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

Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Rosarito (0245), Estado de Baja California

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

Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea

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

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

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

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

CLAVE	ACUÍFERO	R	DNCOM	VCAS	VEXTET	DAS	DÉFICIT
		CIFRAS EN MILLONES DE METROS CÚBICOS ANUALES					
ESTADO DE BAJA CALIFORNIA							
0245	ROSARITO	6.2	0.5	4.621705	3.9	1.078295	0.000000

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

Comisión Nacional del Agua

Subdirección General Técnica

Gerencia de Aguas Subterráneas

Subgerencia de Evaluación y Ordenamiento de Acuíferos

DETERMINACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA EN EL ACUÍFERO 0245 ROSARITO, ESTADO DE BAJA CALIFORNIA.

México, D.F., Diciembre 2008

CONTENIDO

1. GENERALIDADES 2
Antecedentes 2
1.1 Localización 2
1.2 Situación administrativa del acuífero 4
2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD. 4
3. FISIOGRAFÍA 4
3.1 Provincia fisiográfica 4
3.2 Clima 5
3.3 Hidrografía 5
3.4 Geomorfología 6
4. GEOLOGÍA 6
4.1 Estratigrafía 8
4.2 Geología estructural 9
4.3 Geología del subsuelo 9
5. HIDROGEOLOGÍA 9
5.1 Tipo de acuífero 9
5.2 Parámetros hidráulicos 9
5.3 Piezometría 10
5.4 Comportamiento hidráulico 10
5.4.1 Profundidad al nivel estático. 10
5.4.2 Elevación del nivel estático 11
5.4.3 Evolución del nivel estático 12
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea 12
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA 12
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS 12
7.1 Entradas 13
7.1.1 Recarga vertical (Rv) 13
7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh) 14
7.2 Salidas 15
7.2.1 Bombeo (B) 15
7.2.2 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh) 15
7.3 Cambio de almacenamiento (ΔVS) 15
8. DISPONIBILIDAD 16
8.1 Recarga total media anual (Rt) 16
8.2 Descarga natural comprometida (DNCOM) 16
8.3 Volumen concesionado de aguas subterráneas (VCAS) 17
8.4 Disponibilidad de aguas subterráneas (DAS) 17
9. BIBLIOGRAFÍA 18

1. GENERALIDADES

Antecedentes

La Ley de Aguas Nacionales (LAN) y su Reglamento contemplan que la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) debe publicar en el Diario Oficial de la Federación (DOF), la disponibilidad de las aguas nacionales, en el caso de las aguas subterráneas esto debe ser por acuífero, de acuerdo con los estudios técnicos correspondientes y conforme a los lineamientos que considera la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000 “Norma Oficial Mexicana que establece el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales”. Esta norma ha sido preparada por un grupo de especialistas de la iniciativa privada, instituciones académicas, asociaciones de profesionales, gobiernos estatales y municipales y de la CONAGUA.

La NOM establece para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas la realización de un balance de las mismas donde se defina de manera precisa la recarga, de ésta deducir los volúmenes comprometidos con otros acuíferos, la demanda de los ecosistemas y el volumen concesionado vigente en el Registro Público de Derechos del Agua (REPDA).

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

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

1.1 Localización

El acuífero Rosarito definido con la clave 0245, en el Sistema de Información Geográfica para el Manejo del Agua Subterránea (SIGMAS) de la CONAGUA, se localiza en el Litoral Noroeste de Baja California, aproximadamente entre las coordenadas 32° 16’ y 32º 29’ de latitud norte y 116° 52’ a los 117º 07’ de longitud oeste, comprende una superficie aproximada de 339 km^2.

Colinda al norte con el acuífero Tijuana, al este con Las Palmas, al sur con Los Médanos y al oeste con el Océano Pacífico (figura 1).

Geopolíticamente la mayor parte del área del acuífero se localiza en el municipio de Tijuana, y una porción menor al sur, dentro del municipio Playas de Rosarito.

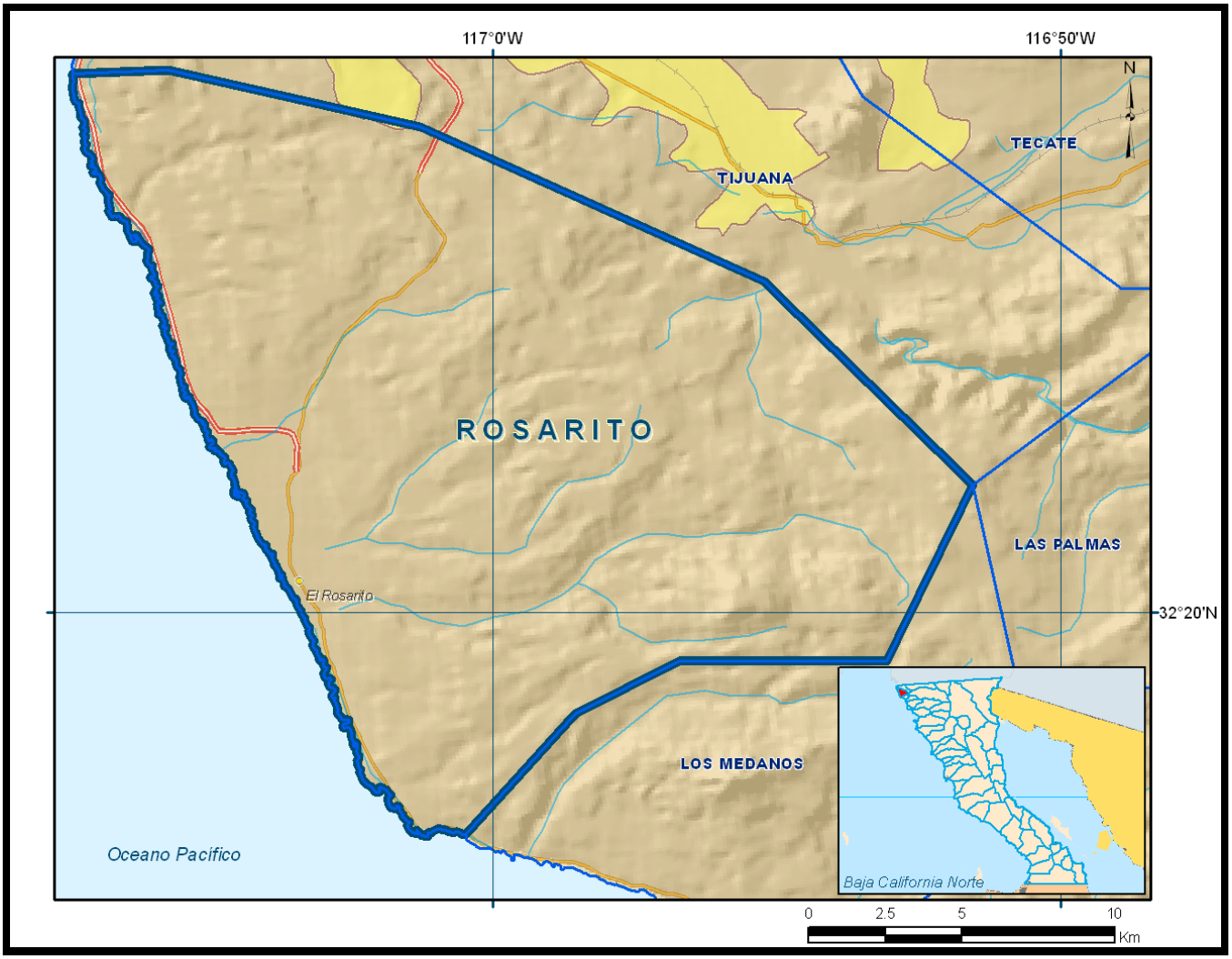


Figura 1. Localización del acuífero

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

Tabla 1. Coordenadas que delimitan la poligonal simplificada del acuífero

ACUIFERO 0245 ROSARITO							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	117	0	30.0	32	16	5.2	DEL 1 AL 2 POR LA LINEA DE BAJAMAR A LO LARGO DE LA COSTA
2	117	7	24.3	32	29	28.1	
3	117	5	43.8	32	29	32.2	
4	117	1	16.9	32	28	32.4	
5	116	55	14.4	32	25	49.2	
6	116	51	34.2	32	22	14.7	
7	116	53	4.6	32	19	8.7	
8	116	56	43.4	32	19	8.7	
9	116	58	32.9	32	18	13.3	
1	117	0	30.0	32	16	5.2	

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero pertenece al Organismo de Cuenca de la Península de Baja California y su territorio se encuentra sujeto a las disposiciones del *"Decreto por el que se establece veda para el alumbramiento de aguas del subsuelo en el Estado de Baja California"*. Publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 15 de mayo de 1965, este decreto se clasifica como tipo III, en las que la capacidad de los mantos acuíferos permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.). El acuífero pertenece al Consejo de Cuenca (2) Baja California, instalado el 7 de diciembre de 1999.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua (2008), los municipios de Playas de Rosarito y Tijuana se encuentran en zona de disponibilidad 2. Actualmente no existe Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD.

En la región que comprende el territorio que cubre el acuífero se han llevado a cabo algunos estudios geohidrológicos, entre los más importantes podemos mencionar los siguientes:

PROSPECCIÓN GEOFÍSICA DEL MANTO ACUÍFERO REALIZADA EN EL HOTEL ROSARITO, CD. DE ROSARITO, BAJA CALIFORNIA, **elaborado por la empresa Inversiones Rosarito S.A. de C.V.** Se realizó una obra dentro del hotel, con el objetivo de analizar, el sustrato en una porción del predio, así como la posibilidad de invertir en una perforación. Se realizó una exploración geoeléctrica, usando el arreglo Shlumberger, como método eléctrico de geofísica, con los que se obtuvieron los siguientes valores de resistividad: 680 ohms/m corresponden a arena media no consolidada, 26 ohm/m a arena media compacta, 6 ohm/m a arena media-fina saturada, 15 ohm/m a arena-gravilla-arcilla y 11 ohm/m a arena-arcilla.

Este estudio fue la base para la elaboración de este documento, por lo que sus resultados y conclusiones se analizan en los apartados correspondientes

3. FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia fisiográfica

El área de estudio pertenece a la provincia fisiográfica de Baja California (Raisz, 1964), subprovincia Sierras de Baja California; siendo ésta la mayor de las tres que constituyen la provincia de la Península de Baja California, corresponde casi al 80% del área total del estado.

Se caracteriza porque a partir de la frontera con los Estados Unidos y hacia el Sur, las unidades orográficas presentes son las Sierras de Juárez y San Pedro Mártir. En ambas Sierras se localizan las unidades morfológicas más elevadas con un máximo de 2,828 msnm en el Picacho del Diablo o Cerro La Encantada, ubicado en la Sierra de Juárez.

Las cimas han sido descritas como de "mesa corrugada", de relieve poco o moderadamente pronunciado y con pendientes secundarias que se levantan de 150 a 300 m sobre el piso elevado. La cresta Occidental es uniforme y la Oriental es algo irregular, especialmente en la zona de La Encantada. En las cumbres de la sierra de San Pedro Mártir, cuyas altitudes disminuyen poco a poco hacia el sur, hay pendientes, valles y algunas praderas intermontanas.

3.2 Clima

De acuerdo con la clasificación climatológica de Köppen, modificada por Enriqueta García para las condiciones de México, el acuífero presenta un clima que corresponde al tipo BSk, que corresponde con climas mediterráneos de templados a secos, con lluvias en invierno; que son comunes entre las costas del Norte del estado de Baja California.

De acuerdo a la estación de Tijuana, la temperatura media anual es de 16.4° C. La temperatura media del mes más cálido (Julio-Agosto) es 23.9° C. La temperatura media del mes más frío (Enero) es 7.2° C. Observándose la temperatura más caliente de 38.9° C y la más fría observada de -2.2° C.

Las lluvias son muy escasas en la mayor parte de la región, la precipitación media anual es de 262 mm con 55.4 mm (21%) ocurrida durante el mes de mayor precipitación (Enero) y 0.25 mm (0.1%) durante el mes de menor precipitación (Julio). La precipitación tiene comportamiento estacional con el 87% del total ocurriendo en un período entre los meses de Noviembre a Abril. Existe un promedio de 24 días por año con una precipitación que excede a 2.5 mm.

3.3 Hidrografía

El acuífero Rosarito se encuentra dentro de la Región Hidrológica 1, Baja California Noroeste, la cual comprende algunas corrientes de carácter internacional, y en ella se encuentran dos de las ciudades más importantes del estado: Tijuana y Ensenada. Las corrientes de ésta región desembocan en las costas del Océano Pacífico.

El arroyo Rosarito, se localiza dentro de la cuenca Río Tijuana-Arroyo de Maneadero; en la que se encuentra una de las corrientes bajacalifornianas de mayor longitud: sobre el cauce del río Tijuana, se encuentra la presa Abelardo L. Rodríguez, cuyas aguas se utilizan para abastecer a la ciudad de Tijuana, al igual que la que proviene de los pozos ubicados en el lecho del mismo río y del río Alamar, así como la que se destila en la planta desaladora de Rosarito. La cuenca del río Tijuana se divide en

21 subcuencas, siendo las de mayor importancia las que corresponden a los arroyos Rosarito y Huahuatay.

El drenaje superficial es canalizado por un barranco en la parte central, hacia el cual fluyen las aguas pluviales de las laderas situadas al norte y al sur del acuífero. Con base en las cartas topográficas, se observa que el sitio forma parte de una cuenca hidrográfica local, en la cual el drenaje se agota hacia el Océano Pacífico. Como tal, las descargas superficiales están confinadas localmente y no tienen un impacto en el sistema de aguas superficiales ni en el drenaje de la cuenca hidrográfica de Tijuana.

3.4 Geomorfología

Geomorfológicamente, en la parte Norte del acuífero, presenta cantiles resistentes a la erosión de composición ígnea con una componente importante de cantiles sedimentarios en el área de San Antonio del Mar en el municipio de Tijuana. Al sur de la planta de la CFE, se encuentra una playa baja de composición arenosa cuyo ancho aumenta hacia el sur y que anteriormente presentaba un campo de dunas, que con el continuo crecimiento de infraestructura habitacional ha modificado sustancialmente la zona, incrementando los riesgos y daños a la misma.

El área que conforma el acuífero Rosarito y zonas adyacentes se encuentra sumamente accidentada con una serie de barrancos alineados sobre un eje Noreste-Suroeste que desembocan hacia la costa. Los barrancos son valles montañosos, profundos y estrechos, equivalentes a cañones o valles en forma de “V”, con pendientes verticales empinadas. Esta unidad geomorfológica es típica de las mesas formadas por erosión de las capas horizontales de rocas sedimentarias o volcánicas, que son frecuentemente formas de relieve producidas por erosión. Al llegar a la línea litoral, se pueden observar farallones alcanzando aproximadamente 30 metros de altura.

La costa presenta un control de falla y los basaltos y las tobas han sido deformados hasta formar un monoclinal fallado. En el sitio, se observa la Formación San Diego que se encuentra expuesta, como una cuña al oeste del monoclinal fallado. El drenaje por curso de agua está controlado estructuralmente, dividiendo el área de los farallones litorales, este drenaje se agota en dirección Este-Oeste en la parte Oeste-central del sitio entre dos fallas menores relacionadas al monoclinal y la Falla Mira Mar.

4. GEOLOGÍA

Las condiciones geológicas en el acuífero, principalmente en la parte inferior de los farallones litorales hacia la parte occidental del acuífero, consisten en basaltos horizontales y tobas, miembros de la Costa Azul, pertenecientes a la Formación Rosarito Beach (Mioceno). Estas rocas están sobrecubiertas a elevaciones de 60 a 100 m por una delgada capa de arenisca o roca de playa y conglomerados de la formación San Diego (Plioceno). Los mismos basaltos y tobas de brecha que se

encuentran en la parte inferior de los farallones frente al mar a una elevación de entre 90 y 170 m están expuestos dentro de la cuenca hidrográfica.

Las características geológicas indican que la mayoría del territorio municipal (Rosarito) está conformado por suelo de tipo litoral formado por materiales sueltos que se acumulan por la acción de las olas y las corrientes marinas; estos suelos denominados expansivos tienen un drenaje deficiente lo que representa problemas para su desarrollo. En esta región las colonias localizadas entre la cañada el Descanso y el Ejido Plan Libertador, con una longitud aproximada de 30 km y un promedio de 5 km de ancho, están formadas por rocas sedimentarias de origen marino pertenecientes al Cretácico Superior, con una edad aproximada de 100 millones de años. Tales rocas son conocidas como “Grupo Rosarito”.

Por otro lado, la zona cercana al nivel del mar, formada por amplias mesas y colinas, como la del Descanso, Popotla y Rosarito se encuentran rocas volcánicas extrusivas basaltos y andesitas Miocénicas de edad Terciaria (figura 2).

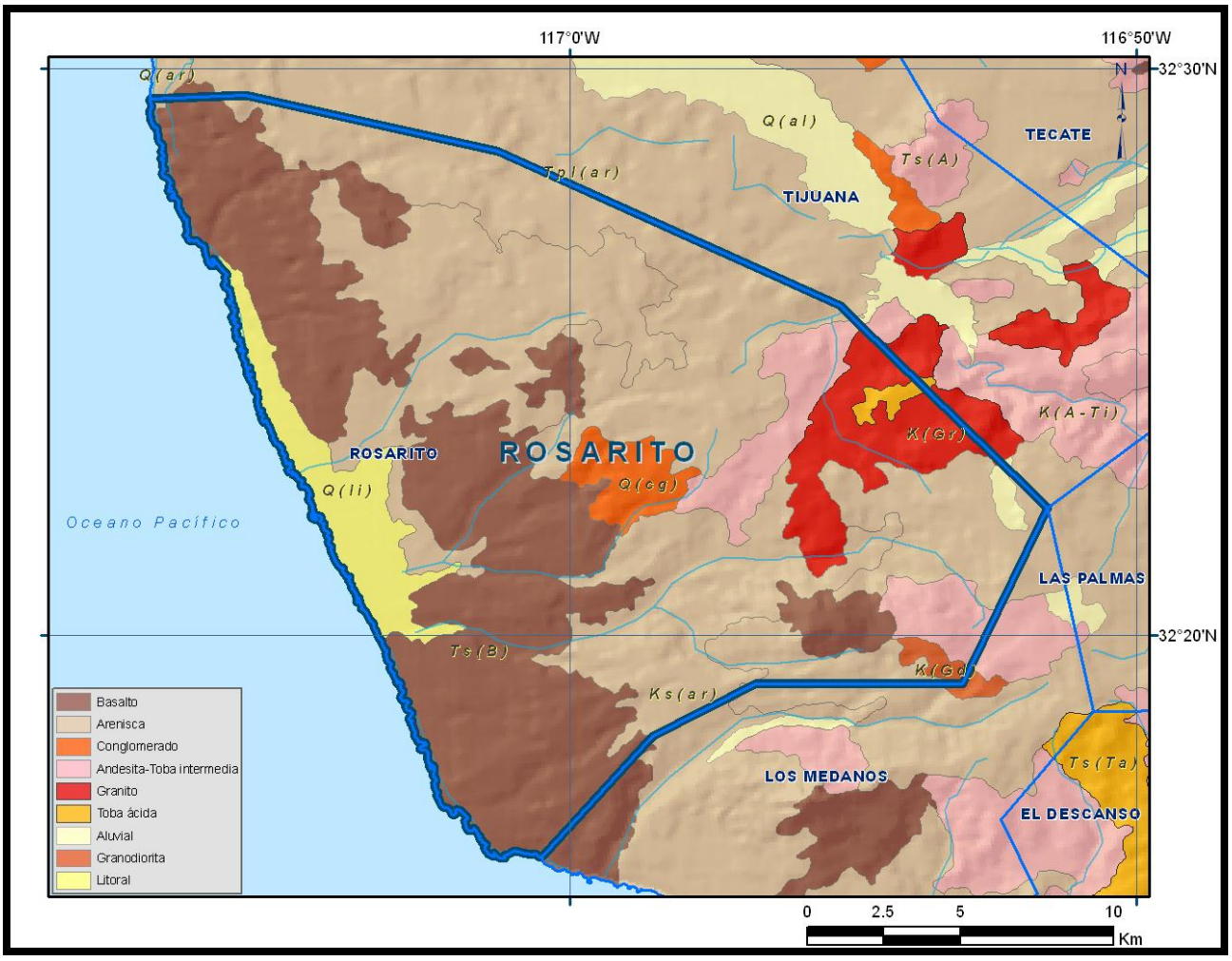


Figura 2. Geología general del acuífero

4.1 Estratigrafía

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

Formación Rosarito Beach (Mi). Está constituida por intercalaciones de basaltos, tobas y brechas, aflora en las subcuencas de Rosarito y Tijuana, además se constituye por cinco miembros de la base (más antiguos) a la cima (recientes), corresponden a depósitos sedimentarios y volcánicos.

- *Base:* predominan sedimentos de plataforma con intercalaciones delgadas de derrames basálticos con horizontes de toba.
- *Cima:* compuesto principalmente por derrames de lava con intercalaciones de arenisca, toba y limonita.
- *Hiato:* persistió hasta el Plioceno, dando lugar a depósitos de cuenca aislados. Los cuales forman dos unidades pertenecientes a la Formación San Diego, constituida por dos miembros.
- *Miembro Inferior:* formado por areniscas de finas a medias, con lentes de conglomerado, presenta una coloración amarillenta.
- *Miembro Superior:*, constituido por areniscas medias con intercalaciones de conglomerado, estos últimos hacia la cima se presentan de forma más gruesa.

Formación San Diego (Plc). Suprayace a la Formación Rosarito Beach y en discordancia a la Formación Linda Vista, está formada por conglomerados, con intercalaciones de arenisca de matriz café a rojiza, presenta además sedimentos fluviales depositados en los lechos de los ríos coluviales asociados a pendientes fuertes y aluviones debido a movimientos de ladera.

Formación Alisitos (Krm): constituida por una serie de rocas volcánicas, volcanoclásticas y sedimentarias; las primeras de composición andesítica mientras que las rocas sedimentarias están constituidas por la denudación de las rocas volcánicas y volcanoclásticas, afectadas por un proceso de dinamometamorfismo el cual va disminuyendo de oriente a poniente. Se encuentra coronando a las rocas de edad Triásico-Jurásico en forma discordante; con un espesor máximo de 5000 m.

Formación Rosario (Kr): formada por paquetes de lutitas, areniscas y conglomerados con presencia de fósiles de origen continental y marino. Esta formación se presenta poco consolidada y así como el tectónismo poco marcado, se le encuentra descansando en discordancia angular a la formación Alisitos, formando el tercer cinturón (postbatolítico), y cuyo limite oriental es la denominada línea “Santillana Barrera”, que representa una línea de costa fluctuante que marca el límite de dos eventos tectónicos. Presenta un espesor aproximado de más de 750 m, de edad Maestrichtiano. Sus principales afloramientos se localizan sobre la costa del Pacífico.

4.2 Geología estructural

La región en la que se enmarca el área es afectada por procesos geológicos complejos íntimamente ligados a la apertura del Golfo de California a partir del Terciario Medio. Las principales estructuras que afectan a las unidades litológicas expuestas son: fracturamiento, fallamiento y plegamiento en rocas sedimentarias. Mientras que la zona de costa está afectada por una zona de Farallón.

4.3 Geología del subsuelo

De acuerdo con las resistividades obtenidas y las características de los materiales del subsuelo se clasificaron en las siguientes unidades:

- **Unidad impermeable**: formada por arenas y arcillas a una profundidad de 60 m aproximadamente y con un espesor de 10 m.
- **Unidad semipermeable**: constituida por materiales de tipo granular como arena media fina saturada y arena media compactada. Su límite inferior y lateral es la unidad Impermeable, la unidad de arena media saturada presenta resistividades muy bajas.
- **Unidad permeable**: constituida por materiales granulares como arena de grano medio compactada, así como arena de grano medio no consolidada, en dicha unidad se pueden considerar como de buena permeabilidad a los basaltos altamente fracturados.

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

De acuerdo con la geología del subsuelo y la estratigrafía del área se deduce que se trata de un **acuífero libre**. La topografía dentro del arroyo y las áreas adyacentes está sumamente accidentada con una serie de barrancos que están alineados sobre un eje Noreste-Suroeste y que desembocan hacia la costa. Los barrancos son valles montañosos, profundos y estrechos, equivalentes a cañones o valles en forma de V, con pendientes verticales empinadas. Al llegar a la línea litoral, se pueden observar farallones alcanzando un espesor de 30 m de altura, donde el drenaje superficial es canalizado por el barranco en la parte central de la propiedad hacia el cual fluyen las aguas pluviales de las laderas situadas al Norte y al Sur.

5.2 Parámetros hidráulicos

En el acuífero Rosarito los aprovechamientos están localizados sobre rocas ígneas de composición basáltica con alto fracturamiento y fallamiento, además de estar altamente intemperizados y por consecuencia erosionados, sin embargo de forma general, hacia las entradas de agua subterránea al acuífero se asocia como valores promedio de transmisividad **2.257 x10^{-3} m^2/s** y hacia las salidas de

flujo subterráneo un rango que va de los **0.926 x10^{-3}** a los **1.042 x10^{-3} m^2/s**.

5.3 Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea se consideró la información disponible de 2007, para determinar el comportamiento hidráulico se realizó una extrapolación de la elevación del nivel estático apoyado con el nivel del terreno.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático.

De acuerdo a la configuración realizada con los datos obtenidos para el estudio de 2007, se observa que la profundidad varía entre 25 y 75 m, localizándose las mayores profundidades en la porción sur-este del área de explotación, observándose así una variación gradual del nivel piezométrico hacia la costa (figura 3).

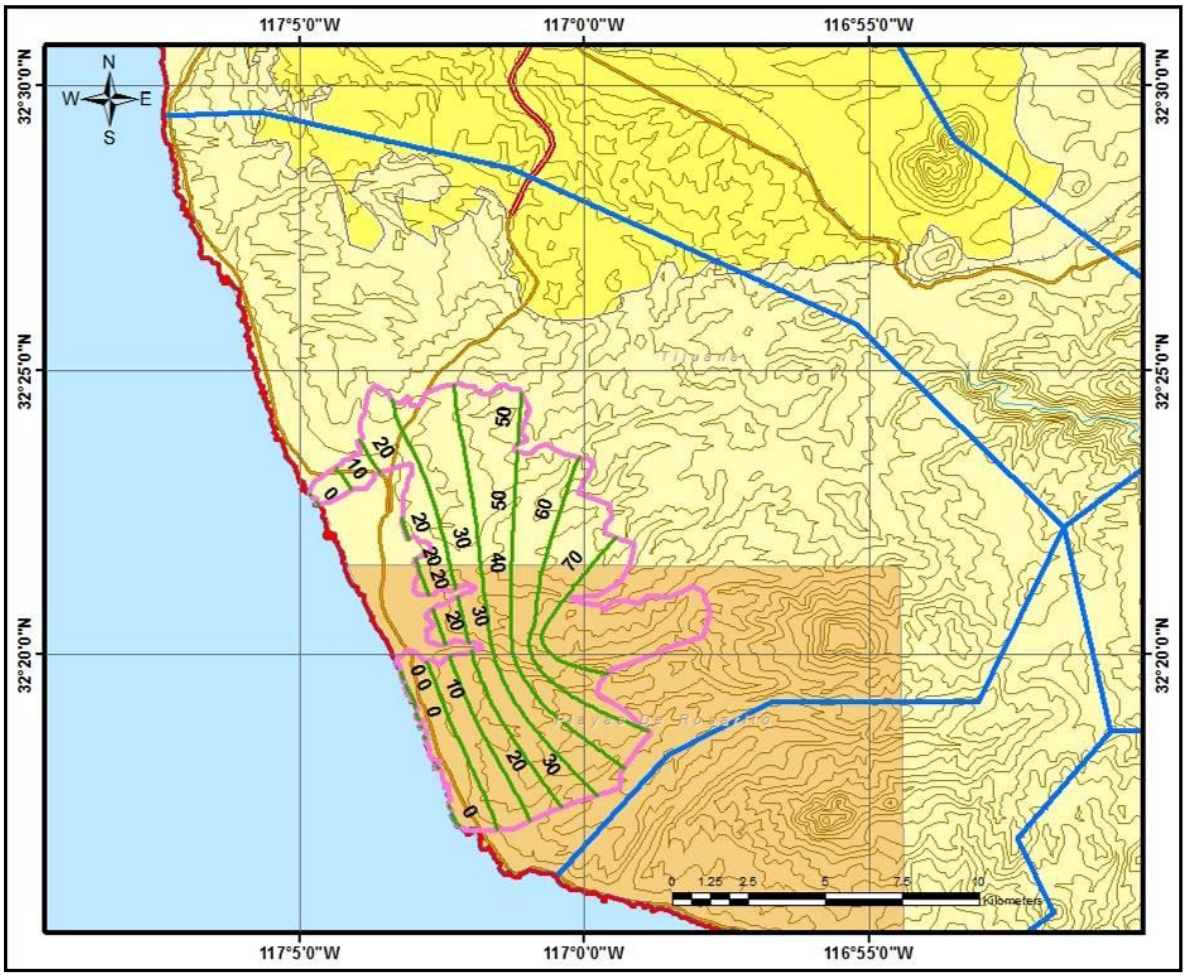


Figura 3. Profundidad al nivel estático en m (2007)

5.4.2 Elevación del nivel estático

Es el principal indicador del flujo subterráneo, si las cargas están referidas a la elevación media del nivel del mar. De esta forma las zonas de saturación de mayor elevación, generan movimiento de aguas subterráneas en dirección de las localidades donde la elevación de los niveles de saturación es menor, si no existen fronteras que impidan el flujo.

Para el acuífero Rosarito las elevaciones reflejan que el flujo del agua en el subsuelo tiene semejanza con un hipotético flujo en condiciones naturales al flujo superficial, con dirección ligeramente de nor-este a sur-oeste, originando entradas en las cañadas, representativas de esta zona (Cañada Rosarito, Cañada Aguajito, Cañada los Alisos, Cañada el Toro), siendo éstas las partes más altas y debido a su acomodo estructural se puede observar que la dirección del flujo es hacia el sur-oeste, donde las elevaciones disminuyen hasta llegar a la costa, por lo que se considera que existe una descarga de agua subterránea hacia el mar (figura 4).

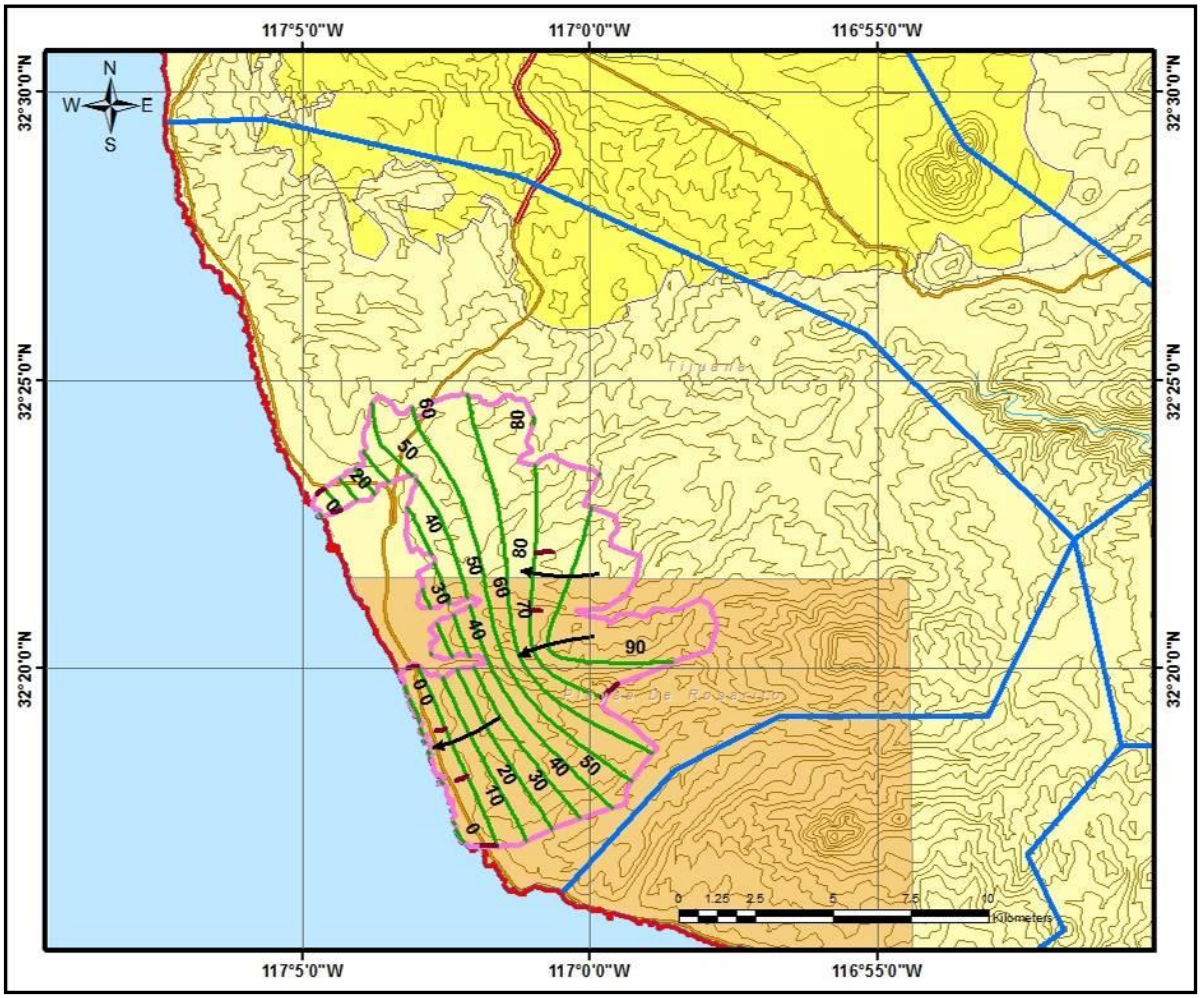


Figura 4. Elevación del nivel estático y dirección de flujo subterráneo, 2007

5.4.3 Evolución del nivel estático

Las escasas mediciones piezométricas recabadas no son suficientes y no cubren en su totalidad la extensión superficial del acuífero, por lo que no es posible realizar una configuración de evolución del nivel estatico. Adicionalmente, aunque la configuración de la elevación del nivel estático está inferida, la incipiente extracción que se realiza no ha causado aún la alteración de las condiciones del estado inicial del régimen de flujo subterráneo.

Por estas razones, se puede afirmar que las variaciones en el nivel del agua subterránea no han sufrido alteraciones importantes en el transcurso del tiempo, por lo que el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo.

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

La calidad del agua, de los pozos al Suroeste del acuífero, presentan contenidos de Calcio (114mg/l); Magnesio (96.8 mg/l); Potasio (193.0 mg/l); Sodio (1.9 mg/l); SO_4 (146.0 mg/l); HGNL (451.4 mg/l); NO_3 (9.9 mg/l); CO_3 (12.0 mg/l); Cloro (404.7 mg/l); una Conductividad Eléctrica de 2.26 ohmios/cm y una concentración de Sólidos Totales Disueltos de 1,430 mg/l.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con el Registro Público de Derechos del Agua (REPDA) existen 141 aprovechamientos, con una extracción total de **3’960,409 m^3/año.** De estos aprovechamientos el 0.01% del volumen es para uso doméstico, 1% es de uso industrial, 5% se utiliza para uso pecuario, 4% es para usos múltiples, 4% es de uso público-urbano, 24% para servicios y el 62% restante para uso agrícola.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

La diferencia entre la suma total de las entradas (recarga), y la suma total de las salidas (descarga), representa el volumen de agua perdido o ganado por el almacenamiento del acuífero, en el periodo de tiempo definido. La ecuación general de balance, de acuerdo a la ley de la 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 de un acuífero:

Recarga total - Descarga total = Cambio de almacenamiento

El balance de aguas subterráneas, con base en la red de flujo para el año 2007, de acuerdo con la topografía y con el espesor de los depósitos aluviales que conforman el acuífero, se planteó en una superficie de 92.1 km^2. Es importante señalar que los resultados del balance deben tomarse con mucha reserva debido a que ante la falta de información piezométrica es necesario hacer inferencias y estimaciones que permitan el cálculo de las componentes del balance.

La ecuación de balance definida para éste acuífero es:

$$\mathbf{Rv + Eh - B - Sh = \pm \Delta V(S)} \qquad \mathbf{(1)}$$

Donde:
Rv = Recarga vertical por lluvia;
Eh = Entradas horizontales por flujo subterráneo;
B = Extracción por bombeo;
Sh = Salidas por flujo subterráneo;
Δ**V(S)** = Cambio de almacenamiento;

7.1 Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual definido para el acuífero, las entradas están integradas por la recarga vertical (Rv) que se produce por efecto de la infiltración de la lluvia que se precipita en el valle y a lo largo de los escurrimientos, y la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de una recarga por flujo horizontal subterráneo (Eh).

De manera inducida, la infiltración de los excedentes del riego agrícola constituye otra fuente de recarga al acuífero. Este volumen se integra en la componente de recarga inducida. En la zona, el volumen de agua subterránea explotado para uso agrícola representa el 62% del total, sin embargo de acuerdo con los métodos de riego empleados (tecnificados), se considera despreciable el retorno de riego, para el caso de infiltración de las redes de agua potable, también se consideran despreciables debido a que el volumen destinado para este uso es muy pequeño. Por lo que **Ri = 0**.

7.1.1 Recarga vertical (Rv)

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que se tiene información para calcular el cambio de almacenamiento (ΔV), así como las entradas y salidas por flujo subterráneo, su valor será despejado de la ecuación de balance (1).

De esta manera, despejando la recarga vertical (Rv) se obtiene la siguiente expresión:

$$\mathbf{Rv = \pm \Delta V(S) - Eh + Sh + B} \qquad \mathbf{(2)}$$

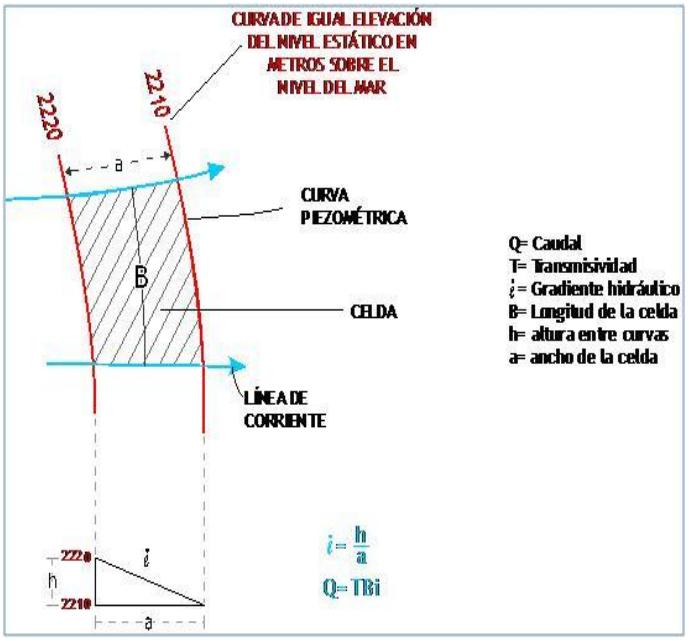
7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas altas del área del acuífero se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través del pie de monte, para posteriormente llegar a recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de explotación.

El cálculo de entradas por flujo subterráneo horizontal se realizó con base en la Ley de Darcy, partiendo de la configuración de elevación del nivel estático mediante la siguiente expresión:

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

Donde:
Q = Gasto;
T = Transmisividad;
B = Longitud de la celda;
i = Gradiente hidráulico;



Partiendo de esta configuración se seleccionó un canal de flujo para calcular el caudal "Q" que recarga al acuífero. La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada uno de los canales establecidos para el año de balance (tabla 2).

Tabla 2. Estimación del volumen de entrada por flujo subterráneo, 2007.

Celda	T (10^{-3} m^2/s)	B (10^{-3} m)	i (adim)	Q1 (m^3/s)	Vol_1 anual (hm^3)
ENTRADAS LATERALES					
E_1	2.257	3.72	0.008	0.0637	2.009
E_2	2.257	1.829	0.008	0.0338	1.065
				TOTAL	**3.1**

El volumen estimado por entrada de flujo subterráneo horizontal (Eh) es de **3.1 hm^3/año.**

7.2 Salidas

De acuerdo con el modelo conceptual definido, la descarga del acuífero ocurre principalmente por bombeo (B) y las salidas subterráneas hacia el mar (Sh).

Respecto a la evapotranspiración, debido a la baja precipitación que se presenta en el área, se invalidan los métodos empíricos para su cálculo (Turc y Smith), ya que éstos son aplicables en regiones con valores mayores a los 300 mm. Adicionalmente el área en la que se registran niveles freáticos someros es muy pequeña, aproximadamente 2.7 km^2. Por lo tanto, para los fines del balance no se consideran salidas por evapotranspiración, **ETR = 0**.

7.2.1 Bombeo (B)

Como se mencionó en el apartado de censo e hidrometría, el volumen de extracción es de **3.9 hm^3/año**.

7.2.2 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

El cálculo del volumen de salidas por flujo subterráneo que se descarga naturalmente en el área de balance se realizó de la misma forma que las entradas. El volumen estimado es de **2.3 hm^3/año.**

Tabla 3. Estimación del volumen de salida por flujo subterráneo, 2007

Celda	T (10^{-3} m^2/s)	B (10^{-3} m)	i (adim)	Q1 (m^3/s)	Vol_1 anual (hm^3)
SALIDAS LATERALES					
S_1	0.926	0.769	0.01	0.0074	0.2
S_2	1.042	2.15	0.01	0.0227	0.7
S_3	1.042	2.115	0.01	0.0211	0.7
S_4	1.042	2.291	0.009	0.0204	0.7
				TOTAL	2.3

7.3 Cambio de almacenamiento (ΔVS)

Como se menciona en el apartado de evolución del nivel estático, no se dispone de información piezométrica para elaborar la configuración de la evolución del nivel estático para un periodo de tiempo. Por otra parte, debido a que el volumen de extracción es menor a la recarga que recibe el acuífero, es de esperar que no se registren alteraciones en la dirección natural del flujo subterráneo, ni conos de abatimiento. Bajo estas consideraciones, se considera que la posición del nivel del agua subterránea no ha sufrido alteraciones importantes y el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo. Por lo tanto para fines del balance de aguas subterráneas, **ΔV(S) = 0**

Solución de la ecuación de balance

Una vez planteada esta hipótesis y conociendo las componentes de la ecuación de balance, procedemos a evaluar la recarga vertical por lluvia y en su caso las infiltraciones a lo largo del cauce del arroyo, mediante la expresión (2):

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

$$Rv = 0.0 – 3.1 + 2.3 + 3.9$$

$$\mathbf{Rv = 3.1\ hm^3}$$

De esta manera la recarga total media anual (Rt) es igual a la suma de las entradas:

$$Rt = Rv + Eh$$

$$Rt = 3.1 + 3.1 = 6.2$$

$$\mathbf{Rt = 6.2\ hm^3\ anuales}$$

8. DISPONIBILIDAD

Para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas, se aplica el procedimiento de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000, que establece la metodología para calcular 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:

$$\mathbf{DAS = Rt – DNCOM - VCAS \qquad (3)}$$

Donde:

DAS = Disponibilidad media anual de agua subterránea en una unidad hidrogeológica;
Rt = Recarga total media anual;
DNCOM = Descarga natural comprometida;
VCAS = Volumen de agua subterránea concesionado e inscrito en el REPDA;

8.1 Recarga total media anual (Rt)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (Rt), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto en forma de recarga natural como inducida. Para este caso, su valor es **6.2 hm^3/año**.

8.2 Descarga natural comprometida (DNCOM)

La descarga natural comprometida se determina sumando los volúmenes de agua concesionados de los manantiales y del caudal base de los ríos que está comprometido como agua superficial, alimentados por el acuífero, más las descargas que se deben conservar para no afectar a los

acuíferos adyacentes; sostener el gasto ecológico y prevenir la migración de agua de mala calidad hacia el acuífero.

Para este caso, la descarga natural comprometida se considera un 20 % de las salidas por flujo subterráneo horizontal, que corresponde a un volumen de **0.5 hm^3/año**. El porcentaje se considera que es el mínimo que debe conservarse para mantener la posición de la interfase marina, adicionalmente, debido a la escasez natural del recurso, existe alta demanda local para los sectores agrícola, servicios y agua potable, considerando que para abastecer a los distintos usos se emplea agua proveniente de los acuíferos Tijuana por medio del acueducto Río Colorado –Tijuana.

8.3 Volumen concesionado de aguas subterráneas (VCAS)

El volumen anual de extracción, de acuerdo con los títulos de concesión inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), de la Subdirección General de Administración del Agua, con fecha de corte al **30 de septiembre de 2008**; es de **4'181,464 m^3/año.**

8.4 Disponibilidad de aguas subterráneas (DAS)

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

Conforme a la metodología indicada en la norma referida anteriormente, de acuerdo con la expresión 3, se obtiene de restar al volumen de recarga total media anual, el valor de la descarga natural comprometida y el volumen de aguas subterráneas concesionado e inscrito en el REPDA.

$$DAS = Rt - DNCOM - VCAS \qquad (3)$$

$$DAS = 6.2 - 0.5 - 4.181464$$

$$\mathbf{DAS = 1.518536\ hm^3/año}$$

Conforme a la metodología indicada en la norma referida anteriormente, el resultado indica que existe un volumen de **1'518,536 m^3 anuales** disponibles para otorgar nuevas concesiones.

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

Conforme se genere mayor y mejor información, especialmente la que se refiere a la piezometría y pruebas de bombeo en pozos cercanos a los piedemonte, se podrá hacer una evaluación posterior.

9. BIBLIOGRAFÍA

Inversiones Rosarito S.A. de C.V. 1995. Informe de la Prospección del Manto Acuífero realizada en el Hotel Rosarito, Cd. de Rosarito Baja California.