

SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUA EN EL ACUÍFERO SAN BERNARDO (2658), ESTADO DE SONORA

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1 GENERALIDADES	2
Antecedentes.....	2
1.1 Localización	3
1.2 Situación administrativa del acuífero	5
2 ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD	6
3 FISIOGRAFÍA.....	7
3.1 Provincia fisiográfica.....	7
3.2 Clima.....	8
3.3 Hidrografía	10
3.4 Geomorfología.....	12
4 GEOLOGÍA.....	13
4.1 Estratigrafía.....	14
4.2 Geología estructural	16
4.3. Geología del subsuelo	18
5 HIDROGEOLOGÍA.....	19
5.1 Tipo de Acuífero.....	19
5.2 Parámetros hidráulicos.....	22
5.3 Piezometría.....	23
5.4 Comportamiento hidráulico.....	24
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea	26
6 CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA.....	29
7 BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	31
7.1 Salidas	32
7.1.1 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh).....	32
7.1.2 Bombeo (B)	32
7.1.3 Evapotranspiración (ETR)	32
7.2 Cambio de almacenamiento	34
7.3 Entradas.....	34
7.3.1 Flujo subterráneo horizontal (Sh).....	34
8 DISPONIBILIDAD.....	35
8.1. Recarga total media anual	36
8.2. Descarga natural comprometida.....	36
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)	36
8.4. Disponibilidad de aguas subterráneas.....	36
9 BIBLIOGRAFÍA.....	38

1 GENERALIDADES

Antecedentes

La Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento (LAN) contemplan que la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) debe publicar en el Diario Oficial de la Federación (DOF), la disponibilidad de las aguas nacionales, por acuífero en el caso de las aguas subterráneas, de acuerdo con los estudios técnicos correspondientes y conforme a los lineamientos que considera la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000 que establece el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales”.

Esta norma ha sido preparada por un grupo de especialistas provenientes de la iniciativa privada, instituciones académicas, asociaciones de profesionales, organismos de los gobiernos de los estados y municipios, y de la CONAGUA.

El método que establece la NOM indica que para calcular la disponibilidad de aguas subterráneas deberá de realizarse un balance de las mismas, donde se defina de manera precisa la recarga de los acuíferos, y de ésta deducir los volúmenes comprometidos con otros acuíferos, la demanda de los ecosistemas y los usuarios registrados con derechos vigentes en el Registro Público de Derechos del Agua (REPDA).

El cálculo de la disponibilidad obtenida permitirá una mejor administración del recurso hídrico subterráneo ya que el otorgamiento de nuevas concesiones sólo podrá efectuarse en acuíferos con disponibilidad de agua subterránea. Los datos técnicos que se publiquen deberán estar respaldados por un documento en el que se sintetice la información necesaria, en donde quede claramente especificado el balance de aguas subterráneas y la disponibilidad de agua subterránea susceptible de concesionar, considerando los volúmenes comprometidos con otros acuíferos, la demanda de los ecosistemas y los usuarios registrados con derechos vigentes en el REPDA.

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

1.1 Localización

El acuífero San Bernardo, definido con la clave 2658 por la Comisión Nacional del Agua es una de las más grandes de la región sur del Estado de Sonora, sus dimensiones son propiamente las de la subcuenca del mismo nombre con una superficie de 9,674 km². De esta área, la mayor extensión se encuentra en el Estado de Chihuahua que corresponde con la porción E-NE de la cuenca (figura No. 1).

La subcuenca San Bernardo es considerada administrativamente por la Región Noroeste de la Comisión Nacional del Agua como acuífero San Bernardo con la clave 2658.

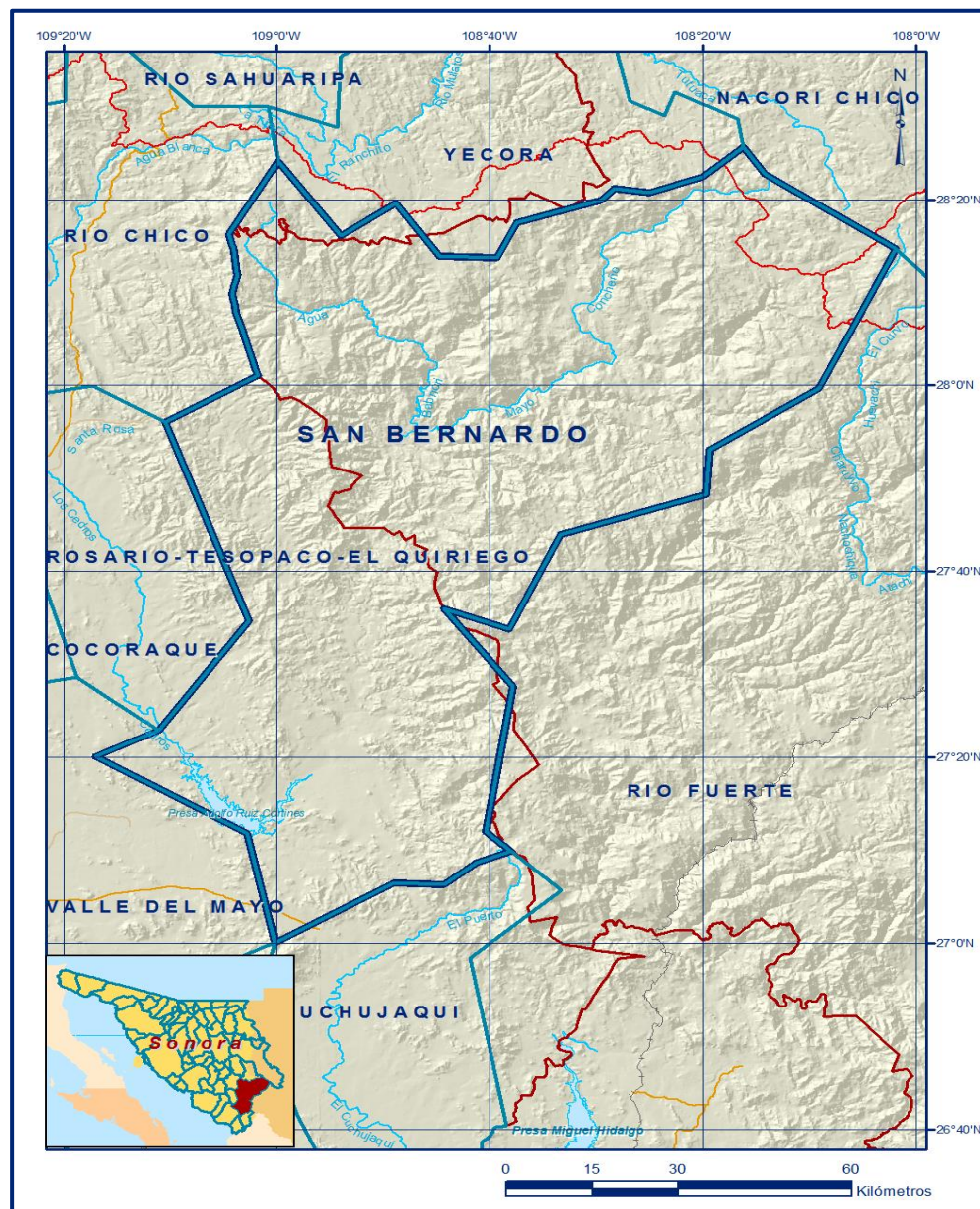


Figura 1. Localización del acuífero San Bernardo.

La poligonal simplificada que delimita el acuífero se encuentra definida por los vértices cuyas coordenadas se muestran en la tabla No.1.

Tabla No. 1 Coordenadas de la Poligonal simplificada del acuífero

ACUÍFERO 2658 SAN BERNARDO							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDO	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	108	41	5.8	27	8	35.3	
2	108	44	9.0	27	6	13.9	
3	108	48	59.6	27	6	26.1	
4	109	0	6.2	27	0	2.1	
5	109	2	47.8	27	11	48.5	
6	109	17	2.2	27	19	59.9	
7	109	11	5.8	27	22	50.3	
8	109	2	34.8	27	34	38.0	
9	109	10	31.4	27	56	3.8	
10	109	1	45.5	28	1	4.9	DEL DADO POR EL LIMITE ESTATAL
11	109	4	27.6	28	16	20.4	
12	108	59	51.4	28	24	3.3	
13	108	53	59.1	28	16	8.2	
14	108	48	49.7	28	19	39.0	
15	108	44	46.1	28	13	54.0	
16	108	39	17.5	28	13	45.8	
17	108	37	28.0	28	17	27.5	
18	108	29	26.2	28	19	58.1	
19	108	28	20.5	28	21	9.3	
20	108	24	57.9	28	20	44.7	
21	108	20	4.9	28	22	23.2	
22	108	16	9.5	28	25	43.1	
23	108	14	13.3	28	22	47.6	
24	108	1	52.5	28	14	43.6	
25	108	9	7.6	27	59	38.0	
26	108	19	23.0	27	53	6.8	
27	108	19	44.2	27	48	16.2	
28	108	33	21.7	27	43	54.0	
29	108	38	10.0	27	33	44.4	
30	108	44	13.6	27	35	54.3	
31	108	37	48.1	27	27	35.7	
32	108	40	19.4	27	11	59.4	
33	108	37	56.9	27	9	51.9	
1	108	41	5.8	27	8	35.3	

El acuífero en la porción sonorensa se encuentra dentro de los municipios de Álamos, El Quiriego, Rosario de Tesopaco y Yécora (figura 2). Esta región de estudio se encuentra aproximadamente a 441 km de Hermosillo, a 176 km de Ciudad Obregón y a 109 km de Navojoa.

En la porción del estado de Chihuahua, se localizan los municipios Urachi, Moris y Ocampo.

Entre los poblados del estado de Sonora se encuentran San Bernardo, El Cupis, Topiyeca, Las Panelas, Las Choyitas, Nahuibampo, Santa Isabel, Mexiquillo, Sabino, La Esperanza, Vado Cuate, Macoyahui y Casas Coloradas, entre otros. Para el estado de Chihuahua los poblados más importantes son Chinipas, Guazapares y Témoris.

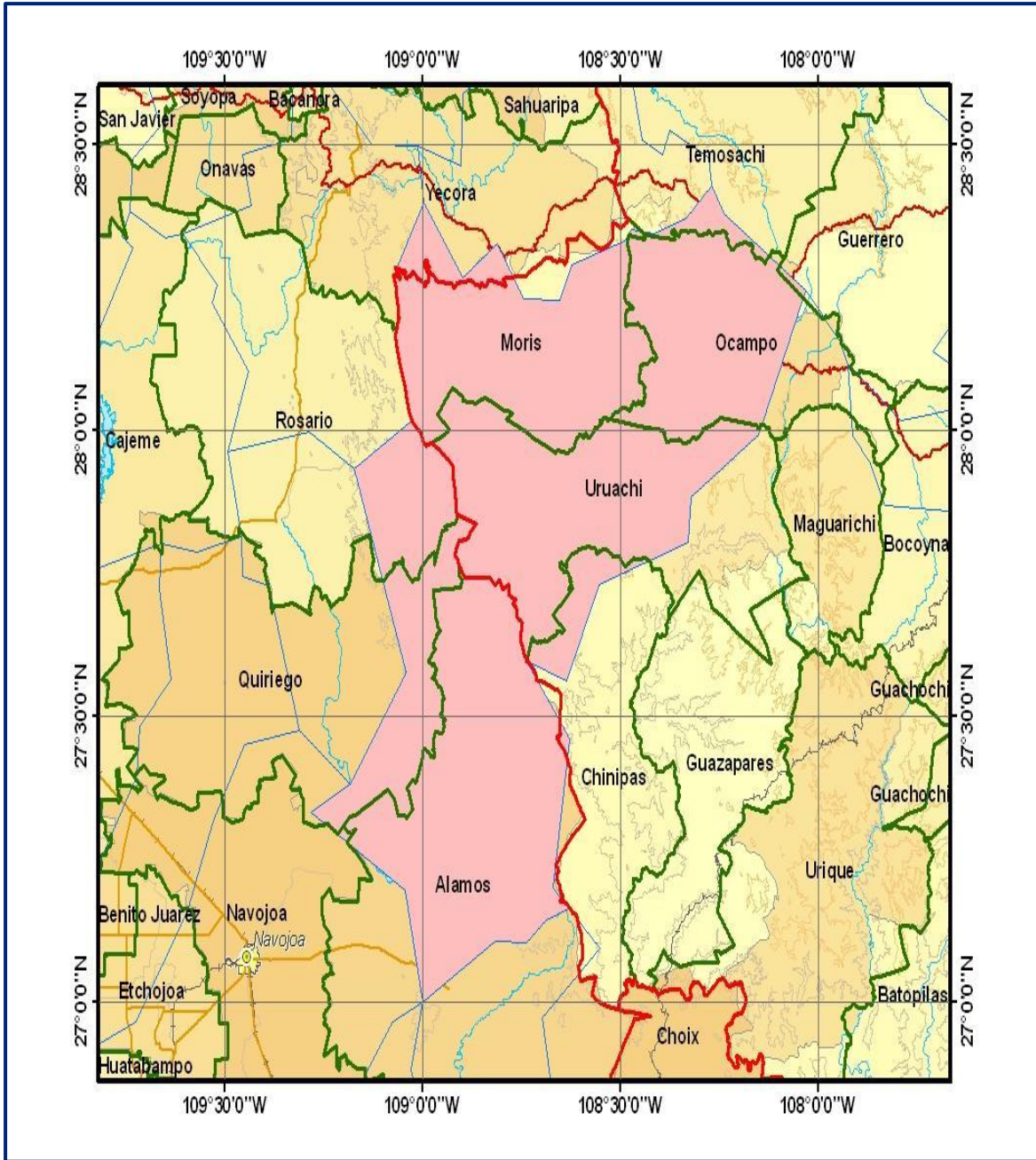


Figura No. 2. Localización de Municipios dentro del área del acuífero.

1.2 Situación administrativa del acuífero

La subcuenca San Bernardo queda comprendida dentro de un área de fuerte presión por la escasez del abastecimiento y a la vez de desconocimiento, por carencia de estudios, del volumen disponible de agua subterránea, esta región conforma un polígono con las cuencas medias y altas de los ríos Yaqui y Mayo, en las cuales se encuentran 8 acuíferos: 2645Río Chico, 2647Onavas, 2648Soyopa, 2649Yécora, 2656Cumuripa y 2657Agua Caliente en la cuenca Río Yaqui y los acuíferos 2646Rosario TesopacoEl Quiriego y 2658San Bernardo en la cuenca Río Mayo.

Dentro de los límites del acuífero, se encuentra en vigor la veda tipo III “Distrito de Riego Río Mayo” decretada el 21 de febrero de 1956, según la cual la capacidad de los acuíferos permite extracciones limitadas para todos los usos. En el primer acuerdo se declara de utilidad pública la construcción de obras que forman el Distrito de Riego del Río Mayo, la adquisición de los terrenos necesarios para alojarlas y operarlas, en la inteligencia de que la zona de riego de dicho Distrito, tendrás los linderos que en el Acuerdo de describen.

En el segundo acuerdo se declara subsistente, por tiempo indefinido la veda para el otorgamiento de concesiones con aguas del Río Mayo y de su cuenca tributaria, establecida con fecha 27 de julio de 1931, publicada en el Diario Oficial de la Federación correspondiente al 5 de septiembre del mismo año.

El tercer acuerdo declara subsistente por tiempo indefinido, la veda establecida para el alumbramiento de las aguas del subsuelo el decreto presidencial de fecha 8 de septiembre de 1954, publicado en el Diario Oficial de la Federación del 14 de octubre del mismo año y se amplía la zona vedada agregándole la parte de la cuenca hidrológica del Río Mayo que dicho decreto no vedo. Por otro lado, no existen decretos de reserva o reglamentos dentro de los límites del acuífero.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 3.

El acuífero queda comprendido dentro de la Región Administrativa II Noroeste; forma parte del Consejo de Cuenca del Río Mayo, instalado el 30 de agosto de 2000. No existen poblaciones importantes en la región, por lo que el agua extraída se utiliza básicamente para satisfacer las necesidades del uso doméstico-abrevadero.

2 ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En el Estudio de Evaluación Hidrogeológica del acuífero San Bernardo, Mpio. Alamos, Sonora, realizado por la Compañía Desarrollo de Acuíferos y Ambiente, en el 2005; se cuenta con información de barrenos exploratorios realizados para la empresa Cobre del Mayo S.A. de C.V., geológicos e hidrológicos realizados por Resource Geosciences de México, S.A. de C.V. en la zona de interés hidrogeológico denominada El Tabela, la cual ya ha sido previamente estudiada por Truebe (1994), Perry 2000, Hawkins (2003), y Rosko (2004). Estos trabajos tuvieron por objetivo recomendar zonas con posibilidades hidrogeológicas a las empresas Phelps Dodge y Cobre del Mayo.

Tomando parte de esta información y consultando los trabajos realizados fue posible elaborar una correlación detallada de las características geológicas del subsuelo hasta una profundidad promedio de 300 m, conocer las unidades productoras, confinantes y transmisoras, así como conocer los parámetros hidráulicos obtenidos realizando pruebas de producción durante la exploración y posteriormente de bombeo en pozos de prueba.

De igual manera las obras de exploración permitieron caracterizar el acuífero del área El Tabelo constituido por una secuencia de rocas fisuradas de origen volcánico, donde se conocieron sus posibilidades hidrogeológicas reales y su geometría, lo que permitirá desarrollar una posible extracción sustentable de agua, que no entrará en conflicto con otros usuarios, ya que no interrelaciona o afecta al acuífero aluvial.

3 FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia fisiográfica

El área del acuífero queda comprendida, casi en su totalidad, en la provincia fisiográfica de la Sierra Madre Occidental, y en menor proporción dentro de la denominada Llanura Sonorense según la clasificación de INEGI (1983).

La Provincia Sierra Madre Occidental está representada dentro del área por las subprovincias Sierras y Valles del Norte, Sierras y Cañadas del Norte, Pie de la Sierra y Gran Meseta y Cañones Chihuahuenses.

A la Provincia Llanura Sonorense le corresponde la subprovincia Sierras y Llanuras Sonorenses, la cual sólo se observa en la parte occidental del área. A la subprovincia Sierras y Valles del Norte, situada en el oeste la conforman sierras de variable altura y valles intermontanos asociados con lomeríos y comprende la mayor extensión del norte y este, la forman sierras altas con cañadas y valles intermontanos.

La subprovincia Pie de la Sierra está conformada por sierras bajas y se localiza en el sur y la subprovincia Gran Meseta y Cañones Chihuahuenses, también en el sur, incluye sierras altas con cañones y mesetas con cañadas; por último, la subprovincia Sierras y Llanuras Sonorenses tiene pendientes escarpadas asociadas con lomeríos.

Es notable la Sierra Madre Occidental, cuya máxima altura de 2820 msnm se localiza en el sureste.

La provincia predominante es la Sierra Alta con Cañones, posteriormente se tiene la de Lomeríos Complejos con Valles y Valles Abiertos como el lomerío del Mayo (pie de sierra). Por último, en la parte sur se presentan sierras bajas y sierras altas de Álamos y San Francisco.

3.2 Clima

El clima de la región de acuerdo con la clasificación de Köppen, modificado por Enriqueta García (1952), es de tipo seco o desértico, caluroso con lluvias en verano y con un porcentaje de lluvia en invierno entre el 5 y 10% de la total anual, y humedad deficiente en las demás estaciones del año. Según Thornthwaite y Köppen, las condiciones geomorfológicas de la región dan lugar a una serie de variaciones climáticas, manifestándose climas secos y templados, con vegetación de bosques y praderas.

Las lluvias son irregulares y se manifiestan en todas las estaciones, aún cuando en algunos sitios son periódicas y con invierno seco. Las temperaturas tienen medias anuales que varían entre 12.6° C y 25° C dependiendo de la zona en que se sitúen.

Dentro del área se encuentran localizadas 21 estaciones climatológicas, de las cuales se obtuvo información en el Servicio Meteorológico Nacional adscrito a la Gerencia Regional Noroeste de la Comisión Nacional del Agua. La información incluye el porcentaje en número de datos disponibles, los años de información, el nombre de la estación, latitud, longitud y altura a la que se encuentran así como las fechas de inicio y terminación de la información existente.

Las estaciones utilizadas fueron: Chinipas, Concheño, Las Panelas, Minas Nuevas, Moris, Quiriego, Ruiz Cortines, Tesocoma, Uruachic y Yécora (figura No.3), las cuales cubren un área del acuífero de 9,674 km² (CNA, 2005).

La temperatura se obtuvo a partir de la información recopilada de las estaciones climatológicas que se han mencionado anteriormente. Para la cuenca del río Mayo hasta San Bernardo, se tiene una temperatura media anual de 19.1° C.

El comportamiento general de la temperatura en el Acuífero San Bernardo muestra una máxima de 48° y mínima de 2° C. La temperatura media más alta se registra en el mes de junio, con 26.1° C, mientras que el mes más frío es enero, con una temperatura media de 12.0° C.

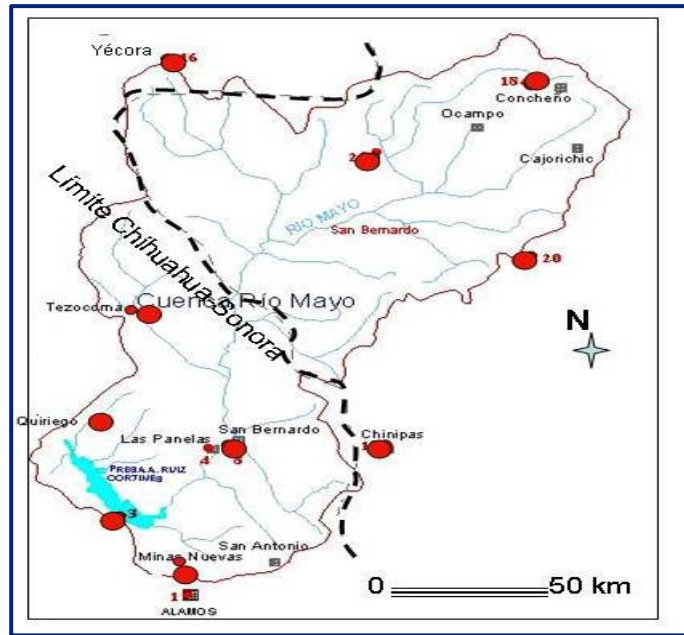


Figura No. 3. Ubicación de las estaciones seleccionadas para el análisis climatológico.

Precipitación media anual

El régimen pluvial en la subcuenca de San Bernardo, en el río Mayo, es variable, pero de manera general presenta dos períodos de ocurrencia, uno entre los meses de julio a septiembre en que se presentan los valores más altos, y otro que abarca de febrero a mayo, cuando las precipitaciones son considerablemente menores. La precipitación media anual para toda la cuenca es de 750.0 mm, con la zona de menor precipitación en la parte baja, aunque la estación Moris, Chih., ubicada en la parte alta, registra el valor más bajo de precipitación anual, con 737.4 mm.

En la parte oriental, los valores de precipitación se incrementan notablemente y en la estación Concheño, Chih., se alcanza una lámina de 1,000.7 mm.

El comportamiento de la precipitación promedio en el Acuífero San Bernardo es similar en la mayoría de las estaciones, la precipitación media mensual máxima se presenta en julio, donde promedia una lámina de 223.4 mm, las menores precipitaciones son en abril y mayo, con la mínima en este último mes, con un promedio de 8.4 mm.

Con los valores obtenidos para el área se define un régimen principal de lluvias de verano (julio, agosto y septiembre), que contribuye con el 65% de agua precipitada; el resto de los meses la precipitación es muy escasa con un porcentaje similar para cada estación.

3.3 Hidrografía

La subcuenca del arroyo San Bernardo pertenece a la Región Hidrológica RH9 Sonora Sur; en la cuenca del Río Mayo, de acuerdo con la clasificación de la Comisión Nacional del Agua. Tiene una extensión aproximada de 9,450 Km² (figura No. 4). Colinda con la cuenca del Río Fuerte de la Región 10; al norte con los orígenes del río Yaqui y al oeste con la cuenca del río Chico, afluente del río Yaqui y con la del arroyo Cocoraque. En una gran proporción, la cuenca pertenece al Estado de Chihuahua.

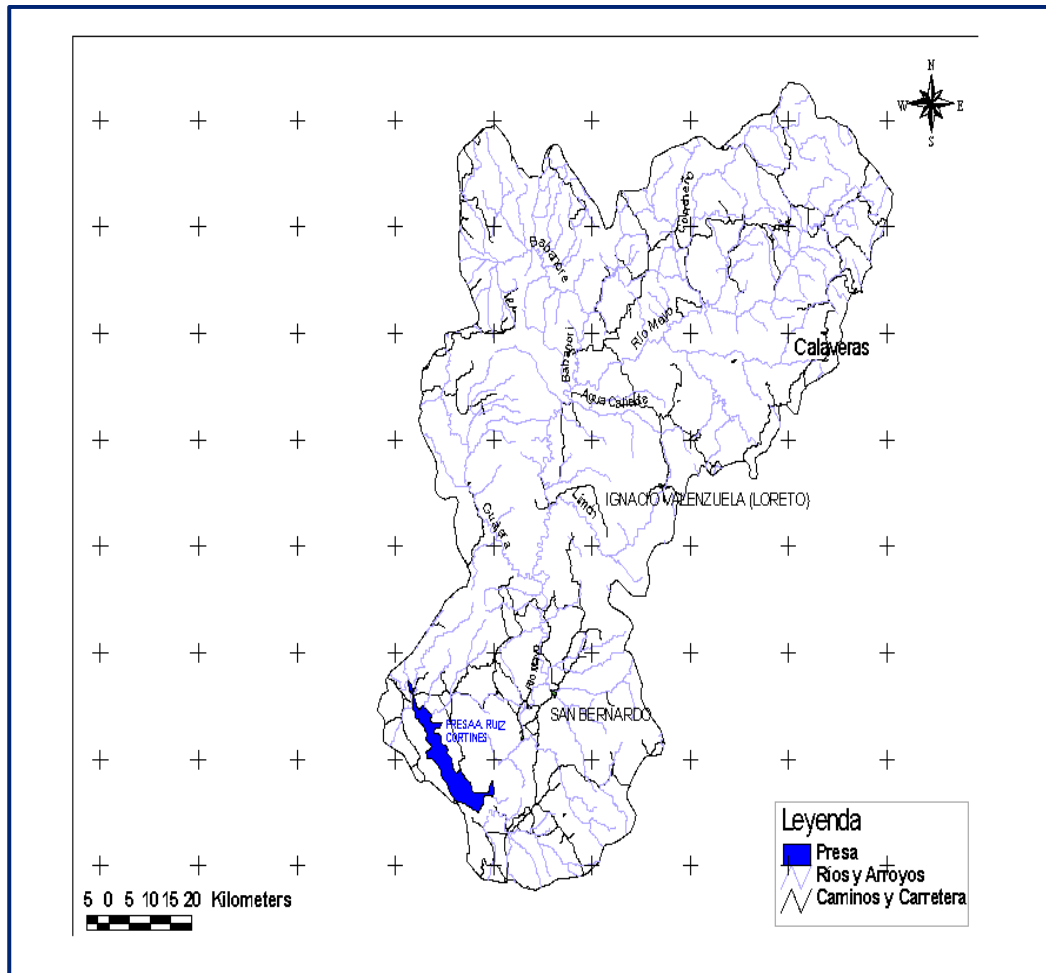


Figura No. 4. Hidrografía de la cuenca San Bernardo.

La topografía de la cuenca es accidentada con altitudes de 2,800 m, principalmente al noreste en el parteaguas con la cuenca del río Oteros, afluente del río Fuerte. El curso general del río Mayo en toda la cuenca es hacia el sureste.

Sus orígenes son en el parteaguas común con los ríos Tutuaca y Verde, afluente del Yaqui con elevaciones de 2,600 m. Como cuenca su afluente principal es el Río Mayo que ocupa el 7% de la superficie total del Estado de Sonora.

Este río inicialmente sigue su curso al oriente con el nombre de río Conchero, que cambia al de Moris al tomar rumbo sur. Recibe al río Candameña por su margen izquierda a una elevación de 700 m.

A partir de esta confluencia el río Moris toma el nombre de río Mayo y discurre con rumbo suroeste; en este tramo las aportaciones importantes provienen del arroyo Colorado por la margen izquierda, y del río Babanori por la margen derecha. Fluyen como afluentes, por la misma margen, los ríos Guajaray y Los Cedros.

De los arroyos más importantes que alimentan al Río Mayo se encuentran El Limón, Agua Caliente y El Concheño. La confluencia del río Babanori ocurre a una elevación de aproximadamente 380 m, donde el río Mayo cambia su curso en dirección Sur, cuando entra a territorio sonorense hasta llegar a la Presa Adolfo Ruiz Cortines, pasando por la estación hidrométrica San Bernardo, hasta descargar en el embalse de dicha presa. Después de la presa, el río toma una dirección hacia el oeste desde donde cambia su curso hacia el Suroeste hasta desembocar en el Golfo de California.

Dentro de la cuenca San Bernardo se pueden identificar cinco subcuencas: Río Mayo-Presa Adolfo Ruiz Cortines; Río Morís; Río Candameña; Río Babanori y Arroyo Guajaray. En su conjunto la cuenca del Río Mayo tiene una precipitación total anual media de 517 mm, con un coeficiente de escurrimiento medio de 14% y volumen total anual medio precipitado de 6,122.3 hm³, para alcanzar un volumen drenado de 863.24 hm³/año (CNA, 2004).

Para el conocimiento del volumen de agua se cuenta con la información de 17 estaciones hidrométricas, distribuidas en los principales arroyos y canales de riego. En el río Mayo, cerca del rancho Las Panelas, opera la estación San Bernardo, que registra las operaciones de la presa Adolfo Ruiz Cortines.

El tipo de drenaje que predomina en la cuenca es dendrítico, el Río Mayo toma su curso por largos tramos en este sistema, si bien gran parte de sus afluentes aprovecharon zonas de debilidad para trazar sus cursos.

En aquellas áreas de rocas más débiles, donde el Río Mayo ha labrado con anchura su cauce, existen bancos fluvio-aluviales de material granular de diversas texturas con buenas condiciones de infiltración y almacenamiento subterráneo.

Otros sistemas de drenaje con presencia importante son radiales y en enrejado. Los primeros labrados sobre rocas intrusivas principalmente y el segundo evidenciando el trazo de los cauces sobre los sistemas estructurales de la región y por producto de rocas volcanoclásticas pseudoestratificadas. Estos sistemas influyen en forma importante no sólo en la dirección de los escurrimientos superficiales, sino como redes ortogonales que permiten la infiltración de flujo subterráneo.

La única estación hidrométrica localizada en el área del acuífero es operada por la Comisión Nacional del Agua; se le conoce con el nombre de San Bernardo.

Esta estación inició operaciones en enero de 1960; se localiza en 27° 24' 5.87" de latitud norte y 108° 50' 50.22" de longitud oeste y tiene por objeto medir los escurrimientos del río Mayo para conocer las aportaciones a la presa Adolfo Ruiz Cortines. El escurrimiento medio anual en esta estación hidrométrica es de 952 millones de m³.

Los escurrimientos de la cuenca del Río Mayo se controlan en Sonora con la presa Adolfo Ruiz Cortines desde 1955, esta presa es comúnmente conocida con el nombre de Mocúzari; con el agua que almacena se abastece al Distrito de Riego No. 38, Río Mayo. Su capacidad es de 1,386 hm³ y su captación media anual es de 973.7 hm³.

El agua del río drena hacia el oeste y suroeste, cruza por la ciudad de Navojoa, Son., recorre su cauce moderno y desemboca en el Golfo de California, fuera del área del acuífero.

3.4 Geomorfología

Gran parte de la morfología que se presenta en la cuenca es producto de patrones geológico-estructurales resultantes de la tectónica compresiva y distensiva que han sufrido las rocas a lo largo de su historia geológica, de aquí que la mayoría de los cambios bruscos en la dirección de los principales corrientes de la cuenca se deben a grandes estructuras geológicas (fallas y fracturas) que siguen los ríos como zonas de debilidad. Estructuralmente la cuenca San Bernardo presenta un patrón de estructuras orientadas NW-SE, el cual corresponde al tipo "Basin and Range Sonorense" (De Cserna, 1988) o sistema de fosas y pilares (horst-graben).

El análisis hidromorfotectónico es la correlación de la dirección de alineamientos estructurales de las marcas de drenaje, con el esquema tectónico de la región, las cuales son útiles para identificar las zonas de recarga y descarga.

Los alineamientos principales de estructuras de ríos y arroyos tienen una tendencia NE-SW esto es, perpendiculares a la dirección preferencial de las estructuras citadas, lo que se interpreta como un posible sistema resultante. Esta tendencia de los dos patrones de estructuras formó un sistema ortogonal que induce y genera una dirección de flujo subterráneo cuya predominancia es al SW, en dirección a la presa.

Lo anterior obedece al patrón de alineamientos, pero además al buzamiento general hacia el SW rumbo al sitio El Tabelo, por lo que éste resulta ser una de las zonas con mejores posibilidades hidrogeológicas para alumbrar agua subterránea, ya que parte del flujo subterráneo que fluye a través de estructuras y de los planos de pseudo estratificación rumbo a la presa, es interceptado.

4 GEOLOGÍA

La litología del área tiene un rango de edad del Proterozoico medio hasta el Holoceno. La unidad más antigua aflora en la porción centro-este del área, cerca del límite norte entre los acuíferos San Bernardo y Yécora; esta unidad está constituida por un granito-gneis al cual se le asignó una edad de Proterozoico medio debido a su similitud litológica y en posición estratigráfica con las secuencias del área de Caborca, Sonora (figura No. 5).

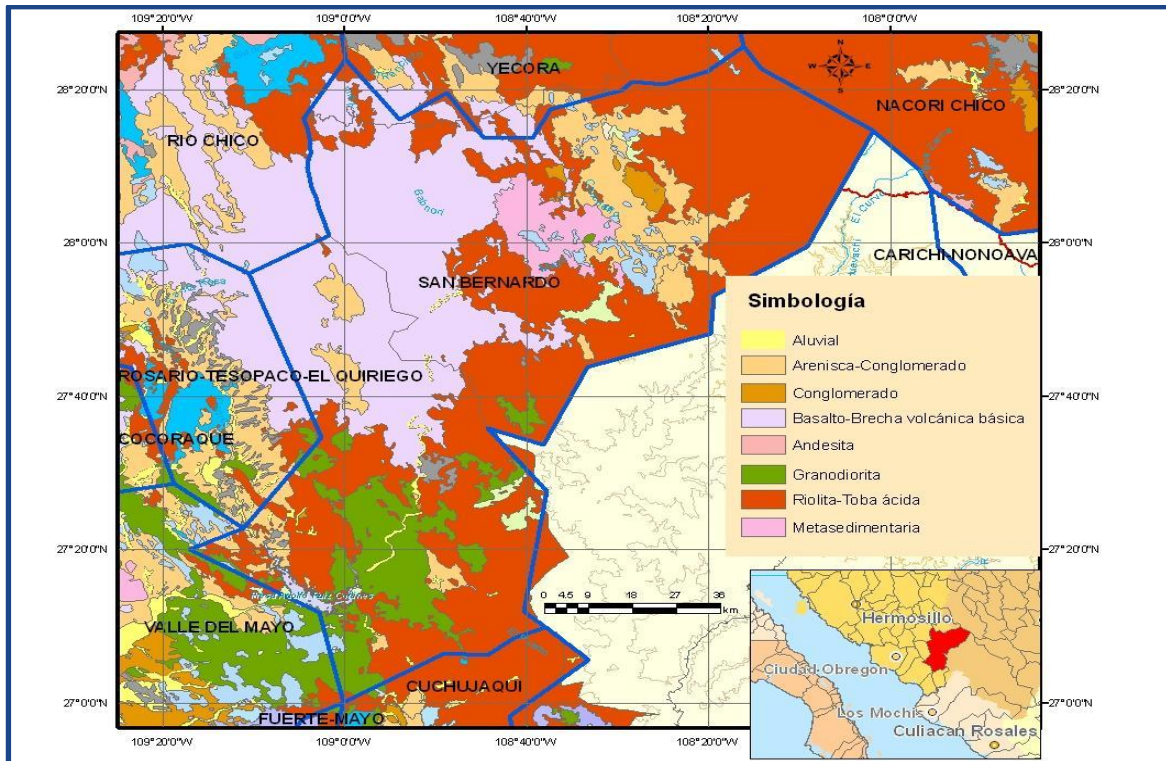


Figura No. 5. Mapa Geológico.

La zona está compuesta por dos importantes secuencias ígneas, cuyo contacto marca un periodo intermedio de calma volcánica. La secuencia más antigua la forman rocas volcánicas, principalmente intermedias, y cuerpos ígneos cuyas edades varían entre 100 y 45 millones de años. La más reciente está integrada por ignimbritas riolíticas y riodacíticas en posición generalmente horizontal, o ligeramente inclinada y con edades que varían entre 34 y 27 millones de años.

El complejo volcánico inferior posee una forma dominante de derrames y unidades piroclásticas de composición andesítica, pero también cuenta con intercalaciones de ignimbritas silíceas. Este complejo inferior contrasta en gran medida con el superior, por su carácter ligeramente deformado e intensamente afallado y alterado; las secuencias que lo constituyen son, por lo general, rocas encajonantes de las principales mineralizaciones de gran parte de esta región de México.

4.1 Estratigrafía

La secuencia de la Sierra Madre Occidental, consiste principalmente de rocas metamórficas, de edad probablemente Precámbrica, y de lavas terciarias y cuaternarias.

Pero a lo largo de sus flancos y en su parte norte, se encuentran áreas de estratos paleozoicos y mesozoicos que comprenden capas que datan probablemente del Cámbrico, Devónico, Mississípico, Pensylvánico, Pérmico, Triásico – Jurásico y Cretácico.

Precámbrico

Esquistos, gneises y otras rocas metamórficas, de edad probablemente Precámbricas, existen en muchos lugares de la Sierra Madre Occidental y probablemente forman el núcleo o corazón de la cordillera. En la parte norte de la provincia se les ha podido fijar la edad. Describiendo la región de Cabullona en Sonora.

Paleozoico

En el norte de Sonora se observan estratos correlacionados con la Cuarcita Bolsa y con la Formación Abrigo de edad Cámbrica del sur de Arizona. El nombre de Cuarcita bolsa ha sido cambiado por el de Formación Abrigo ya que se afirma que la caliza en algunos lugares es reemplazada por arenisca, cuarcita y caliza silícea, que contiene prácticamente el mismo conjunto de Trilobites.

La caliza Naco de edad Pensylvánica y Pérmica está bien desarrollada en la parte norte de la Sierra Madre Occidental, donde alcanza un espesor de 2500 m.

Mesozoico

Triásico

En la Sierra Madre Occidental, abajo del nivel general de la meseta ígnea, en los lugares donde la erosión ha cavado profundas barrancas han sido registrados afloramientos de rocas triásicas. En el área de Sahuayacan afloran pizarras graníticas interestratificadas con cuarcitas; son afosilíferas, pero la presencia de grafito sugiere que probablemente pertenezcan a la Formación Barranca.

En condiciones similares están los afloramientos del Río Mayo, presentan en su margen norte, en el flanco de la Sierra de la Trompa, donde están expuestos grafito y carbón. Más al este, en el norte y noreste de Moris, las cuarcitas asociadas con calizas y que se presentan a lo largo de una falla con escarpa y en estructura muy complicada, han sido asignadas a la Formación Barranca y al Cretácico. Por último en Guayjura, en el Río Oteros, el grafito ha sido correlacionado tentativamente con la misma formación.

Los depósitos a lo largo de la línea indefinida de demarcación entre la Sierra Madre Occidental y la Provincia de Sonora, que King tentativamente asigna a la Formación La barranca (Triásico), están mejor desarrollados en la Sierra de San Javier.

Jurásico

Hasta ahora no se han encontrado rocas ígneas o sedimentarias de esta edad en la Sierra Madre Occidental, por lo que es posible que haya estado emergida durante este tiempo limitando los grandes geosinclinales, mexicano al Este, y Franciscano al Oeste.

Cretácico

La distribución del vulcanismo parece estar relacionada genéticamente a los eventos tectónicos y al comportamiento de la tectónica de placas del Océano Pacífico Oriental. Este complejo de rocas basálticas volcánicas de edad Cretácico – Cenozoico Temprano, representa la actividad magmática de una “Cordillera Pacífica” tipo margen continental – arco insular que culminó con una deformación y un levantamiento hace 45 millones de años.

La consecuente erosión de las rocas volcánicas emergidas, aportó grandes cantidades de sedimentos a las cuencas cretácicas subsidentes al oriente de la sierra.

Los depósitos cretácicos están ampliamente distribuidos al norte de la Provincia. Se han observado sedimentos indiferenciables del Cretácico al oeste de Chihuahua. Un grueso frente de calizas, areniscas y arcillas del Cretácico Medio en Santa Rosa. Un frente de capas de calizas en la cuenca de Cabullona al NE de Cananea, contiene formaciones tanto del Cretácico Medio como del Cretácico Superior.

Terciario

Formación de la Sierra Madre Occidental. Los depósitos Terciarios de la Sierra Madre Occidental existen en dos grupos principales: el inferior principalmente de origen volcánico y que data del Terciario Medio, descansa discordantemente sobre rocas cretácicas y más antiguas. El superior esta formado principalmente de material clástico de origen terrígeno o lacustre es del Terciario Superior.

No se tiene información entre principios del Terciario, hasta los 32 millones de años, ya que el vulcanismo ignimbrítico dominante empezó casi simultáneamente a lo largo de la actual sierra hace 32 millones de años, posiblemente debido a cambios acentuados de la interacción de las placas tectónicas. El efecto anterior finalizó de una manera súbita hace más de 23 millones de años en la parte central de la sierra, marcando el fin de la subducción a lo largo del margen occidental del Continente Norteamericano. De acuerdo con los datos radiométricos disponibles varias intrusiones de troncos y hasta batolitos continuaron su movimiento iniciado a principios del Terciario, provocando mineralizaciones a veces muy importantes.

La Sierra Madre Occidental esta formada esencialmente de cuerpos eruptivos de gran espesor cuyo orden de sucesión es el siguiente: andesitas, dacitas, traquitas (poco frecuentes) riolitas y basaltos. Todas estas rocas volcánicas son cenozoicas y descansan discordantes sobre rocas mesozoicas o paleozoicas plegadas o bien sobre rocas metamórficas erosionadas en alto grado.

4.2 Geología estructural

Las unidades más antiguas del área presentan un metamorfismo regional, el cual causó una foliación con ejes axiales subparalelos a la estratificación original de estas rocas.

Las características petrográficas y estructurales de estas rocas metamórficas indican que el metamorfismo que las afectó fue producto, posiblemente, de un engrosamiento cortical como respuesta a un apilamiento tectónico asociado a una colisión de placas litosféricas. Mullan (1978) hizo un estudio basado en correlaciones y relacionó este metamorfismo a la orogenia nevádica o nevadiana (Cenomaniano-Turoniano).

El rasgo estructural general E-W encontrado en el área, ha sido también observado más al sur (Fredrikson y Henry, 1972; Mullan, 1978; Henry, 1986), es por ello que se le da una importancia regional. Henry (1986), las ha atribuido a una convergencia oblicua entre la placa norteamericana y Farallón hace poco menos de 100 Ma. Aun así, este marco tectónico no alcanza a explicar los pliegues de ejes sub-verticales.

En este sentido, es interesante notar que ciertos autores han postulado que en alguna parte del área deben de existir una o varias estructuras fundamentales que yuxtapongan ya sea dos o más 'terrenos tectónicos' al cratón norteamericano (Ortega-Gutiérrez et al ,1994). El tipo de acreción de estos 'terrenos' es aún tema de debate, pero las reconstrucciones más aceptadas sugieren que esta porción de México debió haber actuado como una gran zona de cizallamiento de tipo transcurrente durante la apertura del Golfo de California (Dietz y Hoden 1979; Pilger, 1978).

Se sugiere que el sur-oeste del área fue originalmente el marco de una margen continental activa, destruida eventualmente por la colisión de diferentes terrenos tectónicos que yacieron más al sur-oeste, y luego sufrieron las consecuencias de la apertura del Golfo de California. Las rocas estratificadas del Cretácico Tardío-Terciario Temprano, generalmente presentan una tendencia NW-SE y buzamiento suave ya sea al SW o al NE.

Esta actitud parece ser por la fuerte influencia de las estructuras terciarias más jóvenes. Sin embargo, a escala de afloramiento estas rocas presentan un plegamiento suave, lo que sugiere que están afectadas por una tectónica compresiva tangencial de baja intensidad y/o duración.

Por las edades de estas rocas, esta deformación correspondería a la Orogenia Laramide en el área, época que en la región se caracterizó más por un magmatismo que por una deformación.

Las estructuras terciarias son las más notorias dentro del área (Atwater, 1970; Carlson, 1982; Gans, 1997), simplemente con observar un mapa de estructuras y la distribución de sus rocas se puede notar que el rasgo más notorio es un patrón orientado NW-SE. Sin embargo, en un análisis más minucioso se puede ver que el comportamiento estructural es más complejo que esto.

No obstante, es posible observar que la definición de los patrones del escurrimiento y flujo subterráneo está influenciado notoriamente por este sistema estructural. Confirmando lo anterior, se puede apreciar que las estructuras predominantes en la cuenca San Bernardo son las orientadas NW-SE, así como algunas estructuras subcirculares. Estructuras que se presentan también en algunas partes de la cuenca, generalmente asociadas a los afloramientos de rocas intrusivas.

Las evidencias estructurales nos indican que las estructuras NE-SW se formaron en dos etapas, pero principalmente durante el Oligoceno; por su parte, las estructuras NW-SE, en general, parece corresponder al fracturamiento ocurrido en el Neógeno, período en el cual se formaron las provincias geológicas Desierto Sonorense y Sierras y Valles Paralelos.

Las estructuras sub-circulares, aunque de dimensiones menores, se encuentran en las áreas cercanas a La Cieneguita, Álamos y El Zapote.

Estudios estructurales al norte de la Sierra Madre Occidental (Montaño-Jiménez 1988), indican que un momento de cambio de orientación de los ejes de esfuerzos corticales ocurrió a finales del Oligoceno; mientras que durante el Terciario Tardío el campo de esfuerzo estaba orientado esencialmente ENE – WSW.

4.3. Geología del subsuelo

La única información con la que se cuenta son los perfiles geológicos de la carta geológica Tecoripa, 1:250,000, realizados por el Consejo de Recursos Minerales en el año 2000. En el área correspondiente a esta carta se encuentran los acuíferos Soyopa, Onavas, Yécora, Río Chico, la mitad superior del Cumuripa, una tercera parte aproximadamente, del San Bernardo y una parte mínima del Agua Caliente.

Sin embargo, para el área El Tabelo, los trabajos de prospección indirecta y directa permiten tener una clara definición de la geología del subsuelo y sus propiedades físicas.

Se cuenta con la información de 20 barrenos con información de un promedio de 300 m de profundidad, secciones geofísicas e interpretaciones geológico-geofísicas con las cuales se realizaron secciones geológicas y correlaciones y se obtuvo la columna litoestratigráfica local.

En esta área el basamento lo forma un intrusivo granítico-granodiorítico del Cretácico Superior; en algunas partes, como en la Sierra San Fernando, se encuentra intrusionado por un pórfido andesítico del Oligoceno.

En la mayor parte del área el intrusivo se encuentra intrusionando areniscas y andesitas del Cretácico Superior que están muy deformadas.

En algunas localidades el intrusivo se encuentra en contacto directo con otras unidades como son: Areniscas y dolomías del Precámbrico superior, lutitas y calizas del Cámbrico, areniscas y conglomerados polimícticos correspondientes al Grupo Barranca (Triásico superior), rocas volcánicas y metasedimentarias del Jurásico y tobas riolíticas y riolitas del Oligoceno. El resto de la columna varía dependiendo de cada localidad, lo cual es difícil de describir ya que son muy pocos los datos con los que se cuenta.

En el área El Tabelo las rocas Terciarias volcanosedimentarias, son las de mayor interés hidrogeológico, dada su capacidad de transmisión y almacenamiento, además de tener una amplia distribución de afloramientos en toda la subcuenca de San Bernardo.

Adicionalmente en la porción norte de la región, reciben la recarga de lluvia transmitida a través de los grandes espesores de rocas fisuradas de la Serie Volcánica de la Sierra Madre Occidental, con las que conforman el esquema de un sistema hidrogeológico complejo de grandes dimensiones.

5 HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de Acuífero

Tomando como base la información geológica local y regional recopilada, se puede establecer que dentro de la zona el acuífero está conformado por dos medios: (A) Granular de tipo libre y (B) roca fracturada que puede comportarse en ocasiones como libre o como semiconfinado. Para el medio granular se definieron dos unidades y para el medio fracturado en roca dentro de la zona El Tabelo, existen tres unidades.

Hidroestratigrafía de Acuíferos granulares.

El acuífero granular está constituido por materiales no consolidados provenientes de distintas fuentes:

1) Unidad Cuaternario aluvión (UQal). Formada por aluvión de edad reciente, generalmente localizados en los valles y cauces principales, en donde el nivel freático está cercano a la superficie, y el rendimiento específico es mayor que en los otros materiales. Generalmente, y en sentido vertical, sus espesores no rebasan los 30 m en la porción de acuífero de la región sonorense.

Lateralmente este varía desde el centro hasta los límites de los valles, en donde el relleno presenta acuñamientos siguiendo la geomorfología y la pendiente de las rocas basales. Su extensión lateral puede ser de grandes dimensiones, dependiendo de la geometría del cauce o del valle en donde han sido depositados, pero sus espesores se mantendrán reducidos.

Esta unidad acuífera se encuentra localizada hacia la zona norte de la porción sonorense del acuífero San Bernardo, en las localidades aledañas a Pinos Altos, Guadalupe y Palos Blancos, y representan los materiales más productivos dentro del área.

2) Unidad granodiorítica intemperizada (Ugi). La segunda unidad definida en el acuífero granular está compuesta por materiales no consolidados, producto del intenso intemperismo que ha actuado sobre las rocas graníticas expuestas dentro del área. Esta se distribuye ampliamente dentro de la zona, en forma de lomeríos suaves y en áreas topográficamente bajas.

El espesor de esta unidad se restringe solamente hasta el punto donde el intemperismo ha actuado sobre la roca madre, generalmente menor a 30 m.

En lugares específicos en donde la roca es afectada por sistemas de fallas pueden esperarse profundidades mayores, sin embargo, la condición natural es que esta unidad sea de muy baja permeabilidad cuando la roca es sana. Esta unidad se extiende desde el Rancho Santa Amalia, Munihua, hasta

Los Tanques, La Vinata, Techobampo, hasta las cercanías del poblado San Bernardo. Al Oeste cruzando el río hasta las localidades de San Juan, Nahuibampo, Agua Blanca y Mexiquillo.

Hidroestratigrafía de Acuíferos en Roca

De la base a la cima, el acuífero en roca está constituido por tres unidades esenciales:

1) Unidad Paleozoica metasedimentaria (UPm). Esta unidad está constituida por rocas metamórficas tales como metareniscas, metalutitas y metaconglomerados y con niveles basales de esquistos y cuarcitas, así como horizontes de carbón y de grafito hacia la parte media y superior de la secuencia. Debido a sus características de permeabilidad y porosidad, esta unidad no es de gran importancia en la zona como productora de agua, sin embargo su carácter confinante si es muy importante ya que es la que retiene el flujo vertical del agua.

2) Unidad Mesozoica Tarahumara (UMt). Está constituida por una secuencia vulcanosedimentaria constituida por derrames volcánicos andesíticos y tobas andesíticas intercaladas con horizontes de lutitas, calizas y algunos paquetes de areniscas y traquitas pertenecientes a la Formación Tarahumara. Hidrológicamente, la porosidad de estas rocas varía en mayor rango que las rocas plutónicas. Su capacidad productora se debe a su alta permeabilidad producto de las articulaciones producidas por enfriamiento, los tubos de lava, las vesículas interconectadas, fracturas y vacíos entre flujos sucesivos.

Debido a las grandes dimensiones de sus espesores, en los lugares en donde aflora esta unidad, constituye las zonas de recarga más importantes dentro del área. En el subsuelo, la potencialidad de esta unidad está definida por los parámetros anteriormente mencionados, y por el grado de fracturamiento de la roca o porosidad secundaria, que a su vez, será el que determine las posibles direcciones del flujo del agua subterránea.

3) Unidad Terciaria vulcanosedimentaria (UTv). Esta es la tercera unidad identificada, está representada por materiales de relleno de cuenca (fosas tectónicas) producidos por una intensa actividad erosiva. Estos sedimentos son conglomerados polimícticos y areniscas, con intercalaciones de basaltos, andesitas basálticas y tobas. Esta unidad es conocida como la Formación Baúcarit y aflora en los lomeríos y terrazas adyacentes a los valles con dimensiones del orden de 200 a 400 m.

Los flujos volcánicos pueden llegar a constituir por sí solos una unidad hidrogeológica (UTex), pero en todo lugar actúan como rocas transmisoras y en sus zonas de afloramiento son captoras importantes de recarga al subsuelo hasta profundidades de 200 m. Los estratos vulcanoclásticos se encuentran interestratificados con sedimentos de grano fino de menor permeabilidad que los horizontes conglomeráticos, pero la permeabilidad de esta unidad varía en función de su distribución granulométrica y grado de compactación.

La capacidad transmisora de esta unidad es menor que la del aluvión, sin embargo, debido a sus enormes dimensiones, almacena gran parte de la reserva de agua de la subcuenca San Bernardo. Esta unidad aflora en las cercanías de la presa Adolfo Ruiz Cortines, Guajaray, San Juan, Los Mezcales, El Sabino y en la localidad del Tabelo, la cual actualmente esta siendo explorada.

5.2 Parámetros hidráulicos

Dadas las características de los aprovechamientos existentes en el acuífero granular, es prácticamente imposible llevar a cabo una prueba de bombeo, puesto que no se cuenta con equipos adecuados para desarrollar un ensayo. Sin embargo, en el área de El Tabelo, se ha podido obtener las K de los estratos acuíferos mediante pruebas de bombeo con pozo de observación.

En el estudio de 2004-2005 se realizaron 3 pruebas de bombeo en los pozos para la compañía Cobre del Mayo S. A. de C. V., en la zona de Tabelo, Mpio. de Álamos, Sonora. En las pruebas de bombeo se observó el comportamiento del abatimiento de los niveles estáticos, así como su recuperación.

En todas las pruebas se contó con pozos de observación, por lo que se pudieron obtener los parámetros de transmisividad en ambos y coeficiente de almacenamiento. Los periodos de duración de las pruebas fueron de 4 a 52 horas.

Transmisividad

Las características de las pruebas de bombeo y los valores obtenidos, permitieron la utilización de tres métodos analíticos para el cálculo de los valores de transmisividad y coeficiente de almacenamiento.

Los métodos analíticos utilizados fueron: Theis, Semi-Log Drawdown y Semi-Log Recovery (Tabla No. 3).

Tabla No. 3. Valores de transmisividad en pruebas de bombeo en El Tabelo

POZO	TRANSMISIVIDAD				
	Abatimiento (mt ² / d)		Recuperación (mt ² / d)	Caudal (lps)	
	Theis	Sem-log Drawdown	Semi-log Recovery	variable	constante
TAB-10 PB		18.6	111.6	9.84 - 12.36	
TAB-10 PO	63.2	137.7	148.8	11.71 - 10.4	
TAB-12 PB		7.7	8.1	7.8 - 12	
TAB-12 PO	7.6	7.7	8.1		8.8
TAB-17 PB		18.6	14.3	4.1 - 12.3	
TAB-17 PO	11.3	9.7	20.6		10.73

Los valores de transmisividad, o capacidad transmisora del acuífero en la zona del Tabelo, muestran una variación, en términos de abatimiento, de 7.7 m²/día a 137.7 m²/día. En lo referente a recuperación, los valores oscilan entre 8.07 m²/día y 148.8 m²/día. Esto es indicativo de que la heterogeneidad en los materiales de relleno del acuífero, producto de sus variaciones granulométricas y espesores, podría estarse comportando como un medio homogéneo para efectos prácticos, como respuesta a la utilización de un ensayo de bombeo de larga duración, en el que el radio de influencia alcanzó varias decenas de metros.

Coeficiente de almacenamiento

Las pruebas de bombeo se interpretaron por medio del método de Theis, obteniéndose los valores de los coeficientes de almacenamiento en los pozos de observación TAB-10, TAB 12 y TAB-17. Para el TAB-10 se obtuvo un coeficiente de almacenamiento de 0.001, mientras que para el TAB-12 se calculó un coeficiente de 0.006, siendo el mayor de los tres pozos considerados, y para el TAB 17 el coeficiente es de 0.003. Estos coeficientes de almacenamiento son propios de acuíferos confinados, tal como se ha observado la condición hidráulica del acuífero volcanoclástico.

5.3 Piezometría

Para el acuífero en roca, la profundidad a los niveles del agua subterránea (2004) es ligeramente distinta, en esta se observa que las profundidades mayores se manifiestan en las localidades de las Guijas y Santa Amalia con 10 y 12 m.

Los niveles más cercanos a la superficie se encontraron en los aprovechamientos PV-1, correspondiente al rancho Campo Nuevo, con una profundidad de 1.8 m, en el PV-21 localizado en la Higuera en donde la profundidad del nivel es de 1.6 m y en El Tabelo, donde se encontró casi brotante en los barrenos 10 y 17 y hasta 0.86 m. Lo anterior indica que estos lugares responden al confinamiento y presión hidráulica de las zonas de recarga del sistema en roca. Profundidades mayores a estas, del orden de 5 a 11 m, se observan en las poblaciones de Las Guijas, Los Tanques, Munihuaza y el Tepustete.

La tendencia del gradiente hidráulico muestra una dirección en sentido al cauce del Río Mayo, esto se corrobora con las elevaciones del nivel piezométrico, las cuales registran sus máximos en la zona de Las Cuevas, Munihuaza y Cochibampo, del orden de 493 msnm en las norias PV-30 y PV-32, y las elevaciones mínimas hacia las localidades de Santa Amalia y Las Guijas, del orden de 280 msnm en la noria PV-22 y pozo PV-11, respectivamente.

En general, la dirección del flujo de agua subterránea tanto para el acuífero granular, como para el acuífero en roca, es en dirección SE-NW, esta fluye a partir de zonas topográficamente elevadas desde los flancos de las montañas, hasta los valles donde el relleno sedimentario es más permeable, para finalmente ser conducida hasta el cauce del Río Mayo y la Presa A. Ruiz Cortines.

5.4 Comportamiento hidráulico

La configuración de los niveles freáticos (2004) indica que las zonas con los niveles más someros se localizan en las localidades de Mexiquillo, Techobampo, Los Camotes y El Fríjol con profundidades de 1.5 a 5 m (figura No. 6).

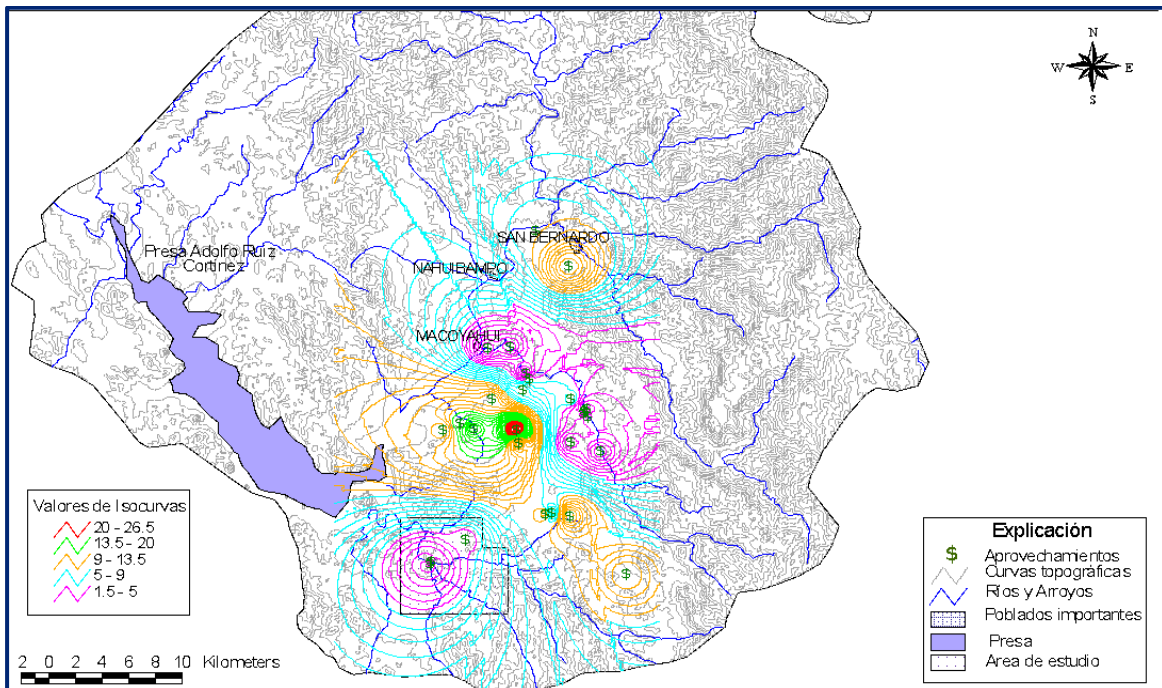


Figura No. 6. Profundidad al nivel freático Agosto, 2004. Acuífero granular

La profundidad a los niveles freáticos en estas zonas, sobretudo próximo a subálveos o cercanos a cauces, indican que la profundidad fluctúa con las zonas de recarga al sistema.

A partir de estas localidades la profundidad a los niveles empieza a aumentar, hacia zonas topográficamente más elevadas, específicamente en los poblados de La Tescalama y Munihuaza, en donde se alcanzan profundidades entre 9 y 13.5 m. Lo mismo sucede en la localidad de San Bernardo, en donde se registra una profundidad al nivel freático de 13 m en el pozo PV-10. En el poblado La Vinata, las norias PV-37 y PV-41 representan las captaciones con las profundidades máximas dentro del área, y alcanzan 27 y 17 m respectivamente. Ello permite asegurar que la superficie freática sigue en forma casi paralela a la topografía de la superficie.

Por su parte, las elevaciones de los niveles freáticos (2004) en el acuífero granular, indican una clara disminución en sentido NE-SW, a partir de la localidad de Munihuaza, en donde se tienen elevaciones del nivel freático de 489 msnm en la noria PV-31, hacia la noria PV-45 localizada en el poblado Casas Coloradas, la cual alcanza una elevación de 146 msnm. Observando esta tendencia, y considerando que las líneas de flujo son perpendiculares a las líneas equipotenciales, además de otros factores geológicos y estructurales, se deduce que las direcciones del flujo subterráneo en el acuífero granular están orientadas exactamente rumbo al cauce del río Mayo con una tendencia general NE-SW (figuras No. 7,8,9).

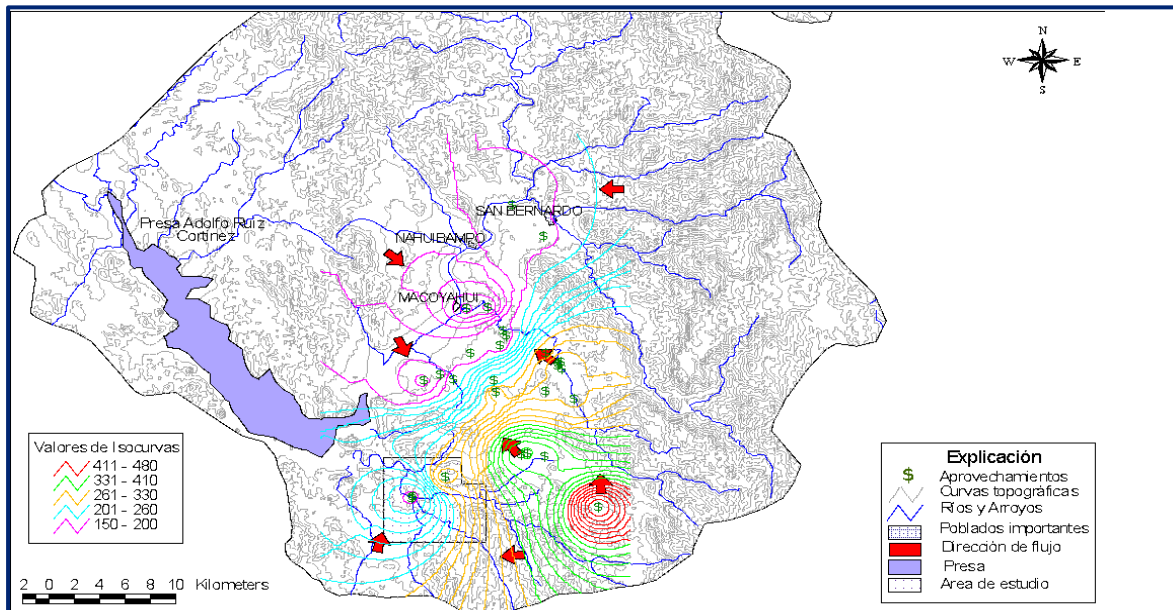


Figura No. 7. Elevación del nivel freático Agosto, 2004. Acuífero granular

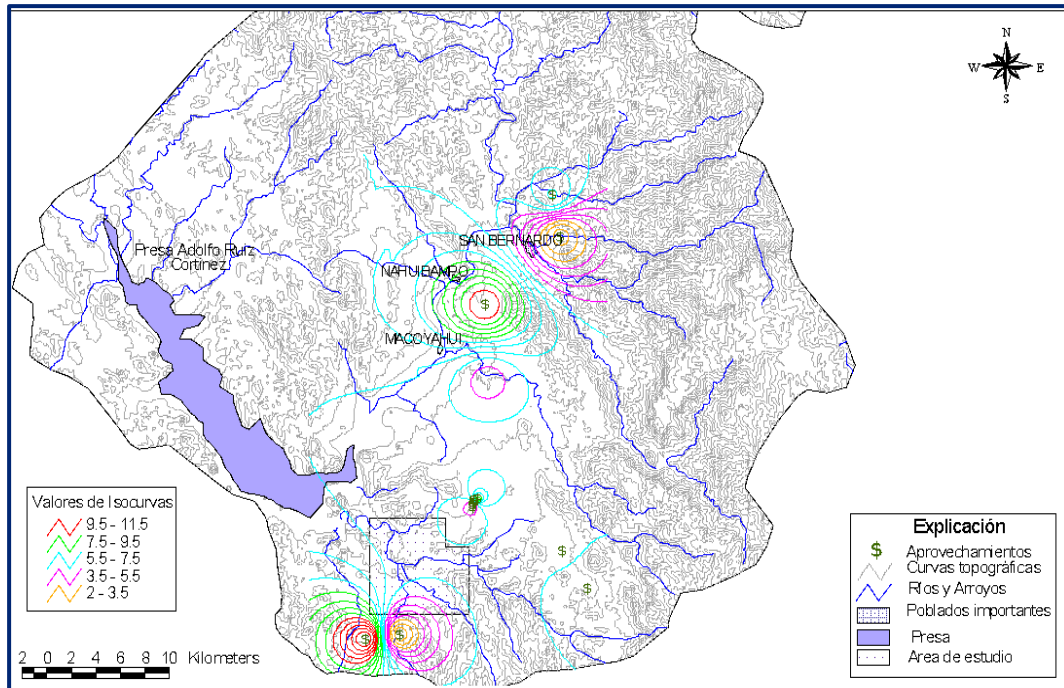


Figura No. 8. Profundidad al nivel Estático Agosto, 2004. Acuífero fracturado

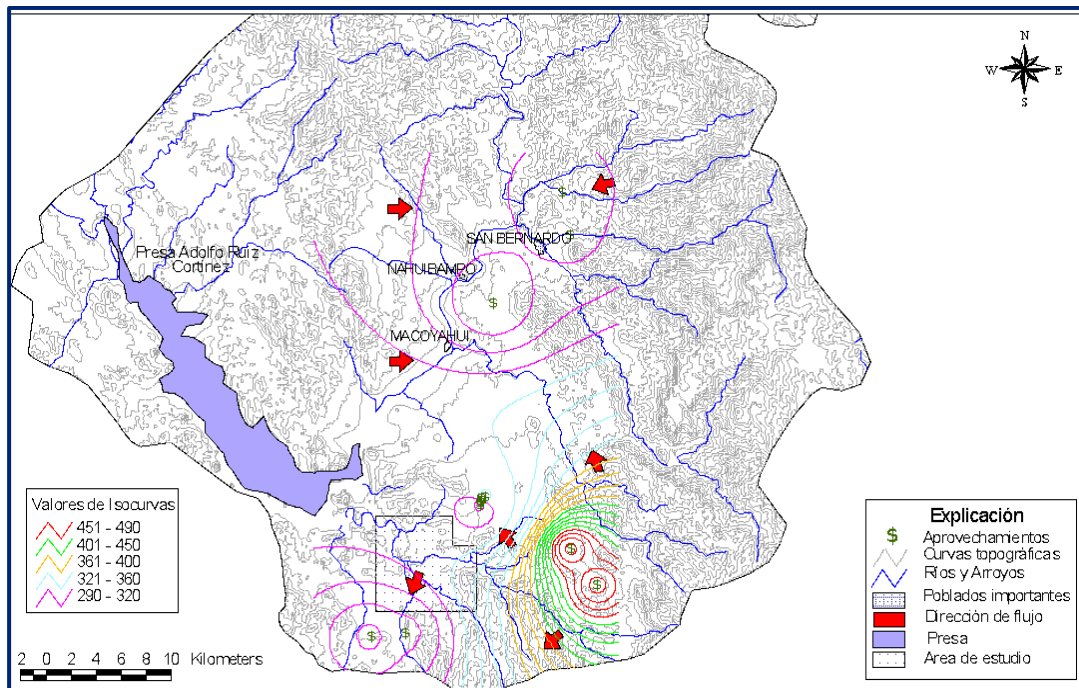


Figura No 9. Elevación del nivel piezométrico Agosto, 2004. Acuífero fracturado

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

La concentración de sólidos totales disueltos (STD) en el agua subterránea es determinada por el peso de los residuos sólidos obtenidos al evaporar un volumen conocido de muestra filtrada luego de secarse.

El residuo invariablemente consiste de constituyentes inorgánicos y muy pequeñas cantidades de materia orgánica (Frezee & Cherry, 1979). Tomar un esquema jerarquizado de la concentración de STD en el agua subterránea es muy útil para tener una perspectiva de su calidad y de sus relaciones con la dirección y movimiento del flujo subterráneo. Para clasificar las concentraciones encontradas en la región, se utilizó el esquema de Frezee y Cherry (1979):

Categoría	Sólidos Totales Disueltos (mg/lit o gr/m³)
Agua dulce	0 - 1000
Agua Salobre	1000 - 10,000
Agua Salina	10,000 - 100,000
Salmuera	Más de 100,000

Este parámetro está íntimamente relacionado con la conductividad eléctrica, ya que el agua subterránea es vista como una solución electrolítica porque sus constituyentes mayores y menores están presentes en forma iónica. De aquí que los constituyentes iónicos pueden ser determinados para conocer la capacidad del agua para conducir energía eléctrica.

Considerando que el agua subterránea es un ácido débil, en su movimiento por el subsuelo y al entrar en contacto con los materiales del acuífero, tiene la oportunidad de disolver mas sales conforme avanza. Bajo este esquema, los STD pueden ser útiles para conocer el sentido de enriquecimiento de la concentración y la dirección de flujo subterráneo, esta relación del tiempo de residencia en el acuífero, es representativa de la permeabilidad del medio y por lo tanto de la velocidad de flujo.

Las concentraciones en la región varían entre 200 y 900 mg/lit. Los valores mínimos se localizan en la parte sur-oeste del acuífero, reflejo probablemente de la influencia meteórica de los escurrimientos e infiltración de las laderas.

Al noreste del área los valores se encuentran por debajo de 900 mg/lit, definiendo en todos los casos mencionados zonas de agua de buena calidad. En la parte alta de la subcuenca se obtuvieron valores de 300 a 460 mg/lit marcando una clara tendencia norte-sur de la dirección del flujo de agua subterránea hacia la parte centro de la subcuenca, en la zona baja de la subcuenca los valores oscilan entre 280 a 320 mg/lit disminuyendo la concentración aguas abajo, esto marca el sentido de la dirección del flujo.

Distribución de parámetros físicos y químicos

En apoyo a la interpretación hidrogeoquímica se utilizaron dos principales representaciones; a) Espacial, con la que se muestra la distribución de los diversos elementos mayores, el cual tiene mayor influencia en la composición química del flujo subterráneo y; b) Temporal, con la que se define su carácter típico y se busca la probable evolución de los diversos parámetros presentes en el flujo subterráneo. Adicionalmente se revisa el origen de la presencia de diversos tipos de contaminantes que han degradado en algunas zonas, la calidad del agua subterránea, tales como flúor, manganeso, arsénico y nitratos principalmente.

En el primer caso, la representación espacial se apoya en mapas hidrogeoquímicos de los cuales se describe la distribución de Isopletas (líneas de igual concentración) de elementos mayores, de ellos se elaboraron para Ca, Mg, Na, HCO_3 , Cl y SO_4 , que relacionan los procesos de disolución en el sistema agua-roca y que son apoyo para la interpretación del movimiento del flujo subterráneo.

En el segundo caso, se utilizaron los métodos de Piper y Stiff para caracterizar y zonificar la presencia de diferentes tipos de familias hidrogeoquímicas.

Calcio. Las concentraciones de calcio (Ca^{++}) en las aguas subterráneas, del área son comunes debido a la presencia de rocas que forman el medio geológico. Puede provenir de la liberación de algunos constituyentes de las rocas ígneas, principalmente basaltos y riolitas por el ataque a los minerales del grupo de los feldespatos y plagioclasas, así como resultado de la disolución de rocas calcáreas, en las que el carbonato de calcio se disuelve fácilmente en el agua, a condición de que esta contenga abundantes iones H^+ , lo que se aprecia importante, dados los valores del pH.

La distribución de isolíneas de Ca^{++} muestra el comportamiento espacial de este ión con valores que van de 30 a 200 mg/lit. Al noreste y suroeste de la subcuenca de San Bernardo se encuentran las zonas consideradas como de recarga natural al sistema acuífero, donde predomina la presencia de rocas volcánicas.

Magnesio. Los valores de magnesio en el área, oscilan entre 0.47 a 78.33 mg/lit. Sodio. Se observa una concentración en la parte central del área, los valores son de 30 a 68 mg/lit en las localidades de San Bernardo y Techobampo entre otras.

Bicarbonatos. Las curvas de isovalores de bicarbonatos, muestran que las mayores concentraciones se encuentran en la parte central del área.

Cloruros. Su concentración es regularmente baja, sobre todo en las muestras relacionadas con los subálveos de los arroyos por lo que no rebasan una concentración de 35 mg/lit. Los valores de concentración de Cloruros en el área, varían desde 2.75 a 192.06 mg/lit.

Sulfatos. Estas concentraciones oscilan entre los valores de 5.26 a 743.73 mg/lit, donde las más altas concentraciones se observan en la parte noreste de la subcuenca. Las muestras fueron tomadas en aprovechamientos que se localizan en la parte norte y sur del área, marcando las rutas preferenciales de flujos de recarga del agua subterránea.

Calidad del agua

La calidad del agua se obtiene del resultado de los análisis químicos los cuales son graficados en los diagramas triangulares de Piper, agrupándose las familias de agua de acuerdo al anión y catión predominante. De esta manera para el muestreo que se realizó, se obtuvieron las siguientes familias de agua mostradas según su predominio en el acuífero de San Bernardo.

Familias de Agua

- 1.- Bicarbonatada Cálcica
- 2.- Sulfatada Cálcica
- 3.- Bicarbonatada Sódica
- 4.- Sulfatada Sódica

6 CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

El censo de aprovechamientos subterráneos consistió en la visita de 51 aprovechamientos, iniciando en la parte norte del poblado San Bernardo, específicamente en las cercanías de Chacari y Chorijoa, expandiéndose hasta la localidad de El Tabelo y Los Arenales por el sur.

Los tipos de aprovechamientos censados fueron pozos, norias y manantiales. De los 51 aprovechamientos censados, 3 corresponden a pozos, 46 norias y 1 manantial.

El análisis de los datos refleja las características de las obras, pero además por su ubicación, indican que la unidad hidrogeológica fluvio-aluvial predomina en número de aprovechamientos y es seguida por norias excavadas en rocas granodioríticas lo que indica que el 92% del total de aprovechamientos censados corresponden a extracciones someras. El 6% de los datos corresponde a pozos y el 2% restante para manantiales.

Con relación a los gastos de los aprovechamientos censados, muestran que la mayoría tienen gastos pequeños. Lo anterior tomando en cuenta la estadística de diámetros de descarga. Los datos analizados para este parámetro, indican que el rango de los diámetros de descarga es de 1 a 4".

Los diámetros predominantes son de 1 – 1½", representado por un 26%. Seguido de este, se tienen los diámetros de 2 - 2½ y de 3" en un 16 % cada uno. El 38% restante de los aprovechamientos no cuenta con dato.

Por lo general, la mayoría de las norias alcanzan profundidades entre 20 y 22 m, sin embargo, también existen pozos con profundidades del mismo orden y se clasifican como pozos someros.

En el acuífero San Bernardo, se visitaron norias que alcanzan hasta 23 y 27 m de profundidad. Por el contrario, se visitó un pozo que alcanza únicamente 20 m. En este caso, las profundidades de 1 a 20 m representan el 44 % de los datos, y se clasifican como norias. Para el caso de profundidades mayores de 20 m el 12% de los datos corresponden a pozos someros. El 48% restante no presenta el dato.

Hidrometría del Volumen de Extracción

Los volúmenes de extracción en la cuenca del Río Mayo, particularmente en el acuífero San Bernardo, fueron obtenidos con base en la información recopilada durante el censo de aprovechamientos.

De aquí se obtuvo que el volumen de agua extraída para uso doméstico se estimó en 792,068 m³ anuales, muy por encima del volumen destinado para fines de abrevadero, para el cual se calculó 263,567 m³. Ambas actividades suman un volumen total de extracción anual de 1,055,635 m³.

7 BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

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

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

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

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

$$R_v + E_h - B - S_h - D_m - ETR - fb = \pm \Delta V(S) \quad \text{----} \quad (1)$$

Donde:

Rv: Recarga vertical

Eh: Entradas por flujo horizontal

B: Bombeo

Sh: Salidas por flujo horizontal

Dn: Descargas natural por manantiales

ETR: Evapotranspiración real

fb: Caudal flujo base

$\Delta V(S)$: Cambio en el volumen almacenado

De esta manera, despejando la recarga vertical:

$$R_v = B + S_h + D_m + fb + ETR - \Delta V(S) - E_h \quad (2)$$

Las entradas al acuífero están integradas por las recargas naturales por infiltración de agua de lluvias y recargas inducidas producto de fugas en la red de agua potable. Para el cálculo de la recarga se obtuvo primero el cambio de almacenamiento y conociendo las salidas totales, las entradas (recarga total) quedaron como una incógnita en el sistema.

7.1 Salidas

El volumen total de salidas del acuífero San Bernardo es de **39.7 hm³/año** (Millones de metros cúbicos anuales), distribuido en la forma siguiente:

7.1.1 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

No existen salidas horizontales de este acuífero.

7.1.2 Bombeo (B)

De acuerdo con la información del censo realizado del 7 al 12 de agosto de 2004, donde se visitaron 51 aprovechamientos, de los cuales 3 corresponden a pozos, 46 norias y 1 manantial, y donde el uso doméstico demanda el 48% del agua extraída y el uso abrevadero el 44%; de aquí se obtuvo que el volumen de agua extraída para uso doméstico se estimó en 0.79 hm³, y para fines de abrevadero se calculó 0.26 hm³. Ambas actividades suman un volumen total de extracción de **1.1 hm³/año** (Millones de metros cúbicos anuales).

7.1.3 Evapotranspiración (ETR)

Gran parte de la precipitación que ocurre en el territorio nacional vuelve a la atmósfera como vapor, como resultado de la evaporación, la transpiración y la sublimación. Evaporarse significa que las moléculas de agua, al adquirir suficiente energía por acción de la radiación solar, escapan de la superficie del agua o de un suelo húmedo, pasando del estado líquido al gaseoso.

La transpiración es el agua que después de ser absorbida por las plantas escapa de ellas convertida en vapor. La evapotranspiración representa, tanto al agua que evaporan las superficies húmedas, como la que simultáneamente transpiran las plantas.

La evapotranspiración potencial, es la pérdida de agua que ocurriría si en ningún momento existiera una deficiencia de agua en el suelo para el uso de la vegetación. Se ha encontrado que la evapotranspiración depende de la densidad de cobertura y de su estado de desarrollo.

Para que sea útil, la evapotranspiración potencial debe ser independiente de la naturaleza y condición de la superficie, excepto con respecto a la disponibilidad de humedad, o debe ser definida en términos de una superficie particular.

Para fines de claridad y obtener resultados que se puedan reproducir, existe una buena razón para considerar la evapotranspiración potencial como equivalente a la evaporación de una superficie de agua libre, de grandes proporciones, pero sin capacidad de almacenamiento de calor.

La evapotranspiración tal como fue definida por Thorthwaite, se aproxima a la evaporación de agua libre siempre y cuando haya una cobertura vegetal completa y que los efectos de los factores meteorológicos en las dos superficies sean lo suficientemente parecidos para que se conviertan de la misma manera en evapotranspiración efectiva. La evapotranspiración real (ETR) fue calculada por el método de Turc; esta ecuación empírica se expresa de la siguiente forma:

$$ETR = P / (0.9 + (P^2/L^2)^{1/2})$$

Donde:

ETR: Evapotranspiración real, en mm

P: Precipitación media anual, en mm

L: $300 + 25T + 0.05T^3$

T: Temperatura media anual, en °C

Con el método de Turc se obtuvo un valor medio en la cuenca de 652 mm anuales. Tomando como dato la evapotranspiración, un área de niveles someros de 137.5 km², se tiene el resultado mostrado en la tabla No. 5:

Tabla No. 5. Cálculo de la evapotranspiración

Intervalo curvas (m)	Profundidad considerada (m)	Área (km ²)	%	ETR (m)	Vol. ETR (hm ³ /año)
1 a 2	1.5	0.4	0.85	0.652	0.2
2 a 3	2.5	1.6	0.75	0.652	0.8
3 a 4	3.5	2.7	0.65	0.652	1.1
4 a 4.5	4.25	9.1	0.575	0.652	3.4
4.5 a 5	4.75	16.0	0.525	0.652	5.5
5 a 6	5.5	36.1	0.45	0.652	10.6
6 a 7	6.5	37.6	0.35	0.652	8.6
7 a 8	7.5	34.0	0.25	0.652	5.5
	Área Balance	137.5		ETR =	35.7

Se ha observado que en acuíferos libres con superficie freática cercana a la del terreno, ocurren variaciones diarias de su nivel, a consecuencia de la evaporación y/o transpiración. Ambos fenómenos causan una descarga de agua a la atmósfera, que es prácticamente constante, puesto que la misma tiene una fuerte correlación con la temperatura.

La evaporación que se produce en el agua subterránea es pequeña, excepto en aquellos casos en que la superficie freática se encuentre cerca del terreno. Su magnitud depende de la posición de la franja capilar con respecto a la superficie del terreno.

7.1.4 Caudal flujo base (fb)

Tomado los datos de volúmenes escurridos en miles de m³ para el periodo de 1960 al 2002 en la estación hidrométrica San Bernardo, el periodo de menor precipitación es entre los meses de marzo a junio con los siguientes volúmenes medios: Tabla No 6

Tabla No 6. Flujo Base

Mes	Marzo	Abril	Mayo	Junio
Media	34,863	7,719	2,905	7,829

En el periodo de estiaje escurren 53 hm³, que comprenden un cuatrimestre, $53 * 3 = 159$ hm³, representan el escurrimiento mínimo anual.

Dentro de este cuatrimestre la menor precipitación se presenta en el mes de mayo con **2.9 hm³/año** (Millones de metros cúbicos anuales) por lo que se toma este valor, como caudal base mínimo.

7.2 Cambio de almacenamiento

En el acuífero San Bernardo, Sonora, el cambio de almacenamiento se considera nulo, ya que no existen cambios significativos en los niveles del agua subterránea.

7.3 Entradas

7.3.1 Flujo subterráneo horizontal (Sh)

Dado que no existe información piezométrica confiable para toda la superficie del acuífero que permita definir celdas de entradas por flujo subterráneo horizontal, en apego estricto a la NOM-011-CNA-2015, se decidió calcular las salidas del acuífero y el cambio de almacenamiento para proceder a calcular el valor de las entradas (o recarga total).

Solución a la ecuación de balance

La recarga total (Rt) que recibe el acuífero representa la suma de las entradas calculadas al acuífero (Rv + Eh), resultan de aplicar la ecuación de balance:

$$Eh + Rv = B + Sh + ETR + fb + \Delta V(S) \text{ ----- (2)}$$

$$Rt = (1.1 + 35.7 + 2.9) + 0$$

$$Rt = 39.7 \text{ hm}^3/\text{año}$$

En la tabla No. 6 se resume el balance de aguas subterráneas:

Tabla No. 6. Balance de aguas subterráneas

RECARGA				
Entradas Totales			hm ³ /año	39.7
RECARGA TOTAL		Rt	hm ³ /año	39.7
DESCARGA				
Salidas horizontales			hm ³ /año	0
Caudal base			hm ³ /año	2.9
Evapotranspiración			hm ³ /año	35.7
Extracción total			hm ³ /año	1.1
	Doméstico		hm ³ /año	0.79
	Abrevadero		hm ³ /año	0.26
DESCARGA TOTAL		St	hm ³ /año	39.7
Cambio de Almacenamiento		ΔV	hm ³ /año	0

8 DISPONIBILIDAD

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

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

Donde:

- DMA** = Disponibilidad media anual de agua del subsuelo en un acuífero
R = Recarga total media anual
DNC = Descarga natural comprometida
VEAS = Volumen de extracción de aguas subterráneas

De acuerdo con la Norma, para deducir una recarga media representativa, se planteará el balance a un intervalo de tiempo de varios años en que se disponga de los datos básicos para cuantificar sus términos y que incluya tanto años secos como años lluviosos. En su defecto, el balance se planteará para un intervalo mínimo de un año.

8.1. Recarga total media anual

La recarga total media anual, corresponde con la suma de todos volúmenes que ingresan al acuífero, en forma de recarga natural más la recarga inducida, que para el acuífero San Bernardo, Sonora es de **39.7 hm³/año** (Millones de metros cúbicos anuales).

8.2. Descarga natural comprometida

La descarga natural comprometida, se cuantifica mediante medición de los volúmenes de agua procedentes de manantiales o de caudal base de los ríos alimentados por el acuífero, que son aprovechados y concesionados como agua superficial, así como las salidas subterráneas que deben de ser sostenidas para no afectar a los acuíferos adyacentes. Para el acuífero San Bernardo, la descarga natural comprometida es de **6.5 hm³/año** (Millones de metros cúbicos anuales), que corresponde al 10% de la evapotranspiración y 100 % del flujo base.

8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)

En el acuífero San Bernardo, Sonora, el volumen anual concesionado, al **30 de diciembre de 2022** es de **13,389,254 hm³/año** (Millones de metros cúbicos anuales).

8.4. Disponibilidad de aguas subterráneas

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

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

$$\begin{aligned}\text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 39.7 - 6.5 - 13.389254 \\ \text{DMA} &= 19.810746 \text{ hm}^3/\text{año}.\end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **19,810,746 m³ anuales**.

9 BIBLIOGRAFÍA