

SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO ORIZABA-CÓRDOBA (3007),
ESTADO DE VERACRUZ**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1. GENERALIDADES	2
1. Antecedentes.....	2
1.1. Localización.....	2
1.2. Situación administrativa del acuífero	3
2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD	5
3. FISIOGRAFÍA	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	16
4.3. Geología del subsuelo	17
5. HIDROGEOLOGÍA	18
5.1. Tipo de acuífero	18
5.2. Parámetros hidráulicos	18
5.3. Piezometría	19
5.4. Comportamiento hidráulico	19
5.4.1. Profundidad al nivel estático.....	19
5.4.2. Elevación del nivel estático.....	20
5.4.3. Evolución del nivel estático	21
5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	22
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRIA	23
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	24
7.1. Entradas	24
7.1.1. Recarga vertical (Rv).....	25
7.1.2. Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)	25
7.1.3. Recarga incidental (Ri).....	26
7.2. Salidas.....	26
7.2.1. Bombeo (B)	26
7.2.2. Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)	27
7.2.3. Descarga a través de manantiales (Dm)	27
7.3. Cambio de almacenamiento (ΔVS)	27
8. DISPONIBILIDAD	28
8.1. Recarga total media anual (R)	29
8.2. Descarga natural comprendida (DNC)	29
8.3. Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	29
8.4. Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)	30
9. BIBLIOGRAFÍA	31

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 Orizaba-Córdoba, definido con la clave 3007 en el Sistema de Información Geográfica para el Manejo de las Aguas Subterráneas de la Comisión Nacional del Agua (SIGMAS), se localiza en la porción centro-occidental del estado de Veracruz, en el límite con los estados de Puebla y Oaxaca, entre los paralelos 18°41'12" y 19°02'30" de latitud norte y entre los meridianos 96°45'35" y 97°17'22" de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 1,261 km².

Limita al norte y este con el acuífero Cotaxtla; al sureste con Omealca-Huixcolotla, ambos del estado de Veracruz; al sur y oeste con el acuífero Tuxtepec, del estado de Oaxaca; y en su extremo noroccidental con los acuíferos Valle de Tecamachalco y Libres-Oriental, del estado de Puebla (figura 1).

Geopolíticamente, la superficie que cubre el acuífero abarca de forma total los municipios Mariano Escobedo, Atzacán, Orizaba, Ixtaczoquitlán, Fortín, Huiloapan, San Andrés Tenejapan, Rafael Delgado, Tlilapán, Magdalena, Tequila, Coetzala y Naranjal; casi la totalidad de La Perla, Chocamán, Córdoba, Ixhuatlancillo, Río Blanco y Huiloapan; así como porciones menores de Coscomatepec, Tomatlán, Amatlán de los Reyes, Yanga, Cuichapa, Omealca, Tezonapa, Zongolica, Los Reyes Atlahuilco y Soledad Atzompa.

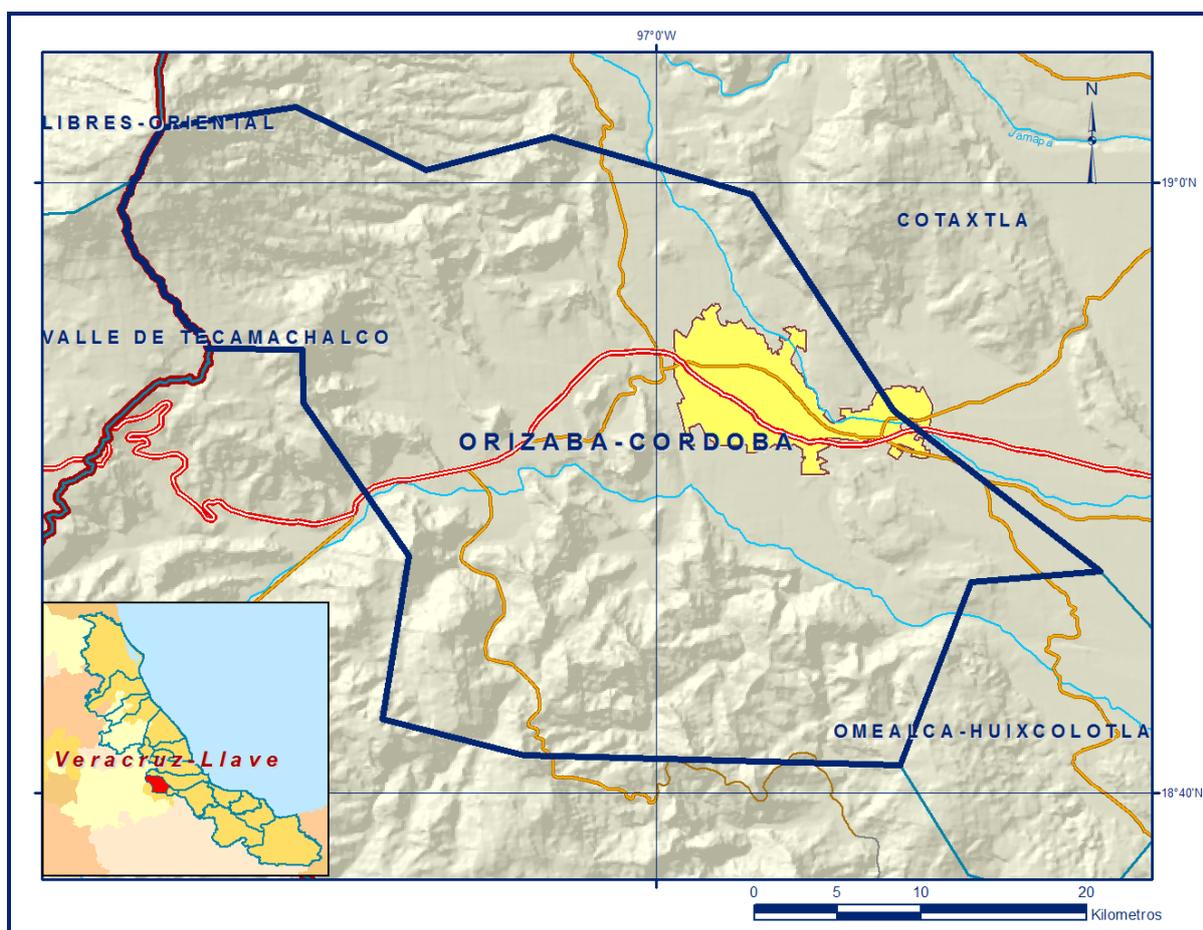


Figura 1. Localización del acuífero

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

1.2. Situación administrativa del acuífero

El acuífero pertenece al Organismo de Cuenca Golfo Centro y al Consejo de Cuenca Río Papaloapan, instalado el 16 de junio de 2000. Su territorio se encuentra parcialmente vedado y sujeto a las disposiciones de dos decretos de veda. En la mayor parte de su superficie rige el “Decreto que declara de utilidad pública el establecimiento del Distrito de Acuacultura Número Dos Cuenca del Papaloapan para preservar, fomentar y explotar las especies acuáticas, animales y vegetales, así como para facilitar la producción de sales y minerales”,

publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 6 de agosto de 1973. Esta veda es tipo II en la que la capacidad de los mantos acuíferos sólo permite extracciones para usos domésticos.

Tabla 1. Coordenadas de la poligonal simplificada del acuífero

ACUIFERO 3007 ORIZABA-CORDOBA							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	96	52	3.8	18	40	54.7	
2	97	4	17.4	18	41	15.0	
3	97	8	52.4	18	42	26.0	
4	97	8	1.0	18	47	46.4	
5	97	11	27.7	18	52	47.7	
6	97	11	28.3	18	54	32.7	
7	97	14	31.7	18	54	33.4	DEL 7 AL 8 POR EL LIMITE ESTATAL
8	97	16	3.0	19	1	47.5	
9	97	11	41.1	19	2	29.5	
10	97	7	28.3	19	0	25.4	
11	97	3	24.0	19	1	31.3	
12	96	56	53.2	18	59	37.7	
13	96	52	16.7	18	52	31.6	
14	96	45	34.9	18	47	16.7	
15	96	49	47.1	18	46	54.2	
1	96	52	3.8	18	40	54.7	

En una pequeña área de la porción oriental está en vigor el “Decreto que establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la zona que comprende la cuenca del Río Jamapa, cuya extensión y límites geopolíticos corresponden a los municipios de Veracruz, Boca del Río y otros, en el estado de Veracruz”, publicado en el DOF el 15 de julio de 1970. Esta veda es tipo III en la que la capacidad de los mantos acuíferos permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.

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

El uso principal del agua subterránea es el industrial. De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 1. En su territorio no se localiza distrito o unidad de riego alguna, ni se ha constituido a la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

En la región central y occidental del acuífero, en su límite con el acuífero Tuxtepec, existe el Área Natural Protegida denominada “Cañón del Río Blanco”, decretada el 22 de marzo de 1938, con la categoría de Parque Nacional. En el límite noroccidental con los acuíferos Libres-Oriental y Tecamachalco del estado de Puebla, se localiza el Parque Nacional Pico de Orizaba, decretado el 4 de enero de 1937.

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

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

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DE FUENTES DE ABASTECIMIENTO PARA ORIZABA, VERACRUZ. Realizado en 1981 por la Ingenieros Civiles y Geólogos Asociados. S.A. para el Gobierno del Estado de Veracruz. Sus objetivos fueron determinar la condición geohidrológica del acuífero, analizar su calidad del agua y localizar los sitios más adecuados para la perforación de pozos para el abastecimiento de agua potable a la población de Córdoba. Entre sus actividades más importantes destacan el censo de aprovechamientos, piezometría, reconocimientos hidrogeológicos, ejecución de sondeos geofísicos y el muestreo de agua superficial y subterránea. Recomienda la perforación de cuatro pozos a profundidad máxima de 150 m, en materiales volcánicos y en rocas calizas, para extraer 120 lps que junto con el aprovechamiento de 300 lps de dos manantiales podrían satisfacer la demanda de agua potable.

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO PARA FUENTES DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE EN LA LOCALIDAD DE CÓRDOBA, EN EL ESTADO DE VERACRUZ. Realizado en 1982 por Ingenieros Civiles y Geólogos Asociados. S.A. para el Gobierno del Estado de Veracruz. Sus objetivos fueron determinar la condición geohidrológica del acuífero, analizar su calidad del agua y localizar los sitios más adecuados para la perforación de pozos para el abastecimiento de agua potable a la población de Córdoba. Entre sus actividades más importantes destacan el censo de aprovechamientos, piezometría, reconocimientos hidrogeológicos, ejecución de sondeos geofísicos y el muestreo de agua superficial y subterránea. Recomienda la perforación de tres pozos a profundidad máxima de 300 m, en materiales volcánicos y en rocas calizas.

ESTUDIO DE EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LOS SISTEMAS ACUÍFEROS DE LA CUENCA DEL RÍO PAPALOAPAN, LOCALIZADOS EN LOS ESTADOS DE VERACRUZ, OAXACA Y PUEBLA. Realizado en 2005 para la Comisión Nacional del Agua Gerencia Regional Golfo Centro, por Consorcio de Ingeniería Mexicana, S.A. de C.V. Su objetivo general fue conocer las condiciones geohidrológicas de los acuíferos, así como contar con información necesaria para determinar la recarga media anual del agua subterránea y calcular su disponibilidad. Mediante actividades de campo que incluyeron censo de aprovechamientos, hidrometría, piezometría, nivelación de brocales, pruebas de bombeo y toma de muestras para análisis fisicoquímicos, plantea el balance de aguas subterráneas para determinar su disponibilidad.

INFORMACIÓN PIEZOMÉTRICA, CENSO E HIDROMETRÍA DEL ACUÍFERO ORIZABA-CÓRDOBA, 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 e hidrometría de las extracciones.

3. FISIOGRAFÍA

3.1. Provincias fisiográficas

De acuerdo con la clasificación fisiográfica de Erwin Raisz (1959), modificada por Ordoñez (1964), el área que cubre el acuífero se localiza en la confluencia de tres provincias fisiográficas: al norte el Eje Neovolcánico, al sur y oeste la Sierra Madre del Sur, y la porción oriental pertenece a la Llanura Costera del Golfo. Por otra parte, de acuerdo con la regionalización fisiográfica del INEGI (1990), se ubica en la Provincia Fisiográfica Eje Neovolcánico, subprovincias Lagos y Volcanes de Anáhuac y Chiconquiaco; Sierra Madre del Sur, Subprovincia Sierras Orientales, y en la Llanura Costera del Golfo Sur, Subprovincia Llanura Costera Veracruzana.

La Provincia Fisiográfica 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, Zinatlécatl (Nevado de Toluca), Popocatepetl, 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.

La Provincia Fisiográfica Sierra Madre del Sur presenta una estructura compleja y se encuentra constituida por una serie de montañas que se extienden a lo largo de 1200 km desde el sur de Jalisco hasta el Istmo de Tehuantepec, al oriente de Oaxaca. Su representación dentro del área estudiada se manifiesta con una serie de prominencias topográficas que configuran barrancas y hondonadas, así como cimas que alcanzan altitudes mayores a 2500 msnm. Está orientada de manera paralela a la costa del Océano Pacífico, separada del Eje Neovolcánico por la Depresión del Balsas. La Subprovincia Sierras Orientales se caracteriza por la presencia de sierras tendidas con dolinas.

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

3.2. Clima

De acuerdo con la clasificación de Köppen modificada por Enriqueta García (1964), para las condiciones de la República Mexicana, el clima que predomina en la superficie del acuífero es de tipo semicálido húmedo del grupo C, en sus variantes (A)C(m) y (A)C(m)(f), con temperatura media anual mayor de 18 °C, temperatura del mes más frío menor de 18 °C, temperatura del mes más cálido mayor de 22 °C., régimen de lluvias de verano, precipitación del mes más seco mayor de 40 mm; porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual, para la primera variante y mayor al 10.2% del total anual, para la segunda variante. Hacia el sureste, en el límite con el acuífero Omealca-Huixcolotla, se presenta clima cálido húmedo, con 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 precipitación invernal del 5% al 10.2% del total anual.

Conforme se asciende topográficamente, se registra clima C(m)(f) templado húmedo y C(w2) templado subhúmedo, con temperatura media anual entre 12 y 18 °C, temperatura del mes más frío entre -3 y 18 °C y temperatura del mes más cálido menor de 22 °C; precipitación en el mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano. Porcentaje de lluvia invernal mayor al 10.2% del total anual para el primer tipo de clima y del 5 al 10.2% para el segundo con índice P/T mayor de 55. Hacia el volcán Pico de Orizaba el clima es Cb'(w2) semifrío subhúmedo 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.

Para la determinación de las variables climatológicas se cuenta con información de 8 estaciones climatológicas ubicadas dentro de los límites del acuífero: Chilapa, Maltrata, Fortín, Tuxpango, Naranjal, Cuichapa, San Miguelito y Córdoba, con periodos de registro diferentes, el más grande de ellos comprende de 1970 a 2013.

Con base en los registros de estas estaciones se obtuvieron valores promedio anuales de precipitación, temperatura y evaporación potencial de 1971 mm, 20.5 °C y 896.3 mm, respectivamente.

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 se ubica en la Región Hidrológica (RH)RH-28 “Papaloapan”, Subregión Hidrológica y Cuenca Río Papaloapan; se localiza en la porción sur de la llanura costera del Golfo de México, ocupando la región sur del estado de Veracruz, y está integrada por las cuencas de los ríos Actopan, La Antigua, Jamapa y Papaloapan, que desembocan en el Golfo de México y tienen su origen fuera de la entidad. Limita al norte con la cuenca del río Nautla, al este con el Golfo de México y la cuenca del río Coatzacoalcos, al sur con la cuenca del río Alto Verde y al oeste con la cuenca del río Atoyac. Abarca una amplia superficie de 57,272 km² del territorio de los estados de Veracruz (28,166 km²), Oaxaca (23,482 km²) y Puebla (5,654 km²).

La cuenca del Río Papaloapan está dividida en tres zonas: La Cañada o Alto Papaloapan, Medio Papaloapan y Bajo Papaloapan. De acuerdo con esta división, el acuífero se encuentra ubicado en el Medio Papaloapan, en tanto que, localmente, la zona está comprendida en cinco sistemas hidrológicos; el Río Blanco en el norte, el Amapa en el sur, el Otapa y Querétaro en la porción central, el Río Tonto y la región de montañas con dolinas en el oeste.

El río Papaloapan es una de las corrientes superficiales más importantes del país, ya que su escurrimiento medio anual es de 47,000 hm³, con una cuenca de aproximadamente 46,000 km², donde se desarrollan los numerosos afluentes que lo alimentan. Nace en las inmediaciones de Coajimoloyas, Oaxaca, en la Sierra Juárez, tomando una dirección general hacia el NW con el nombre de Río Grande, recibe los ríos Las Vueltas, Tomellín, Apoala y San Pedro, labrando el cañón de Tomellín. Desemboca directamente en la Laguna de Alvarado y finalmente en el Golfo de México.

El río Blanco se localiza en la porción norte, es uno de los más importantes que cruza el acuífero. Nace en la sierra de Zongolica y en las faldas del Pico de Orizaba; en sus márgenes se ubican las ciudades de Córdoba y Orizaba. En la última parte de su trayecto, después del cruce con la vía el ferrocarril, se bifurca. Descarga finalmente en la Laguna de Alvarado.

Los principales ríos de la región tienen un patrón de escurrimiento de tipo dendrítico o ramificado bien desarrollado y en menor proporción subparalelo. Los escurrimientos son de tipo intermitente y sólo los ríos más importantes son perennes, que mantienen un caudal base importante durante el estiaje. Localmente se presenta carsticidad. En el territorio del acuífero existe la Presa Tuxpango, alimentada por la descarga de los manantiales de Tlilapán, que se utiliza para generación de energía eléctrica.

3.4. Geomorfología

En la superficie del acuífero las elevaciones topográficas varían de 450 a 5,500 msnm. Las mayores elevaciones se localizan en el extremo occidental del acuífero y forman parte del Eje Neovolcánico, en donde se registran las mayores precipitaciones, generado los escurrimientos que fluyen hacia la planicie, dando lugar a corrientes generalmente de régimen torrencial y algunos con 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 1,500 a 3,500 msnm y están constituidas por rocas volcánicas y sedimentarias. En las porciones menos elevadas (de 500 a 1000 msnm) aparecen los valles con llanuras y laderas donde afloran principalmente rocas sedimentarias, en los que se han depositado materiales clásticos del Cuaternario, proveniente de la desintegración y posterior transporte y acarreo de las rocas preexistentes.

La zona representa una transición geomorfológica entre el valle de Córdoba enmarcado por serranías cuyas elevaciones alcanzan 1250 m, la zona urbana está enclavada en un entrante o valle con una elevación promedio de 750 msnm, que se une al valle de Orizaba hacia el occidente y que manifiesta cierta alineación regional con extensión hacia la planicie costera del Golfo y orientación NW-SE. Las elevaciones que circundan los valles de Córdoba y Orizaba son por lo general de forma semicircular, cuyos afloramientos y extensión se deben probablemente a procesos combinados de tectónica y circulación de agua subterránea en rocas carbonatadas. Con relación al ciclo erosivo, éste probablemente se inició con el alineamiento de una serie de estructuras que desarrollaron dolinas, para finalmente constituir los valles.

Las montañas de caliza tienen características morfológicas de montañas paralelas, plegadas y alargadas, con orientación NW-SE y con elevaciones medias de 500 msnm. Su característica más notable es la presencia de un desarrollo avanzado de carst, con abundantes cavidades de disolución; eventualmente presenta algunos arroyos de fuerte pendiente con arreglo dendrítico. En algunas zonas presentan una cobertura intemperizada de material limo-arcilloso, de 0.5 a 1.0 m de espesor. Por estar plegadas, fracturadas y con cavidades de disolución, propician la infiltración y permiten la circulación del agua subterránea, que es evidente por la presencia de manantiales al pie de las montañas.

4. GEOLOGÍA

La región se encuentra ubicada en parte de la Cuenca Cretácica de Zongolica y de la Cuenca Terciaria de Veracruz, coronadas por la actividad por los productos de la actividad del Eje Neovolcánico. En la Cuenca de Zongolica se depositó un potente espesor de sedimentos marinos calcáreos y detríticos que presentan un estilo de deformación estructural caracterizado por pliegues y fallas de cabalgadura producidos por el evento compresivo Laramide. La cuenca de Veracruz está representada por una secuencia terrígena constituida por lutitas, areniscas y conglomerados polimícticos; en tanto que del Eje Neovolcánico son las rocas andesíticas, derrames basálticos, dacitas, y depósitos de arenas y lahares. El marco litológico que predomina en la superficie está dominado por depósitos de origen marino que corresponden a rocas carbonatadas típica de ambientes de plataforma somera

La superficie cubierta por el acuífero está comprendida en la Provincia Geológica Cuenca Terciaria de Veracruz se caracteriza por la presencia de depósitos de lutitas y areniscas con influencia calcárea desde el Paleoceno hasta el Oligoceno y por depósitos volcánicos durante todo el Mioceno, Plioceno y Pleistoceno. Hacia el límite occidental de la Cuenca Terciaria de Veracruz se desarrollan estructuras en rocas sedimentarias de diferentes tipos de calizas, algunas de ellas con intenso desarrollo cárstico, que en la porción de la Cuenca Terciaria de Veracruz están cubiertas por unidades sedimentarias del Paleógeno-Neógeno.

Las unidades del Cretácico Superior son las más antiguas de la zona y se caracterizan por el desarrollo de una plataforma interna íntimamente relacionada con la Sierra Madre Oriental; esta facies de plataforma está representada por calizas masivas de la Formación Orizaba del Albiano-Cenomaniano, calizas con intercalaciones delgadas de lutitas arenosas de la Formación Maltrata del Turoniano, así como calizas con nódulos de pedernal que constituyen la Formación Guzmantla del Turoniano-Santoniano. Cubriendo tanto a las facies de cuenca de la Sierra Madre Oriental como a las facies de plataforma de la cuenca

de Zongolica, afloran margas y lutitas con horizontes de areniscas y bentonitas del Campaniano-Maastrichtiano de la Formación Méndez.

4.1. Estratigrafía

En la región en la que se ubica el acuífero aflora una secuencia estratigráfica constituida por rocas sedimentarias e ígneas, cuya edad comprende del Jurásico Superior al Reciente. A continuación, se describen de manera general las distintas unidades litológicas, comenzando con la más antigua (figura 2).

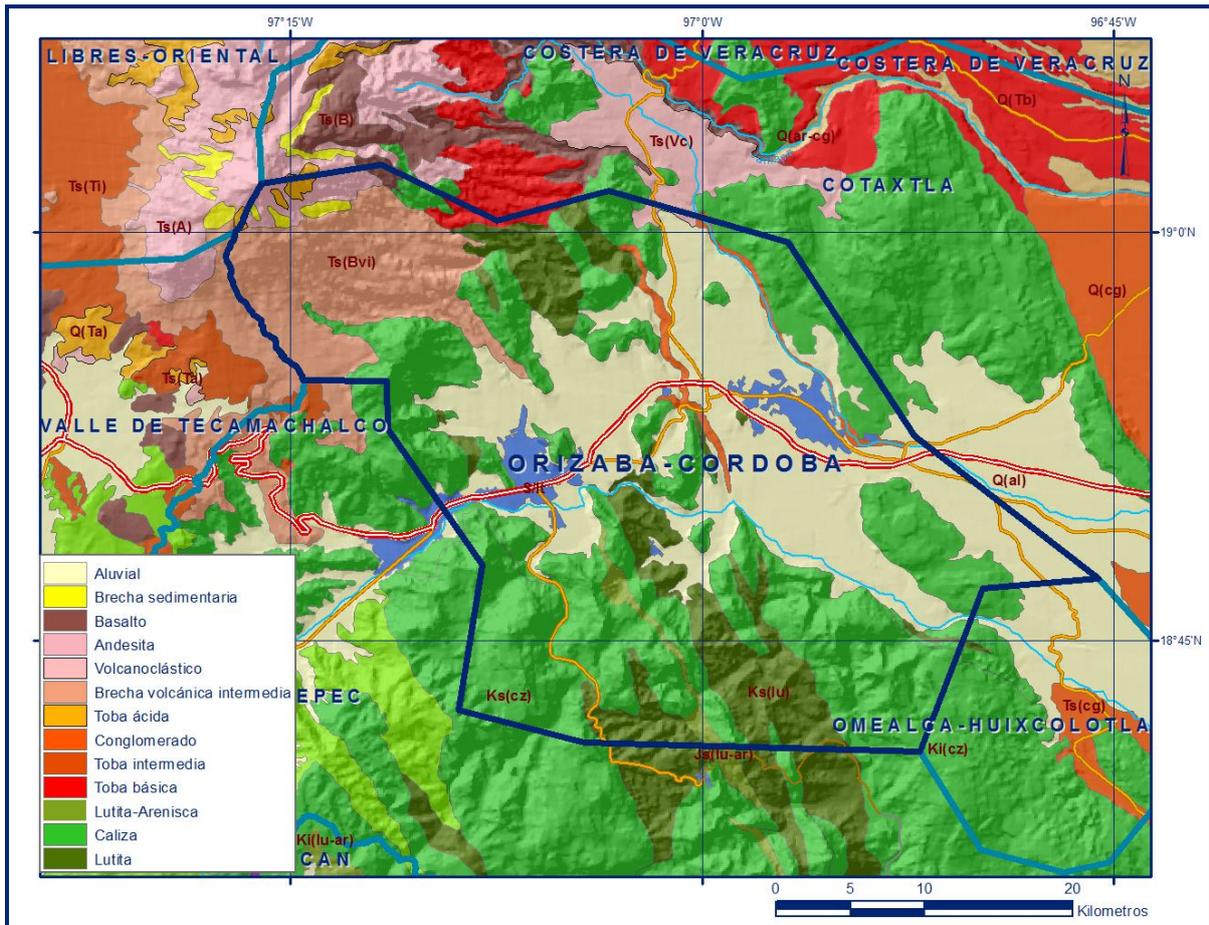


Figura 2. Geología general del acuífero

JURÁSICO SUPERIOR

Formación Tepexilotla

Secuencia de sedimentaria clástica-calcárea de ambientes litoral y marino, representada por lutitas y calizas que afloran fuera del límite del acuífero.

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 fierro interestratificados y lajamiento perpendicular al rumbo de la estratificación. Su espesor alcanza hasta 400 m. En el área del acuífero está representada por calizas intercaladas con delgados horizontes de lutitas cuya característica distintiva es la presencia de nódulos y lentes de pedernal.

CRETÁCICO SUPERIOR

Formación Orizaba

Nombre propuesto F. Viniegra (1965) para denominar a una potente secuencia de calizas de plataforma ampliamente distribuida en la región de Orizaba, Ver., la cual consiste de calizas de color gris claro a café, que por su textura pueden ser divididas en dos facies, a las que nombró facies arrecifal y facies subarrecifal, localizadas en el flanco occidental del cerro Escamela, situado al nor-noreste de la ciudad de Orizaba. Aflora en la porción norte y en el extremo nororiental del área y consiste de un potente paquete de calizas biógenas de hasta 2,500 m de espesor, con estratificación que varía de delgada a gruesa, en donde es común observar estratos de 40 cm hasta cuerpos tabulares muy gruesos de más de 2.5 m de espesor. Se caracteriza por presentar abundante fauna de rudistas y miliólidos que ubican su ambiente de depósito en una plataforma somera, es común que presente lentes y nódulos de pedernal negro.

Sobreyace concordantemente a las rocas de la Formación Tamaulipas Inferior. Desde el punto de vista geohidrológico, presenta abundantes grietas y orificios de disolución ampliamente intercomunicados, que le confieren grandes posibilidades de formar acuíferos.

Formación Guzmantla.

Está representada en el área por una calcarenita biógena, de color pardo a crema, dispuesta en capas potentes, alteradas por disolución y cubiertas por gruesas capas de caliche que la enmascaran en superficie y que se encuentran parcialmente recristalizadas. Su clasificación de campo varía de mudstone a capas

de packstone y grainstone. El espesor de las capas varía de 0.4 a 2.2 m, en algunas localidades se aprecian capas de caliza clástica y conglomerática y algunos estratos de pedernal.

Se encuentra distribuida principalmente hacia el sector septentrional del acuífero y se compone por una secuencia de ambientes de plataforma caracterizada por calizas de color gris cremoso a gris oscuro estratificadas en capas gruesas y masivas, que en ocasiones desarrollan crecimientos arrecifales en algunos intervalos. Su contacto inferior con la Formación Orizaba es transicional, mientras que su contacto superior no se observa. Es correlacionable con las formaciones Agua Nueva y Maltrata, y al igual que la Formación Orizaba presenta buenas características de porosidad primaria y secundaria, lo que la hace importante como receptora de fluidos.

Formación Maltrata

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

Formación 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 conoidal, 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, produciendo un intenso lajamiento y pizarroicidad, 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 del área de estudio con la unidad arcillo-arenosa del Cretácico Superior (Formación Cárdenas). Se le asigna una edad Campaniano-

Maestrichtiano y aparentemente fue depositada en un fondo marino de aguas relativamente profundas, con abundante aporte de material terrígeno fino. Sus afloramientos se distribuyen de manera aislada en el acuífero.

Rocas intrusivas

Las rocas cretácicas están intrusionadas por pequeños cuerpos de composición cuarzo-monzonítica a diorítica, que constituyen la Sierra de Zongolica.

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 sí 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 Concepción

De la Cuenca de Veracruz está expuesta una unidad arcillosa constituida por un conglomerado polimítico, areniscas y lentes de lutitas que presentan una estructura en capas masivas, cuyos afloramientos en la llanura costera

generalmente se expresan en forma de lomeríos, deformados por intrusión salina. Su espesor en la cuenca varía de 450 a 1600 m.

CUATERNARIO

Rocas Volcánicas

El Eje Neovolcánico manifiesta a partir del Plioceno una secuencia de andesitas, derrames basálticos de edad Plioceno-Pleistoceno, tobas andesíticas y andesitas, así como depósitos de lahares y arenas de edad Pleistoceno.

Depósitos Aluviales

Están constituidos por un conjunto de materiales clásticos de tamaño que varía desde gravas hasta arcillas que forman depósitos 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 100 m en los valles. Presentan una gran variabilidad en su granulometría y tipo de rocas, ya que son producto de la erosión, transporte y acumulación de las rocas preexistentes; varían desde arcillas, limos y arenas, hasta gravas y cantos y bloques. Los aluviones se presentan masivos al pie de las sierras, en estratos mal definidos. Las gravas y arenas rellenan los valles fluviales y los materiales más finos forman planicies aluviales, principalmente en las zonas de influencia de ríos y arroyos.

4.2. Geología estructural

En las zonas de afloramientos de rocas carbonatadas del Cretácico, se presenta un sistema de sinclinales y anticlinales orientados preferentemente en sentido noroeste-sureste, así como diversos sistemas locales de fallas y fracturas que gobiernan el patrón de escurrimiento superficial, que contribuyen además a la formación de sistemas de flujo subterráneo propios de un ambiente cárstico, ya que se observan dolinas y otros rasgos de disolución de las calizas. La región manifiesta los efectos de una deformación compresiva representada por pliegues recumbentes y fallas de cabalgadura, propiciando repeticiones de columna estratigráfica y el consecuente engrosamiento estructural de la misma. Se definen estructuras regionales que influyen en la configuración de los diferentes bloques estructurales, la orientación general que presentan las estructuras plegadas, en dirección NW-SE, definen un vector de esfuerzos en una dirección NE-SW perpendicular al rumbo de los ejes de los pliegues.

A partir del Jurásico Medio inicia la apertura del Golfo de México, seguida de subsidencia por enfriamiento y por cambios relativos al nivel del mar del Cretácico Inferior al Cretácico Superior con el depósito de grandes espesores de rocas sedimentarias en diferentes cuencas, que fueron posteriormente deformadas por

efectos de la Orogenia Laramide entre al final del Cretácico Superior y Eoceno Inferior. Posteriormente por efecto de una tectónica distensiva, se origina un reacomodo propiciando un fracturamiento y denudación de materiales en el Terciario, que conformaron las irregularidades estructurales como son la Fosa de Tehuacán al oeste y la Cuenca Terciaria de Veracruz al este. Las secuencias volcánicas terciarias en la región de Huajuapán-Tlaxiaco y Zapotitlán indican que el magmatismo se desarrolló durante la acumulación de depósitos epiclásticos (fluviales y lacustres), piroclásticos, derrames lávicos a intermedios y máficos. Al inicio del Mioceno ocurren las primeras manifestaciones del vulcanismo en la porción central y oriental del Cinturón Volcánico Transmexicano (Carta Geológico-Minera Orizaba E14-16. Escala 1:250,000. SGM, 2001).

4.3. Geología del subsuelo

Con base en las observaciones en la información geológica y geofísica recaba en el acuífero y por correlación con acuíferos vecinos, es posible definir que el acuífero se encuentra alojado, en su porción superior, en los sedimentos aluviales de granulometría variada, que constituyen el lecho y la llanura de inundación de los ríos Blanco, Orizaba y Metlacy otros arroyos tributarios, así como conglomerados, que en conjunto tienen un espesor variable, desde algunos metros hacia las estribaciones de las sierras que delimitan los valles, hasta 100 en la porción central de ellos, que representan 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 basaltos y brechas, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento y disolución. Las calizas y areniscas constituyen horizontes acuíferos que pueden presentar condiciones de confinamiento, debido a que su litología incluye alternancia con lutitas y limolitas.

El acuífero se encuentra alojado en un valle intermontano que ha sido labrado por la erosión de corrientes superficiales que drenan hacia el oriente. Los valles están rellenos por acumulaciones de materiales clásticos constituidos por gravas, cantos rodados y arenas de composición principalmente calcárea. El principal valle es alargado y se extiende desde el poniente de Orizaba y continúa hacia el oriente pasando por Fortín, Córdoba y posteriormente al este, en donde se abre hacia la planicie costera de Veracruz. Se encuentra limitado tanto al norte como al sur por rocas calcáreas cretácicas.

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. 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 Blanco, Orizaba y Metlacy sus arroyos tributarios, así como conglomerados que conforman el relleno de los valles. Esta es la unidad que se explota principalmente 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, basaltos y brechas, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento y disolución en el caso de las calizas. Estas rocas calcáreas constituyen horizontes acuíferos que pueden presentar condiciones de **confinamiento**, debido a que su litología incluye alternancia con calizas arcillosas y están sobreyacidas por lutitas y limolitas.

5.2. Parámetros hidráulicos

Existe muy poca información de pruebas de bombeo realizadas en aprovechamientos localizados en este acuífero. Sólo tres pruebas de corta duración realizadas en 2005 (CONAGUA) en etapas de abatimiento y recuperación, cuyos resultados de su interpretación por métodos analíticos convencionales reportaron valores de transmisividad que varían en un rango de **9.82×10^{-4} a $3.57 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ (84 a 308 $\text{m}^2/\text{día}$)**. Sin embargo, también se pueden tomar en cuenta las 13 pruebas de bombeo de corta duración en abatimiento y recuperación, ejecutadas en 2013 en el acuífero Cotaxtla vecino al este, así como los aforos realizados en el 2005 en el acuífero Omealca-Huixcolotla, vecino al sureste, que tienen el mismo origen, evolución y constitución geológica. De los resultados de su interpretación por métodos analíticos convencionales, se determina que los sedimentos que constituyen estos acuíferos presentan permeabilidad baja a alta. Los valores de transmisividad varían de **52.0×10^{-3} a $5.0 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ (4493 a 4.3 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 **8.2×10^{-5} a $5.1 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ (7.1 a 0.04 m/d)**. Los valores más altos corresponden a los sedimentos clásticos de mayor granulometría y mejor clasificados que constituyen el cauce de los ríos y arroyos, o a zonas de mayor espesor saturado.

En las rocas sedimentarias el sistema de fracturamiento y fallamiento incrementa la permeabilidad, que puede ser hasta de dos órdenes 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 que su valor para los depósitos clásticos varía de **0.05 a 0.20**.

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 2005 además de registros históricos durante el periodo 1995-2019, 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 en dicho periodo 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 10 a 160 m, los cuales se incrementan por efecto de la topografía del centro de los valles y del cauce del río Blanco hacia las estribaciones de las sierras que los delimitan, conforme se asciende topográficamente. Los niveles estáticos más someros, de 10 a 20 m, se registran entre la zona urbana de la ciudad de Orizaba y Jalapilla; en tanto que las mayores profundidades, de 130 a 160 m, se presentan en la región oriental, hacia el límite con el acuífero Cotaxtla, entre los poblados Peñuela y Manuel León y al sureste de la zona urbana de Córdoba, respectivamente (figura 3).

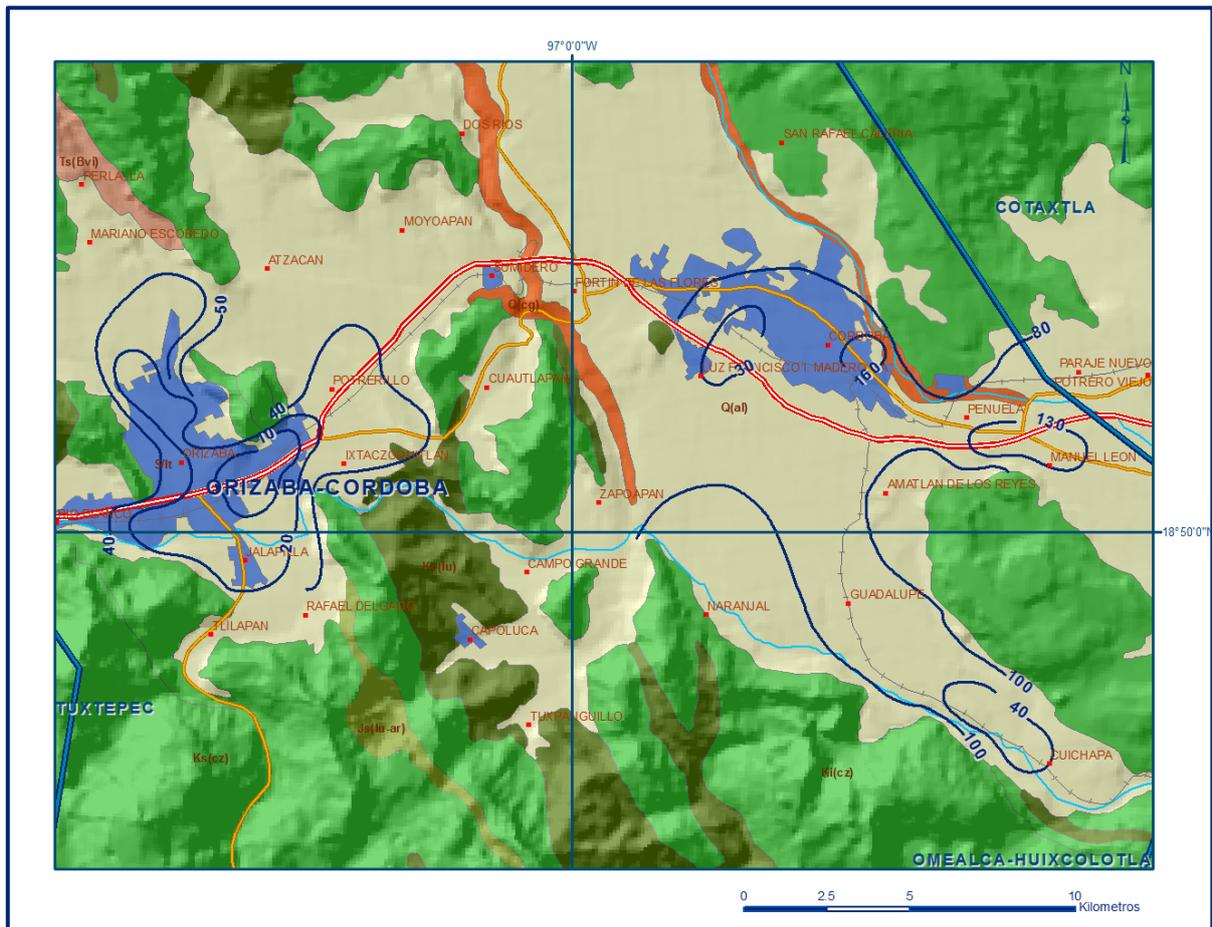


Figura 3. Profundidad al nivel estático en m (2019)

5.4.2. Elevación del nivel estático

De acuerdo con la configuración de elevación del nivel estático, en 2019 se registraron valores que variaron de 1330 a 500 msnm, que se incrementan de las porciones oriental y sur oriental, en dirección a los flancos de las sierras que delimitan el acuífero. Los valores más altos de carga hidráulica, 1250 a 1330 msnm, se registran en la porción noroccidental de Orizaba, desde donde descienden gradualmente hacia el sureste por efecto de la topografía, al igual que los valores de profundidad. Los valores más bajos, de 570 a 500 msnm, se presentan en el extremo suroriental, hacia el límite con los acuíferos Cotaxtla y Omealca-Huixcolotla, mostrando de esta manera una dirección preferencial del flujo subterráneo noroeste-sureste (figura 4).

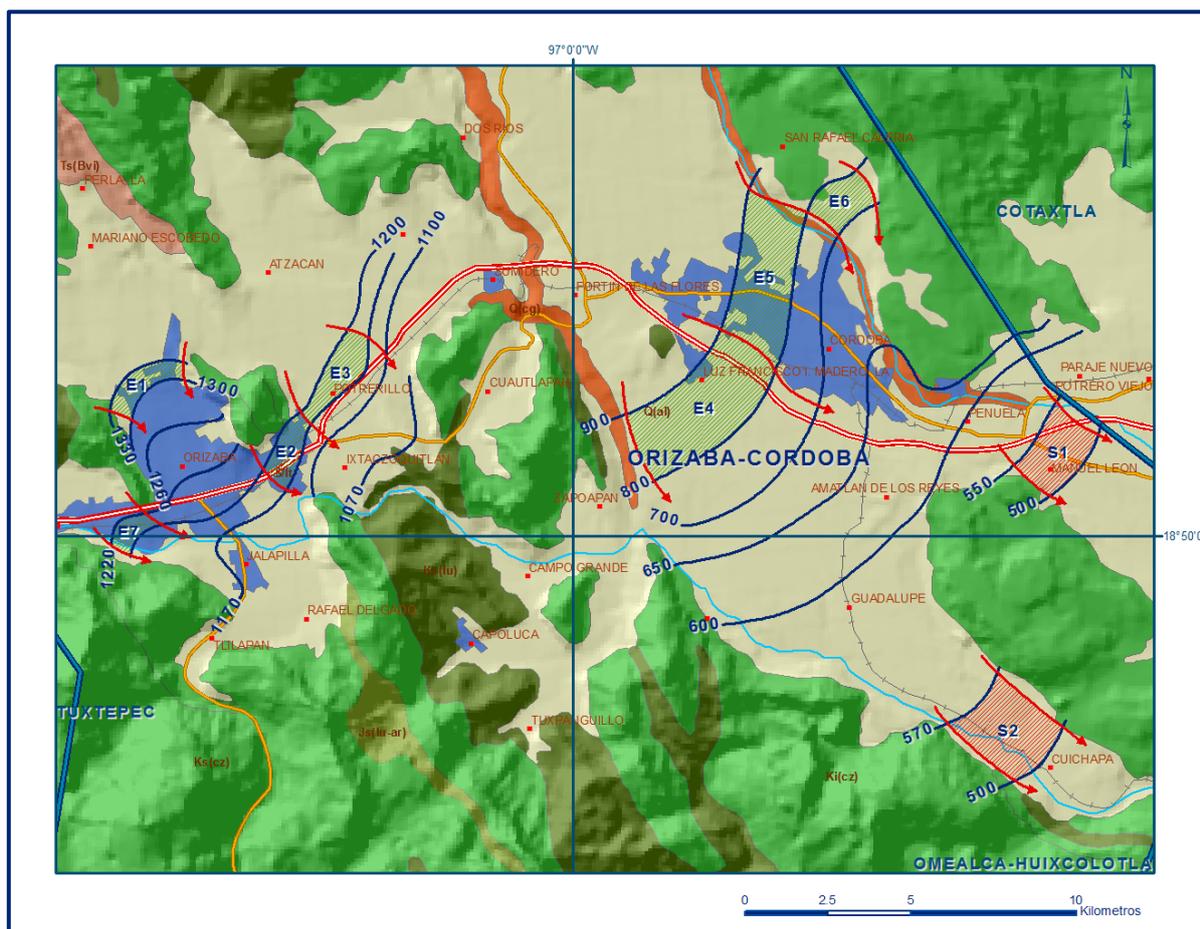


Figura 4. Elevación del nivel estático en msnm (2019)

5.4.3. Evolución del nivel estático

La configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2016-2019 registró valores tanto de recuperación como de abatimiento. Los primeros varían de 1 a 2 m, es decir de 0.3 a 0.7 m anuales y se registran entre Córdoba, Manuel León, Cuichapa, Amatlán de los Reyes y Guadalupe, en el valle de Córdoba; y la zona que rodea a Orizaba, entre Mariano Escobedo, Potrerillo, Jalapilla y Río Blanco, en el valle de Orizaba. Los abatimientos varían de 1 a 5 m, que representan 0.3 a 1.7 m anuales, y se registraron de manera local en la región centro y norte de la zona urbana de Orizaba. En la mayor parte de la zona de explotación los niveles del agua subterránea no presentaron variaciones importantes en su posición (figura 5).

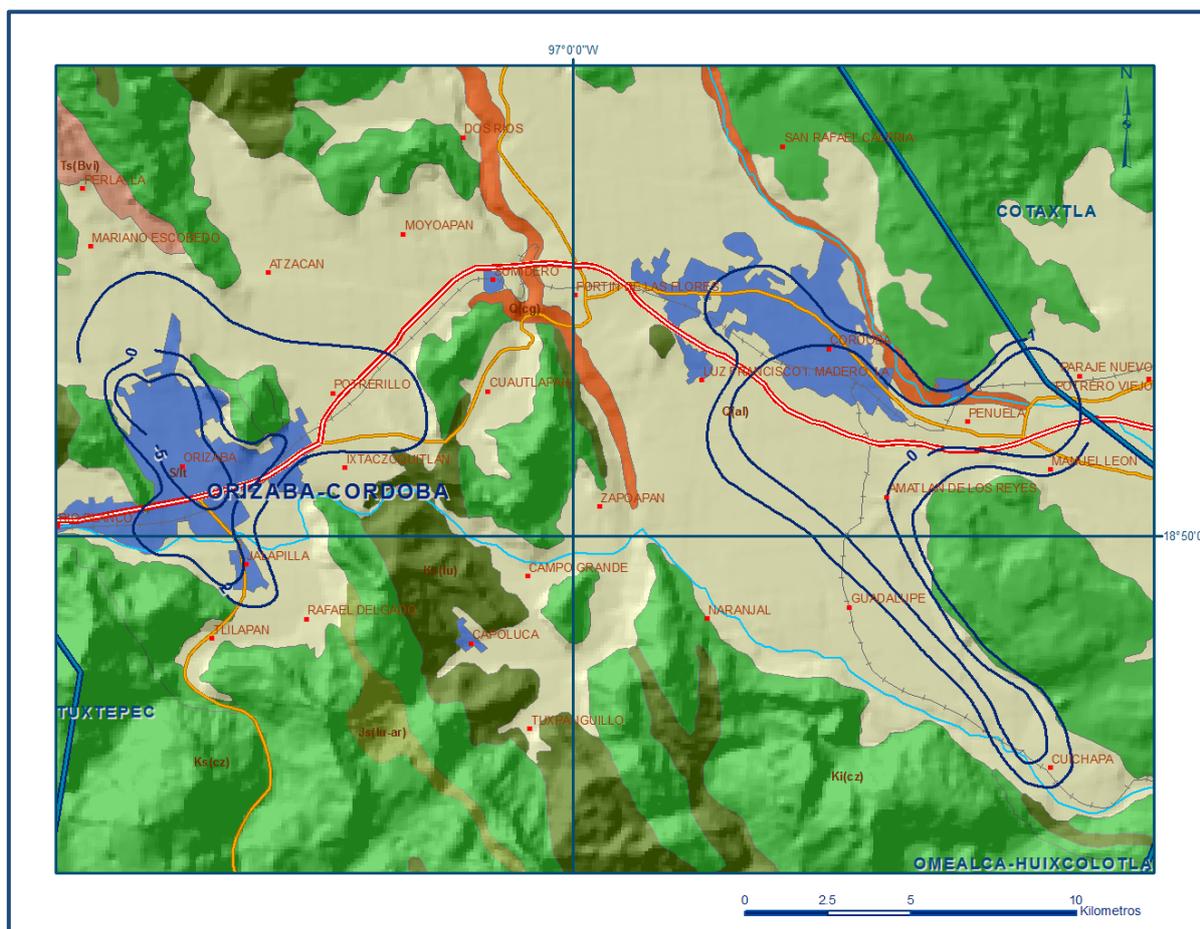


Figura 5. Evolución del nivel estático en m (2016-2019)

5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

La información de hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea disponible proviene de los resultados de laboratorio proporcionados por el Organismo de Cuenca Golfo Centro de la red de monitoreo en sólo 3 pozos identificados como Embotelladora Tropical, S.A. de C.V. (Pepsi-Cola), International Paper y H. Ayuntamiento Constitucional Orizaba (Poblado El Trébol), ubicados en el municipio y localidad de Ixtaczoquitlán; practicados durante el periodo 2012-2018. Las determinaciones incluyeron temperatura, conductividad eléctrica, pH, Eh, nitratos, dureza total, iones principales, sólidos totales disueltos (STD), fierro, manganeso, arsénico, plomo, cadmio, mercurio, nitratos, fosfatos, compuestos orgánicos y análisis bacteriológicos. Los resultados de los análisis fisicoquímicos indican que las concentraciones de algunos iones y elementos sobrepasan los límites máximos permisibles (LMP) que establece la Norma Oficial Mexicana, para los diferentes usos. La concentración de sólidos totales disueltos presenta valores de 262 a 412 mg/l que no sobrepasan el límite máximo permisible de 1000 ppm establecido en la modificación Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 para el agua destinada al consumo humano. El pH registró variaciones de 6.4 a 7.9, 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 19.3 a 22.9 °C.

Con respecto a la conductividad eléctrica, el agua se clasifica de manera general como dulce a salobre, de acuerdo con el criterio establecido por la American Potability and Health Association (APHA, 1995), ya que sus valores son inferiores a 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Los elementos y compuestos que sobrepasan el LMP que establece dicha NOM son plomo y coliformes totales; para el caso del pozo localizado en la embotelladora de refrescos, adicionalmente se detectó la presencia de cloroformo, posiblemente originado por algún accidente fortuito de contaminación local.

Como referencia adicional de información se pueden adoptar por correlación hidrogeológica los resultados de los análisis fisicoquímicos realizados a 5 muestras de agua subterránea obtenidas en 2005 en el acuífero vecino Omealca-Huixcolotla, vecino al norte, que tiene el mismo origen y constitución geológica. Las determinaciones incluyeron: temperatura, conductividad eléctrica, pH, Eh, sólidos totales disueltos (STD), dureza total y dureza de calcio, iones principales, nitratos, fosfatos, hierro y manganeso. Los resultados confirman, de manera general, lo expresado antes para el acuífero Orizaba- Córdoba: concentración de STD que no sobrepasan el límite máximo permisible de 1000 ppm establecido en la modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994; y valores de conductividad eléctrica que la clasifican como agua dulce, de acuerdo con la APHA, 1995.

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 baja a media (C_1 a C_2) y contenido bajo de sodio intercambiable (S_1), lo que indica 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 dominante la bicarbonatada-cálcica, que corresponde a agua de reciente infiltración, con periodos cortos de residencia, que han circulado a través de rocas calcáreas y volcánicas.

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 Norte, se registró la existencia de 150 aprovechamientos más importantes del agua subterránea, ya que de acuerdo con el Registro Público de Derechos del Agua (REPDA), existen 1198

aprovechamientos, la gran mayoría norias. De total de obras censadas, 139 están activas y 11 inactivas temporalmente; 8 son para uso agrícola, 31 para abastecimiento de agua potable, 28 para uso doméstico-pecuario, 62 para uso industrial y 21 para uso de servicios.

El volumen de extracción estimado es de **34.7 hm³ anuales**, de los cuales 20.8 hm³ (59.9%) son para uso industrial, 10.6 hm³ (30.6%) para uso público-urbano, 2.7 hm³ (7.8%) para uso agrícola, 0.5 hm³ (1.4%) para uso de servicios y 0.1 hm³ (0.3%) para uso doméstico-pecuario.

Adicionalmente, a través **manantiales** más importantes censados, se descarga un volumen anual conjunto de 500 lps, que equivalen a **15.8 hm³ anuales**, destinados principalmente al uso público-urbano.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de aguas subterráneas se planteó para el periodo 2016-219, en un área de balance de **290 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 incidental, la infiltración de los excedentes del riego agrícola, que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela; del agua residual de las descargas urbanas y de las fugas en las redes de distribución de agua potable, constituyen otras fuentes de recarga al acuífero. Estos volúmenes se integran en la componente de recarga incidental (Ri). Debido a que el volumen de agua subterránea para uso agrícola es pequeño, sólo se considera la recarga incidental debida a la infiltración de las fugas en las redes de distribución de agua potable y alcantarillado.

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:

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

Donde:

- Rv:** Recarga vertical
- Eh:** Entradas por flujo subterráneo horizontal
- Ri:** Recarga Incidental
- B:** Bombeo
- Sh:** Salidas por flujo subterráneo horizontal
- Dm:** Descarga a través de manantiales
- $\Delta V(S)$:** Cambio en el volumen almacenado

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

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

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 4. 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:

$$Q = T * B * i$$

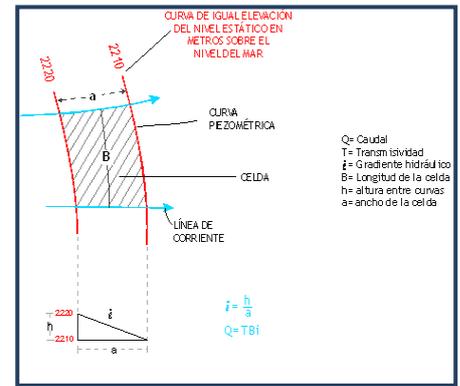
Donde:

Q: Caudal (m³/s)

T: Transmisividad (m²/s)

B: Longitud de la celda (m)

i: Gradiente Hidráulico (adimensional)



La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada una de las celdas establecidas, en la tabla 2 se observan los valores obtenidos en cada celda. El volumen total de entradas por flujo subterráneo horizontal es de **72.6 hm³/año**.

Tabla 2. Cálculo de las entradas por flujo subterráneo horizontal (2019)

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h_2-h_1 (m)	Gradiente i	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
E1	2460	690	30	0.0435	0.002	0.2139	6.7
E2	2090	860	30	0.0349	0.003	0.2187	6.9
E3	3040	1030	30	0.0291	0.003	0.2656	8.4
E4	4610	2160	100	0.0463	0.002	0.4269	13.5
E5	4370	1670	100	0.0599	0.002	0.5234	16.5
E6	1730	1260	100	0.0794	0.003	0.4119	13.0
E7	1440	720	20	0.0278	0.006	0.2400	7.6
TOTAL						0.2400	72.6

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)

Tomando en cuenta que para uso público-urbano se utiliza un volumen promedio anual de 26.4 hm³, de los cuales 10.6 hm³ provienen de pozos y 15.8 hm³ de la descarga de los manantiales, y un porcentaje de infiltración de 20% de recarga efectiva, considerando una profundidad al nivel del agua subterránea de 10 a 40 m en la zona urbana de Orizaba y Córdoba, se obtiene un volumen de recarga incidental de 5.3 hm³. Por tanto, **Ri = 5.3 hm³ anuales**.

7.2. Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente a través del bombeo (B), por salidas subterráneas horizontales (Sh) y a través de manantiales (Dm).

7.2.1. Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo es de **34.7 hm³ 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 4, tal como se muestra en la tabla 3. El volumen total de salidas por flujo horizontal subterráneo asciende a **29.2 hm³/año**.

Tabla 3. Cálculo de las salidas por flujo horizontal (2019)

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h_2-h_1 (m)	Gradiente i	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
S1	2240	1550	50	0.0323	0.007	0.5058065	16.0
S2	2160	2530	70	0.0277	0.007	0.4183399	13.2
TOTAL							29.2

7.2.3. Descarga a través de manantiales (Dm)

De acuerdo con el censo de aprovechamientos, se identificaron manantiales importantes, entre ellos los denominados Cuautlapan, que en conjunto descargan un caudal de 500 lps, que equivalen a 15.8 hm³ anuales. Por lo tanto, **Dm = 15.8 hm³ anuales**.

7.3. Cambio de almacenamiento (ΔVS)

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 5. Con base en ella y tomando en cuenta un valor promedio de rendimiento específico $S_y = 0.15$ 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 4, en la que se puede observar que el cambio de almacenamiento para el periodo es de -2.7 hm³, es decir, un promedio anual de **-0.9hm³**.

Tabla 4. Cálculo del cambio de almacenamiento (2016-2019)

Evolución (m)	Evolución media (m)	Área (km ²)	Sy	ΔV(S) (hm ³ /año)
-5	-5	7.0	0.15	-5.2
0 a -5	-2.5	11.8	0.15	-4.4
2 a 0	1	31.4	0.15	4.7
0	0	38.2	0.15	0.0
1 a 0	0.5	29.8	0.15	2.2
	TOTAL	7.0	TOTAL	-2.7
Promedio anual				-0.9

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:

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

$$R_v = 29.2 + 34.7 + 15.8 - 72.6 - 5.3 - 0.9$$

$$R_v = 0.9 \text{ hm}^3/\text{año}$$

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

$$R = R_v + E_h + R_i$$

$$R = 0.9 + 72.6 + 5.3$$

$$R = 78.8 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

8. DISPONIBILIDAD

Para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas, se aplica el procedimiento de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-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 **78.8 hm³/año**, de los cuales 73.5 hm³ son recarga natural y 5.3 hm³ recarga incidental.

8.2. Descarga natural comprendida (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 Orizaba-Córdoba, su valor es **45.0 hm³ anuales**, de los cuales 29.2 hm³ corresponden a las salidas por flujo subterráneo horizontal hacia los acuíferos vecinos Cotaxtla y Omealca-Huixcolotla, y 15.8 hm³ a la descarga de los manantiales. Por lo tanto, **DNC = 45.0 hm³ anuales**.

8.3. Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)

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

Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de **40,099,535 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos del Agua (REPDA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022**.

8.4. Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)

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

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

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{MA} &= 78.8 - 45.0 - 40.099535 \\ \text{DMA} &= - 6.299535 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

El resultado indica que no existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario, su déficit es de **6'299,535 m³**.

9. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua. 2002. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Orizaba-Córdoba, estado de Veracruz.

Comisión Nacional del Agua. 2005. Estudio de evaluación hidrogeológica de los sistemas acuíferos de la cuenca del río Papaloapan localizados en los estados de Veracruz, Oaxaca y Puebla. Realizado por Consorcio de Ingeniería Mexicana, S.A. de C.V.

Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca Golfo Centro, 2019. Información piezométrica, censo e hidrometría del acuífero Orizaba-Córdoba, estado de Veracruz.

Gobierno del estado de Veracruz, 1981. Estudio geohidrológico de fuentes de abastecimiento para Orizaba, Veracruz. Realizado por ingenieros Civiles y Geólogos Asociados. S.A.

Gobierno del estado de Veracruz, 1982. Estudio geohidrológico para fuentes de abastecimiento de agua potable en la localidad de Córdoba, en el estado de Veracruz. Realizado por ingenieros Civiles y Geólogos Asociados. S.A.

Servicio Geológico Mexicano, 2001. Carta Geológica-Minera E14-16 "Orizaba" Esc. 1:250.000.