

SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO EL PEÑUELO – SAN JOSÉ EL PALMAR
(1921), ESTADO DE NUEVO LEÓN**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1	GENERALIDADES.....	2
	Antecedentes.....	2
1.1	Localización.....	2
1.2	Situación administrativa del acuífero.....	4
2	FISIOGRAFÍA.....	4
2.1	Provincia fisiográfica.....	4
2.2	Clima.....	5
2.3	Hidrografía.....	5
2.4	Geomorfología.....	5
3	GEOLOGÍA.....	6
3.1	Estratigrafía.....	7
3.2	Geología estructural.....	11
3.3	Geología del subsuelo.....	12
4	HIDROGEOLOGÍA.....	13
4.1	Tipo de acuífero.....	13
5	BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	13
5.1	Entradas.....	13
5.1.1	Recarga vertical (Rv).....	13
5.2	Salidas.....	20
5.2.1	Bombeo (B).....	20
5.2.2	Descarga por manantiales (Dm).....	20
6	DISPONIBILIDAD.....	20
6.1	Recarga total media anual (R).....	21
6.2	Descarga natural comprometida (DNC).....	21
6.3	Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	21
6.4	Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	22
7	BIBLIOGRAFÍA.....	23

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 El Peñuelo – San José El Palmar, definido con la clave 1921 en el Sistema de Información Geográfica para el Manejo del Agua Subterránea (SIGMAS) de la CONAGUA, se localiza en el Estado de Nuevo León, entre las coordenadas geográficas 24° 45' y 24° 10' de latitud norte, y 100° 50' y 100° 25' de longitud oeste, cubriendo una superficie de 1083.09 km².

Limita al noreste con el acuífero Navidad – Potosí – Raíces, al sur con el acuífero Santa Rita – Cruz de Elorza, estos pertenecientes al estado de Nuevo León, al noroeste con el acuífero Saltillo Sur, perteneciente al estado de Coahuila, también al sur con el acuífero Cedral – Matehuala, al suroeste con el acuífero Vanegas Catorce, pertenecientes al estado de San Luis Potosí, y al oeste limita con el acuífero El Salvador perteneciente al estado de Zacatecas (figura 1).

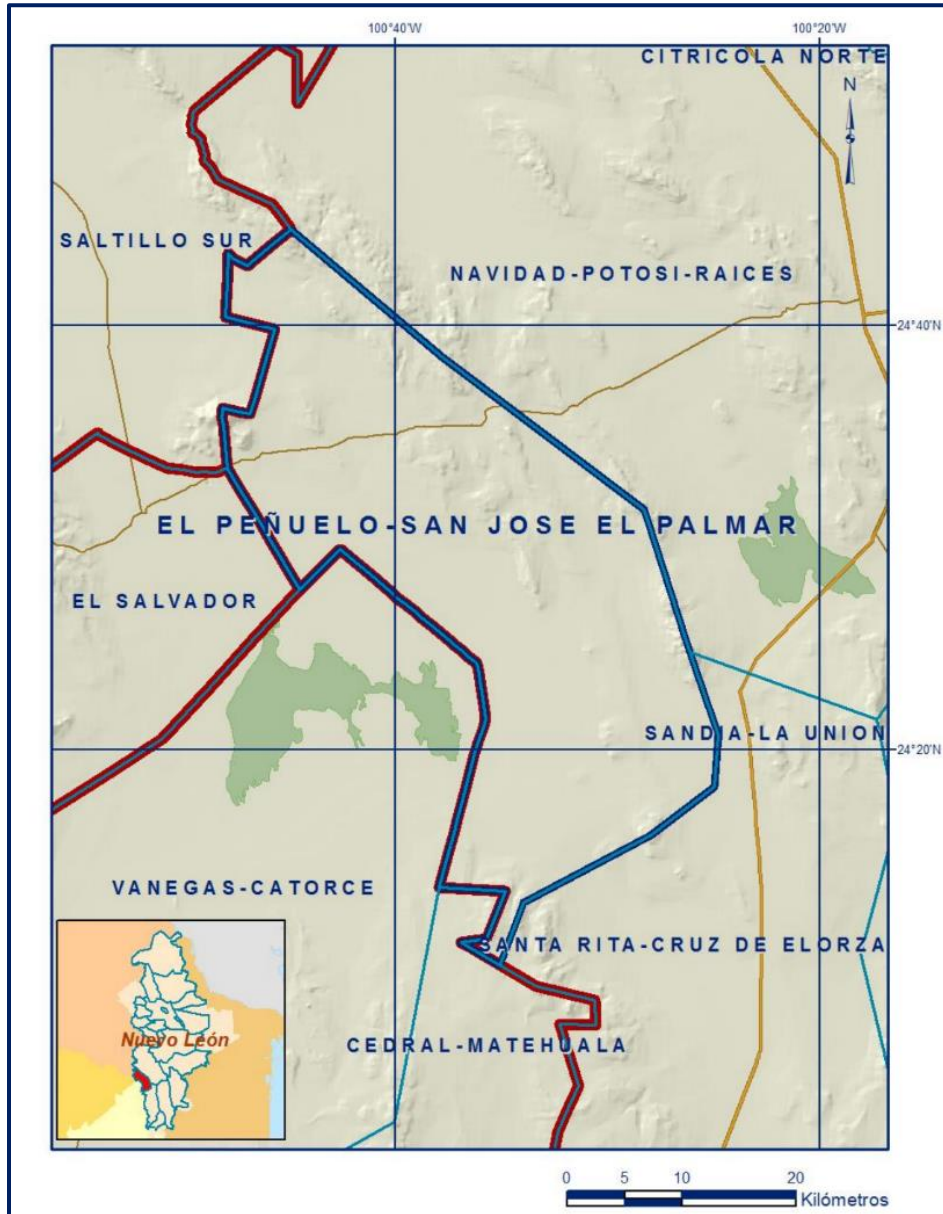


Figura 1. Localización del acuífero

Geopolíticamente se localiza parcialmente en los municipios Doctor Arroyo y Galeana, pertenecientes al estado de Nuevo León.

La poligonal que delimita el acuífero se encuentra definida por los vértices cuyas coordenadas se presentan en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

Tabla 1. Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada del acuífero

ACUÍFERO 1921 EL PEÑUELO-SAN JOSE EL PALMAR							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	100	33	59.2	24	12	48.8	
2	100	35	4.6	24	9	50.8	DEL 2 AL 3 POR EL LIMITE ESTATAL
3	100	44	32.5	24	27	33.2	DEL 3 AL 4 POR EL LIMITE ESTATAL
4	100	47	55.0	24	33	17.5	DEL 4 AL 5 POR EL LIMITE ESTATAL
5	100	44	55.7	24	44	32.2	
6	100	37	49.7	24	38	33.7	
7	100	28	16.2	24	31	20.9	
8	100	26	9.0	24	24	37.7	
9	100	24	48.8	24	20	42.1	
10	100	24	59.4	24	18	14.7	
11	100	27	58.1	24	15	58.7	
1	100	33	59.2	24	12	48.8	

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero El Peñuelo – San José El Palmar pertenece al Organismo de Cuenca VI “Río Bravo”. Su territorio se encuentra parcialmente vedado y sujeto a la disposición del “DECRETO por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos en la superficie comprendida dentro del límite geopolítico del municipio de Galeana, estado de Nuevo León, para el mejor control de las extracciones, uso y aprovechamiento de aguas del subsuelo en dicha zona.”, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 7 de julio de 1978; esta veda se clasifica como tipo II, en la que la capacidad de los mantos acuíferos permite extracciones para uso doméstico y de abrevadero que se realicen por medio manuales.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 4. El uso principal del agua subterránea es el agrícola. El acuífero pertenece al Consejo de Cuenca Altiplano.

2 FISIOGRAFÍA

2.1 Provincia fisiográfica

De acuerdo a la clasificación de las provincias fisiográficas realizada de INEGI, la superficie cubierta por el acuífero se localiza en la provincia de la Sierra Madre Oriental,

subprovincias fisiográficas Sierras Transversales y Sierras y Llanuras Occidentales.

2.2 Clima

De acuerdo con la clasificación de Köppen modificada por E. García, para las condiciones de la República Mexicana, en el área cubierta por el acuífero predomina el clima seco templado, sin embargo, también se encuentran los climas semiseco templado, seco semicálido y templado subhúmedo.

Para la determinación de las condiciones climatológicas, se utilizaron los datos de 4 estaciones que tienen influencia en el área del acuífero, con un periodo de registro que va de 1982 a 2005; mediante el método de polígonos de Thiessen, se determinó que los valores promedio anuales de temperatura y precipitación son **18.0°C** y **289.9 mm**, respectivamente.

2.3 Hidrografía

El acuífero se ubica en la Región Hidrológica 37, El Salado; sobre el acuífero se encuentran las cuencas Sierra Madre Oriental y la cuenca Matehuala, las cuales cubren la mayor parte de éste, sin embargo, parte del acuífero también se encuentra cubierto por la cuenca Sierra de Rodríguez.

La primera cuenca tiene un volumen disponible a la salida de 6.114 millones de metros cúbicos, mientras que la segunda, tiene un volumen disponible a la salida de 5.063 millones de metros cúbicos, de acuerdo a lo publicado en el DOF el 21 de septiembre de 2020.

El patrón de drenaje que predomina es de tipo dendrítico, controlado principalmente por las estructuras, la litología y morfología de las unidades en las que se emplaza.

Los principales ríos que conforman la región son Los Mimbres, San Isidro y San Julián.

2.4 Geomorfología

Está conformado por una sierra alta compleja, y sierra alta compleja con lomerío siendo esta la Sierra Madre Oriental, además está constituido por bajadas típicas, bajadas con lomerío, llanuras desérticas de piso rocoso o cementado, llanura aluvial, llanura desértica inundable y salina, así como con lomerío típico y lomerío con bajadas.

3 GEOLOGÍA

Una gran extensión de la zona está conformada por depósitos aluviales. En las partes elevadas, existen rocas sedimentarias como caliza-lutita, conglomerados y calizas (Figura 2).

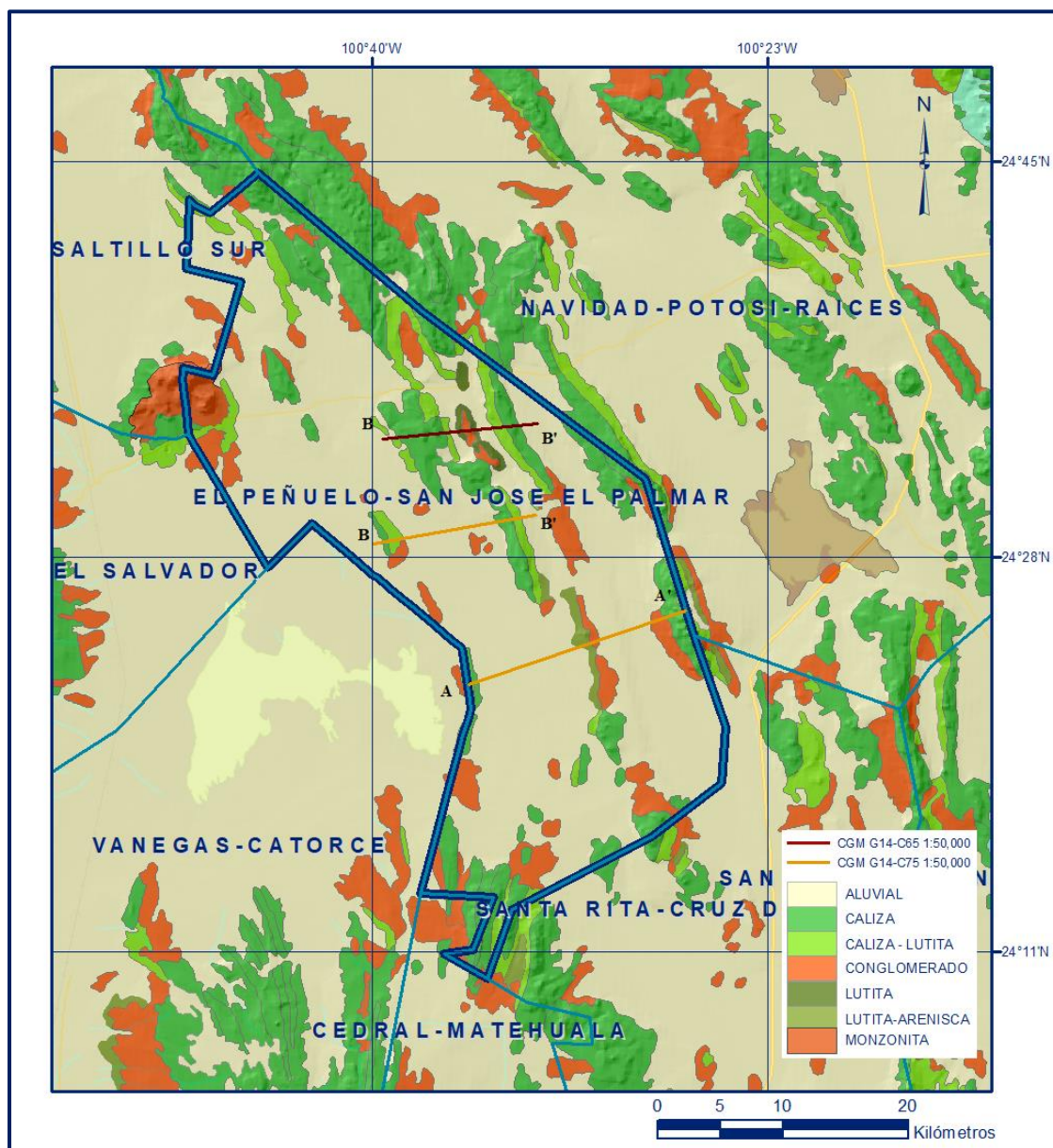


Figura 2. Geología general del acuífero

3.1 Estratigrafía

Mesozoico

Jurásico - Superior

Oxfordiano –Kimmeridgiano

Caliza (JoCz)

La estratigrafía varía en edad del Jurásico superior al Holoceno. La unidad más antigua está conformada por una secuencia de caliza en capas medianas a gruesas, de edad Oxfordiano (JoCz), correspondiente a la Formación Zuloaga; Imlay (1938, 1953) describe que esta unidad está constituida principalmente de caliza de estratificación gruesa, presentándose capas de 3-5 e incluso 10 pies; en algunas secciones en la parte superior pueden presentar nódulos de pedernal negro y localmente algunas capas presentan bivalvos, gasterópodos o corales pobremente conservados. De manera general en la parte superior de la unidad predomina una caliza gris oscura maciza, dispuesta en capas que van de centímetros hasta metros de espesor (Rogers et al., 1957; Pérez-Rul, 1967; Barboza-Gudiño et al., 2004), texturalmente, corresponde a un packstone, predominantemente constituido por granos no esqueléticos como ooides, pisolitos y oncolitos, y en menor grado de granos esqueléticos como fragmentos de corales, moluscos, braquiópodos y espículas de esponja (Salvador, 1991); se caracteriza por la abundancia de fracturas estilolíticas relativamente grandes; en algunas localidades existe dolomita microcristalina (Rogers et al., 1957; PérezRul, 1967), contienen pequeños nódulos de pedernal gris claro y algunos horizontes con *Nerinea* sp. (Pérez-Rul, 1967; Barboza-Gudiño et al., 2004) y con frecuentes calciesferas (Barboza-Gudiño et al., 2004). Las porciones media e inferior son menos masivas, caracterizadas por caliza gris a gris claro con nódulos de pedernal negro o gris (Rogers et al., 1957; Pérez-Rul (1967) y vetillas de calcita; así como intercalaciones de lutita gris clara a café clara que intemperizan a un color amarillento a rojizo (Pérez-Rul, 1967).

Yeso – Caliza (JokY-Cz)

Se encuentra interdigitada con horizontes de yeso de la secuencia de yeso-caliza de la Formación Olvido, de edad Oxfordiano-Kimmeridgiano (JokY-Cz). La descripción original, realizada por Heim (1940), considera que esta unidad está constituida principalmente de caliza de color amarillo a naranja al intemperismo y dolomita con lutita verde, roja y violeta, algunas areniscas y bloques de yeso. De manera general, en el Anticlinorio de Huizachal, Carrillo-Bravo (1961) menciona que esta formación, en la base está constituida por lutitas rojas, yesíferas, en algunos lugares con intercalaciones de lutita verde y amarilla, caliza de grano fino color crema, amarillento, ligeramente

rosadas; margas amarillo y gris verdoso, pudiendo presentar algunas capas de yeso; en cima presenta caliza de grano fino crema-amarillenta, en algunos casos la caliza presenta pedernal blanco, o foraminíferos recristalizados; asimismo, se puede presentar estilolitas paralelas a los planos de estratificación. Contiene una brecha de espesor variable que probablemente se formó por la disolución de las evaporitas.

Tithoniano

Limolita – Caliza (JkKbeLm-Cz)

Ambas formaciones son cubiertas concordantemente por una secuencia en la que predominan los sedimentos terrígenos, con intercalaciones de delgados horizontes calcáreos, de la Formación La Caja (JkKbeLm-Cz), demarcando los depósitos del Jurásico superior Tithoniano al Cretácico inferior Berriasiano-Aptiano.

La Formación La Caja consiste se ha descrito como una secuencia de calcarenita y limolitas calcáreas, con abundante fauna de amonites (Padilla y Sánchez, 1978); y fosforita (Padilla y Sánchez op cit.; PEMEX, 1988); así como una secuencia de mudstone, en capas de unos cuantos centímetros a 10 cm de espesor, con interestratificaciones de lutita calcárea laminar, además de bandas de pedernal negro (PEMEX op cit.). También se reconocen dentro de esta unidad capas delgadas de calizas margosas alternando con limolitas y areniscas bituminosas, con cefalópodos, gasterópodos, pelecípodos y braquiópodos (Barboza-Gudiño et al., 2004).

Cretácico - Inferior

Berriasiano

Caliza – Lutita (KbehCz-Lu)

A la Formación La Caja le sobreyace la Formación Taraises (KbehCz-Lu) del Berriasiano-Hauteriviano, conformada por caliza, caliza arcillosa y menormente margas con interestratificaciones de lutita. En un inicio, Imlay (1936) divide la Formación Taraises en dos miembros litológicos; el miembro inferior lo describe como calizas grises, resistentes a la erosión; sin embargo, el miembro superior se constituye de estratos delgados de caliza y calizas arcillosas; muy fosilífera. De manera general, la unidad consiste de una caliza arcillosa, con textura de mudstone a wackestone de color gris oscuro, con algunas intercalaciones de margas y lutitas calcáreas de capas laminares, en estratos de medianos a gruesos. Asimismo, se observan delgadas bandas y lentes de pedernal intercaladas con estratos de lutitas y limolitas, líneas estilolíticas paralelas a la estratificación (Santamaría-Orozco et al., 1990), horizontes

terrígenos de color gris (Barbosa-Gudiño et al., 1998); así como concreciones de pirita convertidas en hematita (Enciso de la Vega, 1968; Santamaría-Orozco et al., 1990; Tristán-González y Torres-Hernández, 1994). Autores como Imlay, (1940); Canizal-Sosa y García-Ruiz, (2009) reportan la presencia de una arcosa conglomerática intercalada con caliza verdosa y algunas margas.

Barremiano

Caliza (KhapCz)

La unidad anterior se encuentra cubierta por depósitos de caliza en capas medianas a gruesas, con esporádicos nódulos de pedernal de la Formación Cupido (KhapCz) del Hauteriviano-Aptiano. En su descripción original, Imlay (1937) define la unidad como calizas, formando capas con concreciones de pirita, y concreciones de pedernal gris claro. De manera general, esta unidad está constituida de caliza gris, en algunas ocasiones negra (en la parte superior de la unidad). Esporádicamente las calizas están intercaladas con capas de limolitas de color violáceo. Dentro de la caliza se ha reportado la presencia de pedernal, así como concreciones de marcasitas oxidadas (Tristán-González y Torres-Hernández, 1994).

Aptiano

Caliza – Lutita (KapCz-Lu)

Es roca caliza arcillosa en capas delgadas con intercalaciones de terrígenos y bandas de pedernal negro, pertenecientes a la Formación La Peña (KapCz-Lu) del Aptiano. Imlay (1936), en su descripción original la dividió en dos miembros, un miembro inferior de 1400 pies de calizas gris oscuro a gris claro en estratos medianos a gruesos con algunas zonas de caliza finamente estratificada junto a cantidades variables de lutita, las superficies intemperizadas son de color gris a gris amarillento y puede contener nódulos de pirita. El miembro superior consiste de un paquete de 50 a 80 pies de calizas de capas delgadas y lutitas interestratificadas; sin embargo, más tarde Humphrey (1949) menciona que la unidad está formada por margas de color gris que intemperizan en colores rosa y rojo, interestratificadas con delgadas capas de calizas de color gris claro a gris oscuro. Presenta estratos delgados de lutitas fisiles de color gris oscuro a negro y comúnmente contiene vetillas y lentes de pedernal de 3 a 9 cm de espesor.

Albiano

Caliza – Dolomía (KaCz-Do)

A esta última le sobreyace una delgada secuencia de caliza de textura mudstone a wackestone, de estratificación delgada a mediana y con esporádicos nódulos de pedernal negro de la Formación Aurora (KaCz-Do) del Albiano.

Inicialmente descrita como caliza semipura en capas gruesas con numerosos nódulos de fierro y pedernal, con abundantes fósiles (Burrows, 1910). Humphrey y Díaz (1956), la describen como caliza de estratificación delgada a masiva de color gris a ocre con cantidad variable de pedernal en forma de nódulos irregulares y concreciones. Presenta raras intercalaciones de lutita calcárea gris. Los nódulos de pedernal son de color gris a negro e intemperizan a ocre oscuro PEMEX (1988b), considera que la caliza es de tipo wackestone – packestone y grainstone en estratos masivos, con macrofauna de rudistas (caprínidos y toucasias) y microfauna de miliólidos, así como fragmentos de algas, entre otros.

Cretácico - Superior

Cenomaniano - Turoniano

Caliza – Lutita (KaceCz-Lu)

Le sigue una secuencia de caliza y lutita con bandas y lentes de pedernal negro, correspondiente a la Formación Cuesta del Cura (KaceCz-Lu) del Albiano-Cenomaniano.

Imlay (1936) menciona que esta unidad se compone principalmente de capas delgadas de caliza ondulosa y compactas de color gris oscuro a negro; incluye lutita gris y numerosos lentes de pedernal, algunas capas de caliza son finamente laminadas con bandas grises y negras intercaladas. De manera general esta unidad está constituida por caliza negra con estratificación que varía de delgada a mediana, en algunas ocasiones la caliza se observa café grisácea, laminada y ondulada (Pérez-Rul, 1967); asimismo, contiene lutita con lentes y nódulos de pedernal.

Caliza Lutita (KcetCz-Lu)

Continuando con una sucesión de caliza arcillosa que se interestratifica con horizontes de lutita de la Formación Indidura (KcetCz-Lu) del Cenomaniano-Turoniano.

Coniaciano

Arenisca – Lutita (KcomAr-Lu)

Amplio paquete compuesto por una secuencia arrítmica de arenisca y lutita de la Formación Caracol (KcomAr-Lu) de edad Coniaciano-Maastrichtiano. Esta última unidad representa el último depósito de la Cuenca Mesozoica del Centro de México.

La formación Caracol fue descrita por Imlay (1937) como tobas desvitrificadas, lutita y caliza en menor proporción. Consiste principalmente de una alternancia de lutita y capas arenosas; la lutita es ligeramente calcárea de color gris oscuro y negra, que se rompe en fragmentos alargados y angulosos característicos. Se encuentra litológicamente formada por una sucesión de arenisca y lutita intercaladas, con estratificación que cambia de delgada a mediana; la arenisca varía de grano fino a medio con matriz calcárea y de color café oscuro, la lutita varía de arenosa a arcillosa, de color gris (Enciso de La Vega, 1963). PEMEX (1988b) describe que la Formación Caracol consiste de una sucesión irregular de lutita, arenisca y caliza con interestratificaciones de toba desvitrificada y presencia de caliza silícea interestratificada (novaculita).

Cenozoico

Paleógeno - Eoceno

Conglomerado polimíctico – Arenisca (Te (?)Cgp-Ar)

Los depósitos continentales cenozoicos inician con una sucesión de conglomerado polimíctico bien cementado y mal clasificado (Te(?)Cgp-Ar), con edad incierta del Eoceno.

Conglomerado – Polimíctico (TmplCgp), Conglomerado polimíctico – grava (TplQptCgp-gv), Coluvión (Qhoco), Grava – Arena (Qhogv-ar), Aluvión (Qhoal)

Como parte de la erosión de las rocas preexistentes, se desarrollan depósitos de “pie de monte”, conformados por secuencias conglomeráticas y de gravas con una variable consolidación (TmplCgp, TplQptCgp-gv y Qhoco), considerándose del Mioceno - Plioceno al Cuaternario. Finalmente, se tienen depósitos no consolidados de grava-arena (Qhogv-ar) y aluvión (Qhoal) rellenando las partes topográficamente más bajas.

3.2 Geología estructural

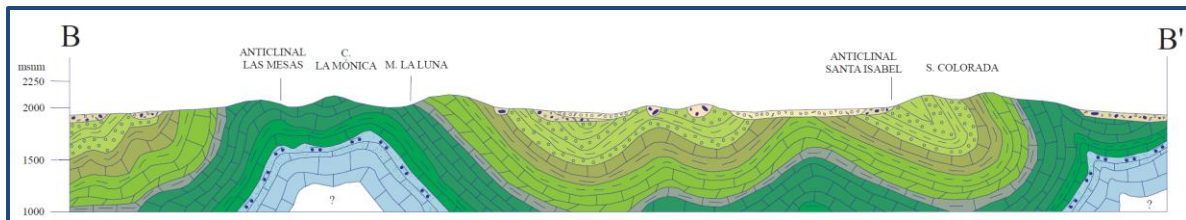
La configuración estructural es derivada, principalmente, de los efectos compresivos

generados durante la orogenia Larámide. En este sentido, las principales estructuras reconocidas dentro del área corresponden al dominio dúctil-frágil, observándose pliegues anticlinales y sinclinales, cuyos planos axiales presentan inclinaciones hacia el noreste, como en los anticlinales Pichaho, La Tomita, Las Mesas, El Halcón, Santa Isabel, entre otros, asimismo en los sinclinales El Barrosito. Además, como resultado del empuje tectónico Laramídico, se generan fallas laterales como Los Piloncillos, El Arroyo, La Presita, El Oso, La Cañada, El Caracol y San Antonio. Los pliegues son mayormente recumbentes y en algunos casos, cortados o interrumpidos por sistemas de fallas laterales con rumbo NE.

3.3 Geología del subsuelo

De acuerdo con la geología superficial y algunos cortes litológicos, se determina que el acuífero está constituido, en su porción superior, por la erosión de rocas preexistentes, creando depósitos de pie de monte, el cual está conformado por secuencias conglomeráticas y de gravas con variable consolidación. La porción inferior se encuentra conformada por rocas sedimentarias tales como arenisca, lutita, caliza y dolomía. Cabe mencionar que la zona se encuentra bajo los efectos de un cambio en el ángulo de subducción entre las placas Farallón y Norteamericana ocasionando efectos compresivos que dieron inicio a la orogenia Laramide (figura 3).

También, debido a dichos efectos compresivos se generaron fallas, lo que hace que tenga la zona un mayor potencial hidrogeológico debido al fracturamiento.



Fuente: Carta Geológico-Minera G14-C65 "El Carmen". Esc. 1:50,000 (SGM, 2018)





Fuente: Carta Geológico-Minera G14-C75 "El Canelo". Esc. 1:50,000 (SGM, 2014)

Figura 3. Secciones geológicas esquemáticas

4 HIDROGEOLOGÍA

4.1 Tipo de acuífero

De acuerdo con la información geológica, es posible definir la presencia de un acuífero de **tipo libre**, heterogéneo y anisótropo, constituido en su porción superior por depósitos de rocas preexistentes y de gravas, además de conglomerados. La porción inferior también se aloja en una secuencia de rocas sedimentarias, principalmente de composición de calizas y lutitas y en menor proporción dolomías, y que pueden presentar permeabilidad secundaria por fracturamiento.

5 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:

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

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:

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

5.1 Entradas

Las entradas al acuífero El Peñuelo-San José El Palmar están integradas básicamente por la recarga natural que se produce por la infiltración de la lluvia (R_v).

5.1.1 Recarga vertical (R_v)

La recarga vertical total que recibe el acuífero (volumen susceptible de infiltrarse) se obtuvo mediante el planteamiento de un balance hidrometeorológico para la superficie del acuífero, mediante la siguiente expresión:

$$V_{LL} = V_{ETR} + V_{ESC} + V_{INF} \quad (1)$$

Donde:

V_{LL} = Volumen de lluvia;

V_{ETR} = Volumen evapotranspirado;

V_{ESC} = Volumen escurrido;

V_{INF} = Volumen infiltrado;

Por lo tanto, despejando el volumen infiltrado, se obtiene lo siguiente:

$$V_{INF} = V_{LL} - V_{ETR} - V_{ESC} \quad (2)$$

El volumen de lluvia que se precipita en la superficie del acuífero tomado en cuenta para el balance, se obtiene al multiplicar su área (1,083.1 km²) por la lámina de precipitación media anual (289.9 mm):

$$V_{LL} = 1,083.1 \text{ km}^2 (0.2899 \text{ m}) = 314.0 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

Para la estimación de la evapotranspiración real se utilizó la ecuación empírica de Turc, considerando los valores promedio anual de precipitación de 289.9 mm y temperatura de 18.0 °C.

Turc a partir de observaciones realizadas en 254 cuencas distribuidas para todos los climas del mundo, reporta la expresión siguiente:

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

Donde:

ETR = Evapotranspiración real;

P = Precipitación media anual;

L = 300 + 25T + 0.05T³;

T = Temperatura media anual, en °C;

La limitación teórica para la utilización de la fórmula de Turc, es que la precipitación no debe ser menor a la relación 0.31L (322.9). En caso contrario se obtiene una $ETR > P$ y para estos casos se debe considerar a $ETR = P$. De acuerdo con lo anterior, se obtiene un valor de lámina de evapotranspiración de 293 mm anuales.

Fórmula de Turc: $ETR (mm) = \frac{P (mm)}{\sqrt{0.90 + \left(\frac{P^2 (mm)}{L^2}\right)}} \quad L = 300 + 25T + 0.05T^3$			
T (°C) =	18.0		
P(mm) =	289.9	P ² =	84042.01
L =	1041.60	L ² =	1084930.56
ETR (mm)	293		

De igual manera Coutagne propuso la ecuación siguiente para el cálculo de la evapotranspiración real:

COUTAGNE Donde: ETR= Evapotranspiración m/año P = precipitación en m/año $\chi = 1/(0.8 + 0.14 t)$ t = temperatura en °C	$ETR = P - \chi P^2$
--	--

La fórmula solo es aplicable para valores de la precipitación media anual (P) comprendidos entre 1/8X y 1/2X, estando ETR y P en metros, y T en °C. Si P es menor que 1/8λ la ETR es igual a la precipitación, es decir, no existe escurrimiento; si la precipitación es mayor que 1/2λ la ETR es prácticamente independiente de P y su valor está dado por: $ETR = 0.20 + 0.035 T$. Aplicando la fórmula de Coutagne se obtiene una lámina de evapotranspiración real de **265 mm anuales**.

Se optó por la estimación conservadora de la infiltración que se obtiene al tomar en cuenta la lámina de evapotranspiración obtenida con la fórmula de Coutagne, que es de 0.265 m anuales; por lo que el volumen de la ETR (V_{ETR}) es:

$$V_{ETR} = 1,083.1 \text{ km}^2 (0.265 \text{ m}) = 287.0 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

Para determinar el volumen de escurrimiento debido a la lluvia (V_{ESC}) se utilizó el método establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, publicada en el Diario Oficial de la Federación, con fecha del 27 de marzo de 2015, en la que se señala que para los casos en los que no se cuente con suficiente información para determinar el volumen anual de escurrimiento natural, se puede aplicar el método indirecto denominado precipitación-escurrimiento.

La normatividad establece que el volumen anual medio de escurrimiento natural es igual a la precipitación media anual por el área y por un coeficiente de escurrimiento:

$$\begin{array}{ccccccc} \text{VOLUMEN ANUAL} & = & \text{PRECIPITACION} & * & \text{AREA DE} & * & \text{COEFICIENTE DE} \\ \text{DE ESCURRIMIENTO} & & \text{ANUAL DE LA} & & \text{LA} & & \text{ESCURRIMIENTO} \\ \text{NATURAL DE LA} & & \text{CUENCA} & & \text{CUENCA} & & \\ \text{CUENCA} & & & & & & \end{array}$$

El coeficiente de escurrimiento (C_e) se puede determinar, según la norma antes citada, en función del parámetro K que depende del tipo y uso de suelo, de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS).

Con apoyo de cartografía del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, se clasifican los suelos de la cuenca en estudio, de acuerdo con los tres diferentes tipos: A (suelos permeables); B (suelos medianamente permeables); y C (suelos casi impermeables), que se especifican en la Tabla 2 y se determina el uso actual del suelo.

En el caso de que, en la cuenca en estudio, existan diferentes tipos y usos de suelo, el valor de K se calcula como la resultante de subdividir la cuenca en zonas homogéneas para obtener el promedio ponderado.

Dependiendo del valor obtenido para K , el coeficiente de escurrimiento (C_e), se calcula mediante las fórmulas siguientes, en la que P es la precipitación media anual expresada en mm:

$$\begin{array}{ll} \text{Si } K \text{ resulta menor o igual que } 0.15 & C_e = K (P-250) / 2000 \\ \text{Si } K \text{ es mayor que } 0.15 & C_e = K (P-250) / 2000 + (K - 0.15) / 1.5 \end{array}$$

Donde:

P = Precipitación anual;

Ce = Coeficiente de escurrimiento anual;

K = Parámetro que depende del tipo, uso y cubierta del suelo;

De acuerdo con la cartografía de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) escala 1:1,000,000 en la zona que comprende el acuífero El Peñuelo-San José El Palmar predominan los siguientes tipos de suelo: Litosol, Solonchak y Xerosol, que se clasificaron en tres tipos de suelo: A, B y C (figura 4).

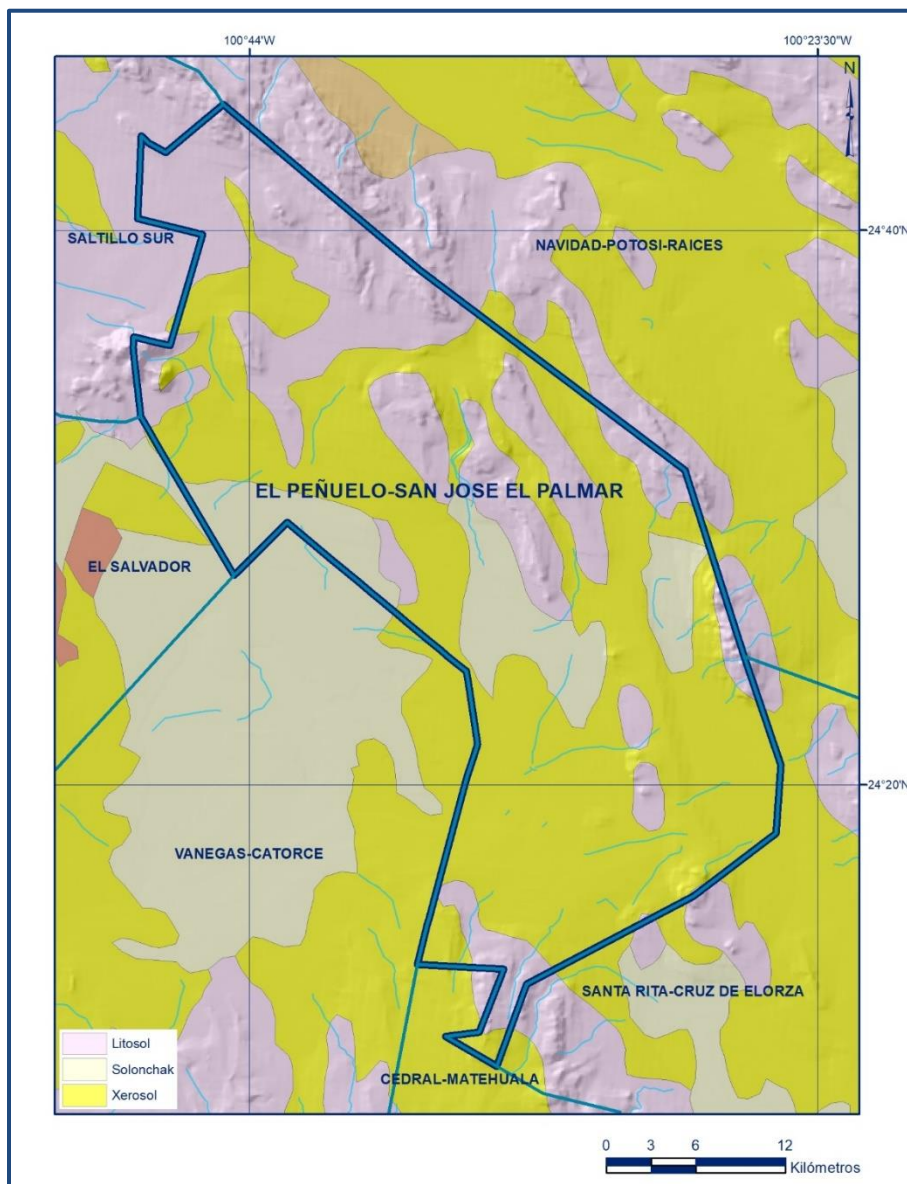


Figura 4. Tipo de suelo

En cuanto al uso de suelo, de acuerdo con la cartografía del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) escala 1: 250,000 en el área donde se localiza el acuífero hay al menos cuatro usos de suelo diferentes: área agrícola, bosque, matorral y otros tipos (figura 5).

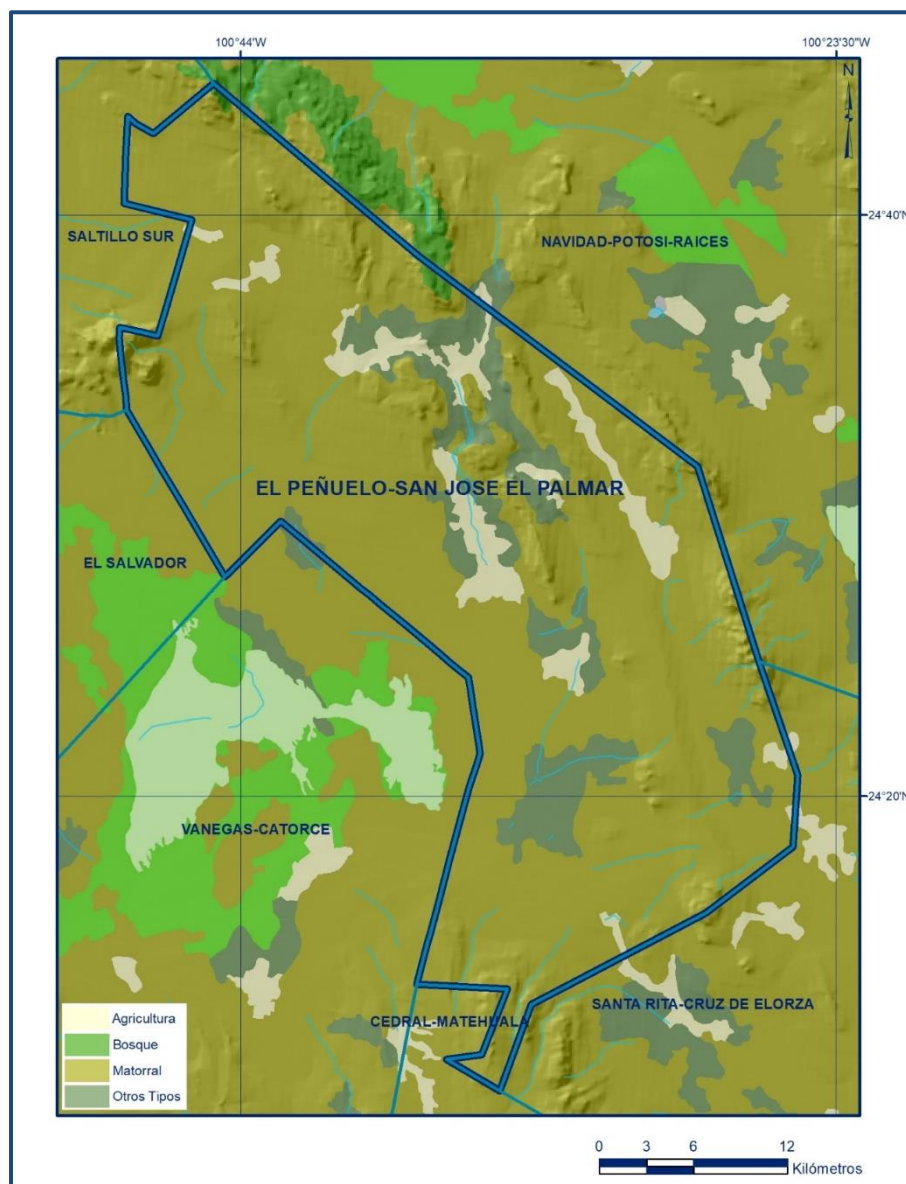


Figura 5. Uso de Suelo

Tabla 2. Valores de K en función del tipo y uso del suelo

USO DE SUELO	TIPO DE SUELO A	TIPO DE SUELO B	TIPO DE SUELO C
Barbecho, áreas incultas y desnudas	0.26	0.28	0.3
Cultivos:			
En hilera:	0.24	0.27	0.3
Legumbres o rotación de pradera	0.24	0.27	0.3
Granos pequeños	0.24	0.27	0.3
Pastizal:			
% del suelo cubierto o pastoreo			
Más del 75% -poco-	0.14	0.2	0.28
Del 50 al 75% -regular-	0.2	0.24	0.3
Menos del 50% -excesivo-	0.24	0.28	0.3
Bosque:			
Cubierto más del 75%	0.07	0.16	0.24
Cubierto del 50 al 75%	0.12	0.22	0.26
Cubierto del 25 al 50%	0.17	0.26	0.28
Cubierto menos del 25%	0.22	0.28	0.3
Zonas urbanas	0.26	0.29	0.32
Caminos	0.27	0.3	0.33
Pradera permanente	0.18	0.24	0.3
TIPO DE SUELO	CARACTERÍSTICAS		
A	Suelos permeables, tales como arenas profundas y loes poco compactos		
B	Suelos medianamente permeables, tales como arenas de mediana profundidad; loes algo más compactos que los correspondientes a los suelos Tipo A; terrenos migajosos		
C	Suelos casi impermeables, tales como arenas o loes muy delgados sobre una capa impermeable, o bien arcillas		

De esta manera, el valor de K se obtuvo como promedio ponderado y es igual a 0.23, valor que se aplicó en la siguiente ecuación para obtener el coeficiente de escurrimiento (Ce):

$$Ce = K (P-250)/2000 + (K-0.15)/1.5$$

$$\mathbf{Ce = 0.058}$$

Aplicando este coeficiente de escurrimiento al volumen de lluvia, se obtiene el volumen del escurrimiento:

$$\mathbf{V_{ESC} = 0.058 (314.0 \text{ hm}^3) = 18.2 \text{ hm}^3 \text{ anuales}}$$

Sustituyendo valores en la ecuación (2), se obtiene lo siguiente:

$$\begin{aligned}V_{INF} &= V_{LL} - V_{ETR} - V_{ESC} \quad (2) \\V_{INF} &= 314.0 - 287.0 - 18.2 \\V_{INF} &= 8.8 \text{ hm}^3 \text{ anuales}\end{aligned}$$

Al dividir el volumen promedio anual infiltrado, entre el volumen anual promedio precipitado, que es de 314.0 hm³/año, se obtiene el coeficiente de infiltración de 0.0280.

De acuerdo con lo anterior, el volumen susceptible de infiltrarse es de 8.8 hm³/año en 1,083.1 km² de superficie del acuífero.

Por lo que la **Rv = 8.8 hm³ anuales**

5.2 Salidas

Las salidas de agua subterránea estimadas en este balance son las siguientes:
La descarga del acuífero ocurre principalmente a través de manantiales (Dm).

5.2.1 Bombeo (B)

De acuerdo con los datos reportados por el Registro Público de Derechos de Agua (REPDa), se tiene registrado un volumen de extracción de **0.1 hm³ anuales**, a la fecha de corte del 30 de diciembre del 2022.

5.2.2 Descarga por manantiales (Dm)

En la zona de este acuífero no se identificó la existencia de manantiales, por lo que no existe descarga por manantiales.

6 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:

$$\begin{array}{ccccccc} \text{DISPONIBILIDAD} & = & \text{RECARGA} & - & \text{DESCARGA} & - & \text{EXTRACCIÓN} \\ \text{MEDIA ANUAL DE} & & \text{TOTAL} & & \text{NATURAL} & & \text{DE AGUA} \\ \text{AGUA EN EL} & & & & \text{COMPROMETIDA} & & \text{SUBTERRÁNEA} \end{array}$$

SUBSUELO DEL	MEDIA
ACUÍFERO	ANUAL

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

6.1 Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde a la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero. Para este caso la recarga total es de **8.8 hm³ anuales**.

6.2 Descarga natural comprometida (DNC)

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

Para este caso, su valor es de **DNC = 0.0 hm³ anuales**, que corresponde a la descarga de manantiales.

6.3 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 (REPD), 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 **180,950 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre del 2022**.

6.4 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.

$$\begin{aligned}\text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 8.8 - 0.0 - 0.180950 \\ \text{DMA} &= 8.619050 \text{ hm}^3 \text{ anuales}\end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible de **8,619,050 m³ anuales** para otorgar nuevas concesiones.

7 BIBLIOGRAFÍA

Servicio Geológico Mexicano, 2018. Carta Geológico-Minera G14-C65 “El Carmen”. Esc. 1:50,000. Nuevo León.

Servicio Geológico Mexicano, 2014. Carta Geológico-Minera G14-C75 “El Canelo”. Esc. 1:50,000. Nuevo León.

Servicio Geológico Mexicano, 2021, Cartas impresas disponibles del Servicio Geológico Mexicano, <https://www.sgm.gob.mx/CartasDisponibles/>

Secretaría de Gobernación, ACUERDO por el que se actualiza la disponibilidad media anual de agua subterránea de los 653 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, mismos que forman parte de las regiones hidrológico-administrativas que se indican, 7 de septiembre del 2020, (México).

Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Conjunto de datos vectoriales Fisiográficos, (2001), México: INEGI.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Conjunto de datos vectoriales Geológicos, Fallas fracturas, (2002), México: INEGI.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Conjunto de datos vectoriales de la carta de Uso del suelo y vegetación, Serie VI, (2017), México: INEGI.

Comisión Nacional del Agua, 2021, Cuencas, Cuencas (nacional), <http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=cuencas>.

Comisión Nacional del Agua, 2021, Regiones Hidrológicas, Regiones Hidrológicas (nacional), <http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=regionesHidrologicas>.

Ficha de Unidad Litoestratigráfica (Formación), Léxico Estratigráfico de México, Servicio Geológico Mexicano, Secretaría de Economía.