. Las rocas del Mioceno han sido agrupadas en seis diferentes unidades.

En el extremo norte del área de estudio, existe una exposición relativamente amplia de una secuencia de conglomerados y areniscas, a la cual se conoce como Formación Báucarit. En el extremo sur existe una serie de lomeríos formados de riolitas, andesitas, dacitas, basalto, además de tobas riolíticas. Estas rocas volcánicas, de aparente afinidad calcoalcalina, parecen pertenecer al campo volcánico de la Sierra Libre. Al norte de Bahía Kino, por otra parte, afloran tobas andesíticas y dacíticas.

Adicionalmente, en algunas localidades aisladas también se presentan tobas riolíticas y basaltos, una asociación que muchos autores refieren como “vulcanismo bimodal”.

Las rocas pliocénicas reconocidas en el área son depósitos piroclásticos consistentes de brechas y tobas de composición dacítica a riolítica. Estas rocas yacen al norte de Bahía Kino, en donde están expuestas, cubiertas en ocasiones por aluvión y en otras erosionadas por los arroyos, los cuales exponen a las rocas más antiguas. Existen también coladas basálticas las cuales se encuentran en pequeños mogotes dispersos en el área.

CUATERNARIO

Los depósitos cuaternarios en el área consisten de sedimentos poco consolidados a no consolidados, los cuales cubren aproximadamente el 70% de la superficie. Estos depósitos han sido separados por su composición clástica y/o ambiente de depósito en: limos y arenas, conglomerados, aluvión, depósitos lacustres y eólicos. Su distribución geográfica y los ambientes sedimentarios actuales indican que las tres primeras unidades son producto de procesos aluviales, estos depósitos son los más ampliamente distribuidos en el área, ocupando las laderas de las sierras, los valles, los lechos de los ríos y arroyos.

Los depósitos lacustres, por su parte, se encuentran muy cerca de la costa. Parte de ellos ocupan la interface mar-continente, mientras que otros, podrían ser depósitos de antiguas cuencas endorreicas, integradas en tiempos relativamente recientes; tal es el caso de la “Playa de San Bartolo”, donde se encontraron restos de mega fauna continental del Pleistoceno superior (Lucas&Ortega Guerrero, 1998), aunque la edad reportada pertenece al Holoceno (Harland *et al.*, 1989, Cowie&Basset, 1989). Por último, los depósitos eólicos se presentan únicamente en la interfase mar-tierra, y parecen ser los sedimentos de playa retrabajados por los vientos costeros.

4.2. Geología estructural

Los principales eventos que han afectado a la región se iniciaron en el Proterozoico Temprano con la orogenia Mazatzal que deformó y metamorfizó a las secuencias de rocas preexistentes, constituyendo el basamento sobre el cual se depositó la secuencia carbonatada-clástica del Proterozoico Tardío. A finales del Proterozoico se produjo un evento regresivo que generó la depositación de una secuencia sedimentaria compuesta por ortocuarcitas, areniscas y lodolitas.

En el Paleozoico se tiene una estabilidad tectónica que permite la depositación de secuencias carbonatadas, con un lento hundimiento de la cuenca, interrumpido al inicio del Mesozoico.

Durante el Triásico Tardío-Jurásico Temprano se desarrolla una cuenca ligada a un arco volcánico, provocando un evento de metamorfismo regional que transformó los depósitos durante el Jurásico Medio-Tardío. Anderson y Silver (1979), consideran que se desarrolló una zona de corrimiento lateral izquierdo de dirección NW-SE (Megacizalla Mojave-Sonora) que al evolucionar generó movimientos compresivos que afectaron el arco magmático dando lugar a la yuxtaposición de las rocas pre-jurásicas sobre las post-jurásicas.

Durante el Cretácico Inferior, se presenta una transgresión, y aguas provenientes del Golfo de México cubren gran parte de Sonora, generándose el depósito de rocas carbonatadas con gran contenido faunístico, en la llamada cuenca de Chihuahua-Bisbee (Bilodeau, 1983). Posteriormente, inició una regresión marina que ocasionó la depositación de sedimentos clásticos continentales representada por areniscas, lutitas, limolitas y conglomerados. El Cretácico Medio se caracteriza por la presencia de una secuencia vulcanosedimentaria asociada a un arco volcánico continental, representada por andesitas, dacitas y riódacitas, con esporádicos lentes de areniscas y conglomerados. Durante el Cretácico Superior se inicia la Orogenia Laramide caracterizada por plegamientos y cabalgamientos de rocas sedimentarias del Precámbrico sobre rocas del Cretácico Inferior y el desarrollo de magmatismo calcoalcalino relacionado con la convergencia entre la placa de Farallón y la placa Norteamericana, evento representado por un intrusivo granítico que forma parte del Batolito de Aconchi (Roldan, 1982).

Este evento magmático fue seguido por eventos de menor magnitud que generaron apófisis y troncos de diferente composición. Durante el Terciario Medio se emplazaron rocas volcánicas félsicas en la fase final de la subducción de las placas Farallón y Norteamericana. Este evento volcánico fue seguido por el último periodo de extensión tectónica terciaria que ocasionó la formación de fallas normales, conformando bloques levantados y escalonados, que dieron origen a la morfología de sierras y valles elongados, principalmente de rumbo NW-SE asociados al extrabasamiento de magma fisural. Anderson (1989), sugiere que algunas fallas podrían ser parte del desarrollo de "Núcleos Complejos Metamórficos", cuyas manifestaciones de este tipo

de estructuras se presentan en la Sierra de Mazatán y al oriente de Opodepe (Carta Geológico-Minera “Hermosillo” H12-8. Escala 1:250,000. SGM, 1999).

4.3. Geología del subsuelo

De acuerdo con la información geológica, hidrogeológica y geofísica recabada en el acuífero, es posible definir que el acuífero está conformado por dos unidades que presentan conexión hidráulica entre ellas.

La porción superior está constituida por materiales clásticos de diferente granulometría y origen: gravas y arenas intercaladas con materiales finos, que conforman depósitos aluviales, de piedemonte, fluviales, eólicos, lacustres, de playa y de barra; en general de buena permeabilidad, que recargan a las unidades más profundas.

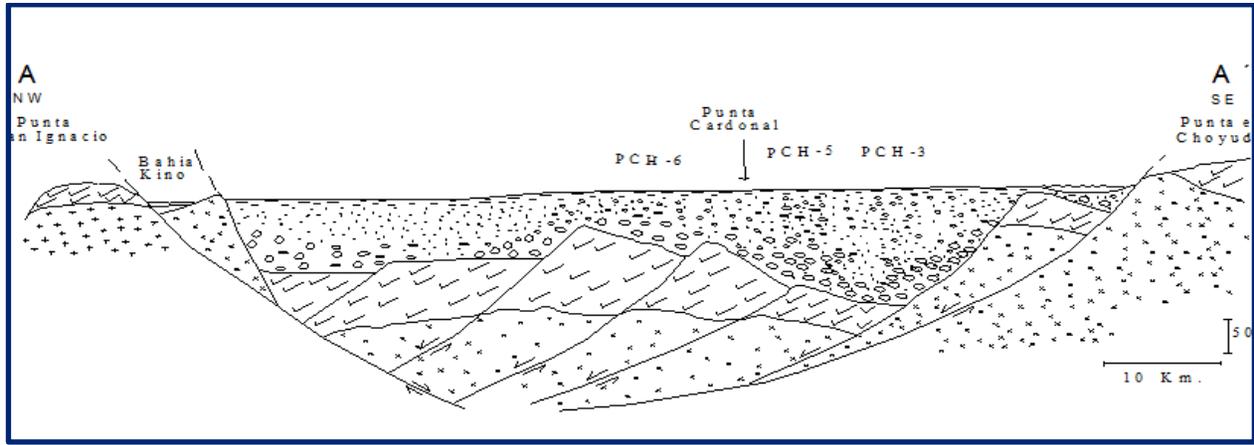
Su espesor promedio es de 300 m y es la unidad que se explota intensivamente y que ha mostrado los mayores abatimientos. La unidad inferior se aloja en los sedimentos clásticos de tipo conglomerático de la Formación Báucarit, compuesta por clásticos de rocas volcánicas (andesitas, riolitas y granitos), así como arenas gruesas y limos, dispuestos en capas delgadas que presentan estructura laminar. Estos depósitos se encuentran alternando con derrames volcánicos de composición basáltica y riolítica.

Estas dos unidades se encuentran divididas por capas, lentes y estratos de arcilla de color gris-azul, que contiene fósiles marinos, prácticamente impermeables, conocida regionalmente como “arcilla azul” cuyo espesor promedio varía de 180 a 340 (Monreal *et al.* 2000), aumentando gradualmente hacia la costa.

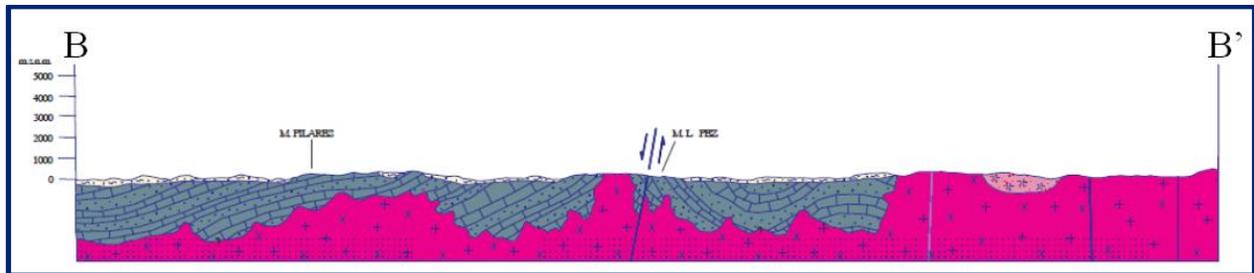
El basamento geohidrológico, así como las fronteras y barreras al flujo subterráneo, se encuentran constituidos por rocas intrusivas, extrusivas y metamórficas.

El acuífero se aloja en una cuenca sedimentaria que se formó como consecuencia de la generación de bloques caídos producidos por fallas normales orientadas NW-SE y NE-SW, desarrolladas probablemente durante la tectónica de “Basin and Range y durante la apertura del Golfo de California. Algunas de estas fallas han sido posiblemente reactivadas recientemente al final del Terciario e inicio del Cuaternario. Como resultado, el basamento y por lo tanto el espesor de los depósitos aluviales, son muy irregulares. La información de los cortes litológicos y los sondeos geofísicos permiten identificar la presencia del basamento en algunos lugares a 150 m y en otros

a mayores profundidades, que varían de 500 a 800 m, cuya morfología está controlada por un conjunto de altos topográficos (horst) y fosas tectónicas (figura 3).



FUENTE: UNISON (2000).



FUENTE: Carta Geológico-Minera: H12-8 "Hermosillo" Escala 1:250.000 (SGM, 1999).

Figura 3. Secciones Geológicas Esquemáticas

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1. Tipo de acuífero

Las evidencias geológicas, geofísicas e hidrogeológicas permiten definir la presencia de un acuífero **tipo libre**, con presencia de condiciones locales de semiconfinamiento debido a la existencia de sedimentos arcillosos a mayor profundidad, conformando un medio heterogéneo y anisotrópico, alojado en un sistema de fosas y pilares tectónicos. Debido a las condiciones de semi-confinamiento del acuífero granular, algunos autores propusieron la existencia de dos diferentes acuíferos; sin embargo, las evidencias actuales demuestran que existe un solo acuífero y debajo de esta unidad hidrogeológica, se encuentra agua muy antigua (agua fósil) almacenada en sedimentos detríticos marinos miocénicos y rocas volcánicas terciarias. El acuífero está integrado por dos unidades que presentan conexión hidráulica entre ellas.

La primera está constituida por materiales clásticos aluviales y fluviales de diferente granulometría y origen, intercalados con depósitos eólicos, litorales y lacustres, que en

general presentan buena permeabilidad dependiendo de su contenido de arcillas. La segunda unidad presenta condiciones de confinamiento y se aloja en los sedimentos clásticos de tipo conglomerático de la Formación Báucarit, cuya litología presenta derrames volcánicos de composición basáltica y riolítica. Las dos unidades se encuentran divididas por una capa de arcilla prácticamente impermeable, conocida como “arcilla azul”, cuyo espesor varía de 200 a 560 m, con un promedio de 180 a 340 m en la porción central del acuífero, aumentando gradualmente hacia la costa.

5.2. Parámetros hidráulicos

Para la estimación de los parámetros hidráulicos de las unidades geológicas que conforman el acuífero, se analizó la información de pruebas de bombeo, la mayoría de ellas de corta duración, que se han realizado como parte de estudios previos a lo largo de varias décadas (SARH, CONAGUA, UNISON).

De los resultados de su interpretación por métodos analíticos convencionales, se determina que los valores de transmisividad varían de **$10 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ a $2.5 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$** , dependiendo de la granulometría de los depósitos aluviales y fluviales. En términos generales, los valores decrecen de norte a sur, en la dirección del escurrimiento. Los valores más altos, de 7.0 a $10.0 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$, se presentan en la porción central del acuífero y al noreste del Distrito de Riego (zonas asociadas con el paleocauce del Río Sonora), disminuyendo gradualmente hacia la zona costera, hasta $1.0 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$, conforme aumenta el contenido de arcillas y la profundidad. Al oriente de Bahía Kino los valores varían entre 5.0×10^{-3} y $6.9 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$, en tanto que en la porción suroeste oscilan entre 2.5×10^{-3} y $3.5 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$.

Los valores de conductividad hidráulica varían **de 10.0 a 20.0 m/d (1.2×10^{-4} a $2.3 \times 10^{-4} \text{ m/s}$)**; en tanto que los valores reportados para el coeficiente de almacenamiento oscilan entre **2.0×10^{-4} y 1.1×10^{-4}** , en la zona oriental de Bahía de Kino y de **0.6×10^{-4} a 1.9×10^{-4}** para la porción suroeste del distrito de riego. El rendimiento específico se considera que varía de 6 a 15%.

5.3. Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, se cuenta con la información recabada como parte de las actividades del estudio realizado en el año 2000, además de registros históricos durante el periodo 1989-2019, obtenidos por el Organismo de Cuenca Noroeste, durante los paros de bombeo que realiza exprofeso

para ello. Para el planteamiento del balance de aguas subterráneas se eligió el periodo 2006-2019 que tiene mayor y mejor distribución espacial.

5.4. Comportamiento hidráulico

5.4.1. Profundidad al nivel estático

De acuerdo con la profundidad al nivel del agua subterránea, el año 2019 presentó valores que variaron de 30 a 135 m, los cuales se incrementan por efecto de la topografía de la zona costera y del cauce del río Sonora hacia las estribaciones de las sierras que limitan la planicie. Los niveles estáticos más someros, de 30 a 60 m, se registran en la porción sur del acuífero, a la altura de los poblados San Rafael, Cajeme y Bahía de Kino, desde donde se incrementan gradualmente hacia el norte y este, conforme se asciende topográficamente. Los más profundos, de 120 a 135 m, se presentan en la región centro-norte de la zona de explotación, ubicada al suroeste de la ciudad de Hermosillo y al suroeste de la localidad Siete Cerros (figura 4).

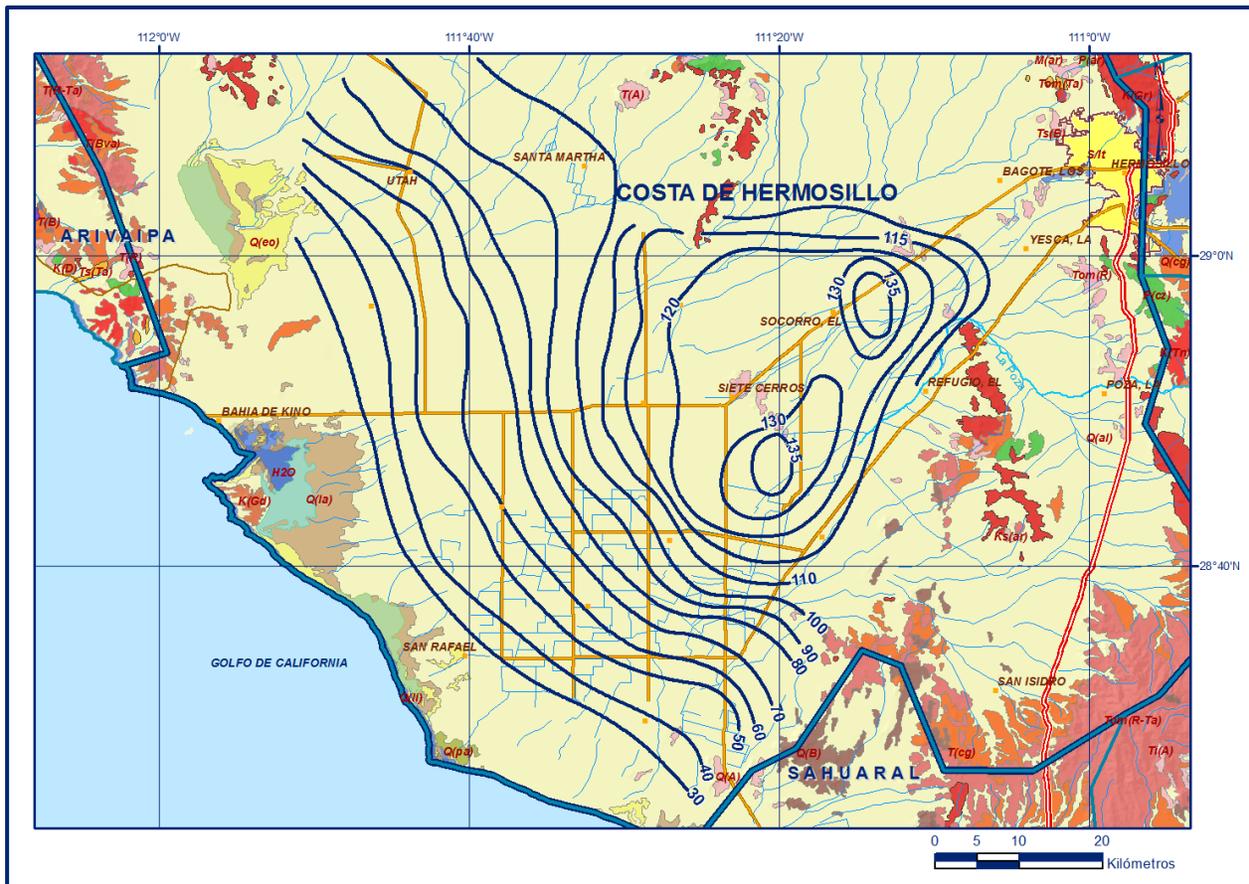


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2019)

5.4.2. Elevación del nivel estático

La elevación del nivel estático en 2019 registró valores que variaron de 40 a -60 msnm. En la mayor parte de la superficie de explotación se presentan elevaciones por debajo del nivel medio del mar debido al avance de la intrusión marina, excepto el extremo oriental, al suroeste de la ciudad de Hermosillo, en donde se registran valores 10 a 40 msnm, entre los poblados Europa y La Yesca, respectivamente.

En la porción central del acuífero, ubicada al noreste del poblado Cajeme, al este de Cuauhtémoc y al suroeste de Santa Martha, se presentan conos definidos por las curvas 40 a 60 msnm causados por la extracción intensiva y la intrusión marina; la curva cero se ha desplazado cerca de 70 kilómetros continente adentro con dirección noreste (figura 5).

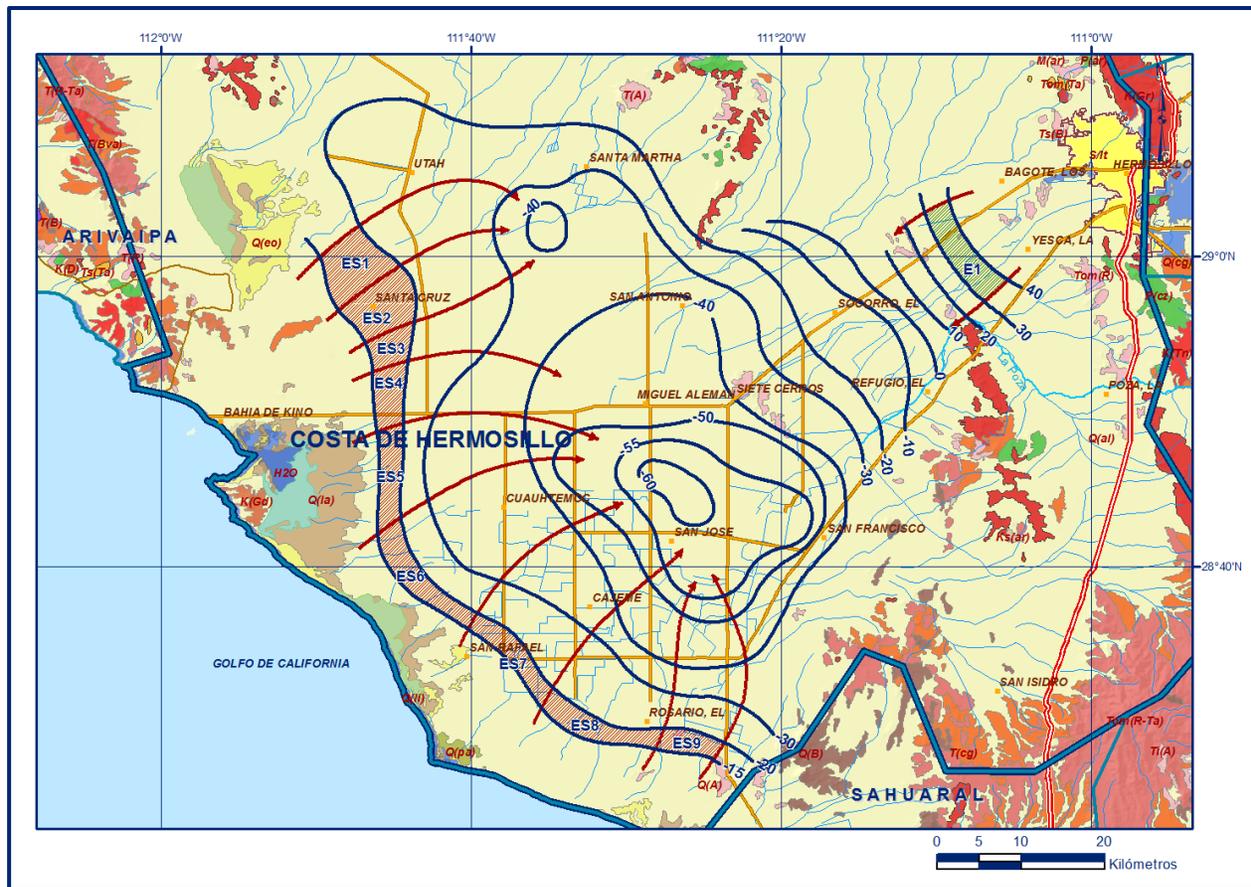


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2019)

5.4.3. Evolución del nivel estático

La configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2006-2019 registró valores de abatimiento que varían desde algunos centímetros, en toda la zona cercana

a la costa, hasta 10 y 25 m que se observaron en las zonas de mayor concentración de la extracción. Los mayores abatimientos de 10 a 25 m para el periodo analizado, que representan un ritmo anual de 0.8 y 1.9 m, se registran en la porción central ubicada al este los poblados Miguel Alemán y Siete Cerros. En la porción sur, a lo largo de la zona costera, el ingreso de agua salada genera recuperaciones del nivel del agua subterránea de 2 a 10 m, que representan 0.2 a 1.2 m anuales, que enmascaran y disminuyen los abatimientos promedio del acuífero (figura 6).

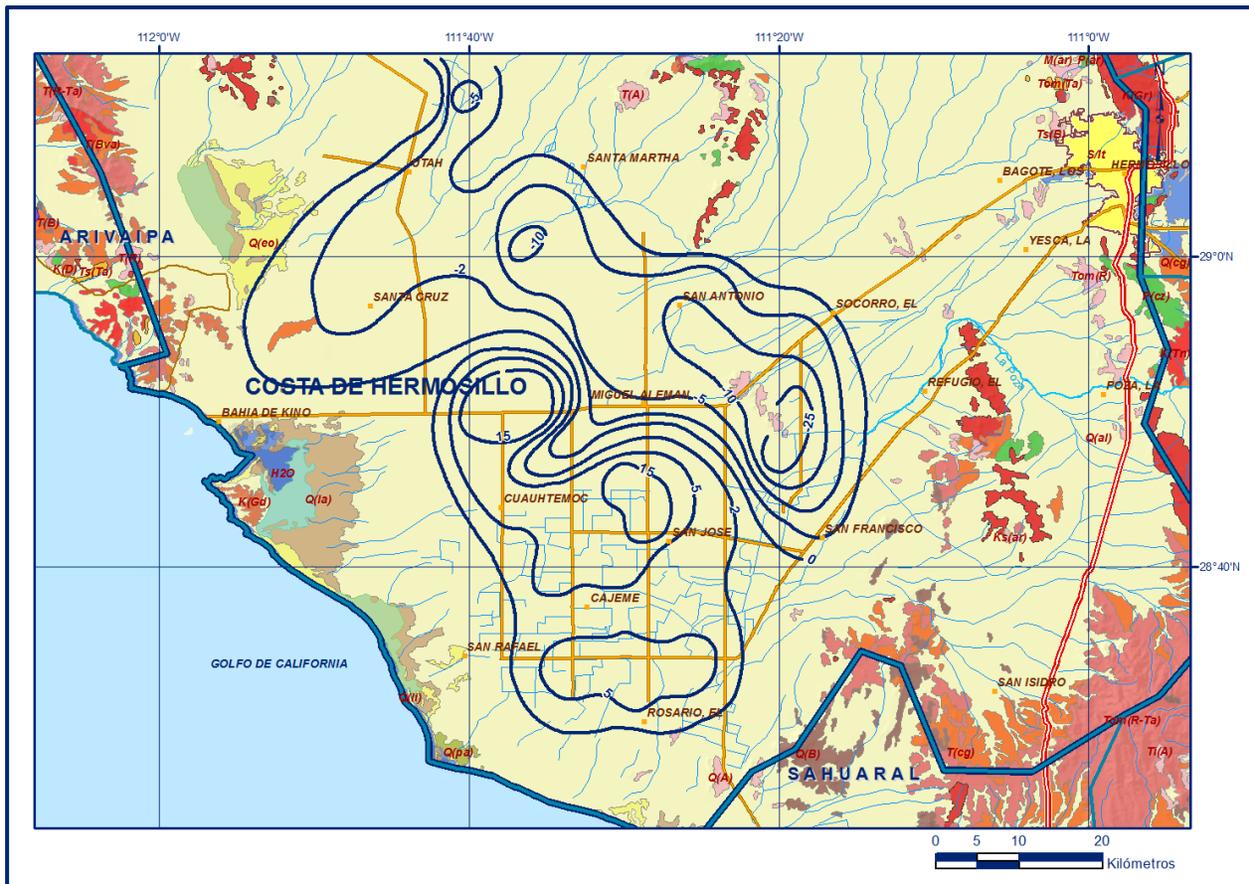


Figura 6. Evolución del nivel estático en m (2005-2018)

5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

De manera general, las concentraciones de los diferentes iones y elementos sobrepasaron los límites máximos permisibles que establece la Norma Oficial Mexicana, para los diferentes usos. La concentración de sólidos totales disueltos (STD) presenta valores que varían de 300 a 31500 mg/l. Las mayores concentraciones de STD se registran en la zona costera y las menores en la zona más cercana a la ciudad de Hermosillo, ubicada al noreste del acuífero, lo cual muestra la dirección preferencial del flujo subterráneo hacia el suroeste en dirección del mar.

Según la clasificación establecida por la American Public Health Association (APHA, 1995) el agua varía de dulce a marina, existiendo al menos 60 m de espesor promedio de está, ya que los valores oscilan entre 2900 y 40800 μ S/cm.

Con respecto a las familias del agua por ion dominante, predominan las familias cálcica-bicarbonatada y sódica-bicarbonatada hacia la ciudad de Hermosillo, que representan conductos preferenciales del agua subterránea asociados al antiguo cauce del río Sonora y por lo tanto a su condición de agua de reciente infiltración. Una zona de entre 20 y 40 km de amplitud, ubicada entre El Sahuaral y Bahía de Kino, en la que prevalecen dos facies de tipo sódico-clorurada y cálcica-clorurada, típicas de la franja costera influenciada por la intrusión marina. La porción noreste de la franja costera se caracteriza por aguas de tipo sódica-bicarbonatada, que corresponde a la zona de transición dentro del sistema, orientada en dos áreas de forma alargada que coinciden con los límites de la zona del antiguo cauce del río Sonora.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con la información del censo de aprovechamientos del año 2001, complementada con información 2022 del Registro Público de Derechos del Agua (REPDA) y volúmenes de extracción 2010-2022 del Distrito de Riego, proporcionada por el Organismo de Cuenca Noroeste, se registró la existencia de 920 aprovechamientos del agua subterránea, de cuales 817 son pozos y 103 norias. Del total de obras, 512 se utilizan para la agricultura, 100 para abastecimiento de agua potable a los centros de población, 283 para uso doméstico-pecuario, 13 para uso industrial y 12 para servicios.

El volumen total de extracción calculado es de **351.8 hm³/año**, de los cuales 338.9 hm³ (96.3 %) son para uso agrícola, 8.0 hm³ (2.3%) para uso público-urbano, 3.2 hm³ (0.9%) para satisfacer las necesidades del uso doméstico-pecuario, 1.5 hm³ (0.4%) para uso industrial y 0.2 hm³ (0.1%) para servicios.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de aguas subterráneas se planteó para el periodo 2006-2019, en una superficie de **4,239 km²**, que corresponde a la zona donde se cuenta con información piezométrica y en la que se localiza la mayoría de los aprovechamientos subterráneos. La diferencia entre la suma total de las entradas (recarga) y la suma total de las salidas (descarga), representa el volumen de agua perdido o ganado por el almacenamiento del acuífero, en el periodo de tiempo establecido. La ecuación general de balance, de acuerdo a la ley de conservación de la masa es la siguiente:

Entradas (E) - Salidas (S) = Cambio de masa

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

Recarga total - Descarga total = Cambio de almacenamiento

7.1. Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico del acuífero, la recarga total que recibe (R) ocurre por tres procesos naturales principales: por infiltración de agua de lluvia que se precipita en el valle y a lo largo de los ríos principales, que en conjunto se consideran como recarga vertical (Rv), y la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de una recarga por flujo horizontal subterráneo (Eh). Adicionalmente, debido a la intrusión marina, existe ingreso de agua salobre (Es) procedente de la franja costera.

De manera incidental, la infiltración de los excedentes del agua destinada al uso agrícola, que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela; del agua residual de las descargas urbanas y de las pérdidas en la redes de distribución de agua potable, constituyen otra fuente de recarga al acuífero (Ri). Para este caso, debido a que el volumen destinados al uso público-urbano es pequeño, para fines del balance de aguas subterráneas solo se considera la recarga incidental debida a los retornos del riego agrícola.

7.1.1. Recarga vertical (Rv)

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que se cuenta con información piezométrica para calcular el cambio de almacenamiento ($\Delta V(S)$) y para estimar las entradas y salidas por flujo subterráneo, su valor será despejado de la siguiente ecuación de balance:

$$Rv + Ed + Ri + Es - B - Ssb = \pm \Delta V(S) \quad (1)$$

Donde:

Rv: Recarga vertical

Ed: Entradas por flujo subterráneo horizontal (agua dulce)

Es: Entradas por flujo subterráneo horizontal salobre (agua salobre)

Ri: Recarga incidental

B: Bombeo

Ssb: Extracción de agua salobre

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

De esta manera, despejando la recarga vertical, se obtiene la siguiente ecuación:

$$Rv = B + Ssb \pm \Delta V(S) - Ed - Ri - Es \quad (2)$$

7.1.2. Entradas por flujo subterráneo horizontal de agua dulce (Ed)

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del acuífero se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través del pie de monte, para posteriormente recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de explotación. La recarga al acuífero tiene su origen en la precipitación pluvial sobre el valle y en la infiltración de los escurrimientos superficiales.

Para su cálculo se utilizó la configuración de elevación del nivel estático correspondiente al año 2019 mostrada en la figura 6. Con base en ella se seleccionaron canales de flujo y se aplicó la ley de Darcy para calcular el caudal “Q” en cada uno de ellos, mediante la siguiente expresión:

$$Q = T * B * i$$

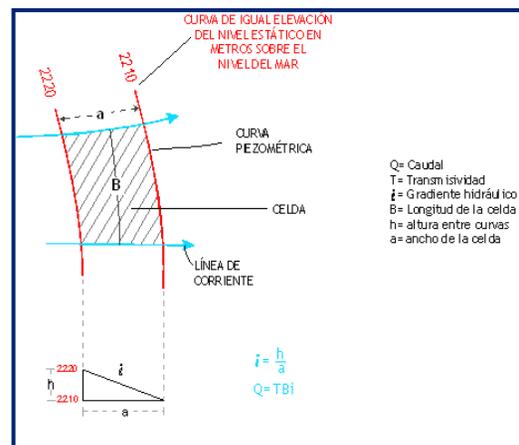
Donde:

Q: Caudal (m^3/s)

T: Transmisividad (m^2/s)

B: Longitud de la celda (m)

i: Gradiente Hidráulico (adimensional)



La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada una de las celdas establecidas, en la tabla 2 se observan los valores obtenidos en cada celda. El volumen total de entradas por flujo subterráneo horizontal de agua dulce es de **19.4 hm³/año**.

Tabla 2. Cálculo de las entradas por flujo subterráneo horizontal de agua dulce (2019)

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h_2-h_1 (m)	Gradiente i	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
Ed1	12110	2960	10	0.0034	0.0150	0.6137	19.4
TOTAL							19.4

7.1.3. Entradas por flujo subterráneo horizontal de agua salobre (Ehs)

Las entradas de agua salobre, por flujo subterráneo horizontal, fueron calculadas de la misma manera como se evaluaron las entradas subterráneas de agua dulce, a partir de la configuración de elevación del nivel estático, mostrada en la figura 6. El volumen total de entradas de agua salobre por flujo subterráneo horizontal es de **96.1 hm³/año** (tabla 3).

Tabla 3. Entradas por flujo subterráneo horizontal de agua salobre (2019)

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h_2-h_1 (m)	Gradiente i	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
Es1	6290	7240	5	0.0007	0.0350	0.1520	4.8
Es2	5700	7450	5	0.0007	0.0300	0.1148	3.6
Es3	4070	4285	5	0.0012	0.0250	0.1187	3.7
Es4	7185	3175	5	0.0016	0.0250	0.2829	8.9
Es5	11830	2420	5	0.0021	0.0200	0.4888	15.4
Es6	14825	2620	5	0.0019	0.0200	0.5658	17.8
Es7	12030	2245	5	0.0022	0.0200	0.5359	16.9
Es8	13395	2949	5	0.0017	0.0250	0.5678	17.9
Es9	6435	2858	5	0.0017	0.0200	0.2252	7.1
TOTAL							96.1

Los valores de transmisividad utilizados para el cálculo de las entradas y salidas subterráneas son los obtenidos de la interpretación de pruebas de bombeo, adaptadas al espesor saturado de la región donde se localizan las celdas.

7.1.4. Recarga incidental(Rr)

Aún en sistemas de riego eficientes, un cierto volumen del agua aplicada en el riego no es usado como uso consuntivo, se infiltra y eventualmente alcanza la superficie

freática, dependiendo de propiedades del suelo, de las condiciones climáticas y de la profundidad al nivel estático.

Esta contribución al acuífero se le conoce como retorno de riego y según Jacob Bear (1970) su valor varía entre el 20 y 40 % del volumen usado en la irrigación. Debido a la falta de información de láminas de riego por cultivo, se consideró que un 5% del volumen aplicado al uso agrícola retorna al acuífero en forma de recarga efectiva, tomando en cuenta la profundidad promedio al nivel del agua subterránea entre 50 y 60 m en las zonas agrícolas y la presencia de estratos de permeabilidad media en el subsuelo. De esta manera, considerando que para el uso agrícola se utilizan 338.9 hm³ anuales y que un 5% de éste recarga de manera efectiva al acuífero en las zonas que no tienen riego tecnificado, se obtiene una recarga incidental por los retornos del riego agrícola de 16.9 hm³ anuales. Por lo tanto, **Rr = 16.9 hm³ anuales.**

7.2. Salidas

La descarga del acuífero ocurre por bombeo de agua dulce (B) y salobre (Ssb).

7.2.1. Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo es de **351.8 hm³ anuales.**

7.2.2. Salidas de agua salobre por bombeo (Ssb)

No existe información de la extracción de agua salobre; sin embargo, se considera que su volumen es al menos de la misma magnitud que el volumen de las entradas por flujo subterráneo de agua salobre procedente de la franja costera. Por lo tanto, **Ssb = 96.1hm³ anuales.**

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

El cálculo del cambio de almacenamiento se realizó a partir de la configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2006-2019 que se muestra en la figura 6. Con base en ella y tomando en cuenta un valor promedio de rendimiento específico S_y que varía de 0.05 a 0.15 se determinó la variación del almacenamiento en el área de balance de 4,239 km², mediante la siguiente expresión:

$$\Delta VS = A * h * S$$

Donde:

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

S: Coeficiente de almacenamiento promedio de la zona de balance

A: Área entre curvas de igual evolución del nivel estático

h: Valor medio de la variación piezométrica en el período

El detalle de cálculo se presenta en la tabla 4, en la que se puede observar que el cambio de almacenamiento para el periodo es de -996.2 hm^3 , es decir, un promedio anual de -76.6 hm^3 . Por lo tanto, **$\Delta V(S) = -76.6 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$** .

Tabla 4. Cálculo de cambio de almacenamiento (2006-2019)

Evolución (m)	Evolución media (m)	Área (km ²)	Sy	$\Delta V(S)$ (hm ³ /año)
15	15	113.7	0.05	85.3
5 a 15	10	258.0	0.08	206.4
5	5	127.5	0.05	31.9
2 a 5	3.5	464.2	0.05	81.2
0 a 2	1	146.7	0.10	14.7
0 a -2	-1	401.4	0.10	-40.1
-2 a -5	-3.5	584.4	0.13	-265.9
-5	-5	8.3	0.10	-4.2
-5 a -10	-7.5	547.4	0.15	-615.8
-10	-10	10.7	0.10	-10.7
-10 a -25	-17.5	138.3	0.15	-363.0
-25	-25	35.7	0.13	-116.0
TOTAL		2836.3	TOTAL	-996.2
Promedio anual				-76.6

Solución de la ecuación de balance

Una vez calculadas las componentes de la ecuación de balance, procedemos a evaluar la recarga vertical por lluvia e infiltraciones, mediante la expresión (2), que fue establecida con anterioridad:

$$R_v = B + S_{sb} \pm \Delta V(S) - E_d - R_r - E_{hs}$$

$$R_v = 351.8 + 96.1 - 76.6 - 19.4 - 16.9 - 96.1$$

$$R_v = 238.9 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

De esta manera, la recarga total media anual estará definida por la suma de las entradas:

$$\begin{aligned} R &= R_v + E_d + R_r \\ R &= 238.9 + 19.4 + 16.9 \\ R &= 275.2 \text{ hm}^3\text{anuales} \end{aligned}$$

8. DISPONIBILIDAD

Para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas, se aplica el procedimiento de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, Conservación del recurso agua-que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales; en su fracción relativa a las aguas subterráneas, menciona que la disponibilidad se determina por medio de la expresión siguiente:

$$\begin{array}{rclcl} \text{DISPONIBILIDAD} & = & \text{RECARGA} & - & \text{DESCARGA} & - & \text{EXTRACCIÓN DE AGUAS} \\ \text{MEDIA ANUAL DE} & & \text{TOTAL} & & \text{NATURAL} & & \text{SUBTERRÁNEAS} \\ \text{AGUA DEL SUBSUELO} & & \text{MEDIA} & & \text{COMPROMETIDA} & & \\ \text{EN UN ACUÍFERO} & & \text{ANUAL} & & & & \end{array}$$

Donde:

DMA = Disponibilidad media anual de agua del subsuelo en un acuífero

R = Recarga total media anual

DNC = Descarga natural comprometida

VEAS = Volumen de extracción de aguas subterráneas

8.1. Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto en forma de recarga natural como incidental. Para este caso su valor es **275.2 hm³/año**, de los cuales 258.3 hm³ son recarga natural y 16.9 hm³ recarga incidental.

8.2. Descarga natural comprometida (DNC)

La descarga natural comprometida se determina sumando los volúmenes de agua concesionados de los manantiales y del caudal base de los ríos que está comprometido como agua superficial, alimentados por el acuífero, más las descargas que se deben conservar para no afectar a los acuíferos adyacentes; sostener el gasto ecológico y prevenir la migración de agua de mala calidad hacia el acuífero. Para el caso del acuífero Costa de Hermosillo, no existen descargas naturales comprometidas. Por lo tanto, **DNC = 0.0 hm³ anuales**.

8.3. Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)

La extracción de aguas subterráneas se determina sumando los volúmenes anuales de agua asignados o concesionados por la Comisión mediante títulos inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA), los volúmenes de agua que se encuentren en proceso de registro y titulación y, en su caso, los volúmenes de agua correspondientes a reservas, reglamentos y programación hídrica, todos ellos referidos a una fecha de corte específica. En el caso de los acuíferos en zonas de libre alumbramiento, la extracción de aguas subterráneas será equivalente a la suma de los volúmenes de agua estimados con base en los estudios técnicos, que sean efectivamente extraídos, aunque no hayan sido titulados ni registrados, y en su caso, los volúmenes de agua concesionados de la parte vedada del mismo acuífero.

Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de **349,453,541 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos del Agua (REPGA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2019**.

8.4. Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)

La disponibilidad de aguas subterráneas, constituye el volumen medio anual de agua subterránea disponible en un acuífero, al que tendrán derecho de explotar, usar o aprovechar los usuarios, adicional a la extracción ya concesionada y a la descarga natural comprometida, sin poner en peligro a los ecosistemas.

Conforme a la metodología indicada en la norma referida anteriormente, se obtiene de restar al volumen de recarga total media anual, el valor de la descarga natural comprometida y el volumen de extracción de aguas subterráneas.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 275.2 - 0.0 - 349.453541 \\ \text{DMA} &= -74.253541 \text{ hm}^3/\text{año} \end{aligned}$$

El resultado indica que no existe volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario, su **déficit** es de **74,253,541 m³**.

9. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua, 1999. Estimación de volúmenes de aguas subterráneas extraídos para uso agrícola en las zonas Costa de Hermosillo, Sonora y Janos, Chihuahua, aplicando técnicas de percepción remota. Realizado por el Colegio de Postgraduados de Chapingo.

Comisión Nacional del Agua, 2001. Estudio de cuantificación de la recarga del acuífero Costa de Hermosillo, municipio de Hermosillo, Sonora. Realizado por la Universidad de Sonora.

Comisión Nacional del Agua, 2001. Estudio de la contaminación difusa del agua subterránea en el acuífero Costa de Hermosillo, Sonora. Realizado por Servicios de Ingeniería Civil y Geología S.A. de C.V.

Comisión Nacional del Agua, Gerencia de Aguas Subterráneas, 2012. Situación actual de la intrusión marina en el acuífero Costa de Hermosillo, Sonora. Informe Técnico Interno.

Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca Noroeste, 2019. Información piezométrica del acuífero Costa de Hermosillo, Sonora.

Rangel Medina Miguel, 2006. Propuesta de un modelo integral para la recuperación de un acuífero intrusionado, sometido a uso intensivo de agua subterránea: el acuífero Costa de Hermosillo, Sonora, México (Tesis doctoral). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.

Servicio Geológico Mexicano, 1999 Carta Geológica-Minera H12-8 Hermosillo. Escala 1:250,000

Servicio Geológico Mexicano, 2000 Carta Geológica-Minera H12-11 Sierra Libre. Escala 1:250,000

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. Realizado por Consultores en Ingeniería Geofísica, S.A. de C.V. (CIGSA).