

*Actualización de la disponibilidad media anual
de agua en el acuífero Cañón del Huajuco
(1911), Estado de Nuevo León*

*Publicada en el Diario Oficial de la Federación
20 de abril de 2015*

Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea

Publicada en el diario oficial de la federación el 20 de Abril de 2015

El artículo 22 segundo párrafo de la Ley de Aguas Nacionales (LAN), señala que para el otorgamiento de una concesión o asignación, debe tomarse en cuenta la disponibilidad media anual del agua, que se revisará al menos cada tres años; sujetándose a lo dispuesto por la LAN y su reglamento.

Del resultado de estudios técnicos recientes, se concluyó que existe una modificación en la disponibilidad de agua subterránea, debido a cambios en el régimen natural de recarga, volumen concesionado y/o descarga natural comprometida; por lo que se ha modificado el valor de la disponibilidad media anual de agua.

La actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea publicada en este documento corresponde a una fecha de corte en el **Registro Público de Derechos de Agua al 30 de junio de 2014.**

CCCXLIII REGIÓN HIDROLÓGICO-ADMINISTRATIVA "RÍO BRAVO"

| CLAVE | ACUÍFERO | R | DNCOM | VCAS | VEXTET | DAS | DÉFICIT |
|-------|----------|--|-------|------|--------|-----|---------|
| | | CIFRAS EN MILLONES DE METROS CÚBICOS ANUALES | | | | | |

ESTADO DE NUEVO LEÓN

| | | | | | | | |
|------|-------------------|------|-----|-----------|-----|----------|-----------|
| 1911 | CAÑÓN DEL HUAJUCO | 26.8 | 0.0 | 28.550004 | 0.8 | 0.000000 | -1.750004 |
|------|-------------------|------|-----|-----------|-----|----------|-----------|

R: recarga media anual; DNCOM: descarga natural comprometida; VCAS: volumen concesionado de agua subterránea; VEXTET: volumen de extracción de agua subterránea consignado en estudios técnicos; DAS: disponibilidad media anual de agua subterránea. Las definiciones de estos términos son las contenidas en los numerales "3" y "4" de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015.



Comisión Nacional del Agua

Subdirección General Técnica

Gerencia de Aguas Subterráneas

Subgerencia de Evaluación y

Ordenamiento de Acuíferos

***DETERMINACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA
EN EL ACUÍFERO CAÑÓN DEL HUAJUCO (1911),
ESTADO DE NUEVO LEÓN***

México, D.F. Agosto de 2014

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 | 5 |
| 3.1 Provincia Fisiográfica..... | 5 |
| 3.2 Clima | 6 |
| 3.3 Hidrografía..... | 7 |
| 3.4 Geomorfología | 7 |
| 4. GEOLOGÍA | 8 |
| 4.1 Estratigrafía | 9 |
| 4.2 Geología Estructural | 13 |
| 4.3 Geología del Subsuelo..... | 13 |
| 5. HIDROGEOLOGÍA | 14 |
| 5.1 Tipo de Acuífero..... | 14 |
| 5.2 Parámetros hidráulicos | 14 |
| 5.3 Piezometría | 14 |
| 5.4 Comportamiento hidráulico | 15 |
| 5.4.1 Profundidad al nivel estático | 15 |
| 5.4.2 Elevación del nivel estático..... | 15 |
| 5.4.3 Evolución del nivel estático..... | 16 |
| 5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea | 17 |
| 6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRIA..... | 18 |
| 7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS..... | 18 |
| 7.1 Entradas | 19 |
| 7.1.1 Recarga vertical por lluvia (Rv)..... | 19 |
| 7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)..... | 19 |
| 7.1.3 Recarga en las calizas (Rc) | 21 |
| 7.2 Salidas..... | 21 |
| 7.2.1 Bombeo (B) | 21 |
| 7.2.2 Evapotranspiración Real (ETR) | 21 |
| 7.2.3 Salidas subterráneas | 23 |
| 7.2.4 Descarga a través de túneles (Dt) | 23 |
| 7.3 Cambio de almacenamiento (ΔVS)..... | 23 |
| 8. DISPONIBILIDAD | 24 |
| 8.1 Recarga total media anual (Rt)..... | 24 |
| 8.2 Descarga natural comprometida (DNCOM)..... | 25 |
| 8.3 Volumen concesionado de aguas subterráneas (VCAS)..... | 25 |
| 8.4 Disponibilidad de aguas subterráneas (DAS)..... | 25 |
| 9. BIBLIOGRAFIA..... | 26 |

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-2000 “Norma Oficial Mexicana que establece 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 concesionado vigente en el Registro Público de Derechos del Agua (REPGA).

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 Cañón del Huajuco, definido con la clave 1911 en el Sistema de Información Geográfica para el Manejo del Agua Subterránea (SIGMAS) de la CONAGUA, se localiza en la porción centro-oriental del estado de Nuevo León, entre los paralelos 25° 23' y 25° 35' de latitud norte y entre los meridianos 100° 05' y 100° 18' de longitud oeste, cubriendo una superficie de 235 km².

Limita al norte con el acuífero Área Metropolitana de Monterrey, al este y sur con el acuífero Citrícola Norte y al oeste con el acuífero Campo Buenos Aires, todos ellos pertenecientes al estado de Nuevo León (figura 1).

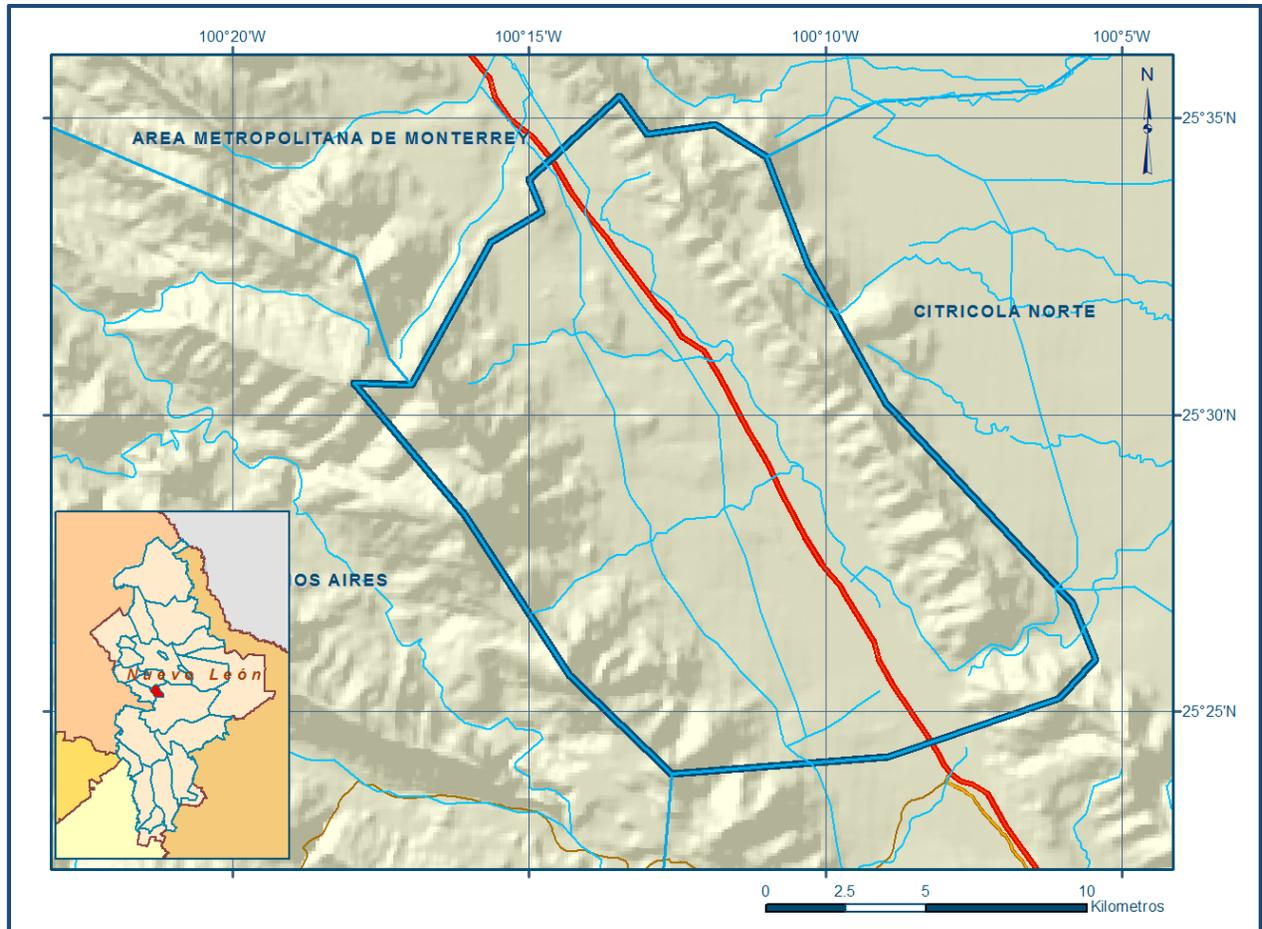


Figura 1. Localización del acuífero Cañón del Huajuco

Geopolíticamente comprende parcialmente los municipios de Monterrey y Santiago, así como pequeñas porciones de Santa Catarina, Juárez y Cadereyta Jiménez. 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

| VERTICE | LONGITUD OESTE | | | LATITUD NORTE | | |
|---------|----------------|---------|----------|---------------|---------|----------|
| | GRADOS | MINUTOS | SEGUNDOS | GRADOS | MINUTOS | SEGUNDOS |
| 1 | 100 | 6 | 4.2 | 25 | 25 | 13.6 |
| 2 | 100 | 8 | 56.5 | 25 | 24 | 14.0 |
| 3 | 100 | 12 | 36.2 | 25 | 23 | 56.7 |
| 4 | 100 | 14 | 19.1 | 25 | 25 | 36.3 |
| 5 | 100 | 16 | 5.3 | 25 | 28 | 19.0 |
| 6 | 100 | 17 | 57.8 | 25 | 30 | 32.1 |
| 7 | 100 | 16 | 59.0 | 25 | 30 | 29.9 |
| 8 | 100 | 15 | 38.4 | 25 | 32 | 54.5 |
| 9 | 100 | 14 | 46.8 | 25 | 33 | 24.7 |
| 10 | 100 | 15 | 0.7 | 25 | 33 | 57.5 |
| 11 | 100 | 13 | 28.7 | 25 | 35 | 21.9 |
| 12 | 100 | 13 | 1.0 | 25 | 34 | 44.1 |
| 13 | 100 | 11 | 51.8 | 25 | 34 | 52.9 |
| 14 | 100 | 11 | 0.1 | 25 | 34 | 21.1 |
| 15 | 100 | 10 | 18.0 | 25 | 32 | 31.6 |
| 16 | 100 | 8 | 59.8 | 25 | 30 | 12.0 |
| 17 | 100 | 5 | 50.3 | 25 | 26 | 49.3 |
| 18 | 100 | 5 | 27.7 | 25 | 25 | 52.7 |
| 1 | 100 | 6 | 4.2 | 25 | 25 | 13.6 |

1.2 Situación Administrativa del Acuífero

El acuífero Cañón del Huajuco pertenece al Organismo de Cuenca “Río Bravo”. Su territorio se encuentra parcialmente vedado; la mayor parte de su superficie está sujeta a las disposiciones del *“Decreto que amplía la zona vedada para el alumbramiento de aguas del subsuelo en los terrenos que ocupa y circunda la ciudad de Monterrey, N.L.”*, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 19 de junio de 1958. Pequeñas porciones de su extremo occidental se encuentran sujetas a las disposiciones del *“Decreto que establece por tiempo indefinido veda para el alumbramiento de aguas del subsuelo de terrenos que ocupa y circunda la ciudad de Monterrey, N.L., en la zona que el mismo describe”*, publicado en el DOF el 17 de julio de 1951. Ambos decretos se clasifican como tipo II, que sólo permiten extracciones para usos domésticos.

En los extremos nororiental y oriental no rige ningún decreto de veda para la extracción de agua subterránea. La porción no vedada del acuífero Cañón del Huajuco, clave 1911, está sujeta a las disposiciones del *“ACUERDO General por el que se suspende provisionalmente el libre alumbramiento en las porciones no vedadas, no reglamentadas o no sujetas a reserva de los 175 acuíferos que se indican”*, publicado en el DOF el 5 de abril de 2013, a través del cual en dicha porción del acuífero, no se permite la perforación de pozos, la construcción de obras de infraestructura o la instalación de cualquier otro mecanismo que tenga por objeto el alumbramiento o extracción de las aguas nacionales del subsuelo, sin contar con concesión o

asignación otorgada por la Comisión Nacional del Agua, quien la otorgará conforme a lo establecido por la Ley de Aguas Nacionales, ni se permite el incremento de volúmenes autorizados o registrados previamente por la autoridad, sin la autorización previa de la Comisión Nacional del Agua, hasta en tanto se emita el instrumento jurídico que permita realizar la administración y uso sustentable de las aguas nacionales del subsuelo.

De acuerdo a la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2014, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 3. El usuario principal es el público-urbano. El acuífero forma parte del Consejo de Cuenca Río Bravo, instalado el 21 de enero de 1999. En su territorio 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 la superficie que cubre el acuífero se han realizado algunos estudios regionales que lo cubren parcialmente, sin embargo el único que lo abarca completamente es el siguiente:

REACTIVACIÓN DE LA RED DE MONITOREO PIEZOMÉTRICO DEL ACUÍFERO DENOMINADO CAÑÓN DEL HUAJUCO, NUEVO LEÓN. Realizado en 2007 Estudios y Proyectos en Agua Subterránea, S.A. de C.V. para la Comisión Nacional del Agua Este estudio tuvo como objetivo general establecer la red de monitoreo piezométrico e hidrogeoquímico que sea representativa del acuífero. Se recabó información piezométrica existente y en 40 pozos se efectuaron mediciones piezométricas, determinación de la elevación de los brocales y medición de la conductividad eléctrica, temperatura, pH y sólidos totales disueltos. Se construyeron mapas con las configuraciones de elevación del nivel estático, profundidad al nivel estático, así como la distribución de los sólidos totales disueltos.

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

3. FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia Fisiográfica

El acuífero Cañón del Huajuco se encuentra ubicado dentro de la Provincia Fisiográfica Sierra Madre Oriental (Raisz, 1964); de acuerdo con la regionalización fisiográfica del INEGI (1981), se ubica en la Subprovincia Fisiográfica Gran Sierra Plegada, que se extiende desde sus límites con el Eje Neovolcánico en las cercanías de Pachuca, Hidalgo, en sentido paralelo a la costa del Golfo de México. A la altura de Monterrey, Nuevo León, una de sus ramas cambia abruptamente al oeste para extenderse hasta la Sierra Madre Occidental al norte de Cuencamé,

Durango; la otra continúa hacia el norte para terminar en la región de Big Bend, Texas. Limita al norte y noroeste con la Provincia de las Sierras y Bolsones, al oeste con la Mesa Central y, en una pequeña franja del extremo noroeste, con la Sierra Madre Occidental, al sur con la Provincia del Eje Neovolcánico y al este con la Llanura Costera del Golfo Norte y la Gran Llanura Norteamericana. Abarca parte de los estados de Durango, Coahuila, Zacatecas, Nuevo León, Tamaulipas, San Luis Potosí, Guanajuato, Querétaro, Veracruz, Hidalgo y Puebla.

La Sierra Madre Oriental es fundamentalmente un conjunto de sierras menores de estratos plegados, cuyas rocas más antiguas son esquistos del Precámbrico, existen además afloramientos de calizas, yesos, lutitas y areniscas. Los cuerpos de roca ígnea intrusiva de composición ácida e intermedia que afectan a rocas sedimentarias del Mesozoico son del Terciario. También pertenecen a esta edad los conglomerados que se encuentran en las márgenes de la Sierra Madre Oriental. Los depósitos de conglomerados y rellenos aluviales pertenecen al Cuaternario. Las principales estructuras de la Sierra Madre Oriental se encuentran constituidas por pliegues anticlinales y sinclinales afectados por grandes fallas de tipo normal y numerosas fallas inversas que han afectado las secuencias normales del depósito.

La Subprovincia Gran Sierra Plegada se inicia inmediatamente al oriente de Saltillo, Coahuila, donde se flexiona con la integración de un gran arco al sur de Monterrey, Nuevo León que se prolonga hacia el sur hasta aproximadamente Ciudad Valles, San Luis Potosí. En ella dominan las capas plegadas de calizas, con prominentes ejes estructurales de anticlinales y sinclinales.

3.2 Clima

De acuerdo con la clasificación hecha por Köppen, adaptada por E. García para las condiciones de la República Mexicana, el clima de la zona del acuífero Cañón del Huajuco es semicálido subhúmedo con lluvias en verano.

Para el análisis climatológico se utilizó la información de 11 estaciones climatológicas que tienen influencia en el área del acuífero: El Cerrito, Las Comitas, Túnel San Francisco, Santiago, La Boca, La Huasteca, Santa Catarina, Adjuntas, Palmitos, Cadereyta Jiménez y San Bartolo, que cuentan un con periodo de análisis de 1970 a 2000. Con base en los registros de estas estaciones climatológicas y el método de polígonos de Thiessen, se obtuvieron valores promedio anuales de precipitación y temperatura de **980.3 mm** y **20.4°C**, respectivamente. La lluvia presenta una distribución parabólica, se manifiesta con mayor intensidad durante el período de abril a octubre, decreciendo durante el resto del año. Los valores menores registrados corresponden a lluvias invernales en los meses de diciembre, enero y febrero.

3.3 Hidrografía

El acuífero se ubica en la Región Hidrológica (RH) número 24, denominada “Río Bravo-Conchos”, Subregión Hidrológica Río San Juan, dentro de la cuenca hidrológica Río Bravo-San Juan, que abarca la mayor parte del estado de Nuevo León. Una de las corrientes principales de esta cuenca es el Río San Juan, segundo afluente en importancia del Río Bravo. El sistema hídrico de la cuenca del este río tiene su origen en el Arroyo La Chueca, el cual escurre en dirección sureste hasta la presa Rodrigo Gómez (La Boca) y después continúa con el nombre de Río San Juan, hasta su desembocadura en el Río Bravo, que ocurre en Camargo, Tamaulipas.

En la superficie que cubre el acuífero, la corriente más importante es el Arroyo La Chueca, que recibe aportaciones de varios pequeños arroyos perennes que descienden de la Sierra Madre Oriental, desde altitudes aproximadamente de 2,000 a 2,300 msnm. Este arroyo que nace en el ojo de agua El Tronco, ubicado en el Cañón del Denuncio, desemboca en la presa La Boca al unirse al Arroyo Sabinas. Tiene una longitud de 13.8 km y presenta un flujo promedio aproximado de 31.4 lps. Existen otros escurrimientos de carácter efímero dentro de la zona, como son los Arroyos La Virgen y El Calabozo, en la porción noroeste del acuífero con dirección noreste, que confluyen en el Río La Silla; Arroyos La Tinaja y Los Álamos, localizados al oeste de la población El Barrial; y el Arroyo El Nogalito ubicado al noroeste del poblado El Ranchito.

La obra hidráulica más importante dentro de la superficie del acuífero es la presa Rodrigo Gómez (La Boca), ubicada en su extremo sur, que tiene una capacidad de almacenamiento de 40 hm³, en una superficie aproximada de 455 ha. Esta presa es alimentada por los arroyos La Chueca, Cavazos, Cristalinas, Dolores, Escamilla, Puerco y San Antonio. Se construyó de 1961 a 1963 y tiene múltiples usos, principalmente para el abastecimiento de agua potable a la ciudad de Monterrey, pero además para otras diferentes actividades como pesca deportiva, recreación, deportes acuáticos y actividades eco turísticas.

3.4 Geomorfología

La región está conformada por pliegues anticlinales y sinclinales con orientación norte-sur, que se flexionan al sur de Monterrey, en el Anticlinorio de Arteaga y cambia abruptamente a una orientación este-oeste. Es común en la región encontrar las estructuras constituidas por dos flancos residuales de un anticlinal, con un valle al centro. Tales estructuras se conocen en el norte del país con el nombre de "potreros", ya que se les aprovecha para el pastoreo. Geomorfológicamente la zona se caracteriza por un conjunto de sierras alargadas y angostas con estrechos valles intermontanos.

Los rumbos de los plegamientos siguen la orientación de la sierra y es justamente al sur de Monterrey, en la unidad geológica llamada Anticlinorio de Arteaga, donde el conjunto de anticlinales paralelos se flexiona lateralmente y describen un arco, que cambia el rumbo de los mismos de sureste-noreste a este-oeste (Sierras Transversales). En general, las altitudes de las cumbres de la Sierra Madre Oriental varían de 2000 a 3000 msnm, pero su parte más alta, que se ubica entre Saltillo y Ciudad Victoria, alcanza elevaciones superiores a 3000 msnm. La cordillera presenta una imponente escarpe sobre la Llanura Costera del Golfo Norte, pero su transición hacia la Mesa Central y el Eje Neovolcánico es menos abrupta debido, en parte, a la altitud media de las mismas y a rellenos de materiales aluviales y volcánicos

4. GEOLOGÍA

En la superficie que cubre el acuífero están expuestas rocas sedimentarias cuyas edades varían del Jurásico Superior al Cuaternario, que conformaron la sedimentación en el paleo-elemento conocido como Sierras Madre Oriental (figura 2).

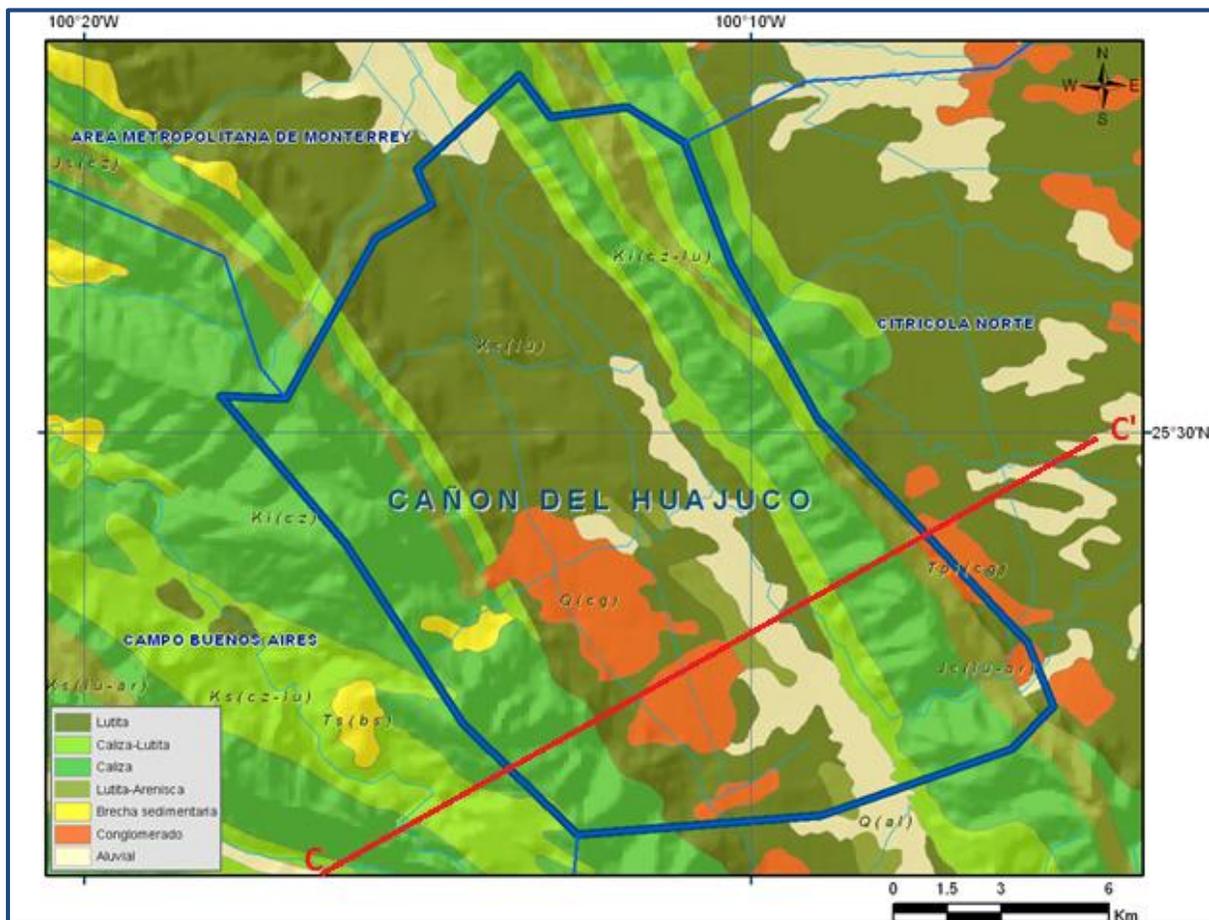


Figura 2. Geología general del acuífero

4.1 Estratigrafía

A continuación se presenta la descripción de las diferentes unidades litológicas, de la más antigua a la más reciente.

JURÁSICO SUPERIOR

Formación Minas Viejas

Es la unidad más antigua de la región y está representada por una secuencia de yeso y calizas que afloran únicamente de manera aislada como ventanas estructurales. Su base no aflora y está cubierta discordantemente por rocas cretácicas. Se le asigna una edad correspondiente al Oxfordiano

Formación Zuloaga

Está constituida por una secuencia calcárea que en la base presenta alto contenido arcilloso, la porción media presenta alternancia de calizas y margas de espesor que varía de 20 a 60 cm, con nódulos de fierro. En la parte superior predominan las calizas con espesores de 40 a 50 cm, intercaladas con lutitas, calizas arcillosas, además de calizas con estratificación media que presentan nódulos de pedernal negro. Su espesor total se estima que varía de 100 a 150 m. Aflora en el núcleo anticlinal del Cerro La Silla y hacia el norte del cerro El Magueyal. Sobreyace concordante a los Yesos Minas Viejas y subyace a la Formación La Casita.

Formación La Casita

Está conformada por una secuencia de areniscas calcáreas de color gris y grano medio, margas arenosas de color gris oscuro, calizas arcillosas grises y negras, lutitas y limolitas. Las areniscas comúnmente contienen amonitas, conchas de bivalvos y belemnites. Su espesor varía de 50 a 80 m y aflora en el Cerro La Silla y al oeste del poblado Los Cristales. Descansa concordantemente sobre la Formación Zuloaga y subyace de igual forma a la Formación Carbonera.

CRETÁCICO INFERIOR

Formación Taraises

Consiste de una alternancia de calizas arcillosas, de color gris obscuro en estratos de 3 a 10 cm, con lentes de pedernal negro, intercaladas con estratos de lutitas de color café amarillento, de espesor hasta de 60 cm. En la parte media continúan calizas arcillosas, lajeadas y carbonosas, en tanto que la porción superior presenta una alternancia de lutitas y calizas arcillosas de 20 a 40 cm de espesor. En toda la secuencia está presente el pedernal, pero es más frecuente en su cima. El color amarillento es típico en esta formación, debido al alto contenido de pirita dispersa en los estratos calcáreos. Su espesor medio varía de 175 a 220 m. Se encuentra expuesta en el Cerro La Silla y al oeste del poblado Los Cristales. Descansa

concordantemente en forma transicional sobre las formaciones: La Caja, Pimienta y como cambio de facies con la Formación Carbonera; subyace concordante a la Formación Cupido.

Formación Carbonera

Está constituida por una alternancia de lutitas arenosas interestratificadas con areniscas de color gris, en la cual existen cambios litológicos laterales que dificultan su correlación. Su espesor varía de 225 a 433 m. Está expuesta en una pequeña porción al suroeste del cerro El Magueyal y hacia el oeste de la población Los Cristales. Sobreyace a la Formación La Casita y está cubierta por la Formación Taraises en las localidades San Rafael, Huachichil, Arteaga, Rayones y Allende.

Formación Cupido

Fue definida por Imlay en 1937, como una caliza gris dispuesta en estratos medios y gruesos en la Sierra de Parras, Coahuila. Consiste principalmente de calizas de color gris oscuro al fresco y gris azulado a la intemperie. Se encuentra ampliamente distribuida en el área de estudio, ya que junto con la Formación Aurora constituyen el núcleo de la mayor parte de las sierras. Presenta estratificación que varía de 0.30 a 1.0 m, con nódulos de fierro y líneas estilolíticas, su espesor se estima en 850 m. Aflora en el Cerro La Silla y al suroeste del acuífero. Sobreyace concordantemente a La Formación Taraises y subyace de igual forma a La Formación La Peña.

Formación La Peña

Propuesta por Imlay, 1937 y posteriormente fue descrita como formación por Humphey (1949), para designar a una serie de calizas arcillosas y fosilíferas, que separan a los potentes bancos de calizas de las formaciones Aurora y Cupido. Se puede dividir en dos miembros: El Miembro Inferior compuesto por capas delgadas a medianas de caliza color gris claro, con nódulos de pedernal y delgadas capas de material arcilloso inter-estratificado. El Miembro Superior contiene mayor cantidad del material arcilloso y los estratos de caliza se adelgazan notablemente, hasta tener una apariencia lajosa, presenta transiciones a limolita calcárea. Con el intemperismo, las coloraciones que adopta este miembro, son rojizas y pardas en ocasiones. Considerando los dos miembros, su espesor varía de 5 a 40 m. Representa un horizonte índice tanto por su contenido de fósiles, como por encontrarse encajonada entre dos grandes cuerpos de calizas masivas correspondientes a las formaciones Aurora y Cupido. Tiene una edad Aptiano Superior y como característica presenta abundantes amonitas principalmente de la familia Dufrenoya. Está expuesta en la sierra Cerro La Silla y en franjas que se ubican en la porción suroeste del acuífero. Sobreyace en forma transicional a la Formación Cupido, su contacto superior es concordante con la Formación Aurora.

Formación Aurora

Está constituida por calizas de color gris claro de estratificación mediana o masiva, de textura mudstone, con nódulos y bandas de pedernal, fosilífera y con presencia de líneas estilolíticas paralelas a la estratificación. Se reconoce un espesor de 300 a 625 m, aunque en el sector transversal su espesor es menor, aproximadamente 100 m. Forma parte de la curvatura de Monterrey, aflora en el Cerro La Silla y en pequeñas franjas localizadas al suroeste y oeste del acuífero. Sus contactos inferior e superior son concordantes con la Formación La Peña y con la Formación Kiamichi, respectivamente, para el Golfo de Sabinas, y con la Formación Cuesta del Cura para la Sierra Madre Oriental.

Formación Cuesta del Cura

Está conformada por calizas con textura mudstone–wackstone, de color gris oscuro con estratificación de 5 a 20 cm. Se encuentra intercalada con bandas de pedernal negro de 5 a 10 cm y margas de 8 cm de espesor. Su característica más notable es la ondulación de sus estratos. El espesor varía de 150 a 300 m. Está ampliamente distribuida en la curvatura de Monterrey en el Cerro La Silla, así como en pequeñas franjas localizadas al suroeste y oeste de la zona de estudio. Es concordante con la Formación Aurora y subyace en forma concordante a las formaciones Indidura y Agua Nueva.

CRETÁCICO SUPERIOR

Formación Agua Nueva

Nombre introducido por Stephenson (1921) y después por Muir, J. M. (1936) para referirse a los sedimentos que descansan directamente sobre la Formación Tamaulipas Superior, que afloran en el cañón La Borrega, ubicado en las inmediaciones del Rancho Agua Nueva, Tamaulipas. Consiste de una alternancia de calizas arcillosas con nódulos y bandas de pedernal e intercalaciones de lutitas laminares carbonosas, así como de cuerpos de margas bentoníticas y de lechos de bentonita. En general predominan las coloraciones gris y gris oscuro; la estratificación es delgada a media en la base y laminar en la parte media y superior. Son comunes los cuerpos de espesor medio y grueso en las lutitas y margas. Su espesor varía de 50 a 100 metros. Aflora en el Cerro La Silla y en pequeñas franjas localizadas al suroeste y oeste del acuífero. Sobreyace, de manera concordante a la Formación Cuesta del Cura y subyace concordantemente a la Formación San Felipe. La parte superior muestra graduación a rocas de la Formación San Felipe y consiste de calizas de estratificación media y delgada. El espesor de la sección tipo es de 127 m. Se correlaciona con la Formación Indidura del NE de México.

Formación San Felipe

Esta formación fue descrita inicialmente por Jeffrey en 1910, en su localidad tipo de la rancharía de San Felipe, ubicada a 6 km al este de Ciudad Valles, S.L.P., donde consiste de

calizas arcillosas de colores gris claro y verde, con frecuentes intercalaciones de lutitas bentoníticas de colores verde y gris claro. La litología de esta unidad es muy homogénea, y corresponde a niveles arcillosos y bentoníticos, de color gris claro y gris verdoso, en capas de espesor delgado, con escasos nódulos de pedernal. Son abundantes las intercalaciones de bentonita y de lutitas bentoníticas laminares. Su espesor es muy variable, de 5 a 330 m. Aflora principalmente en el Cerro la Silla y en porciones al suroeste de la zona de estudio. Sus contactos inferior y superior son concordantes transicionales sobre la Formación Agua Nueva y con la Formación Méndez, respectivamente.

Formación Méndez

Es el nombre que se utilizó para describir a una serie de lutitas calcáreas de colores gris y café, con fractura nodular, que sobreyace a la Formación San Felipe. Su localidad tipo se ubica sobre el km 62 de la vía del ferrocarril Tampico-San Luis Potosí, a 300 m al este de la estación Méndez. Consiste principalmente de lutitas calcáreas de color gris y gris pardusco, con intercalaciones de margas y de capas delgadas de bentonita, así como de algunas areniscas de mudstone gris oscuro. Su espesor varía de 270 a 500 m. Aflora ampliamente en la zona de estudio, principalmente en la porción oriental en el Cerro La Silla y en las inmediaciones de la ciudad de Monterrey, así como en el frente oriental de la Sierra Madre Oriental. El contacto inferior de esta unidad, es en general concordante, transicional sobre la Formación San Felipe; subyace de manera discordante preferentemente sobre sedimentos no consolidados de edad cuaternaria.

TERCIARIO (Paleógeno)

Conglomerado

Con esta nomenclatura se define a las unidades denominadas Conglomerado Reynosa y Conglomerado del Neógeno, constituidos por fragmentos de caliza y areniscas; que varían de angulosos y subredondeados, incluidos en una matriz arcillo-arenosa, parcialmente cementados por carbonato de calcio. El espesor de la unidad varía entre 10 y 20 metros. Sus afloramientos se encuentran ampliamente distribuidos, principalmente en la porción noreste de la zona de estudio. La unidad sobreyace en forma discordante a la Formación Méndez y está cubierta por limos y arcillas.

CUATERNARIO

Está representado por depósitos aluviales y fluviales (limos, gravas y arenas) producto del intemperismo y erosión de las partes topográficamente altas. En las zonas cercanas a las sierras, predominan los cantos rodados, principalmente a lo largo de los arroyos intermitentes que los acarrearán en épocas de lluvia. A esta unidad también pertenecen los depósitos lacustres que rellenan los valles y se originaron por la acción de los agentes erosivos sobre las estructuras plegadas; están compuestos por limos, arcillas y material lacustre, pobremente

consolidados, con gradación y lentes conglomeráticos e intercalaciones de depósitos de sales y delgadas capas de yeso.

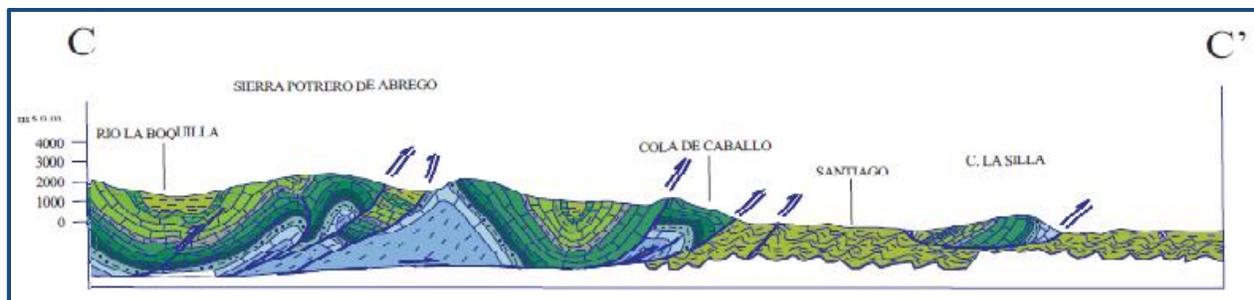
4.2 Geología Estructural

Las principales estructuras geológicas en el acuífero son los pliegues anticlinales y sinclinales con orientación noroeste-sureste que se flexionan al sur de Monterrey hacia el oeste (curvatura de Monterrey), en el Anticlinorio de Arteaga, en donde adoptan orientación este-oeste. Se trata de pliegues simétricos cuyos planos axiales son casi verticales, zonas de transferencia, fallas, cabalgaduras y bifurcación de estructuras. Las sierras presentes en la superficie del acuífero corresponden a anticlinales. Existen además diversas fallas inversas y cabalgaduras con orientación noroeste-sureste, originadas por los esfuerzos compresivos que han afectado las secuencias sedimentarias. Algunos autores proponen que los pliegues del noreste de México son el resultado de la combinación de un despegue con dirección suroeste-noreste y de esfuerzos de cizalla sinestrales donde las fallas se reactivaron durante del Terciario Temprano, provocando un giro de los anticlinales en el Golfo de Sabinas. La tectónica del noreste de México puede explicarse dentro del marco tectónico del desarrollo del Golfo de México, caracterizado por haber sido un margen de placas divergentes durante el Mesozoico, originando varias cuencas por ruptura de la Pangea (Carta Geológico-Minera Monterrey G14-7. Escala 1:250,000. SGM, 2008).

4.3 Geología del Subsuelo

De acuerdo con la información geológica recaba en el acuífero y por correlación con acuíferos vecinos, así como con la información obtenida a partir de cortes litológicos de algunos pozos, se concluye que el acuífero se encuentra constituido, en su porción superior, por los sedimentos aluviales y de pie de monte de granulometría variada, producto del intemperismo de rocas preexistentes y los conglomerados polimícticos que rellenan los valles, especialmente en el cauce y subálveo del Arroyo La Chueca. La porción inferior del acuífero está alojada en un medio fracturado que conforman las calizas arcillosas y lutitas calcáreas que constituyen las formaciones Agua Nueva y San Felipe. Las fronteras y barreras al flujo subterráneo, así como el basamento hidrogeológico, están representados por las misma secuencia arcillo-calcárea cuando desaparece el fracturamiento, impidiendo que fluya el agua a profundidad.

A mayor profundidad las calizas de las formaciones Aurora y Cupido, constituyen sistemas acuíferos profundos que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento y disolución, y presencia de condiciones de semiconfinamiento y confinamiento, debido a están subyacidas y sobreyacidas por una alternancia de lutitas y limolitas (figura 3).



Fuente: Carta Geológico Minera Monterrey G14-7, escala 1:250,000 (SGM, 2008)
Figura 3. Sección geológica esquemática

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de Acuífero

Las evidencias geológicas e hidrogeológicas permiten definir la presencia de un acuífero de tipo libre a semiconfinado, heterogéneo y anisótropo, que se aloja en un medio granular y fracturado; constituido en su porción superior, por los sedimentos aluviales, de pie de monte y conglomerados polimícticos, de granulometría variada, producto del intemperismo de rocas preexistentes que rellenan los valles y el cauce y subálveo del Arroyo La Chueca. La porción inferior está alojada en un medio fracturado que conforman las calizas arcillosas y lutitas calcáreas que constituyen las formaciones Agua Nueva y San Felipe. A mayor profundidad las calizas de las formaciones Aurora y Cupido, constituyen sistemas acuíferos que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento y disolución, y presencia de condiciones de semiconfinamiento y confinamiento, debido a que alternan con lutitas y limolitas.

5.2 Parámetros hidráulicos

En la superficie que cubre el acuífero no se cuenta con información de pruebas de bombeo ni aforos. Los valores de transmisividad se obtuvieron de pruebas de bombeo realizadas en los acuíferos vecinos El-Carmen-Salinas-Victoria y Zona Citrícola Norte, los cuales fueron extrapolados por correlación hidrogeológica, de acuerdo con la geología y el espesor saturado, dado que todos ellos tienen el mismo origen, evolución y constitución geológica. De esta manera, los valores de transmisividad adoptados varían de 1.0×10^{-4} a $1.1 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$.

5.3 Piezometría

Se cuenta con información piezométrica obtenida por la CONAGUA en el año 1989, así como la información generada durante los recorridos piezométricos efectuados como parte de estudio realizado en el año 2007, obtenida en una red de monitoreo conformada por 40 pozos, distribuidos en la mayor superficie de explotación del acuífero. Posterior al año 2007 se han realizado mediciones de esta red piezométrica en los años 2009, 2010 y 2011.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

La configuración de profundidad al nivel estático en el año 2011 muestra valores que variaban de 2 a 45 m. Las mínimas profundidades, de 2 a 5 m, se registraron en las inmediaciones del Centro Deportivo, en el porción central cerca del poblado Loma La Laguna, y al sur en el poblado Huajuquito. De manera general, la profundidad en las márgenes del Arroyo La Chueca fluctúa entre 5 y 12 metros, incrementándose gradualmente por efecto de la topografía hacia las sierras que delimitan el acuífero. La máxima profundidad al nivel estático de 45 m se registró al sur del acuífero, en el poblado San Francisco (figura 4).

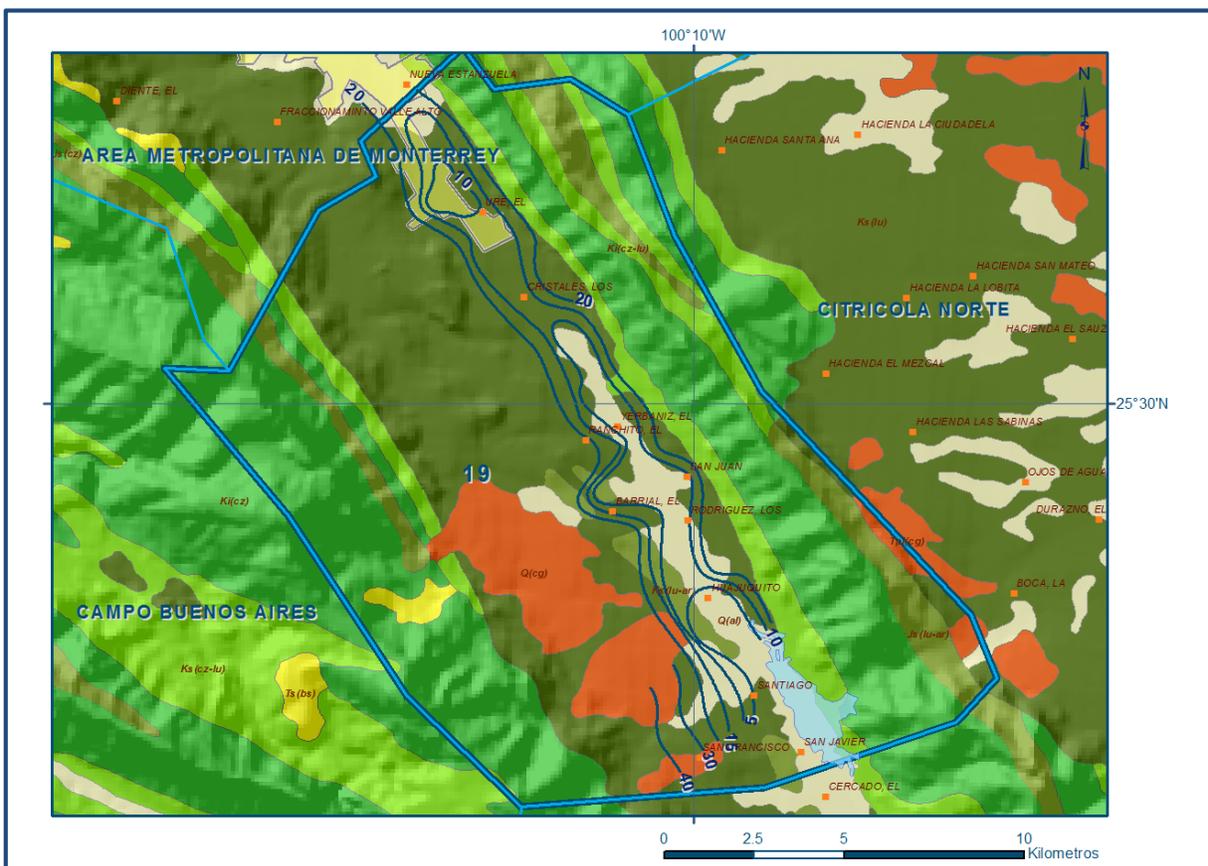


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2011)

5.4.2 Elevación del nivel estático

Para el año 2011, la elevación del nivel estático variaba de 450 a 610 msnm. La configuración muestra que la elevación mínima se presenta al sur del acuífero, cerca del fraccionamiento Las Huertas y en la porción occidental de la presa Rodrigo Gómez (“La Boca”), en tanto que la elevaciones máximas se registraron en las porciones norte y suroccidental, hacia las estribaciones de la sierra; en el valle la elevación máxima se registró al norte del acuífero, en el

fraccionamiento Portal del Huajuco. La dirección preferencial del flujo subterráneo a lo largo del valle es noroeste-sureste, con alimentaciones provenientes del norte, así como de los flancos oriental y occidental que lo bordean, principalmente en la porción central, y tiende a descargar hacia la presa Rodrigo Gómez (figura 5).

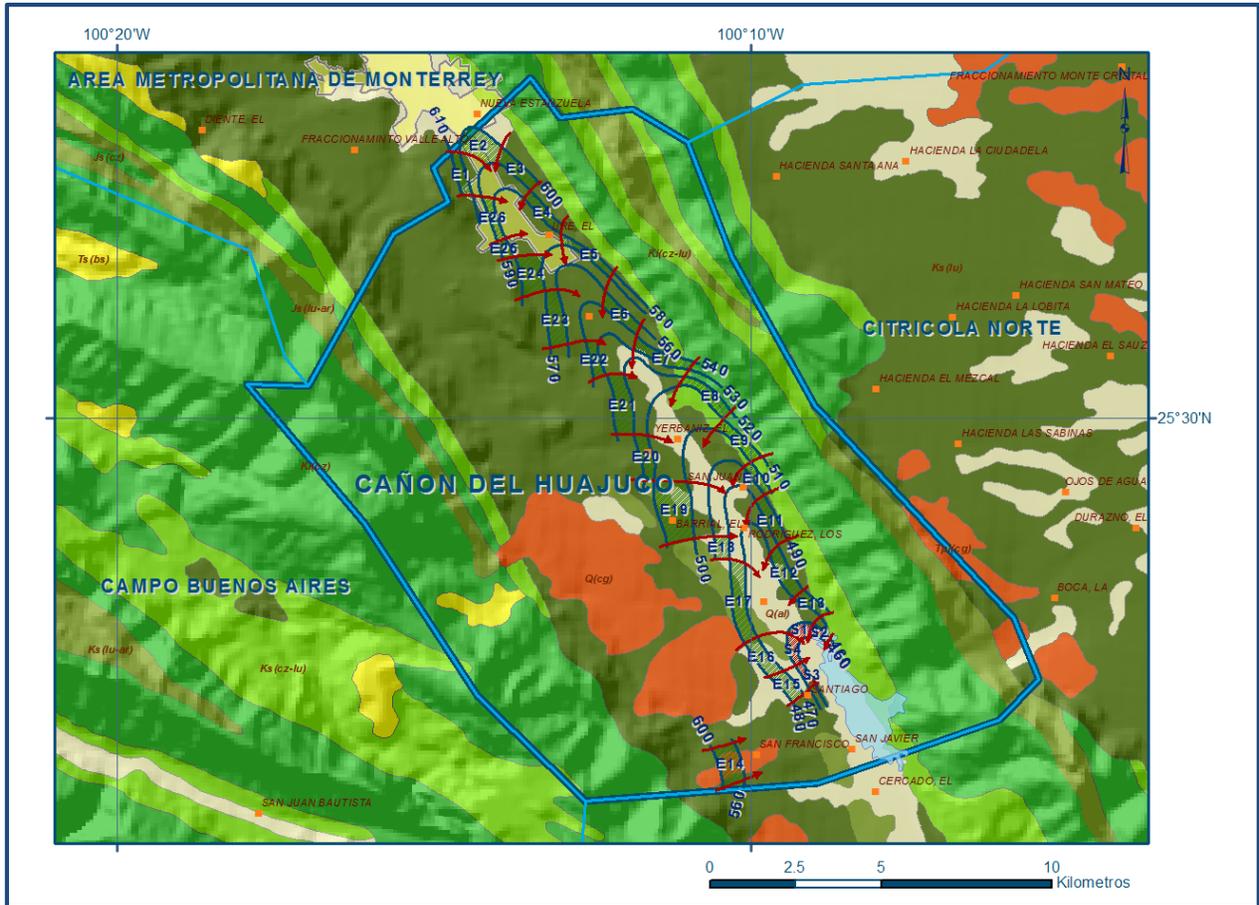


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2011)

5.4.3 Evolución del nivel estático

La evolución del nivel estático en el periodo 2007-2011 muestra valores puntuales tanto positivos como negativos. Los abatimientos máximos se registraron en la porción central del acuífero, en las inmediaciones del poblado El Barrial, en tanto que el valor máximo de recuperación se presentó en las inmediaciones del Centro Deportivo (figura 6). De manera general, los abatimientos se anulan numéricamente con las recuperaciones y, como resultado, el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo. Los niveles del agua subterránea no muestran cambios significativos en su posición durante el periodo analizado.

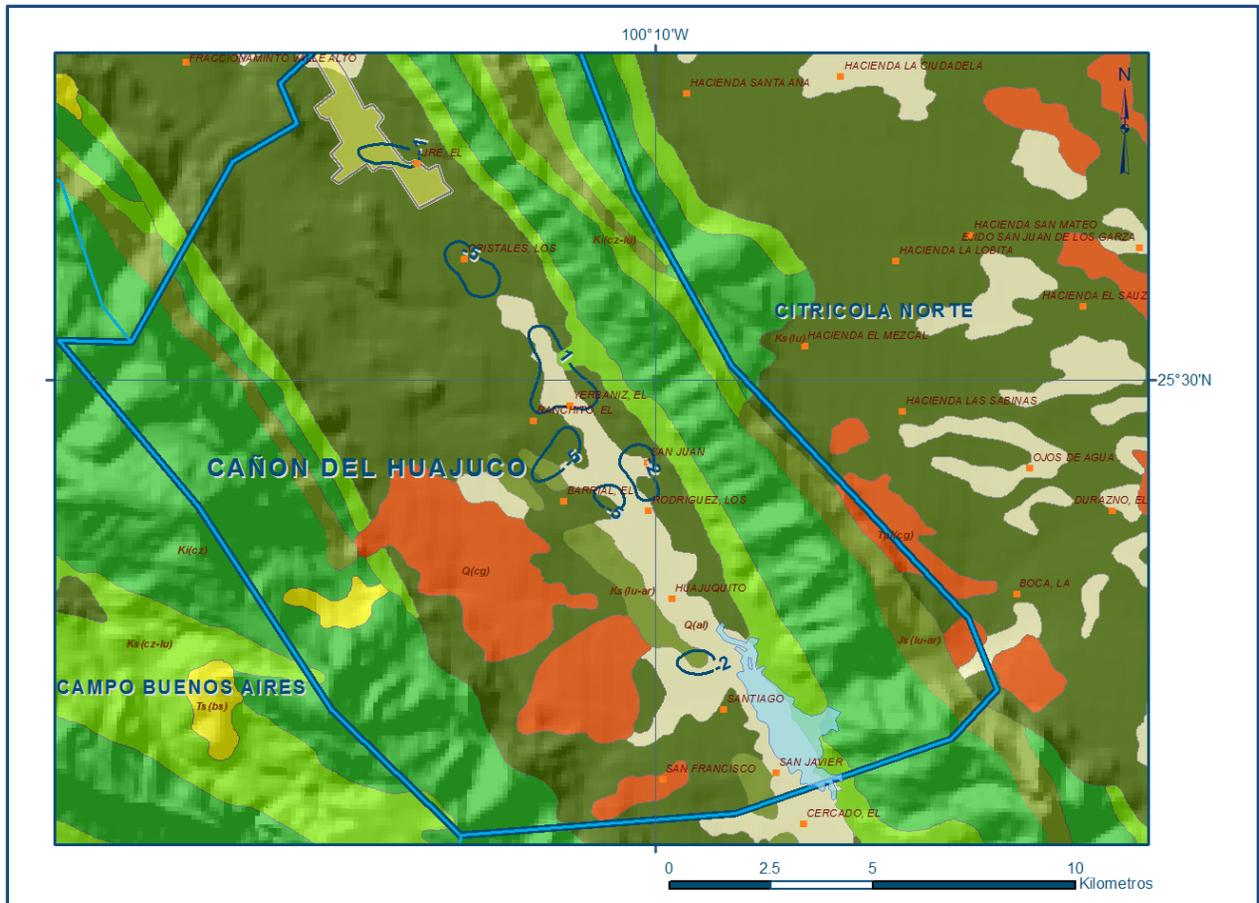


Figura 6. Evolución del nivel estático en m (2007-2011)

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de las actividades de campo del estudio realizado en el año 2007, se midió la conductividad eléctrica del agua subterránea, como indicador de la concentración de sólidos totales disueltos. La menor conductividad, 263 $\mu\text{S}/\text{cm}$, se presenta en la porción sur, en las inmediaciones del poblado San Francisco y la máxima de 670 $\mu\text{S}/\text{cm}$, se obtuvo al norte del acuífero en las inmediaciones del Centro Deportivo. De esta manera, se confirma la dirección preferencial del flujo subterráneo en dirección noroeste-sureste, paralela al escurrimiento del Arroyo La Chueca. La salinidad del agua subterránea en general es menor a 1000 mg/l, que corresponde al límite máximo permisible establecido en la modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, para el agua destinada al consumo humano. Es posible suponer una familia del agua bicarbonatada-cálcica, que representa agua de reciente infiltración, con periodos cortos de residencia, que han circulado a través de rocas carbonatadas.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRIA

No existe información reciente derivada de un censo de aprovechamientos, pero de los recorridos de campo efectuados por la Organismo de Cuenca Río Bravo, se sabe que existe una gran cantidad de norias que se destinan al uso doméstico y servicios de fincas, villas y casas de campo que se utilizan de manera discontinua durante el año. Dado que el subsuelo está conformado principalmente por lutitas, la baja permeabilidad sólo permite la extracción de pequeños caudales de extracción.

De acuerdo con la base de datos del REPDA 2010, existen en el acuífero un total de 219 aprovechamientos, la gran mayoría de ellos son norias de bajo rendimiento que se utilizan para satisfacer las necesidades del uso doméstico y servicios. Del total de obras, 171 (78.1%) se destinan al uso doméstico, 28 (12.8%) al uso agrícola, 11 (5.0%) para servicios, 8 (3.6%) más para uso pecuario y 1 Túnel (0.5%) denominado "Socavón San Francisco", que aporta un volumen de 19.5 hm³ anuales por gravedad hacia la ciudad de Monterrey.

Una vez hecha esta aclaración, se estima que el volumen de extracción por bombeo, de los 218 aprovechamientos restantes, es de **0.8 hm³ anuales**, destinados casi en su totalidad a los usos doméstico y servicios.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de agua subterránea se planteó para el periodo 2007-2011, en una superficie aproximada de **55 km²**, que corresponde al área que cuenta con información piezométrica y en la que se localiza la mayoría de los aprovechamientos subterráneos.

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

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

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

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

7.1 Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual definido para el acuífero, las entradas están integradas por la recarga natural (R_v) que se produce por efecto de la infiltración de la lluvia que se precipita directamente sobre el valle y a lo largo del Arroyo La Chueca, y la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de una recarga por flujo horizontal subterráneo (E_h), así como la recarga en calizas que posteriormente descarga en los túneles “Cola de Caballo” y socavón “San Francisco” y a través de los manantiales.

7.1.1 Recarga vertical por lluvia (R_v)

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que el cambio de almacenamiento puede determinarse y existe información para estimar las entradas y salidas por flujo subterráneo, su valor será despejado de la ecuación de balance:

$$R_v + E_h + R_c - S_h - B - ETR - Dmt = \pm \Delta V(S) \quad (1)$$

Donde:

| | |
|----------------------------------|--|
| R_v: | Recarga vertical por lluvia |
| E_h: | Entradas subterráneas por flujo horizontal |
| R_c: | Recarga en las calizas |
| S_h: | Salidas subterráneas |
| B: | Bombeo |
| ETR: | Evapotranspiración |
| Dmt: | Descarga a través de túneles |
| $\Delta V(S)$: | Cambio en el volumen de almacenamiento |

De esta manera, despejando la recarga vertical:

$$R_v = S_h + B + ETR + Dmt - E_h - R_c \pm \Delta V(S) \quad (2)$$

7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (E_h)

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 pluvial sobre el valle y en la infiltración de los escurrimientos superficiales.

Para su cálculo se utilizó la configuración de elevación del nivel estático correspondiente al año 2011, mostrada en la figura 5. Con base en ella se seleccionaron canales de flujo y se aplicó la Ley de Darcy para calcular el caudal “Q” en cada uno de ellos, mediante la siguiente expresión:

$$Q = B * i * T$$

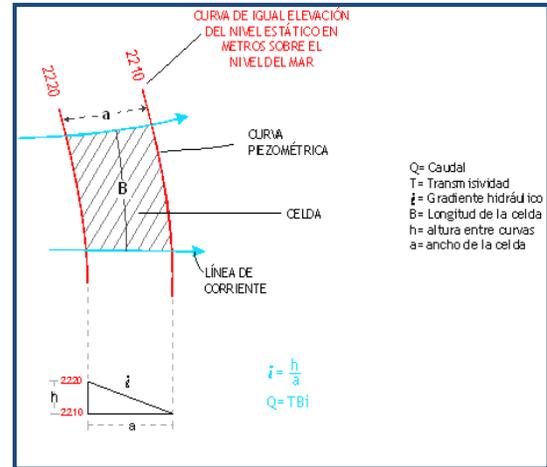
Donde:

Q= Caudal;

B= Largo del canal de flujo;

i= Gradiente hidráulico (i);

T= Transmisividad en el canal de flujo;



El caudal de entrada por flujo subterráneo para cada una de las celdas identificadas y el total anual se muestra en la tabla 2. Su valor anual es de **5.6 hm³ anuales**.

Tabla 2. Cálculo de entrada por flujo subterráneo (2011)

| CANAL | LONGITUD B (m) | ANCHO a (m) | h ₂ -h ₁ (m) | Gradiente i | T (m ² /s) | CAUDAL Q (m ³ /s) | VOLUMEN (hm ³ /año) |
|-----------------------|----------------|-------------|------------------------------------|-------------|-----------------------|------------------------------|--------------------------------|
| E1 | 1180 | 365 | 10 | 0.02740 | 0.0003 | 0.0097 | 0.3 |
| E2 | 1090 | 910 | 10 | 0.01099 | 0.0003 | 0.0036 | 0.1 |
| E3 | 1635 | 320 | 10 | 0.03125 | 0.0001 | 0.0051 | 0.2 |
| E4 | 1545 | 270 | 10 | 0.03704 | 0.0001 | 0.0057 | 0.2 |
| E5 | 1730 | 180 | 10 | 0.05556 | 0.0001 | 0.0096 | 0.3 |
| E6 | 1680 | 225 | 10 | 0.04444 | 0.0001 | 0.0075 | 0.2 |
| E7 | 1820 | 320 | 10 | 0.03125 | 0.0001 | 0.0057 | 0.2 |
| E8 | 1365 | 270 | 10 | 0.03704 | 0.0003 | 0.0152 | 0.5 |
| E9 | 1270 | 320 | 10 | 0.03125 | 0.0003 | 0.0119 | 0.4 |
| E10 | 1365 | 270 | 10 | 0.03704 | 0.0001 | 0.0051 | 0.2 |
| E11 | 1500 | 290 | 10 | 0.03448 | 0.0001 | 0.0052 | 0.2 |
| E12 | 1545 | 365 | 10 | 0.02740 | 0.0001 | 0.0042 | 0.1 |
| E13 | 1090 | 225 | 10 | 0.04444 | 0.0001 | 0.0048 | 0.2 |
| E14 | 1320 | 635 | 40 | 0.06299 | 0.0002 | 0.0166 | 0.5 |
| E15 | 770 | 500 | 10 | 0.02000 | 0.0003 | 0.0046 | 0.1 |
| E16 | 1455 | 365 | 10 | 0.02740 | 0.0003 | 0.0120 | 0.4 |
| E17 | 2270 | 410 | 10 | 0.02439 | 0.0002 | 0.0111 | 0.3 |
| E18 | 770 | 320 | 10 | 0.03125 | 0.0001 | 0.0024 | 0.1 |
| E19 | 2000 | 910 | 10 | 0.01099 | 0.0001 | 0.0022 | 0.1 |
| E20 | 1365 | 345 | 10 | 0.02899 | 0.0001 | 0.0040 | 0.1 |
| E21 | 1820 | 455 | 10 | 0.02198 | 0.0001 | 0.0040 | 0.1 |
| E22 | 1365 | 365 | 10 | 0.02740 | 0.0001 | 0.0037 | 0.1 |
| E23 | 1725 | 410 | 10 | 0.02439 | 0.0001 | 0.0042 | 0.1 |
| E24 | 910 | 270 | 10 | 0.03704 | 0.0001 | 0.0034 | 0.1 |
| E25 | 590 | 455 | 10 | 0.02198 | 0.0003 | 0.0039 | 0.1 |
| E26 | 1545 | 365 | 10 | 0.02740 | 0.0003 | 0.0127 | 0.4 |
| Total entradas | | | | | | | 5.6 |

Los valores de transmisividad utilizados fueron estimados con base resultados de la interpretación de pruebas de bombeo realizadas en los acuíferos vecinos El Carmen-Salinas-Victoria y Zona Citrícola Norte y extrapolados por correlación hidrogeológica, de acuerdo con la geología y adaptados al espesor saturado de cada zona.

7.1.3 Recarga en las calizas (Rc)

Las formaciones calcáreas que afloran en las sierras que delimitan el valle, tienen un comportamiento independiente. La recarga en ellas se evaluó de manera separada en las zonas en las que se localiza el túnel conocido como “Socavón San Francisco”; la cual proviene de la lluvia que se precipita y se infiltra de manera local. Para su estimación se consideró que el volumen que reciben es al menos de la misma magnitud que las salidas que provienen de las calizas, a través del túnel mencionado. Por lo tanto, su valor estimado es de **19.5 hm³ anuales**, de acuerdo con los aforos realizados.

7.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente por bombeo (B), descargas por flujo subterráneo (Sh), descarga hacia el túnel conocido como “Socavón “San Francisco”, así como por evapotranspiración real (ETR) en las zonas de niveles freáticos someros.

7.2.1 Bombeo (B)

Como se mencionó en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo asciende a **0.8 hm³/año**.

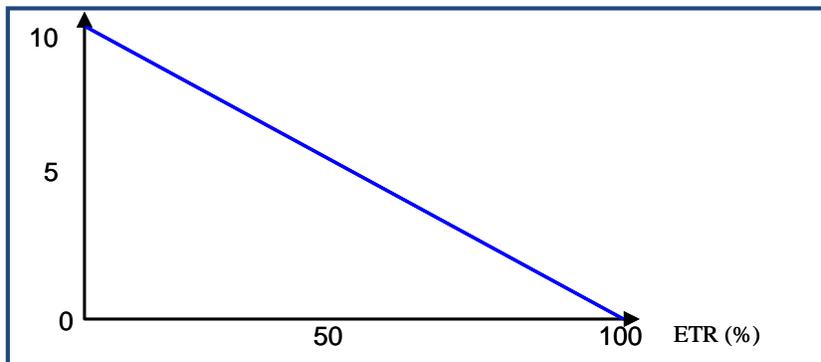
7.2.2 Evapotranspiración Real (ETR)

Este parámetro es la cantidad de agua transferida del suelo a la atmósfera por evaporación y transpiración de las plantas, por lo tanto es considerada una forma de pérdida de humedad del sistema. Existen dos formas de Evapotranspiración: la que considera el contenido de humedad en el suelo y la que considera la etapa de desarrollo de las plantas (Evapotranspiración Potencial y la Evapotranspiración Real. El escurrimiento y el volumen de evapotranspiración real (ETR) es un parámetro utilizado para la recarga potencial de infiltración. Para la obtención de este parámetro se utilizó la ecuación empírica de Turc, que se muestra a continuación, considerando los valores medios anuales de temperatura = 20.4 °C y precipitación= 980.3 mm. La lámina de ETR que se obtiene es de 792.4 mm.

$$ETR(mm) = \frac{P(mm)}{\sqrt{0.90 + \left(\frac{P^2(mm)}{L^2}\right)}} \quad L = 300 + 25T + 0.05T^3$$

| | | | |
|----------|-----------|------------------|------------|
| T (°C) = | 20.4 | | |
| P(mm) = | 980.3 | P ² = | 960988.09 |
| L = | 1234.4832 | L ² = | 1523948.77 |
| ETR (mm) | 792.4 | | |

El cálculo de la evapotranspiración corresponde con aquella pérdida de agua freática somera y que se aplica al balance de aguas subterráneas, considerando que el concepto tiene influencia hasta una profundidad máxima de 10 m, bajo el siguiente proceso: En zonas donde el nivel estático se encuentra a una profundidad menor a 10 m, se calcula el valor de ETR exclusivamente para estas zonas de niveles someros y se pondera el valor del volumen obtenido, partiendo de una relación lineal inversa entre la profundidad al nivel estático (PNE) y el % de ETR. Suponiendo una profundidad límite de extinción de 10 m para el fenómeno de ETR, a menor profundidad mayor será el % de ETR, de tal manera que a 10 m el valor de ETR es nulo y a 0 m el valor es del 100 %, a 5 m el 50%, a 2 m el 80% etc.



Existe en el área de balance una zona con una extensión de 15 km², donde los niveles estáticos se encuentran a profundidades menores a 10 m, que se considera el límite de extinción para que se produzca el fenómeno de evapotranspiración, hasta donde penetran las raíces de las plantas. Si consideramos esta área de 15 km² en la que se registran niveles freáticos someros, con una profundidad promedio al nivel del agua subterránea de 5 m, de acuerdo la gráfica anterior, le corresponde el 50% de la lámina de ETR obtenida:

$$ETR = 15 \text{ km}^2 (0.7924 \text{ m}) (0.5) = 5.9$$

$$ETR = 5.9 \text{ hm}^3/\text{año}$$

7.2.3 Salidas subterráneas

Las salidas por flujo subterráneo hacia el vaso de la presa “La Boca” fueron calculadas de la misma manera como se evaluaron las entradas subterráneas, a partir de la configuración de elevación del nivel estático presentada en la figura 5. Su valor es de **0.5 hm³ anuales**, tal como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Cálculo de salidas por flujo subterráneo (2011)

| CANAL | LONGITUD B (m) | ANCHO a (m) | h ₂ -h ₁ (m) | Gradiente i | T (m ² /s) | CAUDAL Q (m ³ /s) | VOLUMEN (hm ³ /año) |
|----------------------|----------------|-------------|------------------------------------|-------------|-----------------------|------------------------------|--------------------------------|
| S1 | 910 | 545 | 10 | 0.01835 | 0.00015 | 0.0025 | 0.1 |
| S2 | 1180 | 320 | 10 | 0.03125 | 0.00015 | 0.0055 | 0.2 |
| S3 | 730 | 365 | 10 | 0.02740 | 0.00015 | 0.0030 | 0.1 |
| S4 | 1225 | 270 | 10 | 0.03704 | 0.00015 | 0.0068 | 0.2 |
| Total salidas | | | | | | | 0.6 |

7.2.4 Descarga a través de túneles (Dt)

Esta componente del balance se refiere a la descarga hacia el “Socavón de San Francisco”, cuyo volumen se estimó mediante aforos en **19.5 hm³/año**, que representa la recarga mínima que recibe el acuífero en el área de calizas donde se ubica esta obra artificial.

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

Para la estimación del cambio de almacenamiento se tomó en cuenta la configuración de la evolución del nivel estático en el periodo 2007-2011, mostrada en la figura 6 en la que se observa que se registran valores puntuales de evolución tanto positivos como negativos. Por otra parte, dicha configuración no demuestra alteraciones del flujo natural del agua subterránea que indiquen la presencia de conos de abatimiento causados por la concentración de la extracción. Adicionalmente, el valor de la extracción por bombeo es muy bajo comparado con el valor más conservador de recarga. Por estas razones, se puede afirmar que las variaciones en el nivel del agua subterránea no han sufrido alteraciones importantes en el transcurso del tiempo, por lo que el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo. Por lo tanto para fines del balance $\Delta V(S) = 0$

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 que fue establecida con anterioridad:

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

Sustituyendo los valores:

$$Rv = 0.6 + 0.8 + 5.9 + 19.5 - 5.6 - 19.5 + 0.0$$
$$Rv = 1.7 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

De esta manera, la recarga total media anual (**Rt**) estará definida por la suma de la recarga vertical (Rv), las entradas horizontales subterráneas (Eh) y la recarga en calizas (Rc) que posteriormente descarga hacia la zona de los túneles y manantiales.

$$Rt = Rv + Eh + Rc$$
$$Rt = 1.7 + 5.6 + 19.5$$
$$Rt = 26.8 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

8. DISPONIBILIDAD

Para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas, se aplica el procedimiento establecido la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000, que establece la Metodología para calcular la disponibilidad media anual de las aguas nacionales; en la fracción relativa a las aguas subterráneas, menciona que la disponibilidad se determina por medio de la expresión siguiente:

$$DAS = Rt - DNCOM - VCAS \quad (3)$$

Donde:

DAS = Disponibilidad media anual de agua subterránea

Rt = Recarga total media anual

DNCOM = Descarga natural comprometida.

VCAS = Volumen de agua subterránea concesionado e inscrito en el REPDA

8.1 Recarga total media anual (Rt)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (Rt), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto en forma natural como inducida. Para este caso su valor es **26.8 hm³/año**.

8.2 Descarga natural comprometida (DNCOM)

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 Cañón del Huajuco no existe descarga natural comprometida, ya que los manantiales que conforman el flujo base del Río Ramos y Arroyo Escamilla se ubican fuera de los límites del acuífero Cañón del Huajuco; y el volumen de las salidas subterráneas, que tienen a descargar hacia la Presa “La Boca”, es muy pequeño comparado con el que ésta almacena. Por lo tanto **DNCOM = 0.0 hm³ anuales**

8.3 Volumen concesionado de aguas subterráneas (VCAS)

El volumen anual de extracción, de acuerdo con los títulos de concesión inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA), de la Subdirección General de Administración del Agua, con fecha de corte al **30 de junio de 2014 es de 28'550,004 m³/año.**

8.4 Disponibilidad de aguas subterráneas (DAS)

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 Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000, se obtiene de restar al volumen de recarga total media anual, el valor de la descarga natural comprometida y el volumen de aguas subterráneas concesionado e inscrito en el REPGA.

Por lo tanto la disponibilidad de aguas subterráneas, de acuerdo a la expresión (3), es:

$$\mathbf{DAS = Rt - DNCOM - VCAS}$$

$$\mathbf{DAS = 26.8 - 0.0 - 28.55004}$$

$$\mathbf{DAS = - 1.750004 \text{ hm}^3/\text{año}}$$

El resultado indica que no existe volumen disponible de para otorgar nuevas concesiones, por el contrario el déficit es de **1'750,004 m³/año**, que se están extrayendo del almacenamiento no renovable del acuífero.

9. BIBLIOGRAFIA

Comisión Nacional del Agua. 2002. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Área Metropolitana de Monterrey, Nuevo León.

Comisión Nacional del Agua. 2002. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Zona Citrícola Norte, Nuevo León.

Comisión Nacional del Agua. 2007. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero El Carmen-Salinas Victoria, Nuevo León.

Comisión Nacional del Agua. 2007. Reactivación de la red de monitoreo piezométrico del acuífero Denominado Cañón del Huajuco, Nuevo León. Elaborado por Estudios y Proyectos en Agua Subterránea S.A. de C.V.

Servicio Geológico Mexicano (SGM), 2008. Carta Geológico-Minera, Monterrey G14-7, escala 1:250,000.