



UNIVERSIDAD DE SONORA

**División de Ciencias Exactas y Naturales
Departamento de Geología**

**ESTUDIO GEOHIDROLOGICO DEL ACUIFERO DE
SANTA ROSALIA, AUXILIADO POR SIG**

TESIS

**TESIS PROFESIONAL PARA OBTENER EL
TITULO DE GEÓLOGO**

**P R E S E N T A:
ALICIA CHAVARIN GALLEGOS**

Hermosillo, Sonora a Agosto del 2011.



Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

INTRODUCCION

El presente estudio denominado Estudio Geohidrológico del Acuífero de Santa Rosalía, Auxiliado por SIG es debido a los problemas de abastecimiento de Agua potable, en el Estado de Sonora; zona semidesértica, donde se han tenido condiciones de sequía que han sido extremas, es necesario proponer soluciones que permitan conservar y garantizar el suministro de agua. Las condiciones de escasez de agua alcanzan niveles críticos desde hace una década. Y aun no hay soluciones.

El agua que es un recurso natural y esencial para el consumo humano, es de gran importancia para el crecimiento y desarrollo del Estado; Contar con suficiente abastecimiento de agua potable se propicia el desarrollo de la Industria, de la Agricultura y la Ganadería. La carencia de este líquido nos afecta a grandes escalas.

Por ello es necesario tener un manejo sustentable del agua, e indispensable tener conocimientos, históricos y recientes, de las características geohidrológicas de los acuíferos, así como las condiciones de explotación de los mismos.

El desarrollo de este estudio se dividió en tres etapas, la primera relacionada con el análisis e integración de información previa, además de definir objetivos, metodología, análisis climatológico, fisiográfico y geomorfológico. Una segunda etapa que consistió en trabajos de campo, censo de aprovechamientos, medición de niveles piezométricos, verificación hidrogeológica de campo, toma de muestras de agua y análisis de laboratorio. Una tercera y última etapa consistió en el análisis e interpretación de resultados de campo y edición de memoria técnica final.

1.1 Objetivos

El objetivo general del estudio es actualizar el conocimiento hidrogeológico del Acuífero Santa Rosalía, aplicando diversas técnicas directas e indirectas.

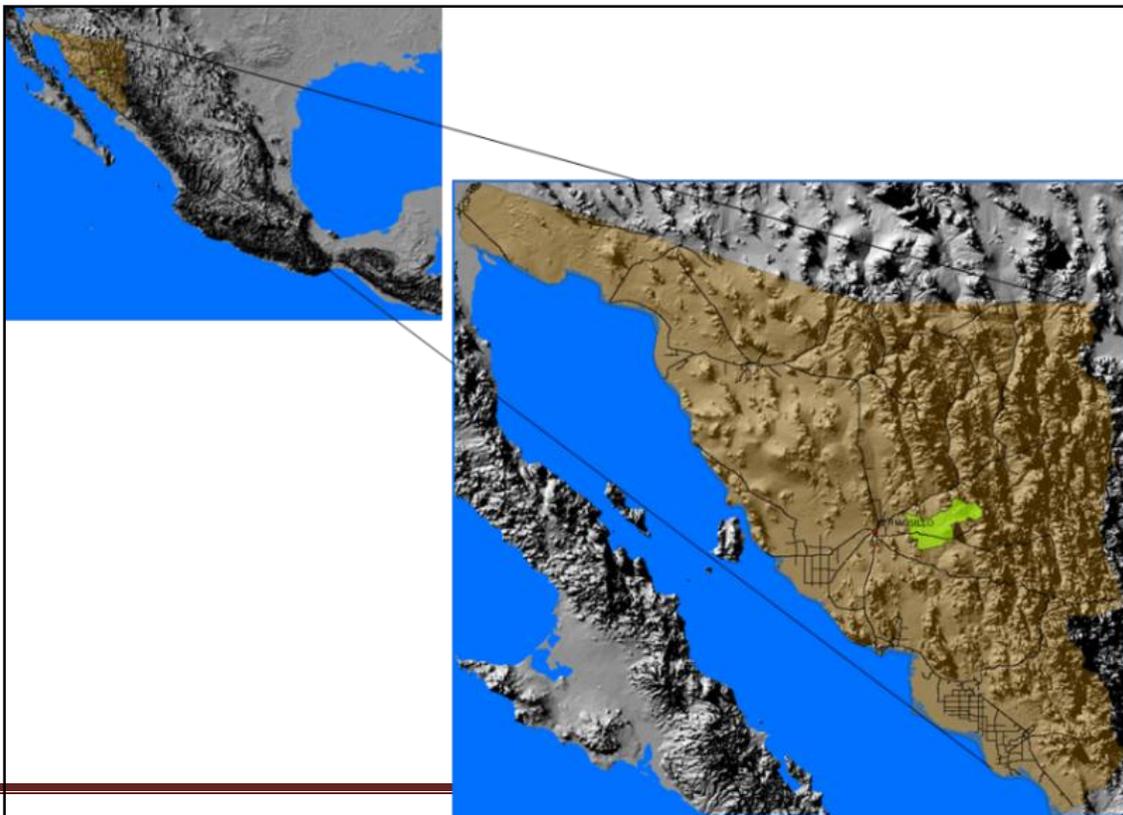
Para el cumplimiento del objetivo general, se plantearon y desarrollaron los siguientes actividades específicas:

- Elaborar un censo completo de aprovechamientos hidráulicos.
 - De manera paralela al censo de aprovechamientos llevar a cabo una campaña de hidrometría.
 - Sondear la totalidad de los aprovechamientos para conocer las condiciones actuales de la profundidad y elevación de los niveles estáticos, además de su evolución con respecto al tiempo.
 - Proponer una red de monitoreo piezométrico
 - Determinar las principales zonas de recarga natural y las direcciones preferentes de flujo de agua subterránea.
 - Establecer donde sea factible, la evolución de los niveles piezométricos con respecto al tiempo.
 - Desarrollar pruebas de bombeo y reinterpretar existentes para determinar los principales parámetros hidráulicos que rigen el sistema del acuífero.
 - Llevar a cabo la verificación hidrogeológica y geológica de las diferentes unidades litológicas que afloran en la región.
 - Integrar la información geológica y geofísica (magnetometría aérea) para modificar o validar el actual modelo geológico del subsuelo.
 - Elaborar una campaña de muestreo de aguas superficiales y subterránea para determinar las condiciones hidrogeoquímicas de la zona.
 - Determinar el funcionamiento y geometría del acuífero por medio de la elaboración de un modelo conceptual.
-

- Mediante la integración de información consultada y generada mediante el desarrollo del estudio, proponer sitios óptimos para perforaciones exploratorias.
- Elaborar un Sistema de Información Geográfica en el programa ArcMap, mismo que permita su fácil consulta y actualización de estudios posteriores.

1.2. Localización del área de estudio

El área de estudio se localiza en la parte noroeste del Estado de Sonora, específicamente al noroeste de la Ciudad de Hermosillo. Comprende parte de los municipios de Hermosillo, La Colorada, Villa Pesquería, Mazatán y en su mayor proporción el municipio de Ures (Figura 1.1). El Acuífero Santa Rosalía tiene un área total de 2000 Km² y está comprendida por las coordenadas Universal Transversal de Mercator (UTM): 535,000 y 610,000 este y 3,193,000 y 3,252,000 norte, como se muestra en la Figura 1.2.



1.3 Análisis Climatológico

Los climas predominantes en el Acuífero Santa Rosalía son de carácter muy seco, seco y semi-seco, mientras que climas húmedos y templados están restringidos en las partes altas de las sierras (INEGI,1994).

De manera particular, se describen a continuación los principales climas del área de estudio de acuerdo con el plano de clasificación climática de INEGI, 1994 (Figura 1.3).

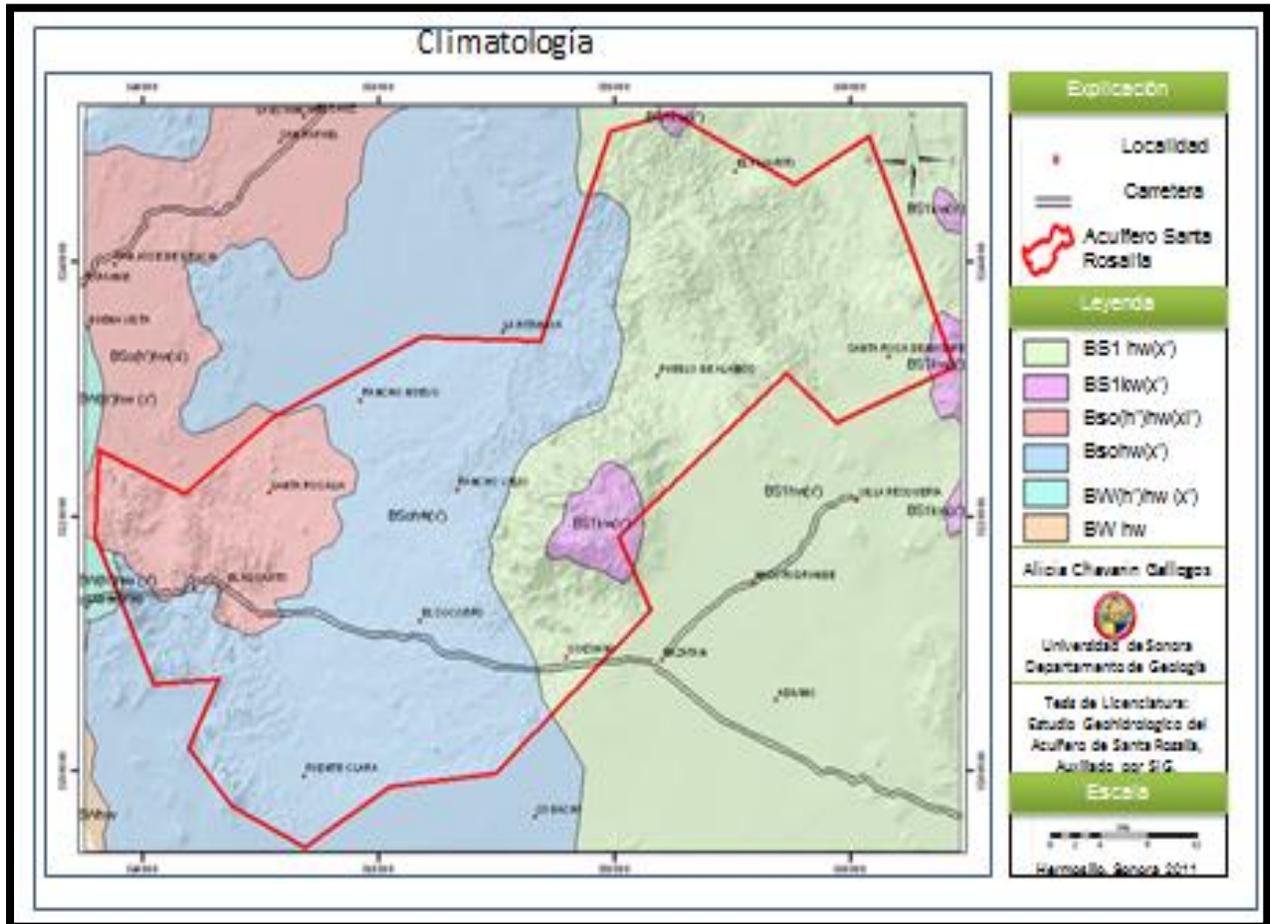


Figura 1.3 Muestra los tipos de climas en el área de estudio (INEGI, 1994).

1.3.1 Climas muy secos (BW_{hw})

Estos tipos de climas, también llamados desérticos, abarcan cerca del 0.70 % del área de estudio, se caracterizan por su precipitación inferior a los 400 mm al año y su temperatura media anual de 18 a 26°C. Son considerados muy extremos, ya que su oscilación térmica, es decir, la diferencia entre la temperatura media del mes más cálido y la del mes más frío es mayor a 14°C. Dentro del área de estudio, solo se identifica un subtipo de este clima:

- *Muy seco cálido con lluvias en verano (BW(h)hw(x')).* El mes más lluvioso es julio y la lluvia invernal, es decir, la ocurrida en los meses de enero, febrero y marzo, corresponde a más de 10.2 mm. La temperatura media anual es mayor a 22°C, mientras que la temperatura media mensual más alta corresponde al mes de julio, en tanto que la más baja se produce en enero.

1.3.2. Climas secos (BS_o)

Estos climas abarcan cerca el 53 % del área de estudio. Con respecto a su temperatura media anual se dividen en cálidos (con valores de 22°C en adelante) y semicálidos (entre 18 y 22°C) Dentro del área de estudio se manifiestan dos subtipos, los cuales se describen a continuación:

- *Seco-cálido con lluvias en verano (BS_o(h)hw(xi)).* El porcentaje de lluvia invernal es mayor a 10.2 mm y la temperatura media anual varía por lo general entre 22 y 26°C. El mes más húmedo es julio y el más seco es abril o mayo. Dentro del área este clima se distribuye en los alrededores de Santa Rosalía, Topahue y Ures.
-

- *Seco-semicálido con lluvias en verano (BSohw(x'))*. El porcentaje de lluvia invernal mayor a 10.2 mm, la temperatura media anual que caracteriza este

Clima comprende un rango de 18 a 22°C. Julio es el mes más caluroso y enero el más frío. Otra particularidad de este clima es la de tener un invierno fresco, dentro del área en estudio se localiza principalmente en la zona de valles.

1.3.3. Climas semisecos (BS1)

Aproximadamente el 44% del acuífero tiene este tipo de clima. Sus temperaturas medias anuales van de 12 a más de 22 °C y su precipitación media anual es del orden de 400-700 mm.

Son considerados climas de transición entre los secos y los templados y en función de su temperatura media anual se dividen en: cálidos, semicálidos y templados; dentro del área de estudio, se tienen el segundo y tercero, los cuales se describen a continuación:

- *Semiseco-semicálido con lluvias en verano (BS1hw(x'))*. El porcentaje de lluvia invernal es mayor de 10.2 mm y la temperatura media anual es mayor a 18°C. El invierno es fresco. Se ubica en la parte central y noreste del área de estudio.
 - *Semiseco-templado con lluvias en verano (BS1kw(x'))*. Comprende aproximadamente el 1.96 % de la superficie estatal. Se caracteriza por su temperatura media anual cuyo rango es de 12 a 18°C, su precipitación total anual entre 400 y 600 mm, además el porcentaje de lluvia invernal es mayor a 10.2 mm donde el invierno tiende a ser cálido.
-

1.3.4. Estaciones Climatológicas

Dentro de la zona estudio se encuentran tres estaciones climatológicas; Santa Rosalía, Rancho Viejo y la estación Pueblo de Álamos. Circundantemente en el área se encuentran cinco estaciones más (a una distancia máxima de 30 km), La Estrella, Mazatán, Matape, Ures y Topahue (Figura 1.4), por lo que en total se analizaron las ocho estaciones (Tabla 1.1) con la finalidad de estimar valores de temperatura, precipitación y evapotranspiración media mensual y anual. Los datos copilados como temperatura y precipitación se ordenaron de la manera más conveniente para analizarlos, obteniéndose los promedios, se constituyó una nueva base de datos en tablas, mediante estas se elaboraron múltiples gráficos para observar las variaciones existentes en los distintos períodos de análisis para los parámetros de temperatura, precipitación y evaporación.

Tabla 1.1 Muestra las coordenadas de las estaciones analizadas

No	Estación	X	Y
1	LA ESTRELLA	535,742.75	3,198,632.76
2	MATAPE	602,176.39	3,219,343.84
3	MAZATAN	586,040.12	3,208,131.23
4	RANCHO VIEJO	568,105.49	3,220,937.41
5	SANTA ROSALIA	551,889.61	3,220,852.48
6	TOPAHUE	535,622.09	3,237,409.26
7	URES (DGE)	559,812.86	3,255,977.23
8	PUEBLO DE ALAMOS	584,253.63	3,230,278.34

1.3.5. Temperatura

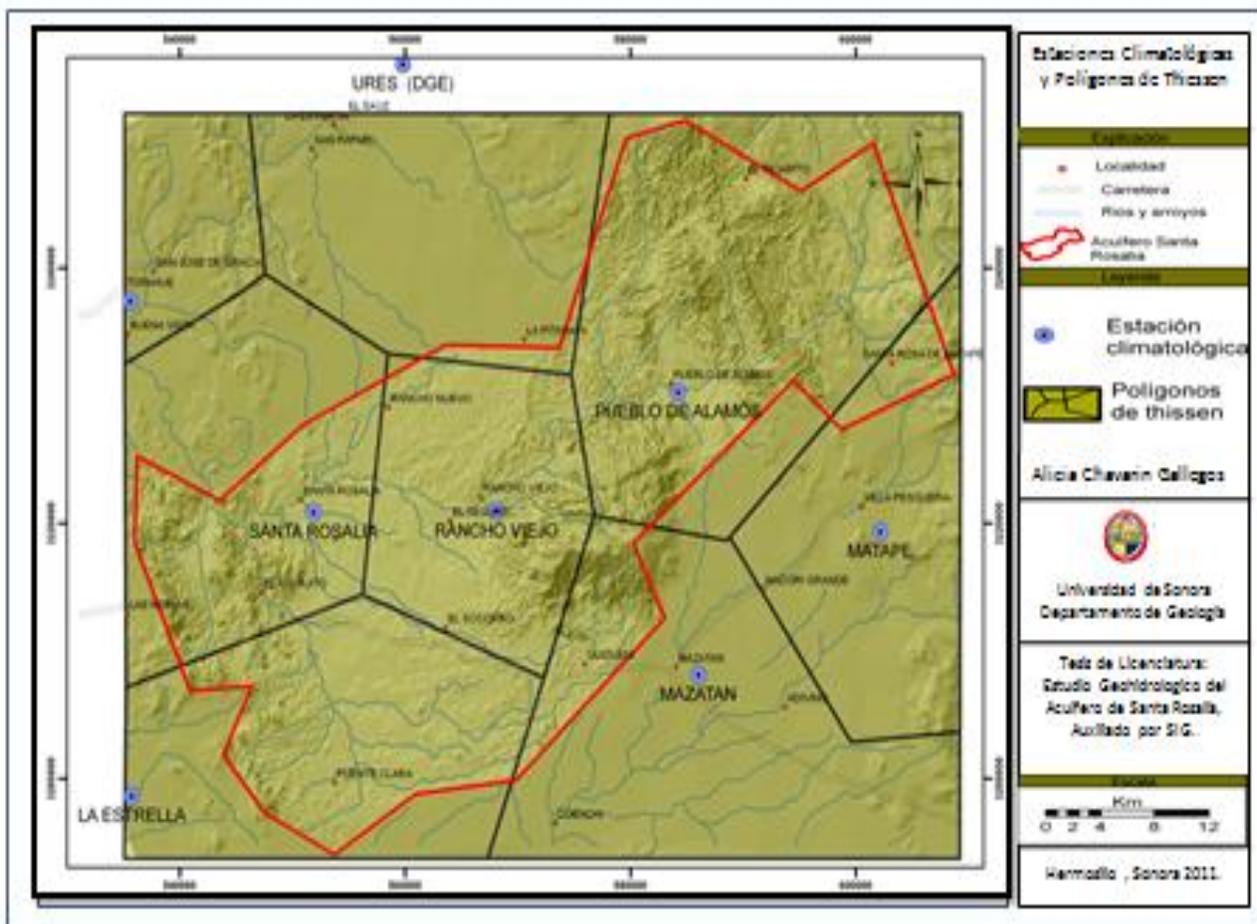
La tendencia general de la temperatura en el Acuífero de Santa Rosalía y sus alrededores se describe sustentada en los promedios obtenidos con los datos existentes, tal es el caso de la temperatura media mensual que presenta un valor de 30.73 °C.

Se realizó una gráfica de temperaturas mensuales promedio para cada estación; tiene forma de campana ya que las temperaturas medias máximas se

presentan en los meses de junio, julio y agosto siendo la temperatura promedio mensual mayor la del mes de julio con 30.7°C.

Los meses con las temperaturas mínimas pertenecen a enero y diciembre, con promedios de 15.6 y 15.7°C (Figura 1.5).

La temperatura media anual máxima la registra la Estación Matape con 30.39°C, por otro lado la temperatura media mínima se registra en la Estación Mazatán, con un valor de 20.73 °C (Figura 1.6), a la vez que la temperatura media anual para la zona es de 22.32°C.



1.4 figura. Ubicación de estaciones climatológicas y polígonos de Thissen.

Figura 1.5 Temperatura promedio mensual en el Acuífero Santa Rosalía.

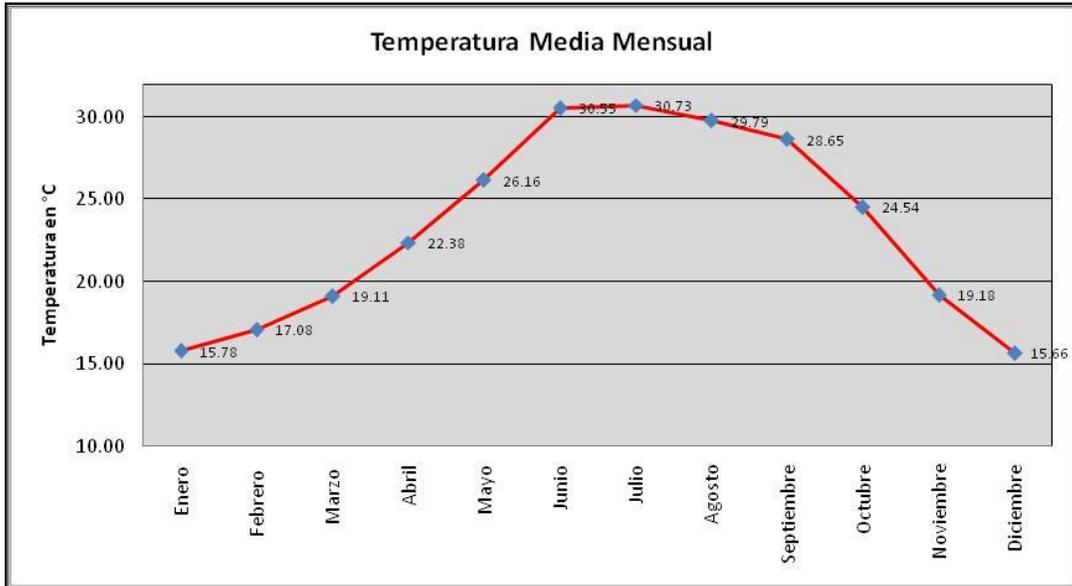
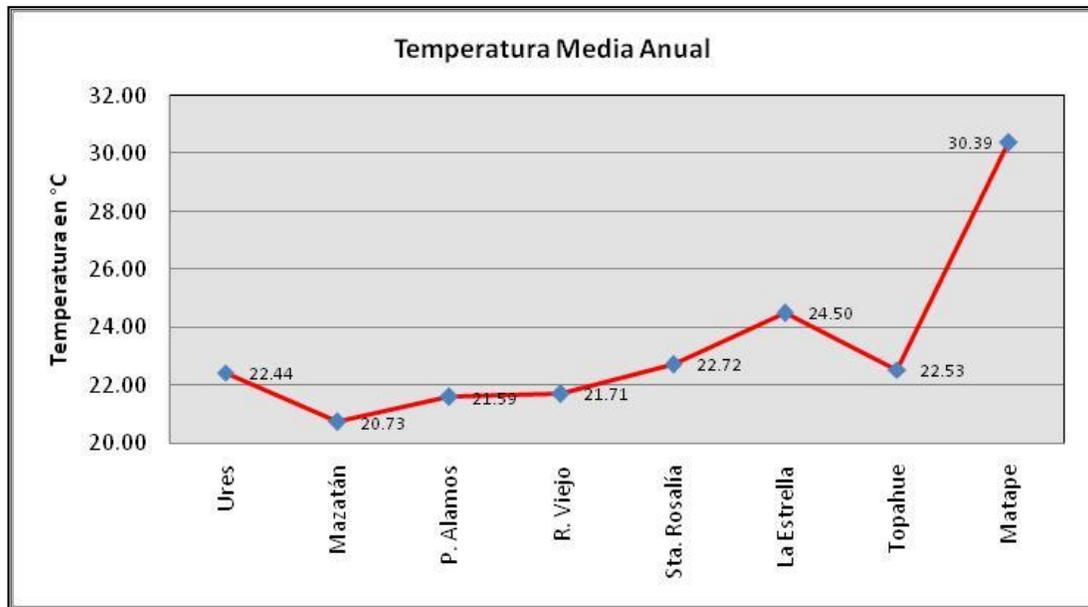


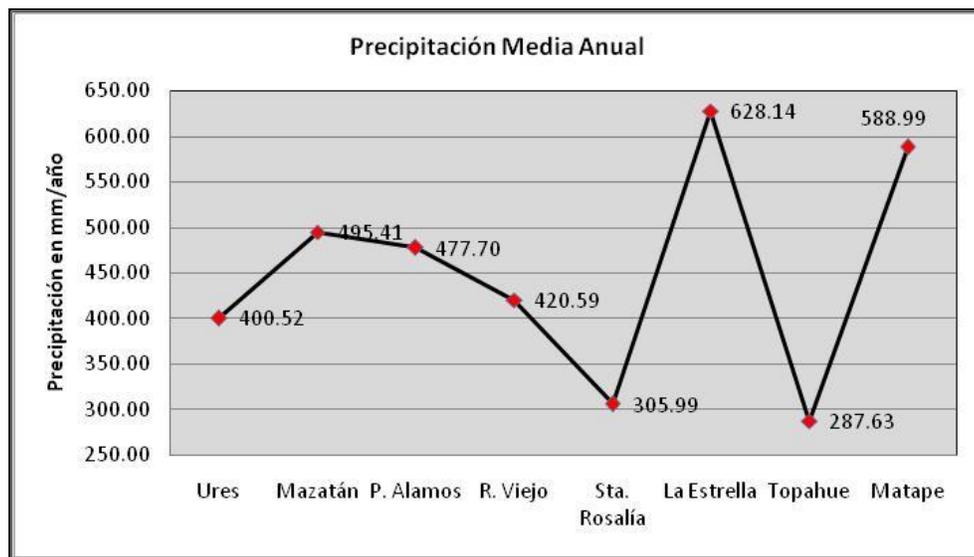
Figura 1.6 Temperatura media anual.



1.3.6. Precipitación

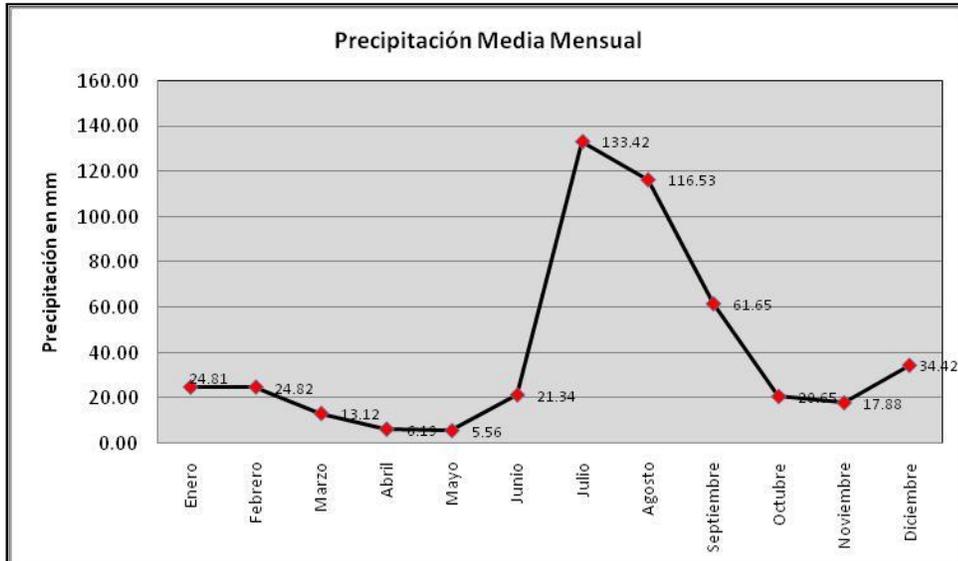
La precipitación media anual es de 450 mm/año. La precipitación media anual mayor fue registrada por la Estación La Estrella con 628.14 mm/año, mientras que el dato mínimo se encuentra en la Estación Topahue con 287.63mm/año. (Figura 1.7).

Figura 1.7 Precipitación media anual



Se puede observar en Figura 1.8 que las precipitaciones medias mensuales máximas se registran en el mes de julio y agosto con valores de 133.42 y 116.53 mm, comportándose la gráfica como un parábola donde el ciclo de lluvias empieza a elevarse en junio y empieza a declinar en agosto. Por otro lado las precipitaciones más bajas se registran en el mes de enero y febrero con valores de 24.81 y 24.82 mm.

Figura 1.8 Precipitación media mensual en el Acuífero Santa Rosalía.



1.3.7. Evapotranspiración Real

La evaporación potencial es un parámetro que estima la pérdida de agua hacia la atmósfera como consecuencia de la temperatura, sin embargo, este dato no permite evaluar la capacidad del medio para integrar lluvia como recarga local, por lo que es necesario calcular la evapotranspiración; un parámetro que se obtiene en forma empírica, que cuantifica el agua que retorna en forma de vapor a la atmósfera, lo anterior debido a la evaporación de cuerpos de agua superficiales, humedad del suelo y a la transpiración de las plantas.

En este estudio se obtuvo por medio de la fórmula empírica de Turc, ya que representa al ambiente semidesértico de la región, la cual enuncia lo siguiente:

$$ETR = \frac{PMA}{\sqrt{0.9 + \frac{PMA^2}{L^2}}}$$

Donde:

ETR = Evapotranspiración Real Anual (mm)

PMA = Precipitación Media Anual (mm)

L = Parámetro de cálculo, función de la Temperatura Media Anual (°C)

$$L = 300 + 25T + 0.05T^2$$

T = Temperatura Media Anual (°C)

El valor de evapotranspiración mayor lo presentan las estaciones Estrella con 541.79mm y Matapé con 541.38mm, mientras que el valor menor lo representan las estaciones Topahue con 286.95mm y Santa Rosalía con 303.39mm. La evapotranspiración media anual para la zona es de 415.96mm (Figura 1.9).

Figura 1.9 Evapotranspiración media anual.



1.3.8. Precipitación Efectiva

La precipitación Efectiva se define como diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración; el volumen de agua disponible para infiltrarse (Figura 1.10). En el área de estudio la precipitación efectiva se observa en valores positivos lo cual indica infiltración por agua de lluvias en todo el acuífero.

Las estaciones con mayor valor de precipitación efectiva; Estrella con 86.35mm, Mazatlán con 51.96mm y por último la Estación de Pueblo de Álamos con 42.77mm (Figura1.11).

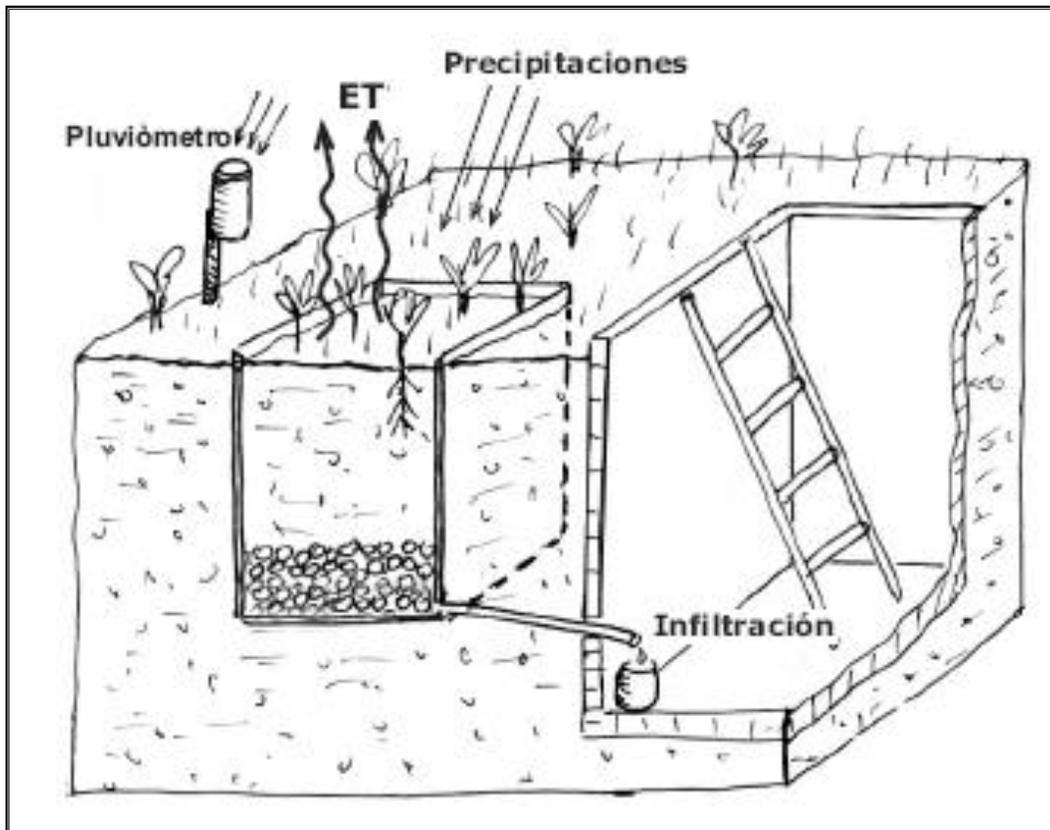
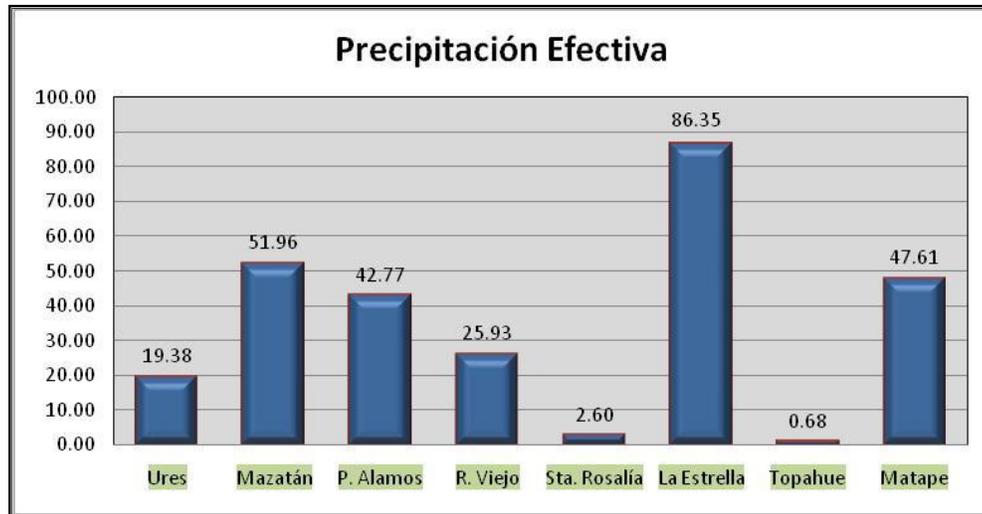


Figura 1.10 Esquema de la precipitación efectiva

Figura 1.11 Precipitación Efectiva en el Acuífero Santa Rosalía.



Entre las estaciones que presentan una menor infiltración por agua de lluvia se encuentra Santa Rosalía con 2.60 mm y Topahue con 0.68mm, cabe mencionar que la Estación Topahue es la que también presenta el menor número de precipitación con 287.63 mm.

La precipitación efectiva promedio anual para toda la zona es 34.66 mm/año. Realizando una comparación entre la precipitación y la evapotranspiración media anual se observa en las estaciones La Estrella, Matape y Mazatán ocurren valores máximos, es decir, una mayor infiltración de agua de lluvia, por lo que se puede hablar de un alto promedio de precipitación efectiva para el acuífero con un valor total de 34.66 mm. (Figura 1.12).

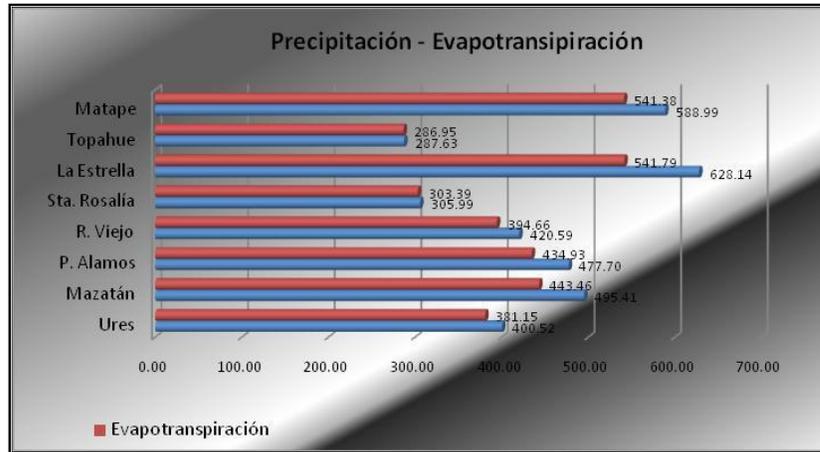


Figura 1.12 Comparación entre Precipitación-Evapotranspiración

El resumen que contiene los valores utilizados para los gráficos y mapas presentados se muestra, en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2 Parámetros calculados para cada estación que intervino en el análisis climatológico.

ESTACIÓN	TEMP MEDIA ANUAL (C°)	PRECIP MEDIA MENSUAL (mm)	PRECIP MEDIA ANUAL (mm)	ETR (mm)	PRECIP EFECTIVA
Ures	22.44	33.74	400.52	381.15	19.38
Mazatán	20.73	43.30	495.41	443.46	51.96
P. Alamos	21.59	43.92	477.70	434.93	42.77
R. Viejo	21.71	36.75	420.59	394.66	25.93
Sta. Rosalía	22.72	31.90	305.99	303.39	2.60
La Estrella	24.50	54.03	628.14	541.79	86.35
Topahue	22.53	24.47	287.63	286.95	0.68
Matape	30.39	56.32	588.99	541.38	47.61

1.3.9 Fisiografía local

La zona de estudio se ubica en la Provincia Fisiográfica Desierto Sonorense (Erwin Raisz, 1964). Esta Provincia colinda en el extremo noroeste con la Península de Baja California, hacia el oriente con La Sierra Madre Occidental y en su extremo sur con La Llanura Costera del Pacífico. Se divide en dos subprovincias: Sierras y Llanuras Sonorenses, donde está enmarcado el Acuífero Santa Rosalía, y Sierra Madre Occidental.

A nivel regional la Subprovincia Sierras y Llanuras Sonorenses comprende un área de 81,661.40km², abarca los municipios de Caborca, Altar, Saric, Tubutama, Oquitoa, Pitiquito, Trincheras, Benjamín Hill, Carbo, San Miguel de Horcadita, Empalme, Mazatán; asimismo incluye parte de San Luis Río Colorado, Puerto Peñasco, General Plutarco Elías Calles, Nogales, Magdalena, Santa Ana, Opodepe, Quiriego, La Colorada, Guaymas, Suaqui Grande, Cajeme y por ultimo Ures, Hermosillo y Villa Pesquera, dentro de los cuales se ubica el Acuífero Santa Rosalía.

Está formada de sierras bajas separadas por llanuras, tales sierras son más elevadas (700 a 1,400 msnm) y más estrechas (rara vez más de 6 km de ancho) en el oriente; y más bajas (de 700 msnm o menos) y más amplias (de 13 a 24 km) en el occidente.

1.4 Geomorfología

Las unidades geomorfológicas se cartografiaron tomando en consideración el relieve, litología, suelo, drenaje, vegetación y procesos de erosión. Se diferenciaron ciertas unidades que varían entre inestables de 35° a 45° , metaestables de 15 a 35° y estables 0 a 15° ; se clasificaron laderas montañosas con altura relativa mayor a los 400 msnm y lomeríos a las unidades que se encuentran entre 200 a 400 msnm.

Se definieron como pie de montes a las pendientes suaves situadas al pie de los lomeríos y montañas formado por materiales procedentes de la erosión y por ultimo las planicies, cuyos rangos varían de 0 a 200 msnm (Figura 1.13).

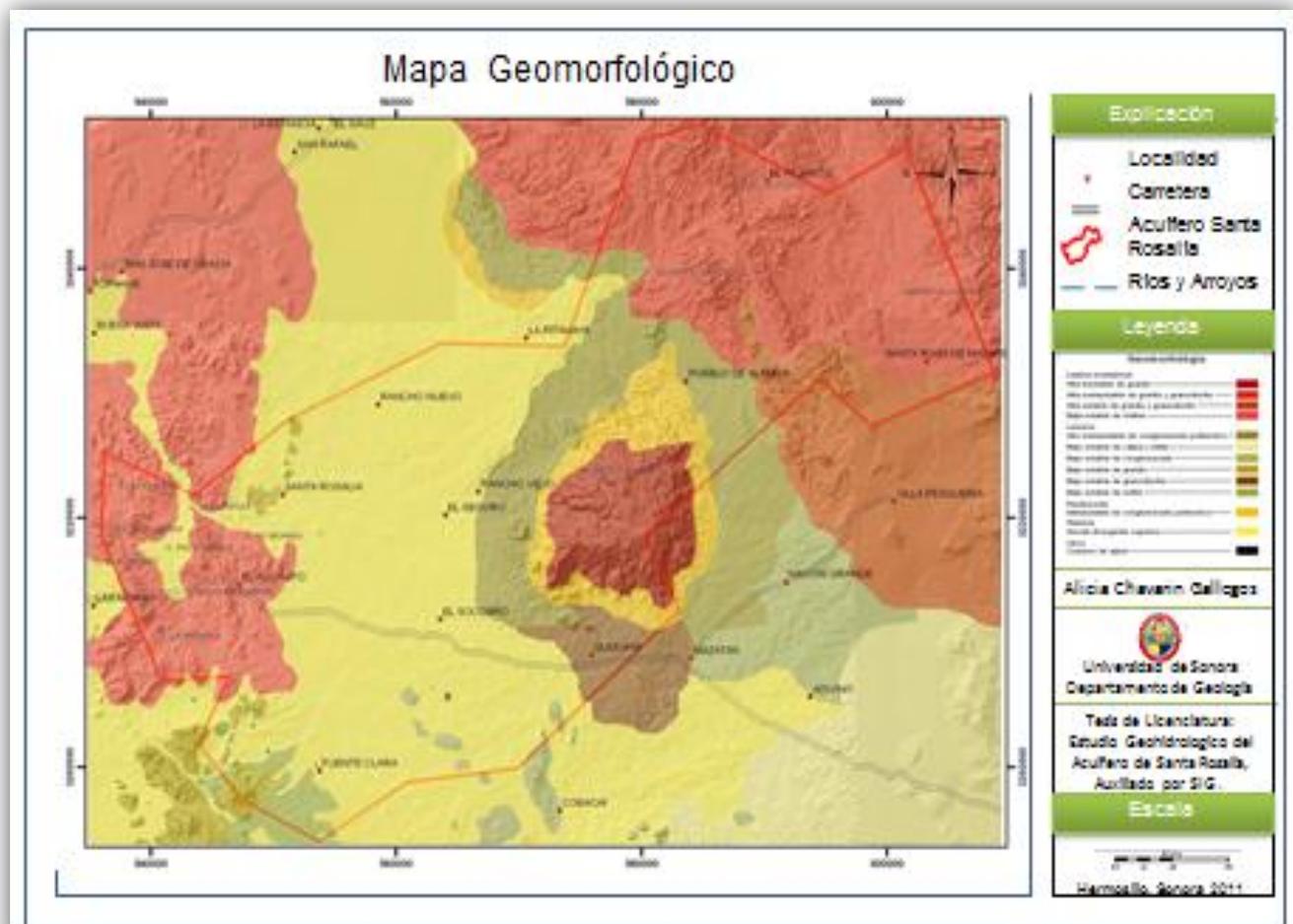


Figura 1.13 Mapa Geomorfológico

2 GEOLOGÍA

2.1 Marco Geológico Regional

El Estado presenta un contexto geológico muy complejo, presenta edades que van del Precámbrico al Reciente; predominan rocas ígneas las cuales están representadas en la Sierra Madre Occidental; donde al oriente del Estado presenta rocas extrusivas, en la mayor parte del Estado destaca la presencia de rocas intrusivas de carácter ácido e intermedio.

En el área de Caborca y Agua Prieta se encuentran rocas sedimentarias tanto continentales como marinas; en la parte oeste del Estado se encuentran sedimentos recientes predominando los aluviales, dándole forma a la Llanura Sonorense.

El Precámbrico esta compuesto de 3 conjuntos de rocas ígneas que van de la edad Proterozoica como el mas antiguo esta representado por el complejo Bámori (Pm) el cual fue descrito por vez primera por Longoria et al. (1978); y el complejo Sonobari; en segundo encontramos representado por el granito Aibó (Pp) y en tercer lugar una secuencia de cuarcitas y dolomías, que cubren las rocas metamórficas del primer conjunto.

El Paleozoico en Sonora se presenta en dos facies; una de plataforma y la otra de cuenca. En la Región de San José de Gracia, al norte de los límites del Acuífero Santa Rosalía, Cirett y Aguilar (1989), reportan la presencia de lutitas con fósiles del Cámbrico.

El Mesozoico esta representado por una secuencia marina regresiva, con depósitos zonados calcáreos, arcillo-calcáreos y arcillo-arenosos y otra continental areno conglomerática. Aflora presencia de rocas ígneas intrusivas y extrusivas de composición ácida a intermedia.

El Terciario inferior esta presente en el noroeste del Estado, con un Batolito Intrusivo, responsable de las mineralizaciones de cobre diseminado.

Para el Terciario Medio presentan eventos volcánicos con presencia de lava riolíticas, con eventuales coladas de basaltos, tobas y depósitos clásticos, de edad Oligoceno-Mioceno (King, 1939) con una amplia distribución en el Estado.

El Plio-Cuaternario tiene presencia en el oeste del Estado con paquetes sedimentarios continentales, con presencias esporádicas de coladas de basaltos y aparatos volcánicos. En la parte de la costa occidental del Estado afloran extensas llanuras costeras cubiertas por capas de sedimentos eólicos.

2.2 Estratigrafía

En el área afloran especies de rocas sedimentarias, ígneas y metamórficas, cuyas edades van desde el Precámbrico al Reciente. Para la elaboración del plano geológico (Figura 2.1, Plano 1) se tomo como base la información generada durante los trabajos de Cartografía Geológica-Minera realizada por el Consejo de Recursos Minerales (Servicio Geológico Mexicano) en las cartas Hermosillo, Sierra Libre y Madera escala 1:250000, Ures y La Colorada escala 1:50,000 además se complemento con cartografía elaborada en este trabajo con énfasis de derrames de basalto que son de importancia Geohidrología. A continuación se presenta la descripción de las unidades estratigráficas presentes en el Acuífero Santa Rosalía en orden cronológico.

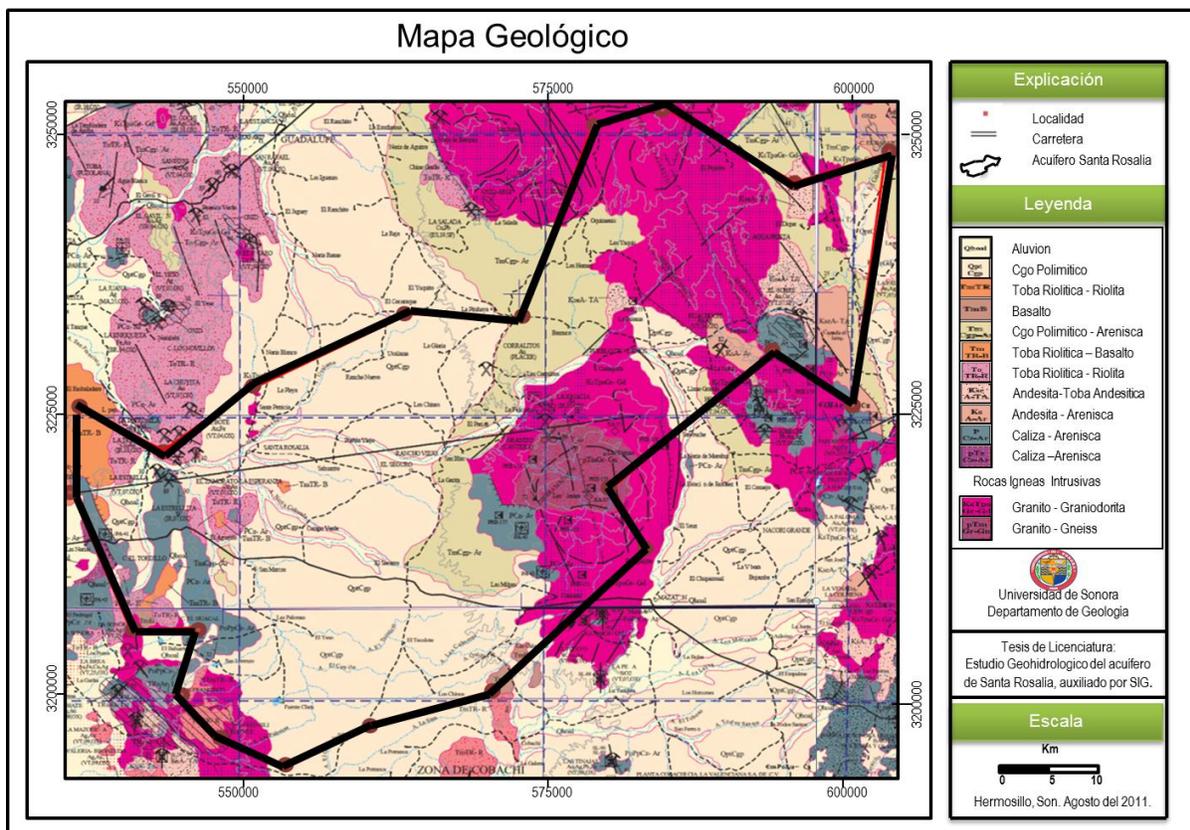


Figura 2.1, Plano 1 Mapa Geológica

2.2.1 Precámbrico

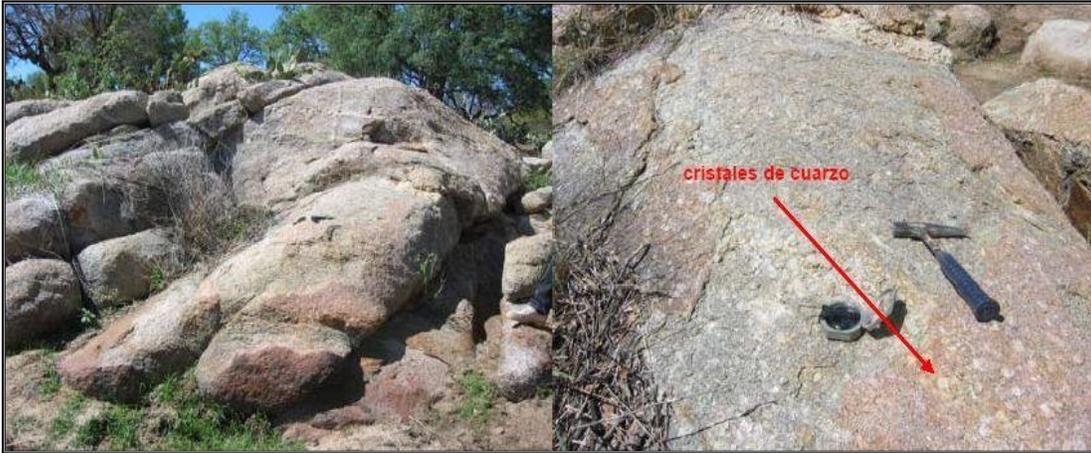
Granito-Gneis pTm Gr-Gn

Con esta clave se engloban a rocas ígneas y metamórficas de edad Precámbrico; Davis G. H., et al (1981), se lo consideran como un complejo metamórfico. Vega G. R. (1996), lo define como un conjunto de rocas metamórficas cuyos protolitos son rocas intrusivas graníticas e intermedias y rocas sedimentarias, que presentan metamorfismo de facies anfibolita y de esquistos verdes, asimismo los separa en dos conjuntos litológicos: el primero formado por una serie de gneises, rocas metasedimentarias, metavolcánicas y metaintrusivos intermedios (Fotografía 2.1); estos se presentan dentro del la segunda unidad en forma de xenolitos, colgantes de dimensiones variables.

El segundo constituido por un monzogranito aluminoso (Fotografía 2.2) el cual contiene una serie de diques o sills de granito orbicular. Esta Unidad aflora a lo largo de toda la Sierra de Mazatán, ubicada al surponiente de Pueblo de Álamos y oriente de Rancho Viejo.



Fotografía 2.1 Fotografía que muestra gneiss bandeado, afectado por diques andesíticos deformados, se aprecian planos de falla.



Fotografía 2.2 Fotografía tomada en el Rancho El Bachan. Monzogranito fuertemente fracturado, nótese los megacristales de cuarzo.

Estructuralmente presenta intenso fracturamiento, una apariencia de pseudoestratificación, contiene estructuras de foliación, lineación mineral y cizallado. Morfológicamente tiene una forma cómica donde su eje mayor es de 15 km en dirección noreste.

Su espesor estimado es de 1000m. Vega G. R. (1996), lo define como un granitoide bastante homogéneo el cual consiste de un agregado de grano grueso de cuarzo y feldespato, con biotita y moscovita.

2.2.2 Paleozoico

Caliza-Arenisca P Cz-Ar

La secuencia paleozoicas esta compuestas principalmente de calizas y areniscas, depositadas en un ambiente de plataforma someras cuyas edad van del precámbrico hasta al pérmico SGM (1999). Afloran principalmente en el Cerro El Tordillo y el Huacal, Sierra de Mazatán, Sierra la Cañada y otro al poniente del área en la Sierra Agua Verde.

Litológicamente los horizontes de caliza (C. El Tordillo) son de color gris con tonalidades blanquecinas, de textura microcristalina silisificada, se presenta en estratos gruesos y medianos, fuertemente deformada y fracturada, también se presenta en estratos medianos en el Cerro El Huacal de mudstone, intercalados con bandas y horizontes de pedernal negro plegados, otra forma de presentarse es en capas gruesas brechada fracturada, marmorizada y fuertemente silisificada de color gris, textura Graistone.

Estructuralmente es difícil de apreciar su estratificación, se confunde con el fracturamiento (Fotografía 2.3).

Es afectada por vetillas de sílice, la alteración presente es silicificación, marmorización, cabe señalar que en el área hay presencia de hidrotermalismo, favorable para la mineralización.

Es afectada por diques andesíticos, de color gris oscuro, textura afanítico, contiene plagioclasas cálcicas, en la zona de contacto hay brechamiento y oxidación. En la gran mayoría de los afloramientos estas rocas presentan deformación y fracturamiento intenso, generalmente abierto y asociado zonas de disolución. Tomada de la Carta Geológica minera del SGM (1999).



Fotografía 2.3 Fotografía de la localidad Zamorato. Caliza brechada silicificada donde se aprecia el abundante fracturamiento y estructuras sigmoidales.

2.2.3 Triásico - Jurásico Lutita-Arenisca Conglomerado (TRs Ar-Lu)

Estas unidades areno arcillosas corresponden al Grupo Barranca, la cual esta dividida en tres Formaciones, de la base a la cima: Formación Arrayanes, Santa Clara y Coyotes, Alencaster, G., (1961).

Se localizan al suroeste del área en las inmediaciones del Cerro San Francisco, es un pequeño afloramiento el cual se extiende por fuera del área en estudio. Consiste de una alternancia de capas gruesas y medianas de areniscas de cuarzo, limolita y conglomerado, las areniscas son de color ocre y gris intemperizan pardo, textura de grano medio a grueso, las capas de limolita son de color café y crema, el conglomerado es de color rosa y rojo, mal clasificado, intemperiza pardo, esta constituido por clastos de cuarcita, pedernal y caliza, cementado por sílice. La unidad presenta fracturamiento intenso.

2.2.4 Cretácico

Andesita-Toba Andesítica (Ks A-TA)

Estas rocas corresponden a la parte inferior de la Formación Tarahumara, denominada por Wilson y Rocha (1946). Pequeños afloramientos se tienen en las inmediaciones de los cerros El Valiente, San Francisco y ranchos San Lorenzo y Zamorato (Fotografía 2.4); afloran ampliamente en las inmediaciones del Cerro La Paloma, Rancho Teopari, flanco oriental de la Sierra El Pajarito, Rancho La Noria de Varela y Cerro Los Torreones.

Litológicamente consiste en una serie de derrames andesíticos, tobas andesíticas y escasas capas de toba riolítica. Generalmente son de color gris y verde olivo, intemperizan de color ocre y rojizo. Dispuestas en una pseudoestratificación, intercalándose capas medianas y gruesas.

En las inmediaciones del Rancho la Noria de Varela (Fotografía 2.4), son de color gris y café, intemperiza ocre y gris, textura afanítica y granular (parece fanerítica) muy alterada con apariencia de intrusivo, contiene fenocristales de plagioclasas, biotita cuarzo amorfo, horblenda.

Estructuralmente la pseudoestratificación (Rumbo de capa norte 34° oeste inc. 34° suroeste) contiene formas sigmoidales, fracturas, fallas y vetillas de cuarzo (atravesando las capas), asimismo es afectada por diques de composición riolítica. Gran parte del fracturamiento está sellado, cabe señalar que varias capas tienen una apariencia de intrusivo, esto es debido a la forma en que se alteran.



Fotografía 2.4 Fotografía tomada en Noria de Varela. Tobas andesíticas del Cretácico superior, fracturada, con estrías en los planos de falla.

En las inmediaciones del Rancho Teopari las capas son de color gris y verde olivo (Fotografía 2.5), existe una marcada coloración rojiza (oxidación) debido a la alteración. La textura es afanítica en las capas de andesita, clástica con una mesostasis afanítica (fragmentos andesíticos angulosos) en las capas de toba.



Figura 2.5 Fotografía tomada en Rancho Teopari. Andesitas y tobas líticas andesíticas. Presenta intenso fracturamiento, planos de falla con estrías y una intensa alteración.

2.2.5 Cretácico - Terciario

Toba Riodacítica-Andesita (KsTe TR-A)

Se trata de una serie de rocas volcánicas es donde estan compuesta por tobas riodacíticas, andesitas, tobas líticas, tobas soldadas y aglomerados (Fotografía 2.6), forma la parte superior de la Formación Tarahumara (Wilson y Rocha,1946).



Fotografía 2.6 Fotografía tomada al sur de San Rafael (límite norte del área), tobas riódacíticas, fuertemente fracturadas.

Se distribuye en la porción oriental del área en estudio, a lo largo de los cerros Los Burros, La Tortuga, El Cusuri, Blanco, Tanque de Sierra, Los Novillos (ranchos Santa Catalina, López, Noria Blanca, Norababi).

Generalmente son rocas de color gris, verde y rosa, seudoestratificadas en capas gruesa y delgadas, por el abundante fracturamiento que contiene es difícil de determinar su estratificación, presenta textura afanítica en capas de andesita, lítica en las tobas riódacíticas y tobas riolíticas, forma pequeños lomeríos de pendientes suaves (Cerro Los Tioris) cuando están cubiertos por sedimentos y lomas semiescarpadas que forman serranías.

Granito Granodiorita (KsTpa Gr-Gd)

Es una roca que generalmente se presenta de color gris y crema, intemperiza de color ocre y verde, estructura compacta, en algunas partes esta muy intemperizado y deleznable, textura fanerítica equigranular, constituido por cuarzo, feldespato, plagioclasas, biotita; presenta alteraciones como propilitización, potásica, seritización, cloritización, epidotización y oxidación. Al sur del Rancho La Noria de Varela aflora una roca de color gris oscuro, intemperiza pardo, el afloramiento no es claro, esta cubierto por sedimentos recientes.

Su textura es fanerítica, contiene plagioclasas, feldespatos y escaso cuarzo, horblenda, tiene un alto contenido de ferromagnesianos, por lo que le da la coloración oscura (Fotografía 2.7).

Intrusiona a las secuencias sedimentarias del Paleozoico, Triásico superior y a las andesitas de la Formación Tarahumara, asimismo es intrusionado por diques pegmatíticos y aplíticos, le sobreyace discordantemente depósitos

conglomeráticos de la Formación Baucarit, volcánicas de la Formación Lista Blanca, gravas y arenas del Cuaternario.



Figura 2.7 Fotografía tomada al sur del Rancho La Noria de Varela.

En la Sierra de Mazatán Richard D. (1991), reconoce la presencia de un granito de dos micas y establece que debe preferirse el término de leucogranito, el cual es una roca blanca cuarzofeldespática con predominancia de muscovita sobre la biotita y que no contiene esfena.

Se distribuye en la porción sur y norte de la Sierra de Mazatán y a lo largo de las sierras El Pajarito, Batamonte y La Cañada. Generalmente es una roca de color gris y crema que intemperiza pardo con algunas tonalidades ocre.

En la localidad El Dique (Fotografía 2.8), se presenta como una masa granítica de color gris con tonalidades rojizas, su textura es fanerítica, observándose cuarzo, feldespatos, horblenda alterada, micas (biotita, muscovita), en los planos de falla se observan estrías (Rumbo de falla norte 66° este inc. 86°

sureste), así como abundante fracturamiento. Morfológicamente presenta una topografía abrupta.

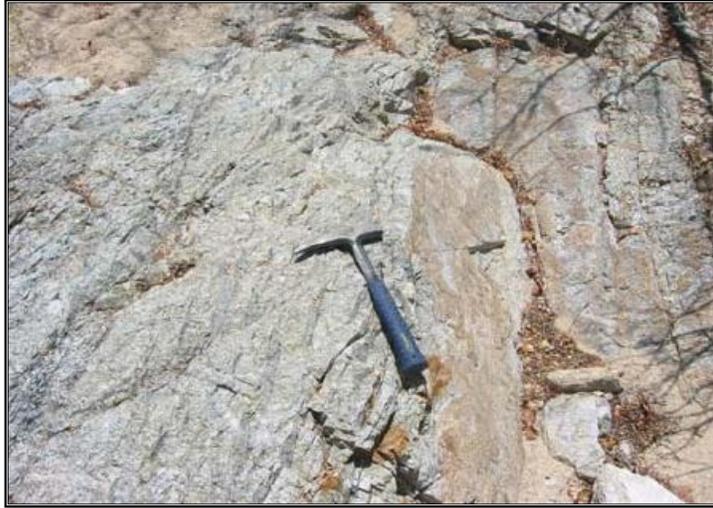


Figura 2.8 Fotografía tomada en la localidad El Dique. Granito afectado por fallamiento.

En el Arroyo Teopari (Fotografía 2.9), el granito es de color gris e intemperiza crema y ocre, tiene una textura fanerítica, los minerales que se observan son: cuarzo, feldespatos, algunas plagioclasas, horblenda, biotita, moscovita. Son observables algunas estructuras como fallas, fracturas y diques andesíticos cuyo espesor varía de 1 a 20 cm.



Fotografía 2.9 Fotografía tomada en el Arroyo Teopari. Granito fuertemente fracturado, contiene planos de falla y vetas de cuarzo.

Conglomerado Polimíctico (Tom Cgp)

Richard D. (1991), define esta unidad como una gruesa secuencia de rocas detríticas continentales, formada por alternancia de areniscas, limolita, conglomerados y brechas sedimentarias, ubicada en el borde suroeste de la Sierra de Mazatán.

En el área aflora en forma de una franja ancha orientada de suroeste a noreste, en las inmediaciones del poblados Rancho Viejo y ranchos San Blas, El Parían, Los comalitos, Bamuco y los Hornos en la parte central de la zona de estudio. Posiblemente su extensión sea más grande, pero no es factible determinarla por la cubierta de sedimentos conglomeráticos que lo cubren discordantemente.

Al oriente del Rancho La Belleza aflora una alternancia de arenisca y conglomerado, de color rojo oscuro, intemperizan rojo, la arenisca se presenta en capas delgadas (rumbo de capa norte 50° este inc. 16° sureste), su textura es de grano grueso, fino y conglomerático, constituido por fragmentos de roca volcánica, metamórfico y cementados por arcilla (Fotografía 2.10).



Fotografía 2.10 Fotografía tomada en la localidad La Belleza. Alternancia de capas delgadas y medianas de arenisca, arenisca conglomerática y capas gruesas de conglomerado. Contienen fracturamiento y fallas.

En la localidad La Manzana, en el flanco este de la Sierra de Mazatán, el conglomerado es de color rojo, intemperiza pardo y rojo, constituido por fragmentos de roca granítica, metamórficos, escasa caliza, el tamaño varía de unos milímetros a 25 cm de diámetro (Fotografía 2.11). Contiene una matriz arcillosa de coloración rojiza. Se presenta en capas gruesas inclusive mayores a un metro.



Fotografía 2.11 Localidad La Manzana. Conglomerado polimíctico, constituido por fragmentos de volcánicos, metamórficos y escasas calizas. Nótese el fuerte basculamiento (55° sureste).

Esta unidad se encuentra subyaciendo discordantemente sedimentos del pleistoceno. Su base no aflora y es cubierto discordantemente por una delgada capa de conglomerado y arenas no consolidados. Presenta una estratificación gruesa. Esta roca se depositó en una zona de fosa y al parecer fue afectada por eventos tectónicos del Terciario.

Conglomerado polimíctico Arenisca (Tm Cgp-Ar)

Se distribuye ampliamente en los flancos poniente de las sierras Agua Verde, Mazatán y en los cerros, El Tordillo, El Cuisiri, Blanco e inmediaciones del Cuervo, Loma El Mezquite y Mesa Extendida.

En el Arroyo Chicural (Fotografía 2.12) el conglomerado es polimíctico semi compacto, mal clasificado, de color café claro, estratificado en capas gruesas, constituido por fragmentos de caliza, volcánicos andesíticos, pedernal, metamórficos, su matriz es arcillo arenosa, conteniendo caliche el cual cementa parcialmente al conglomerado.

Estructuralmente presenta un ligero basculamiento al oriente, sus afloramientos se observan a lo largo de varios kilómetros y forma una serie de lomeríos algunos con escarpes ligeramente abruptos. Es cubierto discordantemente por depósitos más recientes.



Fotografía 2.12 Conglomerado polimíctico semi compacto y mal clasificado en el Arroyo Chicural

De forma general es un conglomerado mal clasificado, de color café claro, intemperiza pardo, se compone de fragmentos ígneos, sedimentarios y metamórficos intercalados con areniscas y basaltos. La abundancia de los constituyentes es de acuerdo a la cercanía de la fuente, contiene una matriz de la misma composición cementada por caliche. En este estudio en base a recorridos de campo se estimó un espesor aflorante de hasta 200 metros.

Tobas riolíticas, dacita, andesita (Tm Tr-A)

Esta secuencia volcánica es definida como Formación Lista Blanca (Dumble 1900). En el área afloran en la porción sureste, en las inmediaciones de los ranchos El Aguajito, El Tecolote, Las Calaveras y las Palomas. Tienden a formar pequeños lomeríos y mesetas, dispuestos de manera discordante sobre el conglomerado Baucarit.

Litológicamente consisten en una serie de derrames de tobas riolíticas, ignimbritas, riolitas y andesitas. Las tobas riolíticas generalmente son de color gris claro y rosa, intemperizan pardo, textura fluidal observando algunos feldespatos, su estructura es compacta a la base y amigdalar en la cima. La riolita es de color gris y rosa textura microgranular, contiene feldespatos y cuarzo.

Basalto (Tom B)

En el área se distribuyen en las inmediaciones del poblado de Santa Rosalía, ranchos López y El resbaladero, continúa aflorando al poniente fuera del área. En Santa Rosalía los afloramientos de basalto se extienden formando pequeñas mesetas semi cubiertas por sedimentos no consolidados recientes.

Son generalmente de color gris oscuro a negro (Fotografía 2.13). Estructuralmente el fracturamiento que presentan es semicolumnar, su textura afanítica, los minerales que se observan son algunos fenocristales de plagioclasa

(blanca translúcida) y piroxenos (negro). Cubre discordantemente al Conglomerado Baucarit.



Fotografía 2.13 Localidad Santa Rosalía. Basalto de piroxeno semicolumnares.

Conglomerado polimíctico (Qpt Cgp-ar)

Esta unidad consiste en un paquete de sedimentos semiconsolidados y no consolidados de diferente composición y granulometría, ocasionalmente presenta estratificación con una clasificación pobre, lo cual sugiere que hubo variaciones en el ritmo de sedimentación.

Se distribuye ampliamente en la parte central del área de sur a norte en forma de una franja ancha de 20 por 30km, también se tiene al poniente en las inmediaciones de Buenavista y al oriente en Pueblo de Alamos, El Gallego y El caballo.

Esta constituido por una gran variedad de litologías tanto volcánicas, sedimentarias y metamórficas. Su granulometría varía de arcillas, arenas finas,

gravas y escasos horizontes con cantos rodados, su espesor se estima en 100m, se considera que este espesor puede ser mayor en El Yeso, Las Palomas, Pueblo Viejo, debido a que están en una zona de fosa.

Aluvión (Qhoal)

Dentro de esta unidad se agrupan una serie de depósitos constituidos por grava de taludes y abanicos aluviales (Qpt gv); consisten en una acumulación de abanicos aluviales, producto de la erosión fluvial de rocas más antiguas. Litológicamente esta constituido por arena, limo, grava y arcilla de terrazas antiguas, constituye sedimentos en planicies de inundación antiguas y paleocausas de arroyos y ríos.

2.3 Geología Estructural

Se observan dos tipos de introduccion: La deformación dúctil-frágil originada por procesos compresivos regionales, asociados a la Orogenia Laramide y la deformación frágil, representado por fallas originadas por procesos distensivos post-laramídicos.

Deformación dúctil-frágil se manifiesta en forma de pliegues y cabalgaduras dentro de la secuencia de caliza-arenisca de edad Paleozoico y secuencia volcanosedimentaria de la Formación Tarahumara, de edad Cretácico Superior, asimismo dentro de estas unidades es posible apreciar sigmoides de deformación, así como un gran número de fallas y fracturas.

La deformación frágil se manifiesta prácticamente en toda las unidades litológicas desde el Precámbrico al Mioceno.

En base a las observaciones de campo y puntos de verificación geológica se tomaron 115 datos de fracturas y fallas, quedando distribuidos en el área e involucrando todas las unidades, estos datos se analizaron estadísticamente mediante un diagrama de roseta.

Como resultado se observa que la tendencia mayor es hacia el noroeste entre 10° y 20° , corresponden a fallas perpendiculares a la Falla La Junta. Un segundo grupo es en dirección prácticamente este - oeste y 70° NE los cuales son paralelos al rumbo de Falla La Junta y un tercer grupo con dirección 45° noreste (Figura 2.2).

Una de las estructuras más sobresaliente es la Falla La Junta, de rumbo promedio noreste 70° suroeste, con desplazamiento derecho, tiene una longitud entre los 65 km y se extiende a lo largo del Arroyo La Junta (nombrado también Teopari, Pueblo de Álamos, Santa Rosalía, y San Francisco), el cual atraviesa de noreste a suroeste el Acuífero Santa Rosalía (Figura 2.3).

Otra serie de estructuras importantes son una serie de fallas con rumbo promedio noroeste 30° sureste, como la Falla El Pajarito, ubicada a lo largo de la sierra del mismo nombre. Esta serie de fallas se ubican a lo largo del Arroyo La Junta, cortando y desplazando en varias direcciones a la Falla La Junta.

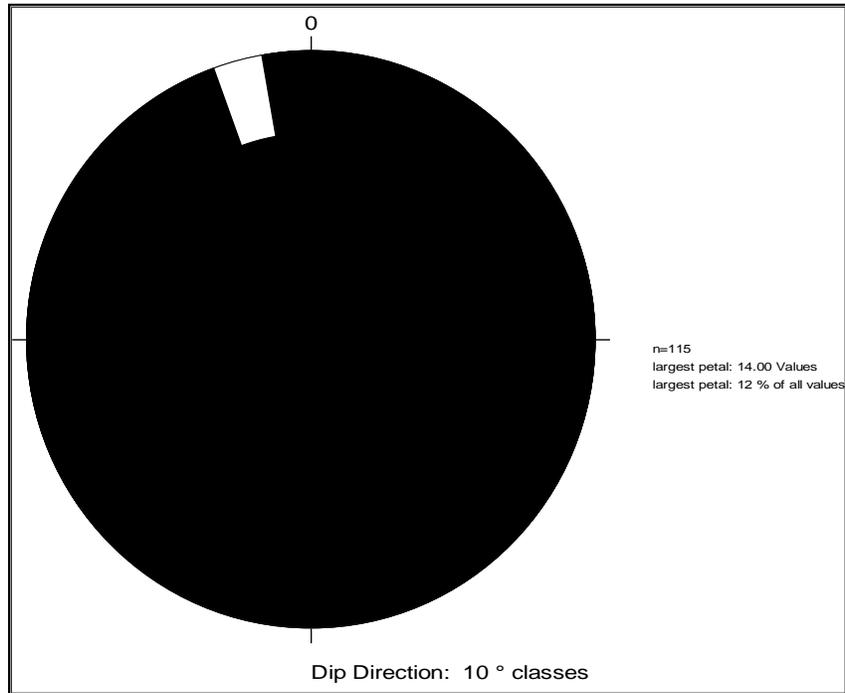


Figura 2.2 Estadística de rumbo de fallas y fracturas (Diagrama de Roseta).

Estas fallas y fracturas son de gran importancia ya que han dado lugar a la formación de una fosa tectónica de dimensiones considerables ubicada al poniente de la Sierra de Mazatán, a la vez que tienen un potencial hidrogeológico atractivo como portadoras de agua al acuífero.

1.3.9. Interpretación de la Imagen de Satélite

Como se aprecia en la Figura 2.3, existe una gran cantidad de lineamientos estructurales, de manera particular en la porción central en la Sierra de Mazatán la mayoría son de rumbo norte - sur y en menor cantidad al noreste-suroeste. En la porción oriental en las sierras El Pajarito, Batamonte y Agua Verde tienen un rumbo promedio noreste 45° suroeste, la mayoría paralelos entre si. En la porción oriental el rumbo promedio es noreste 13° suroeste. Cabe señalar que en la porción central donde se encuentra la fosa tectónica, los lineamientos son enmascarados por los sedimentos conglomeráticos no consolidados, no siendo así

en las inmediaciones de la comunidad Pueblo de Álamos, donde el rumbo es de norte - sur.

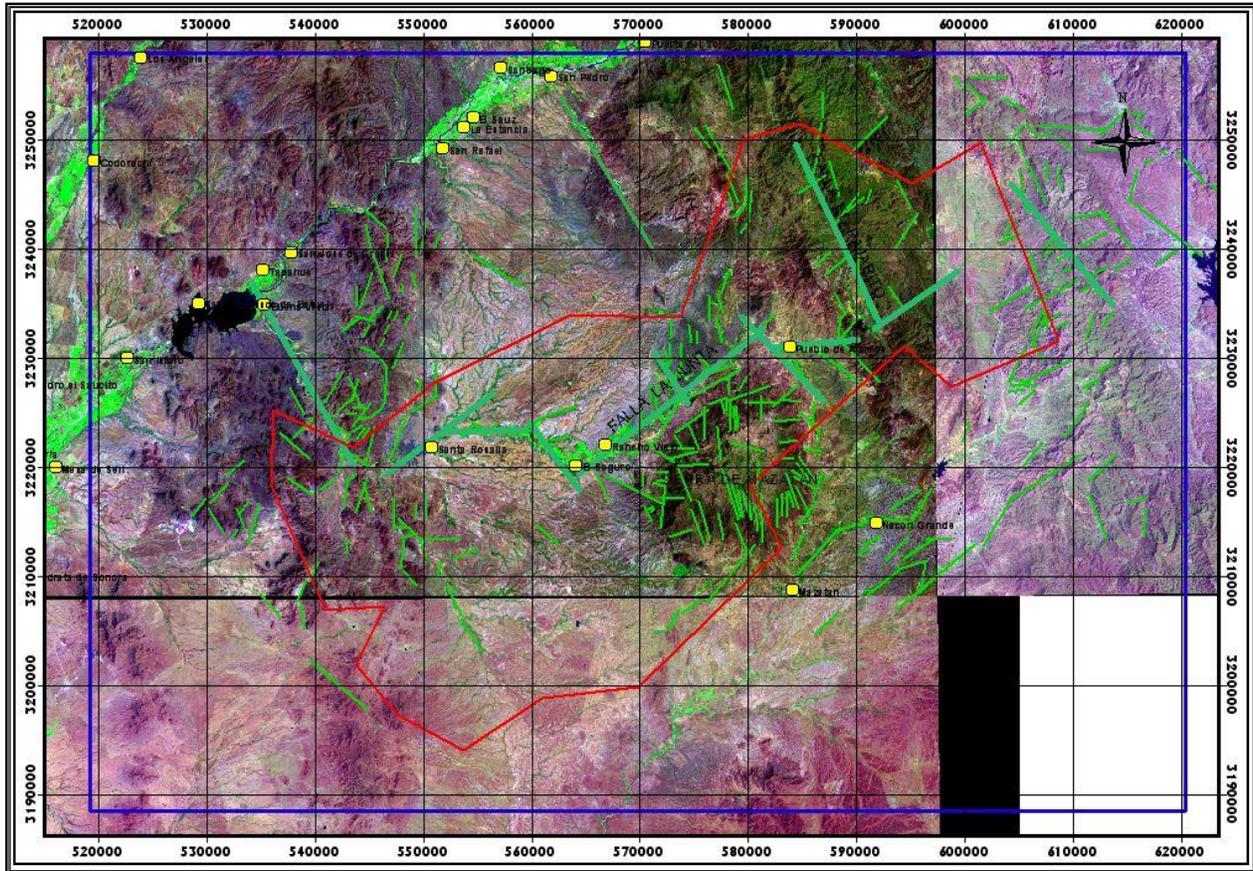


Figura 2.3 Estructuras geológicas sobre la imagen de satélite.

Vega G. R. (1996), describe tres zonas en la Sierra de Mazatán, una zona de cizalla con metamorfismo dinámico, a la cual le determinan, en base a un análisis estadístico de las direcciones de lineación, un rango de lineación de estiramiento entre 60° y 90° noreste suroeste.

La estructura dómica refleja las actitudes de la foliación milonítica y de la lineación asociada, por lo tanto se trata de una estructura producto de deformación más que de una estructura primaria asociada a una intrusión. Las zonas de cizalla frágil corresponden a planos de fallas normales de bajo ángulo.

1.3.10. Interpretación de las Cartas Magnéticas

En la interpretación de la carta magnética destacan dos lineamientos magnéticos; un curvilineamiento magnético y dos unidades litomagnéticas (Figura 2.4). El lineamiento magnético de mayor importancia es de rumbo noreste 54° suroeste, el cual atraviesa el área y se continúa hacia ambos extremos fuera de esta. Otro lineamiento magnético se ubica en el extremo suroeste del área y es de rumbo noroeste 40° sureste. Estos lineamientos coinciden con el sistema de fallas y fracturas que se ha determinado en campo y que además estas estructuras estén influyendo en el flujo subterráneo del agua.

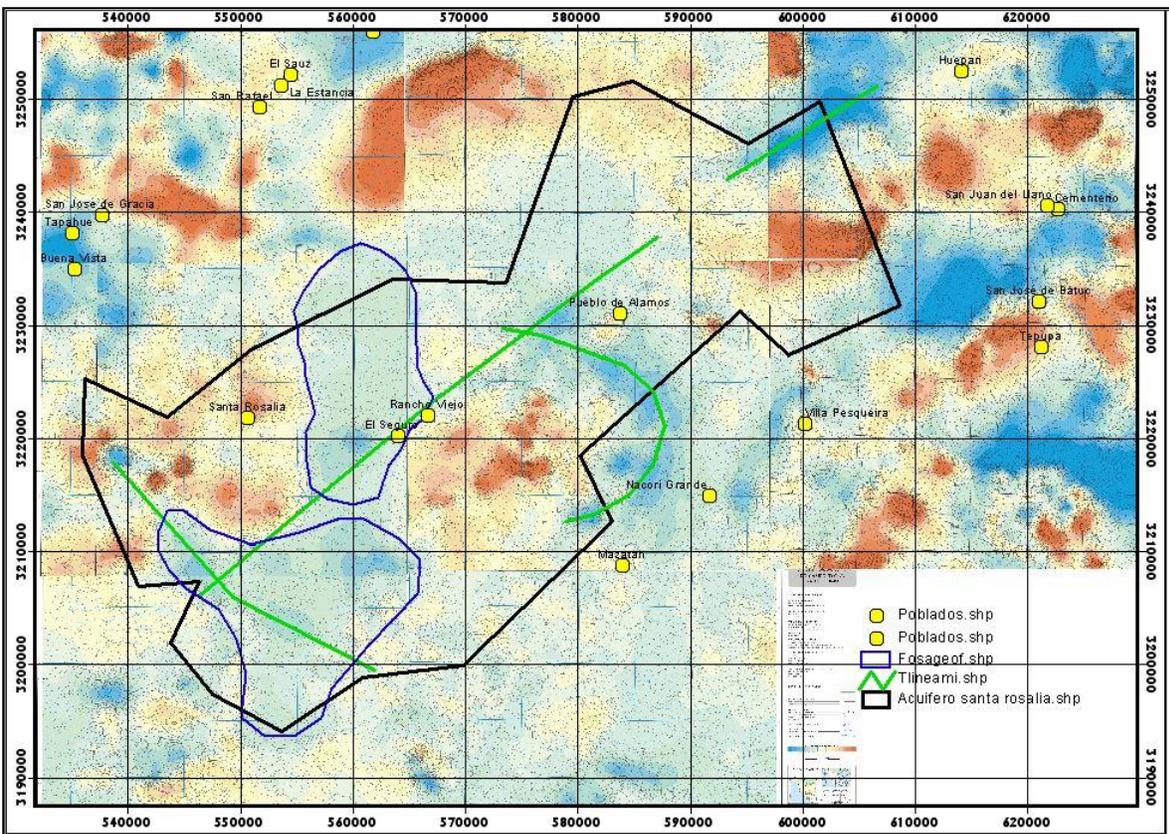


Figura 2.4 Plano de interpretación magnética.

Asimismo pueden estar relacionados a los procesos tectónicos que dieron origen a la formación de fosas y pilares. Otro rasgo importante es un

curvilineamiento magnético que se ubica en la parte central del área, al oriente de la Sierra de Mazatán, el cual está relacionado al levantamiento tectónico de esta sierra.

Siendo importante ya que a lo largo de este curvilineamiento se presenta un bajo magnético, el cual indica una probable acumulación de rocas sedimentarias y sedimentos no consolidados.

Las dos unidades litomagnéticas se ubican en la porción suroeste del área, reflejan un bajo magnetismo característico de rocas sedimentarias. Así mismo pueden interpretarse como una acumulación de sedimentos y rocas sedimentarias alojadas a lo largo de las fosas tectónicas.

2 GEOHIDROLOGÍA

En el presente apartado se muestran los resultados obtenidos campo y su interpretación; censo de aprovechamientos, hidrometría, piezometría, parámetros hidráulicos y verificación hidrogeológica, asimismo su relación con el acuífero para apoyar en la adecuación de un modelo conceptual de funcionamiento acuífero.

3.1 Censo de aprovechamientos

Para el desarrollo del presente trabajo una de las actividades de campo más importante fue el censo de aprovechamientos hidráulicos.

Con base en la información recopilada en campo se definieron los datos asociados con la distribución, infraestructura y rendimiento de los pozos, norias y manantiales y su relación con la geología regional y del subsuelo, información imprescindible para establecer los controles geológicos que condicionan el flujo y la calidad del agua subterránea.

Como trabajo de campo inicial se verifico la información contenida en el Registro Publico de Derechos de Agua (REPDA) del Acuífero Santa Rosalía, donde se encuentran registrados 285 aprovechamientos (Figura 3.1), de los cuales se 179 son de uso pecuario, 60 de uso agrícola, 41 de uso publico urbano, 3 de uso doméstico y 2 para usos múltiples (Figuras 3.2 y 3.3).

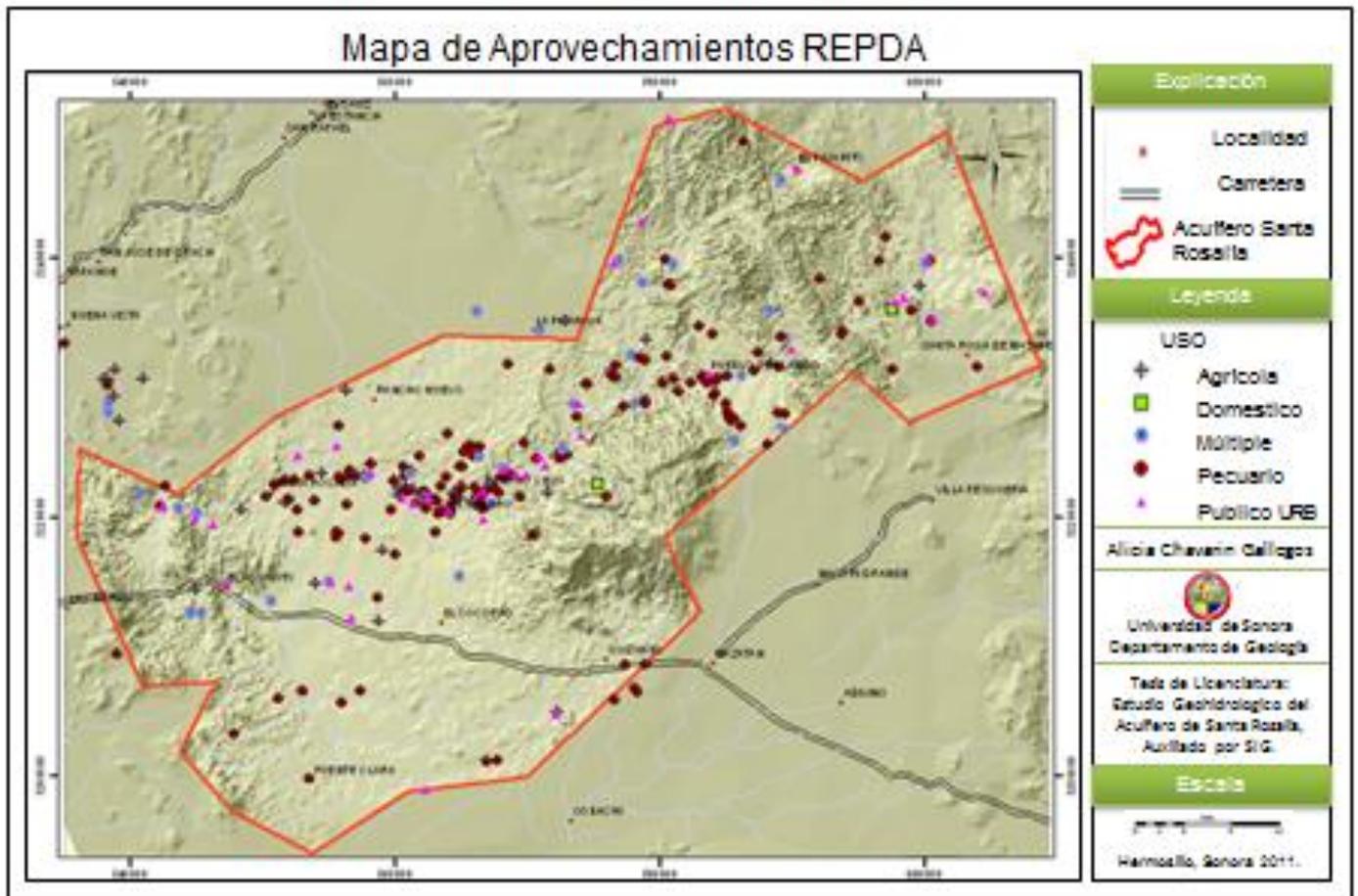


Figura 3.1 Ubicación de aprovechamientos registrado en el REPDA (actualizado a 2006).

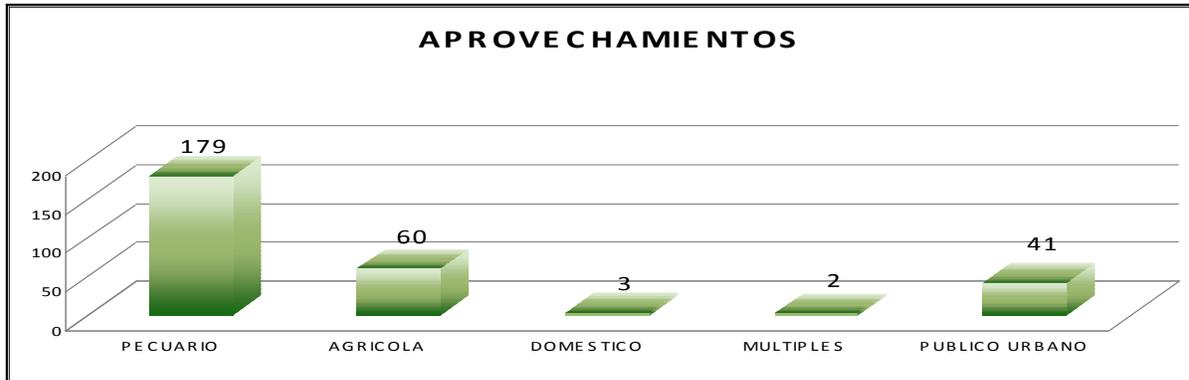


Figura 3.2 Número de aprovechamientos hidráulicos registrados en el REPDA.

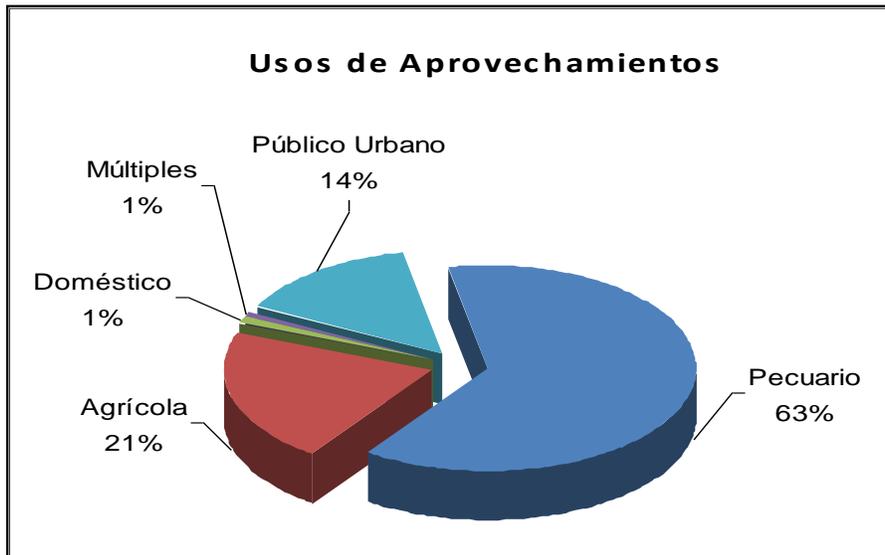


Figura 3.3 Uso de los aprovechamientos registrados en REPDA

Se identificó y marcó prácticamente la totalidad de aprovechamientos ubicados en el acuífero. Cabe mencionar que el número de aprovechamientos registrados en REPDA es mayor al censado, lo anterior debido a que se han cancelado y abandonado un gran número de aprovechamientos.

Durante el censo se obtuvo información diversa:

- a) Nombre y datos específicos del dueño del aprovechamiento
- b) Ubicación y características constructivas de la captación (profundidad, diámetro de perforación, de ademe y de la columna de bombeo).
- c) caudal instantáneo al que se destina el aprovechamiento
- f) profundidad al nivel estático o dinámico
- g) coordenadas geográficas del sitio, entre otros datos relevantes.

El Producto del censo de aprovechamientos elaborado en este trabajo se localizó 165, de los cuales el 75% se encuentran activos. Entre los aprovechamientos activos, el 83% destinan su uso a la actividad pecuaria, el 9% es de uso agrícola, el 6% se utiliza para uso doméstico y solo un 2% es de uso público urbano (Figura 3.4). De acuerdo al tipo de aprovechamiento, se identificaron: 120 norias, 42 pozos, 2 manantiales y una presa, la distribución de los mismos se aprecia en la Figura 3.5.

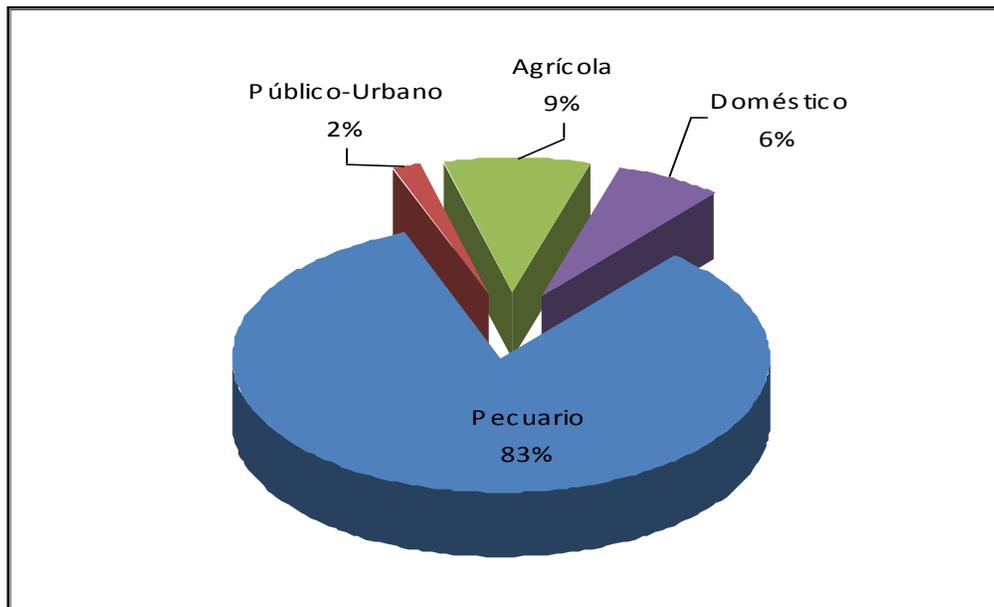


Figura 3.4 Usos de los aprovechamientos censados

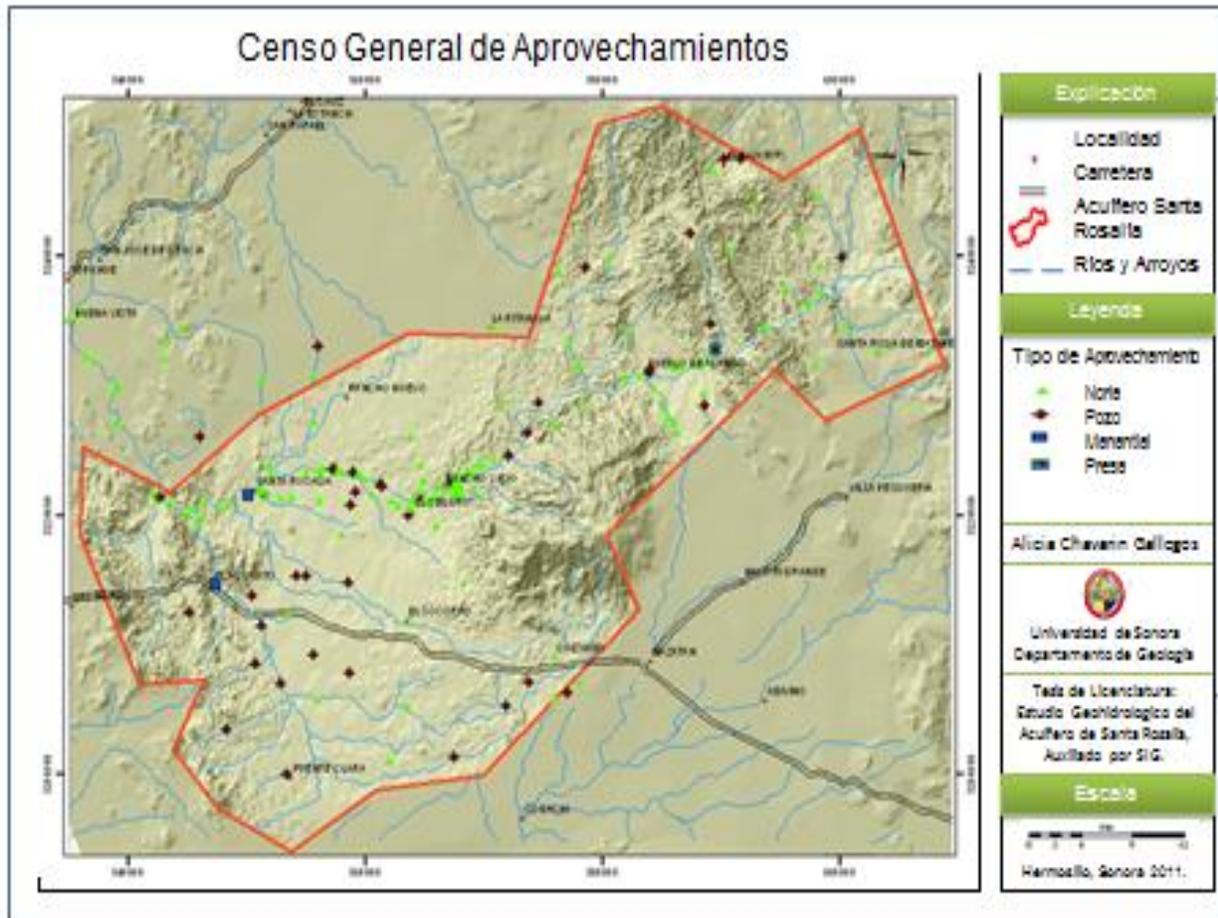


Figura 3.5 Localización y tipos de aprovechamientos censados

Comparando los resultados obtenidos durante el censo elaborado en el presente estudio con el REPDA, se tienen una diferencia de menos del 50%, lo cual, como ya se mencionó, la diferencia estriba principalmente en que existen muchos aprovechamientos abandonados o fuera de uso, mismos que no fue posible localizarlos ya que no queda rastro de ellos.

Los resultados tienden a manifestar sus usos pecuarios y agrícolas. En el rubro donde se aprecia un descenso de mas del 90% es en el uso público urbano, en contraparte aumentó notablemente el uso doméstico de los aprovechamientos.

3.2 Volúmenes y usos de agua

De acuerdo a datos registrados en el REPDA, se estima una extracción anual de 8.01 Hm³/año de agua subterránea en el Acuífero Santa Rosalía. Del volumen total se destinan 7.46 Hm³/año al uso agrícola, en segundo orden de extracción se encuentran el uso pecuario con 0.36 Hm³/año y el público urbano con 0.15 Hm³/año. El uso múltiple y doméstico reportan menor volumen de extracción; 0.04 y 0.0014 Hm³/año respectivamente (Figura 3.6).

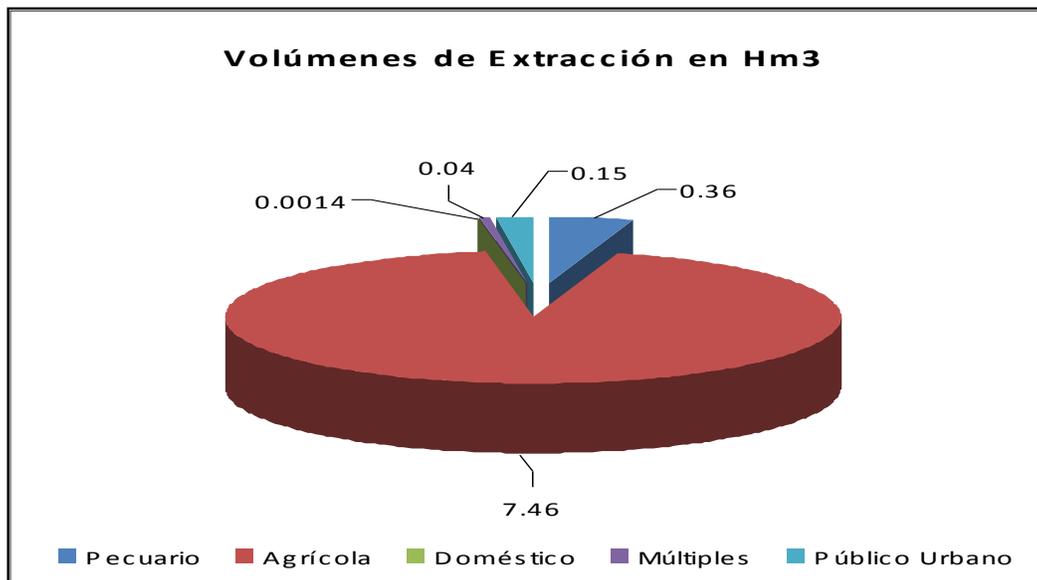


Figura 3.6 Volúmenes de extracción respecto al de uso de los aprovechamientos según el REPDA.

Durante el desarrollo del presente estudio, se estimó el gasto de extracción de los aprovechamientos usando métodos indirectos de cuantificación del volumen de extracción, debido a que la mayor parte de los aprovechamientos no cuentan con medidor de flujo, por lo cual fue necesario utilizar diversas técnicas para cuantificar el volumen extraído.

Debido a que la mayoría de los aprovechamientos no se encontraban en operación al momento de realizar el censo, el caudal se estimó con base en el diámetro de la tubería de descarga, potencia del motor y en el uso preferencial del aprovechamiento, y ocasionalmente, la información fue proporcionada por el personal encargado del aprovechamiento.

Cuando el aprovechamiento tenía descarga libre, se utilizaron diversas estrategias: i) el método de la escuadra y/o ii) registro de tiempo para llenar un depósito de volumen determinado.

El método de la escuadra consiste en medir la distancia (D) que alcanza el chorro de agua que descarga por un tubo horizontal no menor a 1.5 m de diámetro conocido (y), con una escuadra graduada específicamente para este fin. Este método tiene dos variantes: i) Tubo totalmente lleno (Figura 3.7) y ii) Tubo parcialmente lleno (Figura 3.8).

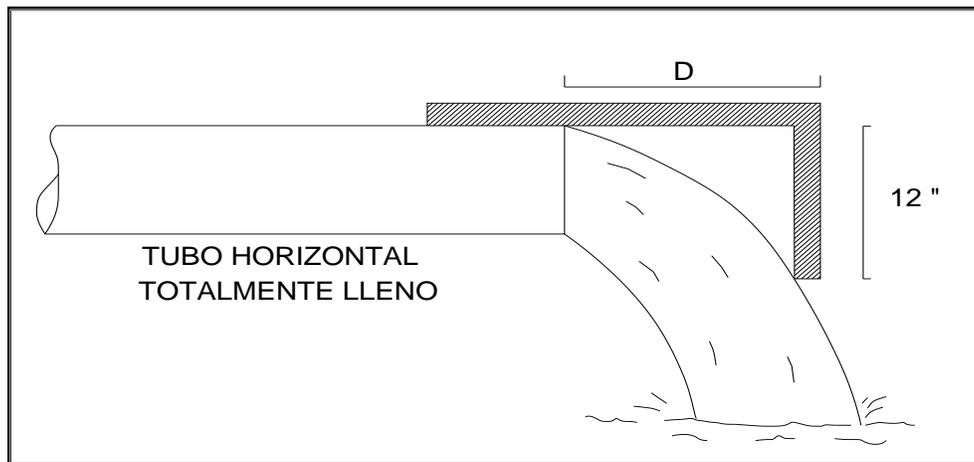


Figura 3.7 Método de la escuadra en tubo totalmente lleno

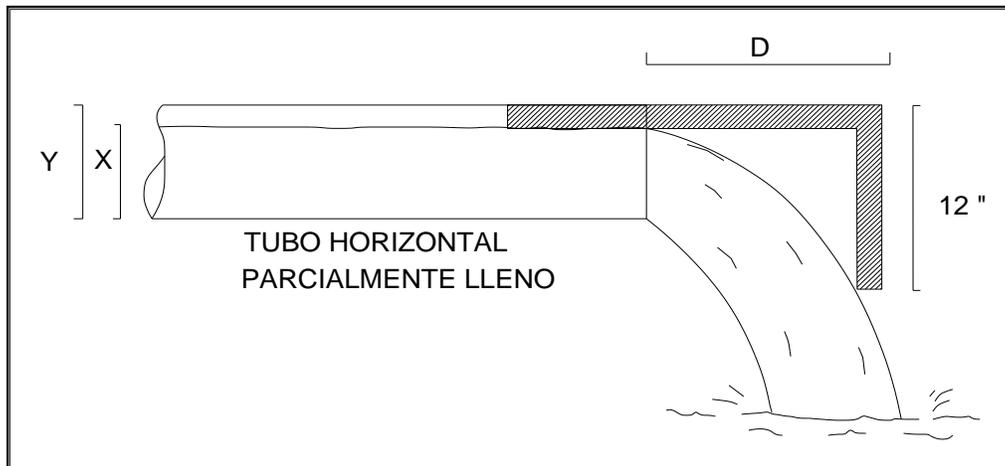


Figura 3.8 Método de la escuadra en tubo parcialmente lleno

En el primer caso se mide la distancia horizontal (D), ajustando el brazo de la escuadra entre el extremo del tubo de descarga y el ángulo a 90° que forma el otro brazo de la escuadra cuando hace contacto con el chorro de agua, el valor obtenido (en cm) se correlaciona con el diámetro de descarga para orificios ya calibrados según la Tabla 3.1, lo cual da un valor de Q en lps considerado aceptable.

En el segundo caso se mide la distancia horizontal (D) en la descarga, y la parte que ocupa el caudal (X) en el diámetro interior del tubo (Y) (Figuras 3.9 y 3.10). De esta relación (X/Y) se obtiene un porcentaje que multiplicado por el valor específico de la relación de la distancia horizontal (D) y el diámetro del tubo de descarga de la Tabla 3.1, en base a 100, nos da Q en lps (Tabla 3.2).



Figura 3.9 Medición de relación X/Y en tubo parcialmente lleno



Figura 3.10 Medición de la distancia horizontal (D) en tubo parcialmente lleno

Estudio Geohidrológico del Acuífero de Santa Rosalía
Alicia Chavarin Gallegos

Tabla 3.3 Aforos de tubos horizontales totalmente llenos, gastos en lps.

Distancia Horizontal (cm)	Aforo de tubos horizontales totalmente llenos. Gasto en lps						
	2"	3"	4"	6"	8"	10"	12"
20	1.7	3.7	6.4	14.6	25.3	39.7	56.9
22	1.9	4.1	7.0	16.0	27.8	43.7	62.6
24	2.0	4.5	7.7	17.5	30.3	47.7	68.3
26	2.2	4.8	8.3	19.0	32.8	51.7	73.9
28	2.4	5.3	9.0	20.4	35.4	55.6	79.6
30	2.6	5.6	9.6	21.9	37.9	59.6	85.3
32	2.7	6.0	10.2	23.3	40.4	63.6	91.0
34	2.9	6.3	10.9	24.8	42.9	67.6	96.7
36	3.1	6.7	11.5	26.2	45.5	71.5	102.4
38	3.2	7.0	12.2	27.7	48.0	75.5	108.1
40	3.4	7.4	12.8	29.2	50.5	79.5	113.8
42	3.6	7.8	13.4	30.6	53.0	83.5	119.4
44	3.7	8.2	14.1	32.1	55.6	87.4	125.1
46	3.9	8.6	14.7	33.5	58.1	91.4	130.8
48	4.1	8.9	15.4	35.0	60.6	95.4	136.5
50	4.3	9.3	16.0	36.5	63.2	99.4	142.2
52	4.4	9.7	16.6	37.9	65.7	103.3	147.9
54	4.6	10.0	17.3	39.4	68.2	107.3	153.6
56	4.8	10.4	17.9	40.8	70.7	111.3	159.3
58	4.9	10.8	18.6	42.3	73.3	115.2	165.0
60	5.1	11.2	19.2	43.7	75.8	119.2	170.6
62	5.3	11.5	19.8	45.2	78.3	123.2	176.3
64	5.4	11.9	20.5	46.7	80.8	127.2	182.0
66	5.6	12.3	21.1	48.1	83.4	131.1	187.7
68	5.8	12.6	21.8	49.6	85.9	135.1	193.4
70	6.0	13.0	22.4	51.0	88.4	139.1	199.1
72	6.1	13.4	23.0	52.5	90.9	143.1	204.8
74	6.3	13.8	23.7	53.9	93.5	147.0	210.5
76	6.5	14.1	24.3	55.4	96.0	151.0	216.1
78	6.6	14.5	25.0	56.9	98.5	155.0	221.8
80	6.8	14.9	25.6	58.3	101.0	159.0	227.5
82	7.0	15.3	26.2	59.8	103.6	162.9	233.2
84	7.1	15.6	26.9	61.2	106.1	166.9	238.9
86	7.3	16.0	27.5	62.7	108.6	170.9	244.6
88	7.5	16.4	28.2	64.2	111.1	174.9	250.3
90	7.7	16.7	28.8	65.6	113.7	178.8	256.0
92	7.8	17.1	29.4	67.1	116.2	182.2	261.6
94	8.0	17.5	30.0	68.5	118.7	186.8	267.3
96	8.2	17.9	30.7	70.0	121.2	190.8	273.0
98	8.3	18.2	31.4	71.4	123.8	194.7	278.7
100	8.5	18.6	42.0	72.9	126.3	198.7	284.4

El segundo método consistió en llenar un recipiente o depósito con una capacidad conocida y medir el tiempo que tardaba en llenarse. Así, por regla de tres, se estimaron los litros por segundo que proporcionaba el aprovechamiento.

De acuerdo al censo de aprovechamientos elaborado en el presente estudio, se calcularon los gastos de extracción de agua (en $\text{Hm}^3/\text{año}$) en base al tipo de aprovechamiento, su uso, infraestructura y se determinó que en la zona de estudio, se extraen aproximadamente $10.47\text{Hm}^3/\text{año}$ de agua por año. De este volumen $5.59\text{Hm}^3/\text{año}$ es destinado al uso pecuario, para uso agrícola se destinan $4.27\text{Hm}^3/\text{año}$, $0.08\text{Hm}^3/\text{año}$ para uso doméstico y solo $0.54\text{Hm}^3/\text{año}$ es para uso público-urbano.

Tabla 3.4 Aforos de tubos horizontales parcialmente llenos

Aforo de tubos horizontales parcialmente llenos							
X/Y	%	X/Y	%	X/Y	%	X/Y	%
0.01	0.17	0.26	20.66	0.51	51.27	0.76	81.54
0.02	0.47	0.27	21.79	0.52	52.55	0.77	82.62
0.03	0.88	0.28	22.92	0.53	53.82	0.78	83.69
0.04	1.34	0.29	24.06	0.54	55.09	0.79	84.73
0.05	1.87	0.30	25.24	0.55	56.35	0.80	85.77
0.06	2.44	0.31	26.41	0.56	57.63	0.81	86.77
0.07	3.08	0.32	27.59	0.57	58.89	0.82	87.76
0.08	3.74	0.33	28.78	0.58	60.13	0.83	88.53
0.09	4.46	0.34	29.98	0.59	61.40	0.84	89.67
0.10	5.21	0.35	31.19	0.60	62.74	0.85	90.59
0.11	5.98	0.36	32.42	0.61	63.89	0.86	91.49
0.12	6.80	0.37	33.64	0.62	65.13	0.87	92.36
0.13	7.64	0.38	34.87	0.63	66.36	0.88	93.20
0.14	8.51	0.39	36.11	0.64	67.58	0.89	94.02
0.15	9.41	0.40	37.36	0.65	68.81	0.90	94.79
0.16	10.33	0.41	38.60	0.66	70.02	0.91	95.54
0.17	11.27	0.42	39.85	0.67	71.22	0.92	96.26
0.18	12.24	0.43	41.11	0.68	72.41	0.93	97.30
0.19	13.23	0.44	42.37	0.69	73.59	0.94	97.56
0.20	14.23	0.45	43.65	0.70	74.76	0.95	98.13
0.21	15.27	0.46	44.91	0.71	75.94	0.96	98.66
0.22	16.31	0.47	46.18	0.72	77.08	0.97	99.12
0.23	17.38	0.48	47.45	0.73	78.21	0.98	99.72
0.24	18.45	0.49	48.73	0.74	79.34	0.99	99.86
0.25	19.54	0.50	50.00	0.75	80.44	1.00	100

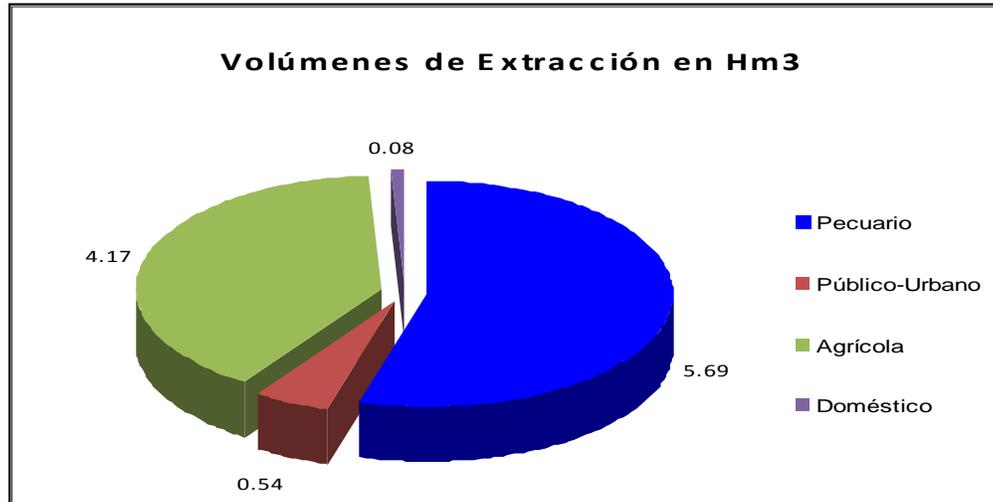


Figura 3.11 Estimación de volúmenes de extracción respecto al de uso de los aprovechamientos

No existe una diferencia notoria en relación al volumen total de extracción de agua subterránea reportado por REPDA y la estimado en este estudio.

La diferencia radica principalmente en el uso, es decir, mientras que el REPDA tiene un registro de 7.45 Hm³/año para uso agrícola con 60 aprovechamientos, el resultado de este estudio se estimó un volumen de 4.16 Hm³/año para el mismo uso con sólo 11 aprovechamientos.

Caso similar corresponde al uso pecuario, donde REPDA tiene considerado un volumen anual de 0.36 Hm³ y en este estudio se estima una extracción de 5.69 Hm³, lo anterior se observa gráficamente en la Figura 3.11.

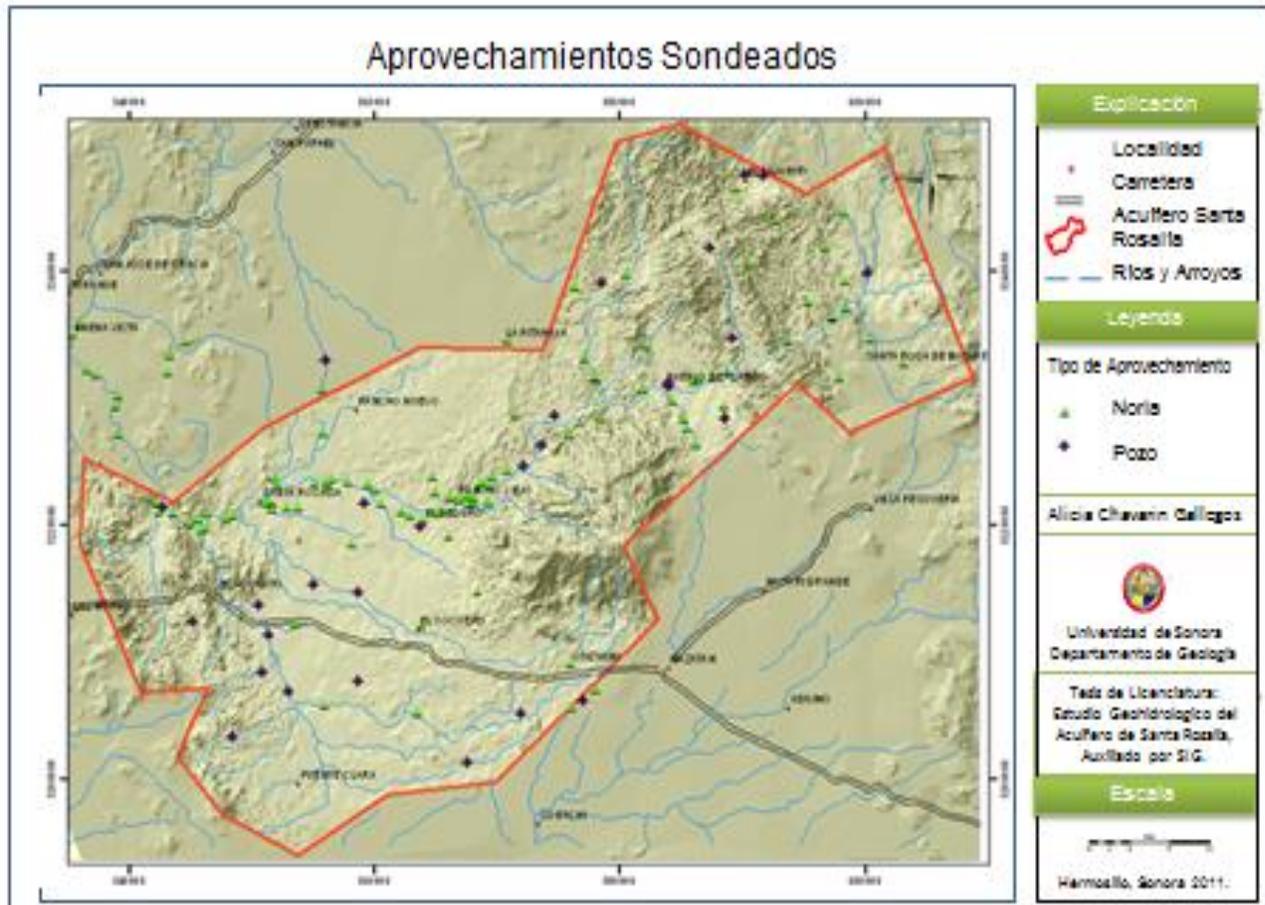


Figura 3.12 Aprovechamientos con medidas de nivel estático.

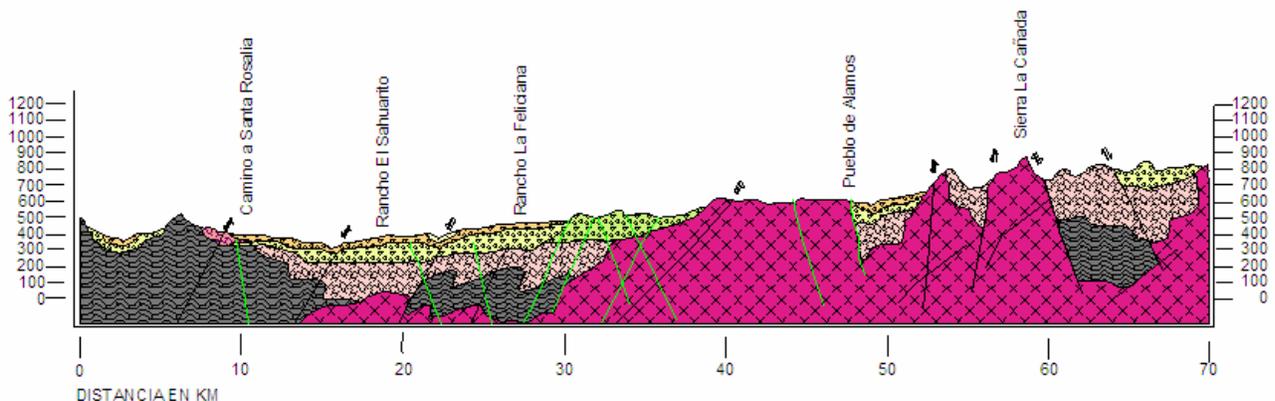
3.3 Sección Geológica A-A'

Se trata de una sección orientada noreste-sureste y que expone de manera general el comportamiento del sistema acuífero. Al inicio de la sección, al extremo poniente de los límites administrativos del acuífero, aflora material fracturado representado por calizas del Paleozóico, formando una pequeña zona de valle con potencial geohidrológico atractivo.

Al noreste la sección expone la principal zona de valle del acuífero, se trata de un pequeño graben que alberga el mayor potencial acuífero, por ende el mayor desarrollo agrícola y un gran número de aprovechamientos hidráulicos, el graben tiene una dirección norte sur y continúa fuera de los límites del acuífero.

Subyaciendo al material sedimentario, la sección muestra la presencia de material fracturado con permeabilidades que varían de medias a altas, por lo cual el potencial de la zona a profundidad tiende a ser alto y se recomiendan perforaciones exploratorias con una profundidad mínima de 400m.

Continuando en dirección noreste la sección expone la zona de pie de monte y su contacto con material intrusivo en el extremo norte de la Sierra de Mazatán, posteriormente muestra la presencia de pequeñas fosas rellenas de material sedimentario cuyas permeabilidades varían de altas a bajas, por lo cual su potencial acuífero es errático y está controlado por la presencia de la material conglomerático del Mioceno (Formación Báucarit).



4 PIEZOMETRIA

Para el análisis piezométrico se contó con un total de 119 datos, la distribución de los mismos se observa en la Figura 4.1. Con objeto de determinar una posible evolución de niveles estáticos se analizó el estudio “Actualización del Estudio geohidrológico de las Subcuencas los Ríos Sonora, Zanjón, San Miguel, Mesa del Seri, La victoria y Cuenca Bacoachito” realizado por la Universidad de Sonora en el año del 2005, el cual contiene 25 datos piezométricos en su mayoría distribuidos en la parte central de la zona de estudio.

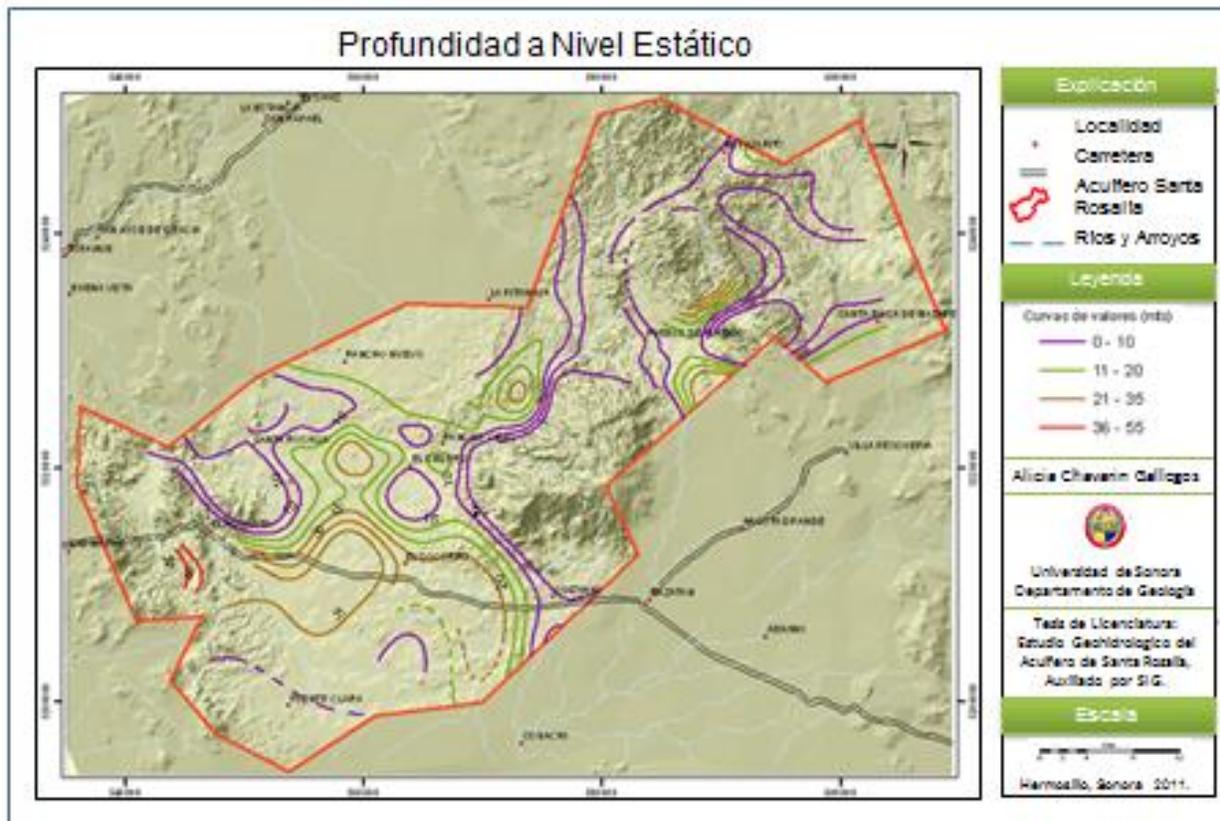


Figura 4.1 Configuración de isovalores para profundidad de niveles estáticos (2007).

4.1 Niveles piezométricos actuales

De acuerdo a las configuraciones de isovalores realizadas en el presente trabajo se aprecia que en la norte del Acuífero Santa Rosalía, donde se localizan las poblaciones Santa Rosa de Matapé, El Pajarito y Pueblo de Álamos, la profundidad de los niveles estáticos, norias en su mayoría, varía entre 2 y 15 metros (Figura 4.2).

En esta misma zona se encuentran dos pozos con profundidades de 34.6 y 23.44 m en las localidades Teopari y La Noria respectivamente, los cuales difieren de los aprovechamientos cercanos.

Lo anterior nos brinda una idea general de la presencia de varios horizontes acuíferos en un sistema heterogéneo.

Una tendencia con profundidades mayores a 5 y menores a 20 m se registra en la parte central de la zona de estudio, específicamente en las aprovechamientos localizados en las poblaciones Santa Rosalía, Rancho Viejo y El Seguro, así como el grupo de aprovechamientos, norias en su mayoría, que se encuentran a lo largo del Arroyo La junta y sus tributarios.

En esta parte del acuífero, los valores de nivel estático más profundos pertenecen a dos pozos de 24.38 y 27.95 m en las localidades La Feliciano y Los Bagotes respectivamente.

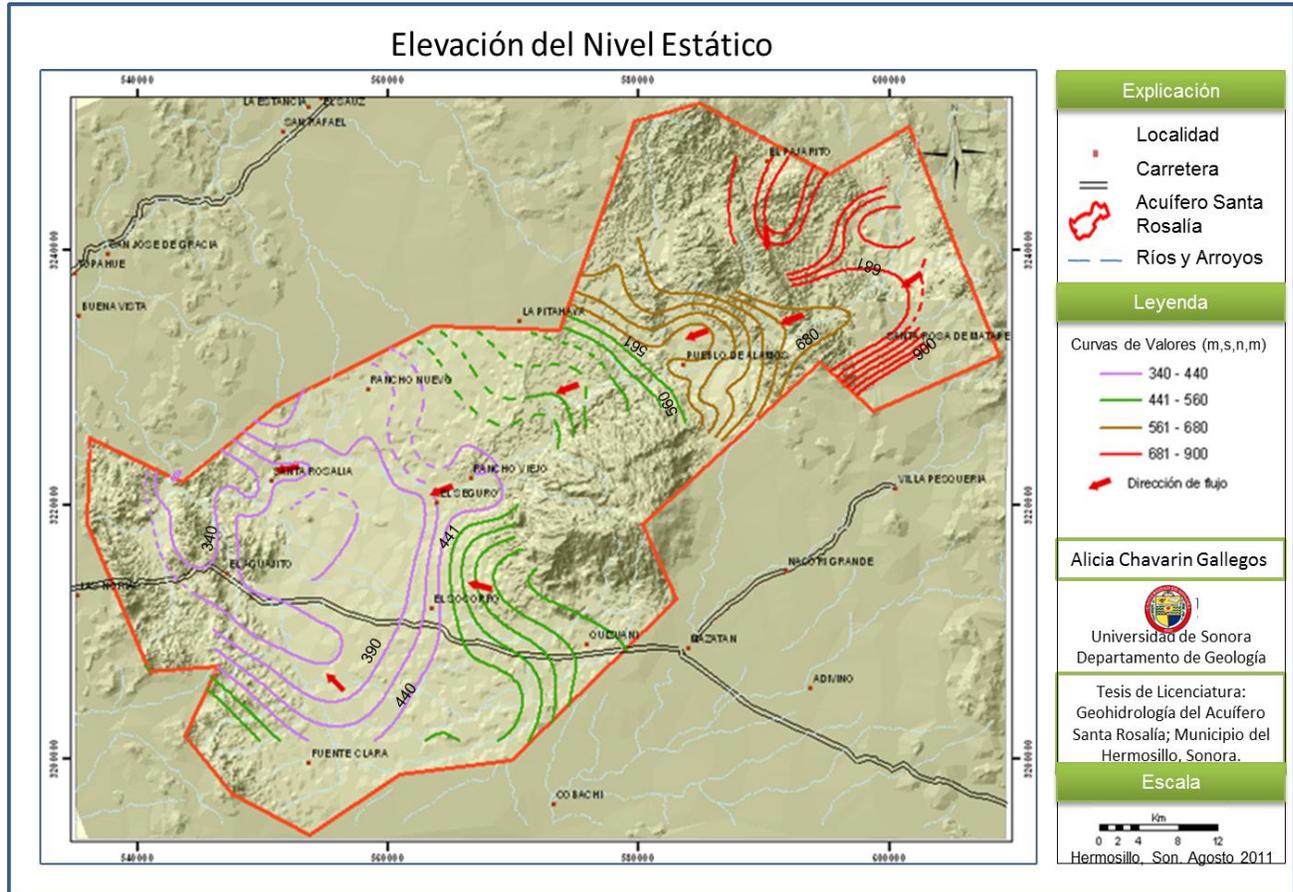


Figura 4.2 Elevación del nivel estático y dirección preferente del flujo subterráneo (2007).

La información anterior brinda un panorama general de la diferencia de niveles estáticos que se encuentran en la zona de estudio.

Caso común es la presencia de aprovechamientos con niveles someros (alrededor de 5 m) y a pocos metros se encuentran niveles estáticos iguales o mayores de 30 m. La mezcla de niveles genera incertidumbre en las configuraciones de profundidad y elevación de nivel estático, por lo que fue necesario hacer un filtrado de medidas y configurar niveles con los considerados representativos en la zona.

Niveles piezométricos más profundos se localizan en la parte suroeste del acuífero, en las poblaciones El Socorro y El Aguajito. Las profundidades son mayores a 20 m y alcanzan en promedio los 35 m. En esta zona el nivel estático más profundo es de 52.4 m en la localidad La Bomba.

La piezometría indica la presencia de dos niveles acuíferos, uno somero con profundidades menores a 15 m y otro nivel cuya profundidad es mayor a 20 m, el primero representa la parte del subálveo del acuífero, misma que está directamente relacionado con la presencia de lluvias, mientras que el segundo nivel representa la parte potencial del acuífero, el cual es poco explotado y se relaciona al fuerte control estructural de la zona.

4.2 Elevación del Nivel Estático

Con base a la profundidad del agua referida al nivel medio del mar fue calculada la elevación del nivel estático. Fueron trazadas curvas de igual elevación, mismas que permitieron inferir la dirección preferente de flujo subterráneo, la cual y de manera general es paralela a los escurrimientos principales (Arroyo La Junta), lo cual indica que el sistema acuífero se encuentra prácticamente en condiciones iniciales.

Se observa que elevaciones máximas se encuentran al noreste del acuífero, presentando valores que van de los 500 a 900 msnm en las localidades de Pueblo de Álamos, Santa Rosa Matape y El Pajarito. Mientras que en la parte suroeste, en las localidades de Rancho Viejo, El Seguro y Santa Rosalía, se encuentran elevaciones mínimas que fluctúan entre 340 msnm y 500 msnm (Figura 4.3).

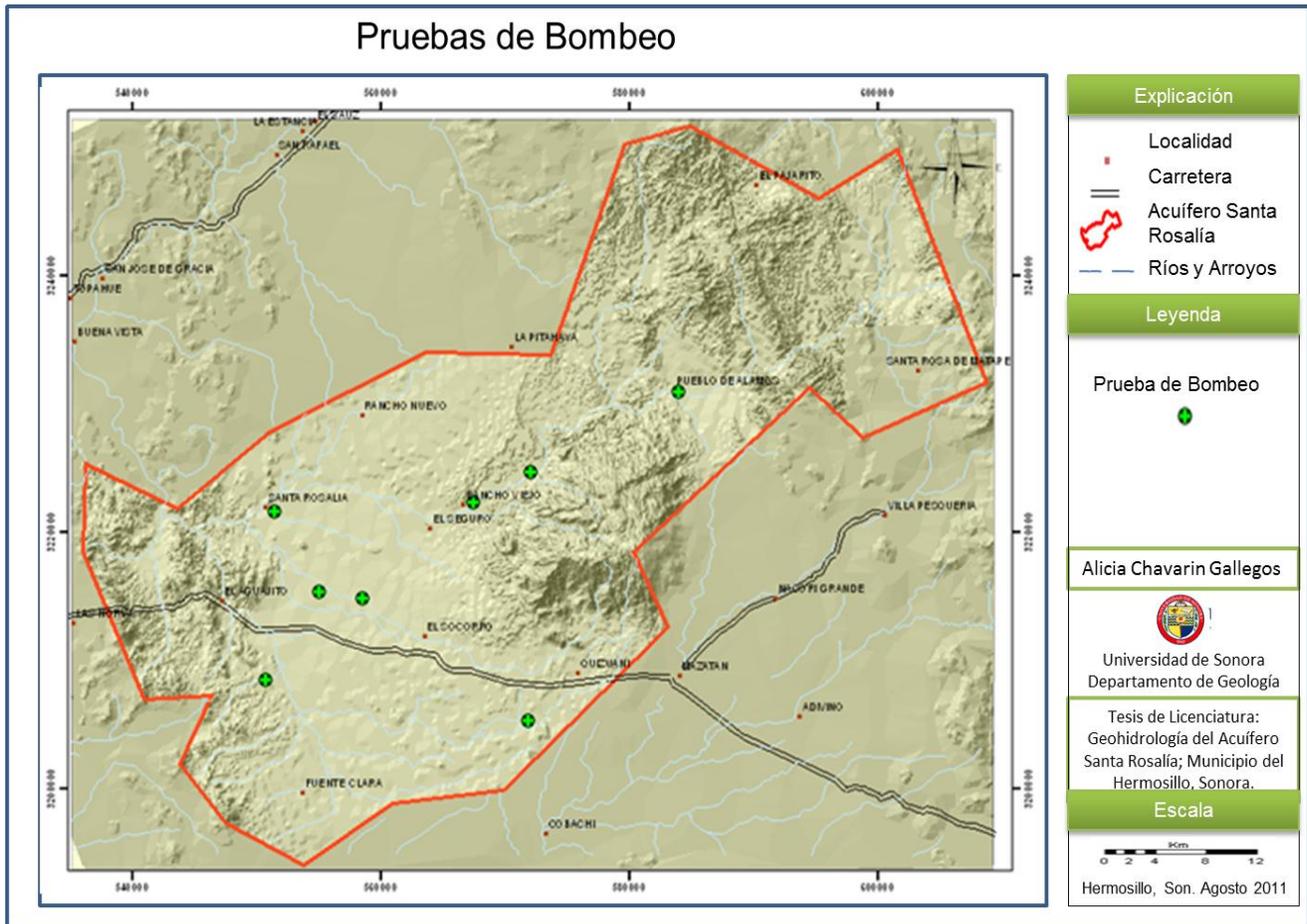


Figura 4.3 Localización de las pruebas de bombeo ejecutadas

4.3 Direcciones preferentes de flujo subterráneo

Las direcciones preferentes de flujo subterráneo indican que el agua sigue trayectorias normales a las curvas de isovalores de elevación del nivel estático, en el sentido en que decrece la carga hidráulica y que el flujo subterráneo tiene una tendencia similar a la dirección del escurrimiento superficial (Figura 4.3).

En base al modelo de flujo subterráneo definido expone que las curvas de igual elevación del nivel estático son normales al cauce del Arroyo La Junta, con una dirección preferente noreste – suroeste, por lo que no existe deformación en las curvas equipotenciales que sugiera sobreexplotación acuífera.

4.3.1 Pruebas de bombeo

Como parte de los objetivos del estudio se ejecutaron 8 pruebas de bombeo en igual número de aprovechamientos distribuidos en la zona de estudio. La duración de las pruebas dependió de la disponibilidad de los aprovechamientos y del comportamiento hidráulico del medio.

En ninguna de las pruebas realizadas se contó con pozos de observación; por lo cual las observaciones y lecturas se limitaron al pozo de bombeo. Del análisis de las pruebas de bombeo, se obtuvieron los parámetros de Transmisividad (T) y Conductividad Hidráulica (K).

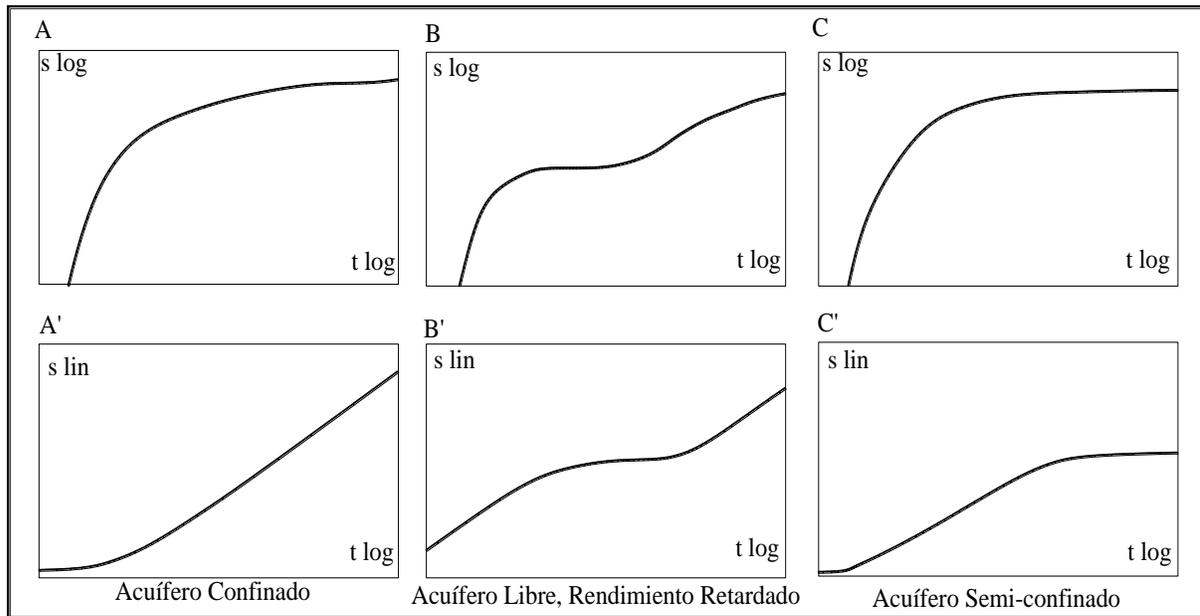


Figura 4.4 Graficas logarítmicas y semi-logarítmicas de las relaciones teóricas tiempo-abatimiento para acuíferos sin consolidar (Kruseman & De Ridder, 1990).

Para determinar el método que se utilizaría para interpretar las pruebas de bombeo se infirió el tipo de acuífero por medio del análisis del comportamiento de las graficas de abatimiento – tiempo, comparadas con las disponibles en varios de métodos de ajuste de curvas para acuíferos de tipo libre (Figura 4.4); que incluyen condiciones hidrogeológicas variadas (Kruseman y de Ridder, 1990).

El análisis de las pruebas de bombeo se realizó por medio del programa Aquifer Test, una vez definido que el comportamiento de las gráficas logarítmicas de los datos de campo (tiempo-abatimiento) comparadas con la literatura, es equivalente a aquella de un acuífero de tipo libre y considerando a los pozos analizados totalmente penetrantes, se procedió a seleccionar el método de interpretación más apropiado para interpretar los resultados de las pruebas de bombeo en acuíferos libres.

La interpretación de las pruebas de bombeo se realizó con el método de Neuman para la etapa de abatimiento y el método de Theis & Jacob para la etapa de recuperación. Ambos métodos son aplicables para las pruebas realizadas en acuíferos de tipo libre. Cabe señalar que no fue posible realizar un número mayor de pruebas debido a que las condiciones de uso, infraestructura y distribución de los aprovechamientos no lo permitieron.

4.3.2 Conductividad hidráulica

La Conductividad Hidráulica (K) se define como el volumen de agua que circula a través de una sección de área unitaria normal al sentido del flujo, bajo un gradiente hidráulico unitario. Esta propiedad caracteriza cuantitativamente la permeabilidad de los acuíferos y depende de las características del fluido y del medio poroso a través del cual circula. Sus dimensiones son longitud / tiempo (L/T) y se puede expresar en cualquiera de sus unidades. (Kruseman & De Ridder, 1990).

De los ensayos realizados se obtuvo, durante la etapa de abatimiento, un valor de K mínimo de 4.60×10^{-6} m/s, un máximo de 1.32×10^{-3} m/s y 3.79×10^{-4} m/s como promedio. De la interpretación durante la etapa de recuperación, el valor de K mínimo obtenido fue de 6.03×10^{-7} m/s, el máximo de 3.39×10^{-3} y en promedio 5.09×10^{-4} m/s.

El valor de K más alto se registró, tanto en la etapa de abatimiento como de recuperación, en la interpretación del ensayo realizado en la localidad La Manzana, en las cercanías de Rancho Viejo, en el flanco oeste de la Sierra de Mazatán.

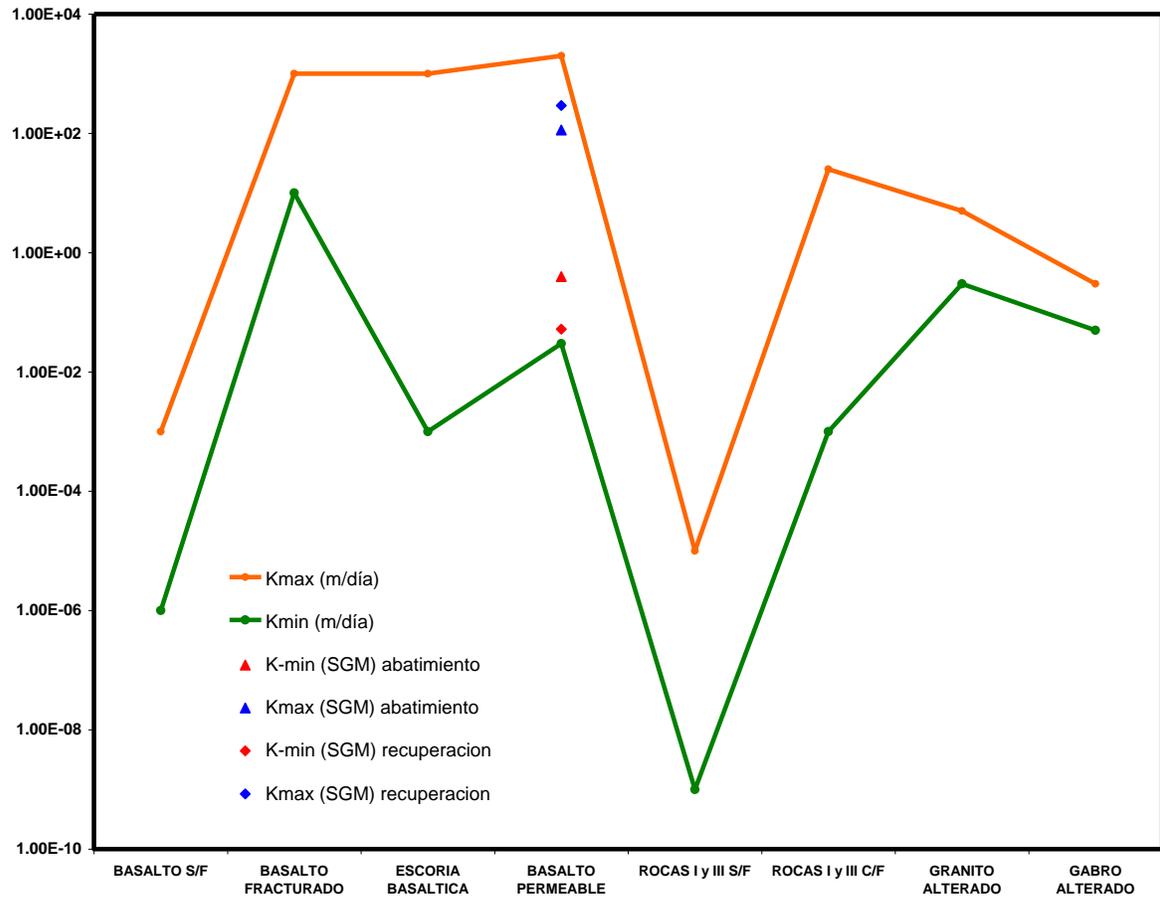


Figura 4.5 Valores de K (en m/día) máximos y mínimos para diferentes materiales geológicos.

4.3.3 Transmisividad

La Transmisividad (T) es el resultado de la Conductividad Hidráulica (K) por el espesor saturado de un acuífero. En consecuencia, T es la cantidad de agua que circula a través de una sección vertical de un metro de anchura y de altura igual al espesor saturado del acuífero, afectado por un gradiente hidráulico igual a uno, T tiene las dimensiones de $L^3/T \times L$ ó L^2/T y se expresa en unidades de $m^2/día$ o m^2/s (Kruseman & De Ridder, 1990).

Los resultado obtenidos, en la interpretación de la etapa de abatimiento varían de $3.22 \times 10^{-4} m^2/s$ a $1.28 \times 10^{-2} m^2/s$, siendo en promedio $4.46 \times 10^{-3} m^2/s$, mientras que en la interpretación de recuperación se obtuvo como valor mínimo $4.59 \times 10^{-5} m^2/s$, un máximo de $2.71 \times 10^{-2} m^2/s$ y $6.95 \times 10^{-3} m^2/s$ como promedio. El valor mayor se obtuvo durante la etapa de abatimiento en el ensayo realizado en la localidad de Rancho Viejo. Mientras que en la recuperación, el valor más alto se obtuvo cercano a la localidad La Manzana.

Como se mencionó, K representa la habilidad del agua para moverse a través de los acuíferos que proveen buena permeabilidad, por lo que se puede considerar la propiedad hidráulica más importante del material geológico y del agua subterránea. Es por ello que se compararon los resultados de K obtenidos con lvalores de K máximos y mínimos estimados en la bibliografía especializada de acuerdo al medio geológico predominante (Tabla 4.1).

Se realizó una grafica con los valores de K máximos y mínimos en $m/día$, reportados por Domenico & Schwartz (1998) y Smith & Weathcraft (1993) y los obtenidos en la interpretación de las pruebas de bombeo realizadas. Se encontró

que los valores máximos y mínimos estimados en el presente estudio, tanto en la etapa de abatimiento como en la de recuperación, se encontraban entre los rangos de K máximos y mínimos para el basalto permeable.

Tabla 4.1 Valores de K (en m/día) promedio según el medio geológico

ROCAS CRISTALINAS	Domenico & Schwartz (1998)		Smith & Weathcraft (1993)		Freeze & Cherry (1979)	
	De (m/día)	A (m/día)	De (m/día)	A (m/día)	De (m/día)	A (m/día)
BASALTO INALTERADO SIN FRACTURAS			0.000001	0.001		
BASALTO FRACTURADO / VESICULAR CUATERNARIO			10	1000		
ESCORIA BASALTICA			0.001	1000		
BASALTO PERMEABLE	0.03	2000			0.02	1000
ROCAS IGNEAS Y METAMORFICAS SIN FRACTURAS	1.0E-09	1.0E-05	1.0E-09	1.0E-05	1.0E-09	1.0E-05
ROCAS IGNEAS Y METAMORFICAS FRACTURADO	0.001	25	0.00001	1	0.0005	20
GRANITO ALTERADO	0.3	5				
GABRO ALTERADO	0.05	0.3				

4.4 Unidades hidrogeológicas

A continuación se describen las características hidrogeológicas básicas de las principales unidades que afloran en la zona de estudio, lo anterior mediante el análisis de geología superficial y la verificación hidrogeológica de campo. El presente análisis se realizó considerando que el flujo de agua subterráneo es controlado por dos propiedades: porosidad y permeabilidad.

En hidrogeología los medios permeables de mayor relevancia están constituidos por depósitos sedimentarios no consolidados o escasamente consolidados y por roca usualmente fracturada. Partiendo de lo antes mencionado se agruparon unidades con grados de permeabilidad para cada medio. En la Figura 4.6 se presenta la distribución de las unidades que mas adelante son descritas.

4.4.1 Unidad granular de permeabilidad alta.

Consiste en arena, limo, gravas, arcillas de terrazas antiguas, las cuales se depositaron en ambientes de planicie de inundación y paleocauces de arroyos, asimismo se encuentra una serie de depósitos constituidos por gravas de taludes y abanicos aluviales, los cuales definen el último evento sedimentario del Cuaternario (Qhoal). Esta unidad se localiza principalmente a lo largo del cauce del Arroyo La Junta y otros arroyos importantes de la zona. Dada esta condición y en base a su composición se cataloga como una unidad que sugiere un acuífero de tipo libre.

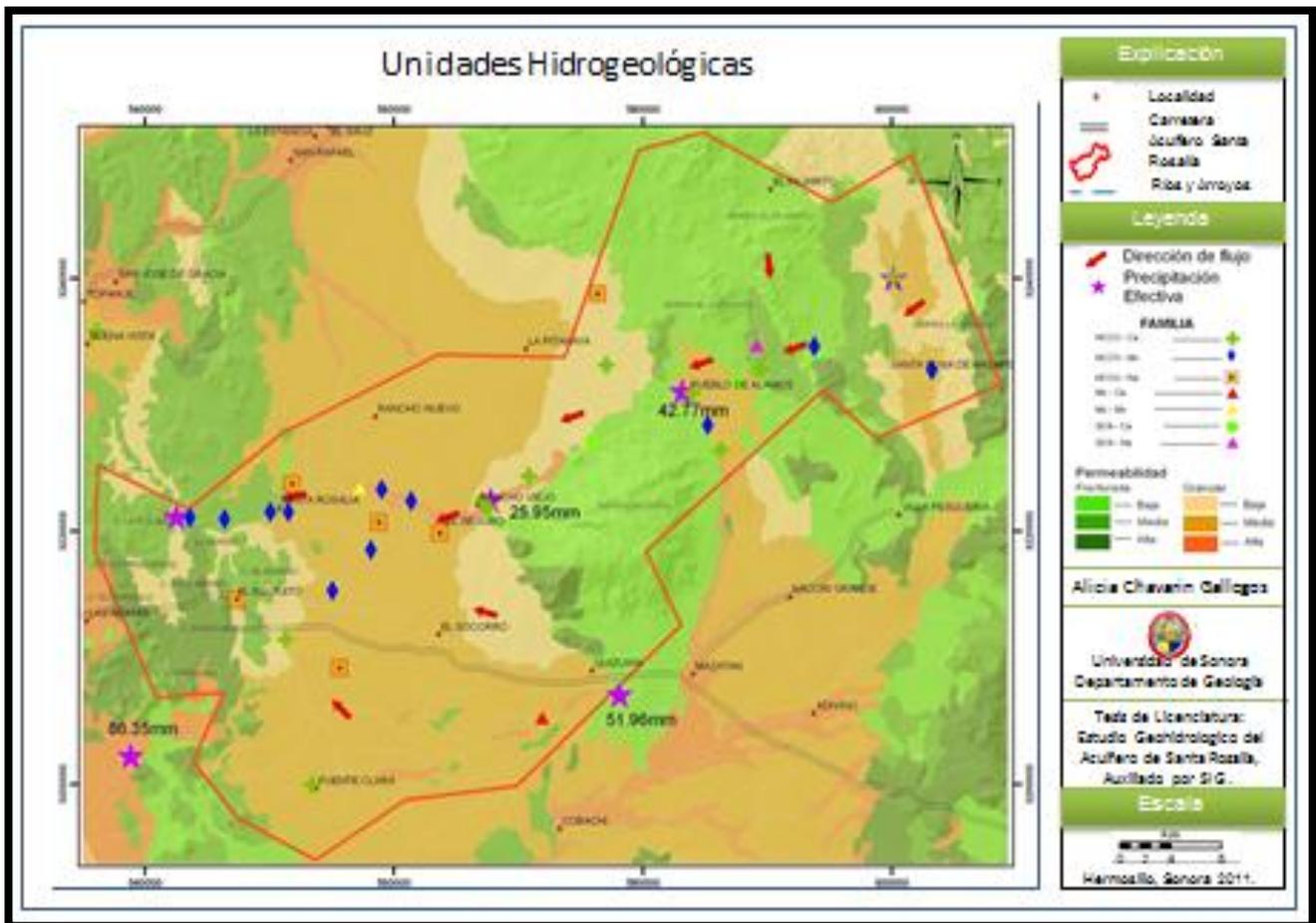


Figura 4.6 Unidades Hidrogeológicas identificadas en el Acuífero Santa Rosalía

En esta unidad se localizan la mayoría de los aprovechamientos tipo noria, con gastos que van desde 1 hasta 80 lps, predominando los gastos altos de 40 lps en promedio, sin embargo estos aprovechamientos están sujetos a periodos de estiajes que merman hasta en un 50% sus gastos, dado que los niveles disminuyen, aunado al espesor de esta unidad que es del orden de 10 a 50m. Se considera que la precipitación y corrientes superficiales operan como fuente principal de recarga.

4.4.2 Unidad granular de permeabilidad media.

Los materiales que componen esta unidad comprenden una gran variedad litológica: materiales derivados de rocas volcánicas, sedimentarias y metamórficas. Su granulometría varía de arcillas, arenas finas, gravas y escasos horizontes de cantos rodados (Qpt Cgp-ar). Geomorfológicamente forma valles de relleno, su distribución es amplia formando en la parte central una franja de ancho 20 por 30 Km, con una orientación de sur a norte.

A partir de la interpretación de la gravimetría aérea, así como datos de construcción de los pozos proporcionados por los usuarios, se infiere que el potencial global de esta unidad varía, llegando en algunos lugares hasta los 100m de espesor. Sin embargo, en la zona centro - sur su espesor puede ser mayor, tal como como sugiere la imagen de magnetometría aérea que marca la presencia de una posible fosa sepultada. Niveles estáticos de los aprovechamientos ubicados en esta unidad son del orden de 30 a 55m.

También existen algunos pozos que son explotados con gastos de 2 lps cuyo nivel de abatimiento es de unos cuantos centímetros y que se recuperan en pocos minutos. Es importante mencionar la presencia de un aprovechamiento con características particulares y perforado en esta unidad, el cual es probable que reciba aporte de la unidad fracturada que subyace el medio granular, cuenta con un gasto del orden de 80 lps y se ubica en el Rancho Las Candelarias.

4.4.3 Unidad granular de permeabilidad baja.

Definida como una secuencia de rocas detríticas continentales, constituida por una alternancia de areniscas, limolitas, conglomerados y brechas sedimentaria, en algunos puntos como el Rancho La Belleza, intemperizan a color rojo, estando bien cementado por caliche. Esta unidad se localiza en una franja que va del lado oeste de la Sierra El Pajarito y parte del flanco noroeste de la Sierra de Mazatán (Tom Cgp). También incluye un conglomerado polimíctico semi compacto, mal clasificado, color café, constituido por fragmentos de caliza, volcánicas, andesitas, pedernal, metamórficos y con una matriz arcillosa (Tm Cgp-Ar). Se distribuye ampliamente en la región, encontrándose afloramientos por toda el área, su espesor se fue estimado en 200m.

Dada su composición y su material cementante, a esta unidad se define como una barrera natural para el flujo vertical, formando acuíferos colgados donde es sobreyacida por materiales granulares permeables. Geomorfológicamente forma lomeríos con pendientes suaves al pie de elevaciones mayores.

4.4.4 Unidad fracturada de permeabilidad alta.

La permeabilidad de los sistemas fisurados refleja la historia geológica de las rocas, especialmente las exposiciones a tensiones tectónicas. Los sistemas más jóvenes de fisuras de los últimos fenómenos tectónicos son a menudo más permeables que los más antiguas, las cuales tienden a ser rellenados por minerales secundarios.

En la zona de estudio la caliza de edad Paleozoico (PCz-Ar) constituye un importante afloramiento calcáreo situado en la mayor parte del área. Se considera que la permeabilidad de las calizas es alta dado la karstificación que presentan.

Por otra parte, el intenso fracturamiento de la unidad implica una infiltración de las aguas de precipitación y/o superficiales significativamente elevada.

4.4.5 Unidad fracturada de permeabilidad media.

Dentro de esta unidad están englobadas rocas de tipo volcánico. Habitualmente contienen fracturas que se originan a partir del enfriamiento de la lava, durante el flujo de lava se crean zonas fracturadas permeables que se extienden horizontalmente, tanto en superficie como en el fondo, estas se convierten generalmente en acuíferos importantes y se localizan en los extensos sistemas de flujo de lava de las mesetas basálticas (TmB).

Sin embargo, en el área se centran en la salida del acuífero con pequeños afloramientos de espesores del orden de 50 m a 80 m. Los aprovechamientos localizados en esta unidad presentan caudales de hasta 12 lps.

En esta unidad se localiza un manantial (El Venerito), cuyo caudal no es muy significativo (1 lps), sin embargo se mantiene constante a lo largo del año.

Dentro de este mismo grupo tenemos a las tobas riolíticas, traquita, andesita-dacita (TmTR-R), las cuales son explotadas principalmente en la parte sur del área (Rancho Las Calaveras), con gastos de 2 a 6 lps, en pozos profundos con niveles estáticos del orden de los 34m. Dentro de esta misma unidad se encuentran las andesitas del Cretácico superior (KsTeA-TA, KsTA-A).

Estas rocas están ampliamente distribuida en la zona y constituyen atractivas áreas de recarga debido a que presentan intenso fracturamiento y fallamiento. Por último, está presente la unidad que consiste en una alternancia de areniscas, limolitas y conglomerado del Triásico Superior (Trs Ar-Lm).

Su presencia en el área es pobre, sin embargo, se engloba dentro de la misma unidad de las rocas vulcano - sedimentarias del Cretácico y se establece que es de permeabilidad media en base a su fracturamiento.

4.4.6 Unidad fracturada de permeabilidad baja.

En la zona de estudio las rocas ígneas intrusivas están ampliamente distribuidas (KsTpa Gr-Gd, TeGr, pTmGr-Gn) y sobre las cuales descansan todo el conjunto permeable. Las rocas ígneas son permeables en las zonas donde las fisuras están abiertas, sin embargo ésta permeabilidad decrece con la profundidad. De este modo se encuentran emanaciones aisladas que se manifiestan principalmente durante las estaciones de lluvias y son drenadas a la escorrentía superficial, se evaporan o bien rellenan zonas deprimidas, fungiendo como zona de recarga para los acuíferos. Cabe mencionar que esta unidad opera como basamento hidrogeológico.

4.4.7 Zonas de Recarga y Descarga

Las zonas de recarga y descarga del Acuífero Santa Rosalía se definieron en base al análisis de la información obtenida durante la revisión geológica de campo y los cálculos de precipitación efectiva realizados en la zona de estudio.

Se definieron como zonas de recarga las áreas donde se identificaron las formaciones que presentaron mayor permeabilidad. Estas se localizan en el flanco sur de la Sierra de Mazatán donde afloran rocas calizas de permeabilidad alta.

También afloran en la parte sur de la Sierra El Pajarito al este de la localidad Pueblo de Álamos y al sur de Santa Rosalía, en un sistema de pequeños cerros, donde Cerros Prietos es la elevación topográfica más relevante. En ambas localidades, afloran ampliamente traquitas – andesitas de permeabilidad media.

Es importante señalar que las unidades fracturadas se localizan en donde fueron mayores los resultados obtenidos de precipitación efectiva.

La zona de descarga se localiza en el medio granular que se distribuye ampliamente en la zona de estudio. La mayor parte de los aprovechamientos que presentan gastos de extracción bajos, se localizan en el medio granular de permeabilidad media; cuya granulometría se compone principalmente de arcillas, arenas finas y gravas.

La unidad granular de permeabilidad alta se distribuye principalmente a lo largo del cauce del Arroyo La Junta y otros arroyos importantes de la zona. Estos depósitos están constituidos por gravas de taludes y abanicos aluviales. Los aprovechamientos que se localizan en esta unidad presentan gastos de hasta 80 lps. Además se identificaron dos manantiales ubicados en la parte oeste de la zona de estudio, específicamente en las localidades El Aguajito y Santa Rosalía, cuyos gastos son de 1 a 2 lps pero se mantienen constantes a lo largo del año.

4.5 Modelo conceptual del funcionamiento acuífero

El modelo conceptual propuesto para el Acuífero Santa Rosalía se realizó en base a la integración de la información geológica, hidrogeológica, interpretación de imágenes de satélite, magnetométricas y un estudio muy superficial de la hidrogeoquímica. considerando que estos factores son importantes rasgos indicadores del comportamiento hidrodinámico del acuífero.

De esta manera suponiendo que las condiciones hidrológicas a profundidad, tienen características similares en toda la zona de estudio; se propone la existencia de un sistema acuífero donde el agua circula y se almacena en dos medios (Figura 4.7); uno integrado por un sistema de unidades de tipo granular y otro por rocas fracturadas.

El primer medio presenta características heterogéneas y su granulometría varía desde gravas a arcillas, mientras que el segundo medio está formado por rocas carbonatadas recristalizadas, rocas andesíticas y rocas basálticas.

El basamento del acuífero esta constituido por un intrusivo granítico del Terciario el cual aflora ampliamente en la parte este de la zona de estudio. Su permeabilidad se considera de media a baja y no constituye una fuente de aporte importante en el sistema de recarga.

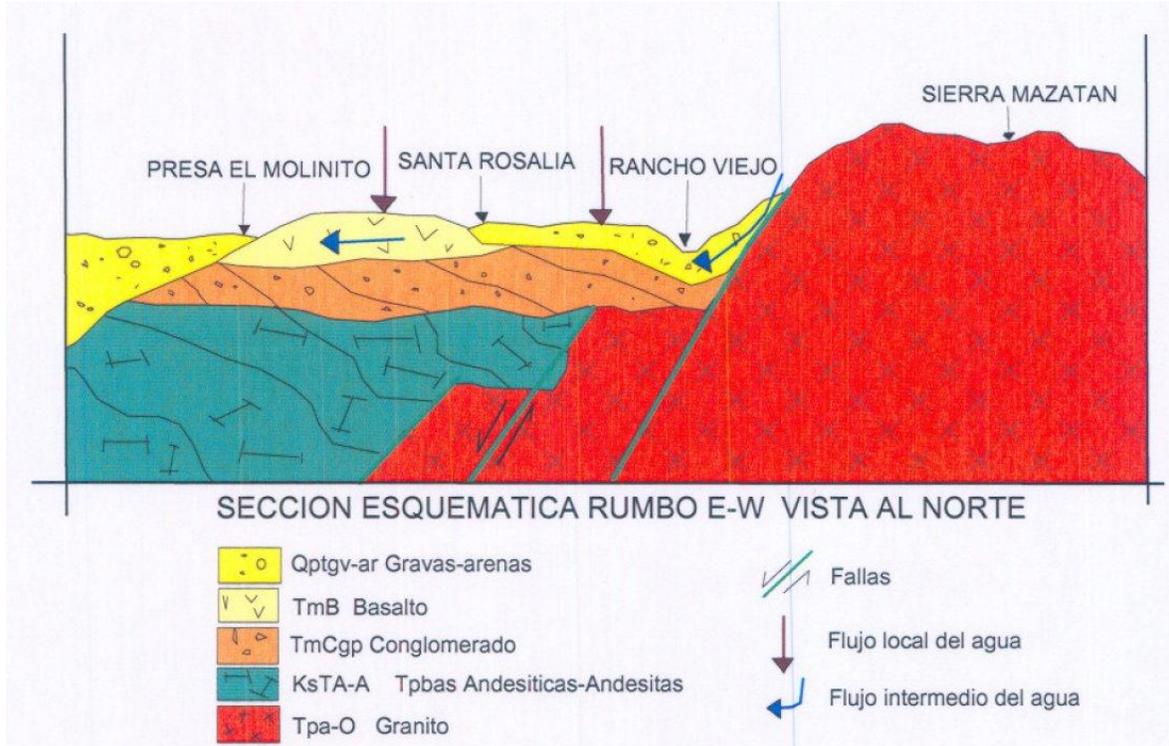


Figura 4.7 Esquema de funcionamiento acuífero

4.6 Geometría y tipo del funcionamiento acuífero

En base al análisis geohidrológico de la zona de estudio se propone la existencia de un acuífero libre en la parte litológica somera, cuyo espesor se estima entre 10 y 50 metros; a profundidad el acuífero tiene fenómenos locales de semiconfinamiento, es de amplia extensión y composición variable. Se estima que en algunas partes su espesor puede ser mayor a los 500m.

La existencia de dos medios de circulación del agua subterránea podría sugerir la existencia de dos acuíferos diferentes, sin embargo ambos sistemas se comunican por medio de estructuras geológicas (tipo fallas), aun cuando existen lentes granulares de baja permeabilidad, constituidos por conglomerados cementados con caliche, que actúan como capas semiconfinantes.

El funcionamiento hidráulico del acuífero no presenta variaciones significativas y conserva sus condiciones iniciales. Se infiere que la recarga natural no se ha sobrepasado respecto a los volúmenes de extracción, debido a que la dirección de flujo subterráneo sigue su tendencia original de forma paralela a la dirección preferente del Arroyo La Junta.

Las condiciones hidrodinámicas que imperan en un sistema acuífero son siempre condicionadas por el medio geológico que lo contiene, debido a que determina las zonas por las que circula el agua subterránea, controla las magnitudes y direcciones de flujo, así como el volumen y la distribución de agua almacenada.

En la Acuífero Santa Rosalía se tiene identificado un importante número de pequeñas fallas en las partes topográficas más altas de la zona. Además de dos sistemas de fallas, una denominada Falla El Pajarito, localizada en la sierra del mismo nombre y el sistema de fallas denominado Falla La Junta, la cual se localiza de forma paralela al arroyo del mismo nombre. Se considera que ambas son fuente de aporte a la recarga subterránea del sistema acuífero.

4.6.1 Condiciones de frontera

Las condiciones de frontera se identificaron tras el análisis de las secciones hidrogeológicas realizadas en base a la verificación geológica de campo, así como los límites naturales y administrativos que rigen en el Acuífero Santa Rosalía.

De este modo se definió como barrera de tipo horizontal a las capas semiconfinantes constituidas por los conglomerados polimícticos: Tm Cgp-Ar y Tom Cgp-Ar, el primero sobreyace las unidades fracturadas de permeabilidad media a alta; y además actúa como barrera vertical cuando aflora en los flancos de las sierras Mazatán y El Batamonte, en la parte central de la zona de estudio y

en los flancos del grupo de cerros que se ubican al suroeste de la localidad Santa Rosalía, la segunda unidad también actúa como barrera vertical cuando aflora en el flanco norte de la Sierra de Mazatán.

Para obtener información más amplia sobre las unidades, se recomienda consultar el apartado de geología.

A manera de frontera horizontal, el basamento geohidrológico está definido por el intrusivo granítico (KsTe Gr-Gd), el cual fue descrito en el apartado de geología y cuya morfología se muestra en las secciones geológicas elaboradas en el presente estudio.

De igual forma actúa como una frontera de tipo vertical entre el valle ubicado en la parte central de la zona de estudio y los pequeños valles donde se ubica Santa Rosa de Matape.

Esta condición podría sugerir que no existe comunicación entre las dos zonas mencionadas, sin embargo el agua subterránea circula a través de las discontinuidades generadas por el sistema estructural de la zona.

5 Hidrogeoquímica

En este capítulo se toma como referencia la Hidrogeoquímica del trabajo que realizó el Servicio Geológico Mexicano, el cual se llamó “Determinación de la Disponibilidad de Agua Subterránea en el Acuífero Santa Rosalía”; realizado en Diciembre del 2007.

A fin de definir la caracterización y comportamiento del agua superficial y subterránea en la zona de estudio, se buscó integrar toda la información relevante recopilada y analizada durante el desarrollo de este trabajo.

Se tomaron un total de 33 muestras a lo largo del Acuífero Santa Rosalía, estos corresponden a 16 norias, 1 presa, 2 manantiales y 14 pozos.

En prácticamente todos los casos las muestras se tomaron de la descarga directa.

En la Figura 5.1 se localizan los aprovechamientos muestreados en la zona de estudio, donde cada punto corresponde a un aprovechamiento con muestra de agua analizada.

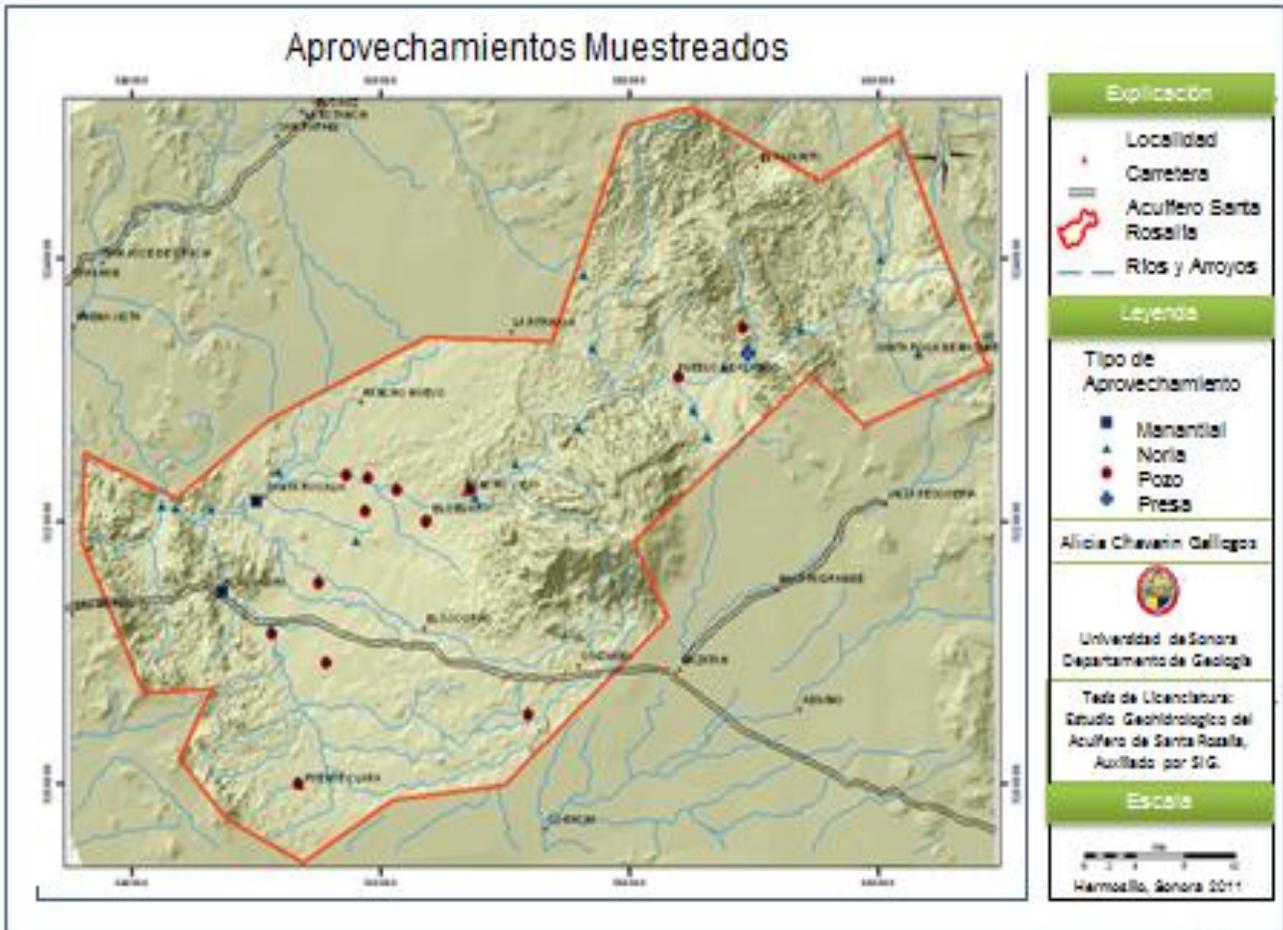


Figura 5.1 Distribución de muestras de agua subterránea.

La medición de diversos parámetros físicos del agua in situ, tales como: potencial de hidrógeno (pH), potencial de óxido reducción (Eh), conductividad eléctrica (CE), temperatura, sólidos totales disueltos (STD) y salinidad, se realizó en campo. Las muestras se enviaron a laboratorios para su análisis, donde se determinaron los parámetros de los Iones mayores y de Metales.

En la Hidrogeoquímica las reacciones químicas de interacción agua-acuífero son función de la temperatura, de manera general los rangos de temperatura se encuentran entre los 19 y los 31.5 °C, siendo el valor promedio 25 °C para todos

los valores de temperatura registrados; las temperaturas tienden a ser uniformes a lo largo de la zona de estudio.

El potencial de hidrógeno (PH) en el Acuífero Santa Rosalía; los valores están en su gran mayoría, cercanos a la neutralidad, teniéndose como valor máximo 8.55 y mínimo 6.5, observándose valores promedio de 7.35.

La Conductividad Eléctrica (CE) la mayor parte de los aprovechamientos presentaron valores bajos de CE, resultando como valor máximo los 1264 $\mu\text{mohs/cm}$ y del orden de los 265 $\mu\text{mohs/cm}$ el más bajo, teniéndose como promedio 675 $\mu\text{mohs/cm}$, lo cual, al igual que el comportamiento del pH, indica la presencia en la zona de agua de reciente infiltración.

Los Iones Mayores son aquellos con mayor presencia en la generalidad de las aguas subterráneas y que permiten caracterizarlas, clasificarlas por familias y estimar los riesgos a la salud en base en sus concentraciones. Los iones negativos (o aniones) más abundantes son cloruros, sulfatos, carbonatos, bicarbonatos y nitratos. Los iones positivos o cationes más comunes en las aguas subterráneas son Ca, Mg, Na y K.

Concentraciones de iones mayores indican que la mayor parte del agua subterránea del Acuífero Santa Rosalía está relacionada a precipitaciones pluviales recientes, además de altas tasas de infiltración y por ende buena calidad del agua. Lo anterior con excepción de aprovechamientos con condiciones hidráulicas y geológicas distintas, donde se hace una mezcla de agua reciente con agua de mayor tiempo de residencia en el acuífero y por o tanto se incrementan las concentraciones de elementos.

Además de los iones mayores, se analizaron la presencia de Metales; donde se analizaron veintiún elementos adicionales que corresponden a los

Metales Pesados y algunos iones. De estos se encontró una presencia significativa sólo en solo cinco casos: Al, As, Ba, Fe y Mn.

El riesgo por Adsorción de Sodio (RAS); determina el uso que se le da al agua del Acuífero Santa Rosalía; Aun cuando la agricultura ocupa cerca del 9% de el uso total que se le da al acuífero, este porcentaje abarca aproximadamente el 40% del volumen de extracción anual estimado.

Por esta razón se realizaron los cálculos necesarios para estimar el Riesgo por Adsorción de Sodio (RAS), para estimar el impacto de salinización del suelo.

La estimación del RAS se lleva a cabo mediante la siguiente ecuación:

$$RAS = \frac{Na}{\sqrt{\frac{Ca + Mg}{2}}} \text{ (en meq/l)}$$

Dentro de las 33 muestras obtenidas solo cuatro se realizaron en aprovechamientos de uso agrícola y de estas solo la muestra 24 presenta un valor elevado de RAS, sin embargo, debido a la Conductividad Eléctrica reportada, no representa peligro por adsorción de sodio y salinización considerando los rangos de valores obtenidos mediante el grafico de clasificación de (Wilcox).

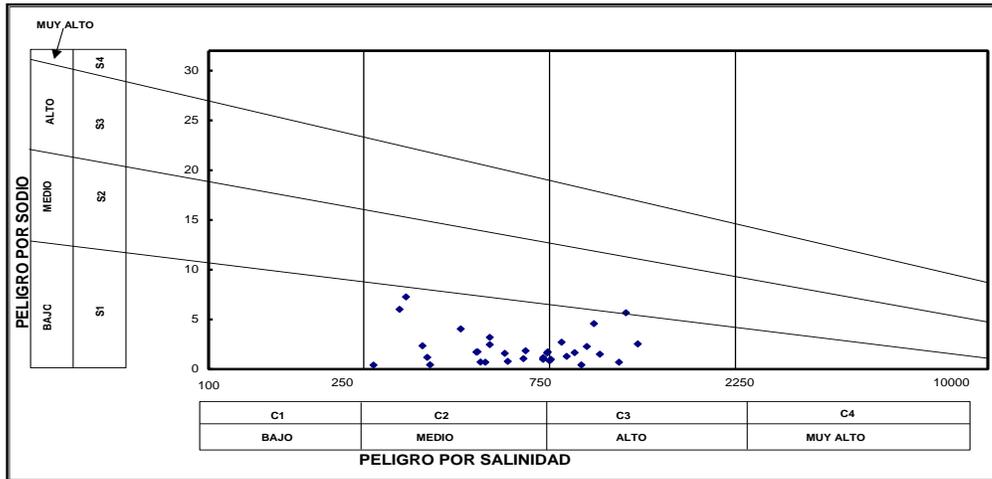


Figura 5.2 Diagrama de clasificación de Wilcox.

Figura 5.3 Variables de Salinidad (C) y peligro por Sodio (S)

C1	Agua de baja salinidad. Puede utilizarse para la mayor parte de los cultivos en casi todos los tipos de suelos con muy poco riesgo de que desarrolle salinidad. Es preciso algún lavado, que se logra normalmente con el riego, excepto en suelos de muy baja permeabilidad
C2	Agua de salinidad media. Puede utilizarse con un grado moderado de lavado. Sin excesivo control de la salinidad se pueden cultivar, en la mayoría de los casos, las plantas moderadamente tolerantes a las sales.
C3	Agua altamente salina. No puede utilizarse en suelos con drenaje deficiente. Selección de plantas muy tolerantes a las sales y posibilidad del control de la salinidad del suelo, aún con drenaje adecuado.
C4	Agua muy altamente salina. No es apropiada en condiciones ordinarias para el riego. Puede utilizarse con una selección de cultivos en suelos permeables, en buen drenaje y con exceso de agua para lograr un buen lavado.

S1	Agua baja en sodio. Puede utilizarse en la mayoría de los suelos con escasas posibilidades de alcanzar elevadas concentraciones de sodio intercambiable
S2	Agua media en sodio. Puede utilizarse en suelos orgánicos o de textura gruesa con buena permeabilidad.
S3	Agua alta en sodio. Puede producir niveles peligrosos de sodio intercambiable, debe usarse en suelos con mantenimiento especial, buen drenaje, alta lixiviación y abono orgánico.
S4	Agua extremadamente alta en sodio. Daño severo en suelos y cultivos

El resultado de Familias de Agua como resultado se obtuvieron siete familias:

- 1) Bicarbonatada-cálcica
- 2) Bicarbonatada-mixta
- 3) Bicarbonatada-sódica
- 4) Mixta-cálcica
- 5) mixta-mixta
- 6) Sulfatada-cálcica
- 7) Sulfatada-sódica

La distribución de las familias de agua no es uniforme y no se aprecia una tendencia clara, lo que podría sugerir la etapa inicial del proceso de evolución geoquímica y en consecuencia que se trata de agua subterránea con tiempo de permanencia en el subsuelo relativamente cortos.

Al igual que las concentraciones de iones mayores, en metales pesados también sugieren la presencia, en su mayoría, de agua de reciente infiltración, misma que no ha circulado lo suficiente para interactuar con el medio geológico y así obtener una firma distintiva en base a su composición.

Sin embargo, existen aprovechamientos que no marcan una tendencia en el acuífero, pero que si evidencia de mezcla de agua reciente con agua de mayor tránsito, lo anterior evidenciado por la presencia de algunos metales pesados.

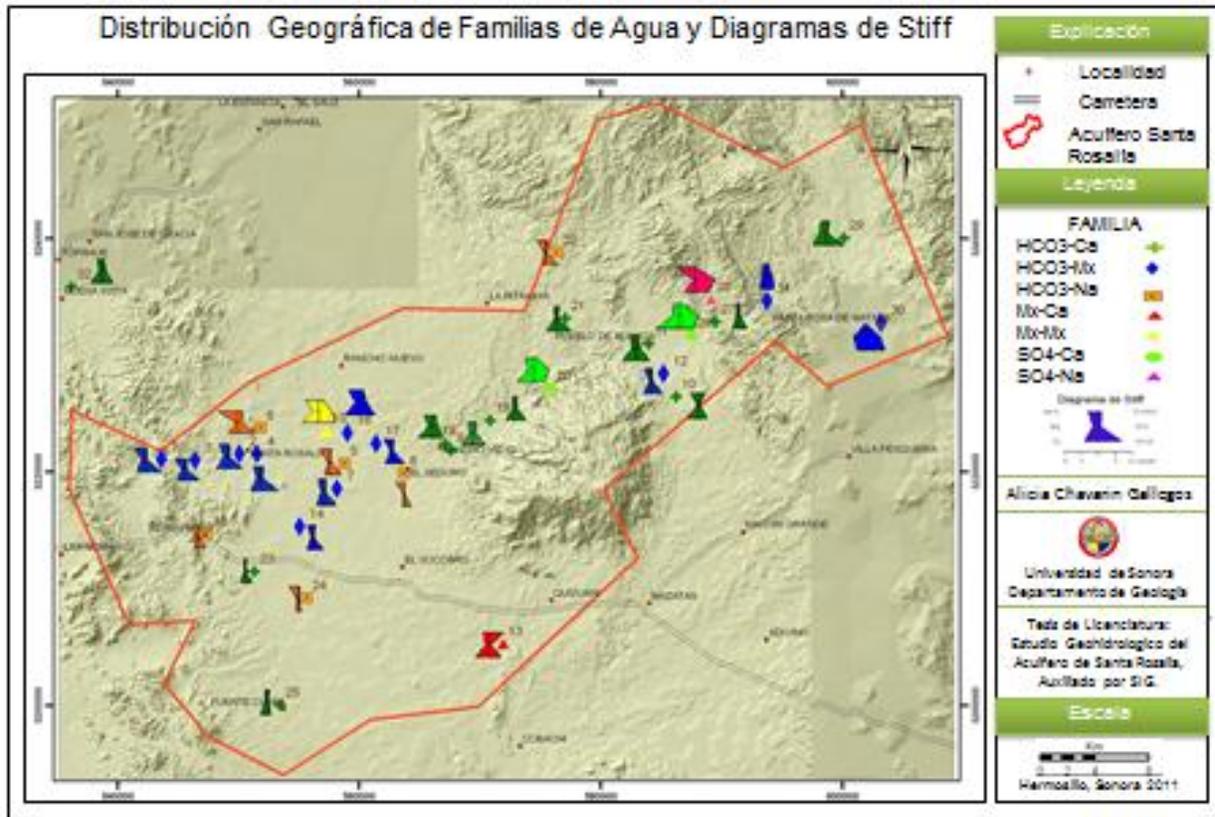


Figura 5.4 Distribución geográfica de familias de agua

6 Balance de aguas subterráneas

En este apartado se describe el cálculo del balance de agua subterránea, la cual se determina la relación que existe entre la recarga y descarga de un acuífero o unidad hidrológica en un intervalo de tiempo dado. El Área de balance considerada en el presente trabajo es de 613 Km². La cual corresponde a la zona de valle que y cuyos límites se definen en la Figura 6.1.

En su forma más simple está representado por la siguiente ecuación:

RECARGA TOTAL (Suma de Entradas)	=	CAMBIO DE ALMACENAMIENTO DE LA UNIDAD HIDROGEOLÓGICA	+	DESCARGA TOTAL (Suma de Salidas)
--	----------	---	----------	--

Para fines prácticos la expresión referida se desarrolló de la siguiente forma:

$$E - S = \pm \Delta V * S$$

Donde:

E = Entradas totales

$\pm \Delta V$ = Cambio de Almacenamiento

S = Salidas totales

S = Coeficiente de Almacenamiento

Para este caso, la ecuación de balance planteada es:

$$E_h + R_i + R_v + R_f + I_{fm} - S_h - B - D_r = \Delta V * s$$

Donde:

E_h= Entradas Horizontales

I_{fm}= Infiltración por Frente de Montaña¹

R_i= Recarga Inducida

S_h= Salidas Horizontales

R_v= Recarga Vertical

B= Bombeo

R_f= Retorno por fugas

D_r= Descarga por ríos

6.1 Entradas

Representa la sumatoria de entradas de agua, ya sean naturales o inducidas, al sistema acuífero, en este caso se trata de la recarga natural, retorno de riego agrícola y entradas horizontales. Dependiendo de las condiciones del acuífero en estudio se consideran otro tipo de entradas, tal es el caso del retorno por fugas. Esta recarga no aplica en la región debido a que no existen asentamientos humanos importantes.

6.1.1 Recarga Vertical (Rv)

Es el agua de lluvia que se infiltra al subsuelo de manera vertical. De la ecuación de balance es la variable que genera mayor certidumbre, por lo cual es recomendable utilizarla como incógnita y que su valor se obtenga despejándola de la ecuación.

$$Eh + Rr + Rv + Rf + Ifm - Sh - B - ETR - Dr = \Delta V * s$$

Donde:

Eh= Entradas Horizontales

Ifm= Infiltración por Frente de Montaña

Ri= Recarga Inducida

Sh= Salidas Horizontales

Rv= Recarga Vertical

B= Bombeo

Rf= Retorno por fugas

Dr= Descarga por ríos

Ev= Descarga por evaporación

Para el Acuífero Santa Rosalía hay variables que no aplican, tal es el caso de Retorno por fugas (Rf), debido a que no hay comunidades importantes, Infiltración por frente de montaña (Ifm), debido a que se tiene un buen control piezométrico, y Descarga por ríos (Dr), debido a que no hay ríos en la zona, de tal forma que la ecuación queda de la siguiente manera:

$$Eh + Rr + Rv - B - Sh - ETR = \Delta V * s$$

6.1.3 Flujo subterráneo horizontal

El volumen de recarga por entradas horizontales se calculó mediante celdas de flujo, para lo cual se tomó como base las curvas de igual elevación de nivel estático determinándose varias zonas de recarga natural al noreste y sur de la zona de balance. Fueron generadas dos zonas de celdas (zona noreste y zona sur), mismas que se observan en la Figura 6.2, donde fueron utilizados distintos valores de transmisividad; de 100 a 200 m²/día (0.0011 a 0.0023 m²/seg), para la zona noreste, a la vez que se utilizó la misma variación en los valores de la zona sur.

Lo anterior en función de la presencia de material fino, cercanía con zonas rocosas de permeabilidades bajas, espesor saturado, entre otros. Cabe mencionar que fueron utilizados valores conservadores de transividad (valores de abatimiento, ver capítulo seis) con el fin de no sobreestimar las entradas por flujo subterráneo horizontal, estos valores se justifican debido a la presencia de material fino (principalmente arcillas).

De los resultados de la interpretación de pruebas de bombeo, se observaron valores mínimos de 28 m²/día y máximos de 1,105 m²/día, con un promedio de 380 m²/día para el sistema acuífero. Cabe mencionar que valores utilizados en el balance de aguas subterráneas fueron adecuados dependiendo de las particularidades litológicas de cada zona de entrada o salida, es decir, se consideró un posible espesor granular, cercanía con la zona de material fracturado, material geológico que aflora, entre otros.

Las celdas utilizadas se muestran en la figura antes referida y el cálculo de volúmenes de entrada se puede consultar en la Tabla 6.1.

A fin de conocer particularidades sobre los aprovechamientos y pruebas de bombeo referidas en este apartado, se recomienda consultar el anexo II correspondiente a pruebas de bombeo.

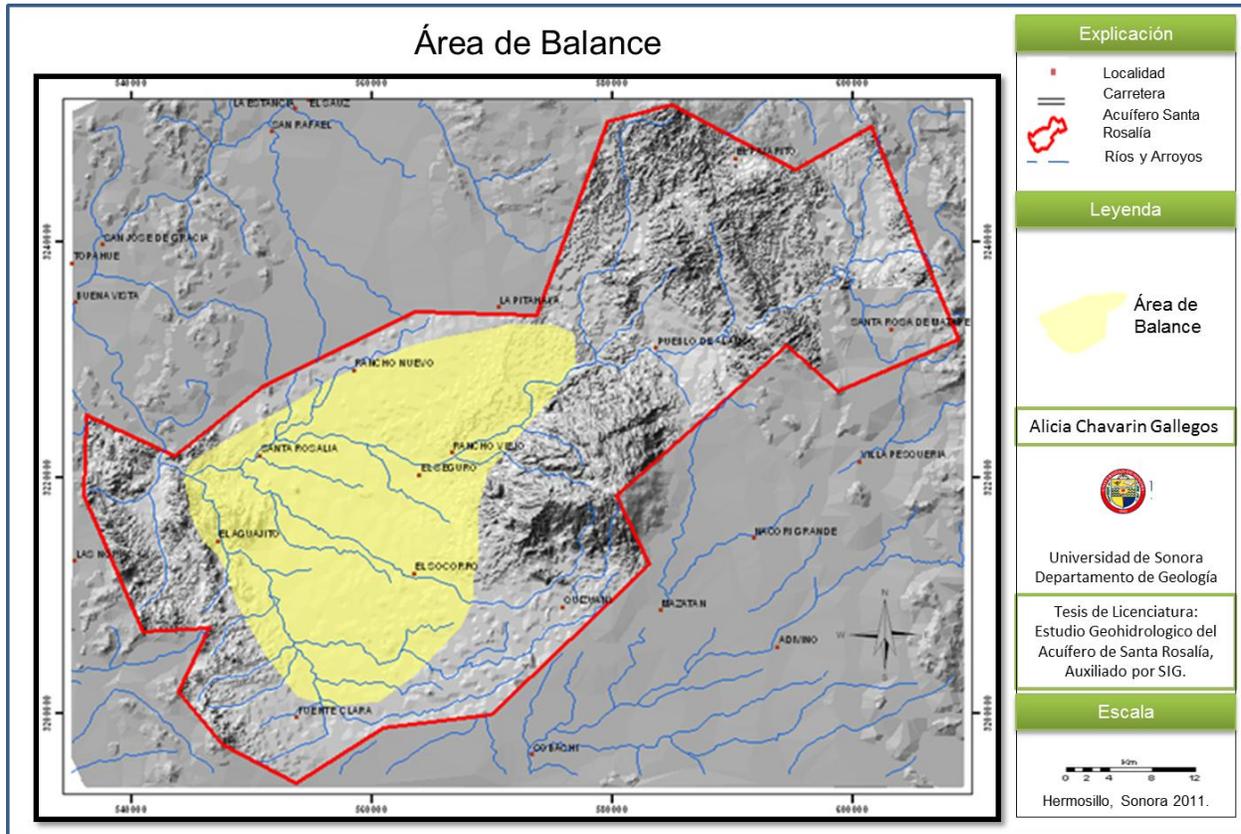


Figura 6.2 Celdas de flujo para el cálculo de entradas y salidas horizontales.

Tabla 6.1 Cálculo de entradas horizontales

ZONA NORTE							
CANAL	LONGITUD L (m)	ANCHO B (m)	h_2-h_1 (m)	Gradiente i (m)	T (m^2/s)	CAUDAL Q (m^3/s)	VOLUMEN ($hm^3/año$)
E1	2360	4252	20	0.0047	0.0011	0.0122	0.4
E2	2668	2544	20	0.0079	0.0017	0.0357	1.1
E3	2276	1837	20	0.0109	0.0017	0.0421	1.3
						Subtotal entradas	2.8
ZONA SUR							
CANAL	LONGITUD L (m)	ANCHO B (m)	h_2-h_1 (m)	Gradiente i (m)	T (m^2/s)	CAUDAL Q (m^3/s)	VOLUMEN ($hm^3/año$)
E4	2716.17	1462.01	20	0.0137	0.0011	0.0409	1.3
E5	3039.67	1620.14	20	0.0123	0.0017	0.0638	2.0
E6	1987.86	2991.08	20	0.0067	0.0017	0.0226	0.7
E7	3704.33	1798.36	20	0.0111	0.0017	0.0700	2.2
E8	3114.49	1852.33	20	0.0108	0.0023	0.0773	2.4
E9	3676.55	1567.56	20	0.0128	0.0017	0.0797	2.5
E10	2718.31	1250.51	20	0.0160	0.0011	0.0478	1.5
E11	2408.5	1033.36	20	0.0194	0.0011	0.0513	1.6
E12	1774.53	941	20	0.0213	0.0011	0.0415	1.3
						Subtotal entradas	15.6

Como resultado del análisis de celdas de flujo se obtuvo un valor de 18.4 Hm³/año que representa las entradas horizontales a la zona de influencia del balance de aguas subterráneas (zona de valle).

6.2 Salidas

Se trata de los volúmenes de agua, ya sean naturales o extraídos, que pierde el sistema acuífero. De manera particular se refiere a evapotranspiración, descargas naturales, bombeo, flujo subterráneo horizontal y descarga por ríos. En el caso del Acuífero Santa Rosalía no aplica la descarga por ríos ya no existen estaciones hidrométricas ni caudales base.

6.2.1 Descarga por Evaporación (Ev)

Debido a que en la zona de estudio el mayor potencial del acuífero se encuentra por debajo de 10 m del terreno natural, para el desarrollo del balance la evapotranspiración se considera despreciable.

6.2.2 Descargas naturales (manantiales, caudal base de ríos).

La descarga natural de un acuífero se lleva a cabo de distintas maneras, la principal a través de salidas horizontales (tema que será tratado en el siguiente apartado), descarga por influencia de manantiales (el cual no aplica en la zona de estudio) y caudal base de ríos. En la zona de estudio no existen manantiales.

6.2.3 Bombeo

Representa normalmente el volumen mayoritario de las descargas del acuífero y se encuentra constituido por la suma de los volúmenes de agua que se extrae del subsuelo para satisfacer las demandas de los diversos sectores productivos de la zona.

En el Registro Público de Derechos de agua se tiene concesionado un volumen de bombeo de 8.00 Hm³/año.

En base a la campaña de hidrometría fue estimado un volumen de extracción del orden de 10.41 Hm³/año.

6.2.4 Flujo subterráneo horizontal (Sh)

El volumen de descargas a través de flujos subterráneos horizontales, al igual que las entradas del mismo tipo, fue estimado mediante celdas de flujo (Tabla 6.2), para lo cual se tomó como base las curvas de igual elevación de nivel estático determinándose una zona de descarga natural en el extremo poniente de la zona de balance (Figura 6.2). Se generó una zona de celdas (zona poniente), misma que se observan en la Figura 5.2, donde fue utilizado un valor de transmisividad de 200 m²/día (0.0023 m²/seg), lo anterior debido a la predominancia de material medio y la poca influencia del conglomerado consolidado del Mioceno. Cabe mencionar que fueron utilizados valores conservadores de transmisividad (valores de abatimiento, ver capítulo seis) con el fin de no sobreestimar las salidas por flujo subterráneo horizontal, estos valores se justifican debido a la presencia de material fino (principalmente arcillas) y por la fuerte presencia del conglomerado Báucarit que opera en la zona como confinante y semiconfinante.

Tabla 6.2 Cálculo de salidas horizontales

ZONA PONIENTE							
CANAL	LONGITUD L	ANCHO B	h_2-h_1	Gradiente i	T	CAUDAL Q	VOLUMEN
	(m)	(m)	(m)	(m)	(m ² /s)	(m ³ /s)	(hm ³ /año)
E13	4375.83	1260.32	20	0.0159	0.0023	0.1597	5.0
E14	1680.76	1206.29	20	0.0166	0.0023	0.0641	2.0
E15	2233.00	1567.13	20	0.0128	0.0023	0.0655	2.1
E16	3213.00	2559	20	0.0078	0.0023	0.0578	1.8
						Total salidas	10.9

Como resultado del análisis de celdas de flujo se obtuvo un valor de 10.9 Hm³/año que representa las salidas horizontales en la zona de influencia del balance de aguas subterráneas (zona de valle). La infiltración se considera de la recarga vertical.

6.3 Cambio de almacenamiento

Debido a que en el Acuífero Santa Rosalía se tienen abatimientos y recuperaciones puntuales, además de que no hay información piezométrica histórica que refleje un comportamiento general del acuífero y dado que no existen variaciones significativas en la posición de los niveles del agua subterránea, se consideró un $\Delta V(S) = 0$.

6.4 Solución a la ecuación de balance

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

$$E_h + R_r + R_v + R_f + I_{fm} - S_h - B - ETR - D_r = \Delta V^*s$$

$$E_h + R_r + R_v - B - S_h - ETR = \Delta V^*s$$

$$R_v = (B + S_h) - (V(S)) - (E_h + R_i)$$

Sustituyendo valores:

$$R_v = 10.4 + 10.9 - 0.0 - (18.4 + 0.834)$$

$$R_v = 2.0 \text{ Hm}^3/\text{año}$$

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

$$R_t = 2.0 + 18.4 + 0.834$$

$$R_t = 21.3 \text{ Hm}^3 \text{ anuales}$$

7 Conclusiones y Recomendaciones

7.1 Conclusiones

En base al análisis climatológico se estimó una temperatura media anual de 22°C, a la vez que la precipitación media anual es del orden de 450 mm, mientras que la evapotranspiración media anual estimada fue de 415.9 mm.

En el área afloran rocas sedimentarias, ígneas y metamórficas, cuyas edades van desde el Precámbrico al Reciente. Con permeabilidades altas afloran rocas calcáreas paleozóicas, derrames de tobas riolíticas, ignimbritas y andesitas del terciario, además de basaltos que forman pequeñas mesetas. Mientras que rocas conglomeráticas del Mioceno funcionan como capa confinante o semiconfinante, a la vez que material intrusivo del Cretácico opera como basamento hidrogeológico.

Referente al censo existen 165 aprovechamientos hidráulicos, de los cuales el 75% se encuentran activos. De manera particular fueron identificados 120 norias, 42 pozos, 2 manantiales.

En base a la campaña de se estimó una extracción total anual de agua subterránea de 10.47 Hm³. Cabe mencionar que volúmenes de extracción mayores se localizan en aprovechamientos ubicados cerca del cauce del Arroyo La Junta.

En la mayor parte del área de estudio se identificaron niveles estáticos que fluctúan entre 5 y 20m, se trata de aprovechamientos recargados por infiltraciones en épocas de lluvia. Niveles estáticos más profundos (mayores a 20 m), se localizan en la parte suroeste del acuífero, siendo el nivel más profundo 52.40 m.

Elevaciones máximas de nivel estático se ubican al noreste del acuífero, presentando valores que van de los 500 a 900 msnm en las localidades Pueblo de

Álamos, Santa Rosa Matape y El Pajarito. Mientras que en la parte suroeste del acuífero, en las localidades Rancho Viejo, El Seguro y Santa Rosalía, se encuentran elevaciones mínimas que fluctúan entre 340 y 500 msnm.

En base al comportamiento de flujo de elevación de nivel estático, se determinó que direcciones preferentes de flujo subterráneo tienen una dirección preferente paralela al cauce del Arroyo La Junta. Se infiere que el bombeo de agua subterránea no ha provocado cambios en la dirección de flujo preferente, ya que no se aprecian conos de abatimiento.

Referente a parámetros hidráulicos, concretamente a conductividad hidráulica se establece que en la etapa de abatimiento se presentan valores mínimos del orden de 4.60×10^{-6} m/s, mientras que valores máximos están representados por 1.32×10^{-3} m/s, con un promedio general de 3.79×10^{-4} m/s. En cambio durante la etapa de recuperación el valor de conductividad hidráulica mínimo fue de 6.03×10^{-7} m/s, el máximo de 3.39×10^{-3} y en promedio 5.09×10^{-4} m/s.

Para transmisividad los resultados obtenidos en la interpretación de la etapa de abatimiento varían de 3.22×10^{-4} a 1.28×10^{-2} m²/s, siendo el valor medio para el acuífero 4.46×10^{-3} m²/s, mientras que en la interpretación de recuperación se obtuvo como valor mínimo 4.59×10^{-5} m²/s, un máximo de 2.71×10^{-2} m²/s y 6.95×10^{-3} m²/s como promedio.

En el Acuífero Santa Rosalía se identificaron varias zonas de recarga una de las principales NE; una al noroeste la cual representa flujos intermedios infiltrados en la zona serrana, en manantiales fracturados con permeabilidades que varían de media a baja. Otra zona de recarga es al Sureste, en materiales granulares con permeabilidad de media a alta.

Entre las más importantes y que están directamente relacionada al comportamiento del acuífero, ocurren a través de varias unidades litológicas; rocas

calcáreas del paleozoico, riolitas terciarias, andesitas y tobas andesíticas de edad cretácica.

De igual forma actuando como importante zona de recarga actúa el material granular de permeabilidad alta, mismo que se distribuye principalmente a lo largo del cauce del Arroyo La Junta y otros arroyos importantes de la zona. Aprovechamientos que se localizan en esta unidad pueden presentar gastos de hasta 80 lps.

Se propone la existencia de un sistema acuífero donde el agua circula por dos medios, uno integrado por unidades de tipo granular y otro por rocas fracturadas; el primero tiene características heterogéneas y su granulometría varía desde gravas a arcillas, mientras que el segundo medio está formado por rocas volcánicas de composición calcárea, riolítica y andesítica.

El basamento hidrológico está constituido por rocas intrusivas del Cretácico, afloran en gran parte del acuífero. Desde el punto de vista hidrogeoquímico la zona de estudio tiene una buena calidad en cuanto a consumo humano se refiere. Concentraciones altas de elementos anómalos se encuentran dispersos a lo largo de la zona de estudio, salvo el aprovechamiento de uso pecuario muestreado en Santa Rosalía, el cual rebasa Na, Fe, Al y Mn.

Se identificaron siete tipos de familias de agua subterránea utilizando el criterio del ión dominante. La familia de agua predominante en la zona de estudio es la del tipo Bicarbonatada en un 85% de las muestras: Bicarbonatada-Cálcica (33%), Bicarbonatada-Mixta (33%) y Bicarbonatada-Sódica (18%). Otras familias presentes en la zona son Mixta-Cálcica, Mixta-Mixta, Sulfatada-Cálcica y Sulfatada-Sódica.

Las familias se encuentran dispersas en la zona de estudio y no se aprecia una tendencia específica, este comportamiento indica que el agua subterránea del Acuífero Santa Rosalía, en su mayoría, se encuentra en la fase temprana de evolución geoquímica.

7.2 Recomendaciones

Utilizar métodos geofísicos que corroboren, o en su caso modifiquen, el modelo conceptual de funcionamiento acuífero propuesto en este estudio.

Regular y supervisar la perforación de nuevos pozos en la zona, además de volúmenes de extracción de agua subterránea con referencia en volúmenes concesionados en el REPDA.

Instalación de medidores de flujo en los pozos para estimar con mayor precisión el caudal anual extraído, asimismo, instalar poliductos en pozos a fin de que faciliten su control piezométrico.

Establecer programas para mejorar y mantener las condiciones de infraestructura y electromecánicas de los aprovechamientos con el fin de optimizar la eficiencia en el riego y en el consumo humano.

Elaborar y monitorear al menos en dos ocasiones por año una red de monitoreo de los aprovechamientos para definir las evoluciones del nivel estático respecto al tiempo.

Implementar una campaña de análisis físico-químicos en años próximos y de preferencia en los mismos aprovechamientos que se muestrearon en este trabajo, lo anterior con el fin de determinar una posible evolución o estabilidad de iones mayores y metales pesados.

Actualizar el conocimiento hidrogeológico del acuífero con miras a establecer evolución de niveles piezométricos y aplicarlos a la ecuación de balance de aguas subterráneas.

Realizar estudios de factibilidad para perforar aprovechamientos hidráulicos con fines de suministro de agua potable a la Capital del Estado de Sonora, lo anterior aprovechando la construcción y operación del acueducto Presa El Molinito – Hermosillo.

8 Bibliografía Consultada

- Alencaster F. G., 1961, Estratigrafía del Triásico Superior de la parte central del Estado de Sonora: Univ. Nal. De Mex., Inst. Geol., Paleontología Mexicana, N° 11, p. 1- 18.
- Arámbula, M. D. A., Palomino M. J. C., 1991, (Universidad de Sonora) Tesis profesional titulada Panorama Geohidrológico del Estado de Sonora.
- Bartolini C. M., M., Damon P., Shafiqullah M., 1992. K-Ar Age of tilted Tertiary volcanics rocks associated with continental conglomerates, Sonoran Basin And Range Province, Mexico; Geol, Soc. Amer. Abstracts with programs, V. 24, n° 5. p. 6.
- Comisión Nacional del Agua, 1998, Estudio Geohidrológico para Establecer Zonas Acuíferas de Reserva para el Abastecimiento de Agua Potable de la Cd. de Hermosillo, Sonora.
- Consejo de Recursos Minerales, textos guía de la Carta Magnética Sierra Libre H12-11 y Hermosillo H12-8, Escala 1:250,000.
- Damon, P. E. *et al.*, 1983, (Universidad de Sonora-Instituto de Geología UNAM) El Batolito Laramide (90-40 M. a.) de Sonora.
- Domenico, P.A. and Schwartz, F.W., 1988. Physical and Chemical Hydrogeology. New York; Wiley.
- Extractor Rápido de Información Climatológica (ERIC), editado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Morelos, México.
- García, E. 1981. Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Koppen. México, D.F.
- NORMA Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000, Conservación del recurso agua- Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales.
- NORMA Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000, bienes y servicios, agua purificada envasada, especificaciones sanitarias.
- Raisz, E., 1964, *Landforms of Mexico(Plano 1:3,000,000)*: Prepared for the Geography Branch of the Office of Naval Research, Second Edition.
-

Roldán Q. J., Solano R. B., 1978, Contribución a la Estratigrafía de las Rocas Volcánicas del Estado de Sonora: Universidad de Sonora, Departamento de Geología. Boletín, V. 1, N° 1.

Secretaria de Agricultura y Recursos Hidráulicos, 1979, Servicios de Prospección y Levantamientos Geológicos y Geofísicos en las Zonas de Mazatán y La Colorada, Estado de Sonora.

Actualización del Estudio geohidrológico de las Subcuencas los Ríos Sonora, Zanjón, San Miguel, Mesa del Seri, La victoria y Cuenca Bacoachito. Universidad de Sonora, 2005.

Waterloo Hydrogeologic, Inc. 2002. Aquifer Test 3.5, User's Manual, Advanced Pumping Test & Slug Test Analysis Software. Waterloo, Ontario, Canada.

Wilson I. F., Rocha U. S., 1946, Los Yacimientos de Carbón de la Región de Santa Clara, Municipio de San Javier, Estado de Sonora. Com. Direct. Invest. Rec. Miner. (México) Bol. 9. p. 108.

Dumble, E.T., 1900, Notes on the geology of Sonora, Mexico: American Institute of Mining Engineers, Transactions, v. 29,
