



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA
GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO LOS JUNCOS (0847), ESTADO DE
CHIHUAHUA**

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.....	7
3.3 Hidrografía.....	7
3.4 Geomorfología.....	8
4. GEOLOGÍA	9
4.1 Estratigrafía	11
4.2 Geología estructural	17
4.3 Geología del subsuelo.....	19
5. HIDROGEOLOGÍA.....	19
5.1 Tipo de acuífero	19
5.2 Parámetros hidráulicos.....	20
5.3 Piezometría	20
5.4 Comportamiento hidráulico.....	21
5.4.1 Profundidad al nivel estático.....	21
5.4.2 Elevación del nivel estático.....	23
5.4.3 Evolución del nivel estático	24
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	25
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	25
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	25
7.1 Entradas.....	26
7.1.1 Recarga vertical (Rv)	26
7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)	27
7.1.3 Recarga inducida (Ri)	28
7.2 Salidas.....	29
7.2.1 Bombeo (B).....	29
7.2.2 Descarga a través de manantiales (Dm).....	29
7.1. Cambio de almacenamiento (ΔVS).....	29
8. DISPONIBILIDAD.....	30
8.1 Recarga total media anual (R).....	31
8.2 Descarga natural comprometida (DNC)	31
8.3 Volumen de extracción de agua subterránea (VEAS).....	31
8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)	32
9. BIBLIOGRAFÍA.....	33

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 Los Juncos, definido con la clave 0847 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción oriental del estado de Chihuahua, entre los paralelos 28° 16' y 29° 12' de latitud norte y entre los meridianos 104° 06' y 104° 58' de longitud oeste, cubriendo una superficie de 4601 km² (Figura 1).

Limita al norte con los acuíferos Álamo Chapo y Bajo Río Conchos, al este con Laguna Los Alazanes, al sur con los acuíferos Rancho El Astillero y Laguna Los Alazanes y al oeste con el acuífero Bajo Río Conchos, todos ellos pertenecientes al Estado de Chihuahua.

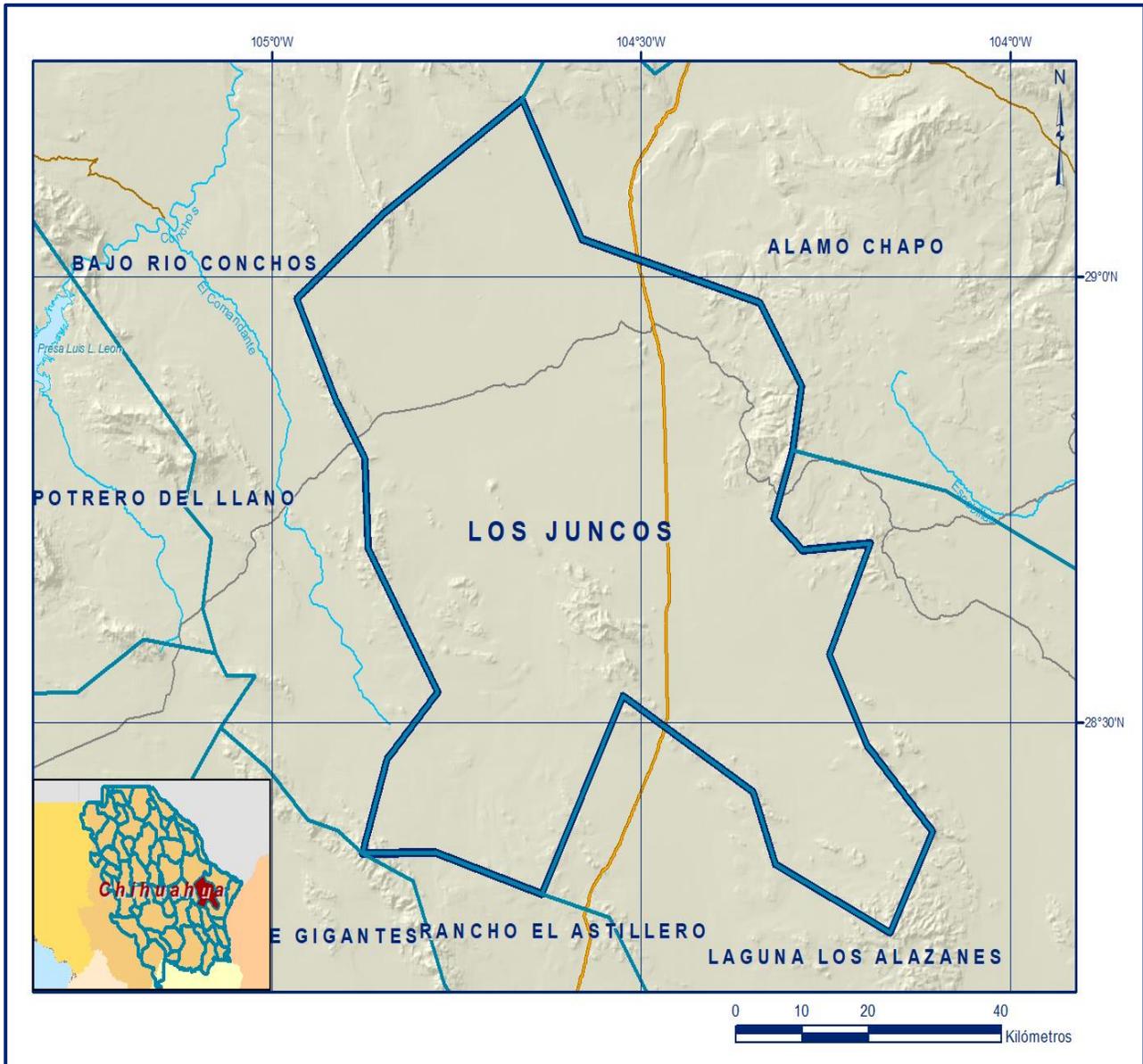


Figura 1. Localización del acuífero

Geopolíticamente comprende parcialmente los municipios Camargo, Julimes, Ojinaga, Aldama y Coyame.

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

Tabla 1. Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada

ACUIFERO 0847 LOS JUNCOS						
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE		
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS
1	104	46	33.8	28	32	4.0
2	104	52	13.1	28	41	43.7
3	104	52	29.5	28	47	48.9
4	104	54	48.1	28	51	37.8
5	104	57	59.5	28	58	32.4
6	104	50	56.3	29	4	16.7
7	104	39	43.4	29	11	53.7
8	104	34	48.9	29	2	29.1
9	104	20	21.7	28	58	14.4
10	104	16	57.9	28	52	41.0
11	104	17	44.3	28	48	21.4
12	104	19	15.5	28	43	44.4
13	104	16	55.5	28	41	36.2
14	104	11	22.7	28	42	4.4
15	104	14	43.4	28	34	36.6
16	104	11	40.9	28	28	28.9
17	104	6	17.7	28	22	40.3
18	104	9	46.1	28	15	52.2
19	104	19	8.1	28	20	27.2
20	104	20	53.5	28	25	21.9
21	104	31	28.7	28	31	49.1
22	104	38	6.6	28	18	29.5
23	104	46	45.9	28	21	17.1
24	104	52	40.0	28	21	12.1
25	104	50	41.8	28	27	32.8
1	104	46	33.8	28	32	4.0

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero Los Juncos pertenece al Organismo de Cuenca VI “Río Bravo” y es jurisdicción territorial de la Dirección Local Chihuahua.

En su superficie completa 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 siete acuíferos que se indican*”, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 5 de abril de 2013, a través del cual en el acuífero, se prohíbe 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, y el incremento de volúmenes autorizados o registrados, 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 de 2024, el acuífero se clasifica en zona de disponibilidad 3.

El principal usuario del agua subterránea es el agrícola. En el territorio que cubre el acuífero no se localiza distrito o unidad de riego alguna, ni tampoco se ha constituido hasta la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En el área que cubre el acuífero se han realizado algunos estudios hidrogeológicos, entre los más importantes se mencionan los siguientes:

ESTUDIO DE PROSPECCIÓN GEOHIDROLÓGICA EN LA ZONA DE LOS JUNCOS, CHIHUAHUA, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Subdirección de Geohidrología, Ariel Consultores, S.A. 1985. En este estudio se censaron un total de 39 aprovechamientos de agua subterránea de los cuales 38 eran pozos y una noria, 3 de las captaciones se encontraban inactivas.

Los pozos en su mayoría alcanzan los 100 m de profundidad, estaban ademados con tubería de 6" y equipados con bomba de pistón, accionados con aeromotores o bombas de combustión interna. La extracción total anual de las captaciones es de 4.5 Mm³, destinándose la mayor proporción al uso agrícola. La profundidad al nivel estático en los pozos variaba de 19 a 120 m; el flujo subterráneo local se establece predominantemente de oriente a poniente, desde la carretera Ojinaga-Camargo hasta Los Juncos de Abajo, aunque en forma regional el flujo es convergente hacia la laguna Los Juncos.

REACTIVACIÓN DE LA RED DE MONITOREO PIEZOMÉTRICO DEL ACUÍFERO LOS JUNCOS, Comisión Nacional del Agua, Gerencia Regional Río Bravo, Gerencia Estatal Chihuahua, Consultores y Constructores del Norte S.A. de C.V. 2005. Este estudio tuvo como objetivo establecer una red de monitoreo simplificada y confiable para la obtención de información hidrogeológica-piezométrica del acuífero mediante la ubicación, inspección y selección en campo de pozos de monitoreo además de conocer la evolución y condición actual de los niveles de agua subterránea y su comportamiento por causas naturales o antropogénicas, mediante recorridos piezométricos, estableciendo un marco de referencia actualizado para identificar los cambios que generen los desarrollos futuros sobre las fuentes de agua subterránea.

ESTUDIO PARA DETERMINAR LA DISPONIBILIDAD DE LOS ACUÍFEROS: LAGUNA DE PALOMAS, LLANO DE GIGANTES, LAS PAMPAS, RANCHO EL ASTILLERO, LAGUNA DE JACO, RANCHO LA GLORIA, RANCHO DENTON, LAGUNA LOS ALAZANES, LAGUNA DEL REY, VALLE DEL PESO, FLORES MAGÓN-VILLA AHUMADA, EL SABINAL Y LOS JUNCOS, ESTADO DE CHIHUAHUA, realizado en el 2010 para la Comisión Nacional del Agua por la Universidad Autónoma de Chihuahua (UACH). El objetivo general de este estudio fue conocer las condiciones geohidrológicas de los acuíferos para calcular su recarga y determinar la disponibilidad media anual de agua subterránea.

Así como conocer el número y distribución de las captaciones de agua subterránea existentes en la zona. Mediante la realización de actividades de campo que incluyeron censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría de las extracciones, realización de pruebas de bombeo, nivelación de brocales de pozos y reconocimientos geológicos, en algunos de ellos fue posible plantear el balance de aguas subterráneas.

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

3. FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia Fisiográfica

De acuerdo con la clasificación fisiográfica del INEGI (1997), el acuífero se encuentra en su totalidad en la provincia Sierras y Llanuras del Norte, en su mayor parte en la Subprovincia Llanuras y Sierras Volcánicas y en menor proporción en la Subprovincia Sierras Plegadas del Norte. La provincia Sierras y Llanuras del Norte es una provincia árida y semiárida que se extiende desde el suroeste de los Estados Unidos de América hasta las inmediaciones de Nazas en Durango y la Laguna de Mayrán en Coahuila. Se orienta más o menos en una dirección noroeste-sureste y abarca parte de los estados de Durango, Sonora, Chihuahua y Coahuila.

La zona se caracteriza por la presencia de sierras asimétricas y paralelas, orientadas hacia el noroeste. Los elementos orográficos están separados por amplios valles como el que ocupa la mayor parte del área. El origen de la provincia está relacionado con el plegamiento de las secuencias marinas del Mesozoico que se desarrollaron sobre un basamento Paleozoico y Precámbrico, así como por el relleno de fosas tectónicas con sedimentos continentales y derrames lávicos, que dieron lugar a la formación de cuencas endorreicas.

3.2 Clima

De acuerdo con la clasificación del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), los climas predominantes en el acuífero en orden de importancia, son los “muy secos” y los de tipo “seco”. Dentro del subclima de los “muy secos” se encuentra el subclima “muy seco semicálido” y el subclima “muy seco templado” con una precipitación invernal entre 5% y 10% del total; dentro de los “secos” se presentan el “seco templado” con una precipitación invernal entre 5% y 10% del total.

Para la determinación de las variables climatológicas se utilizó la información de 5 estaciones climatológicas que tienen influencia en la superficie del acuífero Ojinaga, El Mulato, Presa Luis L. León, Las Burras y Camargo, cuyo registro comprende los periodos 1957-2008, 1980-2003, 1965- 2008, 1970-2003 y 1957-2007, respectivamente.

Con estos datos, se determinaron valores de precipitación y temperatura media anual de **286 mm y 19.86° C** respectivamente. Con respecto a la evaporación potencial, se obtuvo un valor de **1765.47 mm anuales**, según datos de evaporímetro de la estación climatológica Las Burras que se ubica al oeste del acuífero y cuenta con periodo de análisis de 1999 a 2002.

3.3 Hidrografía

El área cubierta por el acuífero se ubica dentro de la Región Hidrológica RH-35 “Mapimí”, parte de esta región hidrológica se encuentra al este-sureste del estado y pertenece a la vertiente interior. Representa el 10.6% del territorio chihuahuense, dentro del cual se tienen cuatro cuencas de las seis existentes en la región, cabe destacar, que no existen en esta porción de la región hidrológica, escurrimientos de importancia y las corrientes que se generan son arroyos intermitentes de trayectorias cortas, algunos de los cuales llegan a descargar en depresiones topográficas donde forman lagunas intermitentes.

Dentro de la Región Hidrológica Mapimí, el acuífero se encuentra en la cuenca hidrológica de Polvorillas-Laguna del Marqués la cual está situada completamente en la porción oriental del territorio chihuahuense, cubriendo 1.8% de su área. Esta cuenca se encuentra rodeada en la porción oeste-norte hasta el noreste por las cuencas Río Conchos-Ojinaga (J) y Río Bravo-Ojinaga (H) de la RH-24 Río Bravo; al sur-sureste limita con la cuenca Laguna del Guaje-Lipanes (C); y al suroeste con una pequeña sección de la cuenca El Llano-Laguna del Milagro (E), estas últimas pertenecen a la RH-35. La cuenca Los Juncos es cerrada topográficamente, por lo que la red hidrográfica converge hacia la parte más baja donde se forman pequeñas lagunas, como la de Los Juncos, que presenta una elevación aproximada de 1140 msnm.

3.4 Geomorfología

La región presenta un relieve volcánico de mesetas, que cubre parcialmente a un relieve plicativo; estos elementos aparecen dispuestos según montañas de bloques escalonados separados por valles de origen tectónico; los cuales están bordeados por depósitos recientes. Afloran rocas de composición ígneas de composición ácida, acumuladas durante el Oligoceno-Mioceno y está caracterizado por la presencia de escarpes y por una disección profunda que ha labrado cañones.

El relieve plicativo se desarrolló a finales del Cretácico Superior, a partir de las secuencias sedimentarias del Paleozoico y del Mesozoico; por lo general, su morfología tiene una correspondencia directa con las estructuras sobre todo en las rocas mesozoicas. Estos elementos geomorfológicos aparecen modificados por pequeños cuerpos intrusivos. La interacción de las fuerzas endógenas y exógenas, se encuentran en cada una de las geoformas y son responsables del paisaje que se observa. De tal forma que las primeras de ellas dieron origen a formas plicativas como en las sierras: Chupaderos, Mojina y El Jabalí.

En los valles de origen tectónico se han desarrollado extensas planicies aluviales y algunas lacustres. Fuerzas distensivas dieron origen a la formación de cuencas tectónicas que posteriormente fueron rellenadas, denominadas regionalmente “bolsones”.

Las corrientes fluviales que drenan las montañas plegadas son por lo general subsecuentes. Principalmente el proceso de destrucción de las estructuras antes mencionadas, lo constituye la disección causada por las corrientes fluviales, las cuales al labrar su cauce han formado barrancas y cañones cuyos productos de erosión se depositaron en llanuras y valles aluviales. En general y de acuerdo a su génesis, las corrientes del área son consecuentes radiales centrífugas, como las desarrolladas en las unidades volcánicas, consecuentes deformativas las que drenan hacia los bordes de las sierras plegadas; aquellas que drenan las estructuras sinclinales son las consecuentes longitudinales. Con base en las características que exhibe, el área se puede ubicar en una etapa geomorfológica correspondiente a madurez; en algunas áreas se observa ruptura de pendiente en los sedimentos clásticos que rellenan los valles, lo que indica un levantamiento del área.

4. GEOLOGÍA

En la superficie cubierta por el acuífero afloran rocas sedimentarias, ígneas extrusivas e intrusivas, cuyo registro estratigráfico comprende el periodo del Mesozoico hasta el Reciente (figura 2).

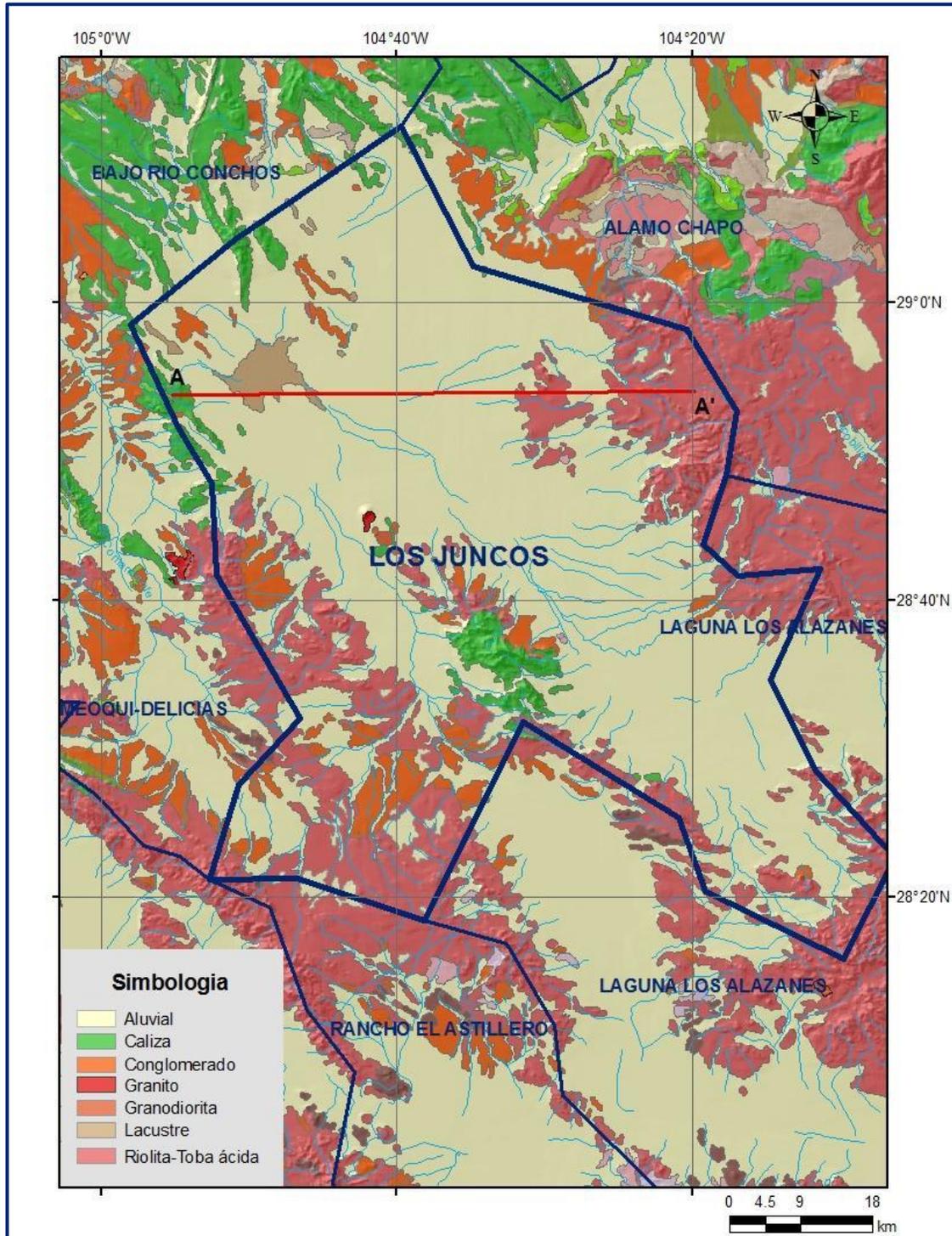


Figura 2. Geología general del acuífero

El Mesozoico está indicado por rocas sedimentarias depositadas en facies marinas y el sistema que se muestra principalmente es el Cretácico. Para este tiempo existía una serie de elementos paleo-geográficos con actividad tectónica que se desarrollaron desde el Triásico y dieron origen a la formación de dos facies de sedimentación identificadas para el Cretácico Inferior (Pacheco C., Castro R., y Gómez Miguel, 1984).

La primera de ellas de edad Hauteriviano-Turoniano, según Juan Araujo y Rodolfo Arenas (1986), que se depositó al occidente del Mar Mexicano o Geosinclinal Mexicano, en facies de cuenca y con aportes de sedimentos terrígenos de probable origen de arco volcánico, representada por las calizas que conforman las sierras Mojina y El Chupadero, así como lutitas y areniscas al noroeste, fuera del área.

La segunda deposita para este mismo tiempo al oriente, en donde prevalecían condiciones de facies litorales y de mares someros debido a la presencia de elementos positivos como la Isla del Cuervo e Isla de Coahuila, las que fueron transgredidas hasta el Albiano, predominando facies de plataforma de mar abierto con desarrollo de bancos arrecifales y condiciones lagunares en la Plataforma de Coahuila. Para el Cretácico Superior (Cenomaniano-Turoniano), las condiciones de depósito varían debido al levantamiento de la parte occidental y central (López Ramos, 1981) y dan lugar a la sedimentación marina con predominio de terrígenos en facies de mar abierto, iniciándose la depositación de sedimentos calcáreo-arcillosos.

Durante el Senoniano prevalece el levantamiento occidental con el comienzo de la regresión marina hacia el oriente y se producen cambios en las facies de sedimentación de mar abierto a litorales; por tal motivo el gran aporte de terrígenos originó una secuencia "flysch" representada por areniscas y lutitas. Las relaciones estratigráficas entre las unidades cretácicas son transicionales y concordantes.

La fase orogénica proveniente del occidente, continúa a principio del Cenozoico, acompañada con la intrusión de granito (Cerro El Centinela), granodiorita, gabro y diorita, que causan intrusiones a las calizas de plataforma.

Las rocas extrusivas de tipo andesítico relacionadas con la primera fase volcánica que dio origen a la Sierra Madre Occidental, sobreyacen discordantemente a las rocas sedimentarias cretácicas, que a su vez infrayacen discordantemente a tobas del Oligoceno-Mioceno y a rocas sedimentarias del Neógeno.

Se observaron secuencias vulcano-sedimentarias que infrayacen a las rocas denominadas por Mc Dowell y Clabaugh (1979) como “Complejo Volcánico Superior”. La segunda fase volcánica está representada por tobas de composición riodacítica y riolítica con intercalación de depósitos vulcanoclásticos, así como riolitas del Oligoceno-Mioceno que en ocasiones se extruyeron a través de fracturas; estas unidades sobreyacen en discordancia a las rocas del “Complejo Volcánico Inferior” (Mc Dowell y Clabaugh, *op cit.*).

Andesitas post-miocénicas sobreyacen concordantemente a las unidades ácidas e infrayacen a basaltos que representan las últimas manifestaciones volcánicas. De acuerdo con las observaciones de campo, esta unidad sobreyace también discordantemente a rocas ígneas, así como a unidades cretácicas e infrayace a rocas y sedimentos del Pliocuaternario.

4.1 Estratigrafía

CRETÁCICO

Grupo Aurora

Se define como Grupo Aurora, a una secuencia gruesa de rocas sedimentarias carbonatadas de origen marino, compuesta por calizas masivas, lutitas y areniscas, en la que se agrupan las formaciones: Coyame, Benigno, Walnut, Cox y Finlay. La sección tipo se encuentra al noroeste del poblado de Cuchillo Parado, en el estado de Chihuahua.

Las rocas de estas formaciones afloran ampliamente dentro del área del acuífero. El Grupo Aurora está conformado por tres miembros, que presentan características litológicas distintivas. La Formación Coyame se compone de lutitas con intercalaciones de calizas, de color gris oscuro a negro en superficies frescas, mientras que en superficies intemperizadas presentan color gris claro. Su estratificación es de espesor medio a delgado, así también presenta pirita diseminada de forma euhedral. La Formación Benigno está compuesta por calizas masivas, así como lutitas calcáreas de color gris claro a gris oscuro.

El miembro medio está compuesto por las formaciones Walnut y Cox. La Formación Walnut es distinguible por el quiebre topográfico que presenta en las sierras del área de estudio, debido a que se encuentra encajonada entre calizas masivas de la Formación Finlay y Formación Benigno. Se compone litológicamente por lutitas calcáreas y calizas de estratificación delgada.

Gradúa lateralmente hacia la porción este a rocas de la Formación Cox. La Formación Cox se encuentra compuesta por areniscas calcáreas, areniscas conglomeráticas y calizas.

Sus estratos son de espesor medio a delgado. Las areniscas presentan abundante estratificación cruzada y algunos estratos contienen madera fósil muy poco abundante. En el área del acuífero está representada por calizas depositadas en facies de plataforma de mar abierto, con desarrollo lagunar y arrecifal. Megascópicamente su textura es de mudstone a wackstone, con variaciones locales a packstone, al microscopio las texturas son: micrita, biomicrita, espatita y en algunas muestras clástica samítica y clástica pelítica. La estratificación es variable, de 30 a 40 cm en calizas arcillosas, de 20 a 40 cm con intercalación de limolita arenosa y abundantes fósiles. Estas rocas se asignan por posición stratigráfica al Albiano Inferior, Albiano Medio y son correlacionables con las formaciones Glen Rose y Paluxy del centro de Texas.

El miembro superior está formado por la Formación Finlay. Esta se presenta generalmente formando pendientes muy abruptas debido a las calizas masivas que la componen. Estas calizas son de color gris claro a gris oscuro con abundantes fósiles, también contiene abundantes nódulos de pedernal color gris claro a oscuro, de formas redondeadas y de tamaño variable que va de 5 a 25 cm. El espesor reportado para el Grupo Aurora es variable, dependiendo de su localidad, ya que generalmente se presenta aflorando parcialmente. Los espesores se encuentran entre los 1200 a 2800 m. Esta unidad está situada por posición stratigráfica dentro del Albiano Medio y es correlacionable con las Formaciones Comanche Peak y Edwards del centro de Texas.

Formación Loma de Plata

Definida Ambsbury (1954) para referirse a calizas masivas y nodulares que se depositaron en un ambiente nerítico interno a medio, con presencia de toucasitas y caprinídos que reflejan el desarrollo de arrecifes. La caliza es del tipo mudstone, de color gris claro, en estratos que varían de medianos a gruesos, con nódulos y lentes de pedernal, huellas de disolución y mineralización. En ocasiones se observa caliza del tipo grainstone en estratos gruesos a masivos. Las relaciones stratigráficas de la Formación Loma de Plata con las otras unidades stratigráficas que la encajonan son nítidas y concordantes, es sobreyacida por el Grupo Washita y subyacida por la Formación Benavides. Al sur de la sierra Los Pilares, le sobreyace tectónicamente la Formación Las Vigas, de la misma forma se encuentra con la Formación Ojinaga en el cerro La Ventana. En la sierra Vallecillos se encuentra en contacto estructural por falla normal con el Grupo Aurora.

Formación Benavides

Está constituida por una secuencia de lutitas y calcarenitas que se depositaron en un ambiente nerítico de interno a medio. La caliza es del tipo mudstone, color gris claro y está dispuesta en estratos gruesos, con nódulos de pedernal, fragmentos de fósiles y aparece intercalada con calizas arenosas, lutitas y limolitas. Puede identificarse en el área de estudio generalmente por el quiebre topográfico que presenta debido a su naturaleza arcillosa.

Aflora ampliamente en el noreste de México en donde se le ha nombrado también con el nombre de Formación Kiamichi, Sue Peaks o Sombrerete.

Consiste de lutitas calcáreas gris oscuro, que intemperizan a tonalidades verdosas, las cuales se observan interestratificadas con caliza de textura mudstone y wackestone nodulares, de color gris claro a gris oscuro y de estratificación delgada a media. En su parte media presenta un cuerpo calcáreo constituido por caliza de textura mudstone de fragmentos biógenos.

Una característica importante de esta unidad es su abundancia de fauna, principalmente de amonitas, equinodermos, pelecípodos y gasterópodos. También presenta microorganismos básicamente plantónicos y abundantes concreciones de marcasita y fierro.

Su edad corresponde a la parte superior del Albiano Medio y gran parte del Albiano Tardío. Los sedimentos se depositaron en un ambiente de mar abierto, de aguas relativamente profundas y de poca energía hidráulica.

TERCIARIO (NEÓGENO)

PALEOCENO

Conglomerado Polimíctico

Unidad constituida por un conglomerado polimíctico depositado en facies continentales, se le observa mal clasificado con clastos de 5 a 50 cm de diámetro, predominando los fragmentos de roca calcárea y en menor proporción fragmentos de rocas ígneas, su grado de redondez varía de subanguloso a subredondeado y dispuestos en forma caótica; se encuentran unidos por una matriz arcillosa de color café con cementante calcáreo. Ocasionalmente se presentan fracturas rellenas de calcita, se.

La unidad presenta diferentes tonos de coloración entre los que sobresalen el gris con tonos de beige o rojizos. Estos conglomerados sobreyacen a rocas sedimentarias del Cretácico y de igual forma a rocas volcánicas del Oligoceno-Mioceno, está cubierto también en discordancia por basaltos del Neógeno, por la relación que mantiene con las demás unidades se le considera de edad Neógeno. La unidad se encuentra rellenando fosas tectónicas, con expresión morfológica de lomas de pendiente suave y medianamente disectados.

OLIGOCENO-MIOCENO

Riolita-Toba ácida

Unidad constituida por diversas rocas de composición ácida: tobas riolíticas, tobas riódacíticas y algunas ignimbritas. En general la mineralogía incluye microclina, sanidino, andesina, oligoclasa y cuarzo; como minerales accesorios: circón, hematita, biotita, pirita y fragmentos de roca.

La textura en las rocas efusivas es merocrystalina porfídica y vitrofídica en las rocas explosivas; piroclástica y brechoide.

Las unidades efusivas son masivas, con estructura fluidal, intercalada con toba o inyectadas en planos verticales ondulantes, es decir perpendiculares a la pseudo estratificación con desarrollo de estructuras secundarias a partir de la segregación de sílice en cavidades preexistentes. En general la unidad presenta fracturamiento vertical, ocasionando la formación de bloques. Sobreyace discordantemente a rocas cretácicas y a las unidades del Complejo Volcánico Inferior e infrayace a basalto y andesita del Terciario Superior, así como a depósitos recientes. La unidad se correlaciona con el Complejo Volcánico Superior de la Sierra Madre Occidental (Mc Dowell y Clabaugh, 1979) del Oligoceno-Mioceno. En general forma mesetas disectadas, mesetas basculadas y sierras escarpadas.

Andesita

Unidad ígnea efusiva formada por andesina y oligoclasa, unidas por una matriz microlítica de plagioclasas de la misma composición, se reportan minerales accesorios como: augita, apatito, piogenita y circón. Su textura es microcrystalina afanítica y porfídica. Por lo general su estructura es masiva, aunque también se observó estructura fluidal y amígdalas alargadas rellenas de calcita. Los afloramientos presentan fracturamiento en varias direcciones, el cual ha ocasionado la formación de bloques. Sobreyace a las unidades ígneas del Oligoceno-Mioceno e infrayace en discordancia con el conglomerado del Terciario Superior.

Morfológicamente forma cerros aislados y también aflora en los escarpes de las sierras.

Traquita.

Roca ígnea extrusiva, formada por sanidino y oligoclasa, como accesorios: apatito, esfena y cuarzo, su textura es merocristalina afanítica. Presenta tono gris oscuro en muestra fresca y ocre al intemperismo, forma pseudo estratos y fracturas verticales, lo que ha originado prismas rectangulares de 1 a 2 metros.

La unidad muestra un alto grado de meteorización que contrasta con las unidades adyacentes. Infrayace a rocas andesíticas del Terciario Superior, se correlaciona con las primeras manifestaciones volcánicas del Terciario Inferior, de acuerdo con C. Ragin, 1978 en S.P.P. 1984. Su morfología es de ladera.

Basaltos

Unidad ígnea efusiva, formada mineralógicamente por labradorita, con minerales accesorios olivino y augita, unidos por una matriz de plagioclasas sódicas. Su textura es merocristalina afanítica. Generalmente forma derrames de gran magnitud, por extrusión fisural o de un cono central.

La roca es masiva con vesículas las cuales se encuentran rellenas de calcita, causa disyunción columnar prismática, así como intercalación de horizontes de escoria volcánica y ceniza volcánica. Al intemperismo desarrolla formas esferoidales.

Sobreyace discordantemente a calizas del Cretácico Inferior y a rocas ígneas del Oligoceno-Mioceno.

La unidad es correlacionable con las emisiones basálticas ocurridas en el Plio-Cuaternario (Marc Tardy, 1977).

La morfología está representada por: conos volcánicos, derrames con fase de malpaís y mesetas. Sus afloramientos son escasos y de pequeña extensión.

Rocas Intrusivas

Están representadas por rocas de estructura compacta, textura porfídica en una matriz vítrea de grano fino a mediano con fenocristales de feldespato, hornblenda, minerales opacos y hematita, ubicado al suroeste de la zona, donde alcanza una altura de 100 m, que afectan a las rocas de composición ácida.

Granito.

Esta unidad consiste de granito de muscovita, de textura holocristalina equigranular, de color gris claro con tonos verdes en superficie fresca, mientras que en superficie intemperizada, presenta tono café. Presenta escaso fracturamiento y en forma de un gran promontorio de peñascos redondeados, que contrastan con las rocas circundantes.

Granodiorita

Consiste de granodioritas de textura holocristalina equigranular, generalmente de grano grueso y de color gris claro, que frecuentemente presentan intemperismo esferoidal. Están emplazadas en las unidades calcáreas del Cretácico Inferior.

Depósitos aluviales

Sedimentos de origen aluvial y fluvial derivados de la erosión y denudación de las rocas pre-existentes, su acumulación representa el evento más joven del área y se encuentran rellenando extensos valles y fosas tectónicas; los materiales de relleno son arcillas, limos arenas y gravas, con un grado de redondez que varía de sub-redondeado a bien redondeado, en la que destacan grandes cantidades de granos de cuarzo, fragmentos de roca y feldspatos. Localmente presenta estratificación cruzada, así como la presencia de gradación y algunas estructuras lenticulares.

Debido al acomodo de las partículas granulométricas su permeabilidad es alta, dando origen a la formación de acuíferos de tipo libre, los cuales son ampliamente explotados en la región por medio de pozos. Los espesores de estos depósitos son variables con expresión morfológica de extensas planicies que en ocasiones están disectadas por pequeños arroyuelos que desembocan en lagunas endorreicas.

Depósitos lacustres

Depósitos de facies continentales lacustres que forman una secuencia alternante de arenas de grano fino, limo y arcilla, con estratos de sales. Su litología es de limos arcillosos con diversos minerales producidos por precipitación química debido a la evaporación, entre los que se cuentan yeso y sal. Se encuentra graduando horizontalmente a depósitos aluviales contemporáneos de mayor granulometría. Por su posición estratigráfica y características litológicas se le asigna una edad del Holoceno. Su ambiente de depósito es de origen continental en cuencas cerradas, en zonas de climas áridos. Estos depósitos afloran en las depresiones que dan origen a zonas de inundación.

4.2 Geología estructural

La secuencia mesozoica define estructuras plegadas, recostadas hacia el noreste, en ocasiones aparecen dislocadas por fallas inversas. Los cuerpos intrusivos aparecen recortados por fallas normales de orientación general norte-sur, al igual que la secuencia piroclástica del Terciario.

Por las características morfológicas y estructurales que se aprecian, se distinguen zonas diferentes en cuanto al estilo de deformación continua de las unidades litológicas. Los anticlinales y sinclinales, amplios y simétricos con inclinación en sus flancos de 5 a 10 grados y orientación de los ejes estructurales NW-SE. El desarrollo de este tipo de estructuras suaves y abiertas fue debido a la competencia de la roca calcárea, a los esfuerzos de compresión.

La deformación discontinua está representada por dos tipos: las fallas de compresión y distensión, de las primeras se observaron pliegues-falla y fallamiento inverso de poca magnitud con vergencia hacia el NE, así como de cabalgadura. Las estructuras distensivas, están representadas por fallas normales y fracturas; las primeras guardan una orientación NW-SE principalmente, con variaciones N-S, son las causantes de la separación de los bloques sedimentarios y la formación de fosas tectónicas.

Las fracturas forman dos familias una con orientación NE-SW y la otra NW-SE, que afectan a las unidades sedimentarias e ígneas. Estructuras de origen ígneo extrusivo, se encuentran diseminadas en el área y se representan por derrames lávicos, conos y mesetas.

Se distinguen tres fases de deformación: una fase compresiva del Cretácico Superior-Terciario Inferior que pliega las secuencias sedimentarias, un posterior emplazamiento de cuerpos intrusivos, que modifican localmente las estructuras existentes hacia formas dómicas. Una fase de ajuste isostático, que dio origen a pliegues de fondo y fracturas de orientación NNE-SSW, del Mioceno Superior M. Tardy (1977), D.A. Córdoba (1980) y observada en rocas ígneas y sedimentarias del Terciario (Eoceno Mioceno Inferior). Una fase distensiva del Plioceno, representada por fallas de extensión, que formaron la Provincia morfológica de Sierras y Cuencas.

Por último, se denota un fracturamiento que afecta a las estructuras anteriores, así como lineamientos interpretados en las imágenes de satélite y de acuerdo con M. Tardy estas se relacionan con el sistema de fallas de San Andrés y el proceso de oceanización que ocurre en la parte sur del mar de Cortés

Las características estructurales están representadas en el área por la deformación dúctil-frágil que se manifiesta por el anticlinal de la Sierra Azul, que se localiza en la porción suroccidental, con una orientación preferencial N10°W, presentando un pliegue recumbente al oriente de él, orientado al NW, que afecta a las calizas de las formaciones Cuchillo, Benigno, Walnut, Finlay, Benavides y Loma de Plata.

Posterior a los esfuerzos compresivos provocados durante la Orogenia Laramide, se presentan fases de tipo extensional, que generan fallas normales en la porción oriental, las cuales presentan un rumbo NW 53°-45° SE, asociadas a la falla Tres Marías, que presenta un rumbo E-W. En la región occidental las fallas presentan una variación en su rumbo a NW 25°-55° SE, representada por la falla lateral derecha Los Leyva. Otro sistema lo conforman las fallas que presentan un rumbo NE 32°-70° SW, ubicadas al centro-sur de la región, en las inmediaciones de los cerros La Agujita y El Tinajón.

Al sistema de fallas con rumbo preferencial NW-SE, se asocia el origen y el emplazamiento de las rocas volcánicas extrusivas. Otros elementos importantes identificados son los curvilineamientos la Mora, Cerro Bola y El Huérfano.

El primero se ubica en la porción central y consta de una estructura circular de 10 km de diámetro, conformado por rocas volcánicas, asociado a un volcán compuesto derivado de varias pulsaciones, ocasionando diferentes tipos de rocas o secuencias repetitivas de ellas.

Los dos últimos curvilineamientos se asocian a estructuras volcánicas de tipo monogenético y son estructuras circulares de 300 a 400 m de diámetro, conformadas por basalto esencialmente, se ubican al sureste de la región, en las inmediaciones de la falla Los Leyva.

En la porción suroccidental se observa un curvilineamiento denominado Sierra Azul, que es una estructura circular de 15 km de diámetro, conformado en su parte central por un intrusivo de composición granítica, que afecta y pone al descubierto a la secuencia de rocas carbonatadas, generando mineralización con valores de hierro, plata, plomo, zinc y oro en la mina San Carlos y de menor importancia, pequeñas obras de exploración, donde se observan manifestaciones de mineral derivadas de este cuerpo (Carta Geológico-Minera H13-D44-D34 Manuel Benavides. Escala 1:50,000.SGM 2010).

4.3 Geología del subsuelo

Con base en los resultados de la geología del subsuelo, cortes litológicos, hidrología superficial y la interpretación de pruebas de bombeo, entre otros, fue posible definir un sistema acuífero heterogéneo y anisótropo, en general de tipo libre, con condiciones locales de semiconfinamiento, conformado por un medio granular, hacia la porción superior, y otro fracturado subyacente.

El medio granular está constituido por materiales aluviales de granulometría variada que hacia la parte baja de la cuenca presenta condiciones locales de semiconfinamiento debido a la presencia de sedimentos arcillosos; así como conglomerados. Esta unidad aflora ampliamente, presenta permeabilidad media y puede alcanzar espesores de varios cientos de metros en el centro del valle y es que actualmente se explota. El medio fracturado está formado principalmente por rocas volcánicas del Paleógeno-Neógeno (tobas riolíticas y andesitas). El conjunto de rocas afloró ampliamente al este y sur del acuífero, conformando las sierras que lo delimitan. Las fronteras y barreras al flujo subterráneo están constituidas por las rocas ígneas y sedimentarias cuando a profundidad desaparece el fracturamiento (figura 3).

A mayor profundidad, las calizas y la secuencia calcáreo-arcillosa de calizas y lutitas, conforman una unidad acuífera cuyo potencial no ha sido aún explorado y que puede presentar condiciones de confinamiento.

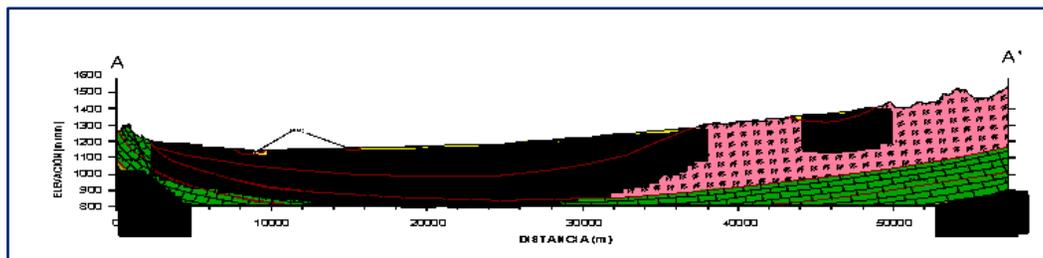


Figura 3. Sección geológica esquemática

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

Con los resultados de la geología del subsuelo, la hidrología superficial y de las pruebas de bombeo, entre otros, fue posible definir la presencia de un sistema acuífero de **tipo libre**, heterogéneo y anisótropo, con **condiciones locales de semiconfinamiento** debido a la presencia de sedimentos lacustres hacia las partes más bajas de la cuenca, conformado por un medio granular y otro fracturado subyacente.

Está constituido, en su parte superior, por un medio granular caracterizado por la presencia de depósitos clásticos y conglomerados que se encuentran rellenando el valle. La porción inferior está alojada en un medio fracturado desarrollado en rocas volcánicas.

A mayor profundidad, la secuencia calcáreo-arcillosa de calizas y lutitas, y las calizas conforman una unidad acuífera cuyo potencial no ha sido aún explorado y que puede presentar condiciones de confinamiento, debido a que están alternadas o sobreyacidas por rocas arcillosas.

5.2 Parámetros hidráulicos

Como parte de las actividades desarrolladas en el 2010, se realizaron 8 pruebas de bombeo, en etapa de abatimiento, cuya duración varió de 4 a 12 horas.

De su interpretación por diversos métodos analíticos convencionales, se deduce que los valores de transmisividad varían de **0.7 a $1.6 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$** , con un valor promedio de **$1.3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$** ; en tanto que la conductividad hidráulica presenta valores que oscilan entre **6.9×10^{-6} a $2.0 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$** , teniendo como valor promedio **$2.0 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$** .

Ninguna prueba contó con pozo de observación, por lo que no fue posible obtener el valor del coeficiente de almacenamiento de la manera tradicional.

Sin embargo, el valor de rendimiento específico S_y se estima que varía de **0.1 a 0.15**, obtenido mediante la interpretación de las pruebas de bombeo por el modelo numérico de dos capas de Rathod y Rushton, con un valor promedio de 0.11, que por correlación hidrogeológica coincide con los acuíferos vecinos que presentan una geología similar.

5.3 Piezometría

Se cuenta con información piezométrica generada en 2005, obtenida en una red de monitoreo conformada por 35 pozos, y la más reciente del año 2010 que pertenece a una red de monitoreo de 42 pozos distribuidos en la mayor superficie de explotación del acuífero.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

En 2005 los valores de profundidad variaban de 10 a 140 m, los más someros se registraban en las zonas que rodea a la Laguna La Escondida y los más profundos hacia los cerros Los Picachos (Figura 4).

La configuración de 2010 muestra valores que varían de 35 a 130 m, los más someros, de 30 a 50 m, se registraron en la porción norte desde donde se incrementan por efecto de la topografía hacia las estribaciones de las sierras que delimitan el acuífero y hacia la porción sureste.

En la porción centro-occidental la profundidad oscila entre 50 y 60 m, hacia las colonias menonitas El Oasis y El Presón del Chilicote.

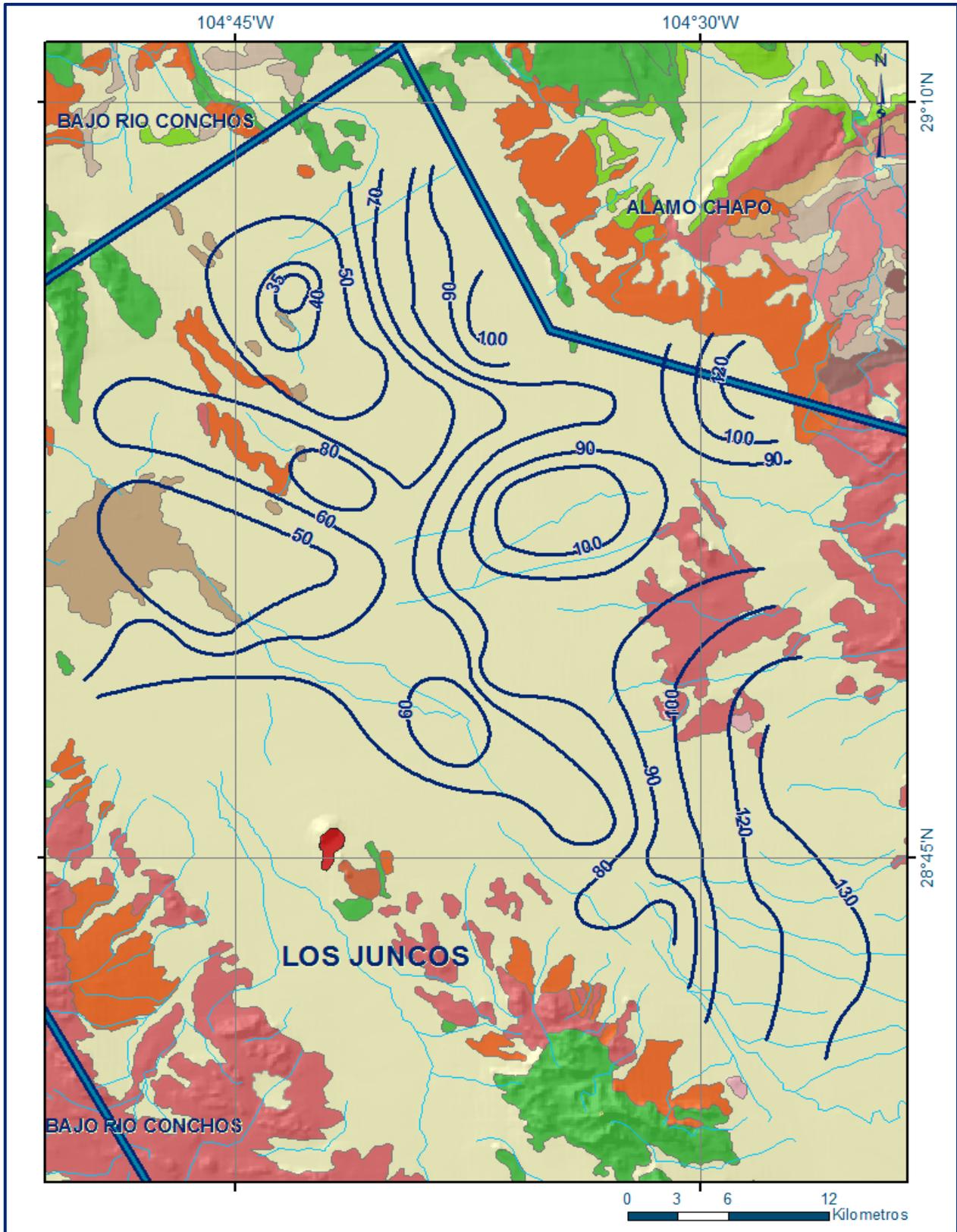


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2010)

5.4.2 Elevación del nivel estático

En 2005 las elevaciones al nivel estático mínimas variaban de 1070 msnm, que se registraban al norte del acuífero bordeando el Presón El Chilicote, a 1240 msnm que se presentaron en la porción sureste, mostrando una dirección preferencial del flujo subterráneo del sureste al noroeste (Figura 5).

Para el 2010 la elevación presenta una configuración semejante a la observada en 2005, pero ahora con valores extremos de 1,100 y 1,230 msnm; las elevaciones mínimas de 1,100 y 1,120 msnm se presentan al noroeste y norte del acuífero, respectivamente, definiendo dos conos de abatimiento a partir de los cuales los valores se incrementan por efecto de la topografía, al igual que la profundidad, hacia la porción suroriental.

La dirección preferencial del flujo subterráneo se mantiene en sentido sureste-noroeste, alimentada por los flujos provenientes de los flancos serranos que delimita el acuífero. El valor mínimo se presenta en la zona del Presón de Chilicote y el máximo en la región suroriental, entre las localidades San Francisco y La Providencia.

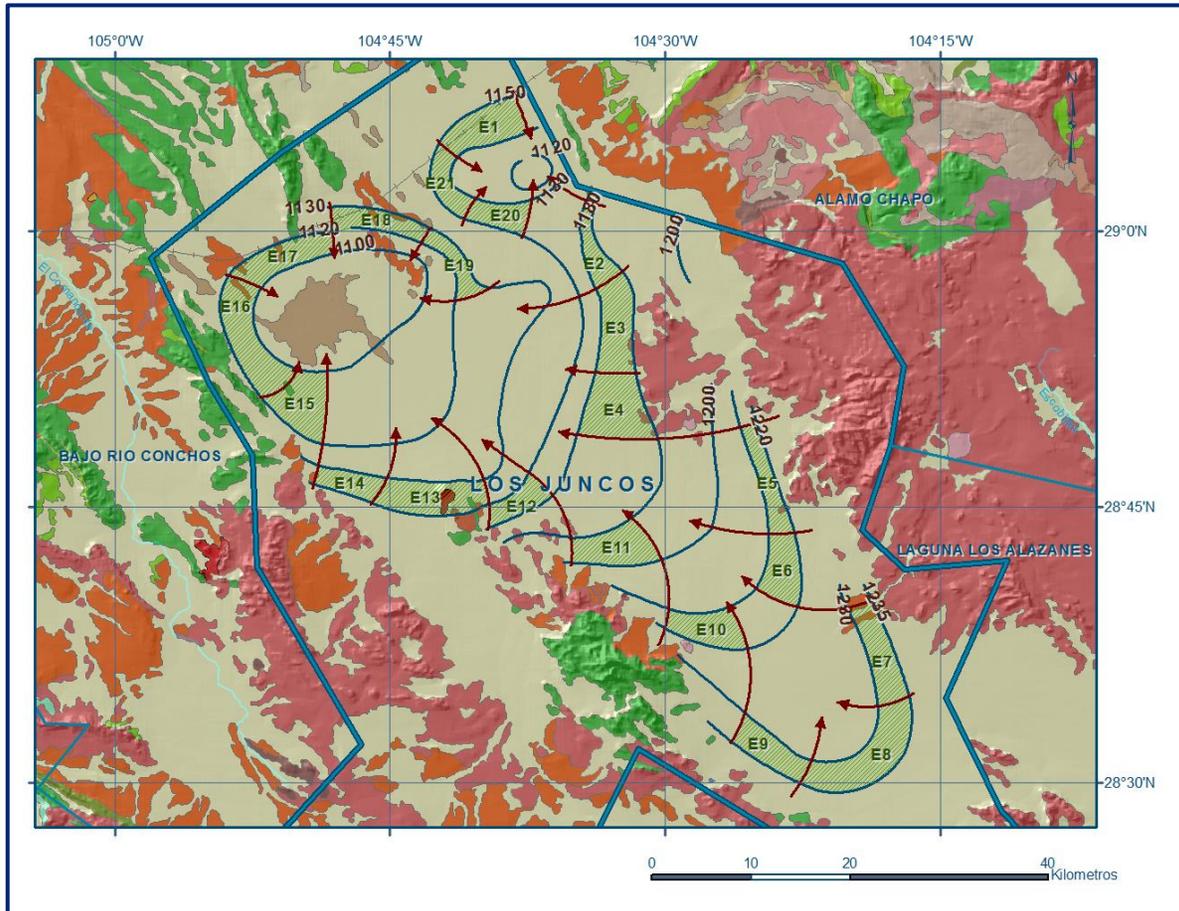


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2010)

5.4.3 Evolución del nivel estático

Con respecto a la configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2005-2010, se registran abatimientos en toda la superficie de explotación y varían de 1m, en toda la periferia, hasta 6 m anuales en la porción central del valle, en donde se ha concentrado extracción de las grandes superficies de los nuevos desarrollos agrícolas de las comunidades menonitas, que han perforado gran cantidad de pozos sin control alguno (figura 6).

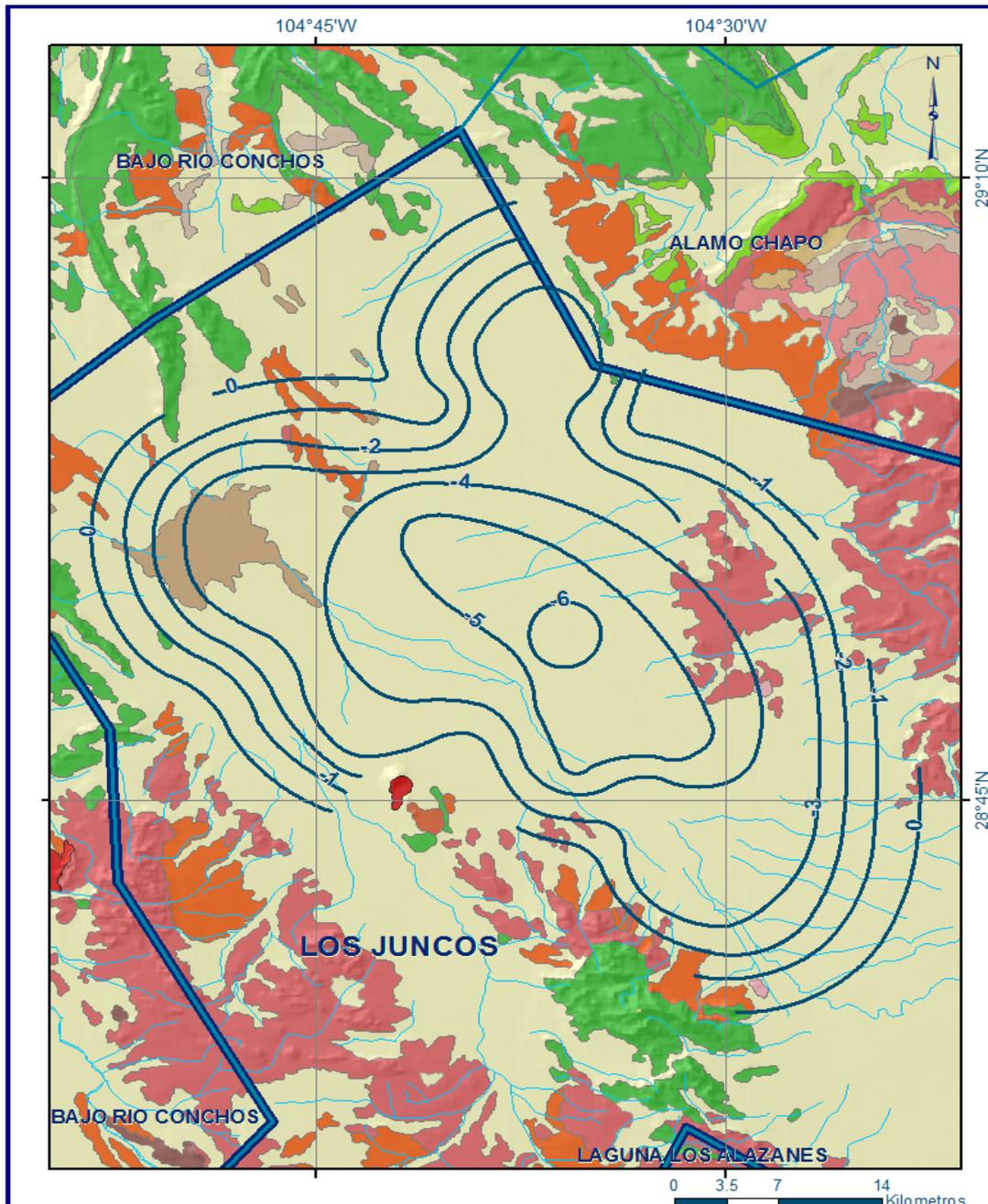


Figura 6. Evolución del nivel estático en m (2005-2010)

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

A la fecha solo se ha realizado un estudio con carácter hidrogeoquímico que incluyó un muestreo y análisis fisicoquímico en el año 1985 donde se recolectaron 20 muestras pero sólo 17 para el análisis físico químico y su interpretación hidrogeoquímica correspondiente. De acuerdo a los resultados de los análisis se concluye que el agua presenta concentraciones de sólidos totales disueltos (STD) inferiores a 1000 ppm que no sobrepasan el límite máximo permisible de 1000 ppm establecido la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021 “Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua”, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 2 de mayo del 2022.

En cuanto al contenido de cloruros solamente una muestra sobrepasó el límite máximo permisible que establece dicha norma, mientras que respecto al contenido de sulfatos 7 muestras excedieron la norma. Por lo que respecta a la dureza del agua, los valores son representativos de agua blanda y en algunos sitios se presenta dureza moderada; solo una muestra de agua resultó ser muy dura.

Debido al gran desarrollo agrícola que la región ha experimentado en los últimos años, es importante recolectar muestras de agua para analizar su salinidad actual y conocer la evolución de su calidad en el tiempo.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con la información del censo de aprovechamientos realizado como parte del estudio llevado a cabo en el 2010, se registró la existencia de 1489 aprovechamientos, de los cuales 1,484 son pozos y sólo 5 norias. Del total de obras, 227 se consideraron activas, 955 se encontraban inactivas temporalmente por diferentes causas y 307 en situación de abandono.

El volumen de extracción total calculado es de **404.2 hm³** anuales, de los cuales, 403.95 hm³ (99.9 %) se destinan para uso agrícola y los 0.25 hm³ restantes (0.1%) para otros usos doméstico- pecuario.

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 establecido. La ecuación general de balance, de acuerdo a la ley de la conservación de la masa es la siguiente:

Entradas (E) – Salidas (S) = Cambio de masa

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

Recarga total – Descarga total = Cambio de almacenamiento

El balance de aguas subterráneas se definió en una superficie de **1530 km²**, que corresponde a la zona donde se localizan los aprovechamientos de agua subterránea que cuentan con información piezométrica.

7.1. Entradas

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

De manera inducida, la infiltración de los excedentes del riego agrícola y del agua residual de las descargas urbanas y de la red de abastecimiento de agua potable, constituyen otra fuente de recarga al acuífero.

Estos volúmenes se integran en la componente de recarga inducida (Ri). Debido a que prácticamente la totalidad del volumen que se extrae se destina al uso agrícola y dada la magnitud de este, sólo se considera la recarga inducida por los retornos del riego (Rr).

7.1.1 Recarga vertical (Rv)

En las regiones áridas y semiáridas los dos principales mecanismos de recarga natural se producen a través de la infiltración a lo largo de los cauces de los escurrimientos superficiales y la recarga de frente de montaña. Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que el resto de las componentes de la ecuación tienen manera de ser evaluadas, su valor será despejado de la ecuación de balance:

$$Rv + Eh + Rr - B - Dm = \pm \Delta V(S) \quad (1)$$

Donde:

- Rv** = Recarga vertical
- Eh** = Entradas subterráneas por flujo horizontal
- Rr** = Retornos de riego
- B** = Bombeo
- Dm** = Descarga a través de manantiales
- $\Delta V(S)$** = Cambio en el volumen almacenado

De esta manera, despejando la recarga vertical:

$$Rv = B + Dm \pm \Delta V(S) - Eh - Rr \quad (2)$$

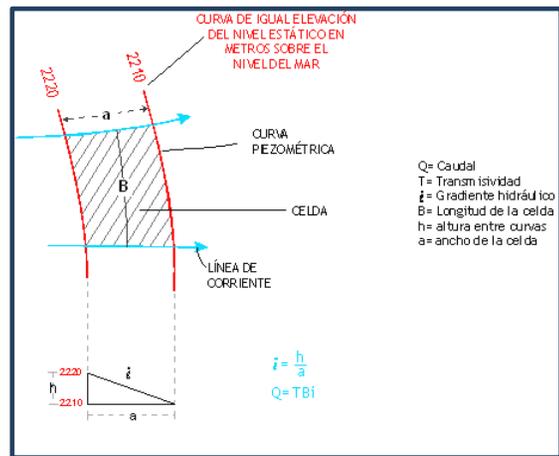
7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

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 piedemonte, 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 sobre el valle y en la infiltración de los escurrimientos superficiales. El cálculo de entradas por flujo horizontal se realizó con base en la Ley de Darcy, a partir de la configuración de elevación del nivel estático para el año 2010 (figura 5), mediante la siguiente expresión:

$$Q = T * B * i$$

Dónde:

- Q** = Caudal (m^3/s)
- T** = Transmisividad (m^2/s)
- B** = Longitud de la celda (m)
- i** = Gradiente Hidráulico (adimensional)



Los valores de T utilizados para el cálculo de entradas subterráneas se obtuvieron de los promedios obtenidos de la interpretación de pruebas de bombeo realizadas en los estudios previos, adaptadas al espesor saturado de la región donde se localizan las celdas.

La recarga total por flujo subterráneo horizontal es la suma de los caudales de cada uno de los canales establecidos, en la tabla 2 se pueden observar los valores obtenidos en cada celda. Su valor total es: **Eh = 37.4 hm³/año.**

7.1.3 Recarga inducida (Ri)

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. A 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.

Tabla 2. Cálculo de Entradas por flujo subterráneo horizontal (2010)

CANAL	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h ₂ -h ₁ (m)	Gradiente i (m)	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
E1	8000	3600	20	0.005556	0.0016	0.0711	2.2
E2	8000	1600	20	0.012500	0.0012	0.1200	3.8
E3	10000	3000	20	0.006667	0.0012	0.0800	2.5
E4	5000	6400	20	0.003125	0.0012	0.0188	0.6
E5	11000	2600	10	0.003846	0.0015	0.0635	2.0
E6	7000	4600	10	0.002174	0.0015	0.0228	0.7
E7	10000	2000	5	0.002500	0.0015	0.0375	1.2
E8	13000	4000	5	0.001250	0.0017	0.0276	0.9
E9	9600	2400	5	0.002083	0.0017	0.0340	1.1
E10	8000	3200	10	0.003125	0.0017	0.0425	1.3
E11	8000	2400	20	0.008333	0.0016	0.1067	3.4
E12	6000	2400	10	0.004167	0.0015	0.0375	1.2
E13	9000	3400	20	0.005882	0.0010	0.0529	1.7
E14	7600	2600	20	0.007692	0.0010	0.0585	1.8
E15	5000	6000	10	0.001667	0.0010	0.0083	0.3
E16	12000	2600	10	0.003846	0.0012	0.0554	1.7
E17	10000	3000	10	0.003333	0.0012	0.0400	1.3
E18	10400	2000	10	0.005000	0.0017	0.0884	2.8
E19	8400	1400	10	0.007143	0.0017	0.1020	3.2
E20	6000	2000	20	0.010000	0.0010	0.0600	1.9
E21	7000	2400	20	0.008333	0.0010	0.0583	1.8
Total entrada							37.4

Para este caso particular, no se cuenta con información de superficies y láminas de riego por cultivo; Sin embargo, debido a la profundidad a la que se localiza el nivel del agua en la zona agrícola y al riego no tecnificado, se considera que el 20% del volumen utilizado en la agricultura (403.95 hm³ anuales) recarga de manera efectiva al acuífero. De esta manera:

$$Rr = (0.20) (403.95 \text{ hm}^3/\text{año})$$

$$Rr = 80.8 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

$$\mathbf{Rr = 80.8 \text{ hm}^3/\text{año}}$$

7.2. Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente por bombeo (B) y de manera incipiente a través de pequeños manantiales. No existe flujo base en ríos.

7.2.1. Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo calculado es de **404.2 hm³/año**.

7.2.2. Descarga a través de manantiales (Dm)

A través de pequeños manantiales localizados en las rocas volcánicas que afloran en la porción oriental del acuífero se descarga un caudal conjunto de 3 lps, que representan un volumen anual de 0.1 hm³. **Dm = 0.1 hm³ anuales**.

7.1. Cambio de almacenamiento (ΔVS)

Para la estimación del cambio de almacenamiento se tomó en cuenta la configuración de la evolución del nivel estático 2005-2010 (figura 6).

Con base en ella y tomando en cuenta un valor promedio de rendimiento específico $S_y = 0.06$ se determinó la variación del almacenamiento mediante la siguiente expresión:

$$\mathbf{\Delta VS = S * A * h}$$

Donde:

ΔVS : Cambio de almacenamiento en el período analizado

S: Coeficiente de almacenamiento promedio de la zona de balance

A: Área de influencia de curvas de igual evolución del nivel estático (km²)

h: Valor de la variación piezométrica en el período (m)

Como consecuencia de la explotación del recurso para el uso agrícola, la posición del nivel piezométrico ha descendido drásticamente principalmente en la porción centro-sur del acuífero.

El detalle de cálculo se presenta en la tabla 3, en la que se puede observar que el cambio neto de almacenamiento es de **-270.7 hm³/año**.

Tabla 3. Cálculo del cambio de almacenamiento anual (2005 - 2010)

Evolución (m)	Abatimiento (m)	Área (km ²)	Sy	ΔV(S) (hm ³ /año)
0 a -1	-0.5	253.4	0.06	-7.6
-1 a -2	-1.5	217.9	0.06	-19.6
-2 a -3	-2.5	239.1	0.06	-35.9
-3 a -4	-3.5	408.5	0.06	-85.8
-4 a -5	-4.5	238.5	0.06	-64.4
-5 a -6	-5.5	156.3	0.06	-51.6
-6	-6	16.3	0.06	-5.9
Área de balance		1530.0	TOTAL	-270.7

Solución a 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:

$$R_v = B + D_m \pm \Delta V(S) - E_h - R_r$$

$$R_v = 404.2 + 0.1 - 270.7 - 37.4 - 80.8$$

$$R_v = 15.4 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

De esta manera, la recarga total media anual estará definida por la suma de la recarga vertical, las entradas horizontales subterráneas y los retornos del riego agrícola.

$$R = R_v + E_h + R_r$$

$$R = 15.4 + 37.4 + 80.8$$

$$R = 133.6 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

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:

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

Donde:

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

R = Recarga total media anual

DNC = Descarga natural comprometida

VEAS = Volumen de extracción de aguas subterráneas

8.1. Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto en forma de recarga natural como inducida.

Para este caso su valor es **133.6 hm³/año**, de los cuales 52.8 hm³ son recarga natural y 80.8 hm³ recarga inducida.

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 están comprometidos 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 Los Juncos su valor es de **0.1 hm³ anuales**, que corresponden a las descargas a través de manantiales.

Por lo tanto, **DNC = 0.1 hm³ anuales**.

8.3. Volumen de extracción de agua subterránea (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 **656,825,232 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022**.

8.4. Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)

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

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

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 133.6 - 0.1 - 656.825232 \\ \text{DMA} &= -523.325232 \text{ hm}^3/\text{año} \end{aligned}$$

El resultado indica que no existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario, el déficit es de **523,325,232 m³ anuales**.

9. BIBLIOGRAFÍA

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. 1985. Estudio de Prospección Geohidrológica en la zona de Los Juncos, Chihuahua. Realizado por Ariel Consultores, S.A.