



**SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA**  
**GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS**

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE  
AGUA EN EL ACUÍFERO ATLAPEXCO-CANDELARIA (1305),  
ESTADO DE HIDALGO**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

## Contenido

<b>1</b>	<b>GENERALIDADES.....</b>	<b>2</b>
1.1	Localización.....	2
1.2	Situación administrativa del acuífero.....	4
<b>2</b>	<b>ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD .....</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>FISIOGRAFÍA.....</b>	<b>5</b>
3.1	Provincia fisiográfica.....	5
3.2	Clima.....	6
3.3	Hidrografía .....	7
3.4	Geomorfología.....	7
<b>4</b>	<b>GEOLOGÍA .....</b>	<b>8</b>
4.1	Estratigrafía.....	9
4.2	Geología estructural .....	12
4.3	Geología del subsuelo .....	13
<b>5</b>	<b>HIDROGEOLOGÍA.....</b>	<b>13</b>
5.1	Tipo de acuífero .....	13
5.2	Parámetros hidráulicos.....	14
5.3	Piezometría .....	14
5.4	Comportamiento hidráulico.....	15
5.4.1	Profundidad al nivel estático.....	15
5.4.2	Elevación del nivel estático.....	15
5.4.3	Evolución del nivel estático .....	16
5.5	Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	16
<b>6</b>	<b>CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA .....</b>	<b>17</b>
<b>7</b>	<b>BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS .....</b>	<b>18</b>
7.1	Entradas .....	18
7.1.1	Recarga vertical (Rv).....	19
7.1.2	Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	19
7.2	Salidas.....	21
7.2.1	Bombeo (B).....	21
7.2.2	Descarga a través de manantiales (Dm) .....	21
7.2.3	Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh) .....	21
7.2.4	Evapotranspiración (ETR).....	21
7.2.5	Flujo Base (Qb).....	23
7.3	Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$ .....	23
<b>8</b>	<b>DISPONIBILIDAD .....</b>	<b>24</b>
8.1	Recarga total media anual (R).....	25
8.2	Descarga natural comprometida (DNC).....	25
8.3	Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS) .....	25
8.4	Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA) .....	25

## **1 GENERALIDADES**

### **Antecedentes**

La Ley de Aguas Nacionales (LAN) y su Reglamento contemplan que la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) debe publicar en el Diario Oficial de la Federación (DOF), la disponibilidad de las aguas nacionales, en el caso de las aguas subterráneas esto debe ser por acuífero, de acuerdo con los estudios técnicos correspondientes y conforme a los lineamientos que considera la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000 “Norma Oficial Mexicana que establece el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales”.

Esta norma ha sido preparada por un grupo de especialistas de la iniciativa privada, instituciones académicas, asociaciones de profesionales, gobiernos estatales y municipales y de la CONAGUA.

La NOM establece para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas la realización de un balance de las mismas donde se defina de manera precisa la recarga, de ésta deducir los volúmenes comprometidos con otros acuíferos, la demanda de los ecosistemas y el volumen concesionado vigente en el Registro Público de Derechos del Agua (REPDA).

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 Atlapexco-Candelaria, definido con la clave 1305 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza al noreste del estado de Hidalgo, en la denominada Huasteca Hidalguense, abarcando una superficie de 1,104 km<sup>2</sup>. Su territorio se encuentra enmarcado entre las coordenadas 20° 38' y 21° 11' de latitud norte y 98° 15' y 98° 45' de longitud oeste (figura 1).

Colinda al este y sur con el acuífero Calabozo, al sur con Meztitlán, al oeste con Orizatlán y al norte con los acuíferos Xochicoatlán-Huejutla y Tampico Misantla, este último del estado de Veracruz

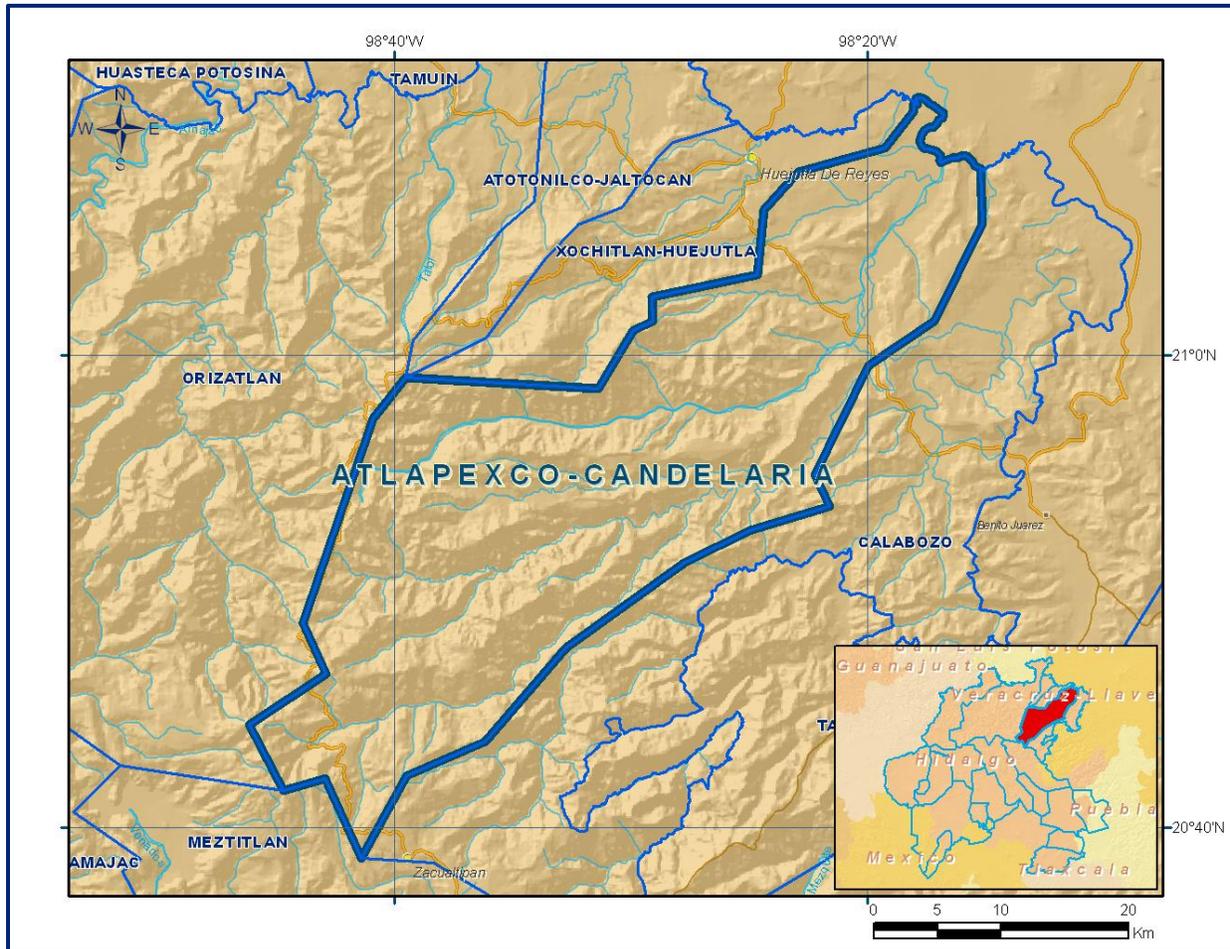


Figura 1. Localización del acuífero

Geopolíticamente abarca parcialmente los municipios de Atlapexco, Tianguistengo, Huazalingo y Yahualica; la totalidad de los municipios de Xochicoatlán y Calnali, y unas pequeñas porciones de Meztitlán, Zacualtipán de los Ángeles, Molango de Escamilla, Lolotla, Tlanchinol, Huautla y Huejutla de Reyes.

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 que delimita al acuífero

ACUIFERO 1305 ATLAPEXCO-CANDELARIA							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	98	15	10.9	21	7	53.2	
2	98	15	7.8	21	5	34.3	
3	98	17	8.3	21	1	26.9	
4	98	19	57.0	20	59	34.5	
5	98	22	11.7	20	54	55.4	
6	98	21	34.1	20	53	35.5	
7	98	24	57.0	20	52	34.9	
8	98	27	43.2	20	51	12.3	
9	98	32	45.4	20	47	36.5	
10	98	36	9.2	20	43	38.7	
11	98	39	28.5	20	42	12.3	
12	98	41	24.2	20	38	43.0	
13	98	42	56.3	20	42	4.1	
14	98	44	42.3	20	41	33.3	
15	98	46	8.4	20	44	21.0	
16	98	42	53.0	20	46	29.6	
17	98	43	53.7	20	48	39.2	
18	98	40	52.9	20	57	18.9	
19	98	39	30.8	20	59	3.0	
20	98	31	23.9	20	58	35.0	
21	98	29	53.1	21	1	2.0	
22	98	29	5.0	21	1	26.4	
23	98	29	6.7	21	2	28.2	
24	98	24	38.9	21	3	25.1	
25	98	24	21.8	21	6	7.6	
26	98	22	55.6	21	7	44.9	
27	98	19	12.9	21	8	47.1	
28	98	18	0.0	21	10	21.1	
29	98	18	1.0	21	10	40.0	DEL 29 AL 1 POR EL LIMITE ESTATAL
1	98	15	10.9	21	7	53.2	

## 1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero Atlapexco-Candelaria pertenece al Organismo de Cuenca “Golfo Norte” y es jurisdicción territorial de la Dirección Local Hidalgo. En el acuífero no existe veda de aguas subterráneas.

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 público-urbano. No existe Distrito de Riego alguno, ni tampoco se ha constituido hasta la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

## **2 ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD**

El acuífero se ubica parcialmente en la zona serrana de la Huasteca Hidalguense, de topografía accidentada, y otra porción en la Planicie Costera del Golfo; en ambos casos la presencia del agua subterránea es escasa, por la baja permeabilidad de la litología del subsuelo que sólo permite el emplazamiento de un escaso espesor de relleno granular.

La precipitación abundante y existencia de ríos de gran caudal permiten el abasto con fuentes de agua superficial; sin embargo, en la época de estiaje, desaparecen varias de éstas obligando a buscar la solución en el agua subterránea. Por el desarrollo y crecimiento regional, es necesario el monitoreo piezométrico del acuífero. Sólo se dispone de información geológica con propósitos descriptivos publicada por el Consejo de Recursos Minerales (hoy Servicio geológico Nacional), de investigación y de exploración petrolera realizada por diversos autores, nacionales y extranjeros, que han difundido sus trabajos en diferentes publicaciones nacionales e internacionales. El único estudio realizado en el acuífero es el siguiente:

**ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DEL ACUÍFERO ATLAPEXCO-CANDELARIA, EN EL ESTADO DE HIDALGO. Realizado para la Comisión Estatal del Agua (CEA) y Alcantarillado del estado de Hidalgo por la empresa Lesser y Asociados, S.A. de C.V. en 2008.** Los objetivos del trabajo fueron: Actualizar el conocimiento hidrogeológico del acuífero, realizar un balance del agua subterránea y determinar la disponibilidad de agua subterránea de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana; así como desarrollar un modelo matemático para la simulación hidrodinámica del acuífero. 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 con la clasificación de Raisz, 1964, la mayor parte de la superficie cubierta por el acuífero se ubica dentro de la Provincia Fisiográfica de la Sierra Madre Oriental, y una pequeña porción al noreste pertenece a la Llanura Costera del Golfo. En términos generales en la Sierra Madre Oriental afloran las rocas precámbricas consideradas como las más antiguas de México, así como de una serie de unidades estratigráficas que abarcan desde el Paleozoico Superior, Mesozoico y Cenozoico.

Esta secuencia está constituida por rocas sedimentarias de origen marino y continental, constituyendo relieves característicos sobre las cordilleras y exhibiendo extensos derrames de rocas basálticas y tobas.

En esta provincia se definen sierras que alcanzan alturas del orden de los 2,700 msnm, y cañadas tan profundas que presentan diferencias topográficas de hasta 500 m, ocupando la parte norte del territorio del estado de Hidalgo. Posee rasgos de un carst mayor y presenta un fuerte grado de disección, por la acción de los importantes ríos que afluyen en ella. Esta región cárstica es parte de una de las más extensas del país ya que en ella dominan rocas calizas.

### **3.2 Clima**

Con base en la clasificación de climas elaborada por W. Köppen, modificada por Enriqueta García, para las condiciones de la República Mexicana, en la superficie que cubre el acuífero se presenta el clima (A)C(m)(w) en el extremo norte, que corresponde a un clima semicálido, húmedo, con abundantes lluvias en verano y un porcentaje de lluvia invernal menor del 5%; mientras que hacia el centro, sur y suroeste en la zona que corresponde a la sierra, el clima es (A)C(fm), que corresponde a un clima semicálido, húmedo con lluvia todo el año y un porcentaje de lluvia invernal menor del 18%.

La precipitación media anual varía de 1,700 mm en el norte de la zona a la altura de Atlapexco, a menos de 800 mm en la parte sur y suroeste.

En la estación climatológica Huejutla, la precipitación media anual registrada es de 1,617.7 mm.

En la estación Calnali, ubicada en la porción central del acuífero, la media registrada es de 1,943.2 mm. La precipitación media entre los meses de mayo y octubre es de 1,300 mm a la altura de Atlapexco, la cual se incrementa hacia la sierra a poco más de 1,400 mm. Entre noviembre y abril la precipitación es cercana a 350 mm. Respecto a la temperatura media anual, varía de 23° C a la altura de Atlapexco, a 14° C en la parte alta de la sierra, ubicada hacia el sur y suroeste.

En la estación climatológica de Huautla, la temperatura media anual es de 21.9° C. En la estación Calnali, ubicada en la parte central del acuífero, la temperatura es de 19.1° C.

La temperatura media entre los meses de mayo y octubre registra mínimos promedio de 21° C y máximos promedio de 28° C a la altura de Atlapexco, mientras que entre noviembre y abril los mínimos promedio son de 12° C y máximos promedio de 24° C.

Debido a la variación que presentan las variables climatológicas, como resultado la diferencia en la altitud de la topografía, aunque para fines descriptivos se mencionen diferentes valores, para efecto de la estimación de la evapotranspiración en el balance de aguas subterráneas que se plantea posteriormente, se tomaran los valores promedio de 22° C y 1,700 mm/año para la temperatura y precipitación, respectivamente. Con respecto a la evaporación potencial, los valores varían de 1,700 a 2,000 mm.

### **3.3 Hidrografía**

La zona forma parte de la Región Hidrológica RH26 “Río Pánuco”, Cuenca del Río Moctezuma, Subcuenca Acuapa-Chinameca. Los escurrimientos se originan en la porción sur del acuífero, donde termina la sierra e inicia la planicie. Destaca el Río “Los Hules” formado por varios escurrimientos que provienen del suroeste que circulan hacia el noreste para confluir a la altura de. No existe infraestructura hidráulica para el almacenamiento de las corrientes superficiales.

### **3.4 Geomorfología**

En el área que cubre la superficie del acuífero, se distinguen 3 principales unidades geomorfológicas, correspondientes a: Sierras calcárea, lomeríos y valles.

**Sierras calcáreas.** - Constituyen la mayor parte de la zona. Corresponden al frente de la Sierra Madre Oriental, la cual está formada por pliegues anticlinales y sinclinales, frecuentemente recumbentes y afectados por fallamientos, en rocas calizas y lutitas, formando sierras que se elevan hasta 1200 msnm, mientras que la planicie del oriente se ubica a 200 msnm. La sierra presenta pendientes pronunciadas y está disectada por ríos y arroyos en ocasiones en forma de **V**. En general la topografía es abrupta.

**Lomeríos.** - Se localizan en la parte oriente de la zona y que corresponde a la transición de la Sierra Madre Oriental con la Planicie del Golfo, se encuentran una serie de lomeríos redondeados, de formas suaves y alturas de alrededor de 200 m, las que en su mayoría corresponden a lutitas del Paleógeno - Neógeno.

**Valles.** Entre los lomeríos de la parte norte del acuífero, se encuentran valles alargados correspondientes a las zonas de erosión de los ríos provenientes de la sierra y que circulan hacia la Planicie Costera del Golfo. Tienen una orientación sur-norte-noreste.

#### 4 GEOLOGÍA

En la superficie cubierta por el acuífero afloran rocas sedimentarias marinas, principalmente del Cretácico y del Paleógeno-Neógeno. Las rocas del Cretácico forman parte de los plegamientos de la Sierra Madre Oriental, mientras que las correspondientes al Paleógeno-Neógeno son parte de la Planicie Costera del Golfo (figura 2). Existen varias versiones de la cartografía geológica, principalmente las elaboradas por el Servicio Geológico Mexicano (SGM) y el INEGI.

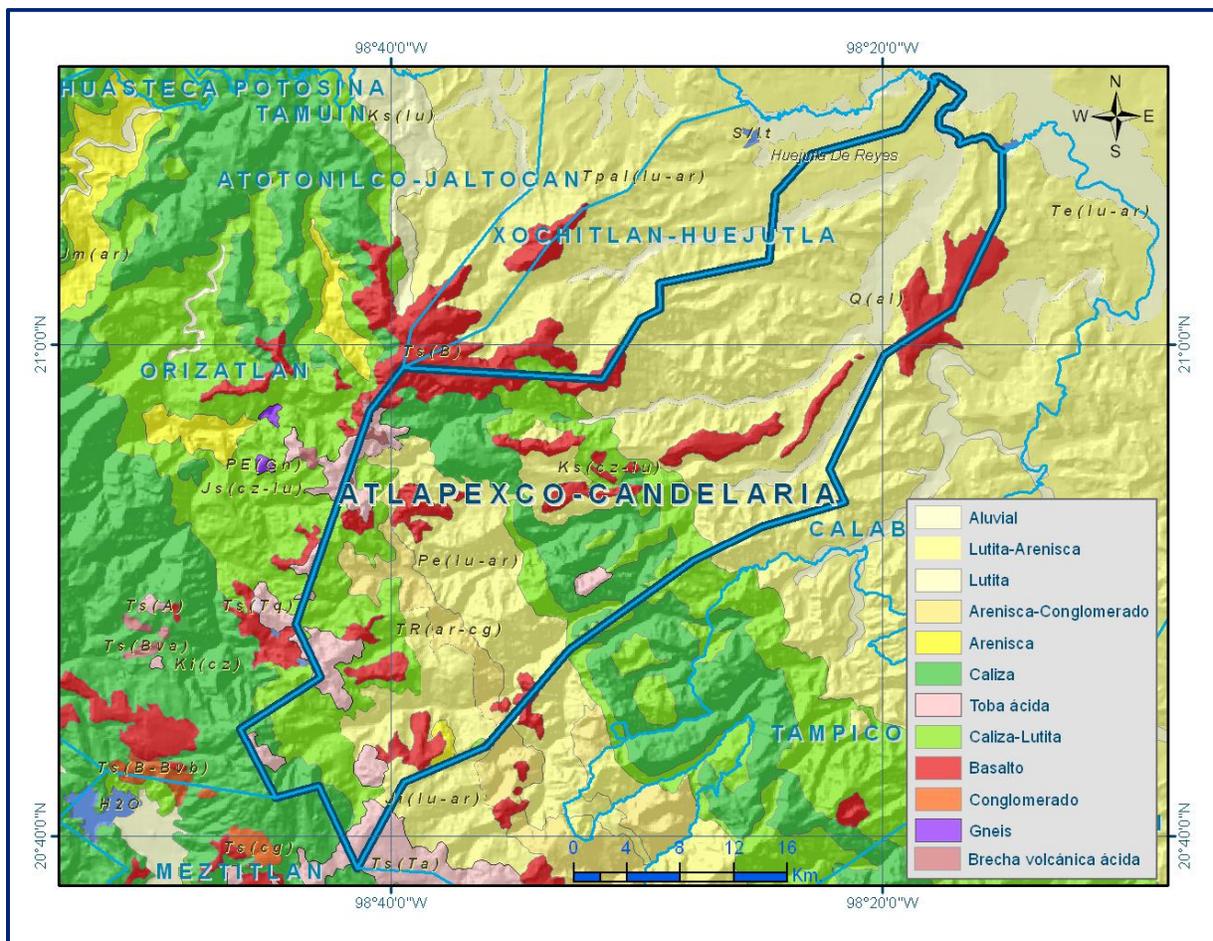


Figura 2. Geología general del acuífero

#### **4.1 Estratigrafía**

Las rocas más antiguas que se encuentran en la zona, corresponden a lutitas y areniscas del Pérmico y Triásico, a las que les sobreyacen calizas y lutitas del Jurásico. Sobre estas descansan sedimentos calcáreos marinos del Cretácico y que en conjunto forman la Sierra Madre Oriental. Hacia el oriente, le sobreyacen lutitas y areniscas del Paleógeno - Neógeno. Finalmente, sobre los valles de la parte norte, se encuentran delgadas capas de aluviones del Cuaternario. La descripción de las unidades litológicas, fue tomada de Ochoa-Camarillo, *et al*, 1998 y de la Monografía Geológico Minera del Estado de Hidalgo, del SGM. A continuación, se describe la estratigrafía de la región.

#### **PÉRMICO**

En la región más alta de la sierra ubicada al suroeste del acuífero, de manera aislada se presentan pequeños afloramientos de lutitas y areniscas metamorfoseadas que representan a las rocas más antiguas de la región, a las que Fries y Orta (1965) por medio de dataciones radiométricas les asignaron una edad correspondiente al Pérmico.

#### **JURÁSICO INFERIOR**

Formación Huayacocotla. - Esta formación fue estudiada por Díaz-Lozano (1916) y descrita formalmente por Imlay en 1948. Se encuentra constituida por lutitas y areniscas de grano grueso, así como limonitas, con abundantes fósiles que permiten asignarle edad. Consta de tres miembros. El miembro inferior está formado por conglomerado, arenisca, limonita y lutita. El miembro intermedio está constituido por conglomerado, arenisca, limolita y lutita con amonites. El miembro superior está formado por arenisca, limolita, lutita y conglomerado y se caracteriza por la presencia de plantas fósiles continentales. Su espesor es muy variado, existen zonas sin depósito y en algunos sitios se le han llegado a medir hasta 900 m.

#### **JURÁSICO MEDIO**

Formación Cahuwasas. - Fue definida por Carrillo-Bravo, 1965 como una secuencia de más de 1,000 m de espesor que consiste en areniscas, conglomerado y limonitas de color rojo. Descansa en discordancia angular sobre la Formación Huayacocotla y está cubierta concordantemente por la Formación Tepexic.

Formación Tepexic. - Fue descrita formalmente por Erben, 1956 y está formada por margas, limonitas calcáreas, calcarenitas y coquinas.

## **JURÁSICO SUPERIOR**

Formación Santiago. - Esta unidad fue definida formalmente por Cantú-Chapa en 1971, constituida por un paquete de limolita negra calcárea, con ocasionales capas de caliza negra. En la parte superior abundan concreciones negras, calcáreas, donde se encuentran amonites.

Formación Chipoco. - Fue definida por Hermoso de la Torre y Martínez-Pérez en 1972 como una alternancia de caliza grainstone y lutita calcárea. Se distinguen cuatro unidades como sigue: Miembro 1 constituido por caliza manganesífera con intercalaciones y lutita calcárea; Miembro 2 caracterizado por arenisca calcárea con intercalaciones de lutita calcárea arenosa; Miembro 3 que presenta limolita y lutita calcárea con intercalaciones de caliza arcillosa y; Miembro 4 constituido por una secuencia de caliza interestratificada en forma rítmica con lutita negra.

Formación Pimienta. - Fue definida por Heim en 1926 como una serie de calizas de estratificación delgada con capas de pedernal negro, estratos de 5 a 30 cm e intercalaciones rítmicas de lutita negra en espesores de 1 a 5 cm, nódulo y lentes de pedernal negro y gris, así como concreciones esféricas.

## **CRETÁCICO INFERIOR**

Formación Tamaulipas Inferior. - Consta de calizas micríticas densas de estratificación media a gruesa y ocasionalmente horizontes bentoníticos verdes con presencia de nódulos de pedernal y especialmente de estilolitas bien desarrolladas. Su edad es Hauteriviano-Barremiano y su espesor aproximado es de 400 m. Se encuentra subyaciendo al Horizonte Otates. Horizonte Otates. - Consta de calizas de estratificación media que alternan con lutitas laminares y ocasionalmente presentan pedernal. Este horizonte tiene un espesor de entre 10 y 15 m, pertenece al Aptiano y se considera como un horizonte índice.

Formación Tamaulipas Superior. - Esta unidad está formada en la base por calizas de grano fino de color blanco y amarillo crema, en estratos delgados que alternan con estratos gruesos. En la cima consta de calizas de grano fino con estratificación ondulante de espesor variable, con nódulos de pedernal intercalados con margas laminadas. La edad de esta Formación se ha determinado Albiano-Cenomaniano y tiene un espesor aproximado de 400 m.

## **CRETÁCICO SUPERIOR**

Formación Soyatal constituida por calizas delgadas, interestratificadas con bandas de pedernal. Se le ha asignado una edad Huroniano. Tiene un espesor medio de 300 m, infrayace en forma discordante a la Formación Mezcala.

Formación Mezcala. - Consiste de una potente secuencia que en su sección inferior presenta una alternancia de limonitas, lutitas, margas, calizas y areniscas. Hacia su sección superior desaparecen los horizontes calcáreos y predominan los terrígenos, incluyendo intercalaciones conglomeráticas. Su espesor alcanza los 1,000 m.

Formación Agua Nueva. - Esta unidad está formada por calizas de estratificación delgada que sobreyacen en forma discordante a la Formación Mezcala. Tiene un espesor de 120 m y su edad es Turoniano-Santoniano.

Formación San Felipe. - Consiste en calizas margosas con intercalaciones de arcilla bentonítica. Sobreyace concordantemente a la Formación Agua Nueva y presenta un espesor medio de 120 m.

Formación Méndez. - Está constituida principalmente por margas con intercalaciones menores de arenisca, principalmente hacia su cima. Se le ha asignado una edad que abarca del Campaniano al Maestrichtiano y un espesor que varía de 200 a 300 m.

## **PALEÓGENO**

Formación Chicontepec. - Esta unidad comprende sedimentos de aguas profundas de la cuenca de Tampico-Misantla. Comprende alternancias rítmicas de areniscas, limonitas y lutitas cuya edad corresponde al Paleoceno-Eoceno Temprano.

## **CUATERNARIO**

Aluviones (Qal). - Están constituidos por gravas, arenas y arcillas que se encuentran cubriendo los pequeños valles intermontanos de la porción nororiental del acuífero. En afloramientos y cortes litológicos de pozos, se han medido espesores de 1 a 10 metros.

En la parte superficial se ha desarrollado una capa de suelo residual de 20 a 150 cm de espesor, con abundante materia orgánica.

## 4.2 Geología estructural

Los rasgos estructurales que se observan en esta región indican varios tipos de deformación de la secuencia rocosa que la conforman. Algunos de estos rasgos corresponden a una fase neotectónica y se manifiestan como rupturas en el relieve y fuertes cambios de pendientes transversales a las estructuras. Los principales elementos geológicos estructurales de la región están representados, en orden de importancia, por anticlinales, sinclinales, fallas, fracturas.

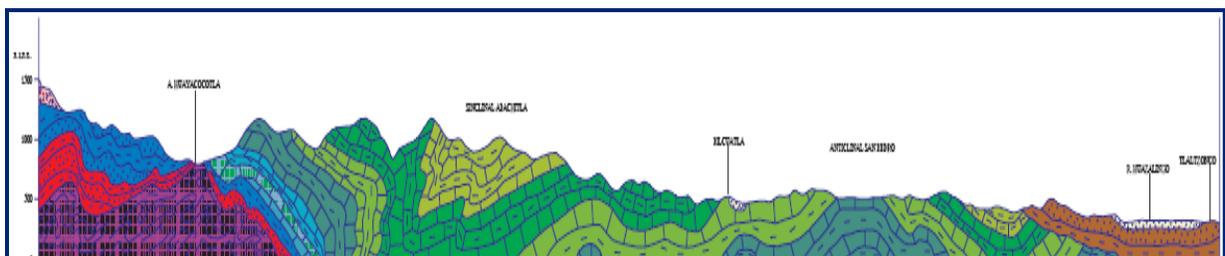
En menor proporción, es posible encontrar vestigios de estructuras volcánicas. Estos elementos estructurales son comunes en toda la porción norte del estado de Hidalgo, en los límites con los estados de San Luis Potosí y Veracruz.

En esta región, las rocas del Mesozoico que se encontraban cubiertas por el mar, fueron deformadas y plegadas por el efecto tectónico de la Orogenia Laramide; posteriormente a los esfuerzos de compresión siguió una etapa de extensión durante la cual se generaron grandes fallas de tipo normal, que actuaron entre fines del Cretácico y principios del Cenozoico.

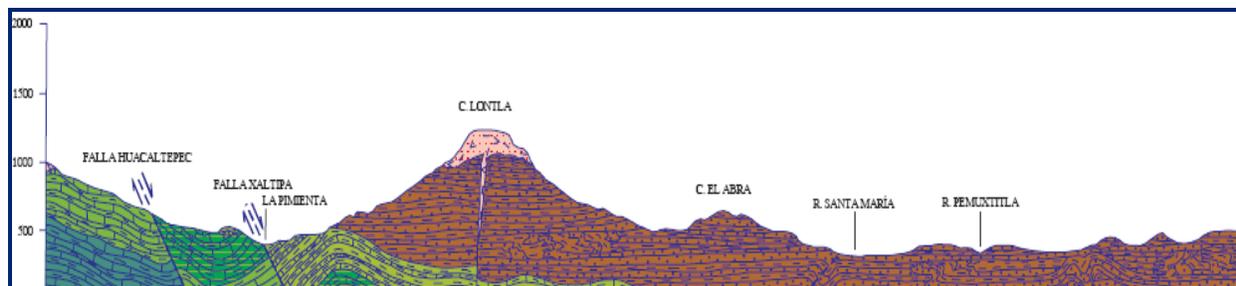
Este tipo de fallamiento estuvo acompañado de fracturamiento y dio lugar a la formación de profundas cañadas.

Es posible que la invasión de rocas intrusivas se haya dado en forma casi simultánea con la fase orogénica que plegó la secuencia del Mesozoico, propiciando a su vez mayor deformación local en la zona de intrusión, y al mismo tiempo la inyección de fluidos mineralizantes en las rocas altamente fracturadas.

En la figura 3 se muestran secciones geológicas que ilustran los plegamientos del subsuelo en esta porción de la Sierra Madre Oriental.



Fuente: Carta Geológica-Minera F14-D52 "Calnali". Esc. 1:50.000 (SGM, 2005)



Fuente: Carta Geológica-Minera F14-D42 "Huejutla". Esc. 1:50,000 (SGM, 2005)

Figura 3. Secciones geológicas esquemáticas

### 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 de río Atlapexco y arroyos; en su porción inferior se aloja en una secuencia de rocas sedimentarias calcáreas y terrígenas (calizas y areniscas) que presentan permeabilidad secundaria por disolución y fracturamiento.

Las fronteras al flujo subterráneo y el basamento geohidrológico del acuífero están representadas por rocas sedimentarias, principalmente lutitas, limolitas y areniscas compactas, que forman parte de la secuencias calcáreo arcillosas de unidades litológicas que afloran ampliamente en todo el acuífero.

## 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 (arenas, gravas y arcillas), de espesor reducido que no sobrepasa los 10 m, debido a que están subyacidos por lutitas y areniscas compactas.

Este es el acuífero que actualmente se explota en el valle localizado en el extremo nororiental del acuífero, principalmente mediante norias perforadas a mano en los subálveos del río y arroyos que sólo satisfacen las necesidades del uso doméstico-abrevadero. Las calizas y areniscas, que forman parte de las secuencias calcáreo-arcillosas, así como los basaltos, representan una fuente potencial de agua subterránea que aún no ha sido explorada.

Debido a la topografía accidentada y al carácter general impermeable de la zona serrana, los escurrimientos fluyen de manera rápida sin permitir su infiltración.

Solo en la porción baja es posible la acumulación de agua, conformando un acuífero de reducidas dimensiones y de baja capacidad de almacenamiento, que presenta permeabilidad media.

En las porciones sur y centro del acuífero es común la existencia de pequeños manantiales que en forma de “lloraderos” descargan localmente la infiltración del agua a través de las fracturas o por el contacto con rocas impermeables.

La descarga del acuífero, se realiza en forma natural a través del drenado de las corrientes superficiales.

## **5.2 Parámetros hidráulicos**

Como parte de las actividades del estudio de 2008, se realizaron 8 pruebas de bombeo de corta duración, tanto en etapa abatimiento como de recuperación, aprovechamientos localizados en el subálveo de ríos y arroyos.

Los resultados de las pruebas muestran que los valores de transmisividad varían entre **0.06 y  $10.6 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$** . Un pozo aislado tiene transmisividad de  **$44.54 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$** .

Los valores más bajos están relacionados a la presencia dominante de sedimentos más finos y los más altos a sedimentos de mayor granulometría, dentro de los sedimentos aluviales que conforman las pequeñas planicies de inundación y subálveos de los principales escurrimientos superficiales.

El acuífero se restringe al espesor del aluvión de los valles de inundación de los ríos ubicados en la porción nororiental del acuífero, que presenta baja transmisividad y reducido espesor.

## **5.3 Piezometría**

Para el análisis del comportamiento del acuífero únicamente se cuenta con información correspondiente al año 2008. Existen una gran cantidad de pequeños manantiales o “lloraderos”, la mayoría de ellos localizados en cotas topográficas por arriba del nivel de los valles.

## 5.4 Comportamiento hidráulico

### 5.4.1 Profundidad al nivel estático

La configuración de profundidad al nivel estático en 2008 (figura 4) muestra curvas dominadas por el efecto de la topografía a lo largo de los ríos, con valores entre 1 a 5 m, que se incrementan gradualmente conforme se asciende hacia las partes más altas, hasta alcanzar los 10 m.

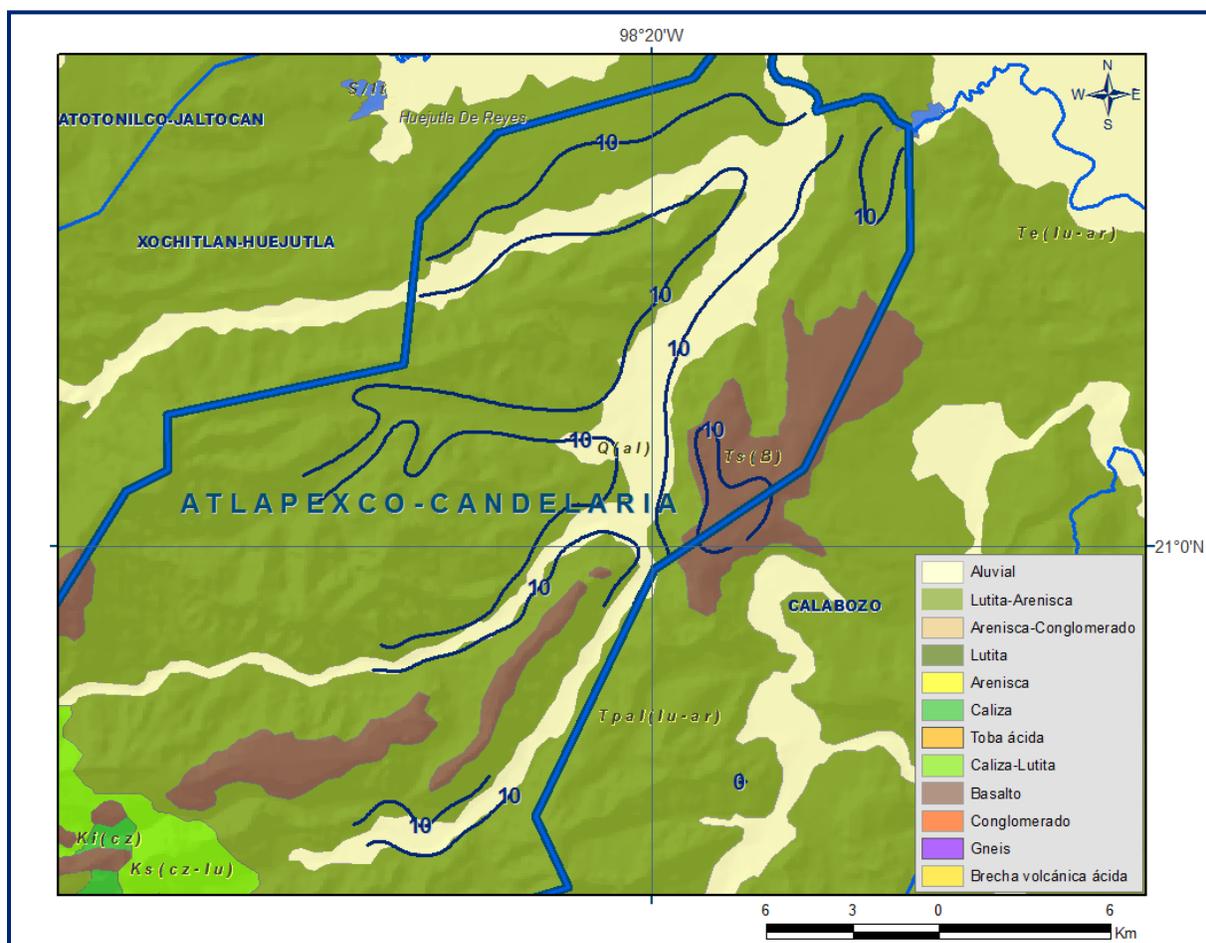


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2008)

### 5.4.2 Elevación del nivel estático

La configuración de la elevación del nivel estático respecto al nivel del mar, mostrada en la figura 5, presenta curvas entre 180 y 130 msnm a la altura de Atlapexco y entre 120 y 100 msnm al norte del acuífero.

De manera general, se observa una dirección preferencial del flujo subterráneo de suroeste a noreste, paralela al escurrimiento superficial.

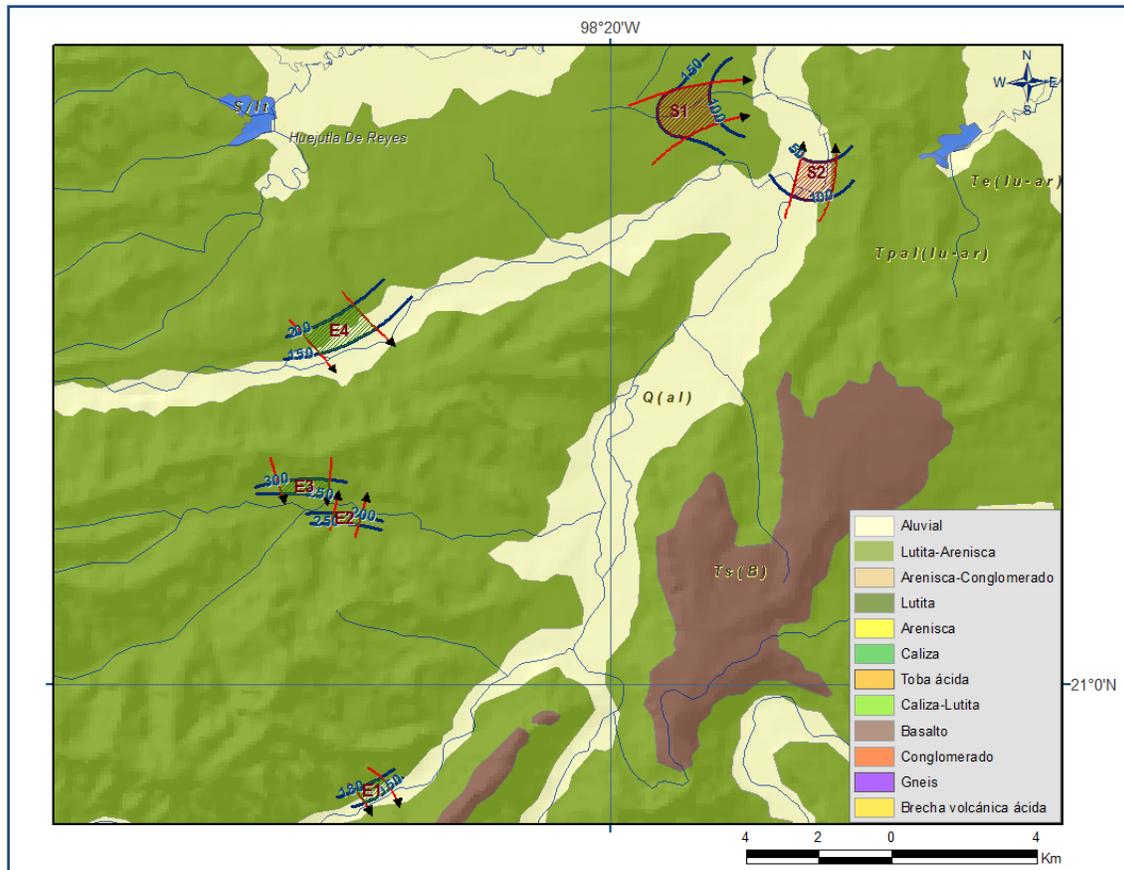


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2008)

### 5.4.3 Evolución del nivel estático

Con respecto a la evolución del nivel estático, no se cuenta con información piezométrica que permita la configuración. Las escasas mediciones piezométricas recabadas se encuentran dispersas 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 y/o del bombeo.

Por estas razones, se puede afirmar que la posición del nivel del agua subterránea no ha sufrido alteraciones importantes en el transcurso del tiempo, por lo que el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo.

### 5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte del estudio realizado en 2008, se tomaron 19 muestras de agua, para su diferente análisis fisicoquímico, bacteriológicos e isotopos correspondientes.

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 20 a 772 mg/l. Los valores más bajos se ubican en los aprovechamientos ubicados hacia las partes topográficamente más altas, mientras que los mayores se encuentran hacia el extremo nororiental del acuífero, reflejando de esta manera la dirección preferencial del flujo subterráneo.

Respecto a los análisis bacteriológicos y a las determinaciones de 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, se detectaron coliformes fecales y totales, el resto de las determinaciones realizadas se encuentra dentro de la Norma.

De acuerdo a las concentraciones de elementos mayores por ion dominante, se identificaron 2 principales tipos o familias de agua: cálcico-bicarbonatada-cálcica y bicarbonatada-magnésica que representan agua de reciente infiltración que ha circulado principalmente a través de rocas sedimentarias calcáreas (calizas y dolomitas).

Para el uso agrícola, utilizando el método de Wilcox, el agua se clasifica, para la mayor parte de las muestras, como de salinidad media (C2) y bajo contenido de sodio intercambiable (S1) que es apropiada para su uso en riego, sin restricciones.

## **6 CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA**

De acuerdo con los resultados del censo realizado en 2008, dentro del área del acuífero se inventariaron 118 aprovechamientos de los cuales 107 se encuentran activos y los 11 restantes inactivos. De ellos 33 son norias, 84 manantiales y uno es tajo.

El volumen de extracción calculado es de **0.1 hm<sup>3</sup>/año**, mediante norias que en muchos casos se encuentran excavadas en el subálveo de los arroyos, destinados al uso doméstico-abrevadero.

Adicionalmente, a través de manantiales se descarga un volumen anual de **2.0 hm<sup>3</sup>**, destinados en su totalidad al abastecimiento de agua potable.

## **7 BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS**

El balance de agua subterránea se planteó para el año 2008, en una superficie de 95 km<sup>2</sup>, que corresponde a la zona donde se cuenta con información piezométrica y en la que se localiza la mayoría de los aprovechamientos subterráneos.

La diferencia entre la suma total de las entradas (recarga), y la suma total de las salidas (descarga), representa el volumen de agua perdido o ganado por el almacenamiento del acuífero, en el periodo de tiempo establecido.

La ecuación general de balance, de acuerdo a la ley de la conservación de la masa es la siguiente:

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

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

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

### **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 en el valle y a lo largo de los escurrimientos de los arroyos (Rv) y la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de una recarga por flujo horizontal subterráneo (Eh).

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 para fines del balance de aguas subterráneas no existe recarga inducida.

### 7.1.1 Recarga vertical ( $R_v$ )

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que se tiene información para calcular el cambio de almacenamiento ( $\Delta V$ ), así como las entradas y salidas por flujo subterráneo, su valor será despejado de la ecuación de balance:

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

Dónde:

- $R_v$ :** Recarga vertical
- $E_h$ :** Entradas por flujo subterráneo horizontal
- $B$ :** Bombeo
- $S_h$ :** Salidas por flujo subterráneo horizontal
- $D_m$ :** Descarga a través de manantiales
- $ETR$ :** Evapotranspiración
- $Q_b$ :** Flujo base
- $\Delta V(S)$ :** Cambio de almacenamiento

De esta manera, despejando la recarga vertical:

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

### 7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal ( $E_h$ )

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

La recarga al acuífero tiene su origen en la precipitación sobre el valle y en la infiltración de los escurrimientos superficiales. El cálculo de entradas por flujo horizontal se realizó con base en la Ley de Darcy, partiendo de la configuración de elevación del nivel estático para el año 2008 (figura 5).

De acuerdo con la ecuación de Darcy para medios porosos:  $Q = V \cdot A$

Considerando una sección, con una longitud (B) y ancho (a), con una diferencia de alturas de ( $\Delta h$ ). El área de la sección quedará definida por:  $A = B \cdot a$

Mientras que la velocidad será:  $V = K i$

Dónde:

**K** = Coeficiente de permeabilidad o conductividad hidráulica.

**i** = Gradiente hidráulico ( $\Delta h / \Delta L$ )  $\Delta h$  y  $\Delta L$  son la diferencia y distancia respectivamente entre las equipotenciales (h) que conforman el canal de flujo.

Sustituyendo en la ecuación de continuidad:

$$Q = B \cdot a \cdot K \cdot i$$

Ya que la transmisividad  $T = K \cdot a$ , la ecuación queda reducida a:

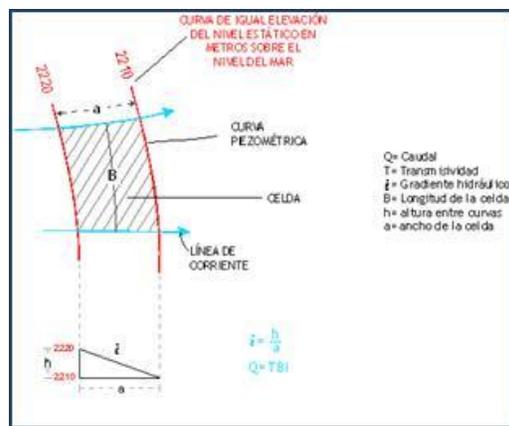
$$Q = T \cdot B \cdot i$$

Dónde:

**T** = Transmisividad en  $m^2/s$ .

**B** = Longitud de la celda en m.

**i** = Gradiente Hidráulico, en m.



El cálculo de las entradas subterráneas para el año 2008 se presenta en la tabla 2, en la que en la se observa que su valor total es de  $\approx 10.0 \text{ hm}^3$  anuales.

Tabla 2. Cálculo de entradas por flujo subterráneo 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	971	455	30	0.0659	0.001	0.0640	2.0
E2	850	510	50	0.0980	0.001	0.0833	2.6
E3	1000	471	50	0.1062	0.001	0.1062	3.4
E4	800	648	50	0.0772	0.001	0.0617	2.0
Total de entradas							10.0

Los valores T utilizados para el cálculo de entradas y salidas corresponden al promedio obtenido de las pruebas de bombeo realizadas en el 2008, adaptadas al espesor saturado de cada celda.

## 7.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente por bombeo (B), las salidas subterráneas (Sh), descarga a través de manantiales (Dm), flujo base (Qb) y por la evapotranspiración (ETR).

### 7.2.1 Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el volumen de extracción por bombeo asciende a **0.1 hm<sup>3</sup>/año**.

### 7.2.2 Descarga a través de manantiales (Dm)

La descarga a través de manantiales es de **2.0 hm<sup>3</sup>/año**, destinados al abastecimiento de agua potable.

### 7.2.3 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

Las salidas subterráneas fueron calculadas de la misma manera como se evaluaron las entradas subterráneas, a partir de la configuración de elevación del nivel estático presentada en la figura 5. El valor estimado es de **5.0 hm<sup>3</sup> anuales**, tal como se muestra en la tabla 3.

La dirección de flujo es hacia el noreste hacia el acuífero Tampico-Misantla, del estado de Veracruz.

Tabla 3. Cálculo de salidas por flujo subterráneo horizontal

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h <sub>2</sub> -h <sub>1</sub> (m)	Gradiente i	T (m <sup>2</sup> /s)	CAUDAL Q (m <sup>3</sup> /s)	VOLUMEN (hm <sup>3</sup> /año)
S1	800	1173	50	0.0426	0.002	0.0682	2.1
S2	580	635	50	0.0787	0.002	0.0913	2.9
Total de salidas							5.0

### 7.2.4 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).

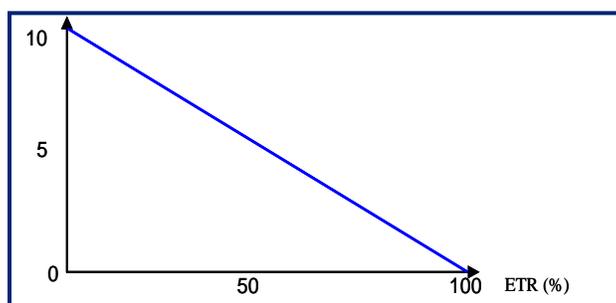
El escurrimiento y el volumen de evapotranspiración real (ETR) es un parámetro utilizado para la recarga potencial de infiltración. Para la obtención de este parámetro se utilizó la ecuación empírica de Turc, que se muestra a continuación, considerando los valores medios anuales de temperatura = 22.0° C y precipitación= 1,700 mm. La lámina de ETR que se obtiene es de 1,094.6 mm.

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

T (°C) =	22		
P(mm) =	1700	P <sup>2</sup> =	2890000
L =	1382.4	L <sup>2</sup> =	1911029.76
ETR (mm)	1094.6		

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.



En el área de balance existe una zona donde los niveles estáticos se encuentran a profundidades menores a 10 m, que se considera el límite de extinción para que se produzca el fenómeno de evapotranspiración, hasta donde penetran las raíces de las plantas en este tipo de clima.

Esta zona tiene una superficie de 30 km<sup>2</sup> de extensión, se localiza en las márgenes de las corrientes que se localizan en la porción norte del acuífero.

Si consideramos esta área donde se registran niveles freáticos someros, con cobertura vegetal cuyas raíces son suficientemente largas y susceptibles de evapotranspirar, y una profundidad promedio al nivel del agua subterránea de 6 m, de acuerdo con el valor de la lámina de ETR obtenida y la gráfica anterior:

$$\text{ETR} = 30 \text{ km}^2 (1.0946 \text{ m}) (0.4) = 13.1$$

$$\text{ETR} = 13.1 \text{ hm}^3/\text{año}$$

### **7.2.5 Flujo Base (Qb)**

Dentro de acuífero se localiza la estación hidrométrica “Atlapexco”, ubicada sobre la corriente del río del mismo nombre, cuenca del Río Los Hules con clave (26464). De acuerdo con los datos de aforo proporcionados por Organismo de Cuenca Golfo Norte de la CONAGUA, para el periodo 1988-2005, el promedio del caudal base en periodo de estiaje es de **5.47 m<sup>3</sup>/s**, que equivalen a un volumen de **172.5 hm<sup>3</sup>/año**.

### **7.3 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.

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 condiciones, 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 lo tanto, para fines del balance de aguas subterráneas,  **$\Delta V(S) = 0$** .

### Solución a la ecuación de balance

Una vez calculadas las componentes de la ecuación de balance, procedemos a evaluar la recarga vertical por lluvia e infiltraciones, mediante la expresión definida, que fue establecida con anterioridad:

$$R_v = Sh + B + ETR + D_m + Q_b \pm \Delta V(S) - E_h$$

Sustituyendo cada una de las componentes de la ecuación de balance evaluadas:

$$R_v = 5.0 + 0.1 + 13.1 + 2.0 + 172.5 \pm 0.0 - 10.0$$
$$R_v = 182.7 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

La recarga que se podría considerar como el volumen infiltrado, se convierte de manera prácticamente instantánea en escurrimiento de los ríos, que corresponden a una descarga natural comprometida. De esta manera, la recarga total media anual estará definida por la suma de la recarga vertical y las entradas horizontales subterráneas.

$$R = R_v + E_h$$
$$R = 182.7 + 10.0$$
$$R = 192.7 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

## 8 DISPONIBILIDAD

Para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas, se aplica el procedimiento de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000, que establece la metodología para calcular 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 siguiente expresión:

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

- 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 (R) corresponde a la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto en forma de recarga natural como inducida.

Para este acuífero su valor es de **192.7 hm<sup>3</sup> anuales**.

### **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 de este acuífero, se considera un volumen de descarga natural comprometida de **183.7 hm<sup>3</sup>/año**.

Esta corresponde a las salidas a través de manantiales que están comprometidos para abastecimiento de agua potable, el 70% de la evapotranspiración que se debe mantener para preservar el ecosistema ribereño del río Atlapexco, y los 172.5 hm<sup>3</sup> restantes al flujo base.

No se consideran comprometidas las salidas subterráneas debido a que no existe infraestructura hidráulica para su aprovechamiento aguas abajo en el acuífero vecino Tampico-Misantla, del estado de Veracruz.

### **8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)**

Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de **1,552,531 m<sup>3</sup> 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 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, de acuerdo con la expresión definida, 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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 192.7 - 183.7 - 1.552531 \\ \text{DMA} &= 7.447469 \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **7,447,469 m<sup>3</sup> anuales**.

Cabe hacer la aclaración de que el cálculo de la recarga media anual que recibe el acuífero, y por lo tanto de su disponibilidad, se refiere a la porción del acuífero en la que actualmente existe información hidrogeológica para su evaluación.

No se descarta la posibilidad de que su valor sea mayor; sin embargo, no es posible en este momento incluir en el balance una superficie mayor ni los volúmenes de agua que circulan a mayores profundidades que las que actualmente se encuentran en explotación. Conforme se genere mayor y mejor información, especialmente la que se refiere a la piezometría, afloros de manantiales y pruebas de bombeo, se podrá hacer una evaluación posterior para su actualización.