

El agua subterránea en el acuífero Allende-Piedras Negras, Coahuila, México

Juan Manuel Lesser-Illades, David González-Posadas, Luis Ernesto Lesser-Carrillo
Lesser y Asociados, S. A. de C. V.

Víctor Manuel Castañón Arcos
Comisión Nacional del Agua

Resumen

Al oriente de la Sierra del Burro, se encuentran el área conocida como *Zona de los grandes manantiales*. Su recarga proviene de la infiltración del agua de lluvia que se precipita sobre la parte alta de la Sierra del Burro. Su descarga, da origen a su vez, a otro acuífero ubicado en la planicie localizada al oriente de la Sierra. Se obtuvieron datos de 778 aprovechamientos de agua subterránea, de los cuales 13 corresponden a los grandes manantiales, los que afloran en el buzamiento sureste del anticlinal de la Sierra del Burro y en conjunto aportan un caudal promedio de 7.7 m³/seg. Estos manantiales, corresponde a *vertedores de demasías* del gran receptáculo de agua subterránea que constituye el acuífero en rocas calizas de la Sierra del Burro. Cercanos a los manantiales, se encuentran varios pozos artesianos o brotantes, los cuales penetraron a las rocas calizas acuíferas en sitios donde la presión hidrostática es mayor que la superficie del terreno. Los caudales de agua, tanto en los manantiales como en los pozos artesianos (brotantes), presentan una inmediata respuesta a la recarga que recibe el acuífero por la infiltración de la precipitación pluvial. En estiajes prolongados (años secos) los caudales disminuyen y en épocas de lluvias abundantes, aumentan. Al pie de la Sierra de Burro, el agua subterránea se caracteriza por presentar bajo contenido salino y ser del tipo cálcico-bicarbonatada, mientras que en los pozos ubicados sobre una franja al oriente de la anterior, el agua presenta altos contenidos salinos y es del tipo cálcico-sulfatada.

Palabras clave: Geohidrología Coahuila, Allende, Piedras Negras, Sierra del Burro, pozos artesianos, acuífero calizo.

Introducción

El acuífero Allende-Piedras Negras se localiza al norte del Estado de Coahuila y de acuerdo a su funcionamiento y marco geohidrológico, como parte de este trabajo se marcaron sus límites, los que se muestran en la figura 1 y posteriormente fueron validados por CONAGUA, 2009. Esta zona se ubica dentro de la región hidrológica RH24, "Río Bravo". Actualmente se encuentra en proceso de publicación

un decreto de veda para el alumbramiento de agua subterránea. En la región que comprende la superficie del acuífero, se han llevado cabo varios estudios hidrogeológicos de evaluación. El primero en su tipo (CFE, 1981), corresponde al primer trabajo que plasma la concepción del funcionamiento del acuífero al pie de la Sierra del Burro y ha servido de base para prácticamente todos los trabajos subsecuentes, como los de CNA, 1990, CAYSC, 2002 y Grupo Modelo, 2008, entre otros.

El clima en la región es seco, semicálido con lluvias escasas todo el año y un porcentaje de lluvia invernal mayor del 18%. De acuerdo con los datos de las estaciones climatológicas 05-042 y 05-002 ubicadas en los poblados de Zaragoza y Allende respectivamente. La precipitación pluvial en la planicie de Allende-Piedras Negras tiene un promedio de 500 mm. Hacia la Sierra del Burro, la precipitación alcanza hasta 626 mm. De acuerdo con los datos de precipitación anual registrada en las estaciones climatológicas Allende, Zaragoza y Piedras Negras para periodos de 60, 27 y 64 años respectivamente, se han registrado precipitaciones medias anuales de 494, 545 y 550 mm para las estaciones mencionadas. Hacia los años 2001, 2002 y 2006, se presentaron lluvias escasas, del orden de casi la mitad de la media anual; mientras que para el resto de los años de la presente década (2004, 2005 y 2007), las precipitaciones han sido abundantes, por arriba de la media anual.

De acuerdo a la clasificación del Ing. Manuel Álvarez Jr., 1958, el acuífero se ubica en parte de dos provincias fisiográficas. Una que comprende la porción poniente, que corresponde a la Sierra del Burro, la que pertenece a la Provincia de la "Región Montañosa de Coahuila"; mientras que la parte oriental, se encuentra dentro de la provincia fisiográfica denominada "Cuenca del Bravo de la Llanura Costera del Golfo de México". La región está constituida por una llanura aluvial ligeramente inclinada al noreste, entre las cotas topográficas de 600 msnm en su parte más alta y aproximadamente 200 msnm en el cauce del Río Bravo. Esta llanura aluvial se encuentra entre el Río Bravo y la vertiente oriente de la zona sur de la Sierra del Burro, así como la vertiente noreste del Lomerío Peyotes. En el cañón Oso Blanco, localizado en la Sierra del Burro, existe el mayor relieve de la zona (Álvarez, 1958), ya que, en el nacimiento del Río San Rodrigo hay diferencias de alturas entre cimas y pisos de arroyos de hasta 520 m. En este lugar se tiene la mayor altura sobre el nivel del mar con cerca de 1,500 msnm en el parteaguas de la sierra. Los flancos sur y oriente de la Sierra del Burro, se ubican a alrededor de 700 msnm; el ascenso a partir de ahí

al corazón de la sierra es suave, culminándose en las alturas antes mencionadas. La Sierra del Burro y el Lomerío Peyotes que conforman el límite norte de la provincia Sierra Madre Oriental, favorecen la recarga de agua subterránea debido a su gran extensión y suave pendiente topográfica.

Se distinguen varias unidades geomorfológicas que son: Sierras y valles en el noroeste; sierras alargadas en el suroeste; el anticlinal cóncavo de la Sierra del Burro; lomeríos bordeando el oriente de la sierra y; la planicie del Río Bravo.

Geología

La columna geológica de la zona de estudio, está constituida por rocas sedimentarias marinas del Cretácico que afloran en la Sierra del Burro y que hacia la planicie de Allende-Piedras Negras se encuentran cubiertas por un conglomerado del Terciario y aluviones del Cuaternario. Su distribución general se muestra en la figura 2 donde se marca la distribución de las rocas del Cretácico Inferior, Cretácico Superior y aluvión Cuaternario.

Del Cretácico Inferior, se encuentran las formaciones Glen Rose, Telephone Canyon, Complejo Arrecifal del Burro, West Nueces, Mcknight y parte del Grupo Washita. Del Cretácico Superior, se encuentran parte del Grupo Washita y las formaciones Eagle Ford, Austin, Upson, Olmos, San Miguel y Escondido. El Terciario está representado por el Conglomerado Sabinas-Reynosa y el Cuaternario por aluviones.

La Formación Glen Rose corresponde a afloramientos de calizas resistentes y margas suaves, presentes a lo largo del cauce del Río Paluxy, cerca del poblado Glen Rose, Texas. En la Sierra del Burro, aflora de manera incompleta en el Cañón del Cíbolo (Smith, 1970), en el Complejo la Cueva y en el cauce del Río Bravo. Presenta permeabilidad por fracturamiento.

La Formación Telephone Canyon (Walnut), se refiere a una secuencia de arcillas amarillentas, calizas laminadas y coquinas que cubren transicionalmente a la Formación Glen Rose en el poblado de Walnut Spring, Texas (Smith, 1970, p. 38). Se comporta como impermeable.

El nombre de Complejo Arrecifal del Burro fue usado por los geólogos de PEMEX para incluir los sedimentos calcáreos de tipo arrecifal que afloran en la porción central de la Serranía del Burro. Smith (1970, p. 43) la describe como Formación Devils River. Aflora en una franja con orientación NE-SW en la

porción central y suroriental del área estudiada y consiste de un paquete de calizas en estratos muy potentes. Presenta alta permeabilidad primaria y secundaria.

La Formación West Nueces consiste en calizas de textura media (wackstone), que hacia su base presenta estructura nodular. Se encuentra sobreyaciendo a las margas y calizas de la Formación Telephone Canyon y subyaciendo a las calizas de la Formación McKnight. Presenta amplios afloramientos en el flanco este de la Sierra del Burro.

La Formación Mcknight está constituida por calizas oscuras en capas delgadas, evaporitas y brechas de colapso. Se encuentra sobreyaciendo a las calizas de la Formación West Nueces y subyaciendo a las calizas de la Formación Salmon Peak.

El denominado Grupo Washita se encuentra constituido por las formaciones Salmon Peak, Del Río y Buda. La Formación Salmon Peak corresponde a calizas arcillosas con nódulos de pedernal e inclusiones de marcasita en estratos potentes. Sus límites superior e inferior son transicionales, pero fácilmente reconocibles en el campo, pues ésta unidad en general contrasta con las unidades que la encajonan. Litológicamente, su límite inferior es transicional; en tanto que su límite superior es un cambio gradual de las calizas en estratos potentes de la Formación Salmon Peak, hacia la secuencia de sedimentos clásticos y calcáreos de la Formación Del Río. Su espesor es variable con un promedio de 245 m. Su permeabilidad en la Formación Salmon Peak es alta y disminuye hacia las otras formaciones.

La Formación Del Río consiste de 60 m de lutitas fosilíferas de color amarillento. Se comporta como impermeable.

La Formación Buda está constituida por 30 m de estratos medianos de calizas con foraminíferos y margas con braquiópodos y nódulos de hematina y pirita. Presenta baja permeabilidad.

Sobre las unidades de roca mencionadas, se encuentra la Formación Eagle Ford, que corresponde a lutitas de color oscuro, intercaladas con calizas arcillosas en estratos delgados, que afloran en una delgada banda al pie de la Sierra del Burro. Presenta baja permeabilidad.

La Formación Austin está formada por caliza de color gris claro, en estratos de tamaño medio, con intercalaciones de lutitas calcáreas. Aflora en el denominado Lomerío de Peyotes que corresponde a un

anticlinal, continuación del buzamiento sureste del anticlinal de la Sierra del Burro. Presenta baja permeabilidad.

Las formaciones Upson, Olmos, San Miguel y Escondido, están constituidas por lutitas y limolitas en capas de delgadas a laminares y areniscas en capas de estratificación mediana. Se consideran impermeables por su baja permeabilidad pero llegan a dar origen a un acuitardo.

En la planicie de Allende-Piedras Negras y descansando discordantemente sobre los sedimentos calcáreos del Cretácico Superior, se encuentra la Formación Sabinas-Reynosa. Se compone básicamente de un conglomerado semi-consolidado y en parte consolidado, de clastos calcáreos semi-redondeados, mal clasificados, de tamaño variable desde gravas hasta guijarros, empacados en un cementante calcáreo y presentando una capa de caliche hacia la cima. El conglomerado generalmente no sobrepasa los 7 u 8 m de espesor y en conjunto con el caliche la formación puede alcanzar un espesor de 40 m. MICARE, 2006, reporta, con base en información de barrenos exploratorios, tres subunidades, denominadas, de abajo hacia arriba, conglomerado, caliche arenoso y caliche arcilloso, este último con distribución muy irregular. La zona de caliche presenta abundantes agujeros de disolución de alta permeabilidad.

En la planicie de Allende-Piedras Negras, los materiales que constituyen el subsuelo se encuentran cubiertos por una delgada capa de 2 a 6 metros de espesor, de material aluvial cuaternario.

La estructura geológica predominante en la zona, es el anticlinorio de la Sierra del Burro, formado durante el Cretácico Superior y el Terciario Inferior. Los anticlinales de Agua Verde y Chupaderos, ubicados al noroeste del acuífero, son ondulaciones estructurales asociadas a dicho anticlinorio. La Sierra del Burro tiene forma cómica con flancos suaves, cuyos echados son del orden de 3 a 5°. El eje del anticlinal parte del centro-oeste de la sierra, en dirección al sureste, para buzarse al poniente del poblado de Allende. Al sureste de esta sierra, se encuentra otro anticlinal conocido como Lomerío de Peyotes, en el que afloran calizas de la Formación Austin del Cretácico Superior. Tiene flancos de suave pendiente y la dirección de su eje es NW-SE. A pesar de lo tendido de los plegamientos de la Sierra del Burro y del Lomerío Peyotes, sus buzamientos propician la existencia de zonas fracturadas. Cabe mencionar que en el flanco occidental del Anticlinal El Burro, existe una falla importante que anuncia un desplazamiento vertical o salto de alrededor de 1250 m con el bloque caído hacia el este. Se trata de una falla normal

originada como consecuencia del relajamiento de la deformación Laramide. Esta falla se conoce con el nombre de El Cedral y tiene importancia geohidrológica, ya que aparentemente constituye una barrera al flujo subterráneo y forma el límite sur del acuífero. En anticlinorio El Burro-Peyotes ha estado expuesto desde el Mioceno y, gran parte del rejuvenecimiento de cavernosidad para las calizas del subsuelo, se debe al efecto de las aguas meteóricas.

Para ilustrar de manera simplificada la distribución de las rocas en el subsuelo, en la [figura 3](#) se muestra un croquis de una sección geológica regional, donde se observa el levantamiento anticlinal que forma la Sierra del Burro, el cual presenta flancos de suave pendiente.

La sierra se puede describir como la mitad de una “gran cebolla”, cuyas capas en la parte superior de la sierra, han sido cortadas por erosión. El núcleo corresponde a las rocas permeables del Cretácico Inferior, mientras que la porción externa forma una banda anular. En los cañones de la sierra y en el plano geológico, son notables los afloramientos de las capas inferiores o de la parte baja del Cretácico, algunas de ellas por su poco espesor y posición casi horizontal, semejan curvas de nivel.

Afloran rocas calizas del Cretácico Inferior correspondientes a las unidades McKnight y Salmon Peak, que forman el flanco oriente de la Sierra del Burro. Estas, al igual que el resto de las formaciones cretácicas, presentan una inclinación de entre 3 y 5° en dirección al oriente. Rodeando a las formaciones mencionadas, se encuentran unidades del Cretácico Superior conocidas como Del Río, Buda, Eagle Ford y Austin ([figura 3](#)). Estas formaciones dan origen a lomeríos y elevaciones topográficas menores, mientras que entre los ranchos de El Remolino, El Bambilete y Las Albercas y, su prolongación al sur hasta el Río Escondido, se encuentra un valle alargado provocado por la erosión de la Formación Del Río, la cual está constituida por lutitas calcáreas que son más fáciles de erosionar que las calizas. Esto, da origen a una morfología que permite identificar claramente el límite entre las rocas del Cretácico Inferior (hacia el poniente de El Remolino y Las Albercas, de las rocas del Cretácico Superior (al oriente del valle entre los mismos ranchos mencionados). Hacia la parte central y oriente, donde se ubican los poblados de Zaragoza, Morelos, Nava y Allende, se extiende una planicie que se continúa hasta el Río Bravo, la cual está formada por materiales granulares del Terciario (Conglomerado Sabinas-Reynosa), cubiertos por una

capa de aluvi3n Cuaternario. Destaca el Conglomerado Sabinas-Reynosa, el cual constituye un importante acuífero que es explotado para uso agrícola e industrial.

Tipo de Acuífero

Las rocas existentes en la zona de estudio se pueden clasificar en tres grupos de acuerdo a su comportamiento geohidrol3gico: (1) Calizas del Cretácico Inferior, (2) calizas del Cretácico Superior y (3) materiales granulares del Terciario- Cuaternario.

(1).- Las calizas del Cretácico Inferior forman el núcleo de la Sierra del Burro, son permeables y permiten la infiltración, circulación y almacenamiento de agua en el subsuelo. Dan origen a un acuífero de alto rendimiento que se recarga por la infiltración de agua de lluvia en la Sierra del Burro y se descarga principalmente a través de los manantiales de la zona de Nava-Allende-Villa Unión (figura 4). Corresponden a un ejemplo típico de salida de agua en el buzamiento de anticlinales de caliza del norte de México, de igual manera que el agua al pie de la Sierra de San Marcos da origen a las pozas de Cuatro Ciénegas (IMTA, 2007) y el origen de los manantiales de Derramaderos al oriente de Saltillo, actualmente secos por sobre-explotación.

(2).- Las calizas y lutitas del Cretácico Superior se comportan como impermeables al flujo del agua subterránea. Cubren y confinan parcialmente al acuífero calizo descrito en el párrafo anterior.

(3).- Los materiales granulares del Terciario y Cuaternario que cubren la planicie que se extiende entre la Sierra del Burro y el Río Bravo, son permeables y dan origen a un acuífero somero que es explotado principalmente para uso agrícola e industrial (Conglomerado Sabinas-Reynosa).

El acuífero en las calizas del Cretácico Inferior de la Sierra del Burro, se recarga en las partes altas de la sierra y el flujo subterráneo circula hacia el sureste. El agua se encuentra confinada y con una presión hidrostática que le imprime la posición del nivel piezométrico en la zona de recarga. Esta agua ha buscado y encontrado una salida o alivio a la presión hidráulica, la cual se establece a través de fracturas que permiten la salida del agua en forma de los manantiales que existen en la zona ubicada entre Zaragoza, Morelos y Allende. Estos manantiales constituyen los “vertedores naturales de demasías” del acuífero

calizo de la Sierra del Burro. Por otra parte, varios pozos perforados al pie de la Sierra del Burro, son brotantes o artesianos.

Los alineamientos estructurales tales como fallas y ejes de anticlinales, contribuyen a que la dirección del flujo subterráneo de la sierra, se establezca hacia el sureste. El agua de los manantiales es utilizada para riego en la zona de Nava y gran parte vuelve a infiltrarse al subsuelo, recargando el acuífero superficial en la Formación Sabinas-Reynosa, ubicado en la planicie entre Allende y Piedras Negras.

Manantiales y pozos brotantes

Existen 6 grandes manantiales en la zona de Nava-Allende, denominados Las Ánimas, Cabeceras, El Sabino, Morelos (Las Corrientes), Nava (El Pesebre) y Allende. En el extremo norte de la zona se encuentra otro manantial, El Remolino. En la zona de Villa Unión, existen otros 6 manantiales de menor caudal que los anteriores y se denominan Santa Mónica, Ciénega Grande, Parque de La Luz, Hacienda de Guadalupe, Santa Ana y Manantial del AP de Villa Unión.

Al poniente de las poblaciones de Zaragoza y Allende se encuentran varios pozos artesianos o brotantes, los cuales alcanzaron a las rocas calizas acuíferas, en sitios donde presentan una presión hidráulica mayor que la superficie del terreno (figura 4).

Los caudales de agua, tanto en los manantiales como en los pozos artesianos (brotantes), presentan una inmediata respuesta a la recarga que recibe el acuífero por la infiltración de la precipitación pluvial sobre la sierra.

Piezometría y parámetros hidráulicos

El total de captaciones registradas en el acuífero Allende-Piedras Negras es de 778, de las cuales 675 corresponden a pozos, 64 a manantiales y 39 a norias. El volumen de extracción conjunta asciende a 425.9 millones de metros cúbicos anuales ($\text{Mm}^3/\text{año}$), destinados en su mayor parte a riego y en menor proporción a uso industrial y doméstico. Del total de la extracción, $332.3 \text{ Mm}^3/\text{año}$ (78.0 %) se destinan al uso agrícola, $60.0 \text{ Mm}^3/\text{año}$ (14.1 %) al uso industrial, $18.5 \text{ Mm}^3/\text{año}$ (4.3%) para abastecimiento público-urbano, y los $15.1 \text{ Mm}^3/\text{año}$ restantes (3.6%) para uso doméstico-abrevadero.

Para efectos de cuantificación del agua subterránea se marcaron 2 zonas, una que corresponde al área de balance limitada por celdas que se mencionan más adelante (figura 6) y otra que comprende el área fuera de la zona de balance y, entre ambas, cubren todo el acuífero. El volumen total de extracción (425.9 Mm³/año), se dividió en 172.3 Mm³/año que comprende descargas de agua subterránea que se realiza dentro de la zona de balance, (130.5 Mm³/año de pozos y 41.8 Mm³/año de descargas de manantiales) y 253.6 Mm³/año de descargas que ocurren fuera del área de balance (226.7 Mm³/año corresponden a descarga de manantiales y los 26.9 Mm³/año restantes a extracciones por bombeo).

La profundidad al nivel estático (NE) para marzo-mayo del 2008 presentaba valores entre 7 y 20 m al norte de la carretera Allende-Piedras Negras y en la zona de extracción de carbón de MICARE, debido al “achique” de agua que se realiza en sus tajos de explotación de carbón. Valores de 5 a 7 m de profundidad al NE se registran al noreste de los tajos, debido a la recarga artificial por el retorno del agua de “achique” de las minas mediante recarga artificial. Al sureste de Nava, se presentan valores que oscilan entre 3 y 5 m debido tanto a la baja topografía del terreno, como a la infiltración de los retornos de riego en la zona agrícola; en tanto que al poniente de Morelos varían entre 10 y 30 m, debido a que se eleva la superficie del terreno (figura 5).

El flujo subterráneo se establece de las estribaciones de la Sierra del Burro (Zaragoza, Morelos, Allende y Villa Unión), hacia el oriente (hasta el Río Bravo), entre Piedras Negras y Guerrero (figura 6). Al SW de la zona configurada, se identifica la curva de 440 msnm, a partir de la cual los valores descienden en forma gradual en dirección este-noreste hasta los 360 msnm, a la altura de Morelos. En la zona de los tajos de MICARE, se presenta la curva cerrada de 280 msnm, indicando un cono piezométrico que se forma por el “achique” del agua de los tajos para la explotación del carbón. El flujo continúa hacia el Río Bravo, donde alcanza la cota 220 msnm, descargado hacia dicho río mediante salidas por flujo subterráneo.

Para efectos del balance de agua subterránea, se denominó acuífero calizo al que se manifiesta en pozos artesianos y manantiales y acuífero superficial al ubicado en los conglomerados (y calizas Austin) en la planicie entre Allende-Piedras Negras (figura 4). De acuerdo al comportamiento piezométrico entre los acuíferos calizo y superficial, se determinó que ambos acuíferos están conectados.

Con respecto a la evolución del nivel estático para el periodo 2006-2008, se registraron valores tanto negativos como positivos. Los primeros indican abatimientos de hasta 1 anual y se registran al norte de Zaragoza. Los valores positivos indican recuperación de los niveles del agua subterránea, de 0.5 a 1.0 m anuales hacia la zona de los tajos y Allende-Villa Unión. Predominan los valores de recuperación, que son el reflejo de lluvias superiores a la media anual que se han registrado en los últimos años. Al norte de los tajos, también influye la recarga artificial que realiza la zona minera de MICARE y la CFE. Sin embargo, esta región presenta periodos de estiaje que pueden prolongarse por 5 y hasta 8 años, en los cuales se manifiesta de manera clara un abatimiento regional de los niveles y el descenso del aporte de los manantiales, como se registró en el año del 2002.

Existen valores de transmisividad muy variados. En los pozos ubicados en las rocas calizas, la transmisividad es alta, de 20 a $40 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. Hacia la planicie de Allende-Piedras Negras, la Formación Sabinas-Reynosa presenta conglomerados y horizontes de caliche con cavidades de gran tamaño que provocan alta transmisividad, donde se obtuvieron valores de más de $40 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. Donde no se cortan las cavidades mencionadas, existen aprovechamientos con transmisividad menores, del orden de 0.1 a $5.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. Los valores del coeficiente de almacenamiento reportados en trabajos previos (Grupo Modelo, 2003), es de 10^{-2} y 10^{-3} m^2/s en la zona de Morelos y del orden de $10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ en la mayor parte de la planicie de Allende-Piedras Negras (CFE, 1998).

Hidrogeoquímica

La salinidad del agua expresada como conductividad eléctrica en la porción centro-oriental del acuífero, varía desde 300 hasta más de 600 micromhos/cm al pie de la Sierra de Burro. Los valores más bajos se encuentran hacia la porción poniente y se incrementan gradualmente hacia el oriente, congruente con la dirección preferencial del flujo subterráneo. Existe una relación entre la salinidad del agua y su composición química.

Al poniente, el agua subterránea está caracterizada por presentar menos de 400 ppm de sólidos totales disueltos, bajas concentraciones de sulfatos, generalmente menores de 32 ppm, y pertenecer a la familia cálcico-bicarbonatada. Corresponde a agua que ha tenido contacto con rocas calizas de las cuales disuelve

los carbonatos y el calcio. Los carbonatos en el agua pasan a bicarbonatos que es una forma más estable del mencionado ión.

En contraste, los aprovechamientos ubicados hacia la porción centro-oriental del acuífero, se caracterizan por presentar agua con más de 1 000 ppm de sólidos totales disueltos (CAYSC, 2002), con concentraciones altas de sulfatos, asociados a la familia cálcico-sulfatada. Estos valores altos son puntuales, como los presentados en las inmediaciones de Zaragoza y Morelos, y se asocian a la disolución de yesos y anhidritas de la Formación Mcknight.

Cuantificación de agua subterránea dentro de la zona de balance

El balance anual de agua subterránea, se realizó en una superficie de 2 946 km² que corresponde a la principal zona del valle de Allende Piedras Negras. A continuación se presenta la cuantificación para el área dentro de la zona de balance y posteriormente se mencionan los volúmenes correspondientes al área fuera de la zona de balance, los que sumados dan la cuantificación total del acuífero Allende- Piedras Negras.

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:

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

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 de una unidad hidrogeológica:

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

De acuerdo con el modelo conceptual definido para el acuífero, las entradas están integradas por la recarga natural que se produce por efecto de la infiltración, tanto de la lluvia que se precipita en el valle como en la Sierra del Burro (Rv), así como la que proviene de zonas montañosas contiguas y que se mide como una recarga por flujo horizontal subterráneo (Eh). También, de manera inducida, la infiltración de

los excedentes del riego agrícola (retornos de riego) recargan al acuífero (Ir). Adicionalmente se produce infiltración del agua conducida a través de los canales de riego (Ic) y recarga artificial (Ra) que es importante en esta zona, la cual es realizada por MICARE.

La recarga vertical (Rv) es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo, por lo que fue despejada de la ecuación (1).

Por otra parte, las salidas de agua del acuífero corresponden al bombeo (B), a las salidas por flujo subterráneo (Ss), a la descarga de manantiales (Dm) y a la pérdida de agua por evapotranspiración (ETR), por lo que la ecuación de balance queda como sigue:

$$Rv + Ir + Ic + Ra + Eh - B - Sh - Dm - ETR = \pm \Delta V(S) \quad (1)$$

El cálculo de entradas por flujo horizontal (Eh), se realizó con base en la Ley de Darcy, partiendo de la configuración de elevación del nivel estático para el año 2008 (figura 6), mediante la expresión $Q = T * B * i$

i. Donde Q = gasto que pasa por un determinado canal de flujo; T = transmisividad; B = ancho de la celda; i = gradiente hidráulico.

En dicha configuración se seleccionaron canales o celdas de flujo y se aplicó la ley de Darcy para calcular el caudal "Q" que recarga al acuífero como entrada subterránea (Eh). La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada uno de los canales establecidos. En el Cuadro No. 2 se puede observar que para las celdas identificadas se presenta un flujo de entrada de 69.3 Mm³/año.

La infiltración por retornos de riego (Ir), es una componente de la recarga debida a la infiltración de los excedentes del riego agrícola. Se estimó considerando una superficie de riego de 300 km², obtenida a través de imágenes de satélite, la cual se multiplicó por una lámina promedio de riego de 1.0 m y por un coeficiente de infiltración de 0.08, tomando en cuenta la presencia de caliche y en menor grado arcillas en la capa superficial del suelo. Se obtuvo un volumen de infiltración por retornos de riego de 24.0 Mm³/año.

La infiltración en canales de riego (Ic), se calculó multiplicando el volumen que se conduce a través de dichos canales (210 Mm³/año), por un coeficiente de infiltración de 0.08, con lo que se obtuvo un volumen de infiltración a partir de los canales, de 16.8 Mm³/año.

La recarga artificial (Ra) que ha sido generada por MICARE donde se infiltra el agua extraída por el achique en los tajos de explotación de carbón es de 41.7 Mm³/año (Grupo Modelo, 2008).

Dentro de las salidas de agua del sistema acuífero, se encuentra la evapotranspiración (ETR). Este parámetro es la cantidad de agua transferida del suelo a la atmósfera por evaporación y transpiración de las plantas, por lo tanto es considerada una forma de pérdida de humedad del sistema. Existe una zona del área de balance donde los niveles estáticos se encuentran a profundidades menores a 10 m.

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.

Si consideramos que sólo en una superficie de 191 km² se registran niveles freáticos someros, donde la profundidad media es del 3 m, y la lámina de evapotranspiración real es de 478.8 mm, se obtiene que la ETR = 65.2 Mm³/año.

El valor de la descarga de los manantiales que existen dentro de la zona de balance (Dm), se obtuvo directamente mediante su aforo. Para tener un valor total, se consideró también la información de aforos realizados en trabajos previos (CAYSC, 2002; Grupo Modelo, 2003; Grupo Modelo, 2008). Como resultado se obtiene un valor promedio anual de 41.8 Mm³/año. En el cuadro No. 1, se muestra el valor de la descarga de los manantiales y la extracción mediante pozos, dentro y fuera de la zona de balance de agua subterránea considerada en este trabajo.

El valor de la extracción por bombeo (B), dentro de la zona de balance, asciende a **87.4 Mm³/año**. Dicho valor fue estimado con base en la información de tiempo de operación y gasto, superficie y lámina de riego) o por lectura del medidor de flujo.

Las salidas subterráneas (Sh), 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 6 y Cuadro No.3.

Para obtener el cambio de almacenamiento en la zona de balance ($\Delta V(S)$), se utilizó la configuración de la evolución del nivel estático del periodo 2006-2008 y un coeficiente de almacenamiento entre 0.005 y 0.03, así como la siguiente expresión: $\Delta VS = S * A * h$. Donde: S = Coeficiente de almacenamiento promedio de la zona de balance, A = Área entre curvas de igual evolución del nivel estático y h = Valor medio de la variación piezométrica en el período. El resultado obtenido refleja un cambio positivo en el almacenamiento, con un valor de $\Delta V(S) = 28.2 \text{ Mm}^3$ anuales.

Sustituidos los componentes de la ecuación de balance, se despejó la recarga vertical (Rv), de donde se obtuvo que: $Rv = 134.8 \text{ Mm}^3$ anuales.

Recarga en la Sierra del Burro

Por otra parte, la recarga en la Sierra del Burro corresponde a la descarga de agua que se genera en los manantiales ubicados fuera de la zona de balance (Dmf), más la extracción por pozos fuera de la zona de balance (Bf). Por lo tanto, al valor de la recarga procedente de la Sierra del Burro, corresponde a la suma de la descarga de los manantiales fuera del área de balance ($226.7 \text{ Mm}^3/\text{año}$), más la extracción por bombeo (obtenida mediante hidrometría), que se produce fuera del área de balance definida en el valle ($26.9 \text{ Mm}^3/\text{año}$). Sin embargo, debido a que el volumen de descarga de los manantiales se utiliza para el riego agrícola, debe descontarse el valor de los retornos por los excedentes de riego ($24.0 \text{ Mm}^3/\text{año}$), así como la infiltración que se produce en los canales de conducción ($16.8 \text{ Mm}^3/\text{año}$). De esta manera $Rsb = (Dmf - Ir - Ic) + Bf = (226.7 - 24.0 - 16.8) + 26.9 = 212.8 \text{ Mm}^3/\text{año}$.

Recarga total del acuífero

Las entradas subterráneas son adicionales o independientes de las descargas de manantiales, debido a que, aunque están calculadas aproximadamente en el mismo sitio, por el subsuelo fluyen las entradas subterráneas alimentadas por las lluvias en la Sierra del Burro y sobre la superficie escurren los volúmenes de los manantiales.

Por lo tanto, el valor de la recarga total que recibe el acuífero (R_t), es la suma de la recarga que se produce dentro de la zona de balance, más la que tiene lugar fuera de ella. En la Sierra del Burro es igual a la suma de las entradas, $R_t = (R_v + E_h + I_c + I_r) + R_{sb}$; de donde se obtiene una recarga total (R_t) de 457.7 Mm³ anuales.

Conclusiones

La Sierra del Burro está constituida por un gran levantamiento de calizas del Cretácico Inferior, en su mayoría permeables, que forman un importante acuífero. Las calizas forman un anticlinal con buzamiento estructural y topográfico hacia el sureste, donde el acuífero calizo se descarga a través de manantiales. La planicie de Allende-Piedras-Negras, se encuentra cubierta por conglomerados del Terciario que permiten la formación de un acuífero de poco espesor pero alta permeabilidad, el cual es recargado por los escurrimientos de los grandes manantiales.

El acuífero en las calizas del Cretácico Inferior de la Sierra del Burro, se recarga en las partes altas de la sierra y el flujo subterráneo circula hacia el sureste. El agua se encuentra confinada y con una alta presión hidrostática que le imprime la posición del nivel piezométrico en la zona de recarga. Esta agua ha buscado y encontrado una salida o alivio a la presión a que se encuentra sujeta, a través de fracturas que permiten la salida del agua en forma de manantiales en la zona entre Zaragoza, Morelos, Allende y Villa Unión (7.7 m³/seg). Los manantiales corresponden a vertedores de demasías del acuífero calizo de la Sierra del Burro. Por otra parte, varios pozos perforados al pie de la Sierra del Burro, son brotantes o artesianos.

Esta región llega a presentar periodos secos que se llegan a alargar entre 5 y 8 años, en los cuales se manifiesta de manera clara un abatimiento regional de los niveles, como sucedió y se registró en el año del 2002, donde los niveles del agua se abatieron y preocuparon a los residentes de la región.

Al pie de la Sierra de Burro, el agua subterránea se caracteriza por presentar agua con menos de 560 ppm de sólidos totales disueltos (STD), bajas concentraciones de sulfatos generalmente menores de 32 ppm y son del tipo cálcico-bicarbonatada, mientras que en los pozos ubicados en una franja al oriente de la anterior, el agua contiene más de 1,000 ppm de STD, concentraciones altas de sulfatos y son del tipo cálcico-sulfatada. En la planicie de Allende-Piedras Negras, la calidad del agua subterránea es variable.

Se realizó un balance de agua subterránea, del que se obtuvo que la recarga total en la zona de estudio es igual a la recarga generada en la Sierra del Burro (R_{sb}) que es de $370.83 \text{ Mm}^3/\text{año}$, más la infiltración por lluvia dentro de la zona de balance (I_{LL}) que es de $88.38 \text{ Mm}^3/\text{año}$, de donde se obtiene una recarga total para el acuífero en cuestión, de $459.21 \text{ Mm}^3/\text{año}$, mientras que el volumen de extracción total en toda la zona es de $425.94 \text{ Mm}^3/\text{año}$.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Grupo Modelo, patrocinador del presente trabajo, el cual se realizó como un aporte a la CONAGUA, para la Reglamentación del Acuífero Allende-Piedras Negras, a fin de establecer las medidas regulatorias para controlar las extracciones y establecer el orden entre quienes necesitan y utilizan agua.

BIBLIOGRAFIA.

ALDAMA, A.A., APARICIO, J., GUTIÉRREZ-OJEDA, C., MARTÍNEZ-MORALES, M., GONZÁLEZ-HITA, L., HERRERA-ZAMARRÓN, G., MATA-ARELLANO, I., MEJÍA-GONZÁLEZ, M.A., ORTIZ-FLORES, G., GALLARDO-ALMANZA, P., LOBATO-SÁNCHEZ, R., PÉREZ-LÓPEZ, J.L., REZARZATE, G. y FRITZ, P. *Comportamiento hidrogeológico de los acuíferos Cuatrociénegas y El Hundido, Coahuila, México*. Ingeniería Hidráulica en México. Vol. - no. -, 2007, pp.

ALVAREZ, M. *Provincias Fisiográficas de la República Mexicana*. Memorias del XX Congreso Geológico Internacional. Sociedad Geológica Mexicana. 1958.

CAYSC. *Actualización y evaluación geohidrológica del acuífero Allende-Piedras Negras (Zona MICARE), Coahuila*. Informe elaborado por Lesser y Asociados, S. A. de C. V. Comisión de Aguas y Saneamiento de Coahuila, 2002.

CFE. *Estudio de evaluación geohidrológica preliminar de la zona de Río Escondido en el Estado de Coahuila*. Informe elaborado por la empresa Técnicos, Asesores y Consultores, S. A. de C. V. Comisión Federal de Electricidad, 1981

CFE. *Estudio geohidrológico Centrales Termoeléctricas Carbón I y II, Piedras Negras, Coahuila*. Comisión Federal de Electricidad, 1993.

CFE. Reporte sobre el *Resumen y evaluación de estudios geohidrológicos realizados para el abastecimiento de agua a las Centrales Termoeléctricas. Carbón I y II, mediante las alternativas de explotación del sistema acuífero calizo de la porción norte del Estado de Coahuila*. Comisión Federal de Electricidad, 1994

CFE. *Estudio Geohidrológico del Sistema Acuífero en Calizas de la Porción Norte del Estado de Coahuila*. Comisión Federal de Electricidad, 1998.

CONAGUA. *Estudio geohidrológico de la zona Allende-Piedras Negras, Coahuila*. Elaborado por Anáhuac, S. A. de C. V. Comisión Nacional del Agua, 1980

CONAGUA. *Estudio sobre reactivación de redes de monitoreo del área Allende-Piedras Negras, Coah.* Comisión Nacional del Agua, 2000.

CONAGUA. *Estudio para determinar la recarga, almacenamiento y descarga de agua subterránea en los acuíferos de la Serranía del Burro, Cerro Colorado-La Partida, Presa la Amistad, Palestina y Allende-Piedras Negras, en diversos municipios del Estado de Coahuila*. Elaborado por Consultoría BETSCO, S. A. de C. V. Comisión Nacional del Agua, 2006.

GRUPO MODELO, S. A. de C. V. *Estudio para determinar la potencialidad del acuífero del área entre Zaragoza y las Albercas, Coahuila*. Elaborado por Lesser y Asociados, S. A. de C. V. 2003.

GRUPO MODELO, S. A. de C. V. *Estudio Técnico para Determinar la Disponibilidad de Agua Subterránea en el Acuífero Allende-Piedras Negras, Coahuila*. Elaborado por Lesser y Asociados, S. A. de C. V., 2008.

MICARE. *Balance geohidrológico del acuífero Allende-Piedras Negras, Coahuila*. Elaborado por COPEI Ingeniería, S. A. de C. V. Minerales Monclova, S. A. de C. V., 2006.

SMITH, C.I. *Lower Cretaceous Stratigraphy, Northern Coahuila, Mexico*. Report of Investigations-No. 65, Bureau of Economic Geology, University of Texas, Austin, Texas, 1970.

Relación de Cuadros:

Cuadro 1. Descarga de los manantiales y extracción por bombeo, dentro y fuera de la zona de balance

Cuadro 2. Cálculo de las entradas por flujo subterráneo horizontal

Cuadro 3. Cálculo de salidas por flujo subterráneo horizontal

Relación de figuras:

Figura 1. Localización del acuífero Allende-Piedras Negras.

Figura 2. Geología general del acuífero, porción central y oriente.

Figura 3. Geología del subsuelo.

Figura 4. Funcionamiento del acuífero

Figura 5. Profundidad al nivel estático en metros (2008)

Figura 6. Elevación del nivel estático en msnm (2008)

Abstract

Dirección institucional de los autores

Juan Manuel Lesser-Illades
David González-Posadas,
Luis Ernesto Lesser-Carrillo

Lesser y Asociados, S. A. de C. V.
Río Guadalquivir 3
Colonia Pathé
76020 Querétaro, Querétaro, México
Teléfono +(52) (442) 223 1515
Fax +(52) (442) 223 3361
lesser@prodigy.net.mx
gonzalezdavidgeo@prodigy.net.mx
luis_lesser@prodigy.net.mx

Víctor Manuel Castañón Arcos

Gerencia de Aguas Subterráneas
Comisión Nacional del Agua
Avenida Insurgentes Sur 2416 Piso 9
Colonia Copilco, El Bajo
04340 México, D. F.
Teléfono +(52) (55) 5174 4000 extensión 1654
cavictor@yahoo.com

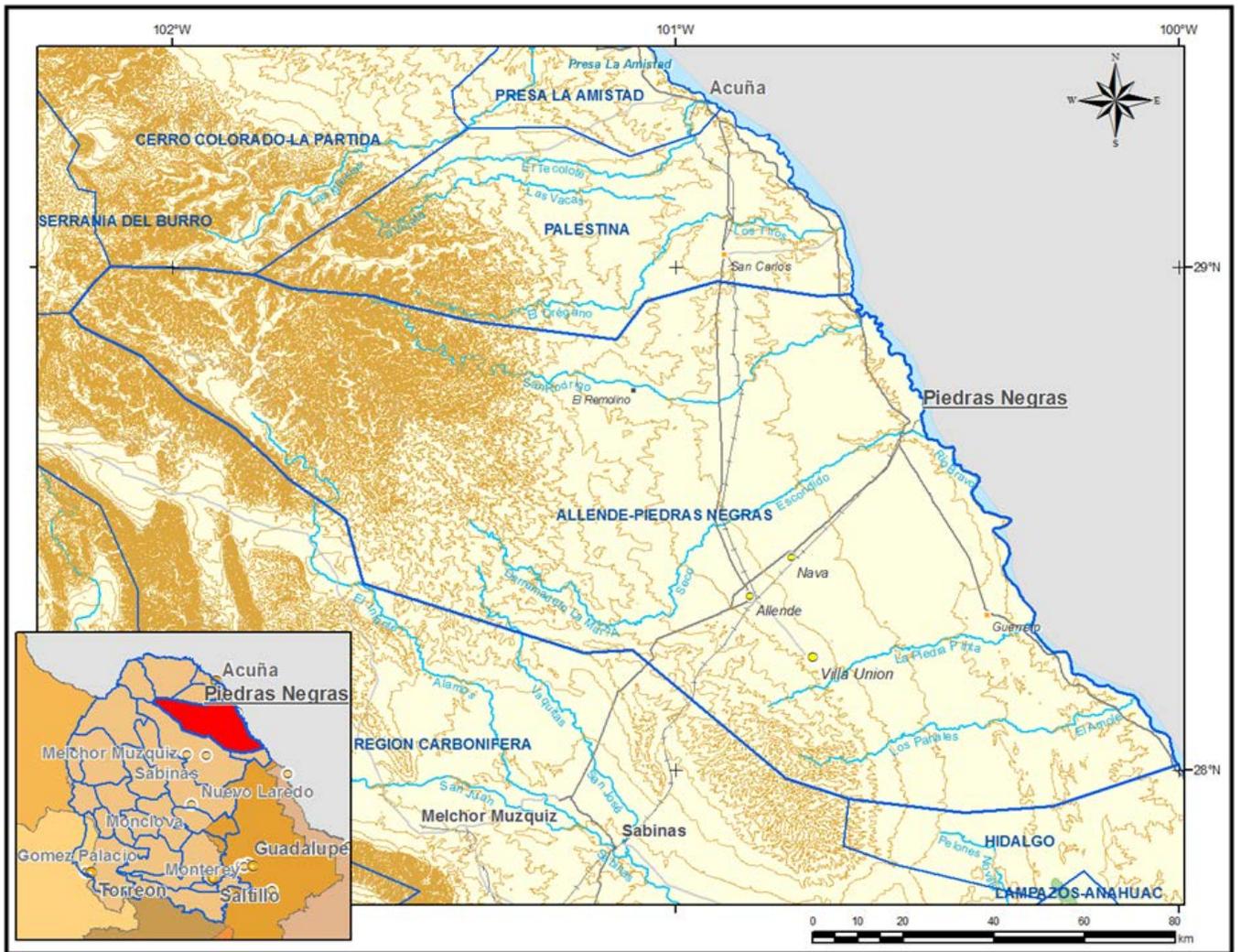


Figura 1. Localización del acuífero Allende-Piedras Negras.

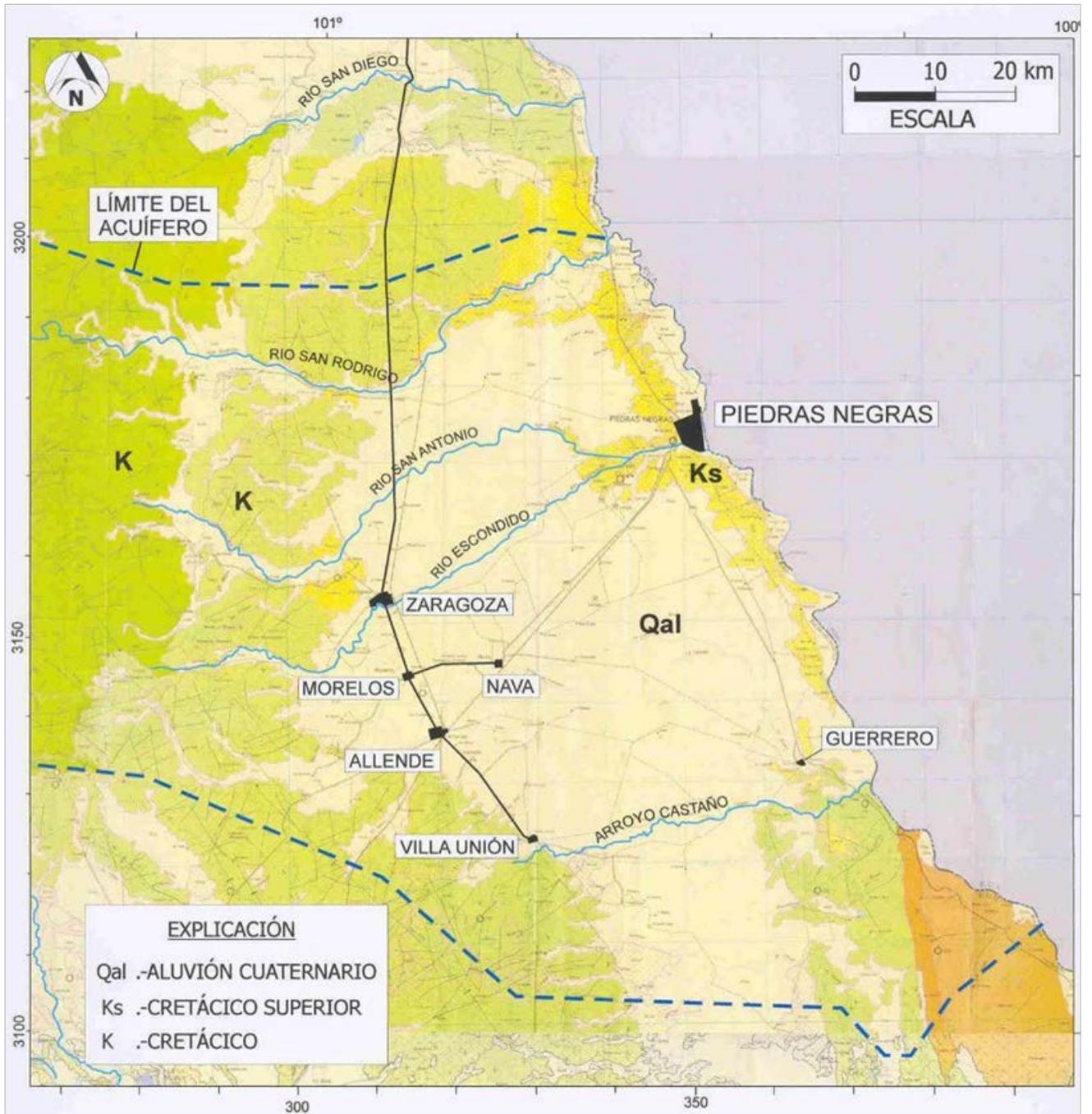


Figura 2. Geología general del acuífero, porción central y oriente.

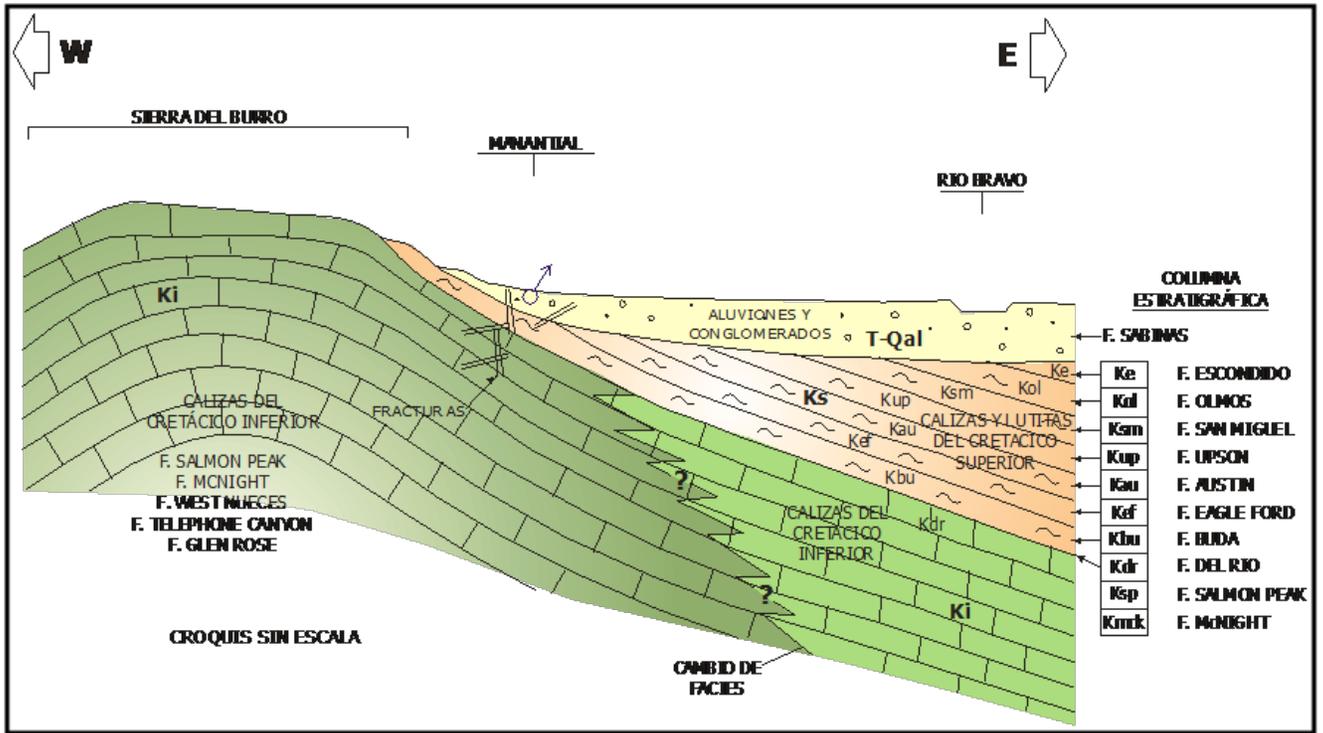


Figura 3. Geología del subsuelo.

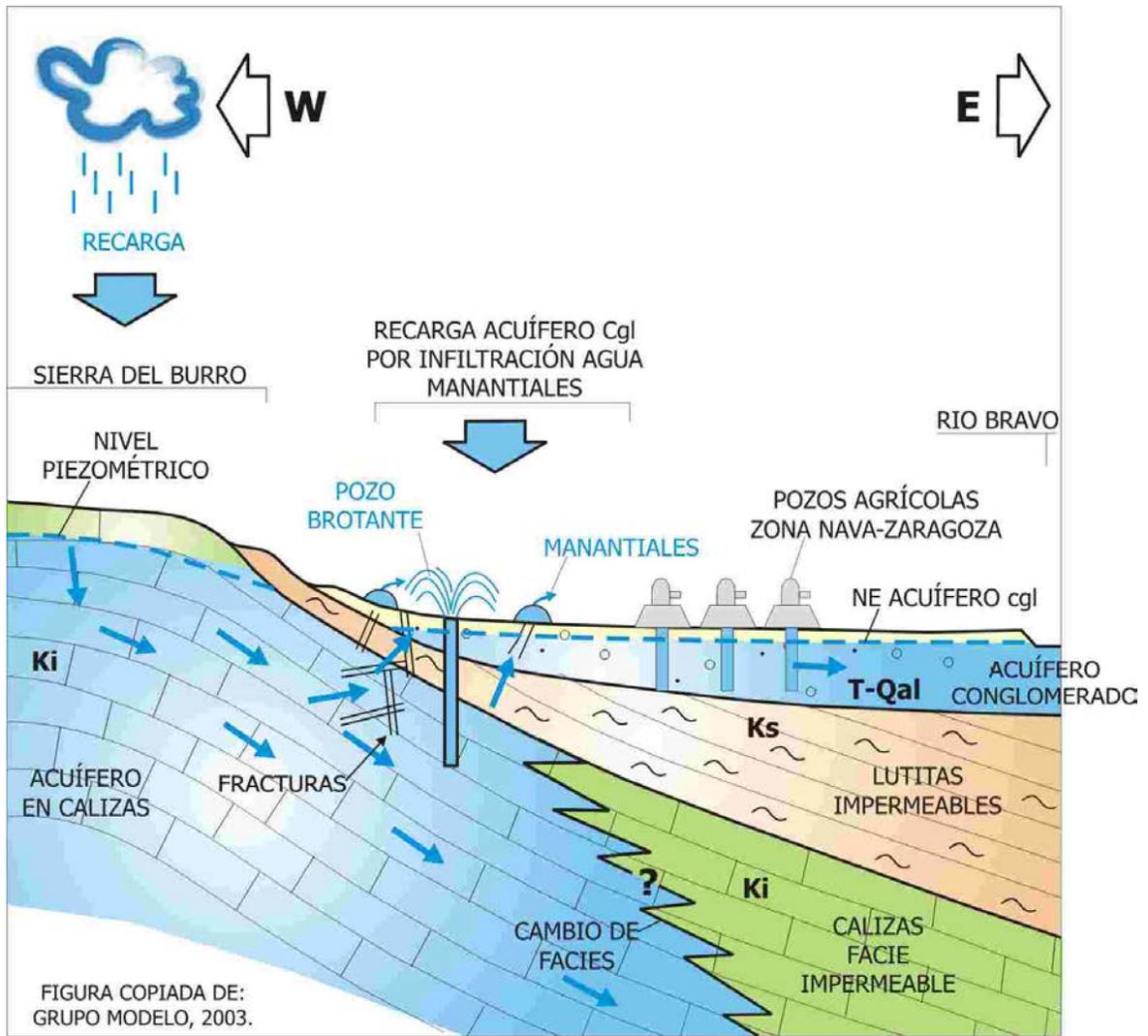


FIGURA 8.3.-RELACIÓN ENTRE EL ACUÍFERO CALIZO Y EL CONGLOMERADO.
Figura 4. Funcionamiento del acuífero.

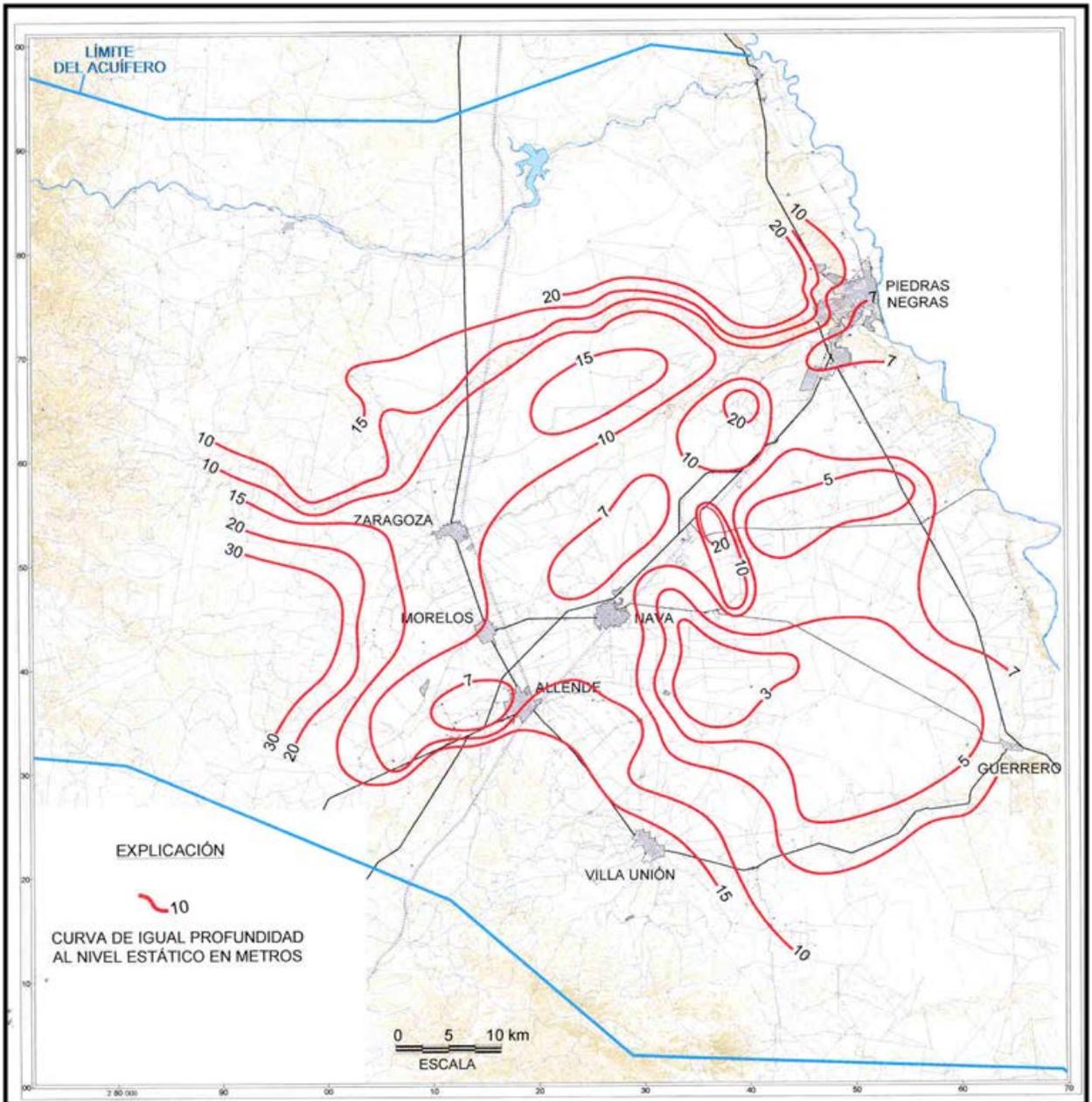


Figura 5. Profundidad al nivel estático en metros (2008)

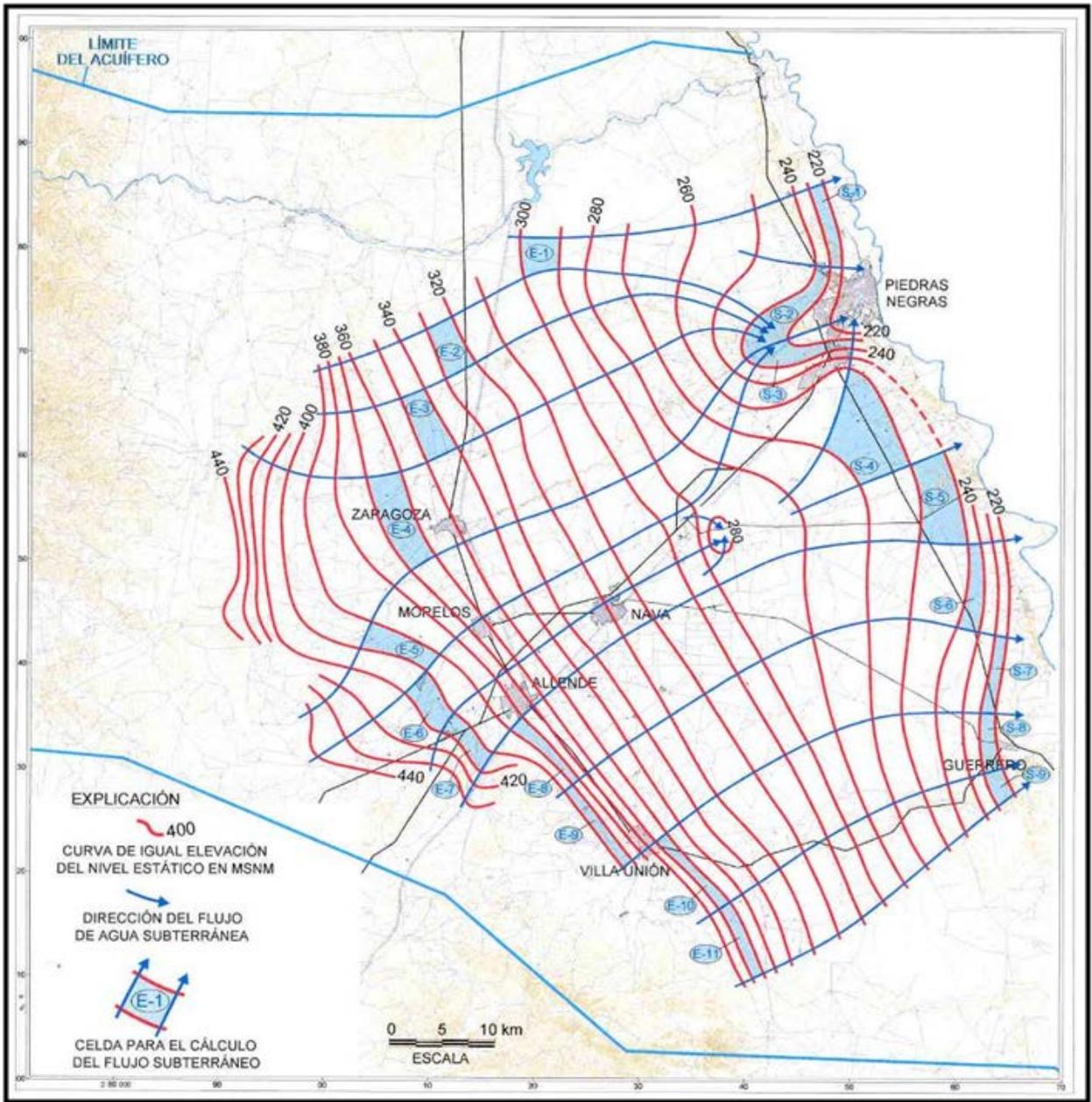


Figura 6. Elevación del nivel estático en msnm (2008)

| CENSO | EXTRACCION TOTAL hm ³ /año | DENTRO DEL AREA DE BALANCE | | FUERA DEL AREA DE BALANCE | |
|-------------|---|----------------------------|----------------------------|---------------------------|----------------------------|
| | | POZOS | DESCARGA DE MANANTIALES | POZOS | DESCARGA DE MANANTIALES |
| LESSER 2002 | 43.35 | 43.35 | | | |
| LESSER 2003 | 224.82 | 14.65 | 16.90 | 18.12 | 175.15 |
| BETSCO 2006 | 21.68 | 13.26 | 1.31 | 7.11 | |
| COPEI 2006 | 0.034 | 0.034 | | | |
| LESSER 2007 | 0.030 | 0.025 | | 0.005 | |
| LESSER 2008 | 84.93 | 8.09 | 23.62 | 1.64 | 51.58 |
| CFE 2008 | 8.0 | 8.00 | | | |
| SUMA | 382.844 | 87.41 | 41.83 | 26.875 | 226.73 |

Cuadro 1. Descarga de los manantiales y extracción por bombeo, dentro y fuera de la zona de balance

Cuadro 2. Cálculo de las entradas por flujo subterráneo horizontal.

| CANAL | LONGITUD L (m) | ANCHO B (m) | h_2-h_1 (m) | Gradiente i (m) | T (m^2/s) | CAUDAL Q (m^3/s) | VOLUMEN ($hm^3/año$) |
|-----------------------|-------------------|----------------|------------------|--------------------|------------------|-------------------------|---------------------------|
| E1 | 3650 | 3233 | 10 | 0.0027 | 0.001 | 0.0089 | 0.3 |
| E2 | 2899 | 5148 | 10 | 0.0034 | 0.002 | 0.0355 | 1.1 |
| E3 | 2956 | 6549 | 10 | 0.0034 | 0.003 | 0.0665 | 2.1 |
| E4 | 3280 | 9251 | 10 | 0.0030 | 0.004 | 0.1128 | 3.6 |
| E5 | 2181 | 6875 | 10 | 0.0046 | 0.018 | 0.5674 | 17.9 |
| E6 | 2595 | 4858 | 10 | 0.0039 | 0.008 | 0.1498 | 4.7 |
| E7 | 1871 | 5384 | 10 | 0.0053 | 0.008 | 0.2302 | 7.3 |
| E8 | 1230 | 8023 | 10 | 0.0081 | 0.004 | 0.2609 | 8.2 |
| E9 | 1117 | 9220 | 10 | 0.0090 | 0.004 | 0.3302 | 10.4 |
| E10 | 1108 | 8900 | 10 | 0.0090 | 0.004 | 0.3213 | 10.1 |
| E11 | 1313 | 7437 | 10 | 0.0076 | 0.002 | 0.1133 | 3.6 |
| Total entradas | | | | | | | 69.3 |

| CANAL | LONGITUD L (m) | ANCHO B (m) | $h_2 - h_1$ (m) | Gradiente i (m) | T (m²/s) | CAUDAL Q (m³/s) | VOLUMEN (hm³/año) |
|-----------------------|---------------------------|------------------------|---------------------------------------|----------------------------|--------------------------------|---------------------------------------|---|
| S1 | 1420 | 8025 | 10 | 0.0070 | 0.0002 | 0.0113 | 0.4 |
| S2 | 2737 | 9662 | 10 | 0.0037 | 0.001 | 0.0353 | 1.1 |
| S3 | 1735 | 8419 | 10 | 0.0058 | 0.002 | 0.0970 | 3.1 |
| S4 | 6177 | 7948 | 10 | 0.0016 | 0.005 | 0.0643 | 2.0 |
| S5 | 3761 | 8417 | 10 | 0.0027 | 0.005 | 0.1119 | 3.5 |
| S6 | 1740 | 8435 | 10 | 0.0057 | 0.002 | 0.0970 | 3.1 |
| S7 | 1212 | 7481 | 10 | 0.0083 | 0.002 | 0.1234 | 3.9 |
| S8 | 1623 | 5560 | 10 | 0.0062 | 0.004 | 0.1370 | 4.3 |
| S9 | 1952 | 2973 | 10 | 0.0051 | 0.002 | 0.0305 | 1.0 |
| Total entradas | | | | | | | 22.3 |

Cuadro 3. Cálculo de las salidas por flujo subterráneo horizontal.