



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA
GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO TEPEHUANES-SANTIAGO (1006),
ESTADO DE DURANGO**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1. GENERALIDADES	2
Antecedentes.....	2
1.1 Localización.....	2
1.2 Situación administrativa del acuífero	5
2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD.....	5
3. FISIOGRAFÍA.....	6
3.1 Provincia fisiográfica.....	6
3.2 Clima.....	6
3.3 Hidrografía	8
3.4 Geomorfología.....	8
4. GEOLOGÍA.....	8
4.1 Estratigrafía	10
4.2 Geología estructural.....	12
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
5.4.1 Elevación del nivel estático.....	16
5.4.2 Evolución del nivel estático	17
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	18
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA.....	19
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	19
7.1 Entradas.....	20
7.1.1 Recarga vertical (Rv).....	20
7.1.2 Entradas subterráneas por flujo horizontal (Eh).....	21
7.2 Salidas.....	22
7.2.1 Salidas subterráneas por flujo horizontal (Sh)	22
7.2.2 Evapotranspiración (ETR)	23
7.2.3 Bombeo (B).....	24
7.2.4 Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$	24
8. DISPONIBILIDAD.....	25
8.1 Recarga total media anual (R).....	26
8.2 Descarga natural comprometida (DNC).....	26
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	26
8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)	27
9. BIBLIOGRAFÍA.....	28

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 Tepehuanes-Santiago, definido con la clave 1006 por la Comisión Nacional del Agua. Se localiza en la porción centro-oeste del estado de Durango, entre las coordenadas 24° 19' y 25° 36' de latitud norte y 105° 00' y 116° 10' de longitud oeste, abarcando una superficie de 5,087 km². Limita al norte con el acuífero Matalotes-El Oro y Galeana-Quemado, al este con Valle de Santiaguillo y Valle de Canatlán, al sur con Valle de Guadiana y Río Presidio, al oeste con Río Piaxtla, Río San Lorenzo y Río Culiacán, estos últimos cuatro acuíferos pertenecen al estado de Sinaloa, que tienen su zona de recarga en las partes topográficamente altas del estado de Durango (Figura 1).

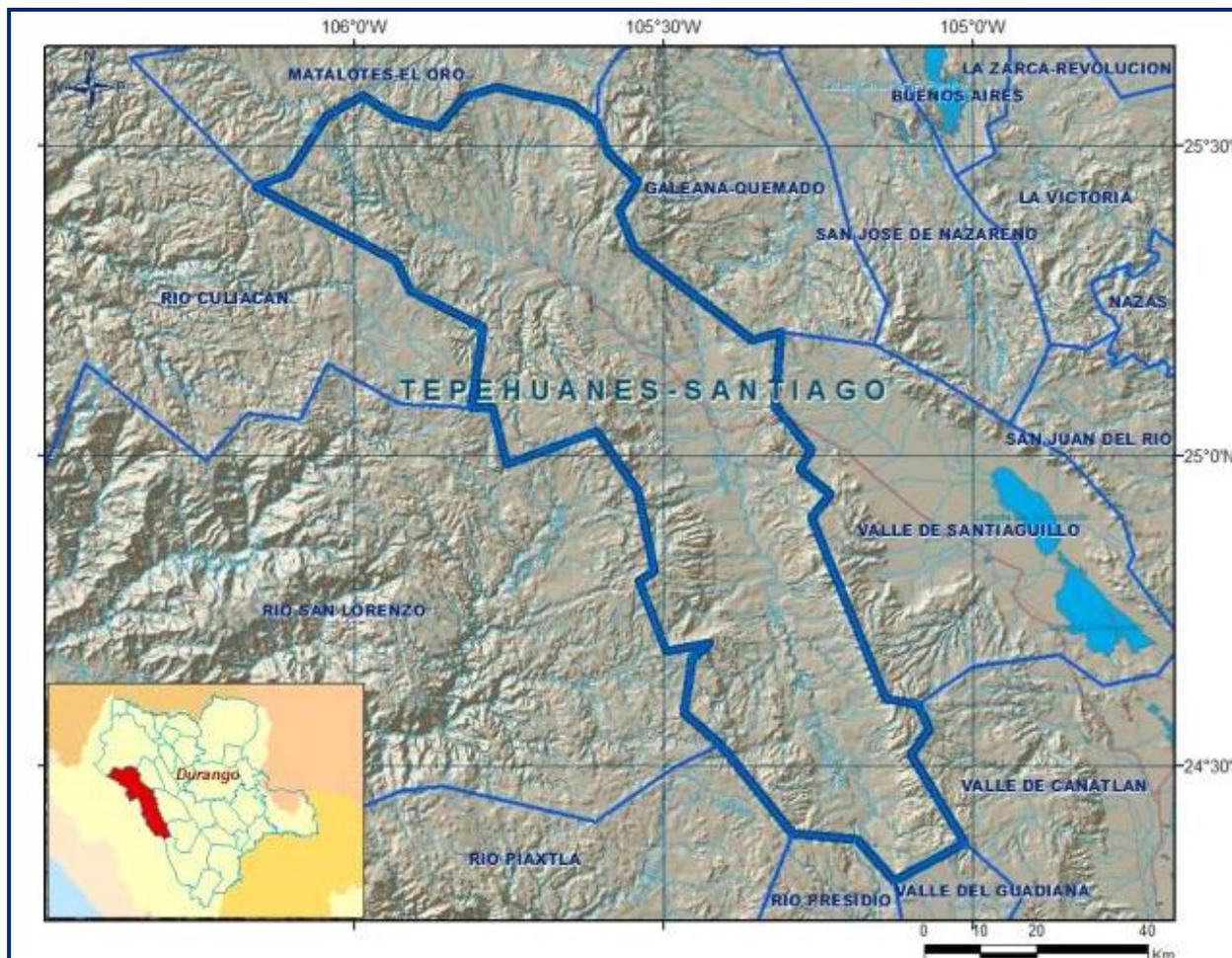


Figura 1. Localización del acuífero

Geopolíticamente, el acuífero se localiza parcialmente dentro de los municipios Tepehuanes, Santiago Papasquiari, pequeñas porciones del extremo sur pertenecen a los municipios Nuevo Ideal, San Dimas, Canatlán y Durango.

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

Tabla 1. Coordenadas de la Poligonal simplificada del acuífero

ACUIFERO 1006 TEPEHUANES-SANTIAGO						
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE		
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS
1	105	18	36.0	25	12	0.0
2	105	19	12.0	25	4	48.0
3	105	15	36.0	25	0	36.0
4	105	16	48.0	24	58	48.0
5	105	13	48.0	24	56	24.0
6	105	15	36.0	24	54	0.0
7	105	8	24.1	24	36	36.0
8	105	5	24.0	24	36	0.0
9	105	4	12.0	24	33	36.0
10	105	6	0.0	24	31	12.0
11	105	0	48.8	24	22	38.1
12	105	7	38.7	24	18	53.3
13	105	11	12.5	24	22	55.7
14	105	17	31.5	24	23	30.0
15	105	24	25.8	24	32	7.4
16	105	28	1.4	24	35	8.6
17	105	27	13.2	24	40	25.1
18	105	25	27.7	24	41	54.6
19	105	29	44.6	24	41	6.4
20	105	32	18.3	24	47	50.1
21	105	30	48.8	24	48	56.6
22	105	32	27.4	24	56	35.3
23	105	36	28.3	25	2	26.2
24	105	45	11.2	24	59	9.0
25	105	46	29.2	25	4	39.2
26	105	48	35.3	25	4	43.8
27	105	47	30.2	25	12	26.7
28	105	54	34.5	25	15	59.7
29	105	55	58.1	25	18	51.6
30	106	9	30.4	25	26	8.5
31	106	6	19.3	25	27	11.8
32	106	2	38.5	25	32	48.3
33	105	59	6.1	25	34	52.4
34	105	55	56.8	25	32	46.2
35	105	51	50.8	25	31	47.3
36	105	49	20.0	25	34	43.3
37	105	46	4.4	25	35	44.6
38	105	43	18.1	25	35	0.8
39	105	38	58.3	25	34	8.3
40	105	36	27.9	25	32	13.4
41	105	35	21.1	25	29	16.7
42	105	32	31.0	25	26	33.6
43	105	34	14.8	25	23	44.5
44	105	32	47.0	25	19	59.5
45	105	27	18.3	25	15	45.8
46	105	21	19.3	25	11	14.6
1	105	18	36.0	25	12	0.0

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero pertenece al Organismo de Cuenca VII “Cuencas Centrales del Norte” y es jurisdicción territorial de la Dirección Local Durango. Su territorio completo no se encuentra sujeto a ninguna veda para la extracción de agua subterránea.

El principal usuario del agua subterránea es el público-urbano. Dentro de los límites del acuífero no se localiza Distrito de Riego alguno, a la fecha no se ha constituido el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua, vigente para el año 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 4.

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la zona que comprende el acuífero no se han realizado estudios hidrogeológicos de evaluación, sólo algunos con fines de prospección minera. En algunos acuíferos vecinos se han realizado estudios hidrogeológicos para determinar su recarga media anual. El único estudio que abarcó la superficie completa del acuífero es el que se describe a continuación:

ESTUDIO PARA DETERMINAR LA DISPONIBILIDAD DE LOS ACUÍFEROS CABRERA-OCAMPO, MATALOTES-EL ORO, SAN JOSÉ DE NAZARENO, GALEANA-EL QUEMADO, LA VICTORIA, BUENOS AIRES, TORREÓN DE CAÑAS, SAN FERMÍN, SAN JUAN DEL RÍO, CABRERA, LA ZARCA-REVOLUCIÓN Y REVOLUCIÓN, EN EL ESTADO DE DURANGO. Realizado en Convenio por la Universidad de Sonora (UNISON) para la Comisión Nacional del Agua, 2010. El objetivo general de este estudio fue el conocimiento de las condiciones geohidrológicas de los acuíferos mediante el diagnóstico de la evolución de los niveles del agua, obtener información necesaria para calcular su recarga y determinar la disponibilidad media anual de agua subterránea; así como conocer el número y distribución de las captaciones de agua subterránea existentes en la zona. Mediante la realización de actividades de campo que incluyeron censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría de las extracciones, realización de pruebas de bombeo sondeos geofísicos y reconocimientos geológicos, fue posible plantear el balance de aguas subterráneas.

ESTUDIO PARA DETERMINAR LA DISPONIBILIDAD DEL ACUÍFERO TEPEHUANES-SANTIAGO, EN EL ESTADO DE DURANGO. Realizado en Convenio por la Universidad de Sonora (UNISON) para la Comisión Nacional del Agua, 2010.

El objetivo del estudio fue el conocer las condiciones geohidrológicas del acuífero mediante el diagnóstico de la evolución de los niveles del agua, obtener información necesaria para calcular la recarga y determinar la disponibilidad media anual de agua subterránea. Los resultados y conclusiones de este estudio fueron la base para la elaboración del presente documento, por lo que sus conclusiones y resultados se analizan en los apartados correspondientes.

3. FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia fisiográfica

De acuerdo a la clasificación fisiográfica de Erwin Raisz (1959), modificada por Ordoñez (1964), el área se encuentra ubicada dentro de la Provincia Fisiográfica Sierra Madre Occidental, Subprovincia Sierras y Llanuras de Durango y Gran Meseta y Cañadas Duranguenses.

La Sierra Madre Occidental en Durango, por su ubicación dentro del contexto continental, se manifiesta majestuosamente a lo ancho de más de 140 km, con rumbo sudoeste, al oeste de la ciudad de Durango donde alcanza su altura media de 2,650 msnm, sus elevaciones máximas son del orden de los 3,000 msnm y pueden ser observadas del el Océano Pacífico.

El relieve de esta provincia se caracteriza por presentar cañones profundos y topografía abrupta, donde es factible encontrar pequeños y estrechos valles en los cañones; la topografía tiende a ser más suave hacia el oriente y al sur, en donde se encuentran amplios valles y extensas llanuras. Las máximas elevaciones en la región están representadas por el cerro Blanco (2,300 msnm), y una porción de la Sierra Gamón (2,580 msnm). La zona de menor elevación se representa en el río Peñón Blanco, con una altitud de 1,450 msnm.

El acuífero en su porción este se localiza en la subprovincia Sierras y Llanuras de Durango, conformada por cordones montañosos irregulares, separados por amplios valles, de altitudes variables entre 1,700 y 2,300 msnm, y la porción oeste pertenece a la Gran Meseta y Cañadas Duranguenses.

3.2 Clima

De acuerdo con la clasificación del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), el clima que predomina en la zona del acuífero es del tipo estepario, variedades BSkw(w), que es el menos seco de los secos.

El subtipo es semiseco (1), el cual presenta un 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 las temperaturas medias anual del mes más frío y del más cálido, corresponde con templado con verano cálido. Presenta una temperatura media anual entre 12 y 18° C, la media del mes más frío entre -3 y 18° C y la del más cálido > 18° C. El régimen de lluvia (w), que define el comportamiento de la lluvia durante el año indicando la temporada en la que se concentra la mayor cantidad, es de 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 indica que su porcentaje de lluvia invernal (cantidad de lluvia que cae en este periodo con respecto a la total anual) es < 5.

En una proporción muy similar al anterior, se presenta el tipo de clima C(w0) donde la temperatura media anual se encuentra entre 12 y 18° C, y su tipo es subhúmedo (w), pues su régimen de lluvias es de verano, presentándose escasa precipitación todo el año o de invierno. El subtipo (0), considerando el grado de humedad que se obtiene del cociente de la precipitación entre la temperatura, corresponde con el menos húmedo, pues su cociente es menor de 43.2. Su porcentaje de lluvia invernal se encuentra entre 5 y 10, mientras que el mes más seco presenta una precipitación > 40 mm.

Los climas C(w1) templados subhúmedos se presentan en las partes altas del río Tepehuanes, y C(E)(w2) semifrío subhúmedo principalmente en las zonas altas de toda la región del acuífero. En menor proporción se presentan los tipos de clima CE(w1) semifrío subhúmedo, C(w2) templado subhúmedo y BSlkw semiseco templado en pequeñas áreas de la región.

Para la determinación de las variables climatológicas se tiene información de ocho estaciones que tienen influencia en el área del acuífero: Guanaceví, Ciénega de Escobar, San Miguel de Lobos, J. Salomé Acosta, Santiago Papasquiaro, Tejamen, El Pino y Col. Ignacio Zaragoza, cuyo registro comprende los periodos 1922-2007, 1965-2007, 1961-2007, 1969-2007, 1938-2007, 1969-2003, 1963-2003 y 1970-2007, respectivamente.

De acuerdo con estos datos y utilizando el método de los polígonos de Thiessen, se determinaron valores promedio anuales de precipitación y temperatura de **588.8 mm y 15.8° C**, respectivamente. De igual manera, con respecto a la evaporación potencial, se obtuvo un valor de **1,661 mm** anuales.

3.3 Hidrografía

El área pertenece a la Región Hidrológica No.36 denominada Nazas-Aguanaval, cuenca de los ríos Tepehuanes y Santiago, los cuales escurren hacia la Presa Lázaro Cárdenas, en el río Nazas. Regionalmente, los ríos más importantes son el Nazas, el cual nace en el estado de Durango, y Aguanaval, que nace en el estado de Zacatecas.

3.4 Geomorfología

La morfología actual del área es abrupta, producto de la disección de corrientes jóvenes sobre una gran meseta riolítica. La topografía es la característica de la erosión en la que los procesos mecánicos predominan sobre los químicos, siendo particularmente notables las bufas y las mesas que se encuentran en la zona. La presencia de material húmico y suelos sobre el que se levantan los bosques presentan aspectos redondeados que denotan una etapa de erosión madura.

Los procesos endógenos más importantes son ígneos volcánicos y fuertes fallamientos de tipo normal. El proceso exógeno más sobresaliente es la erosión fluvial. En cuanto a hidrografía, el patrón de drenaje es subparalelo a dendrítico.

4. GEOLOGÍA

De acuerdo a McDowell y Clabaugh (1979), La Sierra Madre Occidental está compuesta por dos importantes secuencias ígneas, cuyo contacto marca un período de calma volcánica. La secuencia antigua está formada mayormente por rocas volcánicas de composición intermedia y cuerpos ígneos cuyas edades varían entre 100 y 45 Ma. La secuencia más reciente está conformada por ignimbrita riolítica, cuya edad varía entre 27 y 34 Ma (Figura 2).

La Serie Volcánica Inferior está relacionada a un margen continental convergente donde la Placa Americana se mueve hacia el norte sobre la Placa Farallón. Este patrón de vulcanismo representa la actividad magmática de una Cordillera Pacífica tipo margen continental-arco insular (López Ramos, 1979). Demant y Robin (1979) explican el origen de la ignimbrita como el típico vulcanismo de una zona de rift sobre una zona de arco andesítico, causado por la reacción del continente a los movimientos de subducción e indica la coexistencia de vulcanismo compresivo y distensivo. El vulcanismo finaliza con los derrames de basalto del Plioceno.

El fallamiento de Basin and Range que comienza a fines del Mioceno (Córdoba y Silva Mora, 1989) genera las estructuras de pilares y fosas tectónicas como resultado de deformaciones distensivas, relacionadas al sistema Golfo de California-San Andrés.

4.1 Estratigrafía

La estratigrafía del acuífero está representada por las secuencias volcánicas Paleógeno-Neógenas pertenecientes al Supergrupo Volcánico Superior y al Complejo Volcánico Inferior. Además, se tienen afloramientos de rocas conglomeráticas y basálticas del Mioceno, y del Plioceno al Holoceno. Sus características litológicas se describen a continuación.

Cenozoico

Paleoceno-Eoceno Superior

Complejo Volcánico inferior (TpaeA-BvA)

Esta unidad se encuentra aflorando de manera diseminada a lo largo de toda el área del acuífero, principalmente al norte del cerro Las Mangas, en los alrededores de las minas El Refugio y Tovar, al poniente del poblado de Santiago Papasquiario, y en las inmediaciones de los poblados de La Lumbre y Tejamemen.

La litología predominante de este complejo en el área consiste de flujos de andesitas y brechas andesíticas de color gris morado. Las andesitas presentan una textura afanítica y generalmente con una alteración principalmente propilítica.

Los derrames de andesita y brechas andesíticas están compuestas por fragmentos de andesita con alteración clorítica a veces pseudoestratificada que presenta variación litológica a dacitas con espesor variable de 100 a 350 m. Principalmente la unidad está expuesta en forma de ventanas erosionales.

Oligoceno-Mioceno

Supergrupo Volcánico Superior (ToTR-Ig, TomIg-TR, TomRP)

Esta unidad presenta casi el 80% de los afloramientos litológicos dentro del acuífero. Están caracterizados por rocas volcánicas ácidas, tales como tobas riolíticas, riolitas, brechas riolíticas e Ignimbritas.

Regionalmente, esta unidad incluye varias unidades caracterizadas por litologías volcánicas félsicas afines:

a) tobas líticas con pequeños fragmentos de rocas hipabisales y volcánicas con pseudoestratificación de delgada a masiva, aflora en los flancos de la Sierra de Coneto, con un espesor aproximado de 186 m (Formación Ocampo);

b) ignimbritas fluidales y vitrófidos pelíticos asociados a tobas y brechas riolíticas piroclásticas con contenido de calcedonia; su espesor varía de 50 a 100 m (Formación Alumbre);

c) ignimbritas masivas con escasos fragmentos líticos, siendo más abundante en la cima, en su parte media contiene areniscas tobáceas con un espesor variable de 20 a 90 m (Formación El Salto);

d) ignimbritas rosadas, moradas y rojizas con estructura fluidal y juntas columnares, con un espesor aproximado de 75 m (Formación Yerbabuena); y

e) tobas brechoides y aglomeráticas de composición ácida con fragmentos de bloques a bombas envueltos en una matriz de ceniza litificada (Formación Trincheras).

En la porción norte del acuífero se tienen dos pequeños afloramientos semi-circulares de una riolita porfídica (TomRP), también incluida como parte del Supergrupo Volcánico Superior. Uno de estos afloramientos se tiene al norte del poblado de Tepehuanes, mientras que el segundo está al poniente del poblado de Santiago Papasquiario en el cerro Alto Tarabilla.

Mioceno

Formación Metates (TmB)

Fue definida como unidad informal por Córdoba (1963) cerca del poblado de Metates en el km 20 de la carretera Durango-Mazatlán, para nombrar una serie de afloramientos de basaltos alcalinos caracterizados por concentraciones locales de megacristales y xenolitos. Esta unidad aflora al sur del acuífero, con una dirección de flujo predominante hacia el NW, en el Cerro Tenchontla, en Mesas de Urbina, Cerro Alto, Mesa Las Pintas, en el Cerro Potrerillos, Mesa Aguirre. La litología consiste de basaltos color gris oscuro a pardo rojizo, textura vesicular a amigdaloidal con relleno de calcita y olivino. Presenta espesores de 5 a 50 m como máximo. Sobreyacen a esta unidad los sedimentos fluviales cuaternarios.

Formación Santa Inés (TmCgp)

De manera general esta unidad consiste de grava y arena hasta conglomerados con clastos de roca volcánica ácida, subredondeados a subangulosos del tamaño de guijas finas a cantos rodados medianos, los cuales varían de no consolidados a bien cementados.

Los fragmentos líticos de rocas volcánicas ácidas son tobas riolíticas, riolitas, brechas riolíticas e ignimbritas con un grado de esfericidad de subredondeado a subanguloso, mal clasificados y con diámetros variables de 1 a 40 cm empacados en una matriz arenosa de grano grueso y a veces con cementante de arcilla y caliche. En los afloramientos se observó un espesor de 20 a 200 m.

Dentro del área se encuentra cubriendo discordantemente a las rocas riolíticas del Supergrupo Volcánico Superior. Regionalmente esta unidad está cubierta por rocas volcánicas plio-pleistocénicas y los sedimentos del Holoceno.

Neógeno, Plioceno-Pleistoceno

Basalto (TplQptB)

Esta roca basáltica presenta un espesor aproximado de 30 m, y posiblemente está asociada al último fallamiento normal ocurrido después de 20 Ma (Aguirre y McDowell, 1993), el cual sirvió como conducto para la última emisión de lava basáltica. Regionalmente son basaltos alcalinos color oscuro y de texturas fluidal y porosa que cubren mesetas como en La Noria, localizada al sur de San Luis del Cordero, Rodeo, Santiago Papasquiario, Ciénega de Escobar y Guanaceví.

Dentro del área del acuífero, esta unidad aflora sólo en la porción norte del mismo, en el cerro Malpaís. Esta unidad se encuentra Sobreyaciendo en discordancia a la Formación Santa Inés y a rocas volcánicas del Paleógeno-Neógeno.

4.2 Geología estructural

Las rocas y secuencias presentes dentro del área cuentan con una complejidad litológico-estructural muy importante, de tal forma que están genéticamente asociadas a diversos procesos geológicos que se han sucedido en esta porción de la República Mexicana. Es importante establecer el estado de Durango se presenta en una ubicación morfotectónica que lo coloca justo en la transición entre el dominio geográfico de la Sierra Madre Occidental (SMO) y el dominio geográfico de la Plataforma Coahuila (López-Ramos, 1981; Eguiluz de Antuñano y Campa-Uranga, 1982). En este contexto, las litologías presentan una mezcla de evidencia geológico-estructural que obedece principalmente a la sobreposición de diversos ambientes tectónicos.

Los eventos tectónicos de los que se tiene registro para este rango de edades en la región corresponden principalmente a aquellos relacionados con:

- a) el desarrollo de una cuenca mesozoica asociada a la apertura del Golfo de México (Rueda-Gaxiola, 2004),
- b) un proceso de subducción a lo largo de la margen pacífica de Norteamérica desde el Mesozoico y hasta el Cenozoico Tardío (Ferrari et al., 2005),
- c) la presencia de un evento compresivo en el marco de un ambiente de retro-arco a finales del Cretácico e inicios del Cenozoico (Eguiluz de Antuñano et al., 2000), y
- d) la distensión cortical asociada a la provincia extensional del *Basin and Range* (Henry y Aranda-Gómez, 1992).

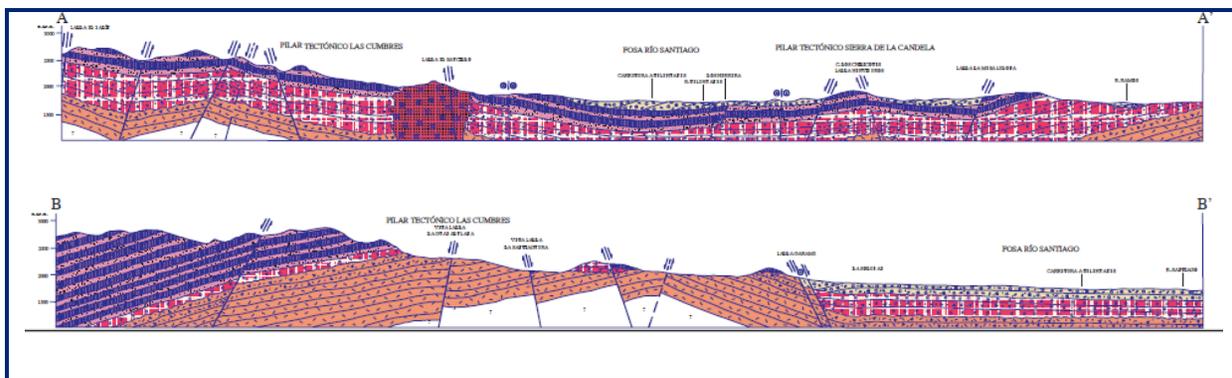
El área del acuífero está caracterizada por un fuerte fallamiento normal de orientación NW-SE, el cual produjo una semifosa de la misma orientación. Esta semifosa tiene un desplazamiento lateral hacia el surponiente con respecto a la semifosa formada al norte de Ciénega de Escobar. Se observa un sistema secundario de fallas normales con desplazamiento lateral, de rumbo general NE-SW o casi N-S, el cual afecta al sistema principal NW - SE.

4.3 Geología del subsuelo

De acuerdo con la información geológica y geofísica 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 Tepehuanes-Santiago y arroyos tributarios.

Esta es la unidad que se explota actualmente para satisfacer las necesidades de agua de la región. La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas volcánicas como son las tobas ácidas, riolitas e ignimbritas y en menor proporción basaltos, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento.

Las fronteras al flujo subterráneo y el basamento geohidrológico del acuífero están representados por las mismas rocas volcánicas, al desaparecer el fracturamiento. (Figura 3). Los depósitos granulares y conglomeráticos tienen varios cientos de metros de espesor y fueron, en gran parte, el relleno de depresiones o cuencas formadas en fosas tectónicas que se produjeron durante la revolución Laramídica.



Fuente: Carta Geológico-Minera G13-C48 “Santiago Papasquiari” Esc. 1:50.000 (SGM, 2003)

Figura 3. Secciones geológicas esquemáticas

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

Las evidencias geológicas, geofísicas e hidrogeológicas permiten definir la presencia de un **acuífero tipo libre** heterogéneo y anisótropo, constituido en su porción superior, por sedimentos aluviales de granulometría variada y conglomerados, cuyo espesor puede alcanzar varios metros en el centro del valle.

La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas volcánicas entre las que destacan las tobas ácidas, riolitas e ignimbritas y en menor proporción basaltos, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento.

5.2 Parámetros hidráulicos

Como parte de las actividades del estudio realizado en 2010, en el acuífero se realizaron tres pruebas de bombeo, las pruebas fueron de corta duración con etapa de abatimiento y recuperación, los resultados se presentan en la tabla 2.

Tabla 2. Resultados de la prueba de bombeo

Aprovechamiento	Tipo	Abatimiento		Recuperación	
		T(m ² /s)	K(m/s)	T(m ² /s)	K(m/s)
CNA-1006-161	Pozo	1.08 X10 ⁻³	1.48 X10 ⁻⁵	9.35 X10 ⁻⁴	1.28 X10 ⁻⁵
CNA-1006-050	Pozo	6.11 X10 ⁻⁵	6.43 X10 ⁻⁷	6.69 X10 ⁻⁵	7.04 X10 ⁻⁷
CNA-1006-012	Pozo	6.95 X10 ⁻⁶	8.45 X10 ⁻⁸	9.16 X10 ⁻⁶	1.11 X10 ⁻⁷

5.3 Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, únicamente se cuenta con la información recabada como parte de las actividades del estudio realizado en el año 2010.

5.4.1 Elevación del nivel estático

Con respecto a la configuración de elevación del nivel estático, mostrada en la figura 5, se observa que los valores varían de 1,700 a 1,860 msnm, mostrando el reflejo de la topografía, al igual que los valores de profundidad, lo que indica que el flujo subterráneo no ha sufrido alteraciones causadas por la concentración de pozos o del bombeo. Los valores más bajos se localizan al largo del cauce del río, desde donde se incrementan por efecto de la topografía hacia el extremo sur.

De esta manera, es posible identificar direcciones preferenciales del flujo subterráneo de norte a sur, en la porción norte del acuífero; de este-oeste y de oeste a este de manera concéntrica hasta confluir con el Río Tepehuanes-Santiago.

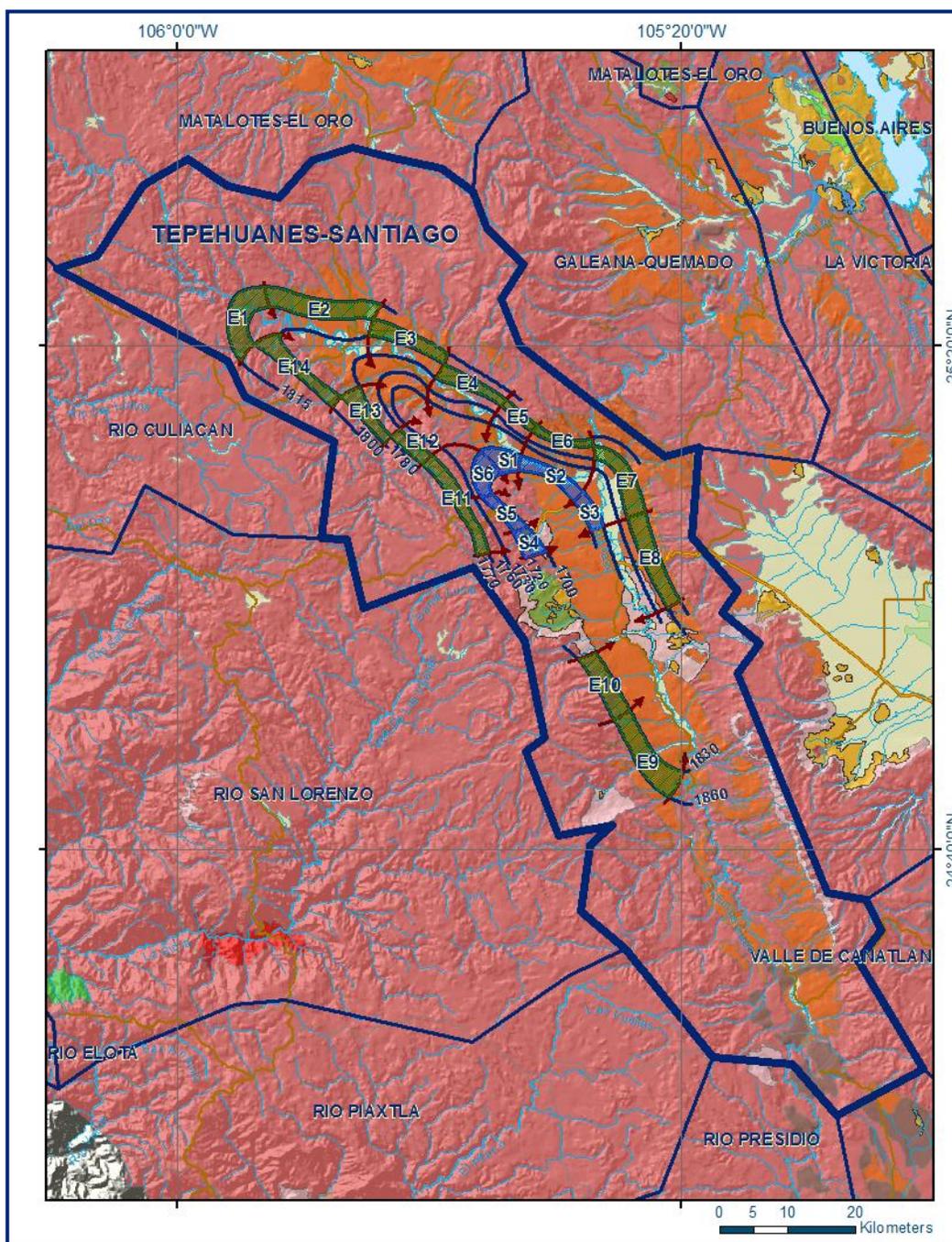


Figura 5. Elevación de nivel estático (msnm), 2010

5.4.2 Evolución del nivel estático

Con respecto a la evolución del nivel estático, no se cuenta con información piezométrica histórica que permita la configuración.

Las escasas mediciones piezométricas recabadas en los recorridos de campo se encuentran dispersas en tiempo y espacio y no cubren en su totalidad la extensión superficial del acuífero.

Aunado a esto, la configuración de la elevación del nivel estático no demuestra alteraciones del flujo natural del agua subterránea que indiquen la presencia de conos de abatimiento causados por la concentración de pozos.

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.

Las mediciones realizadas en el año 2010 serán el punto de partida para el establecimiento del monitoreo de los niveles del agua subterránea.

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en el año 2010, se tomaron 16 muestras de agua subterránea en aprovechamientos distribuidos en la zona de explotación (16 pozos), para su análisis fisicoquímico correspondiente (tabla 3).

Tabla 3. Aprovechamientos muestreados

Aprovechamientos	X	Y	Lat.	Long.	CE ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	STD (ppm)	pH	T °C	ALK (ml de HCl)
CNA-1006-167	427730	2801592	25.3291812	-105.718096	464	209	7.62	22.77	4.8
CNA-1006-176	430723	2799873	25.3137981	-105.688274	423	191	8.04	23.16	3.6
CNA-1006-181	436742	2796170	25.2806313	-105.628308	262	118	8.04	26.92	2.8
CNA-1006-160	440395	2791746	25.2408275	-105.591831	263	119	7.99	25.21	3.4
CNA-1006-157	442104	2787726	25.2045958	-105.574686	406	183	8.18	22.64	3.5
CNA-1006-147	458292	2768229	25.0290593	-105.413416	347	157	8.92	23.35	3.2
CNA-1006-144	456409	2769684	25.0421407	-105.432127	658	295	8.37	26.4	6.2
CNA-1006-016	462546	2755172	24.9112526	-105.370893	414	187	7.47	20.29	2.8
CNA-1006-015	463109	2752157	24.8840378	-105.365243	537	242	7.6	21.38	3.6
CNA-1006-014	464381	2750515	24.8692391	-105.352607	341	154	7.49	20.91	2.4
CNA-1006-008	464339	2749532	24.8603606	-105.3529928	381	172	7.38	22.74	2.6
CNA-1006-017	458697	2768377	25.030406	-105.409402	393	177	7.7	19.39	3.5
CNA-1006-108	455537	2778224	25.1192445	-105.441047	837	376	7.54	23.14	6.1
CNA-1006-107	454918	2778344	25.1203075	-105.447189	543	244	7.44	21.81	5.3
CNA-1006-150	449567	2782135	25.1543784	-105.500402	200	93	7.93	26.23	2.5
CNA-1006-103	454469	2775317	25.092954	-105.451543	618	278	8.46	13.52	5.8

Las determinaciones incluyeron parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos iones mayoritarios, temperatura, conductividad eléctrica, pH, Eh, Nitratos, dureza total, sólidos totales disueltos, Fe Mn, coliformes fecales y totales, etc, para identificar los procesos geoquímicos o de contaminación y comprender el modelo de funcionamiento hidrodinámico del acuífero.

De manera general, las concentraciones de los diferentes iones y elementos no sobrepasan los límites máximos permisibles que establece la Norma Oficial Mexicana, para los diferentes usos.

La concentración de sólidos totales disueltos (STD) presenta valores que varían de 93 a 376 ppm, que no sobrepasan el límite máximo permisible de 1,000 ppm establecido la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021 “Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua”, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 2 de mayo del 2022.

Los valores más bajos se ubican en los aprovechamientos ubicados hacia las partes topográficamente más altas, ubicadas en los extremos norte y sur del acuífero, mientras que los mayores se registran en la porción central, reflejando de esta manera las direcciones preferenciales del flujo subterráneo.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con la información del censo de aprovechamientos realizado como parte del estudio llevado a cabo en el 2010, se registró a existencia de 193 aprovechamientos de agua subterránea, de los cuales 76 son pozos y los 117 restantes norias; todos ellos activos.

El volumen de extracción conjunto se ha estimado en **4.6 hm³ anuales**, de los cuales **2.1 hm³** (45.2%) se destinan al uso agrícola, **2.4 hm³** (52.4%) para abastecimiento de agua potable a las comunidades de la región, y los **0.1 hm³** restantes (2.4%) se utilizan para satisfacer las necesidades de uso múltiple.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de aguas subterráneas se planteó para 2010 en una superficie de 1240 km² que corresponde a la zona donde se tiene información piezométrica y en la que se localiza la gran mayoría de los aprovechamientos. 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 como sigue:

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

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 un acuífero:

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

7.1 Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual definido para el acuífero, las entradas están integradas por la recarga natural que se produce por efecto de la infiltración de la lluvia que se precipita sobre los depósitos aluviales y conglomerados que conforman los valles, así como la infiltración que se produce a lo largo de los escurrimientos superficiales (R_v), y la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de una recarga por flujo horizontal subterráneo (E_h).

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

Estos volúmenes se integran en la componente de recarga inducida (R_i).

Para este caso, dado que no existen poblaciones urbanas importantes y el riego agrícola es incipiente, se considera que no existe recarga inducida.

7.1.1 Recarga vertical (R_v)

En las regiones áridas y semiáridas los dos principales mecanismos de recarga natural se producen a través de la infiltración a lo largo de los cauces de los escurrimientos superficiales y la recarga de frente de montaña.

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo.

Debido a que el cambio de almacenamiento ($\Delta V(S)$) tiende a ser nulo, y se cuenta con información para calcular las entradas y salidas por flujo subterráneo, su valor será despejado de la ecuación de balance:

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

Dónde:

- Rv: Recarga vertical
- Eh: Entradas subterráneas por flujo horizontal
- B: Bombeo
- Sh: Salidas subterráneas por flujo horizontal
- ETR: Evapotranspiración
- $\Delta V(S)$: Cambio de almacenamiento

De esta manera, despejando la recarga vertical:

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

7.1.2 Entradas subterráneas por flujo horizontal (Eh)

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas altas del área se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través del piedemonte, para posteriormente llegar a recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de explotación.

Para su cálculo se utilizó la configuración de elevación del nivel estático correspondiente al año 2010, mostrada en la figura 5. Con base en esta configuración 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:

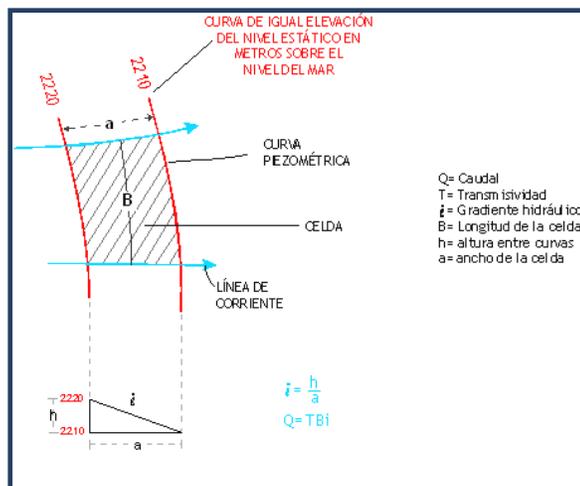
$$Q = B * i * T$$

Donde:

B: Largo del canal de flujo

i: Gradiente hidráulico ($i = h_2 - h_1 / a$); h y a son la diferencia y distancia respectivamente entre las equipotenciales (h) que conforman el canal de flujo.

T: Transmisividad en el canal de flujo ($m^2/día$)



La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada uno de los canales establecidos. En la tabla 4 se pueden observar los valores obtenidos en cada celda y el total de **14.4 hm³/año**.

Tabla 4. Cálculo de entradas subterráneas por flujo horizontal

CELDA	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	11250	3000	15	0.0050	0.0003	0.0169	0.5
E2	16875	2625	15	0.0057	0.0004	0.0386	1.2
E3	11250	2250	20	0.0089	0.0005	0.0500	1.6
E4	11250	1500	10	0.0067	0.0003	0.0225	0.7
E5	5625	1125	10	0.0089	0.0003	0.0150	0.5
E6	9750	1125	10	0.0089	0.0005	0.0433	1.4
E7	9375	2625	10	0.0038	0.0005	0.0179	0.6
E8	15000	2625	10	0.0038	0.0005	0.0286	0.9
E9	13875	2625	30	0.0114	0.0005	0.0793	2.5
E10	9750	2625	30	0.0114	0.0004	0.0446	1.4
E11	15750	1875	10	0.0053	0.0003	0.0252	0.8
E12	9375	1875	10	0.0053	0.0004	0.0200	0.6
E13	7875	2250	10	0.0044	0.0003	0.0105	0.3
E14	14250	1875	20	0.0107	0.0003	0.0456	1.4
Total entradas							14.4

Los valores de T utilizados para el cálculo de las entradas y salidas subterráneas son valores promedio obtenidos de la interpretación de pruebas de bombeo, obtenidas tanto en este acuífero como en los acuíferos vecinos, adaptadas al espesor saturado en cada zona y correlacionadas hidrogeológicamente debido a que tanto el origen como la evolución geológica son comunes en esta región del país.

7.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente por salidas horizontales (Sh), a través de evaporación directa en las zonas de niveles freáticos someros (Ev) y por Bombeo (B). No existen manantiales, ni flujo base en ríos, ya que ambos son de régimen intermitente.

7.2.1 Salidas subterráneas por flujo horizontal (Sh)

Las salidas subterráneas fueron calculadas de la misma manera como se evaluaron las entradas subterráneas, a partir de la configuración de la elevación del NE del año 2010, mostrada en las figuras 5.

Las celdas de salida se localizaron en la parte más baja del área de explotación. El valor total estimado de **8.2 hm^3** anuales se muestra en la tabla 5.

Tabla 5. Cálculo de salidas subterráneas por flujo horizontal

CELDA	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	4875	3375	20	0.0059	0.0006	0.0173	0.5
S2	10125	1500	20	0.0133	0.0008	0.1080	3.4
S3	5625	1875	20	0.0107	0.0008	0.0480	1.5
S4	4500	3000	20	0.0067	0.0006	0.0180	0.6
S5	7875	1875	20	0.0107	0.0006	0.0504	1.6
S6	4500	3000	20	0.0067	0.0006	0.0180	0.6
Total entradas							8.2

7.2.2 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.

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).

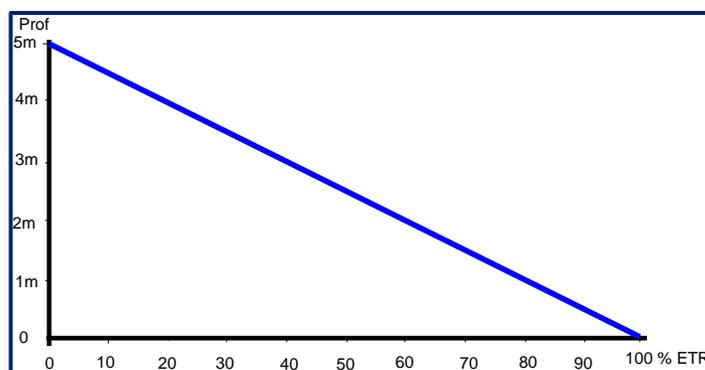
Para la obtención de este parámetro se puede utilizar la ecuación empírica de Turc, que se muestra a continuación:

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

T (°C) = 15.8
 P(mm) = 588.8 P² = 346685.44
 L = 892.2156 L² = 796048.677
 ETR (mm) = 509.5

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 5 m, hasta la que penetra la vegetación en este tipo de climas, bajo el siguiente proceso:

En zonas donde el nivel estático se encuentra a una profundidad menor a 5 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 5 m para el fenómeno de ETR, a menor profundidad mayor será el % de ETR, de tal manera que a 5 m el valor de ETR es nulo y a 0 m el valor es del 100 %, a 4 m el 20%, a 2 m el 60% etc.



De esta manera, la estimación del valor de la evaporación se calculó multiplicando el área donde tiene lugar el fenómeno por la lámina de evapotranspiración obtenida y por el 50% que le corresponde de acuerdo con la gráfica anterior. Tomando en cuenta una superficie de 90 km² en la que la profundidad media al nivel del agua subterránea es de 5.0 m y una lámina de evapotranspiración obtenida de 509.5 mm (con valores de 588.8 mm anuales para la precipitación y 15.8° C de temperatura).

$$\text{ETR} = 100 \text{ km}^2 (0.5095 \text{ m}) (0.5) = 18.2$$

Por lo tanto; ETR = **25.5 hm³/año**.

7.2.3 Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo es del orden de los **4.6 hm³ anuales**.

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

Como se menciona en el apartado de evolución del nivel estático, no se dispone de información piezométrica para elaborar la configuración de la evolución del nivel estático para un periodo de tiempo.

Los registros existentes recabados en recorridos de campo se encuentran dispersos en tiempo y espacio y no cubren en su totalidad la extensión superficial del acuífero. Por otra parte, debido a que el volumen de extracción es menor a la recarga que recibe el acuífero, todavía no se registran alteraciones en la dirección natural del flujo subterráneo ni conos de abatimiento.

Bajo estas consideraciones, se considera que la posición del nivel del agua subterránea no ha sufrido alteraciones importantes y el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo.

Por esta razón, para fines del balance de aguas subterráneas, no existe cambio de almacenamiento en el acuífero; es decir, $\Delta V(S) = 0$.

Solución a la ecuación de balance

Una vez calculadas las componentes de la ecuación de balance, se procedió a evaluar la recarga vertical por lluvia.

$$Rv = Sh + B + ETR - \Delta V(S) - Eh$$

$$Rv = 8.2 + 4.6 + 25.5 - 0.0 - 14.4$$

$$Rv = 23.9 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

De esta manera la recarga total media anual:

$$Rt = Rv + Eh = 23.9 + 14.4$$

$$R = 38.3 \text{ hm}^3$$

8. DISPONIBILIDAD

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

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

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

8.1 Recarga total media anual (R)

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

Para este caso particular, su valor es de **38.3 hm³/año**.

8.2 Descarga natural comprometida (DNC)

La descarga natural comprometida se determina sumando los volúmenes de agua concesionados de los manantiales y del caudal base de los ríos que 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 el caso del acuífero Tepehuanes-Santiago, el valor es de **0.0 hm³ anuales**.

8.3 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 (REPDA), 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 **8,165,862 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022**.

8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)

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

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

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 38.3 - 0.0 - 8.165862 \\ \text{DMA} &= 30.134138 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **30,134,138 m³ anuales**.

9. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua, 2010. Estudio para Determinar la Disponibilidad de los acuíferos Cabrera-Ocampo, Matalotes-El Oro, San José de Nazareno, Galena-El Quemado, La Victoria, Buenos Aires, Torreón de Cañas, San Fermín, San Juan del Río, Cabrera, La Zarca-Revolución y Revolución, estado de Durango. Realizado por convenio con la Universidad de Sonora.