



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO BOCOYNA (0843), ESTADO DE
CHIHUAHUA**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1	GENERALIDADES.....	2
	Antecedentes	2
1.1	Localización.....	2
1.2	Situación administrativa del acuífero.....	4
2	FISIOGRAFÍA.....	5
2.1	Provincia fisiográfica.....	5
2.2	Clima.....	5
2.3	Hidrografía	6
2.4	Geomorfología.....	7
3	GEOLOGÍA.....	7
3.1	Estratigrafía.....	8
3.2	Geología estructural	15
3.3	Geología del subsuelo	16
4	HIDROGEOLOGÍA.....	17
4.1	Tipo de acuífero	17
5	BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	17
5.1	Entradas	18
5.1.1	Recarga vertical (Rv).....	18
5.2	Salidas.....	24
5.2.1	Bombeo (B).....	24
5.2.2	Descarga a través de manantiales (Dm)	24
5.2.3	Caudal base o flujo base (Dfb)	25
6	DISPONIBILIDAD	25
6.1	Recarga total media anual (R).....	25
6.2	Descarga natural comprometida (DNC).....	25
6.3	Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)	26
6.4	Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)	26
7	BIBLIOGRAFÍA.....	27

1 GENERALIDADES

Antecedentes

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

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

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

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

1.1 Localización

El acuífero Bocoyna, definido con la clave 0843 en la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción sur del estado de Chihuahua, entre las coordenadas geográficas 25° 58' y 27° 21' de latitud norte y 106° 50' y 105° 59' de longitud oeste, cubriendo una superficie de 7336.9 km².

Limita al noreste con el acuífero San Felipe de Jesús; al suroeste con Río Fuerte; al noroeste con Carichi-Nonoava, al este con Parral-Valle del Verano, pertenecientes al estado de Zacatecas; al sureste con Providencia y Matalotes-El Oro; al sur con Río Culiacán; que pertenecen al estado de Durango (figura 1).

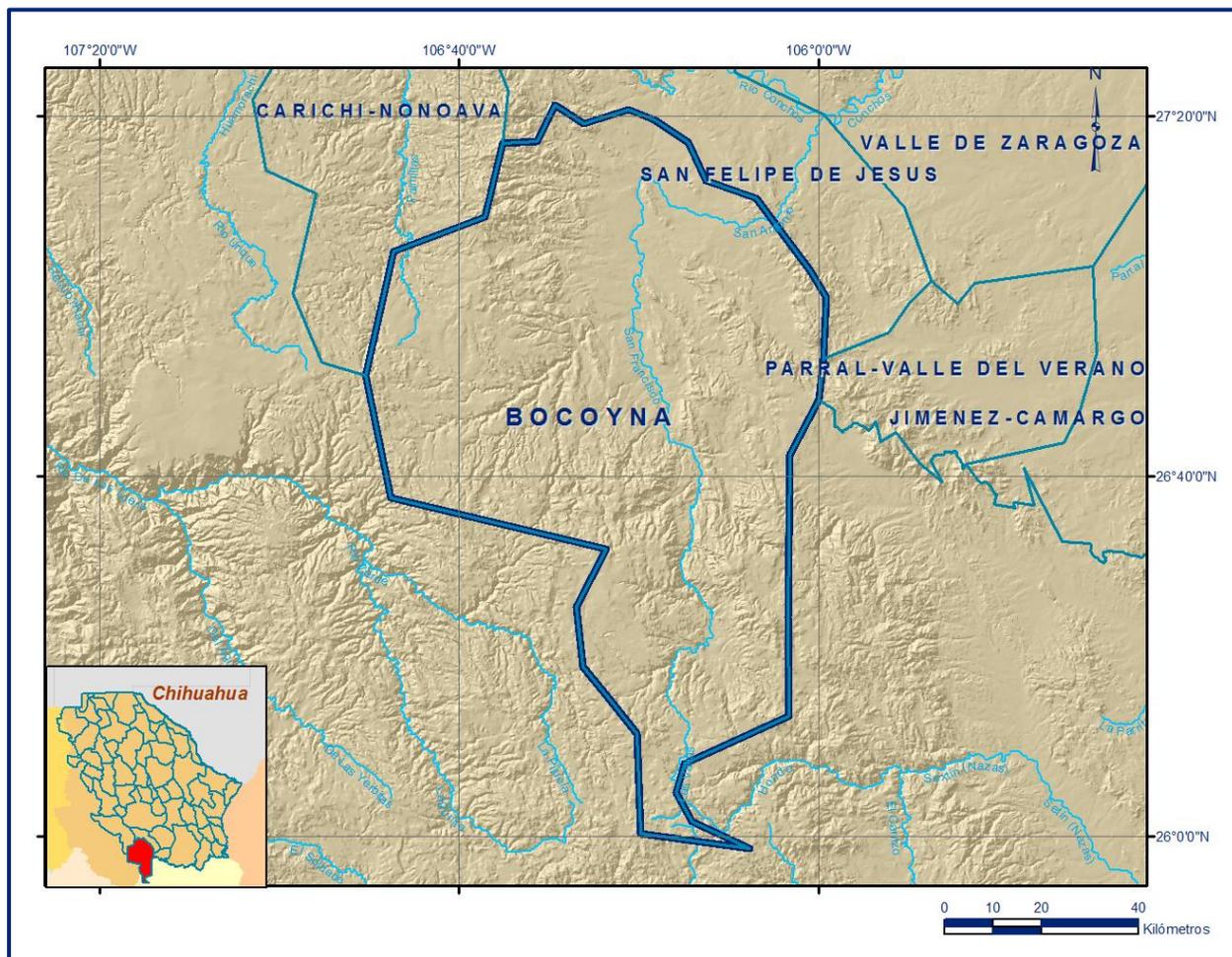


Figura 1. Localización del acuífero

Geopolíticamente, comprende la superficie total del municipio El Tule; parcialmente cubre a Balleza, Huejotitán, Rosario, Ocampo; así como porciones menores de San Francisco del Oro y Nonoava. 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 del acuífero

ACUIFERO 0843 BOCOYNA						
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE		
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS
1	106	3	10.5	26	42	23.9
2	106	3	23.8	26	24	24.8
3	106	3	17.9	26	13	22.4
4	106	14	54.7	26	8	10.0
5	106	15	51.0	26	4	56.7
6	106	14	7.7	26	1	43.8
7	106	7	41.3	25	58	40.6
8	106	19	50.6	26	0	20.7
9	106	20	13.1	26	11	26.3
10	106	23	26.6	26	15	26.9
11	106	26	15.4	26	18	53.5
12	106	26	59.2	26	25	32.9
13	106	23	37.2	26	31	58.2
14	106	47	34.2	26	37	38.1
15	106	50	21.4	26	51	14.0
16	106	47	16.7	27	5	4.4
17	106	37	10.1	27	8	50.7
18	106	35	6.6	27	17	6.9
19	106	31	16.9	27	17	14.5
20	106	29	21.1	27	21	20.4
21	106	26	6.5	27	19	12.7
22	106	21	9.5	27	20	46.6
23	106	18	14.3	27	19	42.5
24	106	14	29.2	27	17	8.6
25	106	12	31.7	27	12	57.3
26	106	6	58.9	27	10	56.7
27	106	0	58.5	27	2	53.1
28	105	59	12.2	27	0	0.2
29	105	59	26.4	26	53	10.4
30	106	0	0.0	26	48	32.0

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero Bocoyna pertenece al Organismos de Cuenca VI “Río Bravo”, al Consejo de Cuenca “Río Bravo”, instalado el 21 de enero de 1999.

En la totalidad de su territorio no rige ningún decreto de veda, sin embargo , se encuentra sujeto a las disposiciones del “ACUERDO General por el que se suspende provisionalmente el libre alumbramiento de las aguas nacionales del subsuelo en los 96 acuíferos que se indican.”, publicado en el 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 con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 4. El uso principal del agua subterránea es el agrícola. No se han constituido ningún Distrito de Riego ni Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2 FISIOGRAFÍA

2.1 Provincia fisiográfica

De acuerdo con la regionalización fisiográfica del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2001), el acuífero se ubica en territorio de la provincia fisiográfica Sierra Madre Occidental, subprovincia Gran Meseta y Cañones Chihuahuenses y Sierras y Llanuras de Durango.

La Sierra Madre Occidental se extiende en parte de los estados de Sonora, Chihuahua, Sinaloa, Durango, Zacatecas, Aguascalientes y Jalisco. Es un gran sistema montañoso que tiene su origen en el Cenozoico Inferior o Medio, cuando se inició la extrusión de gigantescos volúmenes de los materiales volcánicos que lo integran, cuyos espesores oscilan entre 1500 y 1800 m; en ella predominan rocas ácidas, ricas en sílice, e intermedias.

2.2 Clima

De acuerdo con la clasificación de Köppen, modificada por E. García, en 1981, con aportaciones del INEGI, para las condiciones particulares de la República Mexicana, en la zona noreste, prevalece el clima semiseco templado BS1kw(w). Es un clima semiseco estepario (BS), subtipo semiseco (1), con grado de humedad mayor que 22.9 (coeficiente que resulta de la relación precipitación/temperatura). Su condición de temperatura (k), que es una característica establecida considerando la temperatura media anual del mes más frío y del más cálido, templado con verano cálido. El régimen de lluvia (w), que define el comportamiento de la lluvia durante el año, indica la temporada en la que se concentra la mayor cantidad, en este caso es en verano, cuando el mes de máxima precipitación cae dentro del período mayo-octubre, donde

se recibe por lo menos diez veces mayor cantidad de precipitación que el mes más seco del año. El último término (w) indica que su porcentaje de lluvia invernal (cantidad de lluvia que cae en este periodo con respecto a la total anual) es < 5%. Se caracteriza por presentar una temperatura media anual de 16 °C, la temperatura media del mes más frío es menor de 18 °C, con invierno fresco y régimen de lluvias en verano. Atravesando el acuífero de noroeste a sureste se encuentran tres tipos diferentes de clima, el primero es el clima semifrío de tipo subhúmedo CE(w2), con régimen de lluvias es de verano, y la temperatura media anual se encuentra entre 5 y 12 °C. El segundo clima C(w1), templado subhúmedo con régimen de lluvias de verano y escasa precipitación el resto del año o de invierno. La temperatura media anual se encuentra entre 12 y 18 °C. Su cociente precipitación/temperatura se encuentra entre 43.2 y 55.0. Por último, el clima C(w0), que presenta las mismas características que el C(w2) variando únicamente en el grado de humedad, que corresponde con el más seco de los subhúmedos, de modo que el cociente precipitación/temperatura es menor que 43.2.

Usando el método de isólinas con la información de temperatura y precipitación media anual obtenida del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) a escala 1:1,000,000, se calcularon los promedios anuales los cuales son **13.8 °C** y **622.8 mm**, respectivamente.

2.3 Hidrografía

El acuífero se localiza en la Región Hidrológica No. 24 Bravo-Conchos, abarca las cuencas del Río Balleza al sur y del Río Conchos al norte, pertenece en su mayoría a las subcuencas del Río Balleza y Río San Juan.

Su corriente principal es el Río Balleza, el cual se origina a partir del Río San Juan, que proviene del estado de Durango y recibe las aguas de los ríos Chico, Rancho Viejo, Maíz Quebrada de Navarro y Agujas, además de arroyos menos importantes. Prosigue luego por los municipios de El Tule y Rosario, en cuya jurisdicción se une al río Conchos; por la parte oriental se forman varios arroyos que descargan sus aguas al río Nonoava, el cual va a formar la corriente principal del río Conchos.

Los escurrimientos de los arroyos no son perennes, únicamente en temporada de lluvias conducen aguas pluviales, localmente forman un patrón de tipo Dendrítico

2.4 Geomorfología

El sistema de topofomas del acuífero Bocoyna se constituye de Sierras, Mesetas con Cañadas y Valles intermontanos con lomeríos, se identifican fácilmente las subprovincias “Sierras y Llanuras de Durango” al centro y oriente y “Gran Meseta y Cañones Chihuahuenses” al occidente abarcando también el sur del acuífero. Debido a esto la geomorfología es heterogénea, con una diferencia marcada entre las dos subprovincias que se describen a continuación: en la zona centro-oriental, existe un relieve en el que predominan las sierras con una dirección preferencial NW-SE basculadas al NE, entre las que hallamos una sucesión de amplias llanuras alargadas dispuestas en un típico patrón de bloques de fallas escalonadas, la segunda zona abarca el acuífero desde el NW, pasando por el occidente y abarcando por completo el sur del acuífero, se caracteriza por pertenecer a una gran Mesa que se extiende al acuífero vecino Río Fuerte, por encima de la mesa convergen cordones montañosos irregulares separados por amplios valles planos y partes cenagosas. El modelado del drenaje es dendrítico y los cauces meandricos se extienden por los amplios valles (R.E King, 1938, en monografía geológico-minera del estado de Chihuahua, 1994).

Algunos de los principales rasgos son: La Mesa de la Cruz, Mesa Metatillo, Mesa de Matatena, Mesa de Corralitos, Mesa Navarro, mesa la Calavera, Cerro de San Juan, con una altura mayor a 2100 m de altura, Cerro San Cristobal con una altura mayor a 2400 m, Cerro de la plata a 2530m, entre otras.

3 GEOLOGÍA

La geología de la región está compuesta por rocas ígneas y sedimentarias, que varían desde el periodo Cretácico al Cuaternario, las rocas más antiguas se encuentran al Noreste del acuífero siendo de tipo ígneo, como Andesitas y Tobas andesíticas, estas pertenecen al Mesozoico.

Las rocas que abarcan una mayor superficie, en el acuífero pertenecen al Cenozoico representadas principalmente por Riolitas y Tobas, en este mismo periodo podemos encontrar Ignimbritas-Tobas riolíticas, Dacitas-Andesita, Andesitas-Basalto, Riolitas, Basalto-Conglomerados y Calizas-Areniscas. La distribución general de las distintas unidades litológicas se muestra en la figura 2.

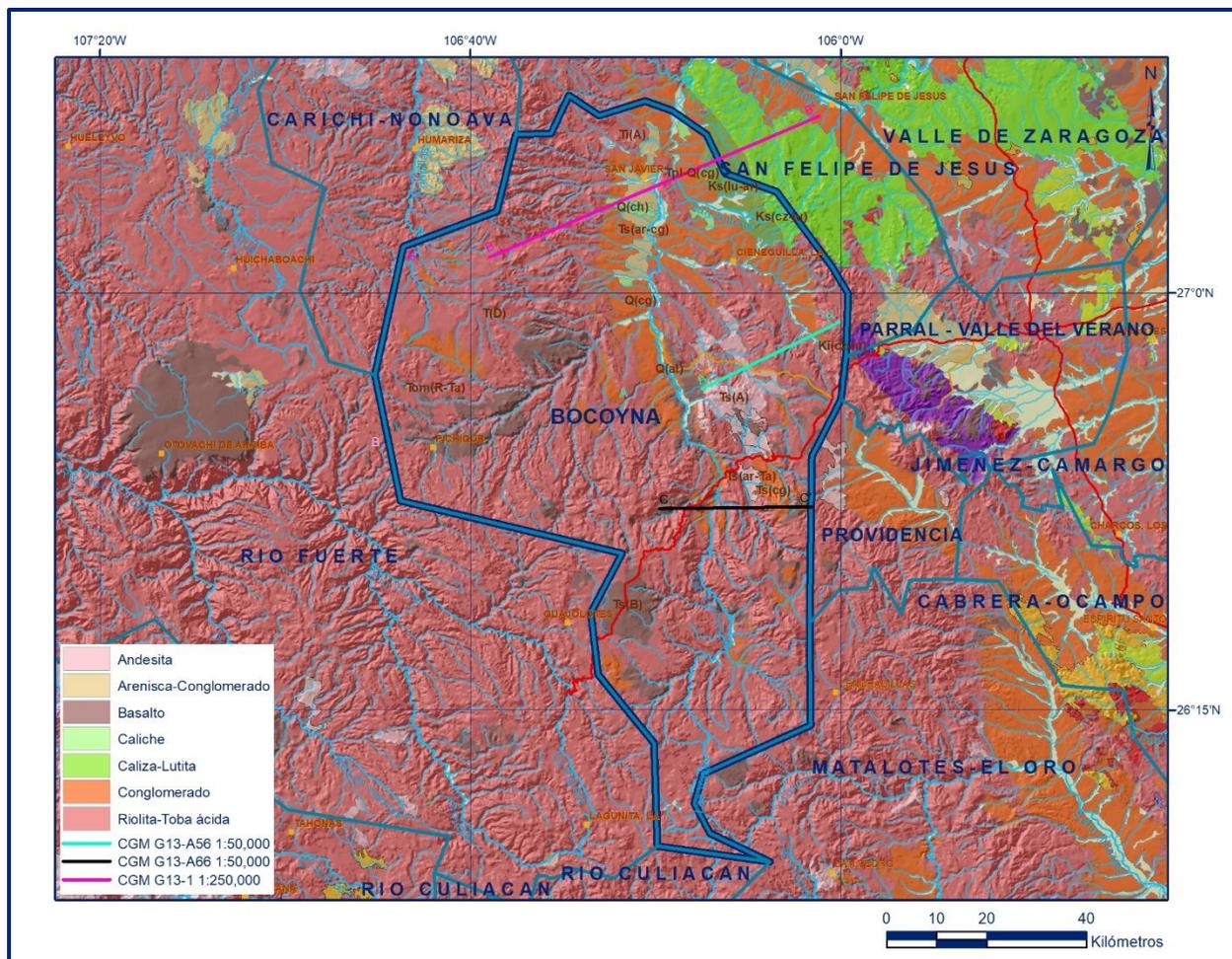


Figura 2. Geología general de acuífero

3.1 Estratigrafía

La columna estratigráfica está conformada por rocas sedimentarias e ígneas, cuyo registro comprende edades que varían del periodo Cretácico Inferior al Cuaternario. A continuación, se presenta de manera breve la descripción de la más antigua a la más reciente, con base en información del Servicio Geológico Mexicano:

CRETÁCICO Inferior

La unidad más antigua registrada en la zona del acuífero corresponde a una alternancia de lutitas y calizas, se ubicó un afloramiento en la base del arroyo Los Mexicanos en las cercanías del ejido La Saucedá. Es el único afloramiento registrado en el área y se puede correlacionar con la Formación Mezcalera de edad Cretácico inferior.

CRETÁCICO Superior – Paleoceno Eoceno

Andesita-Toba Andesítica

Esta unidad es una secuencia vulcanosedimentaria formada en la parte inferior por toba andesítica y riolita intercalada por una alternancia de lutita y caliza de estratos delgados, en la parte superior está formada por una alternancia de arenisca y caliza con horizontes esporádicos de conglomerado e ignimbrita. Esta unidad aflora en las inmediaciones de los ranchos San Miguel y Santa Clara.

En la localidad San Miguel aflora dentro del anticlinal San Miguel, el contacto inferior no se observa y se encuentra afectado por la unidad Toba Dacita-Arenisca y le sobreyace de forma discordante la unidad Toba Ignimbrita-Toba Riolítica. En la localidad Santa Clara, se observa como un colgante dentro de la unidad Toba Dacita-Arenisca.

Por sus características esta unidad se correlaciona con la Formación Tarahumara. Wilson y Rocha (1949) definen la Formación Tarahumara y restringen su uso para las rocas volcánicas y aglomerados. Grijalva-Noriega et al. (2008) proponen que la Formación Tarahumara sea considerada una unidad vulcanosedimentario formal del Cretácico tardío.

CENOZOICO

Eoceno

De acuerdo con el registro geológico existe una convergencia de placas tectónicas, esto se ve reflejado en el carácter calcoalcalino y predominantemente intermedio de la secuencia volcánica, es típica de un margen continental.

Granito-granodiorita

Es una unidad intrusiva de composición granítica con variaciones a granodiorita aflora en la parte este del rancho San Nicolás del Cañón sobre el cauce del arroyo de Agua Caliente.

El granito es de textura equigranular de mediana a gruesa con cuarzo, albita, oligoclasa, microclina y biotita. Se observa alteración débil de cuarzo, epidota, pirita, sericita, magnetita y clorita. En algunos puntos su exfoliación del tipo esferoidal.

En superficie el tamaño del intrusivo es de 300 metros de diámetro, gracias a la carta magnética se puede deducir que es un alto magnético semicircular de 1 km de diámetro. Se asignó una edad de eoceno debido a que los flujos de Dacita contienen fragmentos de diorita, esto se observó al noroeste de la localidad San Nicolás del Cañón.

Andesitas

Se define como andesitas a una unidad conformada por andesitas, tobas andesíticas y basaltos, esta secuencia aflora formando el Cerro del Carrizo, observándose también en el arroyo de Los Carrizos, así como en el arroyo de Las Chinacas, el arroyo El Álamo y al sureste y noreste del Cerro Álamo. En cuanto a su composición las primeras son de color café con tintes a café morados, de textura afanítica a porfídica, deleznales; los basaltos son de color negro a ocre con textura microlítica. La mineralogía observable está constituida por plagioclasas y ferromagnesianos y abundantes vetillas de óxidos, con fracturamiento intenso.

La edad de esta unidad se obtuvo debido a que subyace a la secuencia riolítica del Oligoceno y se dataron andesitas por el método K-Ar con una edad de 36.85-37.25 Ma (CRM-BRGM, 1998), Por sus características litológicas y estratigráficas pueden ser correlacionables con la Serie Volcánica Escobedo que aflora en el área de Parral, Chih.

Oligoceno

Durante la época del oligoceno se desarrolla un volcanismo extrusivo efusivo las rocas varían de riolitas, flujos y tobas riolíticas, piroclástico, cenizas ignimbritas y riolitas, presentando intercalaciones de vidrio volcánico ácido

Ignimbritas-Tobas Riolíticas-Riolitas

McDowell y Clabaugh, 1979; Cochemé y Demant, 1991 define como secuencia volcánica superior a una potente secuencia de tobas, flujos piroclásticos de caída y lavas de composición silícica a intermedia, y en menor proporción flujos de composición máfica particularmente expuestos en los bordes de la provincia volcánica de la Sierra Madre Occidental.

La secuencia volcánica piroclástica está compuesta por rocas formadas por flujos de ignimbrita, derrames riolíticos y flujos piroclásticos, que alternan con tobas líticas y riolíticas, epiclásticos ácidos y aglomerados riolíticos.

Las tobas riolíticas son de color café claro a crema, variando a gris claro casi blanco, de textura afanítica, de estructura pseudoestratificada, con incipiente caolinización. La mineralogía observada corresponde a cuarzo, micas y ferromagnesianos. Las riolitas, son de color café grisáceo a café morado, de textura afanítica, de estructura compacta y masiva. La mineralogía observada está constituida por cuarzo, biotita y ferromagnesianos.

Su distribución superficial es amplia siendo la roca más abundante en la superficie que corresponde al acuífero, de acuerdo con su posición estratigráfica se ubica en el Oligoceno, tomando en cuenta las edades de las andesitas que la infrayacen, para obtener una edad más precisa se tomaron en cuenta diferentes ubicaciones donde se realizaron dataciones a la secuencia de ignimbritas, Wark et al. (1990) reportan edades de 31.8 a 31.4 Ma para la Toba Río Verde, asociada a la formación de la caldera de Tómochic y de 29.0 Ma para la Toba Cascada. En la región de Batopilas secuencia ignimbrítica ha sido fechada por K-Ar entre 30.1 y 28.1 Ma (Lamphere et al., 1980). En este rango de edad caen las fechas obtenidas para la secuencia expuesta en La Barranca del Cobre: 30 Ma en El Divisadero (Albrecht y Goldstein, 2000) y 29.3 Ma en Pito Real (Montigny et al. 1987). Por lo que se le asigna una edad tentativa del Oligoceno.

Dacita, Andesita y Riolita

La unidad se compone de derrames de lava de composición dacítica, andesítica y en menor proporción riolítica, esta unidad se encuentra ampliamente distribuida al norte del acuífero, mientras que en la zona sur predominan los derrames riolíticos.

La Dacita-Andesita tiene como característica su tono morado y gris, que intemperiza a rojizo, de textura afanítica con cambios porfídicos, de estructura masiva a fluidal, mineralógicamente está conformada por plagioclasa, hornblenda, magnetita y menor proporción cuarzo, con cavidades rellenas de calcita y hematita. Los planos de flujo están rellenos de sílice de origen hidrotermal, así como hematita y limonita como producto de la alteración de ferromagnesianos.

Las riolitas fluidales, son rocas de color café crema a gris claro (Fotografía No. 3), de textura afanítica esferulítica, compacta. La mineralogía observable está constituida por cuarzo, feldespatos, micas, óxidos de hierro y vidrio volcánico. Se observan abundantes esferulitas y sílice coloidal. En algunas zonas se observan brechas con

clastos de riolita lo que indica la intrusión de la unidad. En los focos de emisión es notable la presencia de vitrófidos y litofisas.

De forma aislada se presentan domos de composición dacítica de color rosa y morado generalmente, se caracterizan por flujos verticales en sus periferias con estructuras bandeadas en el centro, con tonos blancos por argilización, de textura afanítica con intercrecimiento de plagioclasa, en los bordes se encuentran brechas o intercalados en las lavas.

De acuerdo con la estratigrafía los domos se encuentran afectando a la unidad de ignimbritas y tobas por lo que se le asigna una edad tentativa del Oligoceno.

Riolitas

Esta unidad se compone principalmente de flujos de lava de composición riolítica que se manifiestan como derrames con estructura fluidal producto del vulcanismo fisural, acompañados de pequeños domos.

Las riolitas fluidales, son rocas de color café crema a gris claro, de textura afanítica esferulítica, compacta. La mineralogía observable está constituida por cuarzo, feldespatos, micas, óxidos de hierro y vidrio volcánico. Se observan abundantes esferulitas y sílice coloidal. En algunas zonas se observan brechas con clastos de riolita lo que indica la intrusión de la unidad. En los focos de emisión es notable la presencia de vitrófidos y litofisas.

De acuerdo a la composición mineralógica y las características morfológicas del afloramiento se determina que corresponda emisiones volcánicas fisúrales, con masas muy viscosas que estructuraron domos, esta unidad presenta evidencias de alteración hidrotermal, representado por relleno de fracturas y zonas de brecha producto de fallas normales cercanas.

Por sus características litológicas y estratigráficas se ubica en el Oligoceno, formando parte de las manifestaciones volcánicas de la Serie Volcánica Superior.

Andesita-Basalto

Esta unidad se compone de derrames y coladas de andesita y basalto, estas forman pequeñas mesas y estructuras volcánicas, se interpreta que un sistema de fallas facilitó el emplazamiento del vulcanismo de la región.

El basalto se presenta como derrames y coladas, sus características son: color negro con tonalidades rojizas, de textura afanítica, vesicular, compacta y masiva, contiene cristales de olivino, plagioclasa y ferromagnesianos. Generalmente se erosiona de forma esferoidal. En cuanto a los flujos de lava andesíticos son de color verde, con tonos morados y grises, que intemperiza a rojizo, de textura afanítica con algunos puntos con intercrecimientos de plagioclasas, de estructura masiva, con olivino y piroxeno expuestos en una mesostasis fina, con amígdalas de hasta 2 mm rellenas de calcita y zeolitas de color blanco.

Generalmente presenta un espesor de 5 a 50 metros aproximadamente, la edad se obtuvo mediante el método K-Ar, en basaltos de Guachochi, realizado durante el convenio CRM/BRGM (1999). No se cuenta con dataciones en el área de estudio, sin embargo, por la posición estratigráfica y correlación se le asigna una edad tentativa del Oligoceno.

Mioceno

El cambio del Oligoceno al Mioceno está marcado por el cese del vulcanismo intenso, se caracteriza por la deposición de material clástico y desarrollo de vulcanismo básico.

Areniscas y Conglomerado Polimíctico

El Consejo de Recursos Minerales (1998) define para Santa Bárbara, areniscas que afloran escasamente en uno de los arroyos de la región, que por posición estratigráfica las ubica en la base del conglomerado polimíctico (TmCgp).

Aflora de manera restringida en la localidad de Navarro y Las Sandias. Esta unidad está conformada por areniscas tobáceas con intercalaciones de conglomerados.

Los conglomerados son de color crema a blanco, mal clasificados, subarredondados, también los hay subangulosos, englobados en una matriz arcillo-arenosa, deleznales. El espesor de la secuencia varía de 10 a 15 metros. Sobreyacen discordantemente a las

Riolitas del Oligoceno, su contacto superior es concordante y transicional con el conglomerado Polimíctico.

Conglomerado Polimíctico - Basalto

Esta unidad es una secuencia sedimentaria clástica constituida por conglomerado polimíctico, fragmentos de riolita, toba riolítica, andesita, basalto, soportados en una matriz limo-arenosa, con intercalaciones de basalto e ignimbrita. Los basaltos son de color negro en superficie fresca y rojiza por alteración meteórica, con textura variada desde afanítica, con algunos fenocristales de olivino hasta vesicular y amígdalas rellenas plagioclasa y piroxeno, el espesor máximo es de 4 m de espesor. Los niveles de ignimbrita y toba riolítica son de color café claro a blanco en superficie fresca y café oscuro por intemperismo, de textura eutaxítica en los niveles soldados y deleznables en los niveles sin soldar, están constituidos por cristales de cuarzo y feldespato además de fragmentos de roca y pumicita, dispuestos en forma laminar horizontal, de 15 m de espesor.

Por sus características estratigráficas y litológicas se ubica en el Mioceno. La edad es corroborada por la datación realizada en los basaltos que se intercalan en los conglomerados (carta San Juan) y que indican una edad de 7.1 Ma (CRM/BRGM, 1998). Es correlacionable con el conglomerado polimíctico de las cartas La Providencia, San Juan y Huejotitán.

CUATERNARIO

Los depósitos del Cuaternario están formados por materiales aluviales, coluviales y de relleno, compuestos por diferente granulometría que provienen de las unidades expuestas; están constituidas por gravas, arcillas y limos.

Holoceno

Limos-Arena

Son materiales poco consolidados que se han desprendido de las rocas y se depositaron en laderas o al pie de zonas escarpadas. Al margen de los ríos forman planicies amplias y aumenta el contenido de arcilla.

Aluvión

Esta unidad se define como depósitos producto de la erosión transportados y depositados en ríos y arroyos, formados por cantos, grava y arena. La litología está conformada por fragmentos de rocas ígneas, calizas y areniscas.

Gravas y arenas

Esta unidad está conformada por materiales poco consolidados que se depositan en laderas o al pie de zonas escarpadas, consiste de fragmentos de roca del tamaño de bloques de forma angulosa, los cuales pueden o no estar soportados por una matriz de grava arena o arcilla.

3.2 Geología estructural

Las estructuras que se pueden observar en el área del acuífero pertenecen a una serie de eventos geológicos que ocurrieron desde el Cretácico Superior al Mioceno Temprano, en este caso se adecuan el modelo de deformación para el centro de México, documentado por Tristán-Gonzales, et al., (2009).

El primer evento que corresponde al área de estudio fue un levantamiento de bloques de la corteza a partir del Cretácico superior y continuo hasta el Cenozoico Eoceno, debido a esto se inicia la formación de cuencas volcánicas continentales sincrónicamente es afectado por plegamiento y traslape y/o sobrecorrimiento de estratos, estos eventos se presentan en la formación Tarahumara.

Durante el Paleoceno y culminando en el Eoceno se desarrolló plutonismo y volcanismo por medio de fallas laterales y normales que a su vez dieron origen a escalonamiento de la corteza, las estructuras formadas se relacionaron con movimientos dextrales N 45°- 60° W y fallas de salto asociadas

En el Oligoceno inferior continua el vulcanismo a través de estructuras de graben y semi-graben estas fueron formadas por el desarrollo de fallas normales con inclinación NE y SW, y rumbos preferenciales N45° W.

Finalmente se desarrolló un periodo distensivo, con fallas N10°W y N-S, este abarcó del Oligoceno Superior al Mioceno Inferior, como resultado se originaron cuencas y sierras acompañadas de una actividad volcánica intensa que generó flujos de lava con

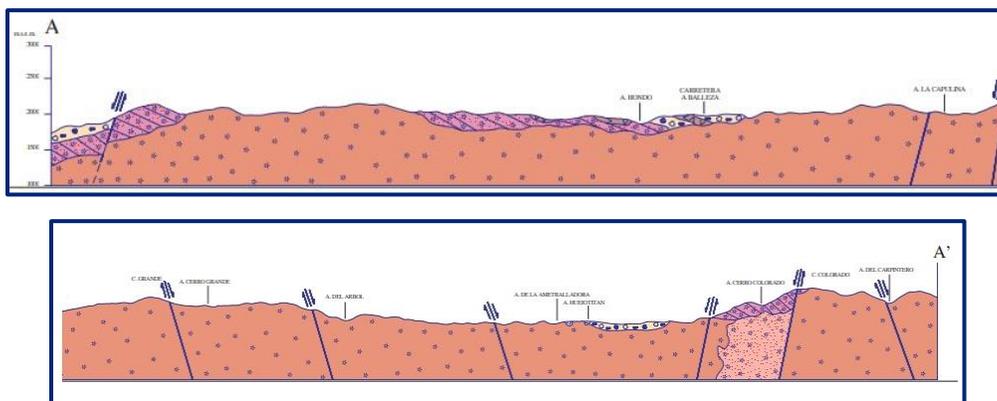
inyecciones dómicas y secuencias de rocas piroclásticas rellenando las depresiones de las cuencas.

3.3 Geología del subsuelo

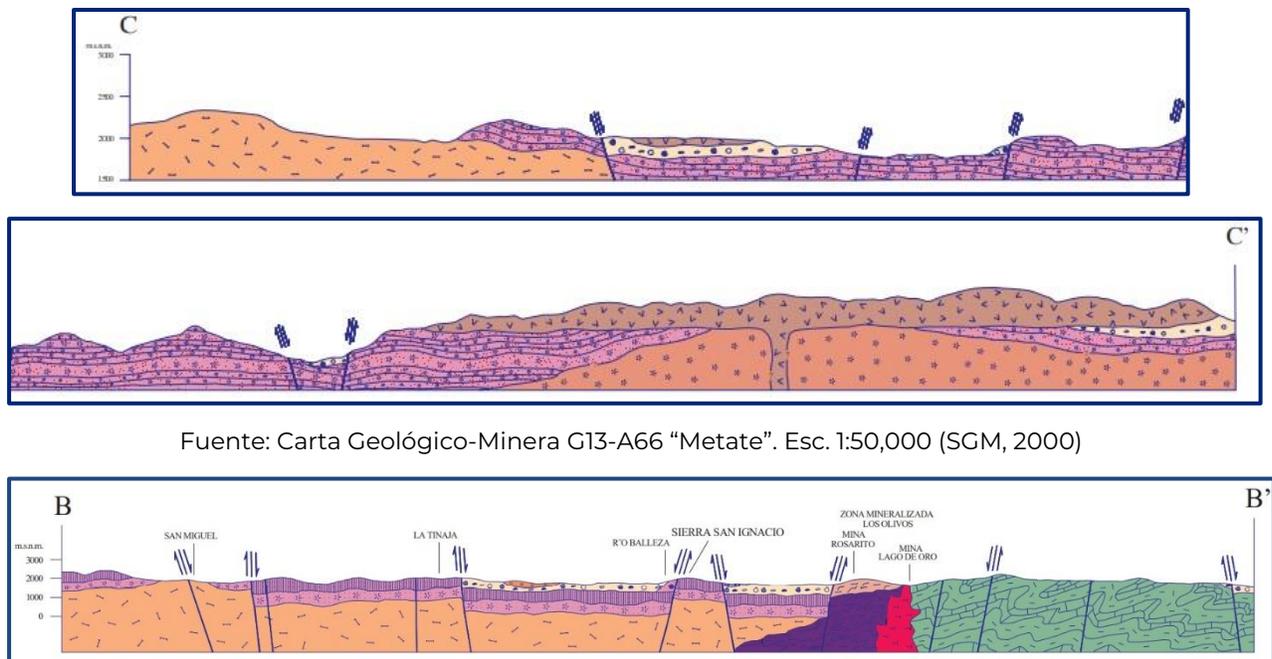
De acuerdo con la información geológica recaba en el acuífero y por correlación con acuíferos vecinos, es posible definir que el acuífero se encuentra alojado, en su porción superior, en los sedimentos fluviales que constituyen el lecho y la llanura de inundación del río Balleza y arroyos tributarios. Esta es la unidad que se explota actualmente para satisfacer las necesidades de agua de la región. La porción inferior de menor espesor se aloja en una secuencia de rocas que de acuerdo con la columna estratigráfica, la parte superior está compuesta por Caliza, Arenisca y Conglomerado polimíctico, en cuanto a su porción inferior está compuesta principalmente por rocas volcánicas como son las tobas riolíticas y andesíticas, andesitas, riolitas e ignimbritas y en menor proporción basaltos, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento (figura 3).

Las fronteras al flujo subterráneo y el basamento geohidrológico del acuífero están representados por las mismas rocas volcánicas, al desaparecer el fracturamiento, y a mayor profundidad las lutitas que forman parte de la secuencia que constituye la Formación Mezcalera.

Los depósitos granulares y conglomeráticos tienen un espesor amplio y fueron, en gran parte, el relleno de depresiones o cuencas formadas en fosas tectónicas que se produjeron durante la orogenia Laramide.



Fuente: Carta Geológico-Minera G13-A56 "San Juan". Esc. 1:50,000 (SGM, 2000)



Fuente: Carta Geológico-Minera G13-A66 "Metate". Esc. 1:50,000 (SGM, 2000)

Fuente: Carta Geológico-Minera G13-1 "Las Coloradas". Esc. 1:250,000 (SGM, 2000)

Figura 3. Secciones geológicas esquemáticas

4 HIDROGEOLOGÍA

4.1 Tipo de acuífero

De acuerdo con la información geológica, es posible definir la presencia de un acuífero de **tipo libre**, heterogéneo y anisótropo, constituido en su porción superior por sedimentos aluviales y fluviales, de granulometría variada, además de tobas, areniscas y conglomerados. La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas volcánicas y sedimentarias que pueden presentar permeabilidad secundaria por fracturamiento.

El basamento del acuífero está compuesto por una serie de rocas ígneas en las que no existe porosidad secundaria por fracturamiento. De acuerdo con la columna estratigráfica se puede deducir que debajo de la secuencia ígnea podemos encontrar una alternancia de estratos de Caliza-Lutita de la Formación Mezcalera, al no haber más afloramientos dentro de la zona del acuífero no se puede asegurar que sea parte del basamento.

5 BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

Debido a la poca información piezométrica actual e histórica en la superficie que cubre el acuífero y a que se encuentra dispersa en espacio y tiempo; hace imposible extrapolarla para elaborar configuraciones del nivel estático que permitan el

planteamiento de un balance de aguas subterráneas tradicional. Por lo tanto, se optó por plantear un balance hidrometeorológico en el área de balance de **7,335.4 km²** del acuífero, para estimar de manera conservadora el volumen de agua susceptible de infiltrarse para recargar al acuífero.

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 con 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 del acuífero:

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

5.1 Entradas

Las entradas al acuífero Bocoyna están integradas básicamente por la recarga natural que se produce por la infiltración de la lluvia (R_v).

5.1.1 Recarga vertical (R_v)

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

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

Donde:

V_{LL} = Volumen de lluvia;

V_{ETR} = Volumen evapotranspirado;

V_{ESC} = Volumen escurrido;

V_{INF} = Volumen infiltrado;

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

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

El volumen de lluvia que se precipita en la superficie cubierta por el acuífero se obtiene al multiplicar su área (7,335.4 km²) por la lámina de precipitación media anual (622.8 mm):

$$V_{LL} = 7,335.4 \text{ km}^2 (0.6228 \text{ m}) = 4,568.5 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

Para la estimación de la evapotranspiración real se utilizó la ecuación empírica de Turc, considerando el valor medio anual de precipitación de 622.8 mm y temperatura de 13.8 °C.

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

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

Donde:

ETR= Evapotranspiración real, en mm;

P = Precipitación media anual, en mm;

L = 300 + 25T + 0.05T³;

T = Temperatura media anual, en °C;

La limitación teórica para la utilización de la fórmula de Turc, es que la precipitación no debe ser menor a la relación 0.31L (280.6). En caso contrario se obtiene una ETR > P y para estos casos se debe considerar a ETR = P. De acuerdo con lo anterior, se obtiene un valor de lámina de evapotranspiración de 501 mm anuales.

Por lo tanto, el volumen de ETR es:

$$V_{ETR} = 7,335.4 \text{ km}^2 (0.501 \text{ m}) = 3,675.0 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

Para determinar el volumen de escurrimiento debido a la lluvia se utilizó el método establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, publicada en el Diario Oficial de la Federación, de fecha 27 de marzo del 2015, en la que se señala que para los casos en los que no se cuente con suficiente información para determinar el volumen anual de escurrimiento natural, se puede aplicar el método indirecto denominado precipitación-escurrimiento. El volumen anual medio de escurrimiento natural es igual a la precipitación media anual por el área y por un coeficiente de escurrimiento.

Para determinar el valor de escurrimiento, la normatividad establece la siguiente relación:

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

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

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

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

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

Si K resulta menor o igual que 0.15

$$C_e = K (P-250) / 2000$$

Si K es mayor que 0.15

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

Donde:

P = Precipitación anual;

Ce=Coeficiente de escurrimiento anual;

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

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

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

De acuerdo con la cartografía de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), escala 1:1,000,000 en la zona que comprende el acuífero Bocoyna, predominan los siguientes tipos de suelo: Cambisol, Feozem, Litosol, Luvisol, Planosol, Regosol, Vertisol que se clasifican en tres tipos de suelo: A, B y C (figura 4).

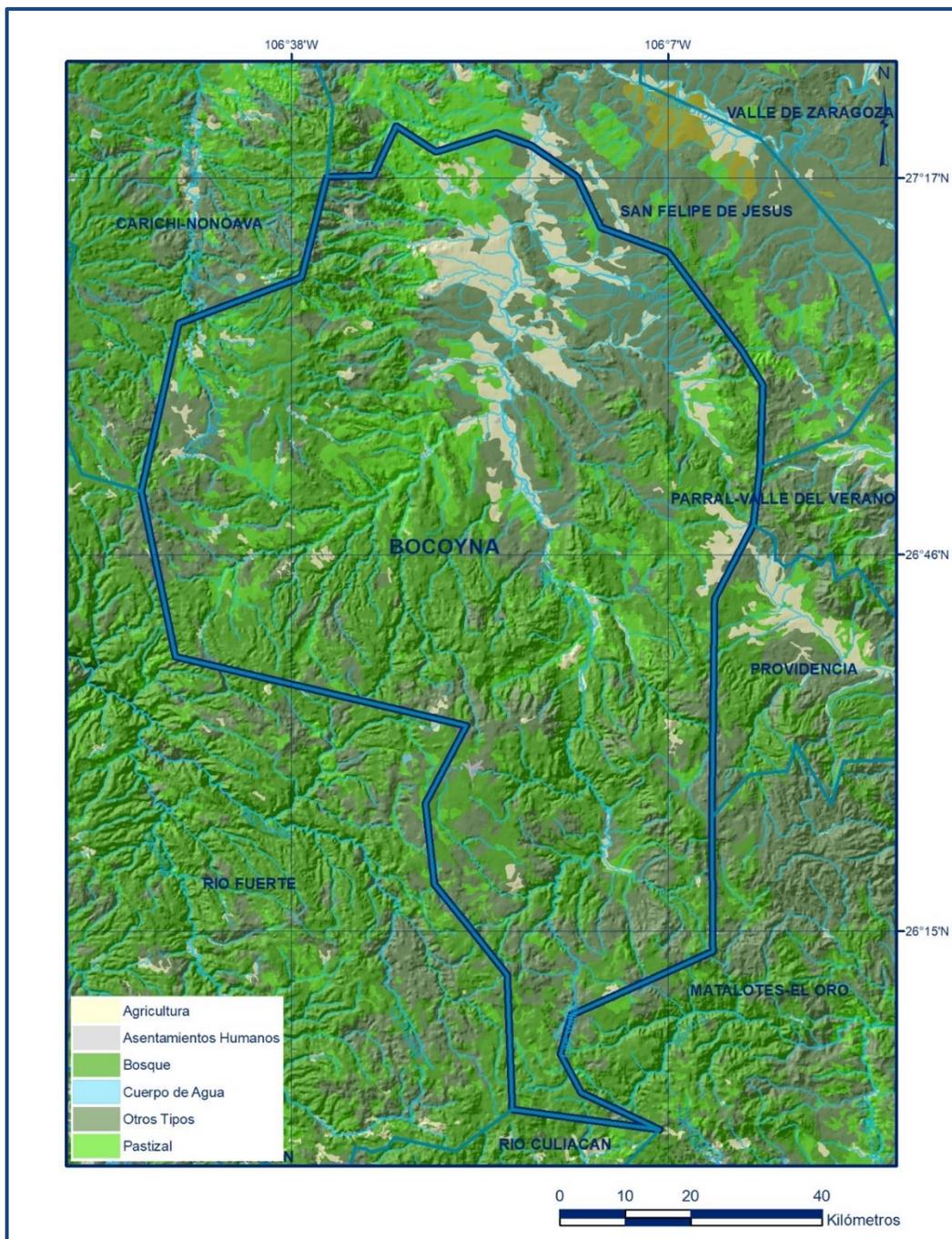


Figura 5. Uso de suelo

De esta manera, el valor de K se obtuvo como promedio ponderado y es igual a 0.286, valor que se aplicó en la siguiente ecuación para obtener el coeficiente de escurrimiento (Ce):

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

$$C_e = 0.144$$

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

$$V_{ESC} = 0.144 (4,568.5 \text{ hm}^3) = 657.9 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

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

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

$$V_{INF} = 4,568.5 - 3,675.0 - 657.9$$

$$V_{INF} = 236.0 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

Al dividir el volumen promedio anual infiltrado, entre el volumen anual promedio precipitado, que es 4,568.5 hm³/año, se obtiene el coeficiente de infiltración de 0.052.

De acuerdo con lo anterior, el volumen susceptible de infiltrarse es de 235.6 hm³/año en la superficie del acuífero.

Por lo que la **Rv = 236.0 hm³ anuales**

5.2 Salidas

Las salidas de agua subterránea estimadas en este balance son las siguientes:

La descarga del acuífero ocurre principalmente por bombeo (B), por manantiales (Dm), flujo base (Dfb) y posiblemente a través de salidas subterráneas y evapotranspiración, pero no se cuenta información piezométrica para su estimación.

5.2.1 Bombeo (B)

De acuerdo con los datos reportados por el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), se tiene registrado un volumen de extracción de **7.9 hm³ anuales**, a la fecha de corte del 30 de diciembre del 2022.

5.2.2 Descarga a través de manantiales (Dm)

De acuerdo con información del 2017, se identificó la existencia de 442 manantiales, que en conjunto descargan **2.2 hm³ anuales**.

5.2.3 Caudal base o flujo base (Dfb)

De acuerdo con la información existe un flujo base de **233.0 hm³ anuales** que corresponde al caudal base de los afluentes del río Conchos en su recorrido por el acuífero.

6 DISPONIBILIDAD

Para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas, se aplica el procedimiento de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, Conservación del recurso agua-que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales; en su fracción relativa a las aguas subterráneas, menciona que la disponibilidad se determina por medio de la expresión siguiente:

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

Donde:

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

R = Recarga total media anual

DNC = Descarga natural comprometida

VEAS= Volumen de extracción de aguas subterráneas

6.1 Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero. Para este caso, su valor es de **236.0 hm³ anuales**, todos ellos son de recarga natural.

6.2 Descarga natural comprometida (DNC)

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

Para este caso, su valor es de **177.5 hm³ anuales**, que corresponde a la descarga de manantiales.

6.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)

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

Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de **7,996,802 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre del 2022**.

6.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)

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

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

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 236.0 - 177.5 - 7.996802 \\ \text{DMA} &= 50.503198 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible de **50,503,198 m³ anuales** para otorgar nuevas concesiones.

7 BIBLIOGRAFÍA

Servicio Geológico Mexicano, 1999. Cartografía Geológica-Minera y Geoquímica, Carta Guacochi, Clave G13-4, Estado de Chihuahua, Escala 1:250.

Servicio Geológico Mexicano, 2015. San Javier G13-A45 Escala 1:50,000, Estado de Chihuahua.

Servicio Geológico Mexicano, 1999. Informe Final De La Cartografía Geológica- Minera Y Geoquímica De La Carta Metate G13-A66 Escala 1:50,000 Municipios De Balleza, Y Villa Ocampo, Chihuahua, México.

Sistema Nacional de Información del Agua (CONAGUA), 2020, Regiones Hidrológicas, Cuencas, Ríos Principales; 2018-2019, Distritos de Riego; 2010, Regiones Hidrológico-Administrativas, Distritos de Riego.

Simulador de Flujo de Agua de Cuencas Hidrográficas (INEGI), 2010 Subcuencas.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2018, Municipios; subprovincias Fisiográficas; 2017, Uso de Suelos; 2008, Unidades climáticas; 2002, Fallas; 2001; Sistema de Topoformas; 2001, Sistema de Topoformas, Provincias Fisiográficas.