



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA
GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO COSTERA DE VERACRUZ (3006),
ESTADO DE VERACRUZ**

CIUDAD DE MÉXICO, DICIEMBRE 2020

Contenido

1. GENERALIDADES.....	2
1.1. Localización.....	2
1.2. Situación administrativa del acuífero.....	4
2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD.....	5
3. FISIOGRAFÍA.....	8
3.1. Provincia fisiográfica.....	8
3.2. Clima.....	9
3.3. Hidrografía.....	10
3.4. Geomorfología.....	11
4. GEOLOGÍA.....	12
4.1. Estratigrafía.....	14
4.2. Geología estructural.....	26
4.3. Geología del subsuelo.....	27
5. HIDROGEOLOGÍA.....	28
5.1. Tipo de acuífero.....	28
5.2. Parámetros hidráulicos.....	29
5.3. Piezometría.....	29
5.4. Comportamiento hidráulico.....	29
5.4.1. Profundidad al nivel estático.....	29
5.4.2. Elevación del nivel estático.....	30
5.4.3. Evolución del nivel estático.....	31
5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	32
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA.....	33
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	34
7.1. Entradas.....	34
7.1.1. Recarga vertical (Rv).....	34
7.1.2. Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	35
7.1.3. Recarga inducida (Ri).....	36
7.2. Salidas.....	37
7.2.1. Bombeo (B).....	37
7.2.2. Evapotranspiración (ETR).....	37
7.2.3. Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh).....	39
7.2.4. Descarga por flujo base (Dfb).....	39
7.3. Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$	39
8. DISPONIBILIDAD.....	41
8.1 Recarga total media anual (R).....	41
8.2 Descarga natural comprometida (DNC).....	41
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	42
8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	42
9. BIBLIOGRAFÍA.....	43

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 Costera de Veracruz, designado con la clave 3006 del Sistema de Información Geográfica para el Manejo de Agua Subterránea (SIGMAS) de la CONAGUA, se localiza en la porción central del estado de Veracruz, entre los paralelos 19° 03' y 19° 29' de latitud norte y los meridianos 96° 05' y 97° 14' longitud oeste, abarcando una superficie aproximada de 3,059 km².

Limita al norte con los acuíferos Jalapa-Coatepec y Valle de Actopan; al sur con el acuífero Cotaxtla; al noreste con Perote-Zalayeta y al oeste con Libres-Oriental, los tres

primeros pertenecientes al Estado de Veracruz y el último al Estado de Puebla. Al su límite natural es el Golfo de México (figura 1).

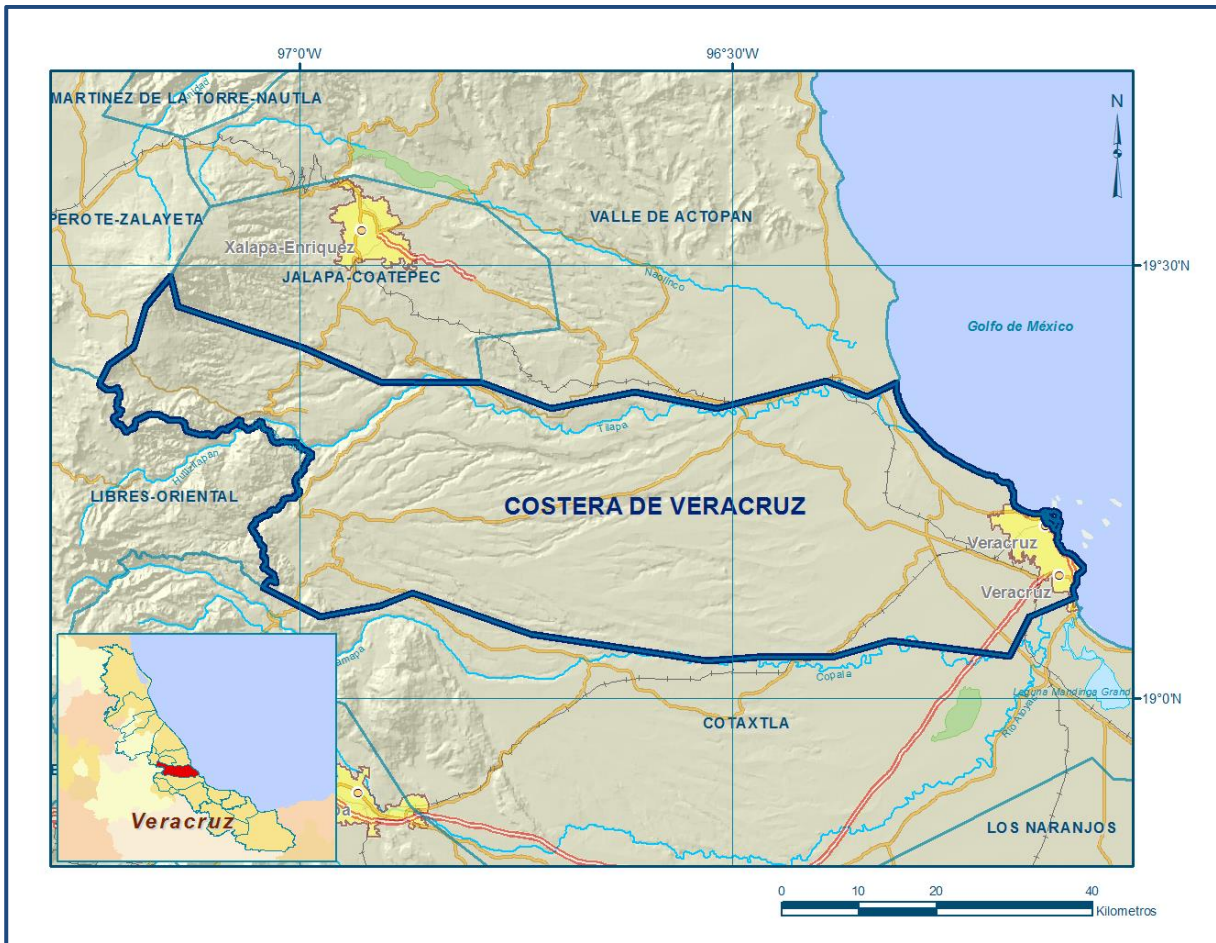


Figura 1. Localización del acuífero

Geopolíticamente la superficie del acuífero comprende totalmente los municipios Ixhuacán de Los Reyes, Cosautlán de Carbajal, Tlaltetela, Comapa, Tlacotepec de Mejía, Totutla, Suchiapa, Tenampa, Paso de Ovejas y Veracruz; casi la totalidad de Huatusco, Ayahualulco, Teocelo, Jalcomulco, Apazapán, Puente Nacional, La Antigua, Boca del Río, Manlio Fabio Altamirano y Soledad de Doblado; así como pequeñas superficies de los municipios Xico, Medellín y Zentla.

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 3006 COSTERA DE VERACRUZ							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	97	12	21.9	19	19	53.8	DEL 1 AL 2 POR EL LIMITE ESTATAL
2	97	13	49.4	19	21	51.9	
3	97	13	13.3	19	23	7.5	
4	97	11	27.2	19	24	19.6	
5	97	10	38.1	19	27	9.1	
6	97	8	56.4	19	29	14.4	
7	97	8	26.4	19	27	6.5	
8	96	59	50.1	19	24	20.5	
9	96	54	23.5	19	21	55.7	
10	96	49	39.1	19	21	53.0	
11	96	47	20.2	19	21	49.9	
12	96	42	36.0	19	20	5.0	
13	96	36	44.1	19	21	12.6	
14	96	31	4.0	19	20	6.1	
15	96	23	29.2	19	21	57.6	
16	96	20	39.7	19	20	54.4	
17	96	18	37.5	19	21	49.4	DEL 17 AL 18 POR LA LINEA DE BAJAMAR A LO LARGO DE LA COSTA
18	96	6	14.5	19	7	0.7	
19	96	9	25.0	19	5	40.2	
20	96	10	46.1	19	2	56.8	
21	96	19	2.6	19	4	0.5	
22	96	23	5.1	19	2	52.1	
23	96	28	17.6	19	2	50.4	
24	96	31	46.1	19	2	34.9	
25	96	43	59.5	19	4	26.6	
26	96	52	10.4	19	7	18.6	
27	96	54	24.0	19	6	26.1	
28	96	58	34.3	19	5	37.6	
29	97	2	30.5	19	7	40.4	DEL 29 AL 1 POR EL LIMITE ESTATAL
1	97	12	21.9	19	19	53.8	

1.2. Situación administrativa del acuífero

El acuífero Costera de Veracruz pertenece al Organismo de Cuenca X “Golfo Centro” y al Consejo de Cuenca “Río Tuxpan al Jamapa”, instalado el 12 de septiembre de 2000. El acuífero se encuentra parcialmente vedado. La porción sur y suroriental de su territorio

se encuentran sujetas a las disposiciones del “*Decreto que establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la zona que comprende la cuenca del Río Jamapa, cuya extensión y límites geopolíticos corresponden a los municipios de Veracruz, Boca del Río y otros del este del estado de Veracruz*” publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 15 de junio de 1970. Esta veda es tipo III, la cual permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.

En la superficie restante no rige ningún decreto de veda para la extracción de agua subterránea. La porción no vedada del acuífero Costera de Veracruz, clave 3006, se encuentra sujeta a las disposiciones del “*ACUERDO General por el que se suspende provisionalmente el libre alumbramiento en las porciones no vedadas, no reglamentadas o no sujetas a reserva de los 175 acuíferos que se indican*”, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 5 de abril de 2013, a través del cual en dicha porción del acuífero, no se permite la perforación de pozos, la construcción de obras de infraestructura o la instalación de cualquier otro mecanismo que tenga por objeto el alumbramiento o extracción de las aguas nacionales del subsuelo, sin contar con concesión o asignación otorgada por la Comisión Nacional del Agua, quien la otorgará conforme a lo establecido por la Ley de Aguas Nacionales, ni se permite el incremento de volúmenes autorizados o registrados previamente por la autoridad, sin la autorización previa de la Comisión Nacional del Agua, hasta en tanto se emita el instrumento jurídico que permita realizar la administración y uso sustentable de las aguas nacionales del subsuelo

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2015, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 2.

El uso principal del agua subterránea es el agrícola. En una porción del extremo oriental del acuífero se localiza el Distrito de Riego 035 “La Antigua”. A la fecha no se ha constituido el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS). En una pequeña porción del noroeste del acuífero, en los límites con los acuíferos Jalapa-Coatepec y Perote-Zalayeta, se encuentra el Parque Nacional Cofre de Perote, decretado el 4 de mayo de 1937.

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la superficie que cubre el acuífero se han llevado a cabo algunos estudios geohidrológicos de evaluación, entre los más importantes podemos mencionar los siguientes:

ESTUDIO DE EVALUACIÓN GEOHIDROLÓGICA DEL ACUÍFERO COSTERA DE VERACRUZ, VERACRUZ. Elaborado por Ariel Construcciones, S.A., para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hídricos en 1982. Su objetivo fue determinar la condición geohidrológica del acuífero. Incluye actividades como censo e hidrometría, nivelación de brocales y ejecución de pruebas de bombeo. Calcula una extracción de 97.1 hm³ anuales, valor muy superior a la recarga, por lo que concluye que el acuífero se encontraba en condición de subexplotación.

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO PARA ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE A LA CIUDAD DE VERACRUZ, VERACRUZ. Elaborado por Investigaciones Técnicas del Subsuelo, S.A., para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hídricos en 1985. Actualiza la piezometría y concluye que la extracción en la zona urbana e industrial ocasionó la sobreexplotación del acuífero y causó la intrusión marina. De continuar con el mismo volumen de extracción, podría inutilizarse el 60% de la zona costera que se encontraba en explotación. Establece que el potencial del acuífero costero es de 1.5 m³/s y que es posible incrementar la extracción en la zona ubicada al norte del puerto de Veracruz, en donde no se manifiesta la intrusión marina. Recomienda la rehabilitación de pozos y la construcción y terminación de otros con diseños que se adapten a la presencia de arenas finas, y el monitoreo continuo de los niveles estáticos y de la salinidad.

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DE EVALUACIÓN, CON ANÁLISIS DE LA INTERFASE SALINA, EN LA ZONA CENTRO-SUR DE LA CIUDAD DE VERACRUZ, VERACRUZ. Elaborado por Constructora Occidental de Desarrollo de Ingeniería y Perforaciones, S.A. (CODIPSA) en 1994, para Grupo Azteca, Refrescos Veracruzanos, S.A. de C.V. Su objetivo fue definir las condiciones geohidrológicas, piezométricas, hidrodinámicas, hidrogeológicas e hidrogeoquímicas de los acuíferos de la zona, para determinar la factibilidad de extraer un volumen adicional para la empresa de refrescos. Concluye que el agua subterránea tiene una concentración promedio de sólidos totales disueltos de 667 ppm, que la posición de la interfase se estima a 225 m de profundidad, asumiendo el equilibrio hidrodinámico y que es factible perforar un pozo nuevo a 60 m de profundidad en las instalaciones de la empresa.

RED DE REFERENCIA DE CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN EL ACUÍFERO COSTERA DE VERACRUZ, 1995. Realizado por el Laboratorio de Calidad del Agua de la Comisión Nacional del Agua, Gerencia Regional Golfo Centro. Este trabajo se enfoca a resultados de la calidad de agua registrada en diferentes pozos dentro del acuífero, los análisis químicos registran un historial de monitoreo del 1995 a 2007.

ACTUALIZACIÓN DEL INVENTARIO DE APROVECHAMIENTOS DE AGUA SUBTERRÁNEA EN EL ACUÍFERO COSTERA DE VERACRUZ, 1998. Elaborado por la Comisión Nacional del Agua, Gerencia Regional Golfo Centro, Subgerencia Técnica.

El principal objetivo fue actualizar el censo de aprovechamientos, así como determinar la magnitud de la extracción de la extracción y de la recarga del agua subterránea.

DETERMINACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA EN EL ACUÍFERO COSTERA DE VERACRUZ, ESTADO DE VERACRUZ. Elaborado por la Gerencia de Aguas Subterráneas de la Comisión Nacional del Agua en el año 2002.

Su contenido sirvió para sustentar los valores de la disponibilidad media anual del agua subterránea en el acuífero, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 31 de enero del 2003. De acuerdo con el análisis realizado, se obtuvo un volumen disponible de 171.6 hm³ anuales.

ACTUALIZACIÓN DE MEDICIONES PIEZOMÉTRICAS EN LOS ACUIFEROS COSTERA DE VERACRUZ Y ORIZABA-CÓRDOBA, EN EL ESTADO DE VERACRUZ, Y VALLE DE TEHUACÁN EN EL ESTADO DE PUEBLA. Elaborado por Lesser y Asociados, S.A. en 2002 para la Comisión Nacional del Agua.

Entre sus objetivos destacan establecer una red de monitoreo confiable para la obtención de información hidrogeológica y piezométrica de los acuíferos; actualizar el conocimiento de la posición de los niveles del agua subterránea a través de la red de medición, determinar con precisión las elevaciones de los brocales o de los puntos de medición en cada uno de los vértices de la red de medición, recopilar, integrar y analizar la información piezométrica y de calidad del agua para elaborar los planos con las configuraciones respectivas y determinar el modelo conceptual hidrogeológico del acuífero.

ESTUDIO PARA LA INSTRUMENTACIÓN DE LA RED PIEZOMÉTRICA EN LOS ACUÍFEROS VALLE DE TEHUACÁN Y COSTERA DE VERACRUZ EN LOS ESTADOS DE PUEBLA Y VERACRUZ, 2007. Realizado por el Organismo de Cuenca Golfo Centro.

Este estudio tuvo como objetivo la selección de pozos ubicados en el acuífero Costera de Veracruz para instalar transductores de presión en forma permanente, que permitan determinar la posición de los niveles del agua subterránea y su evolución a lo largo del tiempo.

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO PARA ACTUALIZAR LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUAS SUBTERRÁNEAS DEL ACUÍFERO COSTERA DE VERACRUZ, EN EL ESTADO DE VERACRUZ. Realizado en el 2013 por Estudios y Proyectos del Subsuelo S.A. de C.V. (EPSA) para la Comisión Nacional del Agua.

El estudio tuvo como objetivo general el conocimiento de la condición geohidrológica de los acuíferos, recabar información para calcular su recarga y determinar la disponibilidad media anual de agua subterránea. Mediante la realización de actividades de campo que incluyeron censo de

aprovechamientos, piezometría, hidrometría de las extracciones, realización de pruebas de bombeo, nivelación de brocales de pozos y reconocimientos geológicos, fue posible actualizar el balance de aguas subterráneas para calcular su recarga total media anual. De sus resultados se determinarán las causales de interés y de utilidad pública señaladas en la Ley de Aguas Nacionales, para establecer la medida regulatoria que proceda.

Este trabajo constituye la base para la elaboración de este documento, por lo que sus resultados y conclusiones se presentan en los apartados correspondientes.

3. FISIOGRAFÍA

3.1. Provincia fisiográfica

De acuerdo con la clasificación de Raisz, 1964, el área se encuentra comprendida dentro de dos Provincias Fisiográficas: su extremo occidental se ubica en el Eje Neovolcánico y la superficie restante pertenece a la Planicie Costera del Golfo.

Por otra parte, de acuerdo con la delimitación fisiográfica realizada por INEGI (1981), el acuífero Costera de Veracruz se encuentra ubicado en la Provincia Fisiográfica Eje Neovolcánico, Subprovincias Lagos y Volcanes de Anáhuac y Chiconquiaco; y en la Provincia Fisiográfica Planicie Costera del Golfo Sur, Subprovincia Llanura Costera Veracruzana.

Eje Neovolcánico abarca parte de los estados de Jalisco, Michoacán, Guanajuato, Querétaro, México, Hidalgo, Colima, Puebla y Veracruz, así como todo el estado de Tlaxcala y el Distrito Federal. Se caracteriza por ser una enorme masa de rocas volcánicas de todos tipos, acumulada en innumerables y sucesivas etapas, desde mediados del Terciario (unos 35 millones de años atrás) hasta el presente. La integran grandes sierras volcánicas, extensas coladas lávicas, conos dispersos o en enjambre, amplios escudo-volcanes de basalto, depósitos de arena y cenizas. Presenta también la cadena de grandes estrato-volcanes denominada propiamente "Eje Neovolcánico", integrado por los volcanes de Colima, Tancítaro, Zináltécatl (Nevado de Toluca), Popocatépetl, Iztaccíhuatl, Matlacuétl (Malinche) y Citlaltépetl (Pico de Orizaba), que casi en línea recta atraviesan el país, más o menos sobre el paralelo 19. Representan el trazo de la gran Falla Clarión.

En el estado de Veracruz se extiende casi hasta a la línea de costa en el Golfo de México, cerca de los conos de tezontle llamados Los Atlixcos. El conjunto fisiográfico de serranías presenta dos sistemas de elevaciones; la primera ubicada al oeste, en donde se observan cumbres que alcanzan 4,250 msnm y la segunda en la porción media cuenta con una

ancha cima cónica que alcanza una altura de unos 2,000 msnm; en la región de Xalapa-Naolinco quedan unidas para formar un solo macizo montañoso que separa a las unidades geomorfológicas de las Llanuras Costera Veracruzana y del Golfo Norte.

La Subprovincia Lagos y Volcanes de Anáhuac se caracteriza por estar conformada de montañas plegadas con orientación casi norte-sur, construidas a partir de secuencias marinas detríticas y calcáreas, separadas por valles aluviales y llanuras formadas a partir de antiguas cuencas lacustres, donde aparecen elevaciones aisladas, mientras que en la subprovincia Chiconquiaco las topofomas observadas están asociadas con lomeríos, que pueden ser clasificados en lomeríos suaves, lomeríos suaves con cañadas y lomeríos de colinas redondeas con mesetas.

La Subprovincia Llanura Costera Veracruzana se distingue por la presencia de lomeríos suaves ubicados al este y noroeste, y en una mayor extensión se identifican llanuras con sistemas lagunares permanentes que ocupan extensas superficies. De los rasgos fisiográficos representativos del acuífero, se distinguen zonas de llanuras inundables, barras, dunas, llanuras costeras con dunas y en el extremo oriental, lomeríos suaves con llanos asociados.

3.2. Clima

Con base en la clasificación de climas elaboradas por W. Köppen, modificada por Enriqueta García, para las condiciones de la República Mexicana, en la superficie del acuífero está representada una variación de climas que depende en gran medida de las elevaciones topográficas. De esta manera, en la región occidental y noroccidental, donde se registran las mayores elevaciones, se presentan climas fríos y conforme se desplaza hacia la línea de costa, el clima cambia gradualmente a cálido sub-húmedo.

La porción montañosa presenta climas templado húmedos clasificados como C(m) donde se registran las menores temperaturas, y el tipo semifrío subhúmedo C(E)(w₂)(w); los cuales cambian a clima semicálido húmedo con lluvias abundantes todo el año, ((A)C(fm) y (A)C(m)), hacia una franja ubicada entre las localidades de Tomatlán y Tepatlaxco. La porción central y oriental del acuífero se caracteriza por presentar climas del tipo cálido sub-húmedo con lluvias en verano (Aw₂(w) y Aw₁(w)).

Para la determinación de las variables climatológicas se cuenta con información de 11 estaciones climatológicas que tiene influencia en el área del acuífero: El Buzón, El Copital, El Tejar, El Faisán, Loma Bonita, Manlio Fabio Altamirano, Mata Anona, Puente Jula, Puente Nacional, Veracruz y José Cardel. Con los registros obtenidos para el periodo 1951-2010 y utilizando el método de isoyetas, se determinaron valores de precipitación y

temperatura media anual de **1,399 mm** y **25.3 °C** respectivamente. Con respecto a la evaporación potencial, su valor promedio es de **1,445 mm** anuales

El régimen pluvial presenta, en términos generales, dos períodos de ocurrencia uno en verano de mayo a octubre, cuando se registran los valores más altos, y otro de lluvias invernales menos significativas que abarca de noviembre a febrero cuando la región es afectada por los frentes fríos. La precipitación media anual varía de 1079 a 1750 mm en toda la superficie del acuífero, rango amplio que depende de las variaciones topográficas; los valores más altos se registran en la región montañosa y los menores hacia el centro y región oriental del acuífero. Las lluvias más intensas se presentan en el periodo comprendido de julio a septiembre.

Respecto a la temperatura, los valores extremos son de 30.0 y 20.3 °C. En algunos sitios de la región montañosa, se registran incluso valores cercanos a 0° C. Con respecto a la variación media mensual, se puede afirmar que las temperaturas más altas se presentan de mayo a agosto y las más bajas durante diciembre y enero. La evaporación potencial media anual registra valores extremos que varían de 723 a 1962 mm, inferiores al promedio que se registra en la región de la zona aledaña a Soledad de Doblado y sus alrededores, en tanto que valores mayores al promedio se presentan localmente en áreas cercanas a la zona costera

3.3. Hidrografía

El acuífero se ubica en la Región Hidrológica RH 28 "Río Papaloapan", Subregión Hidrológica "Ríos Actopan, La Antigua y Jamapa", Cuenca del Río Jamapa y Otros, en la vertiente sur del Golfo de México, aproximadamente en la parte media del arco que forma el litoral mexicano. Está integrada por las cuencas de los ríos Papaloapan y Jamapa-Cotaxtla, caracterizadas por la presencia de numerosos ríos de régimen permanente y algunas lagunas. Abarca gran parte de la porción centro sur del Estado de Veracruz, en la que las corrientes que la integran tienen una disposición radial y paralela, controlada por algunas elevaciones de la Sierra Madre Oriental y el Eje Neovolcánico (Cofre de Perote y Pico de Orizaba), así como por otros sistemas volcánicos y sierras plegadas compuestas por rocas sedimentarias marinas.

La división hidrológica efectuada en el acuífero, permitió definir cuencas abiertas, cerradas y otras de menor extensión que descargan directamente al Golfo de México. Entre las abiertas se distingue la cuenca del Río La Antigua que dentro del acuífero ocupa una superficie de 604 km² con una longitud de 41 km, en la que se ubica la estación hidrométrica denominada Cardel; y la cuenca del río Jamapa, con una longitud

de 72 km en el acuífero y una superficie de 173.3 km², en la que se localiza la estación hidrométrica denominada El Tejar.

En esta región hidrológica se tienen dos cuencas principales: La Cuenca del Papaloapan y la Cuenca del Río Jamapa. En esta última se ubica el Distrito de Desarrollo Rural 007 que es atravesado por las sub-cuencas de los ríos Cotaxtla (Atoyac) y Blanco. Su área territorial se extiende a todo lo ancho de la parte baja y la desembocadura de dichos ríos. Existen otras corrientes de menor caudal que también atraviesan el territorio del Distrito: ríos Otapan, Pozuelos y Las Pozas, en el municipio de Tlalixcoyan, ríos Moreno y San Juan en los municipios de Manlio F. Altamirano y Veracruz.

Además existen numerosos cuerpos de agua superficiales o lagunas, entre las más relevantes destacan la Laguna de Alvarado y Camaronera localizadas en el municipio de Alvarado; La Laguna y Mandinga, en el municipio de Medellín y la Laguna San Julián en el municipio de Veracruz, además de muchos otros cuerpos de menor importancia

3.4. Geomorfología

La porción occidental del área que cubre el acuífero, que pertenece a la Subprovincia Lagos y Volcanes de Anáhuac, se distingue por una morfología de planicies volcánicas con barrancas profundas y sierras entre las que destaca un estratovolcán aislado, mientras que en la subprovincia Chiconquiaco las topofomas observadas están asociadas con lomeríos, que pueden ser clasificados en lomeríos suaves, lomeríos suaves con cañadas, lomeríos de colinas redondeas con mesetas y planicies volcánicas con barrancas profundas.

La zona central se caracteriza por la presencia de una extensa planicie con elevaciones entre los 200 y 20 msnm, ligeramente inclinada al este, donde se depositaron materiales vulcanosedimentarios y aluviales, desde Puente Nacional y Paso de Ovejas, en el norte, hasta Manlio Fabio Altamirano y Soledad de Doblado, en el sur. Por efecto de una erosión diferencial, estas estructuras contrastan con las barrancas escarpadas por donde circulan los arroyos y ríos principales. En la zona de depositación de materiales fluvio-aluviales, la densidad de drenaje tiende a disminuir, formando zonas bajas inundables con formación de lagunas intermitentes o zonas pantanosas durante la época de lluvias, en tanto que la zona litoral presenta características semejantes a las zonas anteriores, sólo que existe una interacción con los procesos litorales con mayor número de zonas de inundación y presencia de sistemas de dunas, con un drenaje incipiente y elevaciones no mayores a los 50 msnm.

4. GEOLOGÍA

La superficie cubierta por el acuífero está comprendida en tres provincias geológicas; la cuenca paleógena-neógena de Veracruz y en menor proporción en el Eje Neovolcánico y Sierra de Juárez. La primera se caracteriza por la presencia de depósitos de lutitas y areniscas con influencia calcárea desde el Paleoceno hasta el Oligoceno y por depósitos volcánicos durante todo el Mioceno, Plioceno y Pleistoceno. Este es el sistema al que corresponden a los depósitos más importantes que se observan en la zona (figura 2).

Hacia el límite occidental de la Cuenca Cenozoica de Veracruz se desarrollan estructuras en rocas calizas, algunas de ellas con intenso desarrollo cárstico, en las estribaciones de la Sierra Madre Oriental; mientras que en la porción de la Cuenca Terciaria de Veracruz, están cubiertas por unidades sedimentarias del Paleógeno-Neógeno.

A nivel regional La unidad sedimentaria más antigua corresponde a la Formación Huayacocotla del Jurásico Superior, constituida por lutitas apizarradas, filitas y areniscas, que es cubierta por las formaciones Cahuwasas y Tenexcate del Jurásico Medio, constituidas por una alternancia de limolitas, areniscas y conglomerados polimícticos con matriz arcillo-arenosa (Formación Cahuwasas) y por conglomerados en una matriz areno-tobácea (Formación Tenexcate), sobreyacida por un paquete conformado por las formaciones Tepexic, Santiago, Tamán, San Pedro y Pimienta del Jurásico, constituido por calcarenitas, lutitas calcáreas, calizas arcillosas y calizas con bandas de pedernal.

El Cretácico Inferior está representado por rocas calcáreas de ambiente de cuenca, representadas por calizas con pedernal y esporádicos horizontes de lutitas de la Formación Tamaulipas Inferior del Berriasiano-Aptiano, cuyo contacto inferior es transicional y concordante con la Formación Pimienta; el contacto superior es concordante con calizas y lutitas calcáreas de la Formación Tamaulipas Superior del Albiano-Cenomaniano. Durante el Cretácico Superior se depositaron calizas con nódulos y lentes de pedernal con lutitas calcáreas laminares que constituyen la Formación Agua Nueva del Turoniano y calizas arcillosas, margas y lutitas bentoníticas de la Formación San Felipe del Coniaciano-Santoniano.

Las unidades cretácicas anteriores son compartidas parcialmente con la Cuenca de Zongolica, que se caracteriza por el desarrollo de una plataforma interna íntimamente relacionada con la Sierra Madre Oriental, esta facies de plataforma está representada por calizas masivas de la Formación Orizaba del Albiano-Cenomaniano, calizas con intercalaciones delgadas de lutitas arenosas de la Formación Maltrata del Turoniano, así como calizas con nódulos de pedernal que constituyen la Formación Guzmantla del Turoniano-Santoniano.

Cubriendo tanto a las facies de cuenca de la Sierra Madre Oriental como a las facies de plataforma de la cuenca de Zongolica, afloran margas y lutitas con horizontes de areniscas y bentonitas del Campaniano-Maastrichtiano de la Formación Méndez.

La cuenca Tampico-Misantla del Terciario está representada por sedimentos marinos clásticos, los más antiguos corresponde a una secuencia flysch conformada por lutitas y areniscas calcáreas con margas, pertenecientes a la Formación Chicontepec del Paleoceno Superior-Eoceno Inferior, cubierta transicionalmente por lutitas y areniscas de la Formación Aragón del Eoceno Inferior, que a su vez es cubierta por lutitas y areniscas de la Formación Guayabal del Eoceno Medio, sobreyacida por areniscas conglomeráticas y lutitas de la Formación Chapopote del Eoceno Superior. Por último lutitas y areniscas conglomeráticas de la Formación Horcones del Oligoceno Inferior, que es cubierta concordantemente por lutitas y areniscas de la Formación Palma Real del Oligoceno Inferior-Medio. Toda esta secuencia está afectada por un intrusivo que varía de diorita a tonalita. De la Cuenca de Veracruz sólo aflora la Formación Velasco, constituida por lutitas y margas, y la Formación Concepción formada principalmente por areniscas mal cementadas y conglomerados constituidos por fragmentos calcáreos.

En la región las rocas volcánicas pertenecen al Eje Neovolcánico y están representadas por cuatro campos volcánicos: Los Humeros-Acocolco, San Salvador El Seco, La Malinche y Palma Sola. Este último es el que se encuentra más cercano a la superficie del acuífero, en el que el magmatismo calcoalcalino basal del Eje Neovolcánico está representado por las andesitas Palma Sola del Mioceno Superior y por lavas alcalinas representadas por basalto, andesitas basálticas y brechas volcánicas basálticas. En el Plioceno Superior-Pleistoceno se precipitaron depósitos de travertino; simultáneamente en la porción centro-oriental ocurrían erupciones basálticas calcoalcalinas denominadas Basaltos Xalapa, seguida de una actividad explosiva alcalina correspondiente a las tobas basálticas Chiconquiaco. Por último, se depositaron limos y arenas, depósitos aluviales y sedimentos eólicos (Carta Geológico-Minera Veracruz E14-3, escala 1:250,000. SGM, 2002).

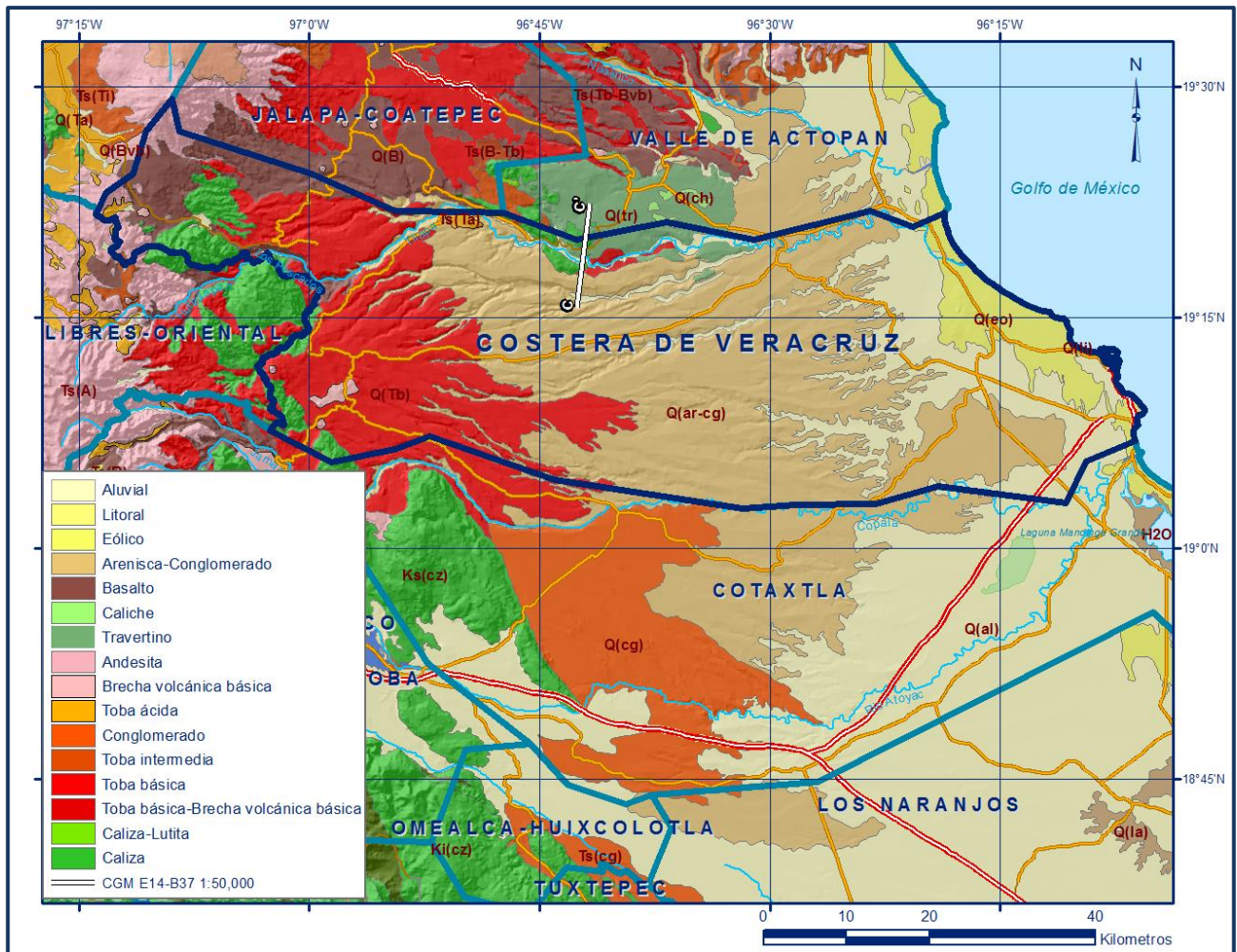


Figura 2. Geología general del acuífero

4.1. Estratigrafía

En la región cubierta por el acuífero afloran rocas sedimentarias y volcánicas, cuyo registro estratigráfico comprende del Jurásico Inferior al Reciente. La mayor superficie del acuífero está cubierta por rocas que varían en edad del Paleoceno al Mioceno, específicamente en el área del acuífero se encuentran sedimentos del Oligoceno, correspondientes a la Formación Palma Real. A continuación, se describen las distintas unidades litológicas de la más antigua a la más reciente:

JURÁSICO

Formación Huayacocotla.

Es la unidad más antigua que aflora, consiste de areniscas de color gris verdoso dispuestas en estratos de 20 a 60 cm, plegados y con estructura "boudinage", intercaladas con un conglomerado de color verde oscuro conformado por fragmentos de cuarzo y rocas metamórficas, así como con lutitas carbonosas de color gris oscuro.

Subyace en forma transicional a la Formación Cahuwasas, en tanto que su contacto inferior no se observa.

Formación Cahuwasas

Está constituida por limolitas de color rojo, areniscas y conglomerados, dispuestas en estratos de espesor de 20 a 90 cm, cubiertas en forma transicional por un paquete representado por las formaciones Santiago, Tamán y Pimienta. Estas formaciones están agrupadas en una misma unidad debido a que sus litologías son muy similares y por la dificultad para ser cartografiadas. Están compuestas por calizas arcillosas en capas de 10 a 40 cm alternando con lutitas calcáreas. Presentan clivaje y pliegues sin-sedimentarios, con presencia frecuente de amonitas, radiolarios y bioclastos indeterminados.

Formación Tamán

Definida por Heim en 1926 y después Erben la describe en su localidad tipo Tamán, ubicada en las cercanías de Tamazunchale, SLP. Está constituida por una secuencia de calizas bien estratificadas, de color negro, de grano fino y microcristalinas, con intercalaciones de lutitas negras. Incluyen una alternancia de lutitas calcáreas de color negro, carbonosas, con calizas arcillosas de color gris oscuro, dispuestas en estratos de 40 a 50 cm de espesor; las lutitas se presentan en estratos de 10 a 15 cm de espesor que intemperizan en tonos rojizos.

Se considera una unidad de gran espesor, alrededor de 700 m, en las paleo depresiones; sin embargo, sus espesores disminuyen notablemente hacia las partes altas del paleo relieve, incluso hasta desaparecer. Subyace en forma concordante y transicional a la Formación Pimienta, observable en superficie y en el subsuelo a través de los pozos petroleros; en algunas localidades sobreyace a la Formación Santiago y en otras llega a cubrir al basamento del Triásico. Presentan estratos de biomicrita, con organismos pelágicos, como radiolarios, equidoermos y *Rhaxella*. Su macrofauna permite establecer su edad, que corresponde al Oxfordiano-Kimmeridgiano. Su depósito ocurrió en las márgenes de una plataforma. Se correlaciona con la Formación San Andrés al sur de la Cuenca de Chicontepec.

Formación Santiago

Esta unidad fue propuesta en forma inédita por Reyes (1964 en Cantú-Chapa, 1969) como miembro de la Formación Tamán, a la cual denominó "Lutita Santiago" y propuso la localidad tipo en la ladera oeste del Río Moctezuma (Tamán, San Luis Potosí), cerca de la desembocadura del Arroyo Santiago, del cual se deriva su nombre. Cantú-Chapa (1969) eleva su rango a formación, argumentando las marcadas diferencias de litofacies, biofacies y de edad con respecto a la Formación Tamán. Reyes (1964) reconoce un cuerpo de "lutitas calcáreas de color gris oscuro hasta de 40 cm de espesor, intemperiza

a café pardo o café rojizo, presentan un clivaje diagonal a los planos de estratificación que a veces dan lugar a apreciaciones erróneas en la medición de los datos estructurales, además poseen nódulos calcáreos intercalados". Cantú-Chapa (1971) reconoce que la base de la formación está representada por lutitas negras a gris oscuro, muy fracturadas, con nódulos calcáreos de color gris oscuro y capas de caliza cuyos espesores varían de 2 a 10 cm. Su espesor varía de 160 a 190 m.

Formación Pimienta

Definida por Heim en 1926 en la localidad tipo que se encuentra en el Rancho Pimienta, ubicado en el Valle del Río Moctezuma, en el km 337 de la carretera México-Laredo, en donde está compuesta por una secuencia de calizas de color gris oscuro dispuesta en estratos delgados con bandas de pedernal. Contiene también calizas mudstone-wackestone y calizas arcillosas de color negro a gris oscuro, intercaladas con capas delgadas de lutitas calcáreas y lutitas laminares negras, con abundante materia orgánica; presenta algunos lentes de pedernal negro. Los estratos de carbonatos se distinguen por contener abundantes foraminíferos y un horizonte de aproximadamente 50 cm de espesor de coquinas con abundantes amonitas dentro de las calizas arcillosas de color negro. Aflora únicamente en las inmediaciones del poblado San Miguel Tenextatiloyan, en un corte de la carretera que une a Libres con Oriental, donde se presenta muy plegada, y en otros dos afloramientos en la porción norte del área. De acuerdo con su contenido faunístico, que incluye especies como *Calpionella alpina*, restos de equinodermos y tintínidos, se determinó que su edad corresponde al periodo Kimmeridgiano-Tithoniano, marcando en su parte superior el Límite Jurásico-Cretácico. Se infiere que se depositó en condiciones de plataforma con comunicación al mar abierto con importante aporte de terrígenos finos, con cambio litológico hacia la cima que se explica por una variación en las condiciones batimétricas que corresponden a mares someros de baja energía.

CRETÁCICO INFERIOR

Formación Tamaulipas

Nombre definido por Stephenson, J. en 1921 y generalizado por J.M. Muir en 1936. Está representada por calizas que afloran en la Sierra de Tamaulipas. Posiblemente el Cañón de la Borrega, ubicado al oriente de la estación de ferrocarril de Zaragoza sea uno de los lugares más accesibles para estudiarla.

Formación Tamaulipas Inferior

Fue descrita como calizas de estratificación mediana a gruesa, de color gris claro y gris oscuro, con nódulos esferoidales de pedernal y dolomitización en su porción basal, en su localidad tipo ubicada en el Cañón de La Borrega, Tamaulipas. Aflora también en los cañones que cortan la sierra de Tamaulipas, San Carlos y la Sierra Madre Oriental, su

exposición está limitada a estas pequeñas áreas, donde está constituida por calizas de textura microcristalina y dolomitas de color gris a gris oscuro, que presentan líneas estilolíticas paralelas a los planos de estratificación, dispuestas en estratos que varían de unos centímetros a dos metros de espesor, con pequeños mantos de óxido de fierro inter-estratificados y lajamiento perpendicular al rumbo de la estratificación. Su espesor alcanza hasta 400 m.

Está representada por tres miembros, que del más antiguo al más reciente son el calcarenítico, el bentonítico y el calcilutítico. El miembro calcarenítico presenta colores gris, pardo y crema, con escasos pseudoolitos diseminados cuyos núcleos son microfósiles y granos de cuarzo, así como intercalaciones de capas delgadas de caliza criptocristalina de color gris verdoso a crema claro, el miembro bentonítico está constituido por bentonita de color verde y gris verdoso, con intercalaciones de caliza criptocristalina de colores gris claro y crema; también presenta capas delgadas de caliza de color pardo claro de textura fina, ligeramente arcillosa, en ocasiones hacia la cima se observa la formación de nódulos de pedernal de colores blanco lechoso, pardo y negro. El tercer miembro está representado por calizas de color crema o calcilutita de colores crema y gris claro de aspecto de porcelana y, con frecuencia, por delgadas capas de lutita bituminosa negra y laminar, capas de caliza ligeramente arcillosa, nódulos de pedernal de color pardo y blanco lechosos e intercalaciones de capas de bentonita de color verde claro.

Sobreyace a las calizas y lutitas de la Formación Pimienta, y a su vez está cubierta de manera concordante por los sedimentos de la Formación Tamaulipas Superior. Aunque en el área de Tlatlauquitepec, ubicada al norte fuera del área del acuífero, está cubierta en contacto normal por la caliza arcillosa del Horizonte Otates al que, a su vez, sobreyace la Formación Tamaulipas Superior.

Su edad corresponde al Neocomiano en facies de Cuenca. En la región de Poza Rica gradúa lateralmente a la Formación El Abra, de la cual proviene el nombre Tamabra, que corresponde a rocas del Albiano-Cenomaniano y posiblemente parte del Aptiano. Las rocas de la Formación Tamaulipas Inferior son de las más persistentes en la porción central y este de México y formaron posiblemente parte de la gran Cuenca o Geosinclinal Mexicano Mesozoico. En todas estas regiones su contacto superior está bien limitado por el Horizonte Otates de edad aptiana.

Formación Otates

Es un intervalo arcillo-calcáreo que separa estratigráficamente a las calizas de las formaciones geológicas Tamaulipas Inferior y Superior. Está constituida por calizas arcillosas de estructura laminar ligeramente carbonosas de color gris oscuro, su espesor

varía de 6 a 13 m. Su localidad tipo se ubica en el Cañón de Otates situado a 7 km de Agua Nueva, en el Cañón de La Borrega, Tamaulipas. Este horizonte llamado también Formación, está representado por calizas arcillosas de color gris, gris oscuro y negro con estratos de espesor muy variable desde unos cuantos cm hasta 0.50 m, intercalados en lutita laminada del mismo color. En ocasiones contiene pedernal negro. En casi todas las localidades es de carácter muy bituminoso. Se correlaciona con la Formación La Peña en el noreste de México.

Formación Tamaulipas Superior

Es una sección de estratos de espesor medio de calizas criptocristalinas de color crema claro, con líneas estilolíticas paralelas a los planos de estratificación y lentes de pedernal gris. En su secuencia es posible distinguir dos miembros: el inferior está representado por calizas de textura fina, de color crema en capas de espesor medio, ocasionalmente con lentes de pedernal; el miembro superior se compone de calizas de color amarillento en capas de espesor delgado con nódulos de pedernal de color gris. Sus exposiciones se presentan en los cañones que cortan la sierra de Tamaulipas y la Sierra Madre Oriental.

Su origen es batial (o de cuenca), de acuerdo con su contenido de amonitas; aflora desde la Sierra de San Carlos, Sierra de Tamaulipas, gran parte de la Sierra Madre Oriental y el subsuelo de los campos de Ébano, Pánuco y SW de Tampico, donde gradúa lateralmente a la facies arrecifal de la Formación El Abra. También se encuentra en la región de Poza Rica al norte y al oeste, donde es isócrona con las turbiditas productoras de los campos de Poza Rica, constituyendo la unidad denominada Formación Tamabra. De acuerdo con su contenido fósil, su edad corresponde al Albiano–Cenomaniano, yace debajo de las calizas de la Formación Agua Nueva y sobre rocas del horizonte Otates. Su espesor es inferior a 400 m y junto con las rocas de la misma edad forman la gran cuenca o geosinclinal mexicano.

CRETÁCICO SUPERIOR

Formación Agua Nueva

Nombre introducido por Stephenson (1921) y después por Muir, J. M. (1936) para referirse a los sedimentos que descansan directamente sobre la Formación Tamaulipas Superior. Se distinguen dos unidades; la inferior consiste de capas de estratificación gruesa a media (hasta 0.70 m.), que contienen laminaciones de lutita negra quebradiza. La parte media de la sección es más arcillosa, en delgadas capas de carácter laminar. Las lutitas negras de esta parte contienen impresiones de *Inoceramus Labiatus*. La parte superior muestra graduación a rocas de la Formación San Felipe y consiste de calizas de estratificación media y delgada. El espesor de la sección tipo es de 127 m. Se correlaciona con la Formación Indidura del NE de México.

Formación San Felipe

Esta formación fue descrita inicialmente por Jeffreys en 1910, en su localidad tipo de la ranchería de San Felipe, San Luis Potosí, ubicada a 6 km al este de Ciudad Valles, donde consiste de calizas arcillosas de colores gris claro y verde, con frecuentes intercalaciones de lutitas bentónicas de colores verde y gris claro. Son típicos los intervalos de calizas moteadas con manchas ovaladas oscuras que pueden ser debidas a la presencia de algas. Está constituida por una secuencia rítmica de calizas arcillosas de color gris claro y lutitas calcáreas color café, que presentan intercalaciones de calizas arcillosas, margas de color gris y verde, así como bentonita, que hacia su cima desaparece la presencia de estratos calcáreos. Subyace a la Formación Méndez cuyo contacto es transicional y sobreyace a la Formación Agua Nueva en forma concordante. Sus afloramientos presentan una gran área de exposición sobre el flanco oriental de la Sierra Madre Oriental, en forma de una serie de pequeños anticlinales y sinclinales, así como en el flanco poniente de la sierra de Tamaulipas. En el subsuelo de la planicie costera del Golfo de México cambia de facies con las formaciones Tamasopo, Soyatal e Indidura.

Su espesor promedio es de 130 m y se correlaciona con las formaciones Parras en el estado de Coahuila, Tamasopo de la Plataforma Valles-San Luis Potosí, Indidura de la cuenca del Centro de México, Guzmantla de la Plataforma de Córdoba y Cuautla de la cuenca Guerrero-Morelos.

Formación Méndez

Definida por Jeffreys en 1910, es el nombre que se utilizó para describir a una serie de lutitas calcáreas de colores gris y café con fractura nodular, que sobreyace a la Formación San Felipe. Su localidad tipo se ubica sobre el km 62 de la vía del ferrocarril Tampico-San Luis Potosí, a 300 m al este de la estación Méndez. En el área del acuífero está constituida por una serie de lutitas calcáreas de colores gris azulado y café, con fractura nodular y concoidal, que sobreyace a la Formación San Felipe, con aislados estratos de areniscas de grano fino color café, que cubren discordantemente a los conglomerados y depósitos aluviales. Su fracturamiento es típico por el intemperismo, produciéndose un intenso laminamiento y pizarrosidad, que originan montículos con apariencia de dunas, subyace discordantemente a los conglomerados y/o depósitos aluviales. Su espesor promedio es de 300 m y se correlaciona dentro del área de estudio con la unidad arcillo-arenosa del Cretácico Superior (Formación Cárdenas). Se le asigna una edad Campaniano-Maestrichtiano y aparentemente fue depositada en un fondo marino de aguas relativamente profundas, con abundante aporte de material terrígeno fino.

Sobreyace en forma discordante a la Formación Tamaulipas y concordante a la Formación San Felipe, con aislados estratos de areniscas de grano fino color café, que cubren discordantemente a los conglomerados y depósitos aluviales; subyace

concordantemente a la unidad arcillosa del Paleoceno, expuesta al oeste del área de estudio. Sus afloramientos se distribuyen ampliamente en toda la superficie del acuífero. Está intrusionada por algunos diques, cuyo fracturamiento resultante le confiere permeabilidad secundaria.

Las unidades cretácicas anteriores son compartidas parcialmente con la Cuenca de Zongolica, que se caracteriza por el desarrollo de una plataforma interna íntimamente relacionada con la cuenca de la Sierra Madre Oriental. Esta facies de plataforma está representada por las formaciones Orizaba, Maltrata y Guzmantla.

Formación Orizaba

Está conformada por calizas de tipo arrecifal con abundante fauna bentónica, que representan un cambio de facies de cuenca de la Formación Tamaulipas Superior. Por lo general, se presenta en forma masiva y únicamente en las zonas de transición o cambio de facies se encuentra estratificada; forma grandes bancos con abundantes fragmentos de mega fósiles tales como caprínidos, gasterópodos (turritelas y nerineas), corales y fragmentos de pelecípodo. Por su microfauna, se le asigna una edad Albiano-Cenomaniano. Por su naturaleza arrecifal es relativamente fácil distinguir estas rocas de aquellas del Aptiano y Turoniano.

Formación Maltrata

En el área del acuífero está representada por una caliza arcillosa de colores gris oscuro y pardo claro, dispuesta en capas delgadas a medianas que varían de 15 a 40 cm de espesor, con intercalaciones muy delgadas de margas y lutitas arenosas de color gris y gris verdoso, esta última con abundantes ramaleos de calcita y delgadas películas de arcilla roja. Contiene fósiles de radiolarios calcificados, *Globotruncana sp.* y fragmentos de otros foraminíferos mal conservados no identificables, que permiten asignarle una edad correspondiente al Cretácico Superior. Está cubierta concordantemente por los sedimentos de la Formación Agua Nueva y cubre a su vez, del mismo modo, los sedimentos de la Formación Orizaba. Se presenta en cambio de facies con los sedimentos de las formaciones Agua Nueva y Guzmantla.

Formación Guzmantla

Está representada en el área por una calcarenita biógena, de color pardo a crema, dispuesta en capas potentes, alteradas por disolución y cubiertas por gruesas capas de caliche que la enmascaran en superficie y que se encuentran parcialmente recristalizadas. Su clasificación de campo varía de mudstone a capas de packstone y grainstone. El espesor de las capas varía de 0.4 a 2.2 m. en algunas localidades se aprecian capas de caliza clástica y conglomerática y algunos estratos de pedernal. Su contacto inferior con la Formación Orizaba es transicional, mientras que su contacto

superior no es se observa. Es correlacionable con las formaciones Agua Nueva y Maltrata, y al igual que la Formación Orizaba presenta buenas características de porosidad primaria y secundaria, lo que la hace importante como receptora de fluidos.

TERCIARIO (NEÓGENO)

Grupo Chicontepec

Definido formalmente por Dumble *et al.* en 1918 y posteriormente elevada al rango de Grupo Chicontepec. Nuttall (1930) fue el primero en dividir al Grupo Chicontepec en tres miembros; Inferior, Medio y Superior, que hasta ahora prevalece por la buena diferenciación que se puede hacer con la prospección sísmica y con micropalantología. Se presenta desde el sureste de San Luis Potosí hasta Tezihutlán, Puebla, paralelamente a la margen oriental de la Sierra Madre Oriental, aunque su mayor desarrollo se tiene en la Cuenca de Chicontepec, también se ha reportado en el subsuelo de la Cuenca de Veracruz. Su localidad tipo se ubica a 2.5 km al este de Chicontepec, Veracruz, donde está integrado por una alternancia de areniscas arcillosas con limolitas y lutitas de color gris verdoso con estratificación rítmica e intercalaciones delgadas de margas arenosas de color gris oscuro (Nava y Alegría 2001).

Las tres biozonas del Grupo Inferior o Basal, Medio y Superior o Canal, actualmente son consideradas como formaciones por si solas, ya que reúnen las características estratigráficas que permiten su separación y son cartografiables; además, se pueden separar en el subsuelo por sus contactos discordantes que se identificaron mediante prospección sísmica. Las dos primeras corresponden al Paleoceno Superior, mientras que Chicontepec Superior o Canal se ubica en el Eoceno Inferior. Los sedimentos que las conforman se caracterizan por ser de origen turbidítico, depositados primero por corrientes submarinas que erosionaron el sustrato para dar forma a la cuenca y después por un depósito volumétricamente importante en las depresiones formadas por la erosión en abanicos submarinos.

Formación Velasco

Fue definida por Cushman y Tager en 1924, en la localidad tipo de la estación Velasco del Ferrocarril Tampico-San Luis Potosí, está formada por lutitas calcáreas de color gris con tonos verdes, intercalados con algunas margas y esporádicas areniscas calcáreas; en algunas localidades contiene yeso. La unidad presenta concreciones calcáreas y localmente delgadas capas de bentonita de color verdoso. Contiene además intercalaciones persistentes de areniscas calcáreas en estratos delgados y medianos de color café con tonos rojizos, algunas presentan huellas de oleaje y restos de plantas. El espesor en afloramientos varía entre 38 y 230 m y en algunos informes de pozos petroleros se le asigna un espesor de 28 a 87 m y de 180 a 275 m. Su edad corresponde al Paleoceno–Eoceno. PEMEX la divide en cuatro miembros (basal, inferior, medio y

superior) que se identifican con los microfósiles índices de los cuatro miembros de la Formación Chicontepec. Cubre a las margas de la Formación Méndez del Cretácico Superior y subyace discordantemente a la unidad arcillosa del Eoceno.

Formación Aragón

Fue definida por Nuttall en 1939, consiste de lutitas de color gris claro, gris oscuro y verdoso. Que se caracterizan por presentar estratificación bien definida por laminación causada por intercalaciones de bentonita, solo en su parte inferior se encuentran algunos horizontes de areniscas y a veces algunos nódulos calcáreos pequeños. Su espesor varía de 80 a 325 m, aunque en ocasiones no se ha definido completamente debido a que su litología es similar a la de la Formación Chicontepec. Sus afloramientos tienen una morfología de lomeríos suaves, de estructura masiva con algunos horizontes de bentonita en la base.

Su contacto superior es concordante con la Formación Guayabal, mientras que el contacto inferior es a través de un cambio de facies con la Formación Chicontepec, que se determina casi siempre por su contenido microfaunístico. Sus sedimentos se depositaron en un ambiente de aguas poco profundas en una plataforma clástica que recibía aporte de terrígenos de los elementos inestables procedentes del occidente, de la Sierra Madre Oriental. De acuerdo con su abundante contenido fósil de foraminíferos del género *globigerina*, se ha determinado que su edad es Eoceno Inferior. Sobreyace discordantemente a la unidad arcillosa del Paleoceno y subyace en igual forma a las unidades arcillo-arenosas del Eoceno y del Oligoceno.

Formación Guayabal

Definida por Adkins en 1925 y descrita ampliamente por Cole en 1927. Su localidad tipo se encuentra en Guayabal, municipio de Tanatoco, Ver. Aproximadamente a 12 km al oeste de Potrero del Llano, en el camino a Tlacolula, Veracruz. Está constituida por lutitas de colores gris, azul y café que por acción del intemperismo adquieren un color gris o crema, contiene nódulos de siderita característicos y delgadas intercalaciones de arenas de grano fino. En la localidad tipo es rica en restos de moluscos, briozoarios y corales, con abundancia de foraminíferos, conjunto que indica que se trata de depósitos en aguas someras. Al sur del Río Tecolutla está constituida por sedimentos de facies marginales, con conglomerados lenticulares y arcillas arenosas con orbitoides, moluscos y briozoarios. Su espesor en superficie varía de 100 a un poco más de 1,000 m, el máximo desarrollo se localiza en el área de Tajín y Chote, Veracruz, donde alcanza 1,190 m. de potencia.

En la cuenca de Chicontepec, sus contactos superior e inferior son concordantes con la Formación Aragón y Chapopote, respectivamente, también subyace en discordancia

con la Formación Palma Real. Su edad es del Eoceno Medio, determinada por la presencia de especies planctónicas y bentónicas, además de abundantes briozoarios y corales. Se correlaciona con la Formación Mount Sellman y sus variaciones laterales, así como con la Formación Cook Mountain de la Cuenca de Burgos.

Formación Chapopote

Fue definida por Cole en 1927 en la localidad tipo que se localiza en la margen norte del Río Tuxpan, cerca del poblado Chapopote, Tamaulipas, en el cruce de la carretera que va de Álamo a Potrero del Llano, Veracruz. Se caracteriza por presentar estratificación irregular y se compone de margas con intercalaciones de capas delgadas de bentonita de color amarillo verdoso en la cima, en otros sitios donde aflora contiene intercalaciones de arenisca de cuarzo de grano fino, con cementante calcáreo. En la base se compone de lutitas calcáreas de color verde que intemperizan a amarillo, plásticas y arenosas, contiene también algunas capas delgadas de areniscas de grano fino con horizontes de lutitas, así como areniscas conglomeráticas con intercalaciones de lutitas de color gris y capas de bentonita. Su espesor varía de 80 a 800 m y sus contactos inferior y superior son concordantes con la Formación Guayabal y con las formaciones Horcones y Palma Real, respectivamente.

Su edad corresponde al Eoceno Superior de acuerdo con los foraminíferos fósiles que contiene. Su ambiente de depósito corresponde con el de una plataforma marina clástica con aporte de terrígenos de granulometría fina, en un medio marino somero de aguas tranquilas cerca de la costa. Se correlaciona con la Formación Tantoyuca del área de Poza Rica.

Formación Horcones

Fue definida por Grimdale en 1923, en la localidad tipo ubicada al sureste y noreste de Colipa, Veracruz. Está constituida por lutitas calcáreas de color gris claro y gris oscuro, que intemperizan a color café con intercalaciones de areniscas finas de cuarzo y algunos estratos de conglomerados calcáreos, en capas de 10 a 15 cm de espesor, con algunas intercalaciones de ceniza volcánica. También se reportan capas gruesas de hasta un metro de espesor de conglomerados heterogéneos con fragmentos redondeados de calizas y dolomías, con pedernal negro y en menor proporción fragmentos de rocas ígneas y areniscas calcáreas. Su espesor es muy variable, de 60 a 450 m y su edad Oligoceno Superior se determinó por su contenido faunístico. Su depósito en aguas someras cercanas a la costa, con aporte de material detrítico producto de la erosión de rocas más antiguas.

Formación Palma Real

Definida por Nuttall en 1928 y dividida en dos miembros, inferior y superior, por Villatoro en 1932. El miembro inferior consiste de areniscas con diferentes texturas, margas arenosas de color gris azul (con abundantes micro foraminíferos), lentes y bloques de calizas coralinas. Su espesor es muy variable en el subsuelo, de 42 m hasta 1,550 m, aunque en muchos pozos varía entre 146 y 270 m y en otros entre 725 y 991 m. Por su contenido fósil faunístico se le asigna una edad del Oligoceno Inferior y Medio. Yace discordantemente sobre los depósitos pelíticos y arcillo-arenosos del Eoceno.

El miembro superior se distingue del miembro inferior por la ausencia de ciertas especies de microfósiles y está compuesto, en términos generales, por lutitas de color gris con tonos azulado y verdoso, a veces arenosas de grano fino, en estratos de 1 a 30 cm de espesor; fracturadas que intemperizan en colores crema y café amarillento. Las lutitas presentan intercalaciones de areniscas de color gris, de grano fino a medio, dispuestas en capas de 1 a 10 cm de espesor, particularmente en la parte superior. Su espesor es muy variable, de 80 hasta 870 m, reportados por diversos autores. Su edad, de acuerdo con su contenido fosilífero, es del Oligoceno Medio al Oligoceno Superior-Mioceno Inferior, correlacionable con las formaciones Alazán y Mesón.

Formación Alazán

Definida por Dumble en 1922 en su localidad tipo ubicada en el río Buenavista, en el cruce del antiguo camino entre las haciendas Alazán y Mozula, Veracruz. Se encuentra distribuida a lo largo de una franja de 280 km, desde el Río Cazonas hasta la cercanía de Aldama Tamaulipas, Consiste de una serie de margas y lutitas de color gris a gris oscuro que intemperizan a color gris rojizo, con intercalaciones decapas delgadas de areniscas; su espesor es variable, de 60 hasta 930 m. Sobreyace concordantemente y transicional a la Formación Horcones o Palma Real. De acuerdo con Mayol (2006), sobreyace a las formaciones Tantoyuca y/o Chapopote y subyace a las formaciones Horcones y/o Palma Real, propone como unidad equivalente a la Formación Palma Real. Por su contenido fósil se le asigna una edad perteneciente al Oligoceno Inferior. De igual manera, por su litología y su contenido faunístico se interpreta que se depositó en una plataforma clástica.

Formación Mesón

Está constituida por lutitas arenosas, areniscas de grano fino, margas y algunos horizontes de limolitas arcillosas, dispuestas en estratos que varían de delgados a medianos, de color gris con tonos azules que intemperizan en tonos de amarillo. En algunas localidades presenta un desarrollo arenoso de grano fino con abundante fauna de *phylumechinodermata*, *coelenterata* y *mollusca*, además de abundantes

foraminíferos. Presenta una unidad calcárea formada por coquinas, calizas coralinas y algunas areniscas calcáreas, en forma de lentes dentro de la unidad clástica. De acuerdo con información de cortes litológicos de pozos de PEMEX, su espesor en el subsuelo es muy variable, de 130 hasta 990 m, aunque predominan los espesores cercanos a 200 m.

La edad que se le asigna, de acuerdo con su contenido faunístico, corresponde a la parte superior del Oligoceno Medio y el Oligoceno Superior–Mioceno Inferior. Yace discordantemente sobre las Formaciones Aragón y Palma Real, atestiguando una trasgresión, y subyace discordantemente a sedimentos del Mioceno Inferior. Esta unidad arcillo-arenosa se presenta suavemente inclinada hacia el este y aflora en la zona costera.

Rocas Intrusivas

Representadas por cuerpos intrusivos que varían en composición de diorita a tonalita, que afectan a las unidades anteriores y que se emplazan en forma de troncos en las rocas arcillosas del Eoceno en la región occidental del área. Su expresión morfológica es de prominencias que modifican los lomeríos.

CUATERNARIO

Andesitas y Basaltos

Corresponden a diferentes derrames de lavas generadas por la actividad volcánica del Pico de Orizaba y otros sistemas volcánicos secundarios. Presentan diferentes texturas, desde merocristalina hasta holocristalina. Su color es generalmente gris oscuro a claro. Las andesitas se encuentran intemperizadas de manera esferoidal y forman sierras escarpadas y lomeríos, mientras que los basaltos se presentan forma acordonadas y en bloques, formando sierras con pendientes suave al norte y escarpada al sur. Sus afloramientos se localizan al occidente del acuífero.

Depósitos vulcano-sedimentarios

Se trata de una unidad conformada por fragmentos de rocas volcánicas preexistentes, derrames de lavas y tobas intemperizadas. Sus afloramientos se localizan en el área comprendida entre Coscomatepec y Tomatlán. Su aspecto es masivo, semiconsolidado, en una matriz areno arcillosa; sus partículas presentan granulometría variada y formas subangulosas a subredondeadas.

Toba básica

Corresponde a un paquete de material volcánico semiconsolidado, conformado por fragmentos de roca de granulometría variada y lapilli, dispuestos en forma masiva, que afloran al noroeste del acuífero.

Conglomerados, areniscas-conglomerados

Estos materiales corresponden a unidades continentales del Cuaternario que se depositaron en zonas topográficamente bajas, así como en las laderas de los cerros. Están constituidos por materiales volcánicos retrabajados y sedimentos fluviales y aluviales, de tal forma que manifiestan una gran variabilidad en su granulometría, desde arcillas, limos y arenas, hasta gravas, cantos y bloques, producto de rocas preexistentes de diferente origen. Sus fragmentos varían desde subangulosos hasta subredondeados, en una matriz arcillo arenosa, poco consolidada. Sus afloramientos se presentan en la zona central.

Aluvión

Se agrupa con esta nomenclatura al conjunto de sedimentos clásticos que conforman las zonas de lomeríos y llanuras aluviales que caracterizan a este acuífero. Por su área de exposición, ésta es la principal unidad y consiste de sedimentos fluviales que fueron transportados por las corrientes provenientes de los altos topográficos. Su distribución se aprecia en la porción centro-oriental del acuífero, abarcando una amplia zona desde La Tinaja y Cotaxtla hasta Los Robles; formando una extensa planicie aluvial.

Depósitos eólicos

Corresponde a un conjunto de lomeríos, dispuestos en una franja paralela a la línea de costa, desde Boca del Río hasta Salinas, y tierra adentro en la localidad Los Robles y el borde oriental de la Laguna Mandinga. Su constitución corresponde a arenas finas bien redondeadas, transportadas por el viento, con presencia de pseudoestratificación cruzada. Su espesor no supera 15 m.

4.2. Geología estructural

Los rasgos estructurales que se observan en la región central y oriental del territorio del acuífero, están representados por una planicie volcánico-fluvial orientada en sentido noroeste-sureste, con una inclinación suave hacia el oriente. Está presente un patrón tectónico asociado a un sistema de fracturamiento orientado noreste-suroeste, por donde escurren los principales ríos y arroyos de la zona.

En las zonas de afloramientos de rocas carbonatadas del Cretácico, se presenta un sistema de sinclinales y anticlinales orientados preferentemente en sentido noroeste-sureste, así como diversos sistemas locales de fallas y fracturas que gobiernan el patrón de escurrimiento superficial, que contribuyen además a la formación de sistemas de flujo subterráneo propios de un ambiente cárstico, ya que se observan dolinas y otros rasgos de disolución de las calizas.

La evolución tectónica en esta región se inicia con un arco magmático antiguo de edad Pérmico (?) en la margen continental de Pangea en una región oriental de México con un magmatismo calcoalcalino, así como con la depositación de sedimentos pelíticos dentro de una probable cuenca marginal sepultada adyacente al arco, la cual es hoy evidenciada por una potente capa de esquistos y metalavas, que representa el basamento del Terreno Maya (Campa U.M.F., 1983 y Sedlock R.L. *et al.*, 1993). Otra evidencia más del magmatismo permo-triásico es el plutón granodiorítico del macizo de Teziutlán. Durante el Jurásico Inferior se produce una subsidencia, generando cuencas donde se deposita la Formación Huayacocotla. Al final del Jurásico Inferior se generan movimientos distensivos provocando la retirada de los mares y restituyendo las condiciones continentales; bajo estas condiciones durante el Jurásico Medio se depositan los lechos rojos de la Formación Cahuadas-Tenexcate. Al finalizar el Jurásico Medio y hasta fines del Cretácico se lleva a cabo una transgresión, que coincide con la apertura del Golfo de México en el Calloviano-Tithoniano, el fondo irregular de las cuencas fue nivelándose con el depósito de las formaciones Tepexic, Santiago, Tamán, San Pedro y Pimienta. Durante todo el Cretácico se desarrollaron simultáneamente la cuenca Sierra Madre Oriental con una sedimentación de cuenca, y la plataforma adyacente correspondiente a la cuenca de Zongolica, condiciones que permanecieron hasta el Santoniano; durante el Campaniano-Maastrichtiano las condiciones de cuenca fueron homogéneas en los dos paleo-elementos, depositándose una secuencia de margas y lutitas correspondiente a la Formación Méndez, que cubre a las secuencias de ambas cuencas. La compresión de la Orogenia Laramide actúa en sentido SW-NE, levantando, fallando y deformando la secuencia mesozoica, generando condiciones para el desarrollo de las cuencas terrígenas terciarias de Tampico-Misantla y Veracruz (Carta Geológico-Minera Veracruz E14-3, escala 1:250,000. SGM, 2002).

4.3. Geología del subsuelo

Con base en las observaciones litológicas, se evidencia que la sedimentación de la cuenca se efectuó en dos episodios que resultaron en la acumulación de una facies flysch, seguida por una facies molasa. Los sedimentos de tipo flysch se acumularon al oeste de la cuenca, como consecuencia de las primeras pulsaciones de la Orogenia Laramide que, posteriormente dio lugar a la Sierra Madre Oriental. Durante este episodio se depositaron la Formación Velasco y la Formación Chicontepec. Contrastando con los sedimentos anteriores, se presentan en sucesión vertical los sedimentos conglomeráticos y arcillo-arenosos de las formaciones más jóvenes, que muestran una granulometría más fina hacia arriba y son el resultado del acarreo post-orogénico de terrígenos. Su distribución espacial es sensiblemente paralela a la facies de depósito de tipo flysch y constituyen una facies molasa en la cuenca.

La Planicie Costera se encuentra cubierta por una cuña de rocas sedimentarias consolidadas y no consolidadas del Cenozoico. Estos sedimentos descansan sobre las rocas del Mesozoico y tienen un espesor que varía de pocos metros, cerca de sus límites hacia tierra, a más de 6,000 m bajo el Golfo de México.

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 aluviales, fluviales, y eólicos de granulometría variada que constituyen el lecho y la llanura de inundación de ríos Jamapa, Paso de Ovejas, Los Pescados y otros arroyos tributarios, así como areniscas y conglomerados. 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. 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 sedimentarias y volcánicas, entre las que destacan intercalaciones de calizas, lutitas areniscas y basaltos, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento.

Las fronteras al flujo subterráneo y el basamento geohidrológico del acuífero están representados por las mismas rocas sedimentarias marinas y volcánicas al desaparecer el fracturamiento y por las secuencias de depósitos terrígenos finos que conforman las lutitas y limolitas. A mayor profundidad se considera que el basamento geohidrológico regional está constituido por la secuencia de limolitas y areniscas que conforman la Formación Cahuwasas.

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1. Tipo de acuífero

Las evidencias geológicas, geofísicas e hidrogeológicas, permiten definir la presencia de un acuífero de **tipo libre**, heterogéneo y anisotrópico, tanto en sentido horizontal como vertical, constituido, en su porción superior, por sedimentos aluviales, fluviales, eólicos, areniscas y conglomerados, depositados tanto en los subálveos de las corrientes fluviales como en la planicie costera y pie de montes. La porción inferior está conformada por rocas volcánicas y calizas, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento y disolución en el caso de las calizas

Debido a la alternancia de secuencias arcillo-calcáreas es posible inferir la presencia de horizontes **acuíferos semiconfinados**. Las rocas calizas pueden presentar también condiciones de semiconfinamiento, sus áreas de recarga se localizan en las sierras

limítrofes del valle, cuyo potencial no ha sido explorado aún en la región y puede localizarse a grandes profundidades en la planicie costera.

5.2. Parámetros hidráulicos

Como parte de las actividades llevadas a cabo en el estudio realizado en el 2013, se realizaron 10 pruebas de bombeo de corta duración, en etapa de abatimiento y recuperación (1.5 a 10 horas). Adicionalmente, se cuenta con la información de pruebas más realizadas en estudios anteriores y otras más en el acuífero vecino Cotaxtla. Para su análisis e interpretación se utilizaron los métodos de Neuman, Theis y Jacob. De los resultados de su interpretación por métodos analíticos convencionales mencionados, se establece que los valores de transmisividad varían de **45.0×10^{-3} a $1.3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ (3888 a 112.3 m^2/s)**. Es evidente una zonificación de los valores de transmisividad: en la porción occidental del acuífero se presentan los valores más altos, de 40 a $45 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, disminuyendo gradualmente hacia la porción central de la planicie, donde se registran valores de 10 a $40 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, y de 10 a $1.3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ en la zona costera. En las arenas eólicas los valores varían de 5 a $10 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. En cuanto a los valores de conductividad hidráulica, de acuerdo con los espesores saturados, varían de **4.0×10^{-4} a $2.8 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ (34.6 a 0.24 m/s)**.

Ninguna de las pruebas de bombeo contó con pozo de observación, por lo que no fue posible obtener valores del coeficiente de almacenamiento. En el estudio realizado en 1982, se determinó un valor de 0.085 para las gravas y arenas y 0.025 para las dunas.

5.3. Piezometría

Para el análisis del comportamiento piezométrico se cuenta con información correspondiente a 1996 y 2013.

5.4. Comportamiento hidráulico

5.4.1. Profundidad al nivel estático

La profundidad al nivel estático en 2013 muestra que los valores varían desde algunos metros, en la zona costera y la porción ubicada entre el puerto de Veracruz y Boca del Río, y partir de aquí se incrementan al occidente por efecto de la topografía hacia las estribaciones de las sierras y los depósitos de pie de monte, hasta los 90 m que se registran en la región comprendida entre Puente Nacional y Soledad de Doblado (figura 3).

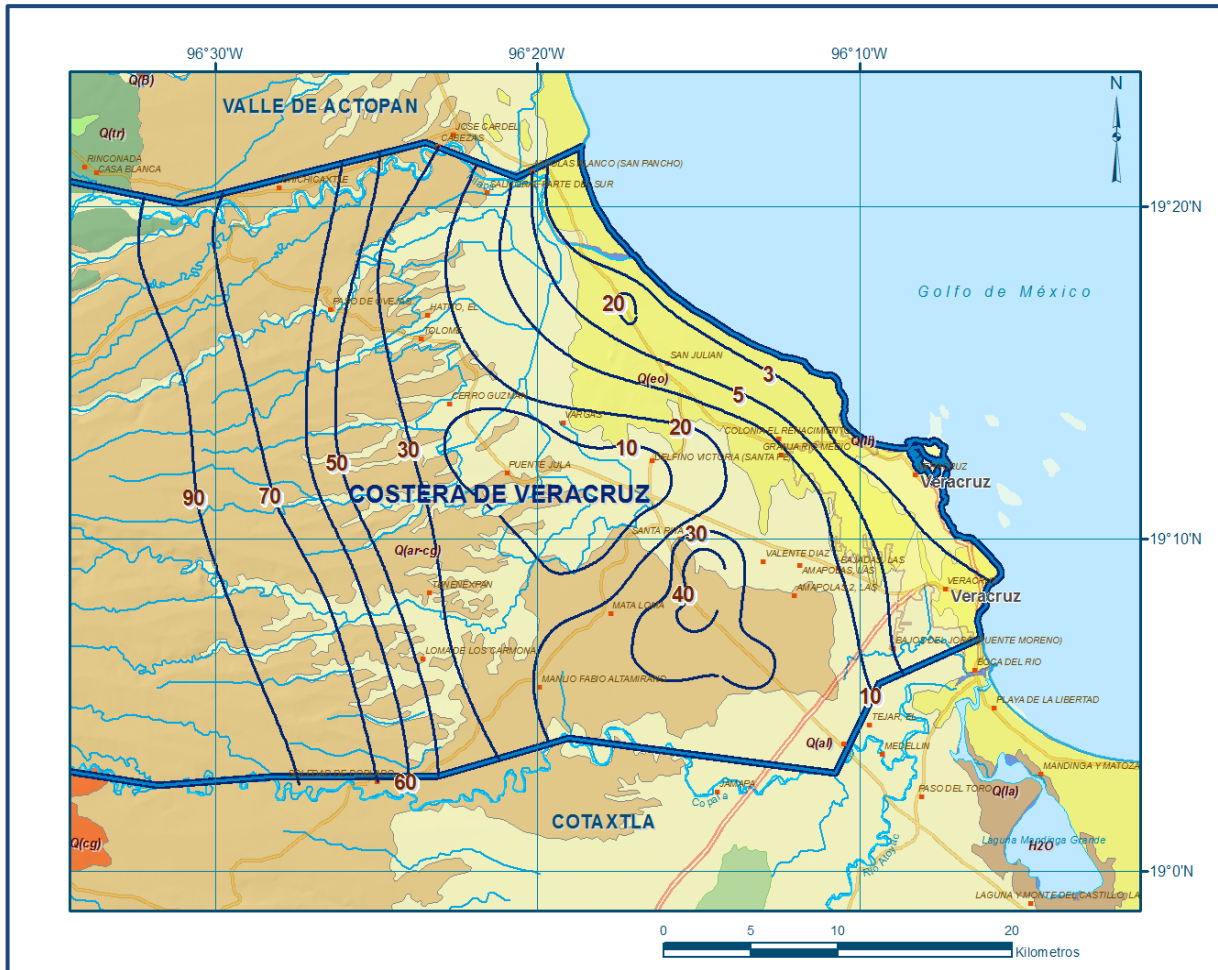


Figura 3. Profundidad al nivel estático en m (2013)

5.4.2. Elevación del nivel estático

La configuración de elevación del nivel estático en 2013 presenta valores varían entre 2 y 70 msnm, que se incrementan de la zona costera hacia el occidente, 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 registran en toda la zona cosera y los más altos conforme se asciende topográficamente hacia la porción occidental, mostrando de esta manera una dirección preferencial del flujo subterráneo W-E, de las estribaciones de la sierra hacia la costa (figura 4).

De manera general, el acuífero recibe una recarga por flujo horizontal proveniente desde el oeste, a través de un medio granular que favorece un flujo regional al oriente y descarga hacia la zona costera. Entre Santa Rita y Vargas se presenta un parteaguas topográfico, definido por la curva de elevación 20 msnm, que provoca que una parte del

flujo subterráneo se dirija a la zona costera y otra tierra adentro, hacia la localidad Puente Jula.

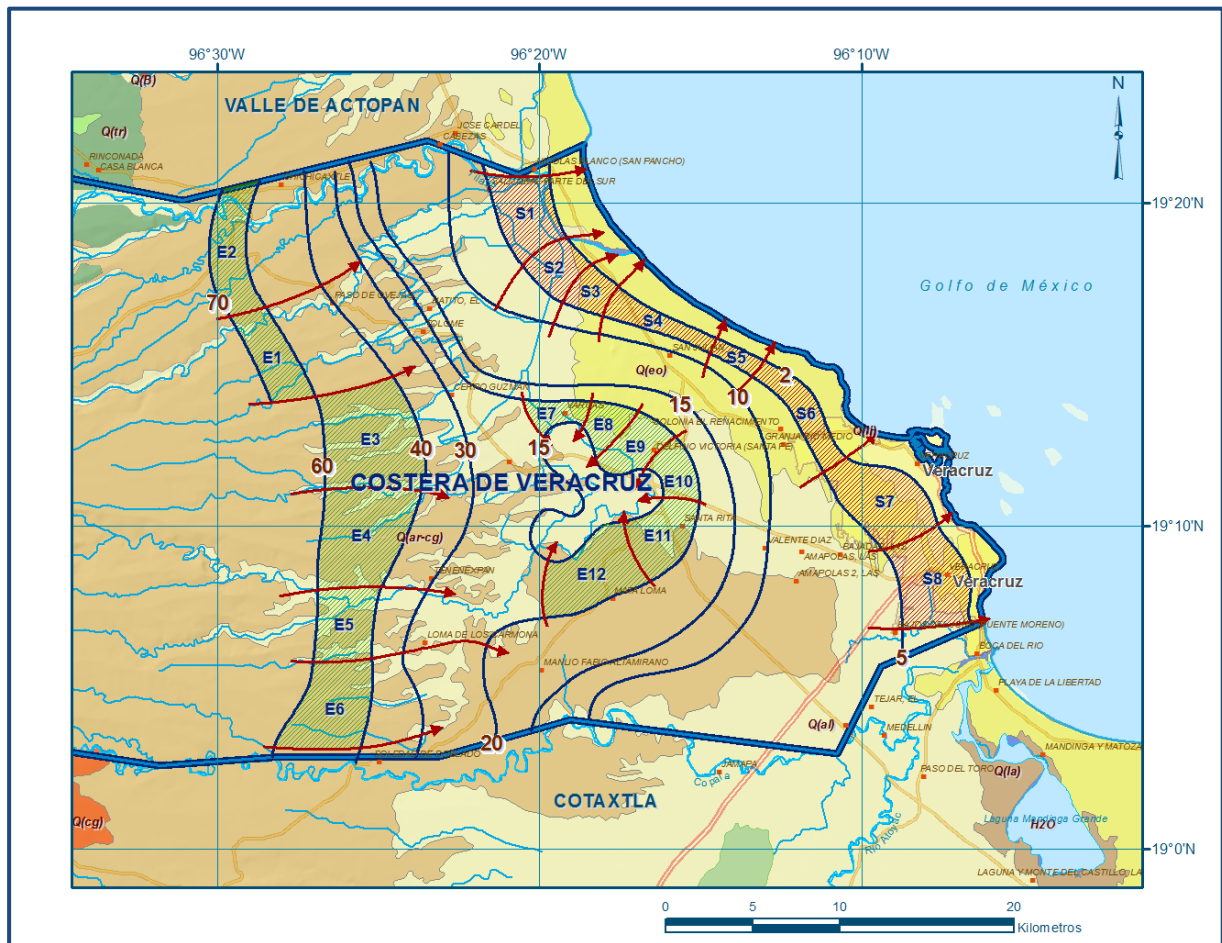


Figura 4. Elevación del nivel estático en msnm (2013)

5.4.3. Evolución del nivel estático

Con respecto a la configuración de evolución del nivel estático para el periodo 1996-2013, se registran valores de abatimiento de 0.5 a 5 m. En el área de Paso de Ovejas y entre Santa Rita y Las Bajadas, donde se concentra la extracción, los abatimientos son de 2.0 a 5.0 m para este periodo, lo que representa un ritmo anual de 0.1 a 0.30 m. El abatimiento promedio es de 2.0 m, que representa un promedio anual de 0.1 m. En la mayor parte del acuífero los niveles del agua subterránea no presentan cambios significativos en su posición, incluso en algunas regiones se presentan recuperaciones (figura 5).

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.

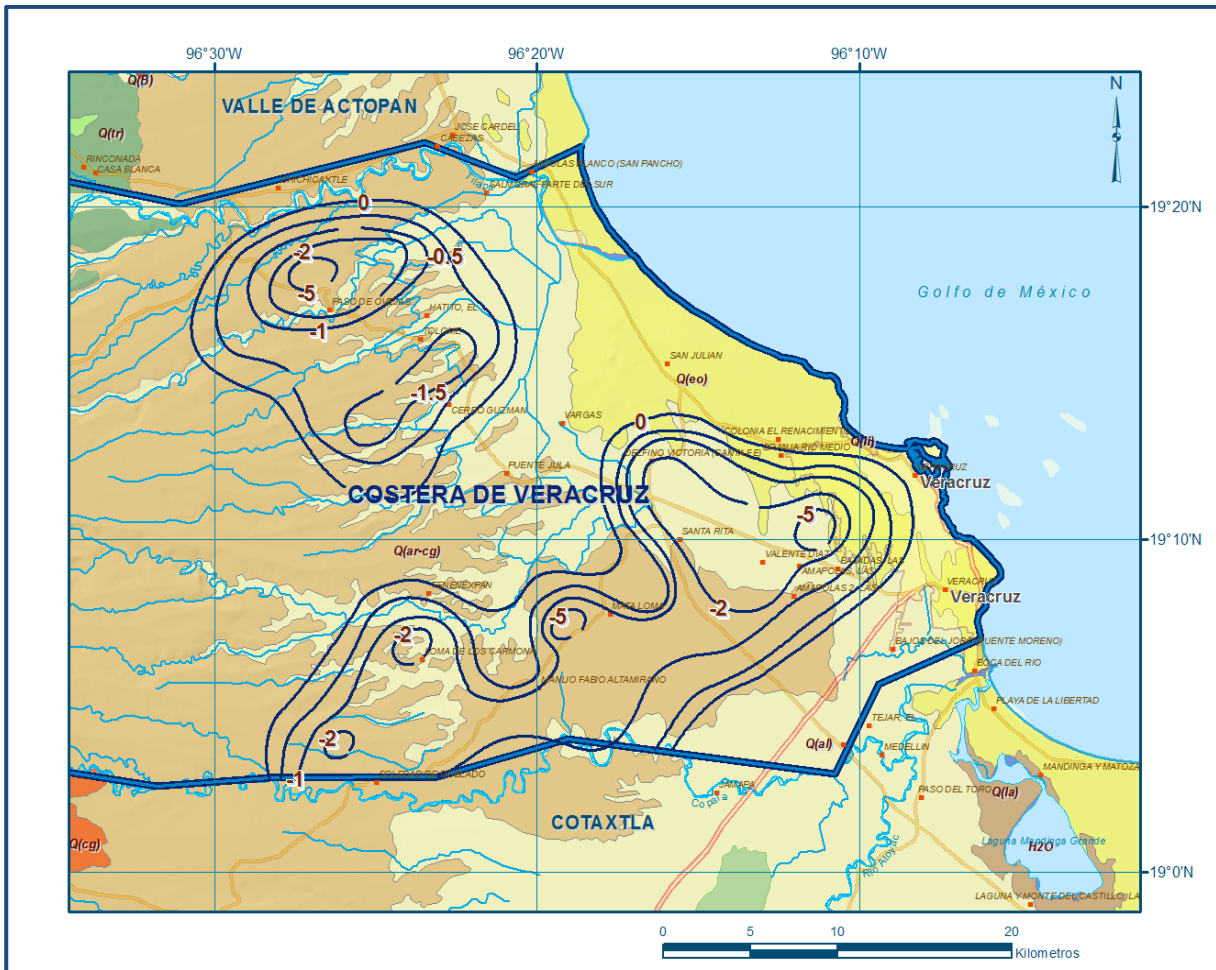


Figura 5. Evolución del nivel estático en m (1996-2013)

5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en el año 2013, se tomaron 10 muestras de agua subterránea en aprovechamientos distribuidos en la zona de explotación (todos ellos pozos) para su análisis fisicoquímico correspondiente. Las determinaciones incluyeron iones principales, temperatura, conductividad eléctrica, pH, Eh, nitratos, dureza total y sólidos totales disueltos (STD), 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 modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, para el agua destinada al consumo humano y por

lo tanto para otros usos. La concentración de STD presenta valores que varían de 256 a 568 ppm; que no sobrepasan el límite máximo permisible de 1000 mg/l establecido por la norma mencionada para el agua potable. Las menores concentraciones se registran en los aprovechamientos localizados hacia las partes topográficamente más altas, ubicadas en el extremo occidental del acuífero, desde donde se incrementan hacia la zona costera, confirmando de esta manera la dirección preferencial del flujo subterráneo de oeste a este.

Los valores de conductividad eléctrica variaron de 350 a 790 $\mu\text{S}/\text{cm}$., que la clasifican como agua dulce, de acuerdo con American Public and Health Association (APHA), 1995. Los valores de pH varían de 7.22 a 7.95 y de temperatura entre 26.9 y 32.2 °C.

De acuerdo con el criterio de Wilcox, que relaciona la conductividad eléctrica con la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), 8 de las muestras de agua extraída se clasifican como de salinidad media (C_2) y contenido bajo de sodio intercambiable (S_1) y las otras 2 muestras se clasifican como de salinidad alta (C_3) y bajo contenido de sodio intercambiable (S_1), que pueden utilizarse para el riego agrícola, sin restricción, salvo en el caso del agua de salinidad alta que sólo puede utilizarse en suelos con buen drenaje y requerir lavados de ellos o para cultivos tolerantes a las sales.

De acuerdo con los iones dominantes, predominan las familias del agua bicarbonatada-cálcica y bicarbonatada-sódica que representan agua de reciente infiltración, de periodos cortos de residencia, que han circulado a través de rocas calcáreas y volcánicas.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

En el censo de aprovechamientos llevado a cabo como parte del estudio realizado en el año 2013, se registraron un total de 1875 obras que aprovechan el agua subterránea: 496 pozos y 1379 norias; del total de obras, 239 se utilizan en la agricultura, 1450 para uso público-urbano, 23 para uso doméstico-pecuario, 70 para servicios, 49 para uso industrial y 44 para otros usos menores.

El volumen de extracción conjunta asciende a **154.1 hm^3 anuales**, de los cuales 54.2 hm^3 (35.2%) se utilizan en la agricultura, 51.7 hm^3 (33.5 %) para uso público-urbano, 23.4 hm^3 (15.2%) para servicios, 17.0 hm^3 (11.0%) para uso industrial y 7.8 hm^3 (5.1%) para otros usos.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de aguas subterráneas se planteó en una superficie de **1170 km²**, que corresponde a la zona donde se cuenta con información piezométrica y en la que se localizan dispersos 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 de funcionamiento hidrodinámico del acuífero, la recarga total que recibe (R_t) ocurre por tres procesos naturales principales: por infiltración de agua de lluvia que se precipita en el valle y a lo largo de los ríos principales, que en conjunto se consideran como recarga vertical (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, que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela, la que se produce a lo largo de los canales de riego; del agua residual de las descargas urbanas, así como las fugas en el sistema de abastecimiento de agua potable y alcantarillado constituyen otra fuente de recarga al acuífero. Estos volúmenes se integran en la componente de recarga inducida (R_i).

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 $\Delta V(S)$, así como las entradas y salidas por flujo subterráneo, su valor será despejado de la ecuación de balance.

$$R_v + E_h + R_i - B - S_h - ETR - D_{fb} = \pm \Delta V(S) \quad (1)$$

Donde:

- R_v**: Recarga vertical
- E_h**: Entrada por flujo subterráneo horizontal
- R_i**: Recarga inducida
- S_h**: Salidas por flujo subterráneo horizontal
- B**: Bombeo
- ETR**: Evapotranspiración
- D_{fb}**: Descarga por flujo base
- ΔV(S)**: Cambio de almacenamiento

De esta manera, despejando la recarga vertical:

$$R_v = S_h + B + ETR + D_{fb} \pm \Delta V(S) - E_h - R_i \quad (2)$$

7.1.2. Entradas por flujo subterráneo horizontal (E_h)

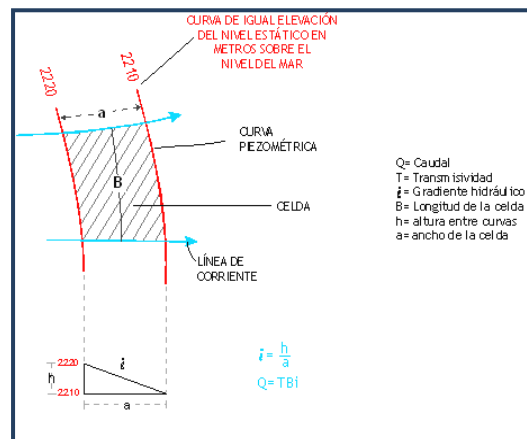
Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del área de estudio se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través del pie de monte, para posteriormente recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de explotación. La recarga al acuífero tiene su origen en la precipitación pluvial sobre el valle y en la infiltración de los escurrimientos superficiales.

Para el cálculo de las entradas por flujo horizontal subterráneo se utilizó la configuración de elevación del nivel estático correspondiente al año 2013, mostrada en la figura 4. 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:

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

Donde:

- Q** = Caudal (m³/s)
- T** = Transmisividad (m²/s)
- B** = Longitud de la celda (m)
- i** = Gradiente Hidráulico (adimensional)



La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada uno de los canales establecidos. En la tabla 2 se pueden observar los valores obtenidos en cada celda y que el volumen total de entradas por flujo subterráneo asciende a **84.3 hm³/año**.

Tabla 2. Cálculo de entradas subterráneas por flujo horizontal (2013)

CANAL	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h ₂ -h ₁ (m)	Gradiente i	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
E1	6665	2220	10	0.00450	0.0120	0.3603	11.4
E2	6220	1775	10	0.00563	0.0120	0.4205	13.3
E3	5555	4890	20	0.00409	0.0120	0.2726	8.6
E4	6000	4445	20	0.00450	0.0120	0.3240	10.2
E5	4445	3110	20	0.00643	0.0120	0.3430	10.8
E6	5110	4445	20	0.00450	0.0120	0.2759	8.7
E7	3110	2000	5	0.00250	0.0200	0.1555	4.9
E8	2445	2665	5	0.00188	0.0200	0.0917	2.9
E9	2220	4445	5	0.00112	0.0200	0.0499	1.6
E10	3110	3335	5	0.00150	0.0200	0.0933	2.9
E11	4260	2445	5	0.00204	0.0200	0.1742	5.5
E12	6665	3555	5	0.00141	0.0120	0.1125	3.5
Total entradas							84.3

Los valores de transmisividad utilizados para el cálculo de entradas y salidas subterráneas se obtuvieron del promedio de las pruebas de bombeo realizadas como parte del estudio realizado en el año 2013 y otros previos en acuíferos vecinos, adaptados al espesor saturado de cada zona.

7.1.3. Recarga inducida (Ri)

Aún en sistemas de riego muy eficientes, un cierto volumen del agua aplicada en el riego no es usado como uso consuntivo, sino que se infiltra y eventualmente alcanza la superficie freática, dependiendo de propiedades del suelo, de las condiciones climáticas y de la profundidad al nivel estático. Esta contribución al acuífero se le conoce como retorno de riego y según Jacob Bear (1970) su valor varía entre el 20 y 40 % del volumen usado en la irrigación, dependiendo de la profundidad al nivel estático, de las características del suelo y de las condiciones climáticas.

Debido a la falta de información de superficies y láminas de riego por cultivo, se consideró que un 20% del volumen aplicado al **uso agrícola retorna al acuífero** en forma de recarga inducida, considerando la profundidad somera al nivel del agua subterránea en la zona agrícola y la presencia de estratos de permeabilidad media a alta de los

sedimentos del subsuelo. El volumen de agua que se destina al uso agrícola es de 404.2 hm³ anuales, de los cuales 54.2 hm³ corresponden agua subterránea y 350.0 hm³ al agua superficial del Río La Antigua. Si consideramos que el 20% del volumen aplicado al uso agrícola retorna al acuífero como recarga efectiva, obtenemos un volumen de **80.84 hm³/año** de los excedentes del riego.

Por otra parte, el volumen anual de agua subterránea para uso público-urbano es de 51.7 hm³, tomando en cuenta que existen baja eficiencia en el sistema de la red de abastecimiento de agua potable y que un 25 % de este volumen recarga de manera efectiva al acuífero a través de las **fugas en la red de distribución y en el sistema de alcantarillado**; el volumen de recarga de este tipo es de **12.9 hm³ anuales**.

7.2. Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente por bombeo (B), salidas subterráneas hacia el mar (Sh), por evapotranspiración de niveles freáticos someros (ETR) y mediante flujo base de ríos (Dfb). No existe descarga a través de manantiales (Dm).

7.2.1. Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el volumen de la extracción asciende a **154.1 hm³ anuales**.

7.2.2. Evapotranspiración (ETR)

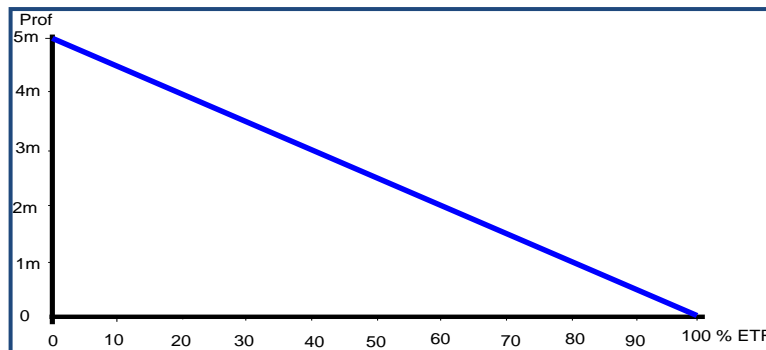
Este parámetro es la cantidad de agua transferida del suelo a la atmósfera por evaporación y transpiración de las plantas, por lo tanto, es considerada una forma de pérdida de humedad del sistema. Existen dos formas de Evapotranspiración: la que considera el contenido de humedad en el suelo y la que considera la etapa de desarrollo de las plantas (Evapotranspiración Potencial y la Evapotranspiración Real, respectivamente), el escurrimiento y el volumen de evapotranspiración real (ETR). Este parámetro es utilizado para la recarga potencial de infiltración. Para la obtención de este parámetro se puede utilizar la ecuación empírica de Turc, con los valores promedio anuales de Temperatura = 25.3 °C y de precipitación = 1399 mm, que se muestra a continuación:

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

$$L = 300 + 25T + 0.05T^3$$

T (°C) =	25.3		
P(mm) =	1399	P ² =	1957201
L =	1742.21385	L ² =	3035309.1
ETR (mm)	1125.6		

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 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.



Considerando que en una superficie de 90.0 km² de la zona costera del acuífero (sin considerar el área de la zona urbana del puerto de Veracruz y Boca del Río) la profundidad media al NE es de 3 m, según la relación lineal mostrada en la figura, le corresponde un 40 % de la lámina de ETR obtenida que fue de 1125.6 mm anuales.

El detalle del cálculo se muestra en la tabla 3, en la que se puede observar que el valor de la evapotranspiración es de **40.5 hm³** anuales. Por lo tanto; **ETR = 40.5 hm³/año.**

Tabla 3. Cálculo de la evapotranspiración

Intervalo curvas (m)	Profundidad media (m)	Área (km ²)	%	ETR (m)	ETR (hm ³ /año)
1 a 5	3.0	90.0	0.4	1.1256	40.5
				Total	40.5

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 del año 2013, mostrada en la figura 4. El volumen estimado de salidas por flujo subterráneo es de **14.9 hm³ anuales** y se muestra en la tabla 4.

Tabla 4. Cálculo de salidas subterráneas por flujo horizontal (2013)

CANAL	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h ₂ -h ₁ (m)	Gradiente i	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
S1	5555	3335	3	0.00090	0.0070	0.0350	1.1
S2	2220	1950	3	0.00154	0.0070	0.0239	0.8
S3	2220	1445	3	0.00208	0.0070	0.0323	1.0
S4	6890	1110	3	0.00270	0.0070	0.1304	4.1
S5	3335	1220	3	0.00246	0.0070	0.0574	1.8
S6	6000	1775	3	0.00169	0.0100	0.1014	3.2
S7	6890	3780	3	0.00079	0.0100	0.0547	1.7
S8	5110	4000	3	0.00075	0.0100	0.0383	1.2
Total entradas							14.9

7.2.4. Descarga por flujo base (Dfb)

De acuerdo con los registros promedio de aforos para el periodo 1951-2011 de la estación Cardel, ubicada en la parte más baja de la cuenca del Río La Antigua, el periodo de estiaje se presenta entre los meses de marzo y mayo. Su caudal base es de 2777 lps, que representan un volumen medio **87.6 hm³ anuales**.

7.3. Cambio de almacenamiento ΔV(S)

Para la estimación del cambio de almacenamiento se tomó en cuenta la configuración de la evolución anual del nivel estático 1996–2013. Con base en ella y en un valor de

rendimiento específico (S_y) promedio de 0.085 (SARH, 1980), se determinó la variación del almacenamiento en un área de balance de 1170 km², mediante la siguiente expresión:

$$\Delta V S = S * A * h$$

Donde:

ΔV = Cambio de almacenamiento en el período analizado;

S = Coeficiente de almacenamiento promedio de la zona de balance;

A = Área de influencia de curvas de igual evolución del nivel estático (km²);

h = Valor de la variación piezométrica en el período (m);

Los valores obtenidos para cada variación piezométrica durante el período 1996-2013 se pueden observar en la tabla 5. El volumen anual del cambio de almacenamiento para este periodo es de -61.8 hm³, que representa un promedio anual de **-3.6 hm³/año**

Tabla 5. Cálculo del cambio de almacenamiento para el periodo

Evolución	Abatimiento	Área (km ²)	S_y	$\Delta V(S)$ (hm ³ /año)
-5	-5	10.0	0.085	-4.3
-2	-2	5.0	0.085	-0.9
-2 a -5	-3.5	69.0	0.085	-20.5
-1 a -2	-1.5	166.0	0.085	-21.2
-0.5 a -1	-0.75	157.0	0.085	-10.0
0 a -0.5	-0.25	140.0	0.085	-3.0
-1.5	-1.5	16.0	0.085	-2.0
0.0	0.0	607.0	0.085	0.0
Área de balance		1170.0	TOTAL	-61.8
		Promedio anual		-3.6

Solución de 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 (2), que fue establecida con anterioridad:

$$R_v = S_h + B + ETR + D_{fb} \pm \Delta V(S) - E_h - R_i$$

$$R_v = 14.9 + 154.1 + 40.5 + 87.6 - 3.6 - 84.3 - 93.8$$

$$R_v = 115.5 \text{ hm}^3/\text{año}$$

De esta manera el valor de la recarga total R_t es:

$$R_t = R_v + E_h + R_i$$

$$R_t = 115.4 + 84.3 + 93.8$$

Rt = 293.5 hm³ anuales

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:

DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUA DEL SUBSUELO EN UN ACUÍFERO	RECARGA TOTAL MEDIA ANUAL	DESCARGA NATURAL COMPROMETIDA	EXTRACCIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS
---	------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------

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. Para este caso, su valor es de **293.5** hm³/año, todos ellos son de recarga natural.

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 este caso, su valor es de **102.5 hm³ anuales**, que corresponde a las salidas subterráneas que aún presenta el acuífero.

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 **204,617,790 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 **20 de febrero del 2020**

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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 293.5 - 102.5 - 204.617790 \\ \text{DMA} &= -13.617790 \text{ hm}^3/\text{año.} \end{aligned}$$

El resultado indica que no existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario, el déficit es de **13,617,790 m³ anuales** que se están extrayendo a costa del almacenamiento no renovable del acuífero.

9. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua, 1995. Red de Referencia de Calidad del Agua Subterránea en el Acuífero Costera de Veracruz. Realizado por el Laboratorio de Calidad del Agua de la Gerencia Regional Golfo Centro.

Comisión Nacional del Agua, 1998. Actualización del Inventario de Aprovechamientos del Agua Subterránea en el Acuífero Costera de Veracruz. Realizado por Subgerencia Técnica de la Gerencia Regional Golfo Centro.

Comisión Nacional del Agua, 2002. Determinación de la Disponibilidad de Agua en el Acuífero Costera de Veracruz, Estado de Veracruz.

Comisión Nacional del Agua, 2002. Actualización de Mediciones Piezométricas en los Acuíferos Costera de Veracruz y Orizaba-Córdoba, en el Estado de Veracruz, y Valle de Tehuacán, en el Estado de Puebla. Realizado por Lesser y Asociados, S.A.

Comisión Nacional del Agua, 2007. Estudio para la Instrumentación de la Red Piezométrica en los Acuíferos Valle de Tehuacán y Costera de Veracruz, en los estados de Puebla y Veracruz. Realizado por Subgerencia Técnica de la Gerencia Regional Golfo Centro.

Comisión Nacional del Agua, 2013. Estudio Geohidrológico para Actualizar la Disponibilidad Media Anual de Aguas Subterráneas del Acuífero Costera de Veracruz, en el Estado de Veracruz. Realizado por Estudios y Proyectos del Subsuelo, S.A. de C.V. (EPSA).

Grupo Azteca, Refrescos Veracruzanos, S.A. de C.V, 1994. Estudio Geohidrológico de Evaluación, con Análisis de la Interfase Salina, en la Zona Centro-Sur de la Ciudad de Veracruz, Veracruz. Realizado por Constructora Occidental de Desarrollo de Ingeniería y Perforaciones, S.A. (CODIPSA).

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, 1982. Estudio de Evaluación Geohidrológica del Acuífero Costera de Veracruz, Veracruz. Realizado por Ariel Construcciones, S.A.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, 1985. Estudio Geohidrológico para Abastecimiento de Agua Potable a la Ciudad de Veracruz, Veracruz. Realizado por Investigaciones Técnicas del Subsuelo, S.A.

Servicio Geológico Mexicano, 2002. Carta Geológico-Minera Veracruz E14-3, escala 1:250,000.