



**SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA**  
**GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS**

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE  
AGUA EN EL ACUÍFERO RÍO SANTA CRUZ (2615), ESTADO DE  
SONORA**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

## Contenido

<b>1</b>	<b>GENERALIDADES.....</b>	<b>2</b>
	Antecedentes.....	2
1.1	Localización.....	2
1.2	Situación administrativa del acuífero.....	4
<b>2</b>	<b>ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD .....</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>FISIOGRAFÍA.....</b>	<b>6</b>
3.1	Provincia fisiográfica.....	6
3.2	Clima.....	6
3.3	Hidrografía.....	7
<b>4</b>	<b>GEOLOGÍA.....</b>	<b>7</b>
4.1	Estratigrafía.....	8
4.3	Geología estructural.....	11
4.3	Geología del subsuelo.....	11
<b>5</b>	<b>HIDROGEOLOGÍA.....</b>	<b>15</b>
5.1	Tipo de acuífero.....	15
5.2	Parámetros hidráulicos.....	16
5.3	Piezometría.....	17
5.4	Comportamiento hidráulico.....	17
5.4.1	Profundidad al nivel estático.....	17
5.4.2	Elevación del nivel estático.....	18
5.4.3	Evolución del nivel estático.....	19
5.5	Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	20
<b>6</b>	<b>CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA.....</b>	<b>21</b>
<b>7</b>	<b>BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....</b>	<b>21</b>
<b>7.1</b>	<b>Entradas.....</b>	<b>22</b>
7.1.1	Recarga vertical (Rv).....	22
7.1.2	Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	23
7.1.3	Recarga inducida por retorno de riego (Rr).....	24
7.2	Salidas.....	25
7.2.1	Extracción por bombeo (B).....	26
7.2.2	Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh).....	26
7.2.3	Evapotranspiración (ETR).....	26
7.3	Cambio de almacenamiento ( $\Delta VS$ ).....	27
<b>8</b>	<b>DISPONIBILIDAD.....</b>	<b>29</b>
8.1	Recarga total media anual (R).....	29
8.2	Descarga natural comprometida (DNC).....	30
8.3	Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	30
8.4	Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	30
<b>9</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>32</b>

## **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 Río Santa Cruz, definido con la clave 2615 por la Comisión Nacional del Agua, se encuentra localizado en la porción norte del Estado de Sonora, entre las coordenadas geográficas 31° 02' y 31° 20' de latitud norte, y 110° 25' y 110° 55' de longitud oeste, cubriendo una superficie de 952 km<sup>2</sup>. Dentro del estado colinda al este, con el acuífero río San Pedro; al oeste con los acuíferos Nogales y Río Alisos; al sur con el acuífero Cocóspera; al sureste con el acuífero Cuitaca y al norte con la línea divisoria internacional con los Estados Unidos de América, por lo cual se trata de un acuífero fronterizo (figura 1).

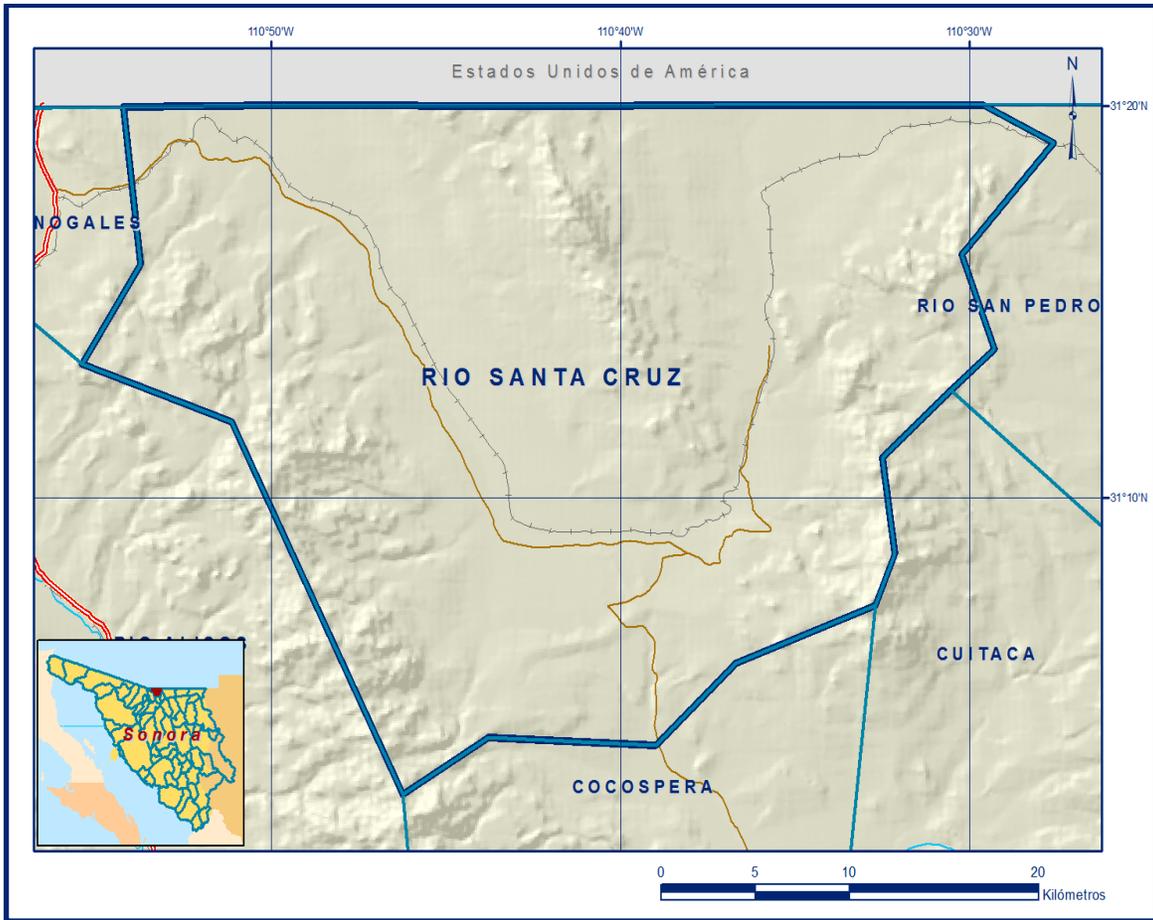


Figura 1. Localización del acuífero

Geopolíticamente se localiza en forma parcial en los municipios Nogales y Santa Cruz. La poligonal simplificada que delimita el acuífero se encuentra definida por los vértices cuyas coordenadas se muestran en la tabla 1.

ACUIFERO 2615 RIO SANTA CRUZ							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	110	30	32.1	31	12	45.5	
2	110	32	29.6	31	11	1.9	
3	110	32	8.8	31	8	34.5	
4	110	32	41.9	31	7	16.2	
5	110	36	41.7	31	5	47.2	
6	110	38	59.3	31	3	42.3	
7	110	43	46.6	31	3	54.4	
8	110	46	14.5	31	2	27.0	
9	110	51	8.6	31	11	57.6	
10	110	55	24.8	31	13	24.9	
11	110	53	45.0	31	15	58.4	
12	110	54	13.9	31	19	58.9	DEL 12 AL 13 POR EL LIMITE INTERNACIONAL
13	110	29	36.7	31	20	1.4	
14	110	27	36.4	31	19	4.1	
15	110	30	13.7	31	16	12.0	
16	110	29	17.7	31	13	47.7	
1	110	30	32.1	31	12	45.5	

Tabla 1. Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada del acuífero

## **1.2 Situación administrativa del acuífero**

El acuífero Río Santa Cruz pertenece al Organismo de Cuenca Noroeste. Su territorio se encuentra sujeto a las disposiciones del “Decreto que establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la región denominada Cuenca del Río Santa Cruz, municipios de Nogales y Santa Cruz, Estado de Sonora”, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 25 de enero de 1961. Una pequeña porción de las zonas serranas que delimitan el acuífero al este y oeste, se rige por 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”, publicado en el DOF el 19 de septiembre de 1978. Ambos decretos se clasifican como tipo III en los que la capacidad del acuífero permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.

El acuífero Río Santa Cruz pertenece al Organismo de Cuenca Noroeste. Su territorio se encuentra sujeto a las disposiciones del “Decreto que establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la región denominada Cuenca del Río Santa Cruz, municipios de Nogales y Santa Cruz, Estado de Sonora”, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 25 de enero de 1961. Una pequeña porción de las zonas serranas que delimitan el acuífero al este y oeste, se rige por 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”, publicado en el DOF el 19 de septiembre de 1978. Ambos decretos se clasifican como tipo III en los que la capacidad del acuífero permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 2. El usuario principal del agua es el Público urbano y agrícola.

En el acuífero no se localiza distrito o unidad de riego alguna, ni se ha constituido a la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

## **2 ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD**

En la región que comprende la superficie del acuífero, se han llevado cabo algunos estudios hidrogeológicos.

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

El estudio consistió en establecer una red de monitoreo piezométrico para cada acuífero que se encuentra bajo la administración de la gerencia regional noroeste, que incluye la totalidad del estado de Sonora y parte del Estado de Chihuahua. Se incluyen planos temáticos (clima, precipitación, temperatura, geomorfología, vegetación, etc.), planos de profundidad y elevación (mostrando las direcciones de flujo subterráneo), del nivel estático y la información que dio origen a dichos planos.

**APLICACIÓN DE MODFLOW PARA LA SIMULACIÓN HIDROGEOLÓGICA ESTACIONARIA DE UNA PORCIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO SANTA CRUZ, SONORA, MÉXICO**, elaborado por Gabriela Tapia Padilla como tesis de maestría, en noviembre de 2005. Universidad de Sonora.

EL objetivo general de esta tesis fue describir el comportamiento hidrogeológico de una porción del acuífero de la cuenca del Río Santa Cruz, en su condición estacionaria, a través del uso del software de simulación de flujo Visual MODFLOW.

**ESTUDIO REGIONAL DE EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL ACUÍFERO SANTA CRUZ, MUNICIPIOS DE SANTA CRUZ Y NOGALES, SONORA**, elaborado por la empresa Investigación y Desarrollo de Acuíferos y Ambiente, para la compañía minera Stingray, Copper Inc., en junio de 2008.

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

Los resultados y conclusiones de este estudio fueron la base para la elaboración del presente documento, por lo que sus conclusiones y resultados se analizan en los apartados correspondientes.

### **3 FISIOGRAFÍA**

#### **3.1 Provincia fisiográfica**

Según el INEGI, el acuífero abarca cuatro provincias que se encuentran en el Estado de Sonora. Casi en su totalidad dentro de la provincia Sierras y Llanuras del Norte y la parte suroeste dentro de la provincia Sierra Madre Occidental.

Para la primera de ellas, la región se ubica en la subprovincia Llanuras y Médanos del Norte, y para la segunda, en la subprovincia Sierras y Valles del Norte.

Subprovincia Llanuras y Médanos del Norte. Está formada por extensos valles aluviales entre los cuales se intercalan algunas sierras; asimismo, en el límite con Chihuahua se localiza un sistema de topofomas denominado bajada.

Predominan las rocas sedimentarias (principalmente conglomerados), aunque también se encuentran pequeños afloramientos de rocas ígneas intrusivas ácidas. En esta subprovincia se encuentran las siguientes formas fisiográficas dentro del acuífero: Sierra Plegada, Valle Aluvial Intermontano y Llanura Aluvial.

Subprovincia Sierras y Valles del Norte. Esta región está formada principalmente por sierras entre las cuales se localizan amplios valles paralelos con orientación norte-sur. La altitud de los sistemas montañosos decrece hacia el sur del estado.

En las sierras dominan las rocas volcánicas ácidas, sin embargo, casualmente aparecen cuerpos ígneos intrusivos. En los valles abundan los materiales sedimentarios continentales (conglomerados del Terciario). En la subprovincia, se encuentran las siguientes formas fisiográficas dentro del acuífero: Sierra Alta y Lomerío Escarpado.

#### **3.2 Clima**

Según la clasificación climática de Köppen, modificada por Enriqueta García (1964). El clima que prevalece en la región, es BSl kw (x') (e') que corresponde a clima semiseco y templado con verano cálido, con lluvias en verano que se manifiestan en los meses de julio y agosto. En este tipo de clima, el porcentaje de lluvia invernal es mayor de 10.2 y la temperatura media anual se encuentra entre 12 y 18° C. La cuenca del Río Santa Cruz cuenta con las estaciones climatológicas Nogales y Santa Cruz, ambas operadas por la Comisión Nacional del Agua. Con base en la información recopilada, se llevó a cabo el análisis climatológico.

La temperatura media anual es de 17.1° C para el período 1986-2006. La temperatura media máxima se registra durante el mes de julio y alcanza los 24.1° C, mientras que la temporada más fría se presenta durante el mes de febrero, con una temperatura media de 10.2° C.

La precipitación más abundante se registra durante el período de lluvias de verano, en los meses de julio y agosto, en el cual se presenta el 43.5% de su media anual; mientras que la temporada de estiaje corresponde a los meses de abril y mayo con el 6% de precipitación media.

La lámina más alta de lluvia en la cuenca se registra en el mes de julio, con 90.8 mm, mientras que la más baja ocurre en el mes de mayo con 9.5 mm.

De la información aportada por los evaporímetros en la región, se determinó que en la zona el valor de la evaporación potencial es de 2117 mm anuales.

### **3.3 Hidrografía**

El acuífero Río Santa Cruz, se encuentra ubicado en la Región Hidrológica 7 “Río Colorado”.

El acuífero pertenece a la cuenca del Río Santa Cruz. Este río nace en los Estados Unidos de América y escurre con dirección sur hacia México, cruzando la línea divisoria internacional en las cercanías del poblado de Lochiel, Arizona, y retorna a los Estados Unidos al este de la ciudad de Nogales, Sonora, descargando en el río Gila al suroeste de Phoenix, Arizona.

El área drenada del río Santa Cruz aguas arriba de la estación hidrométrica de Nogales, Arizona, es de 1,380 km<sup>2</sup>, de los cuales 882.5 km<sup>2</sup> se encuentran en México.

## **4 GEOLOGÍA**

La columna geológica de la zona está constituida por rocas de origen sedimentario e ígneo de complejas relaciones estructurales debido a los eventos de deformación que dieron lugar a extensos plegamientos.

La distribución de las diferentes unidades litológicas se observa en la figura 2.

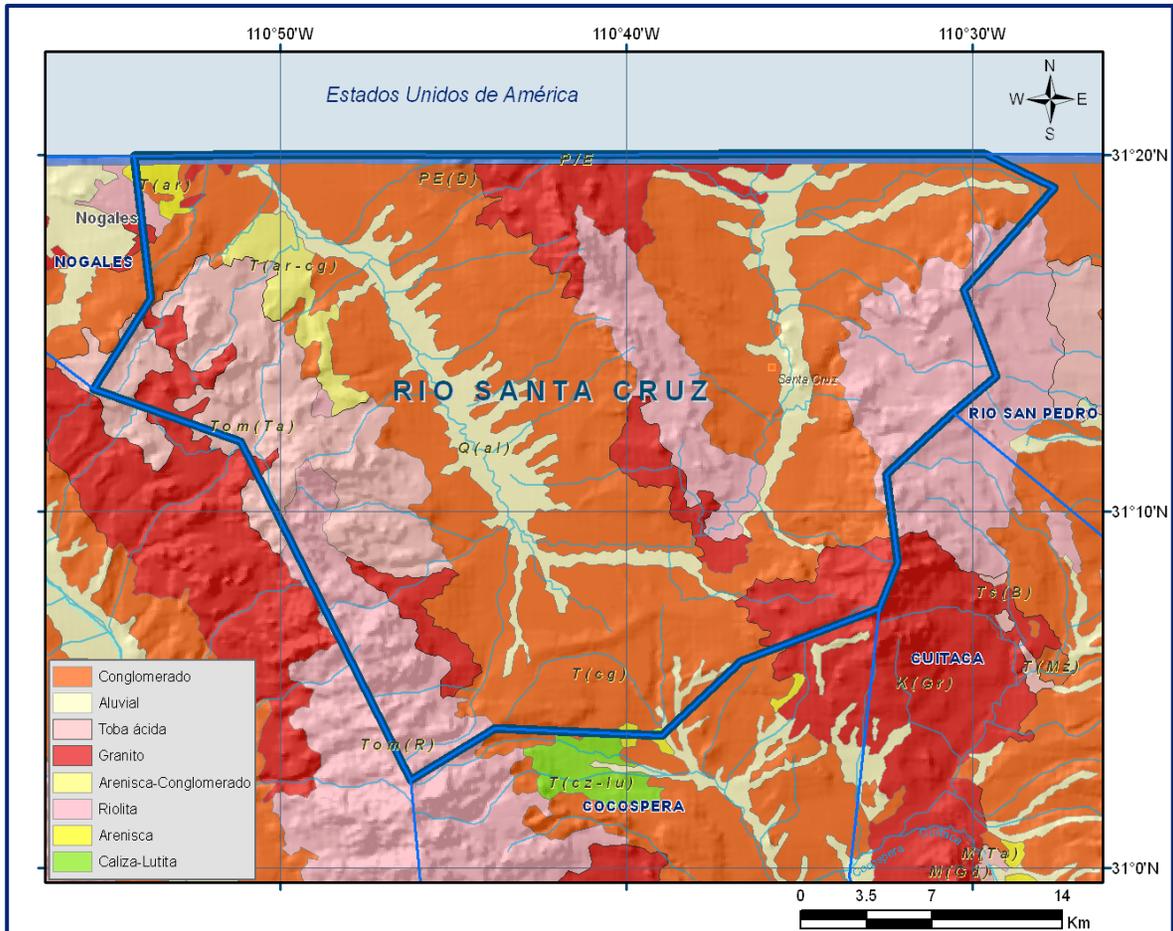


Figura 2. Geología general del acuífero

#### 4.1 Estratigrafía

En el área de interés afloran 13 unidades litológicas, que varían en edad desde el Proterozoico Medio hasta el Cuaternario, a continuación, se presenta la descripción de las distintas unidades cronoestratigráficas:

##### **Cuerpo intrusivo diorítico**

Es la unidad más antigua, del Precámbrico Medio, que aflora en la porción noroeste de la sierra San Antonio, ubicada en la parte centro norte del área de estudio, y forma parte de una serie de afloramientos discontinuos del Proterozoico. Esta unidad se encuentra intrusionada por cuerpos graníticos y granodioríticos del Jurásico Medio y Paleoceno.

##### **Flujos volcánicos y areniscas volcanoclásticas, cuarcitas y grawackas**

Valentine, W.G. (1936), denominó a esta secuencia, Formación Elenita, que aflora en la parte centro, suroeste y noroeste del área de estudio.

En el afloramiento de la parte noroeste está intrusionada por el granito jurásico y cubierta discordantemente por sedimentos granulares mal consolidados del Cuaternario; en la parte centro es intrusionada por un granito - granodiorita de edad Paleoceno, es cubierta discordantemente por los paquetes volcánicos del Oligoceno y Mioceno y está en contacto tectónico con las unidades sedimentarias del Mioceno y sedimentos mal consolidados del Pleistoceno. Intrusionando a las unidades anteriores se presentan afloramientos de cuerpos plutónicos graníticos del Jurásico Medio, que se localizan al noroeste de Nogales y en el cerro El Tordillo en la parte centro - norte del área de estudio. Están cubiertos discordantemente por unidades más recientes.

### **Tobas, flujos, aglomerados y conglomerados**

Valentine, W.G. (1936), denominó Formación Mesa a esta secuencia de rocas volcánicas de composición andesítica, del Cretácico, que aflora en la porción centro-oeste del área. La base está constituida por conglomerados polimícticos con areniscas. Hacia la parte media y superior predominan las tobas andesíticas y las andesitas.

La formación está afectada por la granodiorita del Paleoceno y es sobreyacida por rocas volcánicas del Oligoceno y Mioceno, y por rocas sedimentarias del Mioceno y Plioceno.

### **Cuerpos intrusivos, secuencias de areniscas vulcanosedimentarias, conglomerados y tobas**

Toda la columna precretácica es afectada por cuerpos intrusivos, con antigüedad de  $64.0 \pm 3.0$  Ma. Sus afloramientos principales en el área son: en la sierra El Chivato al sureste, sierra San Antonio en la parte centro, y en los flancos sur - oriente y norponiente de la sierra El Pinito, localizada al suroeste.

Esta cubierta discordantemente por las rocas volcánicas del Oligoceno y Mioceno, y sedimentarias del Mioceno - Plioceno, Pleistoceno - Holoceno, siendo sus contactos localmente tectónicos.

Un grueso paquete volcánico constituido por tobas riolíticas con horizontes esferulíticos riolíticos, aglomerados y brechas riolíticas, aflora en la porción noreste del área, sobreyaciendo discordantemente a las rocas vulcanosedimentarias del Jurásico y volcánicas del Cretácico Superior.

Están cubiertas discordantemente por volcánicas del Mioceno y sedimentarias del Mioceno, Plioceno y Pleistoceno. También es intrusionada por la granodiorita del Paleoceno.

### **La Formación Tubutama**

Es una secuencia de rocas sedimentarias con horizontes de boratos y rocas volcánicas intercaladas. En el área de estudio, esta secuencia está constituida por areniscas y lutitas principalmente, con escasos horizontes conglomeráticos. Aflora en el centro - sur del área, en las inmediaciones del terreno del rancho La Concordia. Cubre discordantemente al intrusivo granítico del Paleoceno, mientras que el contacto superior es discordante con las unidades clásticas del Mioceno, Pleistoceno y Holoceno.

### **La Formación Baúcarit**

Es una secuencia de areniscas arcillosas, conglomerados de estratificación plana y basaltos. La parte vulcanosedimentaria aflora en el centro del área, rellenando la parte poniente del valle entre las sierras San Antonio y El Pinito.

Cubre discordantemente a rocas vulcanosedimentarias del Jurásico e intrusivas del Paleoceno, y a su vez, la cubren discordantemente las volcánicas del Mioceno y sedimentos mal consolidados del Plioceno, Pleistoceno y Holoceno. La parte sedimentaria aflora en los alrededores de la sierra El Chivato, cubriendo discordantemente al intrusivo granodiorítico del Paleoceno, volcánicas del Cretácico Superior y Mioceno, y sedimentarias del Plioceno, Pleistoceno y Holoceno.

Cubriendo a las unidades anteriores, y aflorando al noroeste del área de estudio (sierra El Pinito) y en la esquina noreste del área, se tienen rocas constituidas por toba riolítica, riolita y toba lítica de edad Mioceno.

Un paquete, con escasos horizontes de arenisca y limolita medianamente consolidados y pobremente clasificados, (conglomerado polimíctico), aflora en la porción sureste del área. Este paquete cubre discordantemente al intrusivo del Paleoceno, volcánicas del Cretácico Superior y Oligoceno, y sedimentarias del Mioceno. Encima de este último hay discordantemente sedimentos aluviales del Holoceno.

### **Conglomerados, gravas, arenas y limos**

Del Pleistoceno se tienen depósitos no consolidados de conglomerados, gravas, arenas y limos del Cuaternario, con clastos subangulosos de tamaños y composición heterogénea. Descansan discordantemente sobre toda la columna precuaternaria. También se encuentran depósitos recientes de arena, limo y grava, del Holoceno, restringidos a los cauces de ríos y arroyos del área.

### **4.3 Geología estructural**

Los elementos estructurales en el área son fallas, pliegues, foliación y estratificación, con un patrón de lineamientos regionales bien marcados con una orientación preferencial noroeste - sureste. La mayor parte de las veces, estos lineamientos corresponden a fallas normales de alto ángulo con buzamientos al noreste y suroeste, de manera que se producen sierras paralelas a la orientación de las fallas. El resultado es un sistema de bloques levantados y hundidos tipo horst y graben, relacionado a la tectónica extensional del Terciario Superior. Este sistema se encuentra bien definido en la porción central del área, en donde los bloques levantados o pilares tectónicos corresponden a las sierras Guacomea, Cíbuta, San Antonio y El Chivato.

Estas sierras se constituyen principalmente por rocas volcánicas mesozoicas, y volcánicas e intrusivas terciarias separadas por valles alargados rellenos principalmente con sedimentos continentales terciarios y cuaternarios. El sistema de lineamientos y fallas NE-SW, se expresa principalmente en la traza rectilínea de los ríos y arroyos principales. La foliación se presentó en la secuencia metamórfica del Jurásico y en los granitos deformados del Terciario.

Las rocas Jurásicas presentan un metamorfismo regional de la facie esquisto verde. Su foliación tiene una orientación general NW-SE con inclinación hacia el SW de 20° a 73°, y en algunas localidades la inclinación cambia al NE debido a los plegamientos, con valores de 15° a 24°. La estratificación está presente en todas las secuencias sedimentarias y vulcanosedimentarias: desde el Paleozoico hasta el Terciario, presentando orientaciones e inclinaciones variables.

### **4.3 Geología del subsuelo**

La información de los cortes litológicos de pozos, las evidencias de campo y los registros eléctricos realizados en la región (2008), describe seis unidades hidrogeológicas considerando las condiciones estructurales e hidráulicas de cada una:

Sección NS-01

La sección está conformada por los TEM´s: SC-02, SC-03, SC-06, SC-07, SC-08, SC-09, SC-10, SC-11, SC-14, SC-15, SC-29 y SC-32 (Figura 3). Tiene un rumbo general norte - sur y se ubica en la parte poniente del acuífero, sobre el cauce del río Santa Cruz. Se detectaron tres de las unidades hidrogeológicas: fluvial (II), vulcanosedimentaria - continental (III) y vulcanosedimentaria - continental (IV).

La unidad II comprende depósitos de arenas - arcillas y gravas - arenas con espesores de hasta 70 m y 300 m respectivamente, considerándose saturadas a las gravas - arenas. El agua subterránea en la sección fluye con dirección S-N (paralela al cauce del río), desde el TEM SC-29 hasta el TEM SC-03, lugar donde la dirección cambia a SE-NW, casi perpendicular a la sección. Del TEM SC-02, el agua fluye hacia el cauce del río, o sea hacia el TEM SC-03.

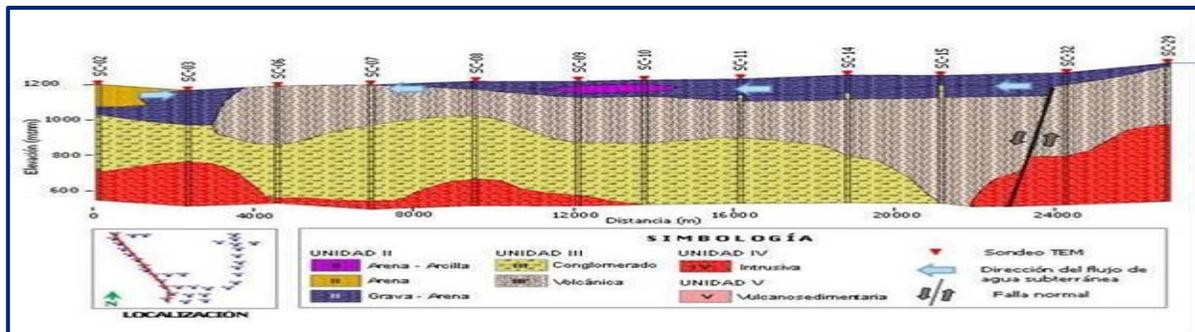


Figura 3. Sección hidrogeológica NS-01

Sección WE-04

La sección hidrogeológica está conformada por los TEM´s SC-15, SC-16, SC-17, SC-18 y SC-19 (Figura 4), y lleva un rumbo este - oeste, ubicándose en la parte centro - sur del acuífero. Presenta tres unidades hidrogeológicas: fluvial (II), que en esta sección presenta depósitos de arenas - arcillas y gravas - arenas; vulcanosedimentaria de ambiente continental (III), y por último la unidad (IV) que es continental.

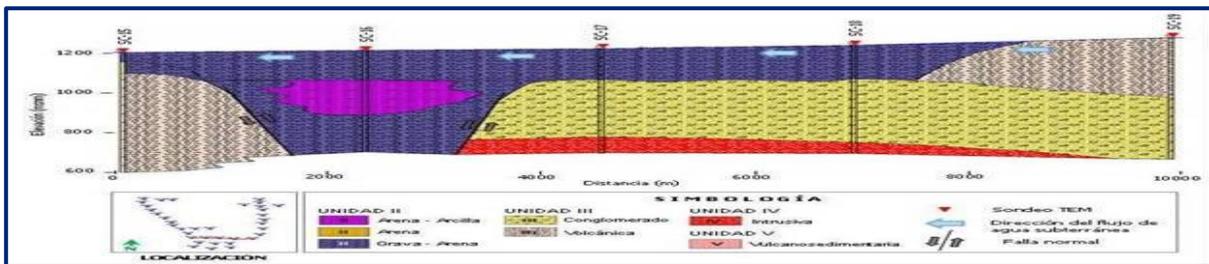


Figura 4. Sección hidrogeológica W-E

Con base en los valores resistivos registrados en los TEM´s SC-16, SC-17 y SC-18, al tipo de material que se asocia (gravas - arenas) a dichos valores resistivos (13 - 24 ohm-m) y el espesor de éste (250 m), se define que la unidad II es la de mejores posibilidades acuíferas, mientras que las unidades III y IV presentan altos valores resistivos que podría representar rocas de baja permeabilidad.

### **Unidad I      Cubierto Aluvional**

Constituida por sedimentos que tienen origen en las rocas adyacentes a la cuenca y que se depositan en el cauce de arroyos y ríos. El límite inferior está constituido por sedimentos arenosos y gravosos que constituyen la unidad II y localmente con las unidades III y V. La porosidad y permeabilidad se consideran altos.

### **Unidad II      Fluvial**

Constituida por sedimentos de arena y grava que se originan en la periferia de la cuenca, los cuales se depositan en forma de abanicos aluviales y fluviales. Esta unidad es considerada como el acuífero principal, ya que por su permeabilidad media-alta almacena grandes volúmenes de agua. Sus afloramientos se localizan en el extremo suroeste y centro del acuífero.

### **Unidad III      Vulcanosedimentaria y Continental**

Secuencia vulcanosedimentaria y continental constituida por conglomerado polimíctico mal consolidado, pseudoestratos de toba riolítica, coladas de riolita y basalto y estratos de conglomerado polimíctico bien consolidado y arenisca. Las rocas volcánicas presentan una porosidad y permeabilidad primaria baja que se incrementa a media cuando son afectadas por eventos tectónicos.

El conglomerado de la Formación Baúcarit se considera de permeabilidad baja, la cual se incrementa a media dependiendo del grado de fracturamiento.

El conglomerado mal consolidado pudiera considerarse de permeabilidad baja a media ya que localmente, debido a su bajo grado de litificación, la permeabilidad y porosidad es media.

Esta unidad está limitada en su parte superior por la unidad I y II, y en la parte inferior por la unidad IV y V siendo tectónicos algunos de sus contactos en ciertas localidades, lo cual puede producir una zona fracturada próxima a éste de alta permeabilidad.

#### **Unidad IV Vulcanosedimentaria y Continental**

Unidad conformada por coladas de composición andesítica intercalada con pseudoestratos de toba andesítica y un cuerpo intrusivo de composición ácida a intermedia.

De acuerdo a sus características hidráulicas, a esta unidad se le asigna una porosidad y permeabilidad primaria baja, pero a causa de los eventos tectónicos de distensión Terciaria y Laramide, su porosidad y permeabilidad secundarias pueden considerarse medias.

De la misma manera, los intrusivos se consideran de permeabilidad y porosidad primaria baja en las partes profundas de las intrusiones, sin embargo, en su parte superficial la porosidad y permeabilidad secundaria se considera media debido al intemperismo y fracturamiento de las rocas.

Su límite superior con las unidades II, III y IV es discordante y tectónico por distancias considerables y que son a la vez el límite físico de las fosas y que, dado el fracturamiento resultante, podría conformar una zona de porosidad media; mientras que su límite inferior es discordante sobre la unidad VI.

#### **Unidad V Vulcanosedimentaria Continental**

Esta unidad hidrogeológica está constituida por una secuencia de estratos de arenisca. Su porosidad y permeabilidad primaria son bajas, y a causa de los eventos tectónicos Mesocretácico, Laramide y Distensión Terciaria.

Esta unidad se encuentra fuertemente fracturada y localmente plegada, lo cual provoca que localmente esta unidad presente porosidad y permeabilidad secundaria media. Su límite superior está marcado discordantemente con las unidades I, II, III y IV siendo algunos de sus contactos con las unidades III y IV tectónicos, lo cual puede constituir zonas de intenso fracturamiento y por consecuencia de alta permeabilidad; mientras que su límite inferior no se observa en esta área.

#### **Unidad VI Continental**

Está constituida por un cuerpo intrusivo de composición diorítica y textura fanerítica, que localmente presenta variaciones a metadiorita esquistosa de grano fino a medio, en ocasiones deleznable.

Se le asigna una porosidad y permeabilidad primaria baja, la cual se incrementa a media a causa del fracturamiento producto de los diversos eventos tectónicos a los que ha estado expuesta y al intemperismo que provoca que la roca se encuentre deleznable. Esta unidad hidrogeológica se encuentra cortada por la unidad V y cubierta discordantemente por la unidad IV.

## **5 HIDROGEOLOGÍA**

### **5.1 Tipo de acuífero**

De acuerdo con la información geológica, geofísica, hidrogeológica y piezométrica, es posible identificar que el acuífero Río Santa Cruz es de tipo libre, formado por una secuencia de depósitos aluviales constituidos principalmente por gravas y arenas no consolidadas (unidad I) de alta permeabilidad y semiconsolidadas (unidad II), que presentan lentes intercalados de arcillas.

Su explotación se localiza principalmente sobre el cauce del Río Santa Cruz y arroyos tributarios, así como en la planicie de inundación. Debajo de esta secuencia y fuera de los cauces de los ríos y arroyos, el acuífero está conformado por conglomerados y una secuencia de rocas intrusivas y volcánicas que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento.

Las unidades de importancia, desde el punto de vista hidrogeológico, son las unidades I y II. La unidad I es aluvial y está formada por arenas que se depositan en el cauce del río, con alta conductividad hidráulica, pero muy poco espesor.

Por lo tanto, esta unidad funciona principalmente como transmisora de agua a la unidad II, la cual está formada por sedimentos de granulometría variable, predominando las arenas y gravas.

En el subsuelo la unidad II se encuentra saturada en la zona de cauce del río, sin embargo, aflorando en las partes altas puede encontrarse seca, o con el nivel estático muy profundo.

El resto de las unidades hidrogeológicas (volcánicas, intrusivas y sedimentarias), tienen baja conductividad hidráulica, por lo que se consideran barreras al flujo. Localmente, estas unidades pueden presentar permeabilidad secundaria producto de fallamiento o intemperismo, actuando como unidad productora de bajo rendimiento.

Hacia el lado oeste del acuífero, sobre el cauce del río existe una fosa formada por tectonismo distensivo (basin and range), con un espesor de sedimentos de más de 600 m. La infiltración es alta a lo largo del cauce, proveniente de la recarga de ladera y de infiltración del mismo río.

La profundidad al nivel estático en general es menor a 10 m y la dirección del flujo subterráneo es paralela al drenaje superficial, desde la frontera con Estados Unidos, con dirección noreste – suroeste, para luego cambiar abruptamente en sentido este – oeste, y finalmente evolucionar al sureste – noroeste, dirección con la que descarga hacia los Estados Unidos (Figura 5).

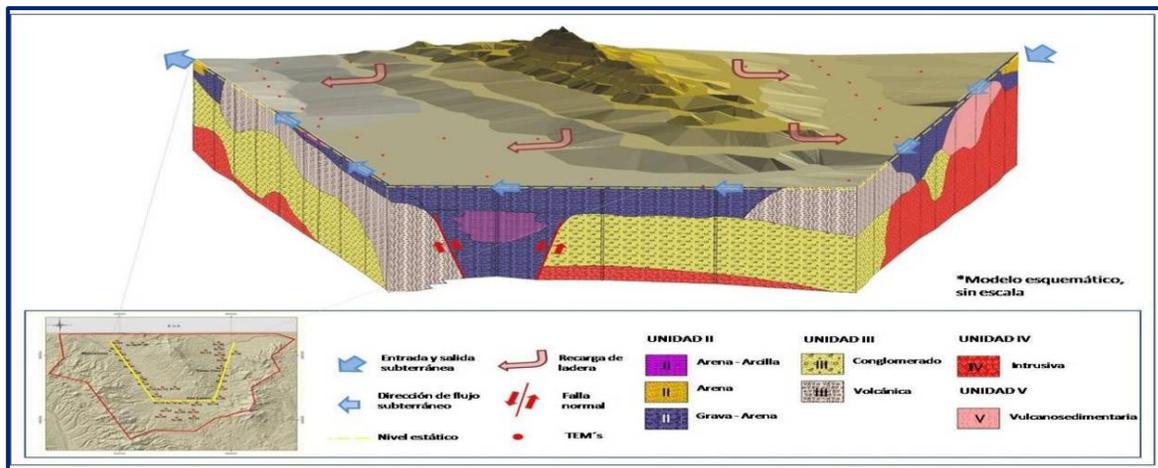


Figura 5. Modelo conceptual hidrogeológico

## 5.2 Parámetros hidráulicos

De acuerdo con las 5 pruebas de bombeo de corta duración, en etapa de abatimiento y de recuperación (Tabla 2); la transmisividad es alta, dado que la unidad acuífera principal corresponde a arenas con escasos lentes de arcillas (cauce del Río Santa Cruz). Los valores varían entre  $3.77 \times 10^{-1} \text{ m}^2/\text{min}$  ( **$6.28 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$** ) y  $1.6 \times 10^0 \text{ m}^2/\text{min}$  ( **$3.68 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$** ).

La conductividad hidráulica (K), varía entre  $1.18 \times 10^{-2} \text{ m}/\text{min}$  ( **$1.97 \times 10^{-4} \text{ m}/\text{s}$** ) y  $3.39 \times 10^{-1} \text{ m}/\text{min}$  ( **$5.65 \times 10^{-3} \text{ m}/\text{s}$** ). El valor promedio de T de las cinco pruebas realizadas es de  $1.06 \times 10^{-1} \text{ m}/\text{min}$  ( **$1.76 \times 10^{-3} \text{ m}/\text{s}$** ). Todos los valores de K obtenidos corresponden a arenas y su valor disminuye con la presencia de arcillas.

Tabla 2. Resultados de la interpretación de las pruebas de bombeo

CLAVE	ESTE	NORTE	ELEV (m)	T (m <sup>2</sup> /min)	T (m <sup>2</sup> /s)	K (m/min)	K (m/s)
STC05	534382	3446200	1288	5.03E-01	8.38E-03	1.18E-02	1.97E-04
STC12	538332	3457091	1380	5.56E-01	9.27E-03	3.39E-01	5.65E-03
STC16	538069	3461390	1388	3.77E-01	6.28E-03	4.11E-02	6.85E-04
STC26	525361	3451086	1226	1.07E+00	1.78E-02	1.15E-01	1.92E-03
STC50	518140	3462096	1167	1.60E+00	3.68E-02	2.30E-02	3.83E-04

En esta prueba no fue posible determinar el coeficiente de almacenamiento o rendimiento específico del acuífero.

### 5.3 Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea se consideró la información disponible de 2005 y 2008.

### 5.4 Comportamiento hidráulico

#### 5.4.1 Profundidad al nivel estático

La profundidad del nivel estático en 2008, varía entre 2.0 y 49.0 m. En general, las menores profundidades al nivel estático se registran sobre el cauce principal del Río Santa Cruz, donde son menores a 10 m (figura 6).

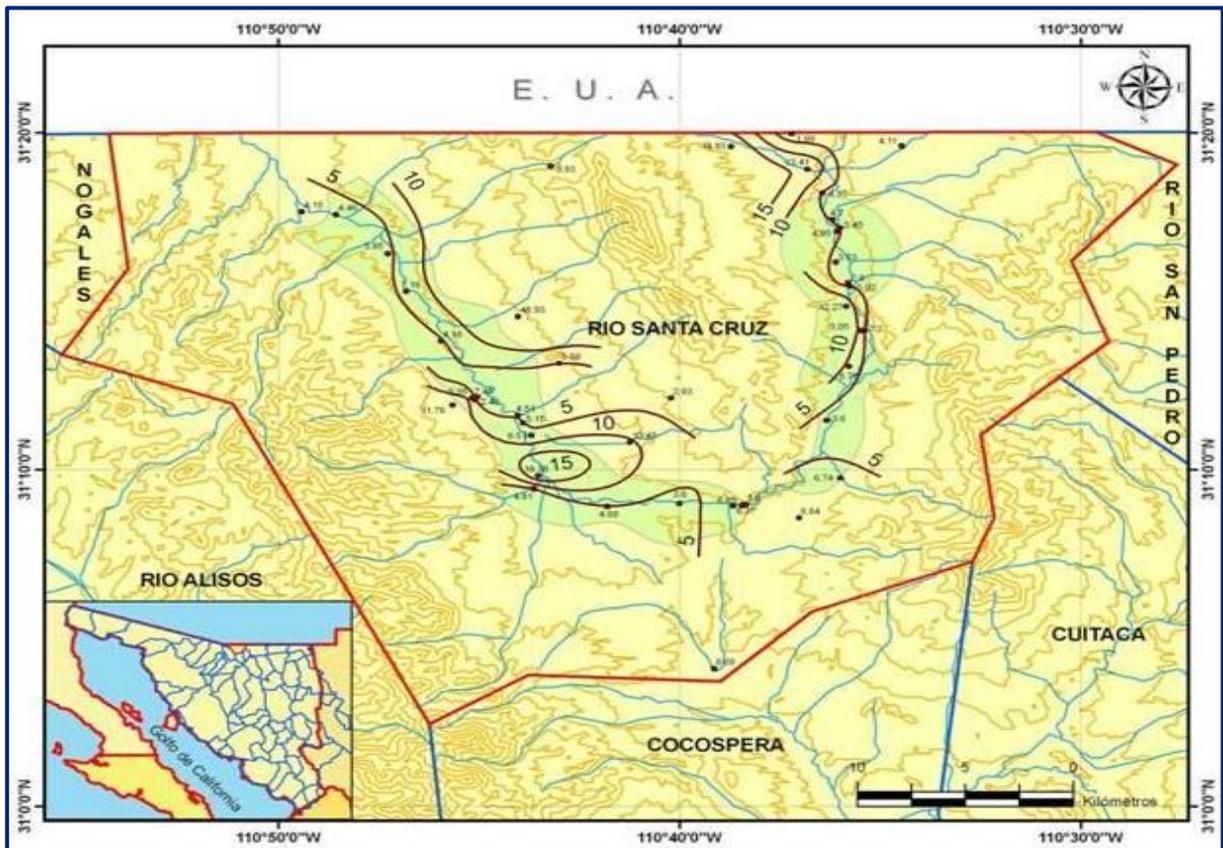


Figura 6. Profundidad al nivel estático en m (2008)

Sin embargo, existe una zona en la parte centro - oeste del acuífero (a 8.3 km al oeste del poblado de San Lázaro) donde la profundidad alcanza 18 m. Todas las profundidades son menores a los 20 m, excepto la que se encuentra en el ejido “El Papalote”, en la parte centro - noroeste del acuífero, donde se registra la máxima de 49 m.

#### 5.4.2 Elevación del nivel estático

La elevación del nivel estático en 2008 oscila entre 1452 y 1158 msnm. Según la influencia de la topografía; los valores más altos se localizan hacia las estribaciones de las sierras que delimitan los valles aluviales, donde se ubican las zonas de recarga, y a partir de estas se identifican las direcciones de flujo subterráneo. Las mayores elevaciones se ubican dirección N-NE del acuífero, en la entrada del Río Santa Cruz y en las sierras de los alrededores y las menores al N-NW del acuífero, en la salida del mismo río. La dirección principal del flujo subterráneo (2008), es paralela al cauce del río Santa Cruz, así como de las sierras de los alrededores hacia el cauce del río (figura 7).

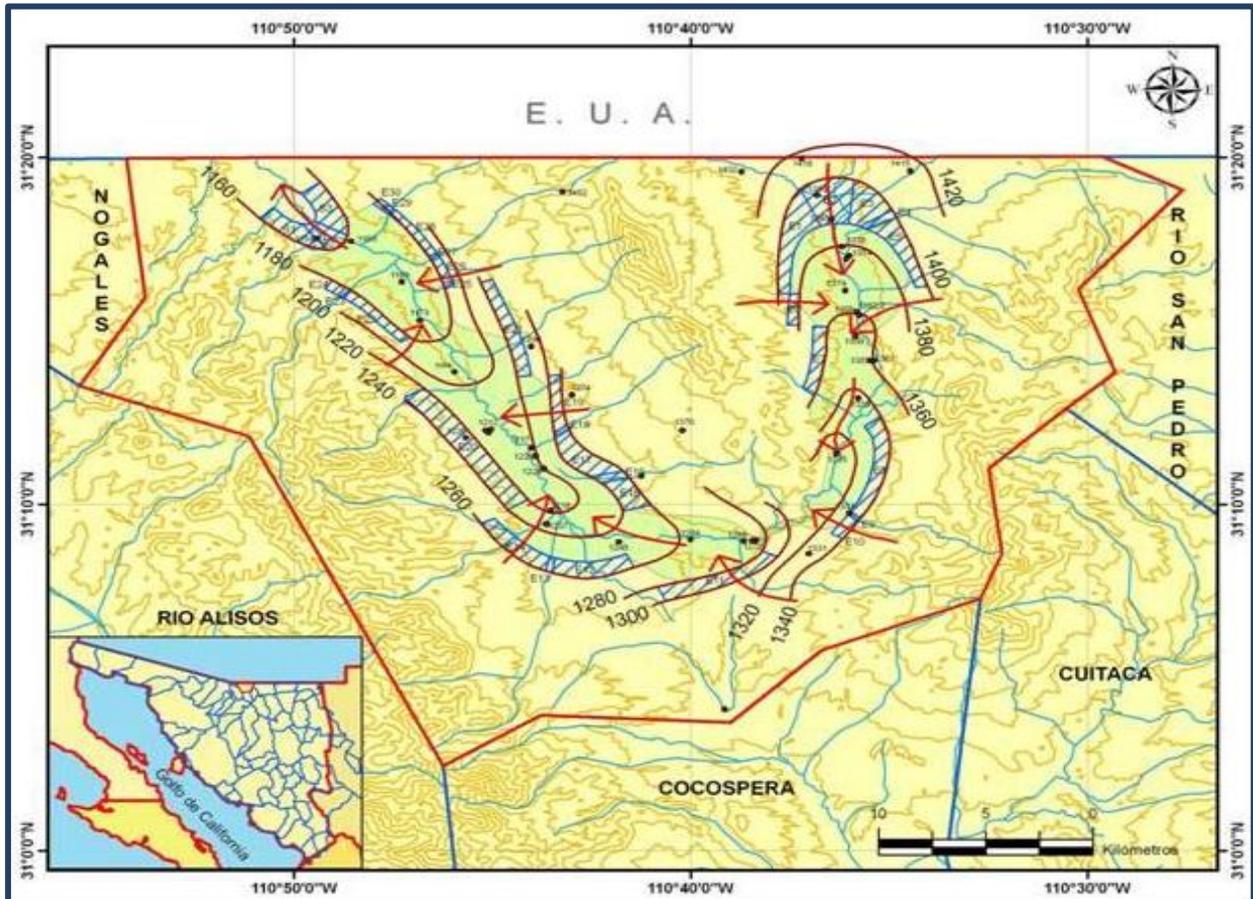


Figura 7. Elevación del nivel estático en msnm (2008)

Inicialmente, el flujo principal viaja con dirección N-S, y cambia abruptamente al E-W en las cercanías del poblado de San Lázaro y cambia al SE-NW hasta su salida hacia los Estados Unidos de América, en las cercanías del poblado de Mascareñas.

### 5.4.3 Evolución del nivel estático

La evolución del nivel estático para el periodo de 2005 a 2008, indica que el mayor abatimiento (-5.6 m) se registra en la parte NE del acuífero, sobre el cauce del río y cercano a la frontera con Estados Unidos. Del lado opuesto, en la parte NW del acuífero, sobre el cauce del río y también cercano a la línea fronteriza, se encuentra la mayor recuperación, siendo ésta de 4.7 m. En general puede observarse que los abatimientos se presentan en la mitad Este del acuífero y las recuperaciones en la mitad Oeste. El nivel se mantiene estable en la parte central (figura 8).

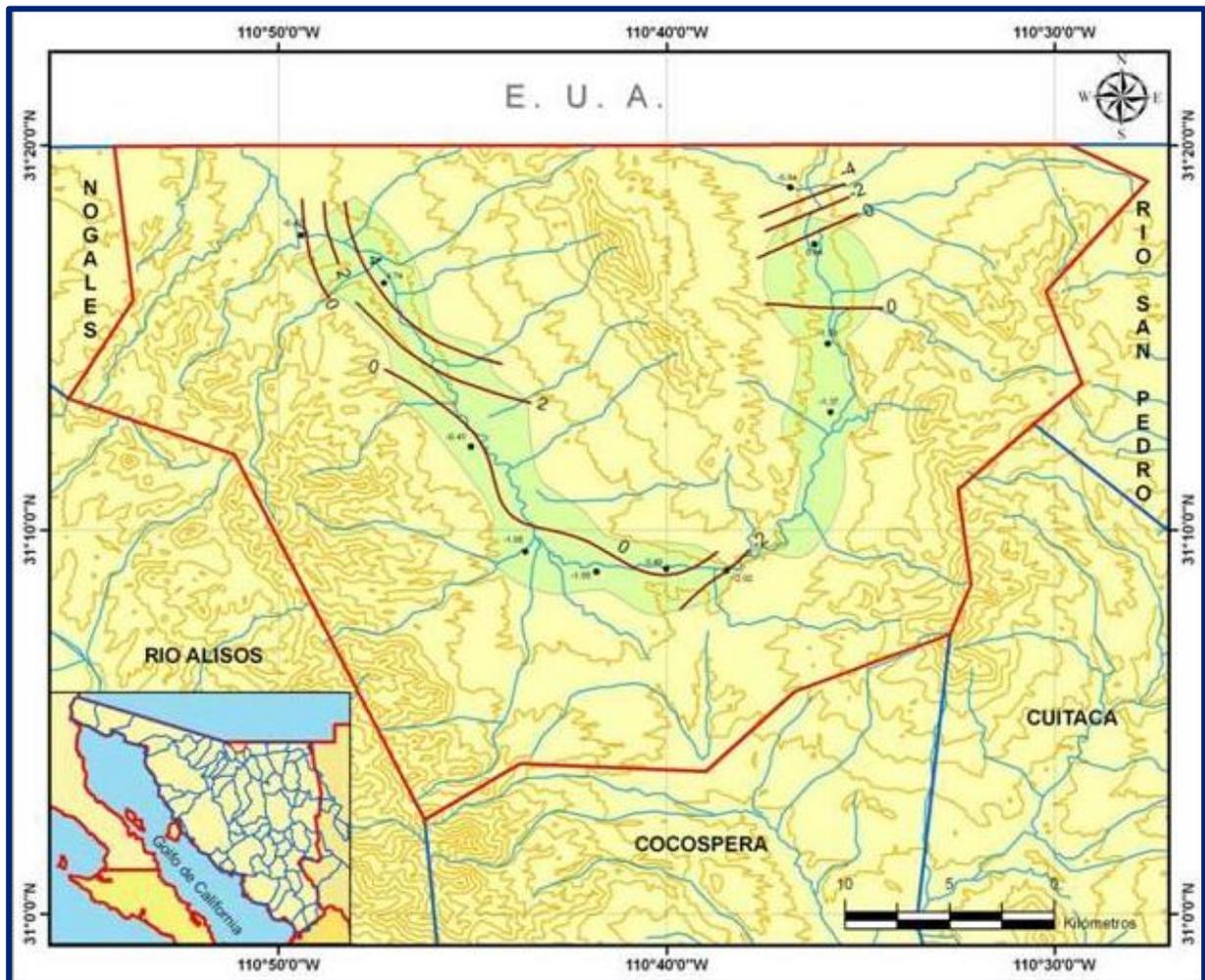


Figura 8. Evolución del nivel estático en me (2005-2008)

## 5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

De acuerdo con los resultados del análisis fisicoquímico en muestras de agua de 12 aprovechamientos (2008), se determinó iones mayoritarios, temperatura, conductividad eléctrica, pH, nitratos, dureza total y sólidos totales disueltos. El agua del acuífero se clasifica como agua dulce, según la clasificación establecida por la APHA, ya que los valores oscilan entre 80 y 1390  $\mu$ S/cm (de 40 a 690 ppm). Con una temperatura de 15.0° C a 23.0° C, y pH variable de 6.5 a 7.8. La familia de agua que predomina es la bicarbonatada-cálcica, lo cual es indicativo de aguas de reciente infiltración.

Los valores de sodio en el acuífero Río Santa Cruz, se encuentran dentro del límite máximo permisible establecido por la NOM-127-SSA1-2021 “Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua”, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 2 de mayo del 2022. (NOM) de 200 mg/l, pues las concentraciones oscilan entre 5.17 y 81.2 mg/l. Para el Calcio, las concentraciones son tolerables para uso y consumo humano ya que varían entre 5.34 a 188.0 mg/l. Para al Magnesio, las concentraciones oscilan entre 1.34 y 30.80 ppm y para potasio entre 0.99 a 5.51 mg/l. (figura 9).

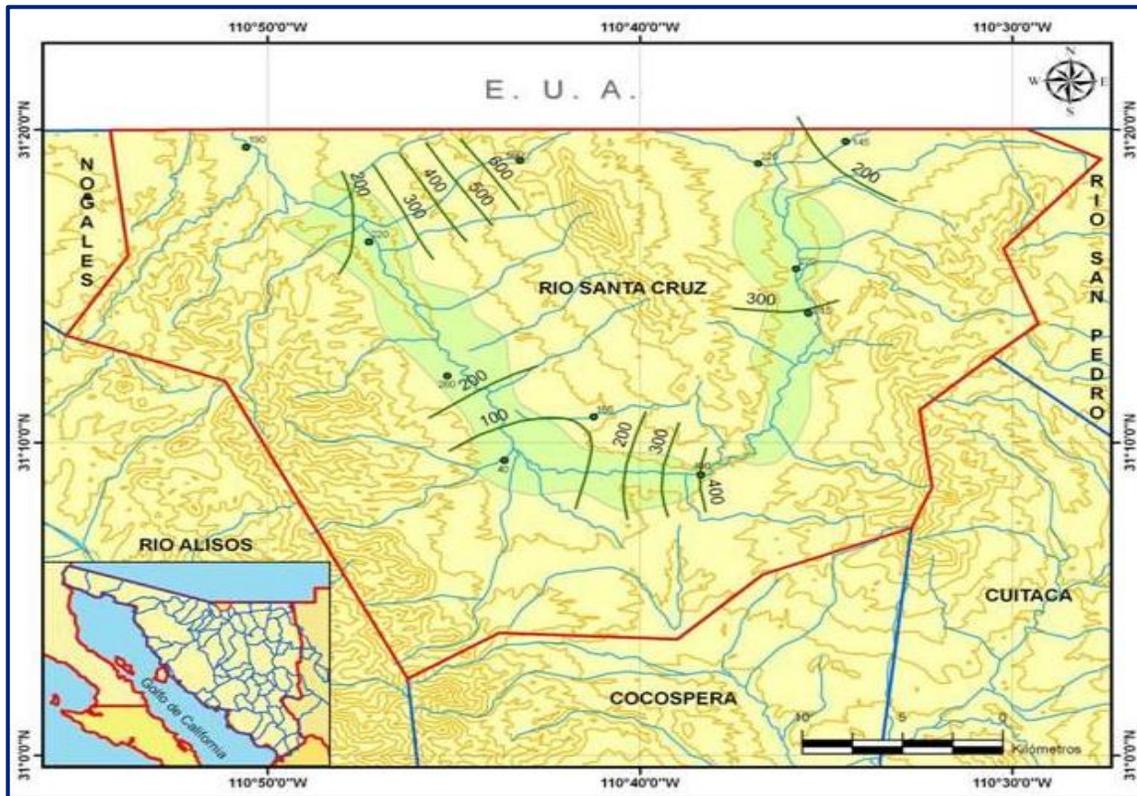


Figura 9. Distribución y valores de concentración de STD (ppm)

Para el contenido de cloruros, la NOM establece un límite máximo permisible de 250 mg/l para uso y consumo humano. En el acuífero Río Santa Cruz, las concentraciones de este ión se encuentran muy por debajo del límite máximo permisible, variando de 4.0 y 43.0 mg/l. Las concentraciones de sulfato en el acuífero se encuentran entre 9.0 y 612.0 mg/l. Sólo un aprovechamiento presentó una concentración mayor al límite máximo permisible establecido por la NOM de 400 mg/l para consumo humano.

En cuanto a bicarbonatos, las concentraciones varían de 22 a 296 mg/l; y para nitratos, las concentraciones se encuentran por debajo del límite máximo permisible que establece la NOM, el cual es de 10 mg/l, pues los valores obtenidos en el análisis de las muestras varían de 0.1 a 6.7 mg/l. Las concentraciones de dureza en el acuífero Río Santa Cruz varían de 21.0 mg/l a 632.0 mg/l. El agua se puede clasificar como ligera a moderadamente dura, ya que el 83% de los aprovechamientos presentaron concentraciones menores a 200 mg/l y el 17% restante se considera aguas muy duras.

## **6 CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA**

De acuerdo con los resultados del censo realizado en 2014, se registraron un total de 196 aprovechamientos de aguas subterráneas (2008), en el acuífero Río Santa Cruz, de los cuales 165 se encuentran activos y los 31 restantes inactivos. De los 165 aprovechamientos activos, 98 de ellos (59.4%) se destinan al uso agrícola, 25 más (15.2%) para uso Público urbano, 23 (13.9%) para uso pecuario y los 19 restantes (11.5%) para uso doméstico.

El volumen de extracción conjunto estimado asciende a **26.4 hm<sup>3</sup> anuales**, de los cuales 18.09 hm<sup>3</sup> (68.5%) se utilizan para satisfacer las necesidades del uso público - urbano (principalmente para la población de Nogales, Sonora), 8.13 hm<sup>3</sup> más (30.8 %) se destinan a las actividades agrícolas, 0.14 (0.5 %) al uso pecuario y los 0.04 restantes (0.2%) para uso doméstico.

## **7 BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS**

El balance de agua subterránea se planteó para el periodo 2005-2008, en una superficie de 130 km<sup>2</sup>, 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 la conservación de la masa es la siguiente:

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

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

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

## **7.1 Entradas**

La recarga total que recibe el acuífero Río Santa Cruz (R) ocurre por tres procesos naturales principales: por infiltración de agua de lluvia en el valle, por infiltración de los escurrimientos del Río Santa Cruz, que en conjunto se consideran como recarga vertical (Rv), y por flujo subterráneo (Eh).

De manera inducida, se produce recarga debido a la infiltración de los excedentes del agua destinada al uso agrícola (Rr), que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela.

### **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 ( $\Delta V$ ), así como las entradas y salidas por flujo subterráneo, su valor será despejado de la ecuación de balance:

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

Donde:

- Rv:** Recarga vertical
- Eh:** Entradas por flujo subterráneo horizontal
- Rr:** Recarga inducida por retorno de riego
- B:** Bombeo
- Sh:** Salidas por flujo subterráneo horizontal
- ETR:** Evapotranspiración
- $\Delta V(S)$ :** Cambio de almacenamiento

De esta manera, despejando la recarga vertical:

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

### 7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

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.

El cálculo de entradas por flujo horizontal se realizó con base en la Ley de Darcy, partiendo de las configuraciones de elevación del nivel estático para los años 2001 y 2009 (figura 6 y 7).

De acuerdo con la ecuación de Darcy para medios porosos:

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

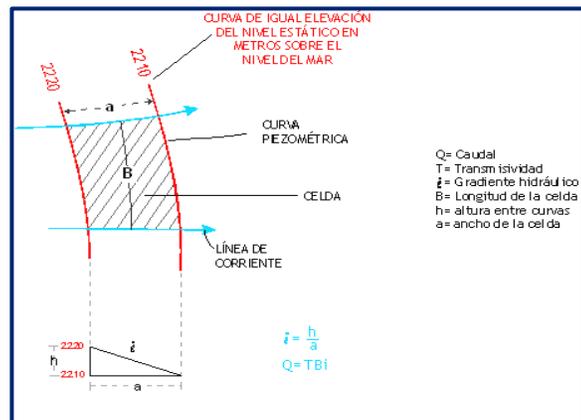
Donde:

**Q**= Gasto;

**T**= Transmisividad;

**B**= Longitud de la celda;

**i**= Gradiente hidráulico;



En esta configuración se seleccionaron canales o celdas de flujo y se aplicó la ley de Darcy 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.

En la Tabla 3 se puede observar que, para las celdas identificadas, se presenta un flujo de entrada de **10.2 hm<sup>3</sup>/año**.

Tabla 3. Cálculo de entradas por flujo horizontal (2008)

CANAL	ANCHO B	LONGITUD L	b	$h_2-h_1$	Gradiente i	K	T	CAUDAL Q	VOLUMEN
	(m)	(m)	(m)	(m)		( m/s)	( $m^2/s$ )	( $m^3/s$ )	( $hm^3/año$ )
E1	4707	880	7	10	0.0114	1.47E-06	1.03E-05	0.0006	0.01736
E2	1636	2418	10	10	0.0041	1.77E-03	1.77E-02	0.1198	3.77665
E3	1350	1998	7	10	0.005	1.47E-06	1.03E-05	0.0001	0.00219
E4	305	1457	5	10	0.0069	1.77E-03	8.85E-03	0.0185	0.58424
E5	3725	692	7	10	0.0145	1.47E-06	1.03E-05	0.0006	0.01747
E6	1655	440	7	10	0.0227	1.47E-06	1.03E-05	0.0004	0.01221
E7	3530	562	7	10	0.0178	1.47E-06	1.03E-05	0.0006	0.02038
E8	5256	551	7	10	0.0181	1.47E-06	1.03E-05	0.001	0.03095
E9	187	559	5	10	0.0179	1.77E-03	8.85E-03	0.0296	0.93364
E10	1163	552	7	10	0.0181	1.47E-06	1.03E-05	0.0002	0.00684
E11	4950	711	7	20	0.0281	1.47E-06	1.03E-05	0.0014	0.04518
E12	3162	861	7	10	0.0116	1.47E-06	1.03E-05	0.0004	0.01192
E13	256	783	5	10	0.0128	1.77E-03	8.85E-03	0.0289	0.91249
E14	3360	784	7	10	0.0128	1.47E-06	1.03E-05	0.0004	0.01391
E15	1697	1051	7	20	0.019	1.47E-06	1.03E-05	0.0003	0.01048
E16	304	1250	5	20	0.016	1.77E-03	8.85E-03	0.043	1.35751
E17	3064	1023	7	20	0.0196	1.47E-06	1.03E-05	0.0006	0.01944
E18	159	683	5	20	0.0293	1.77E-03	8.85E-03	0.0412	1.29944
E19	2887	477	7	20	0.0419	1.47E-06	1.03E-05	0.0012	0.03928
E20	7334	1001	7	20	0.02	1.47E-06	1.03E-05	0.0015	0.04755
E21	5303	561	7	10	0.0178	1.47E-06	1.03E-05	0.001	0.03067
E22	3343	426	7	10	0.0235	1.47E-06	1.03E-05	0.0008	0.02547
E23	181	538	5	10	0.0186	1.77E-03	8.85E-03	0.0298	0.93896
E24	656	544	7	10	0.0184	1.47E-06	1.03E-05	0.0001	0.00391
E25	256	387	5	10	0.0258	1.47E-06	7.35E-06	0	0.00153
E26	1273	376	7	10	0.0266	1.47E-06	1.03E-05	0.0003	0.01099
E27	273	370	5	10	0.027	1.47E-06	7.35E-06	0.0001	0.00171
E28	2809	382	7	10	0.0262	1.47E-06	1.03E-05	0.0008	0.02386
E29	270	372	7	10	0.0269	1.47E-06	1.03E-05	0.0001	0.00236
E30	546	402	7	10	0.0249	1.47E-06	1.03E-05	0.0001	0.00441
<b>Total entradas</b>									<b>10.19859</b>

### 7.1.3 Recarga inducida por retorno de riego (Rr)

En esta variable se incluyen los volúmenes de infiltración de agua que se producen exclusivamente por concepto de los excedentes del riego ya que en la región no existen asentamientos humanos importantes cuya infraestructura hidráulica pueda generar fugas en los sistemas de abastecimiento de agua potable y/o alcantarillado.

En el acuífero Río Santa Cruz existe una zona agrícola cuya superficie aproximada es de 833 has, que se localiza a lo largo del cauce del río del mismo nombre.

Según el censo de aprovechamientos subterráneos realizado en el estudio del 2008, los cultivos principales son: alfalfa (60%), avena (30 %), y sorgo (10 %). El uso consuntivo promedio ( $\overline{UC}$ ) se calculó como:

$$\overline{UC} = \frac{\sum_1^3 A_i UC_i}{\sum_1^3 A_i}$$

Donde  $A_i$  y  $UC_i$  son el área y el uso consuntivo del cultivo  $i$ . La estimación del uso consuntivo por cultivo se realizó mediante la fórmula de Blaney - Criddle modificada por Phelan (Aguilera y Martínez, 1996). Si  $i = 1, 2, 3$  para la alfalfa, avena y sorgo, respectivamente, se tiene:

$$\overline{UC} = \frac{(499.8 \text{ ha} \times 1008 \text{ mm}) + (249.9 \text{ ha} \times 753 \text{ mm}) + (83.3 \text{ ha} \times 703 \text{ mm})}{833 \text{ ha}} = 901 \text{ mm}$$

Por el método de balance hídrico, la lámina de recarga por retorno de riego ( $Rr$ ), se calcula como:

$$Rr = P + L_r - \overline{UC}$$

Donde  $L_r$  es la lámina de riego aplicada, la cual se obtiene como el cociente de la extracción para uso agrícola (8 134,404 m<sup>3</sup>/año) y la superficie regada (833 ha), arrojando un valor de 976.52 mm.

La lámina de precipitación en el acuífero es de 414 mm. De esta manera:

$$Rr = 414 + 976.52 - 901 = 489.52 \text{ mm}$$

Multiplicada por el área total de riego, la recarga total por riego ( $Rr$ ) es de **4.1 hm<sup>3</sup>/año**.

## 7.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente por bombeo (B), por flujo subterráneo (Sh) y por evapotranspiración en niveles someros (ETR). No existen salidas por flujo base en el río ni manantiales.

### 7.2.1 Extracción por bombeo (B)

Se calculó un volumen total de extracción de **26.4 hm<sup>3</sup> anual**. De acuerdo con el censo de aprovechamientos realizado en el estudio del 2008. Cabe resaltar que existe un predominio de obras someras, a las cuales se les extraen caudales considerables y son el reflejo de la principal unidad hidrogeológica que se explota: acuíferos granulares constituidos por sedimentos fluvio - aluviales, presentes en todo el cauce del Río Santa Cruz.

### 7.2.2 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

Las salidas subterráneas fueron calculadas de la misma manera que las entradas subterráneas, utilizando el plano de elevación del nivel estático mostrado en la figura 6 y aplicando la Ley de Darcy para las celdas de flujo identificadas.

El detalle se muestra en la tabla 4. Los resultados indican que el volumen total de salidas subterráneas asciende a 2.0 hm<sup>3</sup>/año.

Tabla 4. Cálculo de salidas por flujo horizontal (2008)

CANAL	ANCHO B (m)	LONGITUD L (m)	b (m)	h <sub>2</sub> -h <sub>1</sub> (m)	Gradiente i	K (m/s)	T (m <sup>2</sup> /s)	CAUDAL Q (m <sup>3</sup> /s)	VOLUMEN (hm <sup>3</sup> /año)
S1	2429	808	5	10	0.0124	1.47E-06	7.35E-06	0.0002	0.00697
S2	823	1659	7	10	0.006	1.77E-03	1.24E-02	0.0615	1.93835
S3	2357	941	5	10	0.0106	1.47E-06	7.35E-06	0.0002	0.00581
<b>Total salidas</b>									<b>1.95112</b>

### 7.2.3 Evapotranspiración (ETR)

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

En la mayor parte del área de balance los niveles estáticos se encuentran a profundidades menores a 10 m de profundidad, que se considera el límite de extinción para que se produzca el fenómeno de evapotranspiración. Se aplicó el método de Turc para calcular que la lámina de Evapotranspiración real es de 398.7 mm anuales, considerando valores medios anuales de temperatura de 17.1 °C y precipitación de 414.0 mm.

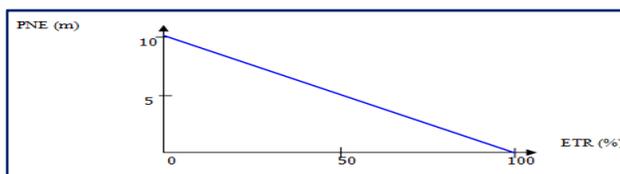
Fórmula de Turc:

$$ETR(mm) = \frac{P(mm)}{\sqrt{0.90 + \left(\frac{P^2(mm)}{L^2}\right)}} \quad L = 300 + 25T + 0.05T^3$$

T (°C) = 17.14  
 P(mm) = 414      P<sup>2</sup> = 171396  
 L = 980.2691      L<sup>2</sup> = 960927.54

ETR (mm) = 398.7  
 ETR (m) = 0.3986735

En zonas donde el nivel estático se encuentra a una profundidad menor a 10 m y con cobertura vegetal nativa, se calcula el valor de ETR exclusivamente para estas zonas de niveles someros y se pondera el valor del volumen obtenido, partiendo de una relación lineal inversa entre la profundidad al nivel estático (PNE) y el % de ETR. Suponiendo una profundidad límite de extinción de 10 m para el fenómeno de ETR, a menor profundidad mayor será el % de ETR, de tal manera que a 10 m el valor de ETR es nulo y a 0 m el valor es del 100 %, a 5 m el 50%, a 2 m el 80% etc.



La tabla 5 muestra el cálculo de la evapotranspiración, en la que se puede observar que el valor de esta componente del balance se estima en 8.8 hm<sup>3</sup> anuales.

Tabla 5. Cálculo de evapotranspiración

Intervalo curvas (m)	Profundidad Considerada (m)	Área (m <sup>2</sup> )	%	ETR (m)	Volumen ETR (hm <sup>3</sup> /año)
2 a 3	2.5	4938505	0.75	0.3987	1.48
3 a 4	3.5	9288784	0.65	0.3987	2.41
4 a 5	4.5	9137518	0.55	0.3987	2.00
5 a 6	5.5	8651920	0.45	0.3987	1.55
6 a 7	6.5	4948060	0.35	0.3987	0.69
7 a 8	7.5	3733036	0.25	0.3987	0.37
8 a 9	8.5	5163044	0.15	0.3987	0.31
9 a 10	9.5	799126	0.05	0.3987	0.02
<b>Total</b>					<b>8.83</b>

### 7.3 Cambio de almacenamiento (ΔVS)

El cambio de almacenamiento representa el volumen ganado o drenado por acuífero y se calcula a partir de la evolución piezométrica observada en el área de balance y del coeficiente de almacenamiento, mediante la siguiente expresión matemática:

$$\Delta V(S) = S * A * h$$

En donde:

- $\Delta V(S)$ :** Cambio de almacenamiento en el período analizado
- S:** Coeficiente de almacenamiento promedio de la zona de balance
- A:** Área de influencia de curvas de igual evolución del nivel estático (km<sup>2</sup>)
- h:** Valor de la variación piezométrica en el período (m)

En la tabla 6 se muestra el cálculo del volumen de cambio de almacenamiento para el periodo considerado. De acuerdo al manual para evaluar Recursos Hidráulicos Subterráneos (CNA, 1994), el valor del coeficiente de almacenamiento (S) para acuíferos libres varía entre 0.1 y 0.35, y para acuíferos confinados entre 0.00005 y 0.01.

Dado que en algunas zonas dentro del área de balance se presentan horizontes arcillosos, fue considerado un coeficiente de almacenamiento medio entre el mínimo para acuíferos libres y el máximo para acuíferos confinados, quedando de 0.05.

El área de balance considerada es de 130 km<sup>2</sup>, de manera que, al dividir el volumen del cambio de almacenamiento entre ésta, se obtiene una lámina de evolución del nivel estático anual de 0.007 m, lo que es evidencia de la estabilidad del acuífero.

Tabla 6. Cálculo de volumen de cambio de almacenamiento

Evolución (m)	Abatimiento (m)	Área (m <sup>2</sup> )	S	$\Delta V(S)$ (m <sup>3</sup> /año)
-3 a -2	-2.5	13937991.7	0.05	-1.74
-2 a -1	-1.5	20614399.8	0.05	-1.55
-1 a 0	-0.5	23822903.2	0.05	-0.60
0 a 1	0.5	30749210.3	0.05	0.77
1 a 2	1.5	14008192.8	0.05	1.05
2 a 3	2.5	8276342.9	0.05	1.03
3 a 4	3.5	6948501.6	0.05	1.22
4 a 5	4.5	11471281.5	0.05	2.58
			<b>Total =</b>	<b>2.77</b>
		<b>Promedio anual =</b>		<b>0.92</b>

Por lo tanto, el valor del cambio de almacenamiento es positivo y su valor es de  **$\Delta V(S)$  = 0.9 hm<sup>3</sup> anuales.**

### Solución de la ecuación de balance

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

$$\begin{aligned} R_v &= Sh + B + ETR - Eh - R_r + \otimes V(S) \\ R_v &= 2.0 + 26.4 + 8.8 - 10.2 - 4.1 + 0.9 \\ R_v &= 23.8 \text{ hm}^3/\text{año} \end{aligned}$$

Por lo tanto la recarga total es igual a

$$\begin{aligned} R &= R_v + Eh + R_r \\ R &= 23.8 + 10.2 + 4.1 \\ R &= 38.1 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

## 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:

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

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. Para este caso, su valor es de **38.1 hm<sup>3</sup>/año**.

## **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 este caso, su valor es de **DNC = 2.0 hm<sup>3</sup> 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 **33,894,355 m<sup>3</sup> anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022**.

## **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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= \text{R} - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 38.1 - 2.0 - 33.894355 \\ \text{DMA} &= 2.205645 \text{ hm}^3/\text{año.} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **2,205,645 m<sup>3</sup> anuales**.

## **9 BIBLIOGRAFÍA**