



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO MARTÍNEZ DE LA TORRE-NAUTLA
(3003), ESTADO DE VERACRUZ**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1	GENERALIDADES.....	2
1.	Antecedentes.....	2
1.1.	Localización.....	2
1.2.	Situación administrativa del acuífero.....	4
2	ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD.....	5
3	MARCO FÍSICO.....	6
3.1.	Provincias fisiográficas.....	6
3.2.	Clima.....	8
3.3.	Hidrografía.....	9
3.4.	Geomorfología.....	10
4	GEOLOGÍA.....	11
4.1.	Estratigrafía.....	12
4.2.	Geología estructural.....	25
4.3.	Geología del subsuelo.....	28
5	HIDROGEOLOGÍA.....	30
5.1.	Tipo de acuífero.....	30
5.2.	Parámetros hidráulicos.....	30
5.3.	Piezometría.....	31
5.4.	Comportamiento hidráulico.....	31
5.4.1.	Profundidad al nivel estático.....	31
5.4.2.	Elevación del nivel estático.....	32
5.4.3.	Evolución del nivel estático.....	33
5.5.	Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	34
6	CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRIA.....	35
7	BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	36
7.1.	Entradas.....	37
7.1.1.	Recarga vertical (Rv).....	37
7.1.2.	Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	37
7.1.3.	Recarga incidental (Ri).....	38
7.2.	Salidas.....	39
7.2.1.	Bombeo (B).....	39
7.2.2.	Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh).....	39
7.2.3.	Evapotranspiración (ETR).....	39
7.2.4.	Descarga por flujo base de ríos (Dfb).....	41
7.3.	Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$	41
8	DISPONIBILIDAD.....	42
8.1.	Recarga total media anual (R).....	43
8.2.	Descarga natural comprometida (DNC).....	43
8.3.	Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	43
8.4.	Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	44
9.	BIBLIOGRAFÍA.....	45

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 Martínez de la Torre-Nautla, definido con la clave 3003 en el Sistema de Información Geográfica para el Manejo de las Aguas Subterráneas (SIGMAS) de la Comisión Nacional del Agua, se ubica en la porción centro-norte del estado de Veracruz, entre los paralelos 19°39' y 20°28' de latitud norte y los meridianos 96°26' y 97°19' de longitud oeste, comprendiendo una superficie de 4,351 km². La porción occidental de su territorio se ubica en territorio del estado de Puebla.

Sus límites con los acuíferos vecinos son los siguientes: al norte y oeste con el acuífero Tecolutla, al sur con Valle de Actopan y al suroeste con el acuífero Perote-Zalayeta, todos ellos pertenecientes al estado de Veracruz; al norte y este su límite natural es el Golfo de México (figura 1).



Figura 1. Localización del acuífero

Geopolíticamente, en el estado de Veracruz comprende totalmente los municipios Martínez de la Torre, Nautla, Misantla, Yecuatla, Juchique de Ferrer, Colipa, Vega de Alatorre, Tenochtitlán, Las Minas, Tlapacoyan y Tatatla; parcialmente abarca territorio de los municipios Tecolutla, Atzalán, Papantla, Jalancingo, Altotonga, Villa Aldama, Las Vigas de Ramírez, Tlacolula, Tonayán, Miahuatlán, Landero y Coss, Chiconquiaco y Alto Lucero de Gutiérrez Bar.

En el territorio del estado de Puebla, comprende parcialmente los municipios Acateno, Hueytamalco y Xiutetelco.

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

Tabla 1. Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada del acuífero

ACUIFERO 3003 MARTINEZ DE LA TORRE-NAUTLA							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	97	8	2.8	19	38	52.9	
2	97	13	39.6	19	40	19.3	
3	97	11	8.1	19	43	42.1	
4	97	13	18.3	19	48	54.7	
5	97	18	18.2	19	51	56.1	
6	97	19	16.7	19	52	39.6	
7	97	18	45.2	19	54	27.4	
8	97	17	8.2	19	56	26.0	
9	97	16	19.4	20	1	46.1	
10	97	13	54.1	20	10	34.8	
11	97	10	44.3	20	14	19.7	
12	97	6	59.2	20	16	52.1	
13	97	3	50.5	20	20	22.3	
14	96	59	13.6	20	27	58.8	DEL 14 AL 15 POR LA LINEA DE BAJAMAR A LO LARGO DE LA COSTA
15	96	26	31.0	19	49	6.7	
16	96	31	35.2	19	48	38.2	
17	96	37	12.4	19	45	48.1	
18	96	38	4.8	19	44	59.4	
19	96	41	37.3	19	44	59.3	
20	96	43	34.3	19	43	35.4	
21	96	45	11.5	19	43	25.3	
22	96	46	22.3	19	45	14.1	
23	96	49	53.0	19	44	35.7	
24	96	54	7.6	19	43	45.3	
25	96	56	0.0	19	43	41.4	
26	96	58	41.1	19	44	59.4	
27	97	1	21.4	19	43	1.7	
28	97	3	44.5	19	40	38.6	
1	97	8	2.8	19	38	52.9	

1.2. Situación administrativa del acuífero

El acuífero pertenece al Organismo de Cuenca Golfo Centro y al Consejo de Cuenca Ríos Tuxpan al Jamapa, instalado el 12 de septiembre de 2000. En la totalidad de su superficie no rige ningún decreto de veda para la extracción de agua subterránea. Sin embargo, se encuentra sujeto a las disposiciones del “ACUERDO General por el que se suspende provisionalmente el libre alumbramiento de las aguas nacionales del subsuelo en los 96 acuíferos que se indican”, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 5 de abril de 2013, a través del cual en el 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 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.

El uso principal del agua subterránea es el público-urbano. De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 3. En el territorio que cubre el acuífero no se localiza distrito o unidad de riego alguna, ni tampoco se ha constituido a la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la zona que comprende el acuífero se han realizado estudios hidrogeológicos de evaluación, de cobertura regional, otros locales para abastecimiento de agua potable a comunidades. Entre los más importantes y recientes destacan los siguientes:

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO EN LOS ACUÍFEROS CUICATLÁN, COATZACOALCOS, EN EL ESTADO DE OAXACA; JALAPA-COATEPEC, TECOLUTLA Y ÁLAMO-TUXPAN, EN EL ESTADO DE VERACRUZ, elaborado por Consultoría BETSCO, S.A. de C.V., para la Comisión Nacional del Agua, en 2010. El objetivo general de este estudio fue el conocimiento de las condiciones geohidrológicas de los acuíferos mediante el análisis de la evolución de los niveles del agua; obtener información necesaria para calcular su recarga y determinar la disponibilidad media anual de agua subterránea; así como conocer el número y distribución de las captaciones de agua subterránea existentes. Mediante la realización de actividades de campo que incluyeron censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría de las extracciones, realización de pruebas de bombeo sondeos geofísicos y reconocimientos geológicos, fue posible plantear el balance de aguas subterráneas.

ESTUDIO DE REACTIVACIÓN DE REDES DE MONITOREO PIEZOMÉTRICO DE LOS ACUÍFEROS TECOLUTLA, MARTINEZ DE LA TORRE, VALLE DE ACTOPAN, OMEALCA-HUIXCOLOTLA, PEROTE-ZALAYETA, COSTERA DE COATZACOALCOS, SIERRA DE SAN ANDRÉS TUXTLA, LOS NARANJOS, SOTEAPAN-HUEYAPAN, COSTERA DEL PAPALOAPAN Y ÁLAMO-TUXPAN, EN EL ESTADO DE VERACRUZ, realizado en 2011 por Consultoría BETSCO, S.A. de C.V. para la Comisión Nacional del Agua. Los objetivos del estudio fueron establecer una red de monitoreo

simplificada y confiable para la obtención de información piezométrica y de calidad del agua de los acuíferos, mediante la ubicación, inspección y selección en campo de pozos de monitoreo, conocer su evolución en el tiempo y la condición actual de los niveles del agua subterránea, como resultado de las variables que intervienen en el proceso de recarga y descarga. Elabora mapas de configuración del nivel estático.

INFORMACIÓN PIEZOMÉTRICA, CENSO E HIDROMETRÍA DEL ACUÍFERO MARTINEZ DE LA TORRE-NAUTLA, VERACRUZ. Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca Golfo Centro, 2019. Se utilizó la información piezométrica para la elaboración de las configuraciones del nivel estático, el censo de aprovechamientos, hidrometría de las extracciones y aforo del flujo base.

3. MARCO FÍSICO

3.1. Provincias fisiográficas

De acuerdo a la clasificación fisiográfica de Erwin Raisz (1959), modificada por Ordoñez (1964), la porción oriental del área que cubre el acuífero se localiza en la Provincia Fisiográfica Llanura Costera del Golfo de México, en tanto que sus extremos sur y occidental pertenecen a la Provincia Fisiográfica Eje Neovolcánico.

Por otra parte, según la regionalización fisiográfica del INEGI (1990), pertenece a la Provincia Fisiográfica Llanura Costera del Golfo Norte, Subprovincia Llanuras y Lomeríos, y la superficie que se localiza en la Fisiográfica Eje Neovolcánico, pertenece a la Subprovincia Chiconquiaco y una pequeña área del extremo suroccidental a la Subprovincia Lagos y Volcanes de Anáhuac.

La Provincia Llanura Costera del Golfo, abarca la mayor parte del estado y se caracteriza por la presencia de dos cuencas sedimentarias donde se depositaron rocas del Paleógeno-Neógeno, formadas principalmente por lutitas y areniscas, cuyas características litológicas varían de acuerdo al ambiente de depósito que varían desde continental (deltas y barras) hasta marino somero. Presenta una morfología variada en la que predomina el relieve de superficies planas, inclinadas al oriente, originadas por la acumulación fluvial y marina; también existen superficies onduladas, formadas por una erosión diferencial; localmente se levantan grandes montañas, como la sierra de Tamaulipas, que limita la zona de estudio al occidente y al poniente por el frente montañoso de la Sierra Madre Oriental. Las planicies que se extienden transversalmente hasta las inmediaciones de la Sierra Madre Oriental están constituidas por lomeríos, superficies onduladas y estratos ligeramente

inclinados al oriente, de acuerdo al buzamiento de las capas de roca. Las elevaciones menores locales corresponden, por lo general, a las crestas de los anticlinales que están coronados por remanentes de erosión en donde afloran los conglomerados recientes.

La Subprovincia Llanuras y Lomeríos se caracteriza por estar formada por sedimentos antiguos arcillosos y arenosos, de edades que decrecen hacia la costa (Mesozoico y Paleógeno-Neógeno). Aunque presenta coronas de rocas basálticas de morfología de mesetas, esta subprovincia se caracteriza por presentar extensas llanuras interrumpidas por lomeríos. Las rocas poco resistentes, como las margas y lutitas, son disectadas rápidamente. La capa de conglomerados ha sido intensamente desmembrada en la superficie, permaneciendo en forma de manchones delimitados por valles fluviales.

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 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, Matlacuéyetl (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 los 4,250 msnm y la segunda en la porción media cuenta con una ancha cima cónica que alcanza una altura de 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.

3.2. Clima

De acuerdo con la clasificación de Köppen modificada por Enriqueta García (1964), para las condiciones de la República Mexicana, el clima de la región presenta variantes orientadas en sentido noreste-suroeste, conforme se incrementa la elevación topográfica. En la zona costera el clima es de tipo Aw1(x') y Aw2(x'), cálido subhúmedo, temperatura media anual mayor de 22 °C y temperatura del mes más frío mayor de 18 °C. La precipitación del mes más seco de 0 a 60 mm; lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal mayor al 10.2% del total anual. En la zona central es de tipo Am(f), cálido húmedo, temperatura media anual mayor de 22 °C y temperatura del mes más frío mayor de 18 °C. Precipitación del mes más seco menor de 60 mm; lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal mayor al 10.2% del total anual.

Hacia las zonas de mayor elevación topográfica el clima presenta cuatro variantes: (A)C(fm) semicálido húmedo, temperatura media anual mayor de 18 °C, temperatura del mes más frío menor de 18 °C, temperatura del mes más caliente mayor de 22 °C. La precipitación anual es mayor de 500 mm y precipitación del mes más seco mayor de 40 mm; lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal mayor al 10.2% del total anual. C(f) templado, húmedo, temperatura media anual entre 12 °C y 18 °C, temperatura del mes más frío entre -3 °C y 18 °C y temperatura del mes más cálido menor de 22 °C. La precipitación en el mes más seco mayor de 40 mm; lluvias todo el año y porcentaje de lluvia invernal mayor al 18% del total anual. C(m) templado, húmedo, temperatura media anual entre 12 °C y 18 °C, temperatura del mes más frío entre -3 °C y 18 °C y temperatura del mes más cálido menor de 22 °C. La precipitación en el mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual. Cb'(m) semifrío, húmedo con verano fresco largo, temperatura media anual entre 5 °C y 12 °C, temperatura del mes más frío entre -3 °C y 18 °C; temperatura del mes más cálido menor de 22 °C. La precipitación en el mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal entre 5 y 10.2% del total anual. En menor proporción, en las porciones topográficamente más altas, se registran los climas templados subhúmedos Cw₀, Cw₁ y Cw₂.

Para la determinación de las variables climatológicas se cuenta con información de 6 estaciones climatológicas ubicadas dentro de los límites del acuífero: Libertad, Martínez de la Torre, San Rafael, Misantla, El Raudal y Vega de Alatorre, cuyo registro comprende un periodo entre los años 1970 a 2015. Con base en los registros de estas estaciones y el método de Polígonos de Thiessen, se determinaron valores de precipitación y temperatura media anual de **1588.3 mm y 24.3 °C** respectivamente. De igual manera, con respecto a la evaporación potencial, se obtuvo un valor de **1,306.6 mm anuales**.

El régimen pluvial presenta, en términos generales, dos períodos de ocurrencia, uno en verano de junio a septiembre, cuando se registran los valores más altos, y otro de lluvias invernales que abarca de enero a marzo, con precipitaciones menos significativas provocadas principalmente por los frentes fríos que afectan la región. En cuanto a la distribución mensual de la temperatura media, junio es el mes más cálido, en tanto que los meses de enero y diciembre registran la menor temperatura media.

3.3. Hidrografía

El área cubierta por el acuífero pertenece a la Región Hidrológica 27 “Norte de Veracruz” (Tuxpan-Nautla), Subregión Hidrológica Norte de Veracruz, en la cuenca Nautla y Otros, comprendiendo las subcuencas de los ríos Bobos, María de la Torre, Nautla, Misantla, Colipa, Yachite, Santa Ana y Arroyo Solteros. La Región Hidrológica Tuxpan-Nautla se localiza en la porción central de la llanura costera del Golfo de México y ocupa la región norte del estado de Veracruz. Está integrada por las cuencas de los ríos Nautla, Tecolutla, Cazones y Tuxpan, que desembocan en el Golfo de México y tienen su origen fuera de la entidad. El acuífero Martínez de la Torre-Nautla comprende la porción sur de región hidrológica, cuyos principales ríos tienen su origen en los límites entre los estados de Veracruz, Puebla e Hidalgo, hasta su desembocadura en el Golfo de México.

La división hidrológica permite identificar varias subcuencas. Una de ellas se denomina Estero Tres Encinos que se localiza en la porción norte y noreste del acuífero, se forma por una serie de arroyos intermitentes que desembocan en el estero Tres Encinos, que vierte sus aguas al Golfo de México a la altura del poblado Casitas. Entre sus afluentes principales destacan los conocidos como Estero Los Tanques, Río El Jaral y el de mayor importancia por su aportación que es el Río Vega

de San Marcos, formado por la confluencia de los arroyos Tranca Puerta de Fierro, Banco de Piedra y Zanja Arena. En esta cuenca no existen estaciones hidrométricas.

La segunda cuenca ocupa la porción central del acuífero, es la de mayor importancia y corresponde a la del Río Nautla, que se forma por el río del mismo nombre y sus afluentes conocidos como María de la Torre, Quilate, Colorado Grande y Chapachapa, entre otros. Su origen se localiza en las estribaciones del Volcán Cofre de Perote, siguiendo una topografía accidentada y recibiendo diversos afluentes, cambia su nombre a Río La Trinidad y posteriormente a Río Bobos y Nautla. En ella se localiza la gran mayoría de los aprovechamientos del agua subterránea. La tercera cuenca de importancia se localiza en la porción sureste del acuífero, al sur de Nautla y se denomina Río Misantla, que se forma por el río del mismo nombre, así como por diversos arroyos que confluyen a él, entre los que destaca el Arroyo El Pato. Su origen se localiza fuera de la superficie del acuífero.

Adicionalmente a estas cuencas, se delimitaron otras de menor dimensión que se localizan en la región sureste y que han sido denominadas Laguna Chica y Laguna Grande, formada por los ríos Cerritos, Las Flores, Arroyo Aparicio y otros que en su conjunto alimentan al estero El Vado, que descarga directamente al mar, la del Río Colipa y la del Río Miraflores.

Los principales ríos de la región tienen un patrón de escurrimiento de tipo dendrítico o ramificado y en la planicie tienden a formar meandros. Los escurrimientos son de tipo intermitente y sólo el Río Nautla es perenne, que mantiene un caudal base importante durante el estiaje. En el territorio del acuífero no existe infraestructura hidráulica para el aprovechamiento del agua superficial.

3.4. Geomorfología

En la superficie del acuífero las elevaciones topográficas varían de 0 a 1,600 msnm. Las mayores elevaciones se localizan en el extremo sur y forman parte del Eje Neovolcánico, en donde se registran las mayores precipitaciones, en donde se generan los escurrimientos que fluyen hacia la planicie, dando lugar a corrientes generalmente de régimen torrencial y algunos con grandes caudales de flujo base durante el estiaje, que labran su curso por valles y lomeríos paralelos a las corrientes principales. Las sierras escarpadas se presentan a elevaciones que varían de 1,000 a 1,600 msnm y están constituidas por las lutitas, areniscas y calizas del Jurásico. En las porciones medias (de 200 a 1000 msnm) se presentan sierras y mesetas; y hacia las

porciones menos elevadas aparecen los valles con llanuras y laderas donde afloran principalmente rocas volcánicas y en las márgenes de los ríos Bobos, Nautla, Misantla y Chapachapa se encuentran amplios depósitos del Cuaternario, constituidos por material bien clasificado proveniente de la desintegración y posterior transporte y acarreo de las rocas mencionadas.

En la región nororiental se extiende la planicie costera formando un litoral cóncavo y sinuoso; en esta región la elevación es menor a 200 msnm y en ella predominan las llanuras y lomeríos caracterizados por extensos depósitos de material aluvial del Cuaternario. El litoral presenta esteros, barras y cordones litorales.

4. GEOLOGÍA

La región en la que se ubica el acuífero se encuentra en la Cuenca Tampico-Misantla (Lopez R., 1979), donde afloran formaciones del Cenozoico marino. Esta cuenca se ubica en la Llanura Costera del Golfo de México, limitada al norte por la sierra de Tamaulipas, al sur por el Macizo de Teziutlán, al este por el Golfo de México y al oeste por la Sierra Madre Oriental (Raisz, 1964). De acuerdo con los trabajos de Campa y Coney (1982), se encuentra comprendida en el Terreno Tectonoestratigráfico Coahuila y parte del Terreno Sierra Madre, cubierta por formaciones mesozoicas y cenozoicas. La secuencia estratigráfica está constituida por sedimentos marinos del Jurásico, Cretácico y Terciario; las unidades más antiguas afloran al oeste y las más recientes al este.

La Formación Huayacocotla es la unidad más antigua y consiste de arenisca de color gris verdoso, dispuesta en estratos de 20 a 60 cm, plegados y estirados formando "boudines", intercalados con conglomerado de color verde oscuro con fragmentos de cuarzo y rocas metamórficas, así como con lutitas carbonosas de color gris oscuro. Subyace en forma transicional a la Formación Cahuassas, constituida por limolita roja, arenisca y conglomerado, en estratos de espesor que varía de 20 a 90 cm. Está cubierta en forma transicional por un paquete representado por las formaciones Santiago, Tamán, y Pimienta, que fueron agrupadas por presentar litologías muy similares, dificultando su separación y representación. La litología está compuesta por caliza arcillosa dispuesta en estratos de 10 a 40 cm de espesor, alternando con lutita calcárea. Presenta clivaje y pliegues sinsedimentarios, con presencia de fósiles de amonitas, radiolarios y bioclastos indeterminados.

Subyacen discordantemente a la Formación Tamaulipas indiferenciado. Al igual que en la unidad anterior, están agrupadas las formaciones Tamaulipas Inferior y Tamaulipas Superior definiéndolas, como Tamaulipas Indiferenciado, consistente de calizas con líneas estilolíticas paralelas a la estratificación, y fracturas concoideas, dispuestas en estratos de 0.2 a 1.0 m de espesor con plegamientos. Subyace en forma concordante y transicional a la Formación San Felipe y Agua Nueva, que en esta zona fueron también agrupadas por la similitud de su litología, sus escasos afloramientos, pobres espesores y la escala de la cartografía. Alterna con lutitas y horizontes de bentonita. El espesor de sus estratos varía de 5 a 40 cm, que subyacen concordantemente a la Formación Méndez formada por lutitas y margas. Desarrolla un fracturamiento concoidal y clivaje en forma de lápiz, con intercalaciones delgadas de capas de arenisca de 5 a 10 cm de espesor. Su deformación es moderada, tiene un espesor estimado de 100 m. Subyace de manera concordante y transicional a sedimentos terciarios de la Formación Chicontepec. Las unidades subsecuentes a esta formación están representadas por las formaciones Guayabal, Chapopote-Tantoyuca, Palma Real, Mesón, Escolín y Tuxpan, que consisten de litologías muy semejantes de areniscas, lutitas y limolitas, que por su medio ambiente de depósito sus contactos son discordantes.

El vulcanismo está bien representado por espesores de derrames de basalto del Mioceno y Pleistoceno, cuyos afloramientos varían en extensión de 10 km² al sur de Martínez de la Torre hasta 55 km² al norte de Villa Ávila Camacho, así como por tobas de composición riolítica y dacítica que cubren de manera discordante a todo el paquete sedimentario, principalmente al sur. Parte de los depósitos cuaternarios se ubican en la costa, la cual se formó como resultado del desarrollo fluvial-deltaico de los ríos Tuxpan, Cazones, Tecolutla y Bobos, y algunos menores tales como los conocidos con los nombres de Tenistepec, Negro y Misantla. También existen depósitos eólicos y lagunares (Carta Geológica-Minera F14-12 "Poza Rica" Esc. 1:250.000, SGM, 2004).

4.1. Estratigrafía

La secuencia estratigráfica que aflora en esta región está constituida por rocas sedimentarias y volcánicas cuya edad varía del Jurásico Inferior al Reciente (figura 2). A continuación, se describen de manera general las distintas unidades litológicas de la más antigua a la más reciente.

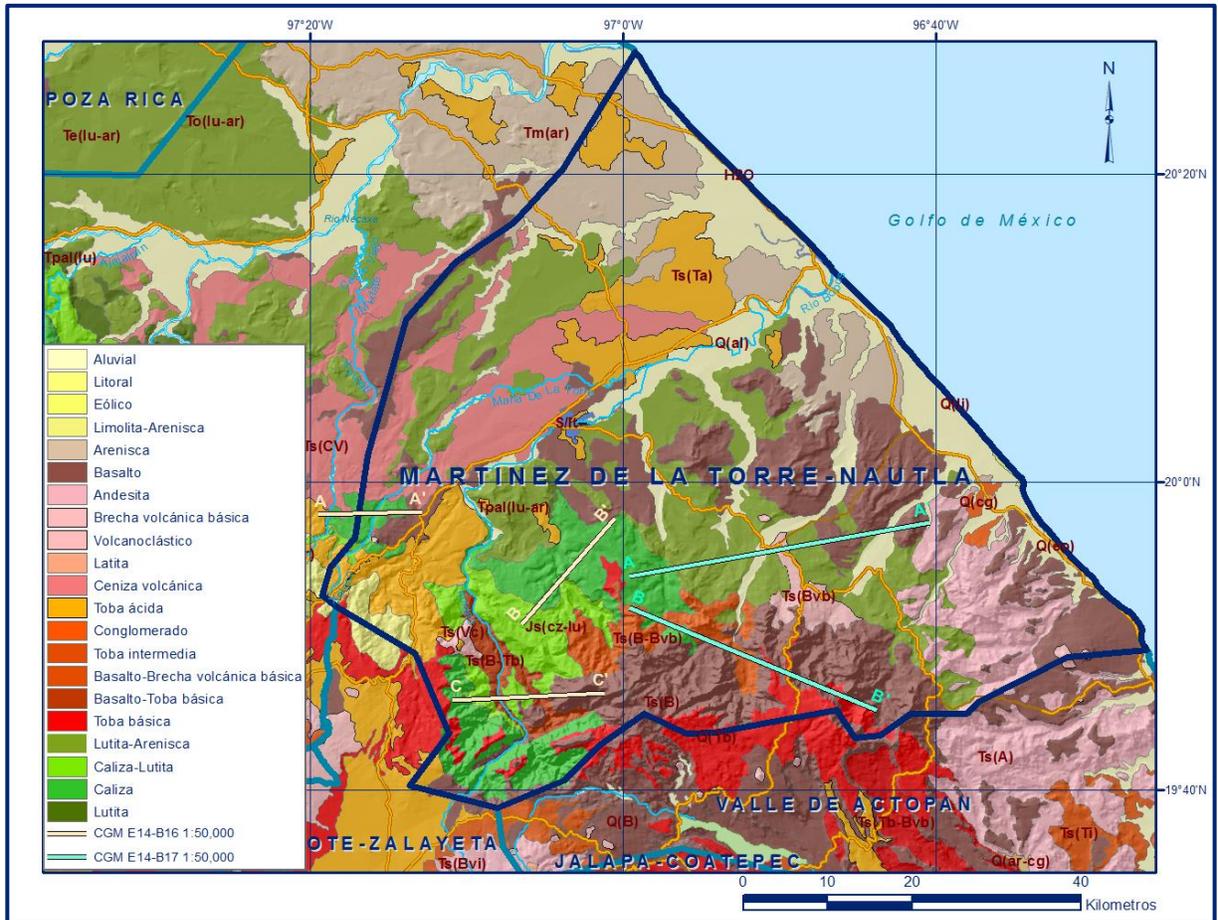


Figura 2. Geología general del acuífero

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 de "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 Cahuasas, en tanto que su contacto inferior no se observa.

Formación Cahuasas

Está constituida por limolitas de color rojo, areniscas y conglomerados, dispuestas en estratos cuyo espesor varía de 20 a 90 cm cubiertas en forma transicional por un paquete representado por las formaciones Santiago, Tamán y Pimienta. Estas formaciones generalmente se agrupan 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 Santiago

Conformada por calizas arcillosas dispuestas en capas de espesor variable de 10 a 40 cm, que se presentan alternadas con lutitas calcáreas. Muestran clivaje y pliegues sin-sedimentarios, así como frecuentes amonitas, radiolarios y bioclastos.

Formación Tamán

Definida por Heim en 1926 y después Erben la describe en su localidad tipo que es el poblado Tamán, ubicado 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, se ha identificado su presencia en superficie y en el subsuelo a través de los pozos petroleros; en algunas localidades sobreyace a la Formación Santiago, pero en otras llega a cubrir al basamento del Triásico. Algunos autores agrupan a las formaciones Tamán, Santiago y Pimienta en una sola unidad porque no aprecian límites contrastantes entre ellas. 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 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 dispuestas 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 y 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.

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, por ello se considera su localidad tipo.

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. Aflora en los cañones que cortan las Sierra de Tamaulipas, San Carlos y la Sierra Madre Oriental, 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 cm a 2 m de espesor, con pequeños mantos de óxido de hierro interestratificados y lamamiento perpendicular al rumbo de la estratificación. Su espesor alcanza hasta 400 m.

Su contacto superior está bien limitado por el Horizonte Otates de edad aptiana. 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. Su edad corresponde al Neocomiano.

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, cuyo 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. Sus estratos tienen espesor variable, desde unos cuantos cm hasta 0.50 m, intercalados en lutitas laminares 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 del 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, dispuestas 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 petroleros Ébano, Pánuco y al 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 que constituyen la 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 las 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.

Formación Tamabra

Definida por Muir en 1936 y descrita más ampliamente por Heim en 1940 y Flores en 1950. Aflora al este de la Sierra Madre Oriental, al oriente de los bordes arrecifales de la Plataforma San Luis Valles y del Atolón de la Faja de Oro, en el subsuelo de la Cuenca de Chicontepec, en el área de Poza Rica y en Misantla, Veracruz. Es un conjunto litológico constituido por brechas de carbonatos, es decir, son rocas clásticas de talud (dolomitizadas o parcialmente dolomitizadas); incluye rocas derivadas del borde de plataforma, por lo que contiene clastos de ambiente arrecifal, moluscos y rudistas.

La unidad consiste de brechas intraformacionales con fragmentos de packstone y grainstone, mudstone de foraminíferos y dolomías microcristalinas. Su espesor es muy variable, desde 200 m en el Campo Poza Rica, hasta 1500 m en otras localidades. Su edad Albiano-Cenomaniano se confirma con base en su posición estratigráfica y su contenido fósil de especies planctónicas y bentónicas como *Stomiosphaera conoidea*, *Microcalamoidesdiversus* y *Nannoconus minutus*. Su ambiente de depósito es de talud, representando las facies internas entre depósitos de arrecife y mar abierto.

Formación El Abra

Definida originalmente por Heim en 1926, en la localización tipo ubicada en la Sierra El Abra, está formada por dos miembros. El inferior constituido por una caliza de rudistas, a la que denominó Taninul y el superior por calizas con abundantes miliólidos. El miembro Taninul consiste de un bioherma de rudistas de edad Cenomaniano, con abundancia extraordinaria de radiolítidos, nerineas y algunos corales. Los estratos están casi horizontales y pueden observarse expuestos como 40 m de una caliza masiva, criptocristalina de color gris a gris crema con manchas negras de restos de hidrocarburos. El miembro superior está formado casi exclusivamente por una caliza gris masiva con abundantes miliólidos (*Nummoloculina heimi*, Bonet), con intercalaciones de calizas biostronales con *Toucasias*.

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, dispuesta en delgadas capas de carácter laminar, que contienen impresiones de *Inoceramus Labiatus*. La unidad 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 San Felipe y 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 bentoníticas de color verde y gris claro. Son típicos los intervalos de calizas moteadas ovaladas de color oscuro que se cree son debidos 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 Cautla de la Cuenca Guerrero-Morelos.

Formación Méndez

Definida por Jeffreys en 1910, al 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 lajamiento y pizarrosidad, que dan origen a 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 en la región 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. Sus afloramientos se distribuyen ampliamente en toda la superficie del acuífero. Está intrusionada por algunos diques, cuyo fracturamiento resultante le confiere permeabilidad secundaria.

TERCIARIO (NEÓGENO)

Grupo Chicontepec

Definida 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 micropalontología. 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. Su espesor en el subsuelo es variable y se incrementa de sur a norte; en Poza Rica tiene un promedio de 370 m; 796 m en Furbero y 935 m en Palmasola; registrando como espesor máximo 3,300 m (SGM, 2007). 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 Aragón

Fue definida por Nuttall en 1039, 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 porción 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, que contienen nódulos de siderita característicos y delgadas intercalaciones de arenas de grano fino. En la localidad tipo la formación 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 la Formación Guayabal 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 Chicontepepec, 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. Sus condiciones de depósito fueron en mares tranquilos, relativamente someros de plataforma clástica, con cambio laterales de facies.

Formación Chapopote-Tantoyuca

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 Álamo-Potrero del Llano, Veracruz. Se caracteriza por presentar estratificación irregular y se compone de margas con intercalaciones en la cima de capas delgadas de bentonita de color amarillo verdoso, 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 es de plataforma marina clástica, en un mar 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 Palma Real

Definida por Nuttall en 1928 y dividida por Villatoro (1932) en dos miembros: inferior y superior. El miembro inferior consiste de areniscas con diferentes texturas, margas arenosas de color gris azul con abundantes microforaminíferos, 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, dispuestas en estratos de 1 a 30 cm de espesor; fracturadas que intemperizan en colores crema y café amarillento. Las lutitas presentan intercalaciones de areniscas grises de grano fino a medio 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

Nombrada 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 Cazones hasta las cercanías 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 los *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 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.

Formación Escolín

Consiste en areniscas calcáreas de grano fino a medio que alternan con margas y calizas arenosas, dispuestas en estratos cuyo espesor varía de 0.04 a 0.7 m, sin contenido fósil, que en algunos sectores presentan lutitas arenosas y conglomerados. Su edad es del Mioceno-Temprano al Mioceno Medio y su espesor varía entre 90 y 300 m (SGM, 2011).

Formación Tuxpan

Fue definida por Dumble, en 1911 y está constituida por capas de lutitas arenosas, areniscas, areniscas calcáreas y calizas arenosas; localmente se aprecian algunos conglomerados, particularmente hacia su base, aunque en casos como el del campo petrolero Ezequiel Ordóñez, la base está definida por un horizonte de tobas de color verde. Los sedimentos de esta formación fueron depositados durante una transgresión de aguas someras, seguida por una regresión, hasta alcanzar la posición actual del Golfo de México. Por su contenido fósil, se le asigna una edad del Mioceno Inferior. Se presenta expuesta al sur de la Laguna de Tamiahua y el Río Tecolutla, cubierta en parte por sedimentos costeros y aluviales más recientes.

Presenta un echado regional hacia el oriente y descansa en discordancia sobre las formaciones oligocénicas Escolín, Coatzintla, Mesón, Alazán y Palma Real en toda la llanura costera del Golfo de México. Su espesor en superficie varía de 50 a 200 m y en su localidad tipo alcanza 150 m de potencia. En el subsuelo su espesor varía de 120 m,

en el campo Ezequiel Ordoñez, a 820 m en Tecolutla, es decir, se incrementa noreste a sureste. En los pozos marinos de la Faja de Oro tiene más de 1,500 m de espesor.

Basalto

Unidad constituida por derrames de basaltos de olivino que presentan estructura vesicular y en menor proporción amigdaloides, con relleno de calcita que localmente se conocen con el nombre de Formación Tlanchinol, de edad Plioceno. Se presentan como derrames lávicos de forma tabular, inalterados hasta muy intemperizados y se asocian a la actividad volcánica que tuvo lugar al finalizar la Orogenia Laramide, por lo que se les asigna una edad Paleógeno-Neógeno. Sus áreas de exposición se localizan dispersas en la región central y suroccidental del acuífero.

Rocas ígneas intrusivas

Están representadas por rocas de composición granodiorítica-diorítica y en ocasiones por gabros que presentan textura holocristalina y color oscuro, emplazadas en forma de troncos en las rocas arcillosas del Eoceno. Su expresión morfológica es de prominencias que modifican los lomeríos.

Rocas ígneas extrusivas (Terciario-Cuaternario)

Se encuentran distribuidas principal y ampliamente al sur de Papantla sobre la margen derecha del río Tecolutla. Consisten en derrames de basalto y también en tobas riolíticas y dacitas.

CUATERNARIO

Depósitos Aluviales

Están constituidos por un conjunto de materiales clásticos de tamaño que varía desde gravas hasta arcillas que forman depósitos lenticulares con alto grado de heterogeneidad tanto lateral como vertical, debido a los depósitos sucesivos de las principales corrientes superficiales. Estos materiales descansan indistintamente sobre las rocas más antiguas, su espesor es variable, desde unos cuantos metros hasta un máximo de 30 m. Los aluviones se presentan masivos al pie de las sierras, en estratos mal definidos y en lentes en las terrazas fluviales. Las gravas y arenas rellenan los valles fluviales y los materiales más finos forman planicies aluviales, principalmente en las zonas de influencia de los ríos.

Depósitos Lacustres

Esta unidad representa a los depósitos arcillosos y arenosos de las lagunas marginales y los de pequeñas cuencas endorreicas. Las arcillas son generalmente plásticas y de color oscuro, las arenas son de grano fino, se presentan interestratificadas en capas laminares delgadas. Su expresión morfológica es de llanura y está expuesta principalmente, en las regiones topográficamente más bajas del sureste del área. Se desconoce su espesor.

Depósitos Eólicos

Se presentan en la zona costera y está constituidos por la acumulación de arenas de grano fino y medio y de fragmentos de conchas, transportados por el viento a partir de los depósitos de playa. Forman barras y dunas orientadas hacia el norte, en ocasiones con estratificación cruzada. En algunas zonas forman dunas fijas formadas por fragmentos de conchas y cementadas por carbonatos.

Depósitos de litoral

Sus afloramientos se restringen a la zona costera y están constituidos por fragmentos de conchas de diversos organismos y por arenas de cuarzo y feldespato de grano fino a medio, sujetos a la acción del oleaje. Su acumulación es la evidencia directa del retroceso del mar.

4.2. Geología estructural

Los lineamientos con orientación NW-SE son los más importantes, tienen una longitud aproximada de 800 km, desde Tamaulipas hasta Veracruz, a lo largo de los cuales se manifiestan varios cuerpos de rocas intrusivas y extrusivas de composición alcalina a calcoalcalina. Estos lineamientos limitan a la Sierra Madre Oriental con la Cuenca Tampico-Misantla y a algunas fosas internas rellenas por material reciente.

Otros lineamientos con rumbo NE-SW, se encuentran representados en los arroyos y ríos en el extremo suroeste de la región, hacia el extremo noroeste y la Planicie Costera del Golfo, perdiéndose bajo la cubierta sedimentaria reciente, se asocia a estos lineamientos un vulcanismo fisural representado por derrames de basalto. El rasgo más sobresaliente está representado por el Río Cazones. Entre Poza Rica y Álamo se observa una estructura semicircular, abierta en el extremo oriental delimitada por fallas que controlan la traza de los ríos Tuxpan, Pantepec y Cazones. Es posible que esta estructura se asocie a la erosión diferencial de las rocas arcillo-calcáreas del Paleógeno-Neógeno. Hacia el oriente se presentan pliegues suaves en

las rocas sedimentarias del Paleógeno-Neógeno, que se orientan preferencialmente al noroeste y en menor proporción al noreste. Se conforman anticlinales y sinclinales con flancos de pendientes muy suaves, tendiendo a desaparecer al oriente. En la zona poniente se tiene la presencia del frente de la Sierra Madre Oriental, donde se manifiesta con mayor intensidad la deformación, evidenciando anticlinales y sinclinales normales asimétricos y fallas normales con componente de movimiento lateral, orientadas en su mayoría al noroeste y en menor proporción al noreste (Carta Geológico-Minera Poza Rica F14-12. Escala 1:250,000. SGM, 2004).

La cuenca sedimentaria Tampico-Misantla está compuesta principalmente por tres unidades estructurales primarias: La porción sur de la Plataforma de Tamaulipas, La Antefosa de Chicontepec y la Sierra Madre Oriental. Destaca en la primera la Sierra de Tamaulipas, cuyo extremo sur está cubierto por sedimentos del Cretácico Superior y del Eoceno, dando origen a la estructura Pánuco-Ébano. Existe en ella un sistema de fallas con orientaciones NNE-SSW sin conexión con los esfuerzos tectónicos que levantaron la Sierra Madre Oriental. Al sur existe un bloque de la Faja de Oro, de forma semicircular, entre la Laguna de Tamiahua y la Barra de Tecolutla, que representa una estructura arrecifal con su porción más alta en el centro que buza hacia los extremos. La Orogenia Laramide levantó y plegó durante el Eoceno los sedimentos del Geosinclinal Mexicano, dando origen a la estructura de la Sierra Madre Oriental y formando también varias antefosas a lo largo de la margen oriental de la sierra, donde se acumularon grandes espesores de sedimentos de facies "flysch" durante el Eoceno. La zona que comprende la mayor parte del acuífero corresponde a la Planicie Costera del Golfo, que se caracteriza por estar constituida por depósitos aluviales y presentar algunos pliegues suaves, asimétricos y simétricos con rumbo general NW-SE.

Estructuralmente, la región se caracteriza por presentar pliegues anticlinales y sinclinales en las rocas cretácicas, donde los ejes de las estructuras presentan una orientación norte-sur; se observan estructuras simétricas, asimétricas, buzantes y recumbentes hacia el este, aunque en la zona sólo se observa una gran estructura anticlinal simétrica. Las rocas terciarias forman un monoclinal con echado muy suave hacia el este cubierto parcialmente por rocas basálticas. Esta secuencia se encuentra afectada por varios troncos de composición básica.

Durante el Jurásico Inferior se produce una subsidencia, que genera cuencas en las que se depositó la Formación Huayacocotla. A fines del Jurásico Inferior se generan

movimientos distensivos provocando la retirada de los mares, restituyendo las condiciones continentales; bajo estas condiciones durante el Jurásico Medio se depositan los lechos rojos de la Formación Cahuasas-Tenexcate. Al finalizar el Jurásico Medio y hasta fines del Cretácico ocurre una transgresión, que coincide con la apertura del Golfo de México, 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 desarrollan simultáneamente la cuenca Sierra Madre Oriental con sedimentación de cuenca y con una 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 paleoelementos depositándose una secuencia de margas y lutitas, correspondiente a la Formación Méndez, que cubre a las secuencias de ambas cuencas. La compresión ocasionada por 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 Tampico-Misantla y Veracruz.

Los fenómenos tectónicos que motivaron el levantamiento de la Llanura Costera a fines del Cretácico continuaron durante principios del Cenozoico, descubriendo los sedimentos marinos de esta época, para dejarlos expuestos a los procesos de intemperismo y erosión, que modelaron la morfología actual en forma de una superficie ondulada con pendiente suave, que asciende hacia el occidente, pero con accidentes topográficos en forma de escarpes en aquellas formaciones más resistentes a la erosión.

La formación de los valles en la región se explica por medio de una serie de procesos tectónicos correspondientes a la formación de la Sierra Madre Oriental, seguida de una etapa de intenso intemperismo y erosión, que produjo una peniplanicie al nivel de la base de los derrames basálticos que se observan. Posteriormente le siguió una actividad volcánica que dio lugar a los depósitos de derrames basálticos, cuyos vestigios se observan en las mesetas y en los cuellos volcánicos que se han identificado. Después siguieron posiblemente dos épocas de rejuvenecimiento durante las cuales se depositaron los sedimentos que rellenaron las cuencas y la planicie costera.

De todo lo anterior, se puede establecer que existieron dos fases tectónicas de deformación; la primera, de compresión, se inició durante el Cretácico Tardío y

culminó en el Terciario Temprano, que originó el plegamiento y dislocación por fallas inversas de las rocas sedimentarias cretácicas y de la generación de la cuenca Tampico–Misantla. La segunda fase tectónica de deformación fue de carácter distensivo y está evidenciada por las fallas normales del área y por el vulcanismo básico. El área del acuífero corresponde a una pequeña cuenca sedimentaria plegada en las porciones noroccidental y sur, que presenta fallas orientadas en sentido noreste-suroeste, cuya traza es sensiblemente paralela al cauce del Río Nautla. Posterior al fallamiento, la cuenca fue rellenada por material ígneo extrusivo, principalmente tobas y otras rocas granulares, que hacia la parte alta cubrieron parte de la superficie.

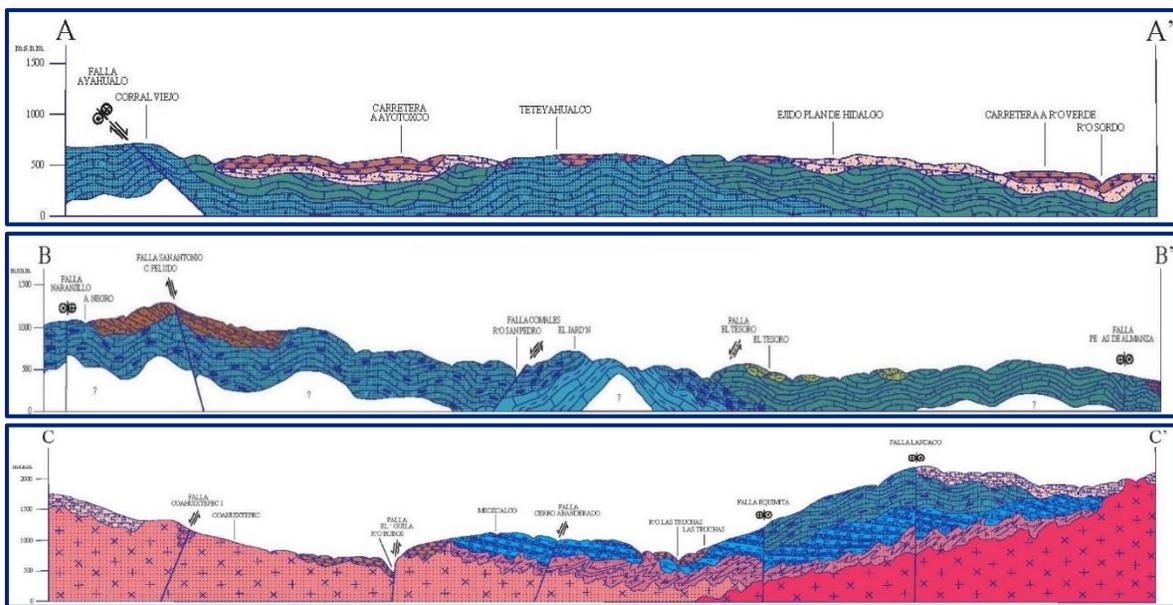
4.3. Geología del subsuelo

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 la cima y son el resultado del acarreo post-orogénico de terrígenos. Su distribución espacial es sensiblemente paralela a la facies de depósito de tipo flysch, que 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, que descansan sobre las rocas del Mesozoico y tienen un espesor que varía de pocos metros, hacia las estribaciones de la Sierra Madre Oriental, a más de 6,000 m en el subsuelo marino.

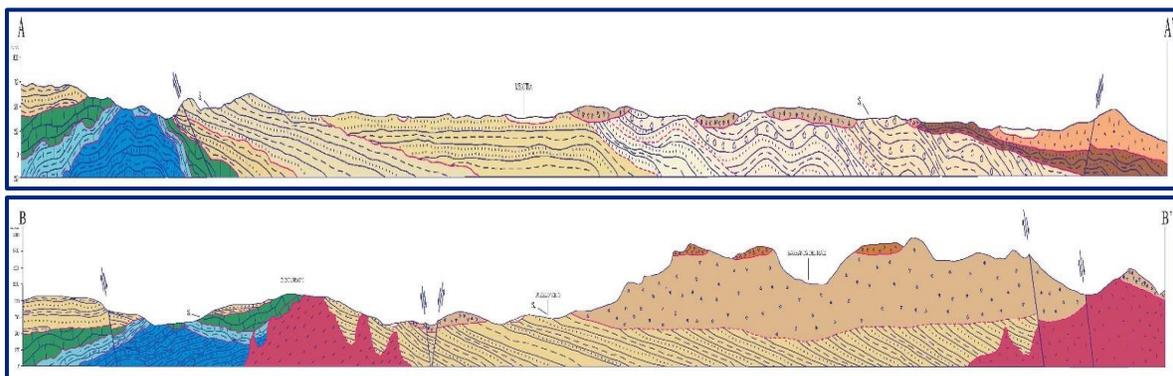
De acuerdo con la información geológica, hidrogeológica y geofísica recabada en el acuífero y por correlación con acuíferos vecinos, es posible definir que el acuífero se encuentra alojado, en su porción superior, en los sedimentos aluviales de granulometría variada, que constituyen el lecho y la llanura de inundación de los Ríos Nautla, Misantla, Bobos y Chapachapa y otros arroyos tributarios, así como depósitos litorales, areniscas y conglomerados que conforman la planicie costera. Los depósitos granulares y conglomeráticos algunas decenas de metros de espesor y fueron, en gran parte, el relleno de depresiones o cuencas formadas en fosas tectónicas que se produjeron durante la Orogenia Laramide. La porción inferior se aloja en una

secuencia de rocas sedimentarias y volcánicas, entre las que destacan intercalaciones de calizas, areniscas y basaltos, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento. Las calizas y areniscas constituyen horizontes acuíferos que pueden presentar condiciones de confinamiento, debido a que su litología incluye alternancia con lutitas y limolitas. Este es un acuífero que aún no sido explorado.

Las fronteras al flujo subterráneo y el basamento geohidrológico del acuífero están representadas 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 lutitas, limolitas y areniscas que conforman las formaciones del Jurásico (figura 3).



Fuente: Carta Geológica-Minera E14-B16 "Altotonga" Esc. 1:50.000 (SGM, 2010)



Fuente: Carta Geológica-Minera E14-B17 "Misantla" Esc. 1:50.000 (SGM, 1996)

Figura 3. Secciones geológicas esquemáticas

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1. Tipo de acuífero

A partir de la información geológica superficial y del subsuelo, recabada en el acuífero así como lo observado en otros acuíferos vecinos que tienen el mismo origen y constitución geológica, es posible definir la presencia de dos medios hidrogeológicos, uno de naturaleza porosa y otro fracturado, que conforman un acuífero de **tipo libre** heterogéneo y anisótropo tanto en sentido horizontal como vertical, de baja capacidad de almacenamiento, conformado por dos medios hidrogeológicos, uno de naturaleza porosa y otro fracturado. El medio poroso constituye la unidad superior y está representado por los sedimentos aluviales de granulometría que varía de gravas a arcillas, que constituyen el lecho y la llanura de inundación de los ríos Nautla, Misantla, Bobos y sus arroyos tributarios, así como depósitos litorales y conglomerados que conforman la planicie costera. 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, areniscas, basaltos y andesitas, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento. Las calizas y areniscas constituyen horizontes acuíferos que pueden presentar condiciones de confinamiento, debido a que su litología incluye alternancia con lutitas y limolitas.

5.2. Parámetros hidráulicos

Existe muy poca información de pruebas de bombeo realizadas en aprovechamientos localizados en este acuífero. Sin embargo, se pueden tomar en cuenta las 10 pruebas ejecutadas en 2010 en el acuífero Tecolutla vecino al norte, que tiene un mismo origen, evolución y constitución geológica; todas ellas de corta duración, en etapas de abatimiento y de recuperación. De los resultados de su interpretación por métodos analíticos convencionales, se determina que los sedimentos que constituyen el acuífero presentan permeabilidad media. Los valores de transmisividad varían de **3.3×10^{-3} a $16.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ (285 a 1382 m^2/d)**, con un valor promedio de **$9.7 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ (838 m^2/d)**. Los valores de conductividad hidráulica varían de **2.7×10^{-6} a $1.8 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ (0.2 a 15.5 m/d)**, considerando un espesor saturado promedio de 30 a 40 m. Los valores más altos corresponden a los sedimentos clásticos de mayor granulometría y mejor clasificados que constituyen el cauce de los ríos y arroyos.

En los aprovechamientos emplazados en las lutitas de las formaciones Méndez, San Felipe y Agua Nueva, las pruebas de bombeo realizadas en acuíferos vecinos al norte, que tienen el mismo origen, evolución y constitución geológica, se obtuvieron valores de transmisividad que varían de **2.7×10^{-4} a $8.8 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ (23.3 a 7.6 m^2/d)**, con un valor promedio de **$4.5 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ (38.9 m^2/d)**. En las rocas sedimentarias el sistema de fracturamiento y fallamiento incrementa la permeabilidad, que puede ser hasta de dos órdenes mayores de magnitud, dependiendo de su frecuencia, abertura y relleno.

En cuanto a los valores del rendimiento específico, ninguna de las pruebas de bombeo contó con pozo de observación, por lo que no fue posible obtener valores del coeficiente de almacenamiento. De acuerdo con la constitución geológica de los materiales que conforman el acuífero, se estima un valor de rendimiento específico de **0.1 a 0.2** para los depósitos clásticos de mayor granulometría, y de **0.01 a 0.05** para los sedimentos más finos y las lutitas.

5.3. Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, se cuenta con la información recabada como parte de las actividades del estudio realizado en 2011 además de registros históricos durante el periodo 2005-2019, obtenidos por el Organismo de Cuenca Golfo Centro, en la red de monitoreo piezométrico. Para el planteamiento del balance de aguas subterráneas se eligió el periodo 2016-2019 que tiene mayor y mejor distribución espacial. Debido a que los niveles estáticos se han mantenido más o menos constantes, únicamente se describen las configuraciones del 2019.

5.4. Comportamiento hidráulico.

5.4.1. Profundidad al nivel estático

La profundidad al nivel del agua subterránea en el año 2019 presentó valores que variaron de 2 a 30 m, los cuales se incrementan por efecto de la topografía de la planicie costera y del cauce del Río Bobos hacia las estribaciones de las sierras que limitan los valles conforme se asciende topográficamente. Los niveles estáticos más someros, menores de 5 m, se registran en la ribera del Río Bobos, ríos y arroyos tributarios, y en la planicie costera; en tanto que las mayores profundidades, de 20 a 30 m, se presentan en zonas topográficamente más altas, ubicadas al norte y noreste de Martínez de La Torre (figura 4).

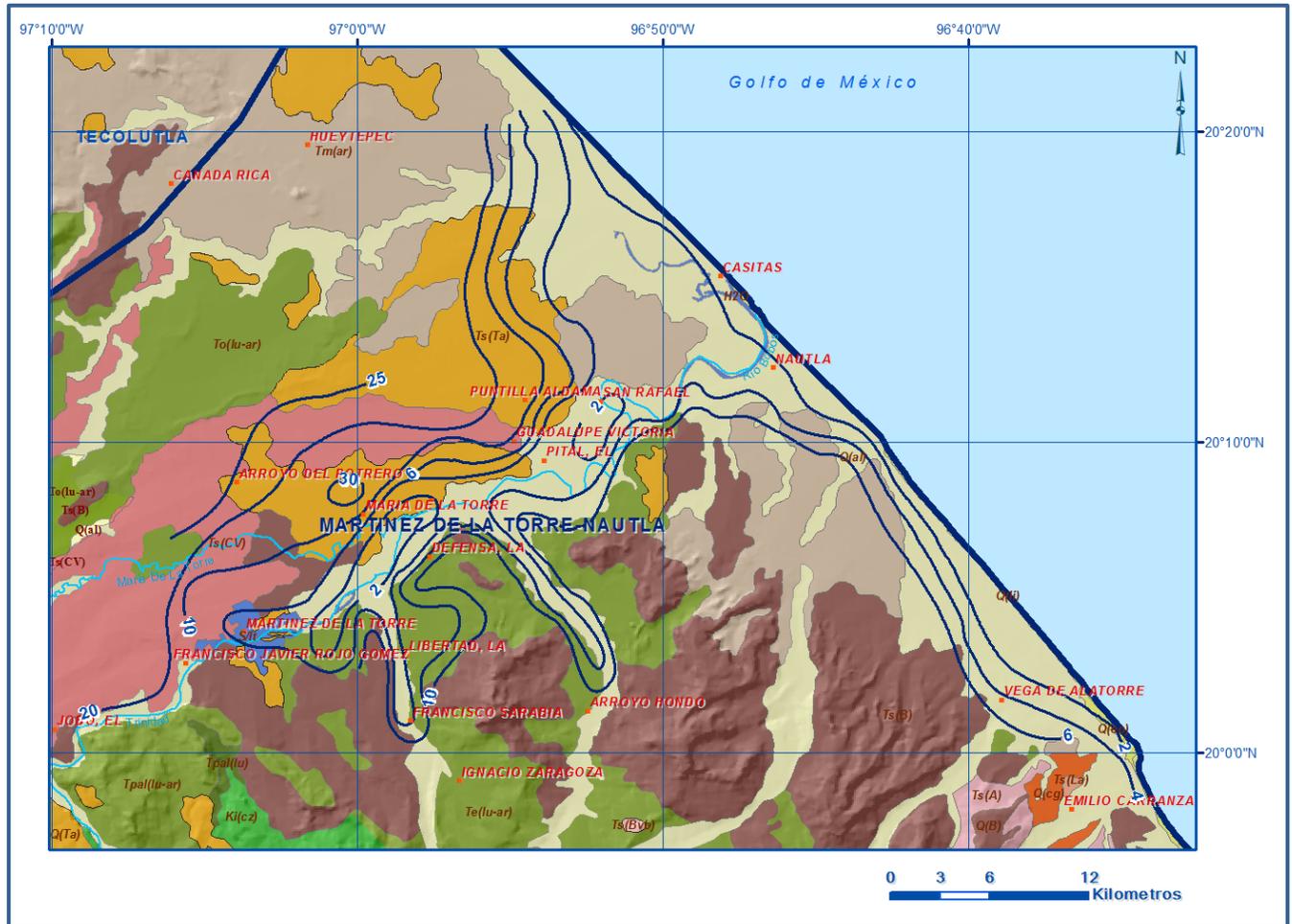


Figura 4. Profundidad al nivel estático en 2019 (m)

5.4.2 Elevación del nivel estático.

De acuerdo con la configuración de elevación del nivel estático, en el año 2019 se registraron valores de carga hidráulica que variaron de 1 a 95 msnm, que se incrementan de la planicie costera hacia los flancos de las sierras que delimitan el acuífero y aguas arriba a lo largo del cauce del Río Bobos. Los valores más altos, 60 a 95 msnm, se registraron en la porción occidental y suroccidental del valle, en la zona ubicada entre Martínez de la Torre y los poblados Francisco Javier Rojo Gómez y Arroyo del Potrero, desde donde descienden gradualmente por efecto de la topografía, al igual que los valores de profundidad, hacia la costa. De esta manera, la dirección preferencial del flujo subterráneo es suroeste-noreste, paralela a la dirección de escurrimiento del Río Bobos, con alimentaciones provenientes de los flancos norte y sur. En la planicie costera se registraron elevaciones puntuales de 1 msnm (metros bajo el nivel del mar). El flujo subterráneo no muestra alteraciones o distorsiones causadas por la concentración de pozos o del bombeo, debido a que su valor de recarga es muy superior al de su extracción (figura 5).

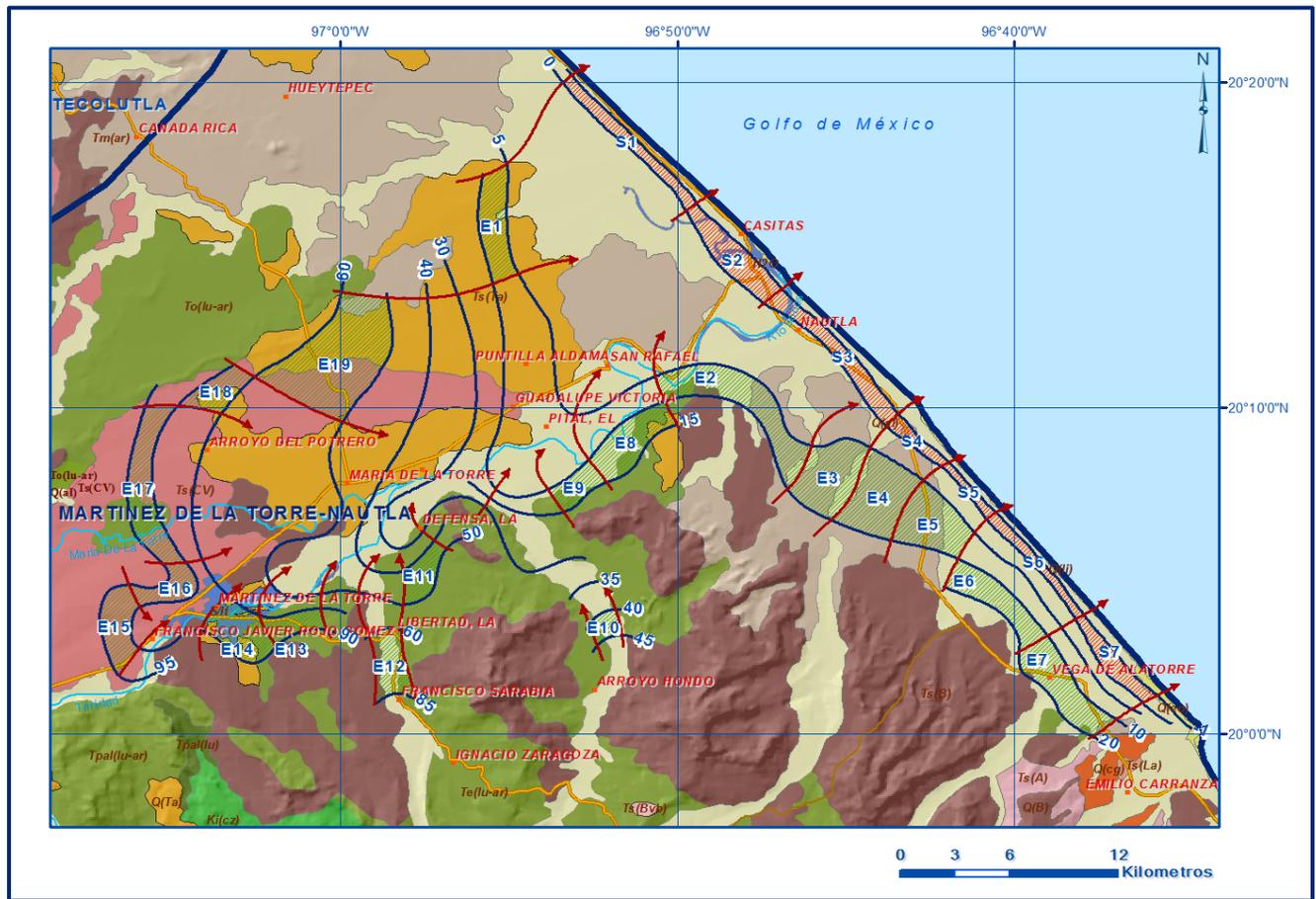


Figura 5. Elevación del nivel estático en 2019 (msnm)

5.4.3. Evolución del nivel estático

La configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2016-2019 registró valores de abatimiento de 1 a 2 m, es decir de 0.3 a 0.7 m anuales. Los abatimientos de 2 m se presentan de manera local en las márgenes del Río Bobos, en la zona ubicada al sur del poblado El Pital y en las inmediaciones de San Rafael. La evolución del nivel estático no registra cambios importantes en su posición, sólo presenta cambios estacionales naturales ocasionados por la alternancia de las temporadas de estiaje y lluvias. En la mayor parte de la superficie de explotación no se registran cambios significativos en la posición de los niveles del agua subterránea (figura 6).

ubicados en la zona próxima a la costa, entre las poblaciones San Rafael, Nautla y Casitas.

Como referencia de información más reciente, se puede adoptar por correlación hidrogeológica los resultados de los análisis fisicoquímicos realizados a 20 muestras de agua subterránea obtenidas en 2010 en el acuífero vecino al norte Tecolutla, que tiene el mismo origen y constitución geológica. Las determinaciones incluyeron: temperatura, conductividad eléctrica, pH, Eh, nitratos, dureza total, iones mayoritarios, STD y análisis bacteriológicos.

Los resultados confirman, de manera general, lo expresado antes para el acuífero Martínez de la Torre- Nautla: concentración de STD de 154 a 914 mg/l, que no sobrepasan el límite máximo permisible de 1000 ppm establecido en la modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994; valores de conductividad eléctrica de 140 a 5120 $\mu\text{S}/\text{cm}$, es decir, agua dulce a salobre de acuerdo con la APHA, 1995.

Los siguientes resultados pueden también ser indicativos de las condiciones de este acuífero. El pH registró variaciones de 6.3 a 7.6, que representa agua ligeramente alcalina en la que existe predominio en el contenido de carbonatos, con respecto a los sulfatos. Con respecto a la temperatura del agua, se obtuvieron valores de 22.8 a 25.5 °C. De acuerdo con el criterio de Wilcox, que relaciona la conductividad eléctrica con la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), el agua extraída se clasifica como de salinidad media (C_2) y contenido bajo de sodio intercambiable (S_1), que es apropiada para su uso en riego sin restricciones. Con respecto a las concentraciones de elementos mayores por ion dominante, se identificó como familia principal la bicarbonatada-cálcica, que corresponde a agua de reciente infiltración, con periodos cortos de residencia, que ha circulado a través de rocas calcáreas y volcánicas

Es evidente el riesgo de contaminación por las fuentes potenciales, principalmente por las actividades agrícolas que usan fertilizantes y agroquímicos, en menor proporción por la descarga de aguas residuales sin tratamiento y por la falta de sistemas de alcantarillado, así como por la presencia de basureros y gasolineras.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRIA

De acuerdo con la información del censo de aprovechamientos del año 2017 proporcionada por el Organismo de Cuenca Golfo Centro, se registró la existencia de 246 aprovechamientos del agua subterránea, del total de aprovechamientos, 235 se

encuentran activos y 11 inactivos temporalmente; 90 son para uso agrícola, 33 para abastecimiento de agua potable, 99 para servicios, 4 para uso pecuario, 10 para uso industrial, 4 para uso acuícola y 6 para otros usos múltiples.

El volumen de extracción conjunto se ha estimado en **13.2 hm³ anuales**, de los cuales 6.0 hm³ (45.4%) se destinan al uso público-urbano, 5.5 hm³ (41.7%) para uso agrícola, 0.9 hm³ (6.8%) para uso industrial, 0.3 hm³ (2.3%) para uso doméstico-pecuario, 0.2 hm³ (1.5%) para servicios y 0.3 hm³ (2.3%) para usos múltiples.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de aguas subterráneas se planteó para el periodo 2016-2019, en un área de balance de **784 km²**, que corresponde a la zona donde se tiene información piezométrica y en la que se localiza la mayoría de los aprovechamientos.

La diferencia entre la suma total de las entradas (recarga), y la suma total de las salidas (descarga), representa el volumen de agua perdido o ganado por el almacenamiento del acuífero, en el periodo de tiempo establecido. La ecuación general de balance, de acuerdo a la ley de la conservación de la masa es la siguiente:

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

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

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

7.1. Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico del acuífero, la recarga total que recibe (R) 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 y arroyos principales, que en conjunto se consideran como recarga vertical (Rv), y la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de una recarga por flujo horizontal subterráneo (Eh).

De manera inducida, la infiltración de los excedentes del agua destinada al uso agrícola (Rr), que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela; y

del agua residual de las descargas urbanas, constituyen otra fuente de recarga al acuífero. Estos volúmenes se integran en la componente de recarga incidental (Ri).

7.1.1. Recarga vertical (Rv)

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

$$Rv + Ri + Eh - B - Sh - ETR - Dfb = \pm \Delta V(S) \quad (1)$$

Donde:

- Rv:** Recarga vertical
- Eh:** Entradas por flujo subterráneo horizontal
- Ri:** Recarga incidental
- B:** Bombeo
- Sh:** Salidas por flujo subterráneo horizontal
- ETR:** Evapotranspiración
- Dfb:** Descarga por flujo base de ríos
- $\Delta V(S)$:** Cambio en el volumen almacenado

De esta manera, despejando la recarga vertical, se obtiene lo siguiente:

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

7.1.2. Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del acuífero 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 su cálculo se utilizó la configuración de elevación del nivel estático correspondiente al año 2019 mostrada en la figura 5. Con base en ella 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:

$$Q = T * B * i$$

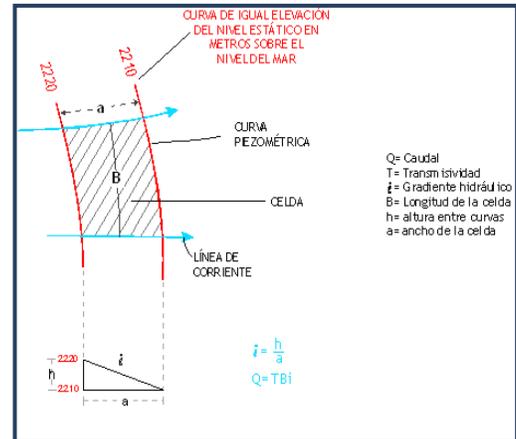
Donde:

Q: Caudal (m^3/s)

T: Transmisividad (m^2/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 una de las celdas establecidas. El volumen total de entradas por flujo subterráneo horizontal es de **14.6 hm³/año**.

Los valores de transmisividad utilizados para el cálculo de las entradas y salidas subterráneas son los promedios obtenidos de la interpretación de pruebas de bombeo, adaptadas al espesor saturado de la región donde se localizan las celdas.

7.1.3. Recarga incidental (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 un coeficiente de infiltración de 30% debido a que la profundidad media a la que se localiza del agua subterránea en la zona agrícola varía de 5 a 15 m y a la permeabilidad media de los sedimentos del subsuelo. El volumen de agua que se destina al uso agrícola es de 5.5 hm³ anuales; si consideramos que el 20% del volumen aplicado al uso agrícola retorna al acuífero como recarga efectiva, obtenemos un volumen de **1.7 hm³ anuales** de los excedentes del riego.

Por otra parte, el volumen anual de agua subterránea para uso público-urbano es de 6.0 hm^3 , tomando en cuenta que existe baja eficiencia en el sistema de la red de abastecimiento de agua potable y debido a que la profundidad al nivel del agua es menor a 10 m, el 30 % de este volumen recarga de manera efectiva al acuífero a través de las fugas en la red de distribución de agua potable y en el sistema de alcantarillado; el volumen de recarga de este tipo es de **1.8 hm^3 anuales**. Por lo tanto, **$R_i = 3.5 \text{ hm}^3$ anuales**.

7.2. Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente a través del bombeo (B), por salidas subterráneas horizontales (Sh), por evapotranspiración (ETR) en las áreas de niveles freáticos someros y por flujo base (Dfb).

7.2.1. Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo es de **13.2 hm^3 anuales**.

7.2.2. 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 para el año 2019, mostrada en la figura 5. El volumen total de salidas por flujo horizontal subterráneo asciende a **$4.3 \text{ hm}^3/\text{año}$** .

7.2.3. Evapotranspiración (ETR)

Este parámetro es la cantidad de agua transferida del suelo a la atmósfera por evaporación y transpiración de las plantas, por lo tanto, es considerada una forma de pérdida de humedad del sistema. Existen dos formas de evapotranspiración: la que considera el contenido de humedad en el suelo y la que considera la etapa de desarrollo de las plantas (Evapotranspiración Potencial y la Evapotranspiración Real). El escurrimiento y el volumen de evapotranspiración real (ETR) es un parámetro utilizado para la recarga potencial de infiltración.

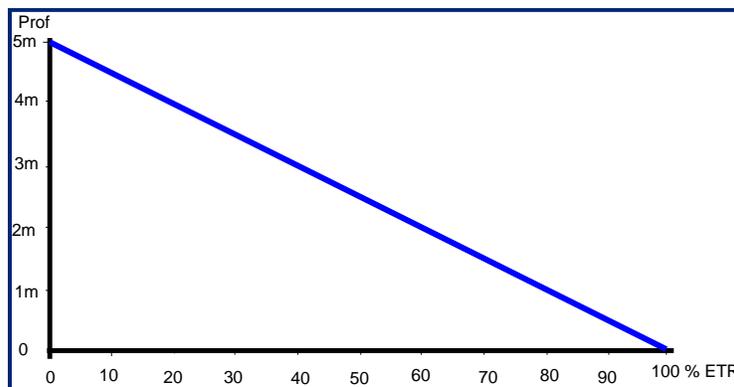
Para la obtención de este parámetro se utilizó la ecuación empírica de Turc, considerando los valores promedio anual de temperatura y precipitación de $24.3 \text{ }^\circ\text{C}$ y 1588.3 mm . Con ellos se obtiene una lámina de evapotranspiración de $1,166.0 \text{ mm}$ anuales, como se muestra a continuación:

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

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

T (°C) =	24.3		
P(mm) =	1588.3	P ² =	2522696.89
L =	1624.94535	L ² =	2640447.39
ETR (mm)	1166.0		

El cálculo de la evapotranspiración corresponde con aquella pérdida de agua freática somera y que se aplica al balance de aguas subterráneas, considerando que el concepto tiene influencia hasta una profundidad máxima de 5 m, hasta la que penetra la vegetación en este tipo de climas, bajo el siguiente proceso: En zonas donde el nivel estático se encuentra a una profundidad menor a 5 m, se calcula el valor de ETR exclusivamente para estas zonas de niveles someros y se pondera el valor del volumen obtenido, partiendo de una relación lineal inversa entre la profundidad al nivel estático (PNE) y el % de ETR. Suponiendo una profundidad límite de extinción de 5 m para el fenómeno de ETR, a menor profundidad mayor será el % de ETR, de tal manera que a 5 m el valor de ETR es nulo y a 0 m el valor es del 100 %, a 4 m el 20%, a 2 m el 60% etc.



De esta manera, la estimación del valor de la evaporación se calculó multiplicando el área donde tiene lugar el fenómeno por la lámina de evapotranspiración obtenida y por el porcentaje que le corresponde de acuerdo con la gráfica anterior, tomando en cuenta las superficies entre curvas de igual valor de profundidad al nivel estático. El cálculo se puede observar en la tabla 2. El volumen de evapotranspiración **ETR =116.5 hm³/año.**

Tabla 2. Cálculo de la evapotranspiración (2019)

RANGOS DE PROFUNDIDAD (m)	PROFUNDIDAD MEDIA (m)	ÁREA (km ²)	LÁMINA ETR (m)	% ETR	VOLUMEN ETR (hm ³ /año)
2	2	18.8	1.1660	0.6	13.1
4 a 2	3	221.7	1.1660	0.4	103.4
	Total	240.5			116.5

7.2.4. Descarga por flujo base de ríos (Dfb)

De acuerdo con la información de las estaciones hidrométricas Martínez de la Torre, Libertad, El Raudal y Vega de la Torre, proporcionada por el Organismo de Cuenca Golfo Centro, los ríos Bobos, Quilate, Misantla y Colipa presentaron un caudal estimado de 31.49, 5.23, 10.93 y 2.85 m³/s de flujo base, respectivamente, en el estiaje del periodo 1965-2019, que representan un volumen de 993.1, 164.9, 344.7 y 89.9 hm³ anuales, también respectivamente. Por lo tanto, **Dfb = 1,592.6 hm³ anuales**.

7.2.5. Cambio de almacenamiento ΔV(S)

El cálculo del cambio de almacenamiento se realizó a partir de la configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2016-2019 que se muestra en la figura 6. Con base en ella y tomando en cuenta un valor promedio de rendimiento específico $S_y = 0.10$, se determinó la variación del almacenamiento mediante la siguiente expresión:

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

Donde:

- ΔVS:** Cambio de almacenamiento en el período analizado
- S:** Coeficiente de almacenamiento promedio de la zona de balance
- A:** Área entre curvas de igual evolución del nivel estático
- h:** Valor medio de la variación piezométrica en el período

El detalle de cálculo se presenta en la tabla 3, en la que se puede observar que el cambio de almacenamiento para el periodo es de -73.4 hm³, es decir, un promedio anual de **- 24.5 hm³**.

Tabla 3. Cálculo del cambio de almacenamiento (2016-2019)

Evolución (m)	Evolución media (m)	Área (km ²)	Sy	$\Delta V(S)$ (hm ³ /año)
-2	-2	18.2	0.1	-3.6
-1 a -2	-1.5	392.9	0.1	-58.9
0 a -1	-0.5	217.6	0.1	-10.9
	TOTAL	628.7	TOTAL	-73.4
Promedio anual				-24.5

Solución a la ecuación de balance

Una vez calculadas las componentes de la ecuación de balance, procedemos a evaluar la recarga vertical por lluvia e infiltraciones, mediante la expresión 2, que fue establecida con anterioridad:

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

$$R_v = 4.3 + 13.2 + 116.5 + 1592.6 - 14.6 - 3.5 - 24.5$$

$$R_v = 1684.1 \text{ hm}^3/\text{año}$$

Por lo tanto, la recarga total es igual a la suma de todas las entradas:

$$R = R_v + E_h + R_i$$

$$R = 1684.1 + 14.6 + 3.5$$

$$R = 1702.2 \text{ hm}^3/\text{año}$$

8. DISPONIBILIDAD

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

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

Donde:

- DMA** = Disponibilidad media anual de agua del subsuelo en un acuífero
R = Recarga total media anual
DNC = Descarga natural comprometida
VEAS = Volumen de extracción de aguas subterráneas

8.1. Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto en forma de recarga natural como incidental. Para este caso su valor es **1702.2 hm³/año**, de los cuales 1698.7 hm³ son recarga natural y 3.5 hm³ recarga incidental.

8.2. Descarga natural comprometida (DNC)

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

Para el caso del acuífero Martínez de la Torre, su valor es **1596.9 hm³ anuales**, de los cuales 4.3 hm³ corresponden a las salidas por flujo subterráneo horizontal hacia el mar para mantener la posición de la interfase marina, y 1592.6 hm³ al flujo base de los ríos Bobos, Quilate, Misantla y Colipa. No se considera comprometida la evapotranspiración porque ésta fue evaluada principalmente en el subálveo del Río Bobos, en donde los niveles freáticos someros son alimentados por su flujo base. Por lo tanto, **DNC = 1596.9hm³ anuales.**

8.3. Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)

La extracción de aguas subterráneas se determina sumando los volúmenes anuales de agua asignados o concesionados por la Comisión mediante títulos inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), los volúmenes de agua que se encuentren en proceso de registro y titulación y, en su caso, los volúmenes de agua correspondientes a reservas, reglamentos y programación hídrica, todos ellos referidos a una fecha de corte específica. En el caso de los acuíferos en zonas de libre alumbramiento, la extracción de aguas subterráneas será equivalente a la suma de los volúmenes de agua estimados con base en los estudios técnicos, que sean

efectivamente extraídos, aunque no hayan sido titulados ni registrados, y en su caso, los volúmenes de agua concesionados de la parte vedada del mismo acuífero.

Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de **29,483,098 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos del Agua (REPGA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022**.

8.4. Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)

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

Conforme a la metodología indicada en la norma referida anteriormente, 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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 1702.2 - 1596.9 - 29.483098 \\ \text{DMA} &= 75.816902 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible de **75,816,902 m³** para otorgar nuevas concesiones.

9. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua, 2002. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Martínez de la Torre-Nautla (3003), estado de Veracruz.

Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca Golfo Centro, 2010. Estudio geohidrológico en los acuíferos Cuicatlán, Coatzacoalcos, en el estado de Oaxaca; Jalapa-Coatepec, Tecolutla y Álamo-Tuxpan, en el Estado de Veracruz. Realizado por Consultoría BETSCO, S.A. de C.V.

Comisión Nacional del Agua, 2011. Estudio de reactivación de redes de monitoreo piezométrico de los acuíferos Tecolutla, Martínez de la Torre-Nautla, Valle de Actopan, Omealca-Huixcolotla, Perote-Zalayeta, Costera de Coatzacoalcos, Sierra de San Andrés Tuxtla, Los Naranjos, Sotepan-Hueyapan, Costera del Papaloapan y Álamo-Tuxpan en el estado de Veracruz. Realizado por Consultoría BETSCO, S.A. de C.V.

Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca Golfo Centro, 2019. Información piezométrica, censo e hidrometría del acuífero Martínez de la Torre-Nautla, estado de Veracruz.

Servicio Geológico Mexicano, 1996. Carta Geológica-Minera E14-B17 "Misantla", escala 1:50,000.

Servicio Geológico Mexicano, 2004. Carta Geológica-Minera F14-12 "Poza Rica", escala 1:250,000.

Servicio Geológico Mexicano, 2010. Carta Geológica-Minera E14-B16 "Altotonga", escala 1:50,000.