



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO RÍO QUELITE (2508), ESTADO DE
SINALOA**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1. GENERALIDADES	2
Antecedentes.....	2
1.1. Localización.....	2
1.2. Situación administrativa del acuífero	4
2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD.....	5
3. FISIOGRAFÍA.....	6
3.1. Provincia fisiográfica	6
3.2. Clima	8
3.3. Hidrografía	9
3.4. Geomorfología.....	9
4. GEOLOGÍA	10
4.1. Estratigrafía.....	11
4.2. Geología estructural	19
4.3. Geología del subsuelo.....	19
5. HIDROGEOLOGÍA.....	20
5.1. Tipo de acuífero.....	20
5.2. Parámetros hidráulicos.....	21
5.3. Piezometría	21
5.4. Comportamiento hidráulico	21
5.4.1. Profundidad al nivel estático	21
5.4.2. Elevación del nivel estático	22
5.4.3. Evolución del nivel estático.....	23
5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea	24
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	26
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	26
7.1. Entradas.....	26
7.1.1. Recarga vertical (Rv).....	27
7.1.2. Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)	27
7.1.3. Recarga incidental(Rr)	29
7.2. Salidas	29
7.2.1. Bombeo (B)	29
7.2.2. Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh).....	29
7.2.3. Evapotranspiración (ETR)	30
7.2.4. Descarga por flujo base de ríos (Dfb)	31
7.3. Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$	32
8. DISPONIBILIDAD.....	33
8.1. Recarga total media anual (R)	33
8.2. Descarga natural comprometida (DNC)	34
8.3. Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)	34
8.4. Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	34
9. BIBLIOGRAFÍA.....	36

1. GENERALIDADES

Antecedentes

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

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

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

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

1.1. Localización

El acuífero Río Quelite, definido con la clave 2508 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción suroriental del estado de Sinaloa, entre los paralelos 23°19'01" y 23°48'06" de latitud norte y 106°09'44" y 106°38'58" de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 1,370km².

Limita al norte y oeste con el acuífero Río Piaxtla; al este y sur con Río Presidio; ambos del estado de Sinaloa. En su extremo suroccidental, su límite natural es el Océano Pacífico (figura 1).

Geopolíticamente, la mayor parte de la superficie que cubre el acuífero se localiza en el municipio de Mazatlán y en menor proporción en el municipio de San Ignacio.

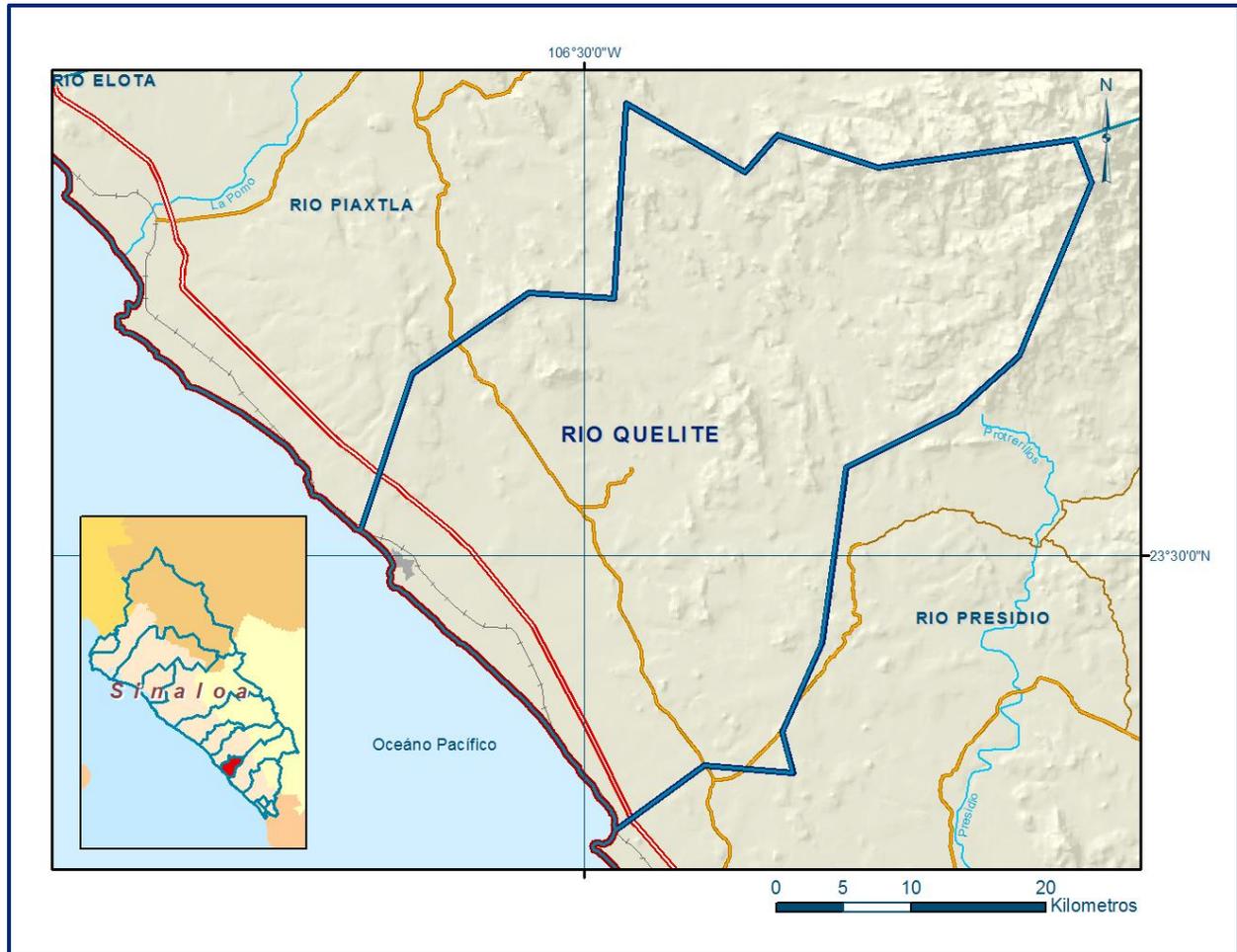


Figura 1. Localización del acuífero

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

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

ACUÍFERO 2508 RIO QUELITE							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	106	10	23.5	23	46	37.9	
2	106	9	43.0	23	44	54.0	
3	106	12	36.6	23	37	57.5	
4	106	15	7.9	23	35	41.5	
5	106	19	32.1	23	33	31.1	
6	106	20	30.0	23	26	30.0	
7	106	22	5.0	23	22	54.9	
8	106	21	39.2	23	21	17.9	
9	106	25	12.1	23	21	34.2	
10	106	28	45.6	23	18	59.9	DEL 10 AL 11POR LA LINEA DE BAJAMAR A LO LARGO DE LA COSTA
11	106	38	56.7	23	30	58.8	
12	106	36	53.7	23	37	15.9	
13	106	32	13.1	23	40	30.5	
14	106	28	48.4	23	40	16.7	
15	106	28	19.6	23	48	4.8	
16	106	23	34.3	23	45	19.2	
17	106	22	16.1	23	46	48.9	
18	106	18	14.7	23	45	31.6	
1	106	10	23.5	23	46	37.9	

1.2. Situación administrativa del acuífero

El acuífero pertenece al Organismo de Cuenca Pacífico Norte y al Consejo de Cuenca Ríos Mocorito al Quelite, instalado el 10 de diciembre de 1999. En el territorio completo que cubre el acuífero no rige ningún decreto de veda para la extracción de agua subterránea. Sin embargo, se encuentra sujeto a las disposiciones del “ACUERDO General por el que se suspende provisionalmente el libre alumbramiento de las aguas nacionales del subsuelo en los 96 acuíferos que se indican”, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 5 de abril de 2013, a través del cual en el acuífero, no se permite la perforación de pozos, la construcción de obras de infraestructura o la instalación de cualquier otro mecanismo que tenga por objeto el alumbramiento o extracción de las aguas nacionales del subsuelo, sin contar con concesión o asignación otorgada por la Comisión Nacional del Agua, quien la otorgará conforme a la Ley de Aguas Nacionales, ni se permite el incremento de volúmenes autorizados o registrados previamente por la autoridad, sin la autorización previa de la Comisión Nacional del Agua, hasta en tanto se emita el instrumento jurídico que permita realizar la administración y uso sustentable de las aguas nacionales del subsuelo.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua, vigente para el año 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 3. El uso principal del agua subterránea es el público-urbano.

En el territorio del acuífero no se localiza distrito o unidad de riego alguna, ni se ha constituido a la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS). En la zona costera se localiza parte del sitio RAMSAR llamado “Laguna Playa Tortuguera El Verde Camacho”, considerado como tal desde el 2 de febrero de 2004; así como parte de la Zona Natural Protegida Meseta de Cacaxtla, decretada el 27 de noviembre de 2000.

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la zona que comprende el acuífero se han realizado estudios hidrogeológicos de evaluación, otros con fines de prospección minera y algunos de cobertura regional en acuíferos vecinos. Entre los más importantes se mencionan los siguientes:

ESTUDIO DE HIDROLOGÍA SUPERFICIAL Y SUBTERRÁNEA EN LOS ARROYOS QUELITE, POZOLE Y PRESIDIO EN MAZATLÁN. ESTADO DE SINALOA. Realizado en 1981 por Técnicas Modernas de Ingeniería, S.A., Consultores para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). Entre sus actividades más relevantes destacan censo y piezometría, sondeos geofísicos, muestreo de agua para análisis fisicoquímicos y ejecución de 17 pruebas de bombeo. Plantea el balance de aguas subterráneas y calcula una recarga media anual de 97.5 hm³.

ESTUDIO DE ACTUALIZACIÓN GEOHIDROLÓGICA DE LOS ACUÍFEROS DE LOS RÍOS ELOTA, PIAXTLA Y QUELITE, SINALOA. Realizado en 2001 por PROTYC, S.A. DE C.V. para la Comisión Nacional del Agua. Entre sus actividades más relevantes destacaron el censo de aprovechamientos, piezometría, realización de pruebas de bombeo y toma de muestras de agua subterránea para análisis fisicoquímicos. En el acuífero Río Quelite se identificaron 124 aprovechamientos que en total extraían un volumen anual de 8.0 hm³. Como resultado del balance se calculó una recarga media anual de 17.9 hm³ con un volumen de salidas totales de 17.9 hm³.

INTEGRACIÓN DEL ESTUDIO TÉCNICO JUSTIFICATIVO DE LOS ACUÍFEROS RÍO ELOTA CLAVE 2506, RÍO PIAXTLA CLAVE 2507, RÍO QUELITE CLAVE 2508, RÍO BALUARTE CLAVE 2510 Y LAGUNA AGUA GRANDE CLAVE 2512, EN EL ESTADO DE SINALOA. Realizado en 2014 para la Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca Pacífico Norte, por SANX Ingeniería Integral y Desarrollo, S.A. de C.V. (SIIDSA). Su objetivo general fue integrar los estudios técnicos que permitan

determinar las causales de interés y utilidad públicos necesarios para la fundamentación y motivación que requiere la emisión del ordenamiento de los acuíferos. Adicionalmente incluyó actividades de campo como piezometría, ejecución de pruebas de bombeo, sondeos geofísicos y toma de muestras de agua para análisis fisicoquímicos.

INFORMACIÓN PIEZOMÉTRICA DEL ACUÍFERO RÍO QUELITE, SINALOA. Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca Pacífico Norte, 2019. Se utilizó la información piezométrica para la elaboración de las configuraciones del nivel estático.

El último estudio y la piezometría obtenida por el Organismo de Cuenca Pacífico Norte, son la base para la elaboración del presente documento.

3. FISIOGRAFÍA

3.1. Provincia fisiográfica

De acuerdo a la clasificación fisiográfica de Erwin Raisz (1959), modificada por Ordoñez (1964), el área que cubre casi la totalidad del acuífero se localiza en la Provincia Fisiográfica "Sierra Madre Occidental", que se caracteriza por un conjunto de sierras con orientación NW-SE y E-W, que presentan una flexión al N-S. La porción costera pertenece a la Provincia Fisiográfica "Llanura Costera de Sinaloa". Por otro lado, según la regionalización fisiográfica del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), el acuífero se localiza en la Provincia Fisiográfica Sierra Madre Occidental, Subprovincias Mesetas y Cañadas del Sur y Pie de la Sierra; y en la Provincia Llanura Costera del Pacífico, Subprovincia Llanura Costera de Mazatlán.

La Sierra Madre Occidental (SMO) es una cadena montañosa que abarca todo el oeste mexicano y el extremo suroccidental de los Estados Unidos. En sus 1500 km de longitud recorre Arizona, parte de Sonora, Chihuahua, Sinaloa, Durango, Zacatecas, Aguascalientes, Nayarit y Jalisco, lugar donde se une al Eje Volcánico Transversal de México. Cubre 289,000 km² y ocupa la sexta parte del territorio mexicano. Su punto más alto es el Cerro Gordo ubicado en Durango, su ancho promedio es de 150 km, con alturas de hasta 3,000 msnm. Presenta una orientación NW-SE y comprende la porción oriental del estado de Sinaloa; es una extensa meseta formada por rocas volcánicas disectada por fallas normales y grabens, cuyo borde occidental se caracteriza por presentar una terminación abrupta con fallas normales que presentan grandes desplazamientos y zonas de barrancas profundas. La Subprovincia Mesetas y Cañadas del Sur está formada por mesetas altas interrumpidas de manera abrupta por profundos cañones y cañadas que son el resultado del tectonismo y de la erosión

fluvial sobre los diversos tipos de rocas volcánicas y vulcanoclásticas que conforma la sierra. Presenta superficies de meseta en promedio más altas que las del resto de la provincia, cañones paralelos y alternos a las superficies de meseta, interrumpidos en ocasiones por valles de laderas tendidas que, río abajo, vuelven a encañonarse; está drenada por corrientes fluviales que escurren hacia el sur y vierten sus aguas en el Río Grande de Santiago o desembocan en la Llanura Costera del Pacífico.

La Subprovincia Pie de la Sierra se extiende como una franja angosta en el oeste de la SMO y tiene una orientación NW-SE. Se caracteriza por presentar sierras y lomeríos con litología similar a la de la subprovincia Mesetas y Cañadas del Sur, aunque mucho más heterogénea, ya que tiene unidades de granito, andesita, basalto y conglomerado; asimismo, las sierras son de altitud menor que las de dicha subprovincia, las mesetas son escasas, dominan los lomeríos bajos disectados, y los valles, algunos de ellos muy llanos; se trata de una región transicional entre la Sierra Madre Occidental y la Llanura Costera del Pacífico, pero presenta una afinidad genética y morfológica mucho mayor a la primera.

La Provincia Fisiográfica Llanura Costera de Sinaloa se caracteriza por ser una extensa llanura en forma de cuña, que comienza al sur, en Mazatlán, que se va haciendo más extensa al norte hasta alcanzar su ancho máximo en Los Mochis. Forma un plano inclinado hacia el suroeste que ocasiona que los ríos en ella tengan en su curso una dirección casi normal a la costa. Estos ríos son: Canoas, Rosario, Quelite, Piaxtla, Elota, San Lorenzo, Culiacán o Tamazula, Mocorito, Sinaloa y Fuerte. Presenta abanicos aluviales, antiguos valles fluvio-deltaicos, pequeñas colinas constituidas por rocas pre-deltaicas, deltas actuales, estuarios, complejos lagunares, cauces de ríos y arroyos, depósitos eólicos y marinos, las cuales pueden ser clasificadas como unidades fisiográficas en cuanto al ambiente de formación como: continentales, fluviales, mixtas o de transición, eólicas y marinas.

La Subprovincia Llanura Costera de Mazatlán presenta las menores pendientes y está conformada por materiales de arrastre fluvial y de oleaje complejos, dominada por una llanura irregular con lomeríos bajos y muy modelados por la acción eólica y marina, con grandes llanuras de inundación, lagunas y pantanos, que conforman la interface marino-terrestre fluvial.

3.2. Clima

Con base en la clasificación climática de Köppen, modificada por Enriqueta García en 1981 para las condiciones particulares de la República Mexicana, se puede afirmar que los climas en la zona sur del estado de Sinaloa, están definidos por franjas paralelas a la planicie costera. En la superficie del acuífero se identifican dos tipos de clima: Semiárido cálido BSt(h´)hw y Cálido subhúmedo Aw0.

En la porción sur del acuífero el clima predominante es de tipo BSt (h´)hw semiárido cálido, con temperatura media anual entre 12 y 18 °C, temperatura del mes más frío entre -3 y 18 °C, temperatura del mes más caliente menor de 22 °C; presenta régimen de lluvias de verano y un porcentaje de lluvia invernal del 5 al 10.2% del total anual.

En la región central y norte el clima es Aw0 cálido subhúmedo, con precipitación del mes más seco entre 0 y 60 mm; índice P/T menor de 43.2. En el extremo nororiental serrano el clima es Aw1(w), también cálido subhúmedo, con índice P/T entre 43.2 y 55. En ambos el régimen de lluvias es en verano, temperatura media anual mayor de 22°C, temperatura del mes más frío mayor de 18°C y porcentaje de lluvia invernal del 5 al 10.2% del total anual.

La zona de estudio está expuesta a dos regímenes de precipitación: las lluvias de verano y las de invierno; las primeras son producidas por la temporada normal de lluvias y eventos hidroclimatológicos extremos, como los ciclones, los cuales se presentan con regularidad; generalmente estas lluvias se presentan en los meses de junio a octubre; suelen ser intensas y de corta duración, generando fuertes avenidas. La segunda temporada de lluvias es invernal, producida por los frentes fríos que se presentan durante los meses de noviembre a enero, de menor intensidad que las de verano. El período de estiaje, donde las precipitaciones son prácticamente nulas, ocurre de febrero a mayo.

Para la determinación de las variables climatológicas se cuenta con información de 6 estaciones climatológicas que tienen influencia en el área del acuífero: El Quelite, El Quemado, La Noria, El Limón, José Aceves y Siqueros, un periodo de registro que comprende de 1965 a 2015. Con estos datos y utilizando el método de Polígonos de Thiessen, se determinaron valores de precipitación y temperatura media anual representativos del área de balance de **692.1 mm** y **25.3 °C** respectivamente. De igual manera, con respecto a la evaporación potencial, se obtuvo un valor promedio de **1,850 mm anuales**.

3.3. Hidrografía

El acuífero Río Quelite se encuentra ubicado en la Región Hidrológica 10 "Sinaloa", Subregión Hidrológica Presidio-Baluartes y Cañas, cuenca Elota-Piaxtla-Quelite. Una pequeña área de la porción oriental pertenece a la cuenca hidrográfica del Río Presidio, subcuenca del río Quelite; que conforman la superficie del acuífero son las de los ríos Quelite. Una pequeña porción del extremo occidental, se localiza en la subcuenca del río Piaxtla.

En el territorio que cubre el acuífero la mayoría de las corrientes superficiales son de régimen intermitente; existen ríos perennes, lagunas y zonas inundables. La principal corriente superficial es el río Quelite.

El Río Quelite nace en la región central de la división entre los municipios de Mazatlán y San Ignacio. Inicia su recorrido con el nombre de Río Quelite, en sentido noreste-suroeste en un sitio situado aguas abajo hacia el poblado La Sábila; y de ahí desvía su curso al sur. Aguas abajo del poblado El Quelite, el río tiene adopta una dirección al suroeste recibiendo varios afluentes; por su margen izquierda recibe aportaciones del Arroyo Grande, y por su margen derecha los Arroyos La Tasajera y El Tunal, cuya unión se encuentra al norte; a partir de dicha confluencia toma el nombre de Río Quelite. Aguas abajo, por su margen izquierda recibe aportaciones del Arroyo Las Chicuras siguiendo su trayecto hasta la comunidad El Quemado, donde continúa su dirección al suroeste hasta su desembocadura en el Océano Pacífico. Tiene una longitud de recorrido de alrededor de 59.5 km desde el sitio donde toma su nombre hasta su desembocadura en el Océano Pacífico. No existe infraestructura hidráulica para el aprovechamiento de los escurrimientos superficiales.

3.4. Geomorfología

En la superficie que cubre el acuífero se distinguen las siguientes unidades geomorfológicas: lomeríos, sierras, mesetas, abanicos aluviales, cauces fluviales, valles deltaicos, lagunas litorales, bermas, manglares, dunas y playas, relacionadas con el origen y naturaleza de las rocas y depósitos que las conforman. Las mayores elevaciones topográficas conforman las sierras y mesetas constituidas por las rocas volcánicas ácidas de la Sierra Madre Occidental y las rocas intrusivas que forman parte de Batolito de Sinaloa, de naturaleza granítica y granodiorítica.

Las rocas metamórficas consisten de esquistos y pizarras de edad Paleozoico, mientras que las rocas sedimentarias marinas están representadas por calizas con intercalaciones de margas y lutitas de edad cretácica. Estas rocas dan origen a un relieve muy variado, los granitos forman principalmente lomeríos, y los materiales volcánicos dan origen a las sierras y mesetas.

En la zona de transición con la sierra madre occidental, la planicie costera presenta una topografía de lomeríos aislados de más de 50 metros de altura, que disminuyen gradualmente a 10 m en promedio, hasta volverse semiplana, en dirección hacia la línea de costa. Los valles son estrechos en forma de “v” y las corrientes presentan gradientes altos que las ubica en una etapa juvenil.

En la zona de planicie, el río Quelite ha depositado materiales deltaicos, formando numerosos meandros que hacia su desembocadura presentan cursos divagantes, dejando huellas de antiguos cauces. Estos cauces por lo general tienen la forma típica de “u” por lo que se considera a la planicie en etapa de madurez avanzada.

4. GEOLOGÍA

El basamento de la región está dominado por una secuencia vulcanosedimentaria metamorfizada, conformada por pizarras, filitas, cuarcitas y esquistos con algunos horizontes lávicos intercalados. Estas rocas se han ubicado en el Paleozoico por correlación y similitud litológica con la Formación San José de Gracia (Carrillo M., 1971) del norte de Sinaloa. Esta secuencia subyace discordantemente a las rocas del Cretácico Inferior-Superior. El Cretácico Inferior consta de rocas andesíticas y le sobryace en contacto concordante un paquete de rocas calcáreas arrecifales de estratificación masiva, que ha sido datada por su contenido fósil en el Albiano (Holguín, 1978); sin embargo, se ha observado que al norte del estado estos cuerpos calcáreos tienen un rango estratigráfico mayor que abarca hasta el Cenomaniano-Turoniano y ocasionalmente en el Maestrichtiano (Perkins, 1969) (figura 2).

El Paleoceno-Eoceno está representado por una secuencia de andesitas y tobas andesíticas, seguido por un periodo de erosión que originó el relleno de pequeñas cuencas continentales con conglomerado polimíctico de edad Eoceno-Oligoceno en donde los componentes derivan de las secuencias cretácicas y de los derrames andesíticos. El Oligoceno-Mioceno está caracterizado por rocas ignimbríticas y tobas riolíticas que cubren discordantemente al conglomerado polimíctico ya los derrames andesíticos,

Descansando sobre el paquete riolítico se tiene una secuencia vulcanoclástica constituida por una alternancia de areniscas y limolitas de la Formación San Ignacio (Fredrickson, G., 1974); donde sus constituyentes provienen de rocas volcánicas y de material ignimbrítico. Por último, se tiene un conglomerado polimíctico constituido por clastos de las rocas preexistentes, que cubre parcialmente en discordancia a la secuencia vulcanoclástica y a las secuencias volcánicas descritas anteriormente. El Cuaternario está constituido por derrames basálticos, depósitos aluviales, lagunares y eólicos.

Las rocas intrusivas forman parte de gran Batolito de Sinaloa, cuyas edades obtenidas abarcan un rango de 100 a 27 Ma, aunque se han obtenido edades aisladas de 135 Ma y 18 Ma. Christopher, D.H., 1975, divide a los cuerpos intrusivos en dos grandes grupos: Intrusivos sintectónicos cuya edad es mayor de 85 Ma y fueron emplazados durante un periodo de compresión regional; intrusivos postectónicos, no foliados y con edades menores de 85 Ma. Los cuerpos intrusivos están afectados por generaciones de diques aplíticos y andesíticos, así como por pórfidos dioríticos y por cuerpos de composición ultrabásica, en los cuales es común la mineralización de cobre, cromo y níquel (Carta Geológico-Minera Mazatlán F13-1. Escala 1:250,000. SGM, 1999).

4.1. Estratigrafía

La estratigrafía de las unidades que afloran en la superficie cubierta por el acuífero comprende edades que varían del Precámbrico-Paleozoico al Holoceno y está constituida por rocas volcánicas e intrusivas, metamórficas y sedimentarias (figura 2). La sucesión de eventos magmáticos ocurridos se encuentra cubriendo, mediante una discordancia petrológica, a escasos afloramientos de rocas sedimentarias del Cretácico Inferior y Superior. El magmatismo inicia en el Oligoceno y continúa de manera interrumpida hasta el Holoceno.

Las rocas más antiguas que afloran en la región y que constituyen el basamento geológico, están formadas por esquistos y pizarras pertenecientes a la formación conocida como Complejo Sonobari; el cual se encuentra afectado por un intrusivo ácido de edad cretácica perteneciente al batolito que aflora en Sonora y Sinaloa, compuesto por granitos, granodioritas, monzonitas y tonalitas. Sobreyaciendo en forma discordante a estas rocas, descansa un paquete de calizas marinas con intercalaciones de margas y lutitas de edad Cretácico.

El Terciario se encuentra representado por rocas volcánicas, vulcanoclásticas de composición que varía de ácida a básica y una unidad de tobas, areniscas y conglomerados estratificados y cementados con un buzamiento regional hacia el noroeste, denominados como Formación Báucarit, de origen continental.

El Cuaternario presenta depósitos de sedimentos clásticos de origen aluvial y fluvial, constituidos por gravas, arenas, limos y arcillas, que se encuentran mezclados entre sí en diferentes porcentajes y en ocasiones en horizontes puros, que conforman diferentes unidades fisiográficas. Los depósitos sedimentarios están constituidos por conglomerados del Terciario, parcialmente cubiertos por materiales aluviales y depósitos fluviales del Cuaternario; rellenan toda la planicie y son muy heterogéneos en cuanto a su litología, grado de cementación y propiedades hidráulicas. Su espesor es mayor de 200 m en las porciones centrales de la planicie y se acuña en dirección de la sierra, así como hacia los cerros dispersos que se localizan en la región.

PRECÁMBRICO-PALEOZOICO

Complejo Sonobari

Las rocas más antiguas corresponden a un complejo metamórfico o meta plutónico correlacionado con el Complejo Sonobari, constituido por gneises anfibolíticos, metatonalitas y metadioritas con un alto grado de deformación; tentativamente se les asigna una edad Precámbrico, aflora a manera de "colgantes" en un intrusivo granodiorítico, por lo que se desconoce su relación con las demás unidades.

PALEOZOICO METASEDIMENTARIO

El basamento stratigráfico de la región está constituido por una secuencia metamórfica de filitas, esquistos, pizarras y cuarcitas con esporádicos horizontes lávicos andesíticos intercalados, cuya edad se ha asignado al Paleozoico por correlación y similitud litológica con la Formación San José de Gracia del norte de Sinaloa. Con este nombre se designa a una secuencia de rocas sedimentarias marinas del Paleozoico que presentan grados de bajo metamorfismo de la facies de esquistos verdes y de anfibolita. En general, la unidad se caracteriza por rocas esquistosas, pizarras, cuarcitas, calizas recristalizadas, pedernal, otras rocas arcillo-arenosas, así como esquistos y pizarras moteadas que indican metamorfismo de contacto, cuyos afloramientos muestran una morfología de lomeríos bajos y redondeados.

En su litología pueden distinguirse dos grupos diferentes de rocas: Las rocas metasedimentarias esquistosas, producto de un metamorfismo de bajo grado, cuya mineralogía indica una facies de anfibolita, en las que los esquistos más comunes son

los de clorita y cuarzo, albita y muscovita o cuarzo- feldespáticos. El otro grupo corresponde a rocas metamórficas de contacto presentadas por esquistos y pizarras moteadas, producto de las aureolas del contacto con los intrusivos que las afectan. Representa, de manera general, un protolito constituido por una antigua secuencia arcillo-arenosa, algunas veces conglomerática, con intercalaciones de rocas carbonatadas, la cual fue afectada por metamorfismo regional y de contacto, plegada, fallada e intrusionada cuando menos en tres ocasiones.

CRETÁCICO

Está representado por las rocas intrusivas, principalmente graníticas y granodioríticas, que forman parte de gran Batolito de Sinaloa, cuyas edades obtenidas abarcan un rango de 100 a 27 Ma, aunque se han obtenido edades aisladas de 135 y 18 Ma. Los cuerpos intrusivos están afectados por generaciones de diques aplíticos y andesíticos, así como por pórfidos dioríticos y por cuerpos de composición ultrabásica, en los cuales es común la mineralización de cobre, cromo y níquel.

TERCIARIO INFERIOR

La litología característica de esta unidad inferior son las lavas andesíticas con textura porfídica y afanítica que presentan color violeta, tobas, aglomerados, sedimentos híbridos, andesitas basálticas y en algunas localidades rocas intermedias y ácidas interestratificadas, las cuales se encuentran generalmente alteradas y oxidadas. Sus afloramientos se presentan en forma de colinas bajas y onduladas, intensamente falladas y fracturadas como producto de la intensa deformación y alteración causada por intrusivos, en discordancia angular con las rocas metamórficas y las calizas del paleozoico, y cubiertas por rocas de composición riolítica. También se presenta una secuencia de rocas volcánicas conformada por andesitas, tobas andesíticas, areniscas tobáceas oxidadas, con escasos afloramientos de dacitas, basaltos, y en menor proporción derrames riolíticos, aglomerados, brechas y materiales piroclásticos de composición intermedia. Asociados frecuentemente a esta unidad y estratigráficamente abajo, se encuentran algunos vitrófidios de color negro. Su morfología característica es la de bloques escarpados con inclinaciones en diversas direcciones y en algunas localidades es común encontrarla muy erosionada. Las rocas de este tipo se correlacionan con las del Complejo Volcánico Inferior (McDowell y Keizer, 1977) que constituyen la base de la Sierra Madre Occidental.

La unidad de rocas ácidas está representada por derrames riolíticos, riolitas, riolacitas, tobas riolíticas y riolacíticas y areniscas conglomeráticas que presentan estructuras vesiculares y amidgaloides y como rasgo característico las estructuras de flujo que forman una secuencia de planos verticales o inclinados en ángulos fuertes. Con frecuencia estos planos de flujo se observan formando pliegues primarios. En el extremo oriental del acuífero, en el estado de Durango, las rocas del Complejo Volcánico Inferior están representadas de la base a la cima por la unidad de andesitas-brechas volcánicas andesíticas, con intercalaciones de ceniza y piroclastos, de edad Paleoceno-Eoceno determinada por datación radiométrica. La secuencia se presenta afectada por un intrusivo de composición granítica-granodiorítica.

TERCIARIO MEDIO

Está representado por una secuencia de rocas de origen vulcanoclásticas constituida por arenisca, limo, areniscas tobáceas, aglomerado, tobas, lavas ácidas y tobas líticas, que en su mayor parte presentan un color rojizo a verdoso. Se presentan como estratos tabulares de espesores que varían de 3 a 30 cm, como intercalaciones conglomeráticas en espesores variables de unos centímetros a varios metros; pueden reconocerse estructuras primarias como grietas de lodo, gotas de lluvia, horadaciones, estratificación cruzada, estratificación gradual, así como estratos limotílicos y lutíticos.

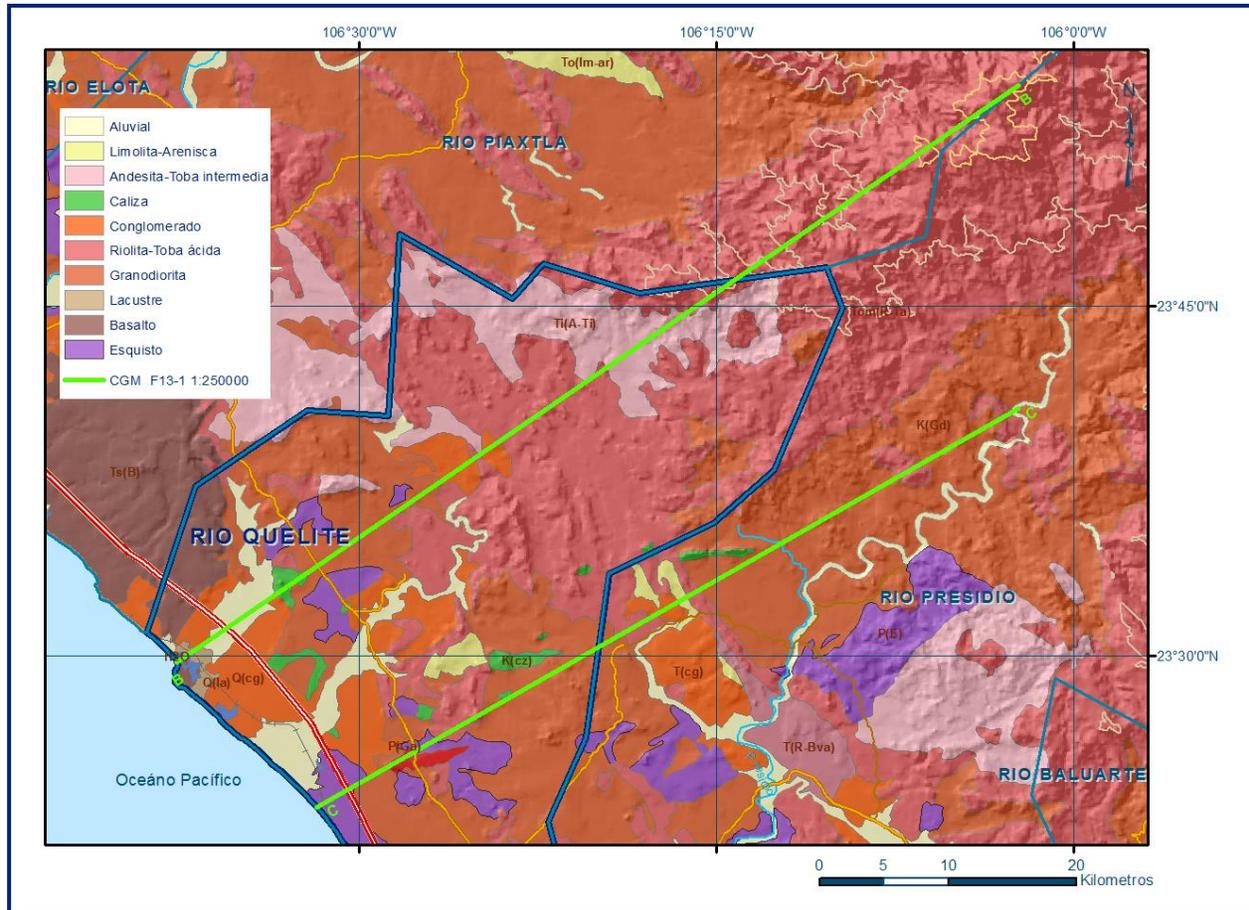


Figura 2. Geología general del acuífero

TERCIARIO SUPERIOR

En su base se presentan rocas volcánicas y piroclásticas de composición riolítica más jóvenes, entre las que destacan las ignimbritas. La riolita, es la litología volcánica más extendida en el área, en la que se observa la estructura fluidal que consiste en una masa oscura de grano fino entre lentes y trazas de color rosa y ocasionalmente fenocristales de feldespatos. Su morfología es muy distintiva, ya que forma grandes mesetas inclinadas generalmente hacia el poniente. Dataciones radiométricas de rocas de esta unidad indican una edad de 13 Ma por lo que probablemente representan el intervalo comprendido entre la parte superior del Terciario Medio y la inferior del Terciario Superior. Estas rocas se correlacionan con las del Supergrupo Volcánico Superior (McDowell y Keizer, 1977).

En la porción del acuífero que se localiza en el estado de Durango, las rocas del Supergrupo Volcánico Superior están conformadas en su base por una brecha volcánica riolítica y hacia la cima por tobas riolíticas, con intercalaciones de tobas

piroclásticas y ceniza de lapilli, cuya edad se asignó al Oligoceno mediante dataciones radiométricas.

La unidad está afectada por cuerpos intrusivos hipabisales de composición diorítica y riolítica de edad Oligoceno y domos riolíticos exógenos de edad Oligoceno Tardío, ambas edades fueron determinadas por medio de sus relaciones de campo. Sobreyace discordantemente a las secuencias volcánicas anteriores la unidad de tobas riolíticas-ignimbritas, que forma parte del Grupo El Salto-Espinazo, de edad Terciario Mioceno determinada por medio de dataciones radiométricas. Estas rocas se encuentran afectadas por una unidad de forma cómica, de composición riolítica, conocida como Las Adjuntas, cuya edad es Mioceno Temprano, según datación radiométrica de K-Ar de 27.7 ± 0.3 Ma. El Terciario clástico está conformado por un espesor considerable de limos, areniscas tobáceas y conglomerados, con horizontes delgados de piroclastos y en ocasiones con lavas. Las rocas de esta unidad descansan en discordancia sobre rocas más antiguas. Frecuentemente su contacto es tectónico, en otros descansa en contacto erosional sobre rocas de la unidad intrusiva ácida. La edad de las rocas de la base del Terciario y las de la unidad terciaria inferior volcánica, o unidad terciaria ácida no varían mucho, lo más probable es que representen una transición entre la mayoría de las unidades terciarias, tanto vertical como lateralmente.

Conglomerado Polimíctico

Secuencia conglomerática que rellena las depresiones de los valles y presenta intercalaciones de basaltos. El conglomerado está constituido por clastos de roca mal clasificados de variada composición y tamaño, de 1 a 20 cm. La composición de los clastos está en función del paquete rocoso que lo delimita, se aprecia cierta gradación y alternancia en la secuencia de depósito que gradúa de finos a gruesos, aunque en la mayoría de los casos se manifiesta como depósito caótico.

Está compuesto por fragmentos líticos mal clasificados, de color gris claro-amarillento a rojizo, la forma de estos clastos es angulosa y subangulosa de tamaño variable, cementados por una matriz areno-arcillosa, areno-tobácea y carbonatada de pigmentación rojiza. Considerando su posible correlación con la Formación Báucarit, se puede considerar que la secuencia pertenece a una facies clástica que comprende conglomerados polimícticos y areniscas, asociados a la formación de un abanico aluvial. Por otro lado, su origen también se asocia al proceso distensivo que dio origen a las depresiones y por consiguiente a los clásticos que rellenan estas fosas.

Formación Metates

Nombre fue propuesto por Córdoba (1963) para referirse a los derrames de basalto con olivino que sobreyacen en discordancia erosional con la Formación Río Chico. El autor sitúa la localidad tipo en el km 990 de la carretera Durango-Mazatlán, en las cercanías del poblado Metates y le atribuye una edad correspondiente al Paleógeno Superior. Se encuentra en discordancia con las rocas riolíticas, en forma de pequeños afloramientos de basalto de escasa potencia que presentan una coloración gris oscura, intemperizando a gris rojizo. En los trabajos consultados, algunos autores mencionan que estos basaltos son correlacionables con los de la Formación Guadiana.

CUATERNARIO

Formación Guadiana

Albritton (1958) asigna el nombre de Formación Guadiana a los derrames de basaltos que afloran a 25 km al este de la ciudad de Durango, en el poblado Saltito de La Constancia. Está constituida por derrames de brecha basáltica; basalto de color oscuro en superficie fresca que intemperiza a café oscuro, de textura afanítica con estructura vesicular, con presencia de olivino de color amarillo verdoso; su localidad tipo se encuentra en la población de Cárdenas, localizada al SW de la ciudad de Durango, en donde se encuentra constituida exclusivamente por gravas con lentes arenosos, con un espesor que varía de 6 a 12 m. Por otra parte, es sobreyacida por sedimentos aluviales recientes, distinguiéndose de éstos por su textura gravillenta y arenosa de color café claro parcialmente cementados por caliche, así como por la presencia de huesos y dientes de vertebrados de edad Pleistoceno.

Por la similitud litológica y posición estratigráfica, los basaltos del área se correlacionan con los de la localidad tipo, que se ubican en el Pleistoceno. Según Lyons (1975) la emisión de los basaltos ocurrió después del segundo colapso de la Caldera Chupaderos. Representan la última actividad volcánica del Neógeno y cubren grandes extensiones de terreno; por su color y forma son fáciles de identificar en campo. Se presentan en forma de derrames intercalados en el Conglomerado Polimíctico; volcanes y conos cineríticos. Los basaltos son de color gris oscuro a negro de textura afanítica que varía a fanerítica, puede ser compacta o vesicular dependiendo de su génesis, contiene plagioclasa sódica con cristales de olivino y ferromagnesianos. Afloran en el extremo nororiental del acuífero, en el límite con los acuíferos Valle del Guadiana y Valle de Acaponeta-Cañas.

DEPOSITOS SEDIMENTARIOS

Los sedimentos de esta edad son los que cubren la mayor superficie de la porción media y llanura costera del acuífero. Están conformados por diferentes unidades. Depósitos conglomeráticos de talud, pie de monte y abanicos aluviales que se localizan hacia las estribaciones de las elevaciones topográficas; están constituidos por peñascos, bloques y guijarros de composición variable.

Las gravas y conglomerados que constituyen a los abanicos aluviales y depósitos de talud son fragmentos angulosos y redondeados, de 20 cm hasta 1.0 m de diámetro, de composición volcánica intrusiva contenidos en una matriz arenosa o tobácea y ocasionalmente bien cementadas. Por su origen presentan una mala clasificación lo que ocasiona que su permeabilidad sea variable, dependiendo del contenido arcilloso y grado de compactación. Morfológicamente, se presentan como lomeríos de suave relieve.

Las llanuras deltáicas se conforman de conglomerados, sedimentos arenosos y arenolimosos que presentan una clasificación pobre y estratificación cruzada, en ocasiones con abundante materia orgánica. Las arenas y arcillas de origen fluvial, son depositadas por los ríos y arroyos al divagar en la planicie costera antes de desembocar en el mar. Forman parte de la llanura costera y presentan un relieve suave caracterizado por lomeríos remanentes de la superficie preexistente. Incluye también las acumulaciones arenosas de origen eólico, que han quedado fuera de la fuente de aporte de sedimento y que han sido fijadas por la vegetación, formando dunas estabilizadas, o bien por la acción de las aguas circulantes.

Depósitos aluviales se ubican en la porción media del valle y consisten de gravas y arenas de variada granulometría, así como limos y arcillas de origen aluvio-fluvial. Estos depósitos aluviales junto con los de la llanura deltaica constituyen el acuífero principal, de permeabilidad variable cuyo espesor total no se ha determinado. Los depósitos arenosos de origen marino que indican el carácter progradante de la línea de costa (bermas o terrazas) fueron formados por la acción del oleaje y mareas que aportan los sedimentos hacia la alta playa y paulatinamente quedan fuera del alcance de la erosión marina. En general, están constituidos por arena de grano medio a fino, con dimensiones medias de 0.5 a 12 mm, con presencia de conchas fracturadas de pelecípodos en cantidades variables.

Sedimentos limosos y arcillosos constituyen lodos negros ricos en materia orgánica que se localizan en las zonas bajas, próximas a la desembocadura de los ríos y lagunas y están sujetos a la acción de las mareas y al flujo del río. Los sedimentos arenosos y arena limosos se localizan en albardones, las gravas en el lecho de los canales fluviales y ocasionalmente en la llanura de inundación. Por último, en amplias áreas bajas sin relieve, localizadas tierra adentro de las lagunas y barreras litorales inundables por la acción de las mareas, se presentan sedimentos finos, arenas de grano medio a fino y limos que conforman llanuras de inter-marea; son identificadas en su límite superior por un pequeño escarpe de erosión causado por la acción erosiva de la marea ascendente y oleaje por viento.

4.2. Geología estructural

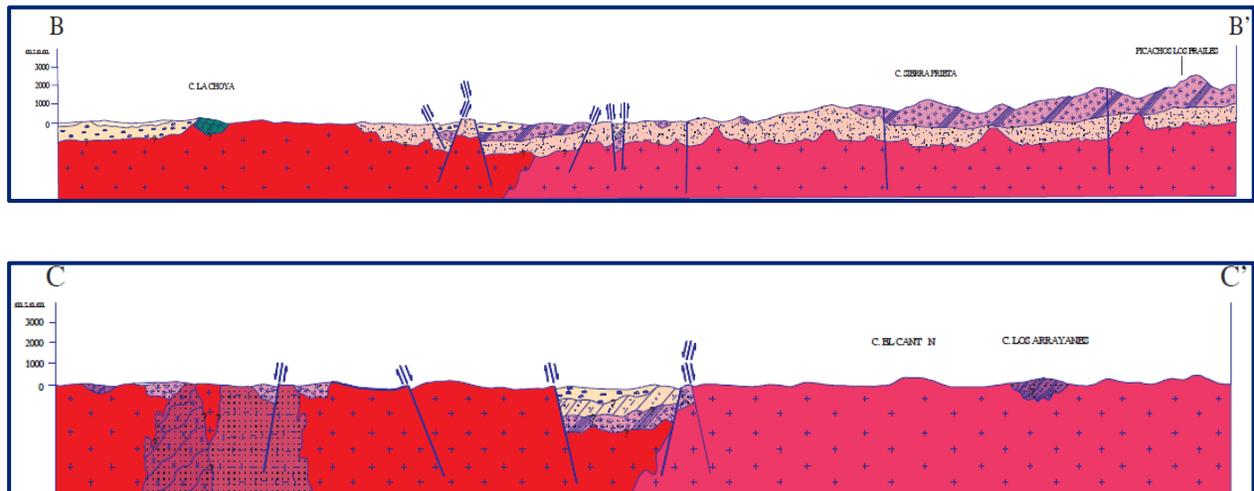
Estructuralmente la región está afectada principalmente por fallamientos de orientación NW-SE y NE-SW. Este último puede ser el más antiguo y tener su origen en la componente compresiva de la Orogenia Laramide. Al cese de los esfuerzos laramídicos la región entra en un periodo de relajamiento por procesos isostáticos y se genera una serie de fallamientos en sentido ortogonal al esfuerzo, que dieron origen al fallamiento de rumbo NW-SE. Es muy probable que este fallamiento se haya reactivado durante la apertura del Golfo de México. El fallamiento NE-SE constituye una serie de fosas y pilares tectónicos escalonados que se observa en la región de San Ignacio y en general en el límite de la planicie costera y la Sierra Madre Occidental. Al oriente de San Pablo este fallamiento tiene desplazamientos laterales, predominantemente dextrales. El sistema estructural de dirección NE-SW, provoca desplazamientos de bloques e interrupción de estructuras.

Existe un tercer fallamiento de orientación ENE-WSW, que tiene una edad comprendida entre 30 y 10 Ma que se considera anterior a la formación de las sierras y valles (Zoback et al., 1981). Una posible explicación es que puede ser la continuidad en continente de las fallas transformantes. Las estructuras anulares observadas en la interpretación de imágenes de satélite son generalmente abiertas, con diámetros entre 1 y 12 km, posiblemente relacionadas a calderas o intrusiones dómicas y a conos volcánicos producto del último evento magmático en la región (Carta Geológico-Minera Mazatlán F13-1. Escala 1:250,000. SGM, 1999).

4.3. Geología del subsuelo

De acuerdo con la información geológica, hidrogeológica y geofísica recabada en el acuífero y por correlación con acuíferos vecinos, es posible definir que el acuífero se

encuentra constituido, en su porción superior, por sedimentos aluviales, fluviales, eólicos, de pie de monte y lacustres, de granulometría variada, producto del intemperismo de rocas preexistentes, así como por conglomerados polimícticos que rellenan los valles. Esta es la unidad que se explota actualmente para satisfacer las necesidades de agua de la región. Los depósitos granulares y conglomeráticos tienen varios cientos de metros de espesor y fueron, en gran parte, el relleno de depresiones o cuencas formadas en fosas tectónicas que se produjeron durante la revolución laramídica. La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas volcánicas como tobas ácidas, riolitas, ignimbritas, andesitas y basaltos que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento. Las fronteras al flujo subterráneo y el basamento geohidrológico del acuífero están representados por las mismas rocas volcánicas, al desaparecer el fracturamiento, y por rocas intrusivas del Batolito de Sinaloa (figura 3).



FUENTE: Carta Geológico-Minera: F13-1 "Mazatlán" Escala 1:250.000 (SGM, 1999).

Figura 3. Secciones Geológicas Esquemáticas

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1. Tipo de acuífero

Las evidencias geológicas, geofísicas e hidrogeológicas permiten definir la presencia de un acuífero **tipo libre** heterogéneo y anisótropo, constituido en su porción superior por sedimentos aluviales, fluviales, eólicos, de pie de monte y lacustres, así como por conglomerados polimícticos, cuyo espesor puede alcanzar decenas de metros en el centro del valle. La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas volcánicas entre las que destacan las tobas ácidas, riolitas, ignimbritas, andesitas y basaltos, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento.

5.2. Parámetros hidráulicos

Como parte de las actividades del estudio realizado en el 2014, se ejecutaron 16 pruebas de bombeo, 6 en ese acuífero, 4 en Río Piaxtla y 6 en Río Baluarte, además de 3 más llevadas a cabo en 2013 en el acuífero Río Presidio, así como otras más de estudios previos(SARH,1981); todos ellas de corta duración en etapa de abatimiento y recuperación, en acuíferos que tienen el mismo origen, evolución y constitución geológica. De los resultados de su interpretación por métodos analíticos convencionales se establece que los valores promedio de transmisividad varían entre **54.0×10^{-3}** y **$2.0 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$** , y la conductividad hidráulica registra valores de **3.9×10^{-3}** a **$8.3 \times 10^{-6} \text{ m/s}$** , (**337.0 a 0.7 m/d**), que se asocian a sedimentos de granulometría media a fina. El valor del coeficiente de almacenamiento obtenido de las pruebas de bombeo realizadas en 2013, en Río Presidio varía de 0.03 a 0.21. Para el propósito del balance de aguas subterráneas, se consideró un valor promedio de rendimiento específico **Sy** de **0.15**.

Los valores más bajos de estos parámetros se asocian a los sedimentos clásticos de granulometría más fina y los más altos a los depósitos aluviales de mayor granulometría que conforman el cauce de los ríos, arroyos y sus planicies de inundación.

5.3. Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, se cuenta con la información recabada como parte de las actividades de los estudios realizados en 2014, además de registros históricos durante el periodo 2003-2019, obtenidos por el Organismo de Cuenca Pacífico Norte, en la red de monitoreo piezométrico. Para el planteamiento del balance de aguas subterráneas se eligió el periodo 2008-2019 que tiene mayor y mejor distribución espacial. Debido a que los niveles estáticos se han mantenido más o menos constantes, únicamente se describen las configuraciones del 2019.

5.4. Comportamiento hidráulico

5.4.1. Profundidad al nivel estático

La profundidad al nivel del agua subterránea en el año 2019 presentó valores que variaron de 2 a 8 m, los cuales se incrementan por efecto de la topografía de la zona costera y del cauce de ríos y arroyos hacia las estribaciones de las sierras que limitan el valle. Los niveles estáticos más someros, menores de 3 m, se registran en la zona costera y a lo largo del cauce del Río Quelite, desde el sur del poblado El Quemado

hasta el estero; desde donde se incrementan gradualmente, conforme se asciende topográficamente. Los más profundos, de 5 a 8 m, se presentan hacia las estribaciones de las elevaciones topográficas que delimitan el valle, entre los poblados Cesteadero y Los Lomillos (figura 4).

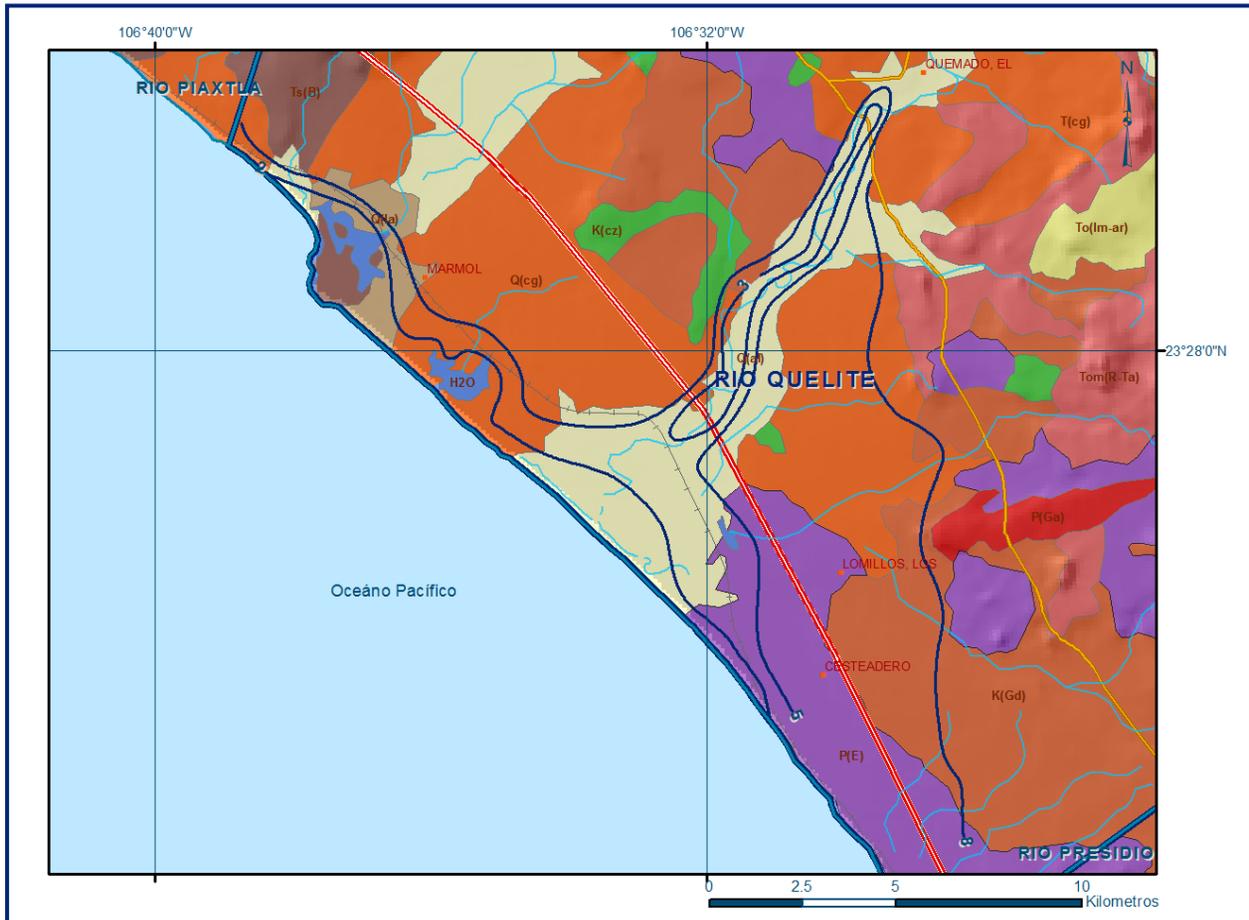


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2019)

5.4.2. Elevación del nivel estático

De acuerdo con la configuración de elevación del nivel estático, en 2019 se registraron valores que variaron de 1 a 20 msnm, que se incrementan de la zona costera hacia los flancos de las sierras que delimitan el acuífero y aguas arriba a lo largo del cauce del Río Quelite. Los valores más altos, de 15 a 20 msnm, se registran sobre el cauce del río Quelite, hacia el poblado El Quemado y en un arroyo paralelo hacia el poblado Las Choyas, desde donde descienden gradualmente por efecto de la topografía, al igual que los valores de profundidad, hacia la zona costera. Los valores más bajos, de 2 a 4 msnm, se presentan en toda la zona costera. La dirección preferencial del flujo

subterráneo es noreste-suroeste, paralela a la dirección de escurrimiento del Río Quelite y de la red de drenaje superficial (figura 5).

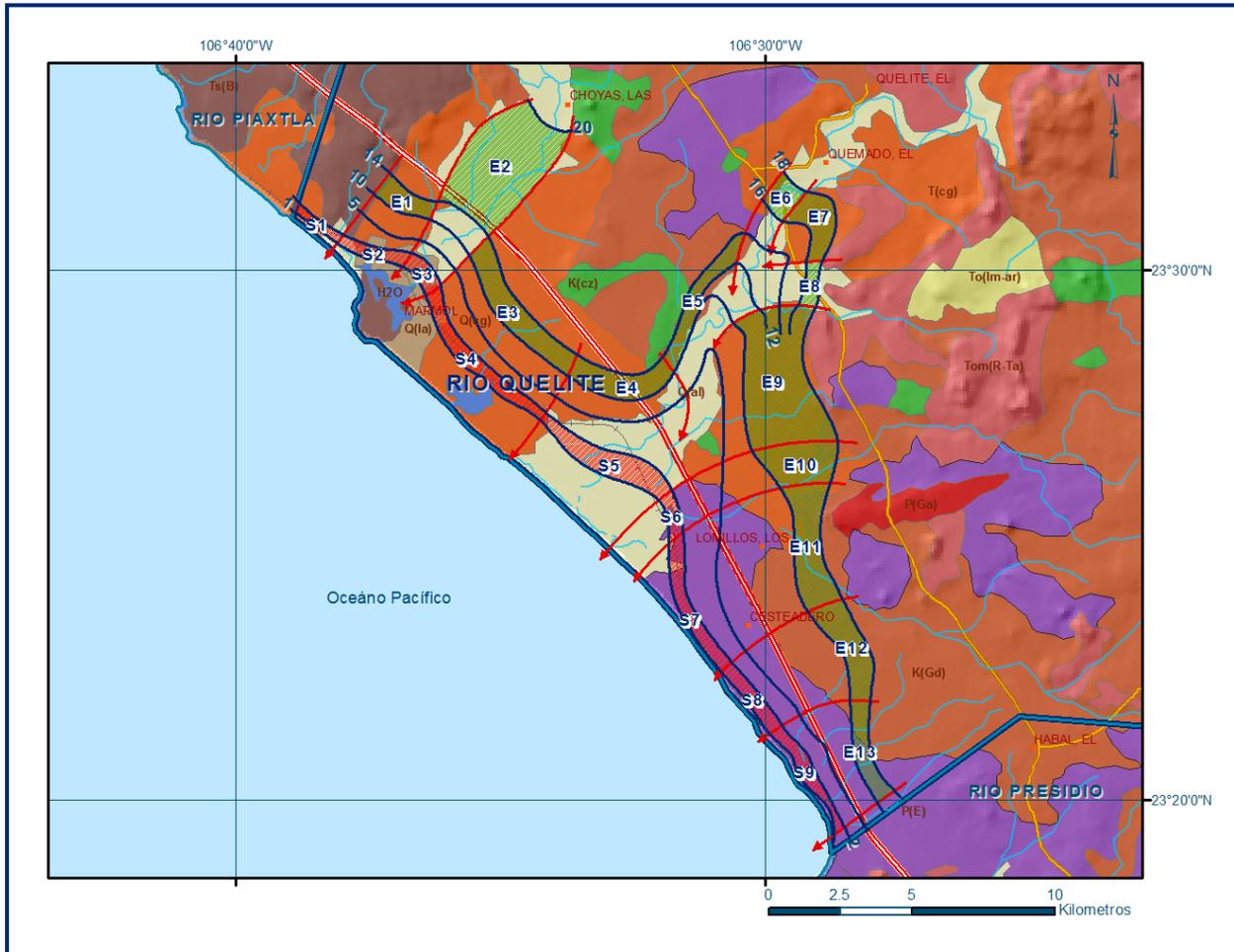


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2019)

5.4.3. Evolución del nivel estático

La configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2008-2019 registró recuperaciones ligeras en la posición de los niveles del agua subterránea en la mayor parte de la zona de explotación, que varían de 0.5 a 1.5 m, es decir un promedio anual de 0.05 a 0.1 m. A lo largo del cauce el río Quelite se observaron abatimientos locales de 0.05 m anuales. Debido a que el volumen de recarga es superior al de extracción, no se observan conos de abatimiento que distorsionen la dirección natural del flujo subterráneo hacia el mar (figura 6).

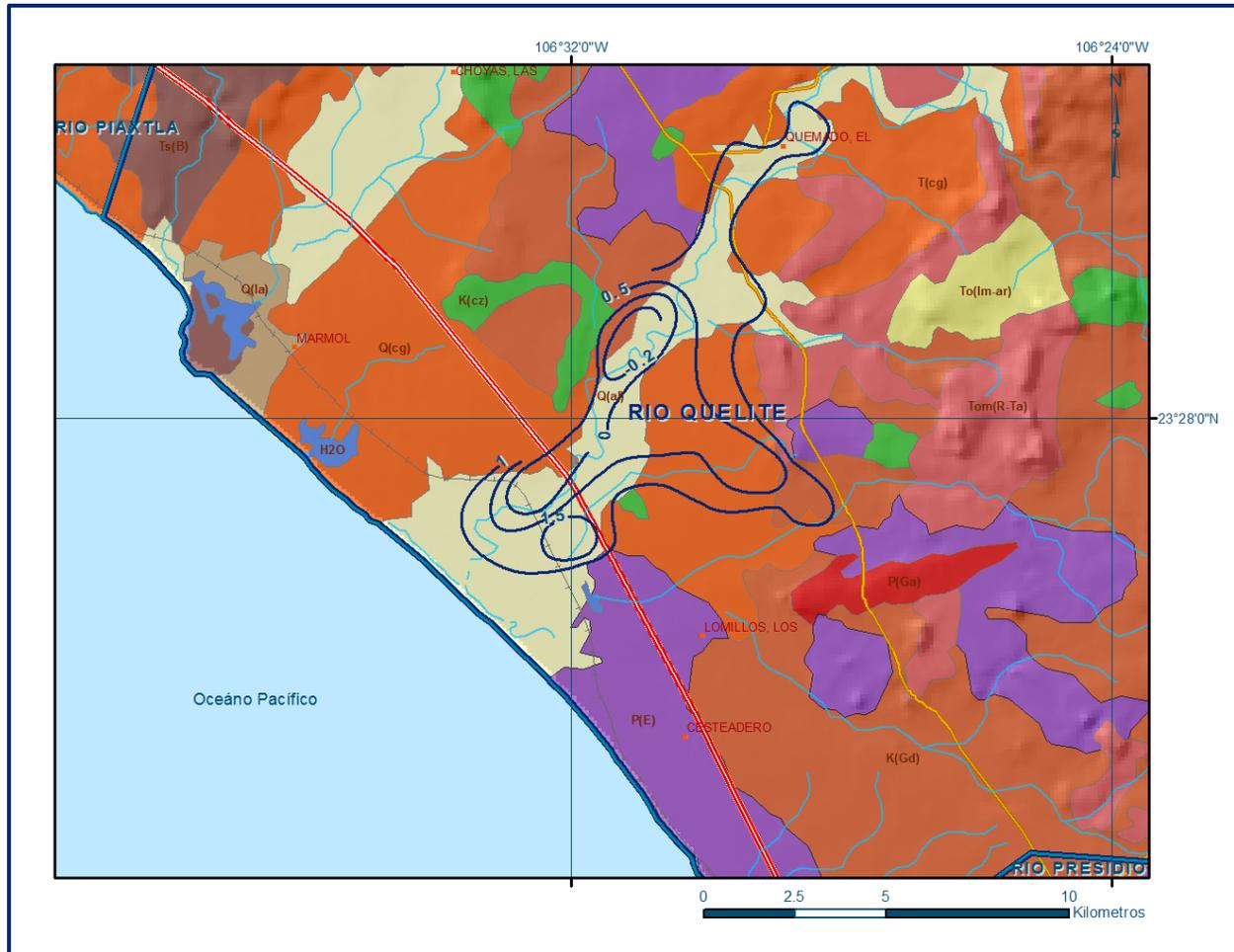


Figura 6. Evolución del nivel estático en m (2008-2019)

5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en el año 2014, se tomaron 5 muestras de agua subterránea en aprovechamientos distribuidos en la zona de explotación, para la caracterización hidrogeoquímica y su análisis fisicoquímico correspondiente. Las determinaciones incluyeron parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos, iones principales, temperatura, conductividad eléctrica, pH, Eh, nitratos, dureza total, sólidos totales disueltos (STD), Fe, Mn, coliformes fecales y totales, así como metales pesados, para identificar los procesos geoquímicos o de contaminación y comprender el modelo de funcionamiento hidrodinámico del acuífero. De manera general, las concentraciones de los diferentes iones y elementos no sobrepasaron los límites máximos permisibles (LMP) que establece la modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, para los diferentes usos. La concentración de STD presentó valores que varían de 150 a 903 ppm que no superan

el LMP de 1000 mg/l para el agua destinada al consumo humano, según la norma mexicana mencionada.

De las determinaciones de laboratorio realizadas, en 4 de las 5 muestras analizadas, se superó la concentración de nitratos 10 mg/l que establece la norma oficial como LMP y en las 5 muestras se detectaron coliformes fecales y totales, en las localidades El Recreo, Los Llanitos y Potrero de Carrasco, en ambos casos, se asocian al uso de agroquímicos y/o a la contaminación con agua residuales urbanas y pecuarias. Otras concentraciones que exceden el LMP son dureza total, cloruros, sodio, hierro y manganeso.

Según con la clasificación establecida por la American Public Health Association (APHA, 1995), el agua del acuífero se clasifica como agua dulce, ya que los valores de conductividad eléctrica varían de 304 a 1842 μ S/cm. Los valores más bajos de STD y conductividad eléctrica se registran en la región centro y nororiental del acuífero, y se incrementan en dirección general hacia el suroeste, confirmando con ello la dirección preferencial del flujo subterráneo. Las mayores concentraciones de STD se registraron en el Ejido Llanitos, ubicado en el Valle de Mármol, por su cercanía a la zona costera y/o quizá por la presencia de evaporitas. Los valores de temperatura varían de 25.4 a 27.6 °C y los de pH de 5.8 a 6.5.

Para determinar la calidad del agua para uso en riego, se utilizó la clasificación de Wilcox, que relaciona la conductividad eléctrica con la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), 3 de las muestras analizadas se clasifican como C₂-S₁, que representa agua de salinidad media con bajo contenido de sodio intercambiable, apta para la agricultura sin restricción alguna en tipo de cultivos ni suelos; y 2 muestras más como C₃-S₁, que representa agua con salinidad alta y bajo contenido de sodio intercambiable, cuyo uso se recomienda en suelos con buen drenaje, que pueden requerir lavados periódicos o ser utilizada en cultivos tolerantes a la salinidad.

Con respecto a las familias del agua por ion dominante, se presenta la familia bicarbonatada-cálcica que representa agua de reciente infiltración con periodos cortos de residencia, y clorurada-cálcica que muestra la influencia del agua marina.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con la información del censo de aprovechamientos, llevado a cabo como parte del estudio realizado en el 2001, se registraron un total de 124 aprovechamientos, de los cuales 43 corresponden a pozos y 81 a norias. Del total de obras, 51 son para uso agrícola, 55 para uso pecuario-doméstico, 12 para abastecimiento de agua potables a las comunidades de la región, 1 para uso industrial y 5 para usos múltiples.

El volumen de extracción calculado es de **8.0 hm³ anuales**, de los cuales 0.8 hm³ (10.0%) son para dotación de agua potable, 6.4 hm³ (80.0%) para uso agrícola, 0.6 hm³ (7.5%) para uso pecuario-doméstico y 0.2 hm³ (2.5%) para uso múltiple.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de aguas subterráneas se planteó para el periodo 2008-2019, en una superficie de **143 m²**, que corresponde a la zona donde se cuenta con información piezométrica y en la que se localiza la mayoría de los aprovechamientos subterráneos.

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

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

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

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

7.1. Entradas

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

De manera incidental, la infiltración de los excedentes del riego agrícola, que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela; del agua residual de las descargas urbanas y de las fugas en las redes de distribución de agua potable, constituyen otras fuentes de recarga al acuífero. Estos volúmenes se integran en la componente de recarga incidental (Ri). Para este caso, debido a que el volumen destinado al uso público-urbano es pequeño, solo se considera la recarga incidental debida a los excedentes del riego agrícola.

7.1.1. Recarga vertical (Rv)

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

$$Rv + Ri + Eh - B - Sh - ETR - Fb = \pm \Delta V(S) \quad (1)$$

Donde:

Rv: Recarga vertical

Eh: Entradas por flujo subterráneo horizontal

Ri: Recarga incidental

B: Bombeo

Sh: Salidas por flujo subterráneo horizontal

ETR: Evapotranspiración real

Fb: Descarga por flujo base de ríos

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

$$Rv = B + Sh + ETR + Fb - Eh - Ri \pm \Delta V(S) \quad (2)$$

7.1.2. Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

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

Para su cálculo se utilizó la configuración de elevación del nivel estático correspondiente al año 2019 mostrada en la figura 5. Con base en ella se seleccionaron

canales de flujo y se aplicó la ley de Darcy para calcular el caudal “Q” en cada uno de ellos, mediante la siguiente expresión:

$$Q = T * B * i$$

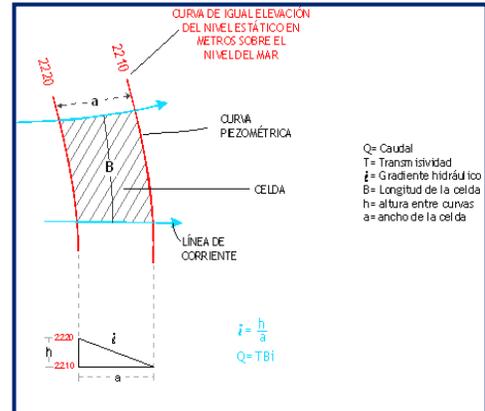
Donde:

Q: Caudal (m³/s)

T: Transmisividad (m²/s)

B: Longitud de la celda (m)

i: Gradiente Hidráulico (adimensional)



La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada una de las celdas establecidas, en la tabla 2 se observan los valores obtenidos en cada celda. El volumen total de entradas por flujo subterráneo horizontal es de **24.0 hm³/año**.

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

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h ₂ -h ₁ (m)	Gradiente i	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
E1	1967	807	4	0.0050	0.003	0.0292	0.9
E2	2689	4042	6	0.0015	0.015	0.0599	1.9
E3	5219	841	4	0.0048	0.003	0.0745	2.3
E4	3574	906	4	0.0044	0.003	0.0473	1.5
E5	4774	574	4	0.0070	0.002	0.0665	2.1
E6	1040	1206	2	0.0017	0.020	0.0345	1.1
E7	2407	1297	2	0.0015	0.004	0.0148	0.5
E8	1581	452	2	0.0044	0.015	0.1049	3.3
E9	4792	2557	8	0.0031	0.004	0.0600	1.9
E10	1464	2240	8	0.0036	0.003	0.0157	0.5
E11	2282	884	8	0.0090	0.003	0.0620	2.0
E12	3637	833	8	0.0096	0.004	0.1397	4.4
E13	3550	562	8	0.0142	0.001	0.0505	1.6
TOTAL							24.0

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

7.1.3 Recarga incidental(Rr)

Aún en sistemas de riego muy eficientes, un cierto volumen del agua aplicada en el riego no es usado como uso consuntivo, se infiltra y eventualmente alcanza la superficie freática, dependiendo de las propiedades del suelo, de las condiciones climáticas y de la profundidad al nivel estático.

Esta contribución al acuífero se le conoce como retorno de riego y según Jacob Bear (1970) su valor varía entre el 20 y 40 % del volumen usado en la irrigación.

Debido a la falta de información confiable de láminas de riego por cultivo, se considera que el 20% del volumen aplicado al uso agrícola retorna al acuífero en forma de recarga incidental, considerando la profundidad somera al nivel del agua subterránea en la zona agrícola y la presencia de estratos de permeabilidad media en el subsuelo. De esta manera, tomando en cuenta que para uso agrícola se utiliza un volumen promedio anual de 6.4 hm^3 , al aplicar el 20% de retornos de riego, se obtiene un volumen de 1.3 hm^3 anuales. **Rr = $1.3 \text{ hm}^3/\text{año}$.**

7.2. Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente a través del bombeo (B), por salidas subterráneas horizontales (Sh) y por evapotranspiración (ETR) en las áreas de niveles freáticos someros.

7.2.1. Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo asciende a **8.0 hm^3 anuales.**

7.2.2. Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

Las salidas subterráneas fueron calculadas de la misma manera como se evaluaron las entradas subterráneas, a partir de la configuración de elevación del nivel estático para el año 2019, mostrada en la figura 5, tal como se muestra en la tabla 3. El volumen total de salidas por flujo horizontal subterráneo asciende a **$9.5 \text{ hm}^3/\text{año}$.**

Tabla 3. Cálculo de salidas por flujo subterráneo horizontal (2019)

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h_2-h_1 (m)	Gradiente i	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
S1	1824	276	1	0.0036	0.003	0.0198	0.6
S2	2285	454	1	0.0022	0.005	0.0252	0.8
S3	1428	618	1	0.0016	0.025	0.0578	1.8
S4	5795	482	1	0.0021	0.003	0.0361	1.1
S5	4885	821	1	0.0012	0.020	0.1190	3.8
S6	1540	437	1	0.0023	0.005	0.0176	0.6
S7	4946	427	1	0.0023	0.001	0.0116	0.4
S8	2689	493	1	0.0020	0.001	0.0055	0.2
S9	4114	527	1	0.0019	0.001	0.0078	0.2
TOTAL							9.5

7.2.3. Evapotranspiración (ETR)

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

Para la obtención de este parámetro se utilizó la ecuación empírica de Turc, considerando los valores promedio anual de temperatura y precipitación de 25.3 °C y 692.1 mm, representativos del área de balance. Con ellos se obtiene una lámina de evapotranspiración de 672.9 mm anuales, como se muestra a continuación:

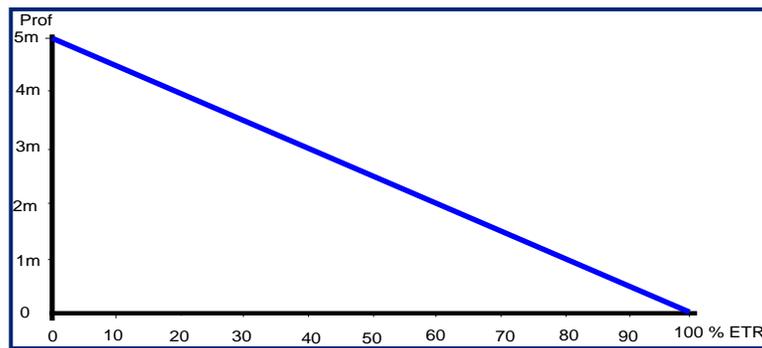
$$ETR(mm) = \frac{P(mm)}{\sqrt{0.90 + \left(\frac{P^2(mm)}{L^2}\right)}}$$

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

T (°C) =	25.3		
P(mm) =	692.1	P ² =	479002.41
L =	1742.21385	L ² =	3035309.1
ETR (mm)	672.9		

El cálculo de la evapotranspiración corresponde con aquella pérdida de agua freática somera y que se aplica al balance de aguas subterráneas, considerando que el concepto tiene influencia hasta una profundidad máxima de 5 m, hasta la que penetra

la vegetación en este tipo de climas, bajo el siguiente proceso: En zonas donde el nivel estático se encuentra a una profundidad menor a 5 m, se calcula el valor de ETR exclusivamente para estas zonas de niveles someros y se pondera el valor del volumen obtenido, partiendo de una relación lineal inversa entre la profundidad al nivel estático (PNE) y el % de ETR. Suponiendo una profundidad límite de extinción de 5 m para el fenómeno de ETR, a menor profundidad mayor será el % de ETR, de tal manera que a 5 m el valor de ETR es nulo y a 0 m el valor es del 100 %, a 4 m el 20%, a 2 m el 60% etc.



De esta manera, la estimación del valor de la evaporación se calculó multiplicando el área donde tiene lugar el fenómeno por la lámina de evapotranspiración obtenida y por el porcentaje que le corresponde de acuerdo con la gráfica anterior, tomando en cuenta las superficies entre curvas de igual valor de profundidad al nivel estático. El cálculo se puede observar en la tabla 4. El volumen de evapotranspiración **ETR = 9.8 hm³/año.**

Tabla 4. Cálculo de la evapotranspiración (2019)

RANGOS DE PROFUNDIDAD (m)	PROFUNDIDAD MEDIA (m)	ÁREA (km ²)	LÁMINA ETR (m)	% ETR	VOLUMEN ETR (hm ³ /año)
3	3	4.5	0.6729	0.4	1.2
3 a 5	4	17.9	0.6729	0.2	2.4
2	2	15.3	0.6729	0.6	6.2
Total		37.7			9.8

7.2.4. Descarga por flujo base de ríos (Dfb)

De acuerdo con la información de la estación hidrométrica “El Quelite”, proporcionada por el Organismo de Cuenca Pacífico Norte, el Río Quelite presentó un caudal promedio estimado de 1.089 m³/s de flujo base, en el estiaje del periodo 1960-2014, que representan un volumen de 34.4 hm³ anuales. Por lo tanto, **Dfb = 34.4 hm³ anuales.**

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

El cálculo del cambio de almacenamiento se realizó a partir de la configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2008-2019 que se muestra en la figura 6. Con base en ella y tomando en cuenta un valor promedio de rendimiento específico $S_y = 0.15$, se determinó la variación del almacenamiento mediante la siguiente expresión:

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

Donde:

- ΔVS :** Cambio de almacenamiento en el período analizado
- S:** Coeficiente de almacenamiento promedio de la zona de balance
- A:** Área entre curvas de igual evolución del nivel estático
- h:** Valor medio de la variación piezométrica en el período

El detalle de cálculo se presenta en la tabla 5, en la que se puede observar que el cambio de almacenamiento para el periodo es de 2.2 hm^3 , es decir, un promedio anual de **0.2 hm^3** . Por lo tanto, **$\Delta V(S) = 0.2 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$** .

Tabla 5. Cálculo del cambio de almacenamiento (2008-2019)

Evolución (m)	Evolución media (m)	Área (km ²)	S _y	$\Delta V(S)$ (hm ³ /año)
-0.2	-0.2	1.5	0.15	0.0
0 a -0.2	-0.1	5.4	0.15	-0.1
0 a -0.5	-0.25	12.0	0.15	-0.4
1.5	1.5	1.3	0.15	0.3
0.5 a 1	0.75	21.7	0.15	2.4
TOTAL		41.8	TOTAL	2.2
		Promedio anual		0.2

Solución de la ecuación de balance

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

$$Rv = B + Sh + ETR + Dfb - Eh - Rr \pm \Delta VS$$

$$Rv = 8.0 + 9.5 + 9.8 + 34.4 - 24.0 - 1.3 + 0.2$$

$$Rv = 36.6 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

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

$$R = Rv + Eh + Rr$$

$$R = 36.6 + 24.0 + 1.3$$

$$R = 61.9 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

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:

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

Donde:

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

R = Recarga total media anual

DNC = Descarga natural comprometida

VEAS = Volumen de extracción de aguas subterráneas

8.1. Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto en forma de recarga natural como incidental. Para este caso su valor es **61.9 hm³/año**, de los cuales 60.6 hm³ son recarga natural y 1.3 hm³ recarga incidental.

8.2. Descarga natural comprometida (DNC)

La descarga natural comprometida se determina sumando los volúmenes de agua concesionados de los manantiales y del caudal base de los ríos que está comprometido como agua superficial, alimentados por el acuífero, más las descargas que se deben conservar para no afectar a los acuíferos adyacentes; sostener el gasto ecológico y prevenir la migración de agua de mala calidad hacia el acuífero.

Para el caso del acuífero Río Quelite, su valor es **48.8 hm³ anuales**, de los cuales 9.5 hm³ corresponden a las salidas por flujo subterráneo horizontal hacia el mar para mantener la posición de la interfase marina, 34.4 hm³ al flujo base del río Quelite y 4.9 hm³ al 50% de la ETR para preservar los ecosistemas costeros y ribereño. **DNC= 48.8 hm³ anuales.**

8.3. Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)

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

Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de **32,663,230 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos del Agua (REPGA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022**.

8.4. Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)

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

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

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 61.9 - 48.8 - 32.663230 \\ \text{DMA} &= -19.563230 \text{ hm}^3/\text{año} \end{aligned}$$

El resultado indica que no existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones, por el contrario, el **déficit** es de **19,563,230 m³**.

9. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua, 2001. Estudio de actualización geohidrológica en los acuíferos de los ríos Elota, Piaxtla y Quelite, Sinaloa. Realizado por PROTYC, S.A. DE C.V.

Comisión Nacional del Agua, 2007. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Río Quelite, estado de Sinaloa.

Comisión Nacional del Agua, 2014. Integración del estudio técnico justificativo de los acuíferos Río Elota clave 2506, Río Piaxtla clave 2507, Río Quelite clave 2508, Río Baluarte clave 2510 y Laguna Agua Grande clave 2512, en el estado de Sinaloa. Realizado por SANX Ingeniería Integral y Desarrollo, S.A. de C.V. (SIIDSA)

Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca Pacífico Norte, 2019. Información piezométrica del acuífero Río Quelite, estado de Sinaloa.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), 1981. Estudio de hidrología superficial y subterránea en los arroyos Quelite, Pozole y Presidio en Mazatlán, estado de Sinaloa. Realizado por Técnicas Modernas de Ingeniería, S.A., Consultores.

Servicio Geológico Mexicano, 1999, Carta Geológica-Minera F13-1 "Mazatlán", escala 1: 250,000.