



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA
GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO COATZACOALCOS (2013), ESTADO
DE OAXACA**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1. GENERALIDADES.....	2
Antecedentes	2
1.1. Localización.....	2
1.2. Situación administrativa del acuífero.....	4
2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD	5
3. FISIOGRAFÍA.....	5
3.1 Provincia fisiográfica	5
3.2 Clima	6
3.3 Hidrografía	7
3.4 Geomorfología.....	7
4. GEOLOGÍA.....	7
4.1 Estratigrafía.....	9
4.2 Geología estructural.....	13
4.3 Geología del subsuelo.....	14
5. HIDROGEOLOGIA.....	15
5.1 Tipo de acuífero	15
5.2 Parámetros hidráulicos.....	16
5.3 Piezometría	16
5.4 Comportamiento hidráulico.....	16
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea	17
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	18
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	19
7.1 Entradas.....	19
7.1.1Recarga vertical (Rv).....	20
7.2 Salidas.....	25
7.2.1Extracción por Bombeo (B)	25
7.2.2Descarga a través de Manantiales (Dm)	25
7.2.3Evapotranspiración (ETR).....	26
8. DISPONIBILIDAD	27
8.1 Recarga total media anual (R).....	27
8.2 Descarga natural comprometida (DNC).....	28
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)	28
8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	28
9. BIBLIOGRAFÍA	30

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 Coatzacoalcos, definido con la clave 2013 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción nororiental del estado de Oaxaca, entre los paralelos 16° 54' y 17° 32' de la latitud norte y los meridianos 93° 59' y 95° 44' de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 9,651 km². Limita al norte con los acuíferos Cuenca Río Papaloapan y Costera de Coatzacoalcos, pertenecientes al estado de Veracruz; al este con Cintalapa, perteneciente al estado de Chiapas; al sur con los acuíferos Ostuta y Tehuantepec; al oeste y noroeste con Tuxtepec, todos ellos pertenecientes al estado de Oaxaca (figura 1).

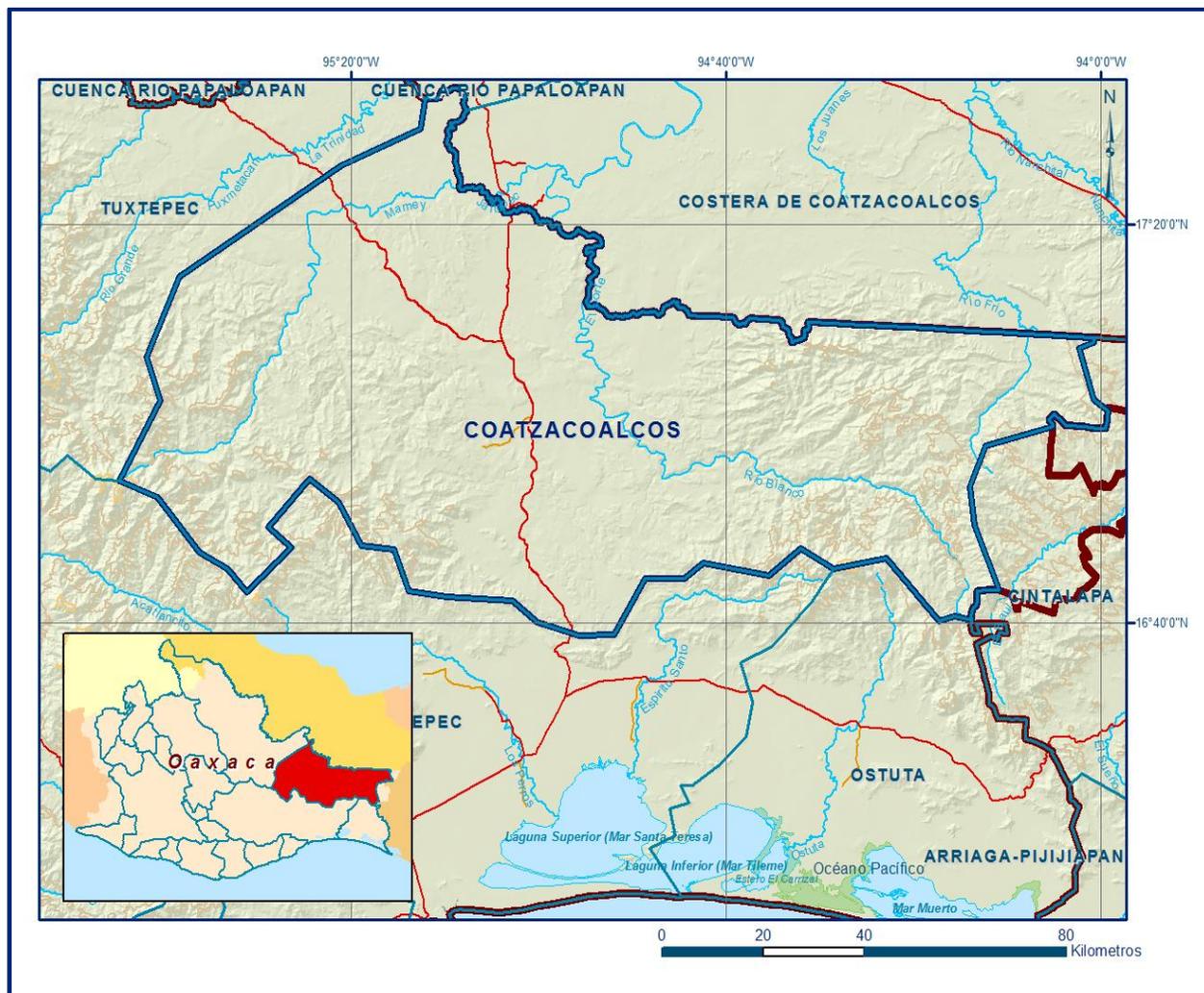


Figura 1. Localización del acuífero

Geopolíticamente comprende totalmente los municipios, San Juan Mazatlán, San Juan Guichicovi, Matías Romero, Santa María Petapa, Santo Domingo Tehuantepec, El Barrio de La Soledad y Santiago Ixcuintepec;

Así mismo cubre parcialmente los municipios San Juan Cotzocón, San Lucas Camotlán, San Carlos Yautepec, Santiago Lachiguiri, Guevea de Humboldt, Santa María Guienagati, Santo Domingo Chihuitán, Asunción Ixtaltepec, San Miguel Chimalapa y Santa María Chimalapa.

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

Tabla 1. Coordenadas de la poligonal simplificada

ACUIFERO 2013 COATZACOALCOS							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	95	12	4.9	17	32	28.5	DEL 1 AL 2 POR EL LIMITE ESTATAL
2	95	7	35.5	17	31	26.3	DEL 2 AL 3 POR EL LIMITE ESTATAL
3	94	0	36.8	17	8	39.6	
4	94	0	43.7	17	8	10.0	
5	94	2	14.9	17	7	34.2	
6	94	0	44.7	17	2	28.3	
7	93	59	13.5	17	1	19.4	DEL 7 AL 8 POR EL LIMITE ESTATAL
8	94	5	6.3	16	59	44.9	
9	94	12	17.4	16	57	45.6	
10	94	13	54.0	16	53	42.5	
11	94	13	26.0	16	49	52.0	
12	94	10	51.4	16	43	18.7	DEL 12 AL 13 POR EL LIMITE ESTATAL
13	94	13	45.2	16	40	21.0	
14	94	15	31.9	16	40	42.4	
15	94	17	13.4	16	40	15.0	
16	94	22	53.5	16	46	31.2	
17	94	28	29.7	16	45	27.0	
18	94	31	59.8	16	47	29.8	
19	94	35	23.7	16	44	45.8	
20	94	42	23.0	16	46	3.7	
21	94	44	27.4	16	44	30.9	
22	94	48	34.4	16	44	27.5	
23	94	51	54.9	16	38	54.3	
24	94	55	40.4	16	38	47.7	
25	95	0	7.3	16	40	8.9	
26	95	2	43.1	16	42	16.6	
27	95	9	44.1	16	42	38.1	
28	95	13	51.1	16	43	14.6	
29	95	15	23.9	16	47	23.2	
30	95	18	50.9	16	47	46.7	
31	95	21	18.7	16	52	8.4	
32	95	24	22.4	16	54	27.7	
33	95	28	42.9	16	49	37.5	
34	95	26	20.4	16	47	34.9	
35	95	31	5.5	16	43	8.0	
36	95	33	9.8	16	45	27.2	
37	95	36	5.7	16	47	6.6	
38	95	40	35.7	16	52	38.2	
39	95	44	39.4	16	54	16.0	
40	95	40	17.0	17	2	22.8	
41	95	41	44.7	17	6	44.1	
42	95	38	14.3	17	14	48.7	
43	95	21	0.0	17	25	58.8	
44	95	12	31.8	17	29	37.4	
1	95	12	4.9	17	32	28.5	

1.2. Situación administrativa del acuífero

El acuífero Coatzacoalcos pertenece al Organismo de Cuenca “Golfo Centro”. En su territorio completo no rige ningún decreto de veda para la extracción de agua subterránea. De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 4. El usuario principal del agua es el Doméstico. En el territorio que cubre el acuífero no se localiza distrito o unidad de riego alguna, tampoco se ha constituido hasta la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la superficie que comprende el acuífero no se han realizado algunos estudios hidrogeológicos de evaluación. El único estudio que abarcó la superficie completa es el que se describe a continuación:

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 en la zona.

Mediante la realización de actividades de campo que incluyeron censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría de las extracciones, realización de pruebas de bombeo sondeos geofísicos y reconocimientos geológicos, fue posible plantear el balance de aguas subterráneas.

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.

Este estudio fue la base para la elaboración del presente documento, por lo que sus conclusiones y resultados se analizan en los apartados correspondientes.

3. FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia fisiográfica

De acuerdo a la clasificación fisiográfica de Erwin Raisz (1964), la superficie cubierta por el acuífero se encuentra dentro de las Provincias Fisiográficas de la República Mexicana Planicie Costera del Golfo, Sierra Madre del Sur (Subprovincia Tierras Alta de Oaxaca), Sierra Madre Oriental y la Cordillera Centroamericana.

La Llanura Costera del Golfo se ubica en toda la costa del Golfo de México desde Tamaulipas hasta la Península de Yucatán; está integrada en la parte norte por calizas, lutitas, arcillas y areniscas del Cretácico, en la zona central por materiales clásticos del Neógeno en una sucesión de tierras bajas y cuevas; el sur está caracterizado por materiales del reciente que forman una amplia llanura sin relieve y lagunas en las regiones costeras (Manuel Álvarez Jr.).

La Sierra Madre Oriental representa una franja alargada orientada en sentido noroeste-sureste, desde Chihuahua-Coahuila hasta el Istmo de Tehuantepec, que presenta una flexión con orientación este-oeste entre Torreón y Monterrey; está integrada principalmente por sedimentos calcáreos del Cretácico y Jurásico que se encuentran plegados, formando valles estructurales (Manuel Álvarez Jr.) en los sinclinales y serranías en los anticlinales.

Solo en la porción norte y nororiental del acuífero afloran las calizas y lutitas-areniscas que pertenecen a esta provincia. La Sierra Madre del Sur está representada por esquistos y granitos que afloran ampliamente en la porción centro y occidental de la superficie del acuífero.

El acuífero presenta geformas de sierras bajas de mediana altura con elevaciones hasta de 1500 msnm en sentido sureste –suroeste de la región, de forma alargada y un tanto angosta. En la porción norte del acuífero existen llanuras y lomeríos con pendientes suaves a moderadas que favorecen la formación de meandros en los ríos, lagunas y zonas de inundación.

3.2 Clima

De acuerdo con la clasificación de climas de Köppen, adaptada a las condiciones de la República Mexicana por Enriqueta García (1964); en la región centro - poniente predomina el clima clasificado como Am(f), que corresponden a un clima cálido húmedo, y Ac(m) hacia el oriente que es de tipo cálido húmedo con lluvias en verano. En zonas topográficamente más altas el clima cambia y es de tipo (Aw1) y (Aw2), cálido subhúmedo. La temperatura media anual es de 26°C en la planicie y flancos de las sierras y disminuye hasta 22°C en las partes altas de las sierras.

La precipitación media anual varía de 1500 a 3600 mm; el periodo de lluvias se presenta entre junio y noviembre, mientras que el estiaje entre enero y marzo. En ellos se presentan valores promedio de lluvias de 50 a 98 mm, para el estiaje, y de 262 a 339 mm para la temporada de lluvias. Para la determinación de las variables climatológicas se cuenta con información de la red de estaciones que tienen influencia en el área del acuífero. De acuerdo con estos datos y utilizando el método de los Polígonos de Thiessen se determinaron valores promedio anuales de precipitación y temperatura de **2600 mm y 24.9°C**, respectivamente. De igual manera, con respecto a la evaporación potencial, se obtuvo un valor de **1158 mm anuales**.

3.3 Hidrografía

El acuífero se localiza dentro de la Región Hidrológica RH 29 “Coatzacoalcos”, Cuenca de Río Coatzacoalcos, dentro de la cuenca “B” que drena hacia el Golfo de México. Esta cuenca abarca una parte de la Sierra Madre del Sur; es una de las más importantes del país porque en ella se localizan parte de los afluentes del Río Coatzacoalcos, generados por los altos índices de precipitación pluvial que caracterizan a la región y por la baja capacidad de almacenamiento que tienen las rocas. No existe infraestructura hidráulica para el aprovechamiento de los escurrimientos superficiales.

3.4 Geomorfología

En la superficie cubierta por el acuífero se pueden distinguir 4 unidades geomorfológicas presentes: llanuras aluviales, que se presentan en las llanuras de inundación de los ríos y arroyos; sierras de altas, constituidas principalmente por rocas metamórficas y graníticas; sierras bajas complejas, conformadas por calizas, areniscas y lutitas y lomeríos constituidos básicamente por conglomerados y areniscas.

Las regiones topográficamente más altas están conformadas por extensos afloramientos de esquistos y granitos, que por su naturaleza se consideran de permeabilidad baja y aunado a la pendiente topográfica no permiten la infiltración del agua de lluvia.

La zona de valle es la más importante desde el punto de vista geohidrológico, debido a que en ella ocurre la recarga del acuífero que actualmente se explota; su elevación varía entre 200 y 100 msnm. Los materiales que lo rellenan presentan permeabilidad media a alta y están representados por paquetes de areniscas y conglomerados. Hacia el cauce del Río Jaltepec, predominan los sedimentos aluviales de granulometría variable.

4. GEOLOGÍA

La superficie de México ha sido dividida en varios Terrenos Tectonoestratigráficos. En la porción sur del acuífero se encuentran los Terrenos Tectonoestratigráficos Xopala y Maya, así como los bloques Arco Chontal y Mixtequita (Carta Geológica-Minera E15-10D15-1, escala 1:250,000 “Juchitán”, SGM, 2000) (figura 2).

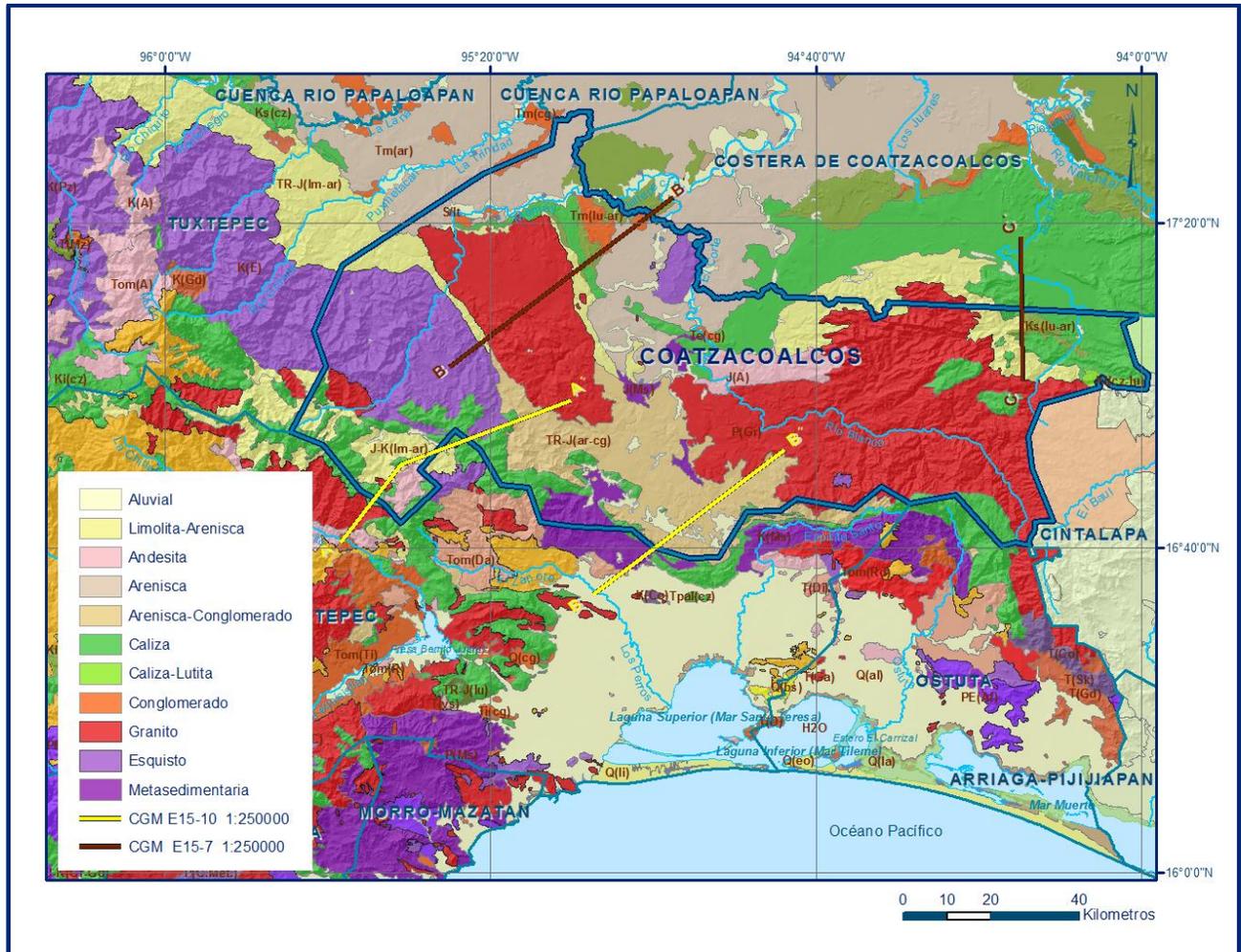


Figura 2. Geología general del acuífero

Las rocas cristalinas del área La Mixtequita han sido divididas como parte del basamento del Terreno Maya (Campa y Coney, 1983). De acuerdo con la configuración tectonoestratigráfica de estos autores, el Terreno Juárez separa al Terreno Oaxaca del Terreno Maya; más recientemente Ortega G.F. et al.(1990) y Sedlock et al. (1993) reanalizan la distribución de los terrenos tectonoestratigráficos del sur de México, pero ambos estudios no consideran la existencia de rocas precámbricas en el Terreno Maya.

No es hasta 1994 cuando Murillo confirma la amplia distribución de granulitas de edad Grenvilliana en el Bloque La Mixtequita; en este sentido, la porción norte del acuífero pertenece al Terreno Maya y comprende parcialmente el Bloque Mixtequita, cuya posición actual es aún un enigma. El Terreno Xolapa está constituido por ortogneises, migmatitas, anfíbolitas y diques aplíticos con metamorfismo en facies de anfíbolita.

La interpretación de la edad de la unidad es compleja ya que estudios isotópicos han reportados edades desde el Precámbrico hasta el Paleoceno. Otras edades miocénicas están relacionadas con grandes emplazamientos plutónicos no deformados, de composición granodiorítica-diorítica.

El Bloque Arco Chontal constituye el arco volcánico mesozoico más oriental con respecto a los situados al occidente de México. Su basamento no se reconoce, sin embargo algunos autores consideran que son las rocas del Complejo Xolapa.

El Arco Chontal consiste de una secuencia vulcano sedimentaria constituida por andesitas, areniscas, lutitas y limolitas con intercalaciones de lentes calcáreos; la parte superior está constituida por estratos delgados de calizas marmorizadas y esquistosas, conglomerados polimícticos con clastos calcáreos y andesitas. Fragmentos de rudistas de asignan una edad Neocomiano-Turoniano o Cretácico Temprano (Carfantán, 1981,1983). El Bloque la Mixtequita se caracteriza por contener dos unidades que se han denominado Complejo Guichicovi y Batolito de la Mixtequita (Carta Geológica-Minera E15-7, escala 1:250,000 "Minatitlán", SGM, 2000).

4.1 Estratigrafía

La compleja columna estratigráfica presente en la zona se describe a continuación, de la unidad más antigua a la más reciente:

PROTEROZOICO

Bloque la Mixtequita

Las rocas más antiguas de la región corresponden al Complejo Guichicovi conformado por paragneises, ortogneises, charnoquitas y anortositas cuya edad pertenece al Proterozoico Medio. Estas rocas coinciden tanto en litología como en edad con el basamento del Terreno Oaxaca (Complejo Oaxaqueño).

PALEOZOICO

Terreno Maya

Su basamento es el Complejo Sierra de Juárez, de edad probable Carbonífero-Pérmico. Está constituido por una secuencia de esquistos de clorita, sericita y cuarzo, metasedimentos cuarzopelíticos y rocas verdes grabroicas, metamorfizadas en facies de esquistos verdes, y se presentan serpentinitas y franjas milonitizadas.

A partir del Pérmico hasta el Triásico se desarrolla un arco magmático continental en la margen pacífica que origina rocas de composición generalmente granítico-granodioríticas con variaciones a dioritas y tonalitas, que constituyen el Macizo de Chiapas.

JURÁSICO TEMPRANO

Batolito La Mixtequita

Está conformado por granitos de biotita con gradaciones a granodioritas cuya edad se ha atribuido al Carbonífero-Jurásico, que se presentan intrusionando a las rocas del Complejo Guachicovi. La litología y edad de esta unidad son muy semejantes a las rocas del Macizo de Chiapas. Estas unidades se encuentran cubiertas discordantemente y en forma parcial por la Formación Todos Santos (?), de edad Jurásico Medio.

JURÁSICO MEDIO

Formación Todos Santos

Término definido por una secuencia de estratos delgados color rojizo de limolitas, areniscas, conglomerados polimícticos e intercalaciones de coladas andesíticas. Sobre esta formación se depositan las secuencias relacionadas a cuencas jurásicas (Depresión Itsmica) y jurásicas-cretácicas. (Sierra de Chiapas). Existen afloramientos de esta unidad en las regiones de Matías Romero, Lázaro Cárdenas y Santo Domingo Petapa.

JURÁSICO SUPERIOR

En la Cuenca de Zongolica aunque los sedimentos más antiguos son del Jurásico Superior, sólo aflora la Formación Orizaba, del Albiano-Cenomaniano, constituida por calizas y dolomías, sobre la cual se depositaron en forma discordante las calizas de la Formación Atoyac y la secuencia de lutitas y areniscas de la Formación Méndez. La cuenca de la Depresión Itsmica se caracteriza por secuencias sedimentarias de edad Jurásico Superior, cuya distribución es muy restringida. En la superficie que cubre el acuífero únicamente aflora su unidad basal que es la Formación Mogoñé, de edad Calloviano-Oxfordiano, constituida por calizas y lutitas apizarradas. Esta formación es cubierta por la Formación Porvenir de edad Kimmeridgiano-Tithoniano, constituida por calizas oolíticas areno-conglomeráticas, sobre la cual descansa la Formación Potrerillos de edad Tithoniano-Berriasiano con brechas calcáreo-terrágenas, la que a su vez es cubierta por la Formación Paso de Buques de edad Valanginiano-Hauteriviano, formada por calizas.

Como cambio de facies aflora la Formación Victoria, constituida por calizas y areniscas con un alcance estratigráfico del Kimmeridgiano-Hauteriviano.

La Cuenca de la Sierra de Chiapas se desarrolló sobre la Formación Todos Santos y su unidad basal la constituye la Formación Uxpanapa, de edad Kimmeridgiano-Tithoniano, formada por calizas y dolomías, sobre la cual se deposita en forma concordante la Formación Edén de edad Tithoniano-Berriasiano, constituida por calizas arcillosas, margas y lutitas la que a su vez es sobreyacida discordantemente por la Formación San Ricardo de edad Hauteriviano-Barremiano, conformada por areniscas y limolitas.

Durante el Jurásico Medio (?) y Superior (?) se desarrolló la Cuenca Salina del Istmo que aunque no llega a aflorar se ha identificado su presencia en el subsuelo mediante gravimetría y perforaciones, se caracteriza por los depósitos salinos que se presentan en forma de diapiros y estructuras dómicas. Su edad es aún controversial, ya que existen argumentos para ubicarla en el Jurásico Superior y Jurásico Medio y hasta el Triásico.

JURÁSICO MEDIO AL CRETÁCICO INFERIOR

La unidad Indiferenciada del Jurásico Medio al Cretácico Inferior está constituida por metareniscas, esquistos y filitas que se encuentran en una zona de cizalla en la zona de La Ventosa y que bien pudieran corresponder con la Formación Todos Santos (?) y formaciones del Jurásico Superior-Cretácico Inferior, pero metamorfizadas. Sobreyaciendo discordantemente sobre la unidad anterior, se presentan metacalizas de color gris claro a gris oscuro, en parte masivas, marmorizadas y foliadas, lo que sugiere que esta unidad también está muy tectonizada y pudiera participar de la deformación de las zonas de cizalla.

CRETÁCICO SUPERIOR

Formación Sierra Madre

Cubriendo indistintamente a las secuencias de la Sierra de Chiapas y la Depresión Itsmica, discordantemente se depositó la Formación Sierra Madre, de edad Albiano-Turoniano, constituida por calizas y dolomías que contienen restos fósiles denerineas, rudistas y corales. Sobreyaciendo en forma discordante a la formación anterior se presenta la Formación Méndez de edad Campaniano-Maestrichtiano, conformada por areniscas, lutitas y margas, localmente por filitas y pizarras.

TERCIARIO (NEÓGENO)

A partir del Paleoceno-Eoceno, el Terreno Maya y el Bloque Chontal comparten una cubierta terciaria representada por molasas continentales constituidas por conglomerados polimícticos de clastos de rocas metamórficas, calizas, fragmentos de cuarzo y areniscas.

En forma discordante sobre estos aflora una secuencia volcánica constituida por tobas andesíticas, andesitas, dacitas y riolitas con intercalaciones delgadas de areniscas y calizas lacustres pertenecientes a la Formación Laollaga.

Cubriendo parcialmente tanto a las secuencias de la Cuenca de Zongolica como de la Sierra de Chiapas se tiene la Cuenca Terciaria del Golfo, cuyas unidades basales están constituidas por conglomerados polimícticos y lutitas de la Formación Conglomerado Uxpanapa y por lutitas y conglomerados de la Formación Lutitas Nanchital, ambas de edad Eoceno. Cubriendo a estas unidades se depositó la Formación La Laja de edad Oligoceno, formada por lutitas y areniscas.

A partir del Mioceno se presenta una sedimentación continua que inicia con la Formación Depósito, del Mioceno Inferior, conformada por lutita micacíferas con intercalaciones de tobas y cenizas volcánicas.

Sobre ella descansa la Formación Encanto de edad Mioceno Medio, constituida por lutitas y arenas, la cual es sobreyacida por la Formación Concepción de edad Mioceno Superior, constituida por areniscas y lutitas, y por la Formación Filisola, también del Mioceno Superior, representada por arenas con delgadas intercalaciones de lutitas.

El Plioceno está representado por las formaciones Jaltepec y Paraje Solo, constituidas por conglomerados y areniscas, y del Pleistoceno-Pleistoceno por la Formación Cedral, conformada por areniscas, lutitas y conglomerados.

Depósitos Cuaternarios

El Cuaternario está representado por el depósito, durante el Pleistoceno, de arenas, arcillas y limosmal consolidados, así como depósitos aluviales, palustres, eólicos y litorales de edad Holoceno.

4.2 Geología estructural

De acuerdo con la carta Geológica-Minera E15-10 D15-1 "Juchitán", escala 1:250000 (SGM, 2000), el contexto estructural de la parte del Terreno Maya que se localiza en el acuífero está relacionado con la evolución tectónica de Pangea y la apertura del Golfo de México.

Durante el Triásico Tardío-Jurásico Medio, el Bloque Yucatán se encontraba localizado en la porción que actualmente ocupa el Golfo de México, se desplazó hacia el sur a su posición actual, a través de una falla transformante que trajo como consecuencia la expansión del Golfo y la deriva del Bloque Yucatán. Se considera también que esta falla transformante de movimiento dextral cruzaba el Istmo de Tehuantepec tomando otro sentido en la rotación del Bloque Yucatán.

Otros autores como Coney y Dickinson (1980) suponen que la separación del Bloque Yucatán de Norteamérica, se dio mediante una megacizalla, con movimiento izquierdo, trayendo como consecuencia una conexión del sistema de expansión del Golfo de México con una zona de subducción que actuaba a lo largo de la Costa del Pacífico y consideraban que este bloque durante su separación con Norteamérica, permaneció unido al borde noroccidental de América del Sur, que finalmente se separó con la culminación del movimiento de la megacizalla, hace 150 y 125 Ma.

El complejo Guichicovi debe su posición actual a los desplazamientos transcurrentes dextrales ocurridos durante el Mesozoico. El complejo se desplazó desde el NW a través de la falla Valle Nacional o bien a través de la falla Villa Alta viajando 300 Km (Murillo, 1994).

En este sentido las estructuras más importantes corresponden a un sistema regional de fallas transcurrentes de rumbo NW-SE, como son la Falla Valle Nacional, de movimiento sinistral, que delimita al bloque Mixtequita del Terreno Maya, y afecta a las rocas metamórficas del Paleozoico y a los lechos rojos de la Formación Todos Santos; la Falla San Cecilia, a la cual se le atribuye el levantamiento del Bloque Guachicovi; la Falla San Juan, que se une con la Falla Santa Cecilia y afecta principalmente a la Formación Todos Santos y al Complejo Sierra de Juárez y La Falla Villa Alta que afecta tanto a las rocas del Complejo Sierra de Juárez, como a la Formación Todos Santos(?) y a las calizas de la Formación Sierra Madre (Carta Geológica-Minera E15-7, escala 1:250,000 "Minatitlán", SGM, 2000).

4.3 Geología del subsuelo

De acuerdo con la información geológica y geofísica así como la geología superficial, recaba en el acuífero y por correlación con acuíferos vecinos, es posible establecer que el acuífero se encuentra constituido, en su porción superior, por los sedimentos aluviales de granulometría variable, desde gravas hasta arcillas, que conforman el cauce y la llanura de inundación de los ríos Jaltepec y Blanco, así como los conglomerados polimícticos y areniscas, cuyos materiales que los originaron fueron transportados por los escurrimientos superficiales desde las regiones topográficamente más altas de la región.

Este conjunto de litologías conforma la unidad que actualmente se explota, principalmente mediante norias de extracción manual, que se destinan básicamente a satisfacer las necesidades del uso doméstico-abrevadero.

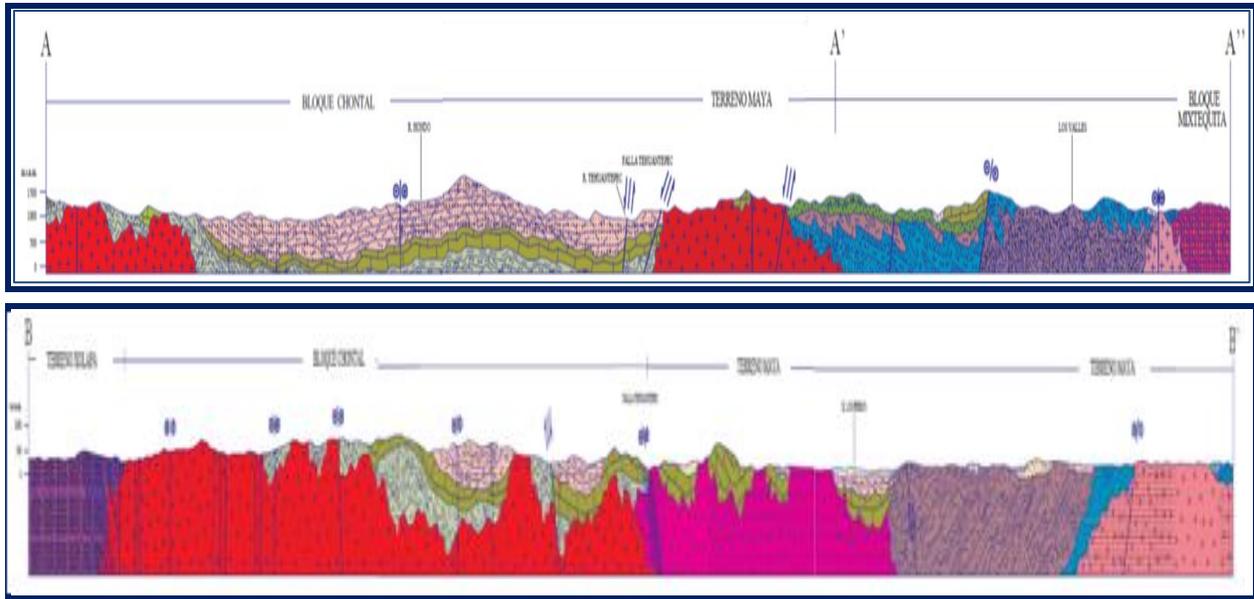
La porción inferior del acuífero está alojada en rocas sedimentarias y volcánicas (calizas, dolomías, areniscas, lutitas, tobas y andesitas), que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento y disolución para el caso de las calizas y dolomías.

A mayor profundidad, las calizas y areniscas constituyen horizontes acuíferos que pueden presentar condiciones de semiconfinamiento o de confinamiento, debido a que su litología incluye alternancia con lutitas y limolitas.

Este es un acuífero que aún no sido explorado. Las fronteras y barreras al flujo subterráneo, así como el basamento geohidrológico del acuífero están representadas por las mismas rocas sedimentarias y volcánicas fracturadas, cuando desaparece su fracturamiento a profundidad, 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 las limolitas e la Formación Todos Santos, rocas metamórficas (esquistos y gneises), metasedimentarias, metavolcánicas y graníticas que constituyen el complejo Oaxaqueño, el Complejo Guichicovi y el Batolito de la Mixtequita.

En la figura 3 se muestran secciones geológicas esquemáticas que muestra la disposición en el subsuelo de las diferentes unidades litológicas.



Fuente: Carta Geológica-Minera E15-10 D15-1 "Juchitán" Esc. 1:50.000 (SGM, 2000)

Figura 3. Sección Geológica Esquemática

5. HIDROGEOLOGIA

5.1 Tipo de acuífero

Las evidencias geológicas, geofísicas e hidrogeológicas permiten definir la presencia de un acuífero **tipo libre**, heterogéneo y anisotrópico, tanto en sentido vertical como horizontal, constituido en su porción superior, por sedimentos aluviales de granulometría variada y espesor reducido, así como conglomerados polimícticos y areniscas.

Este es el acuífero que actualmente se explota en los valles y en la planicie de inundación de los ríos Jaltepec y Blanco, principalmente mediante norias perforadas manualmente destinadas a satisfacer las necesidades del uso doméstico-abrevadero. Las secuencias calcáreas y terrígenas que se encuentran a mayor profundidad representan una fuente potencial de agua subterránea que aún no ha sido explorada en la región.

Debido a la alternancia de secuencias impermeables y permeables, los escurrimientos fluyen de manera rápida sin permitir su infiltración en las primeras y se infiltran en las unidades permeables.

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

Es común la existencia de pequeños manantiales o “lloraderos” que descargan localmente la infiltración del agua de lluvia a través de las fracturas o por el contacto con rocas impermeables. La descarga natural del acuífero, se realiza a través de manantiales y por evapotranspiración en las regiones de niveles freáticos someros.

5.2 Parámetros hidráulicos

Debido a que la gran mayoría de las obras que existen en el acuífero son norias excavadas manualmente, bajos gastos de extracción manual, espesor y rendimiento reducidos, no fue posible la realización de pruebas de bombeo. Como alternativa se realizaron 10 pruebas “slug” mediante el vertido de agua.

De la interpretación de estas pruebas se obtuvieron valores de conductividad hidráulica de **1.2×10^{-5} a 1.15×10^{-3} m/s** (1 a 100 m/d). Si consideramos un espesor promedio saturado de 10 m, se obtienen valores de transmisividad que varían de **0.12 a 11.5×10^{-3} m²/s**.

5.3 Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, únicamente se cuenta con información piezométrica de algunos aprovechamientos que fue posible censar durante el estudio realizado en el año 2010, los cuales presentan niveles freáticos someros, menores a 10 m de profundidad y se encuentran alojados en la zona superficial o de alteración de las rocas, con poca extensión y continuidad hidrogeológica.

5.4 Comportamiento hidráulico

No se cuenta con información piezométrica histórica que permita elaborar las configuraciones de profundidad, elevación y evolución del nivel estático. Las escasas mediciones piezométricas recabadas durante los recorridos de campo se encuentran dispersas en tiempo y espacio. Además, debido a la extensión superficial, existen pequeños valles intermontanos esparcidos en toda la superficie del acuífero, en los que se extrae de manera incipiente el agua subterránea de los niveles freáticos someros. Debido al escaso número de aprovechamientos existentes en el área que cubre el acuífero y al incipiente volumen de extracción, se puede afirmar que las variaciones en el nivel del agua subterránea no han sufrido alteraciones importantes en el transcurso del tiempo, por lo que el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo.

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en el año 2010, se tomaron 21 muestras de agua subterránea en diferentes aprovechamientos distribuidos en la zona de explotación (manantiales, norias, pozos y galerías filtrantes), para su análisis fisicoquímico correspondiente.

Las determinaciones incluyeron parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos, iones mayoritarios, temperatura, conductividad eléctrica, pH, Eh, nitratos, dureza total, sólidos totales disueltos, Fe, Mn, As, fosfatos y fluoruros coliformes fecales y totales, etc, para identificar los procesos geoquímicos o de contaminación y comprender el modelo de funcionamiento hidrodinámico del acuífero (tabla 2).

De manera general, las concentraciones de los diferentes iones no sobrepasan los límites máximos permisibles que establece la Norma Oficial Mexicana, para los diferentes usos; salvo para el caso de algunos elementos traza, como es el caso de la zona de La Mixtequita y la región sureste-suroeste de Matías Romero donde se rebasa ligeramente los límites de Fluoruro. Existen también altas concentraciones de Fe y Mn en algunos aprovechamientos de Santiago Ixtaltepec.

La concentración de sólidos totales disueltos (STD) presenta valores que varían de 91 a 813 ppm, que no sobrepasan el límite máximo permisible de 1000 ppm establecido la NOM-127-SSA1-2021 “Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua”, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 2 de mayo del 2022. de STD.

Con respecto a las concentraciones de elementos mayores por ión dominante, se puede determinar que las familias de agua predominantes son la bicarbonatada-cálcica y bicarbonatada-cálcica/magnésica; en menor proporción se presenta la familia bicarbonatada-sódica.

Las primeras familias se ubican en la zona de La Mixtequita caracterizada por rocas graníticas y un flujo de agua proveniente de Matías Romero donde predominan conglomerados y rocas meta-sedimentarias. En todos los casos, debido a que el ión dominante es el bicarbonato, se puede aseverar que se trata de agua de reciente infiltración con tiempos muy cortos de residencia, que han circulado a través de rocas carbonatadas, ya sea de calcio (calizas) o magnesio (dolomías).

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 (C_1) a media (C_2), y contenido bajo de sodio intercambiable (S_1). La muestra con clave (CNA 13-06) presentó un índice RAS de C_3S_1 (alta salinidad y bajo contenido de sodio), lo que indica que sólo es apropiada para el riego de cultivos tolerantes a la salinidad y necesario el lavado del suelo.

Tabla 2. Resultados de las determinaciones principales de los análisis químicos

MUESTRA	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	STD	Dza-tot	CE
No.	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	uS/cm
CNA13-01	8.57	1.01	31.24	17.25	226.77	12.93	82.00	0.15	155.00	149.0	220.0
CNA13-02	24.91	0.83	40.05	19.19	264.57	13.20	65.00	0.92	249.00	179.0	280.0
CNA13-03	7.01	0.55	46.46	19.19	343.82	27.07	92.00	1.82	325.00	195.0	410.0
CNA13-04	6.36	0.55	68.08	10.93	247.50	28.27	8.00	1.77	365.00	215.0	390.0
CNA13-05	7.99	2.47	28.03	5.34	124.36	11.07	1.00	0.36	139.00	92.0	185.0
CNA13-06	103.21	2.40	61.27	19.44	547.43	24.53	146.00	0.02	813.00	233.0	870.0
CNA13-07	18.23	7.60	43.25	10.93	196.29	28.00	16.00	0.52	245.00	153.0	306.0
CNA13-08	3.61	3.17	15.22	8.75	71.93	8.93	1.00	0.12	91.00	74.0	150.0
CNA13-09	7.40	0.59	48.86	15.79	224.34	8.53	1.00	0.32	181.00	187.0	205.0
CNA13-10	5.39	1.02	74.09	1.46	298.71	9.54	1.00	0.16	293.00	191.0	303.0
CNA13-11	20.46	0.59	17.62	5.34	120.70	6.00	15.00	1.25	139.00	66.0	180.0
CNA13-12	15.56	0.86	56.47	14.09	330.41	20.80	13.00	1.16	407.00	199.0	521.0
CNA13-13	28.13	3.52	59.67	20.89	275.54	26.93	30.00	1.78	323.00	235.0	325.0
CNA13-14	27.07	0.67	20.02	8.75	84.13	13.87	21.00	0.52	173.00	86.0	180.0
CNA13-15	29.00	0.25	54.06	51.99	495.00	21.87	43.00	1.43	529.00	349.0	630.0
CNA13-16	9.40	0.63	52.86	16.28	241.40	8.93	7.00	0.81	211.00	199.0	250.0
CNA13-17	21.20	1.34	81.70	25.51	340.16	116.32	8.00	0.71	519.00	309.0	610.0
CNA13-18	24.64	8.65	41.65	21.62	265.79	20.13	1.00	0.99	297.00	193.0	330.0
CNA13-20	43.95	1.06	56.07	10.45	330.41	6.67	31.00	1.28	309.00	183.0	410.0
CNA13-21	21.66	0.30	40.85	11.42	138.99	32.42	26.00	1.64	233.00	149.0	245.0
Promedio	21.69	1.90	46.88	15.73	258.41	22.30	30.40	0.89	299.80	181.80	350.00
NOM-127	200.00					400.00	250.00	10.00	1000.00	500.00	

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con la información del censo de aprovechamientos realizado como parte del estudio llevado a cabo en el 2010, se registró un total de 21 aprovechamientos, de los cuales 4 son pozos, 13 son norias, 2 son manantiales y 2 son galerías filtrantes. Del total de obras, 14 están activas y 7 se consideran inactivas.

El volumen de extracción conjunto se ha estimado en **0.3 hm³ anuales**, de los cuales 0.29 hm³ (96.7%) se destinan a las necesidades del uso doméstico y los 0.01 hm³ (3.3 %) restantes para uso de servicios.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

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:

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

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:

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

7.1 Entradas

Las entradas al acuífero Coatzacoalcos están integradas básicamente por la recarga natural que se produce por la infiltración de la lluvia (Rv).

No existe información piezométrica actual ni histórica en la superficie que cubre el acuífero. La escasa información disponible, procedente de recorridos de campo hechos por la Dirección Local, se encuentra dispersa en tiempo y espacio, es puntual e inconsistente de tal manera que no es posible extrapolarla para elaborar configuraciones del nivel estático que permitan el planteamiento de un balance de aguas subterráneas.

Aunado a esto, existen pocos aprovechamientos de agua subterránea y se presentaron diferentes problemas para la medición de sus niveles; la superficie del acuífero está conformada en su mayor parte por sierras bajas entre las cuales existen pequeños valles que contienen acumulaciones de granulometría variada donde se localizan los escasos aprovechamientos.

Por todas estas razones, se optó por plantear el balance hidrometeorológico en la superficie completa del acuífero de 9,651 km², para estimar el volumen de agua susceptible de infiltrarse para recargar al acuífero.

7.1.1 Recarga vertical (Rv)

La recarga vertical total que recibe el acuífero (volumen susceptible de infiltrarse) se obtuvo mediante el planteamiento de un balance hidrometeorológico para toda la superficie del acuífero, mediante la siguiente expresión:

$$V_{LL} = V_{ETR} + V_{ESC} + V_{INF} \quad (1)$$

V_{LL}= Volumen de lluvia;

V_{ETR}= Volumen evapotranspirado;

V_{ESC}= Volumen escurrido;

V_{INF}= Volumen infiltrado;

Por lo tanto despejando el volumen infiltrado, se obtiene lo siguiente:

$$V_{INF} = V_{LL} - V_{ETR} - V_{ESC} \quad (2)$$

El volumen de lluvia que se precipita en la superficie cubierta por el acuífero se obtiene al multiplicar su área (9,651 km²) por la lámina de precipitación media anual (2600 mm):

$$V_{LL} = 9,651 \text{ km}^2 (2.6 \text{ m}) = \mathbf{25,092.6 \text{ hm}^3 \text{ anuales}}$$

Para la estimación de la evapotranspiración real se utilizó la ecuación empírica de Turc, considerando el valor promedio anual de precipitación que es de 2600 mm y temperatura de 24.9°C. Turc a partir de observaciones realizadas en 254 cuencas distribuidas por todos los climas del mundo, define la expresión siguiente para la estimación de la evapotranspiración real:

Donde:

ETR= Evapotranspiración real, en mm;

P= Precipitación media anual, en mm;

L= 300 + 25T + 0.05T³;

T= Temperatura media anual, en °C;

$$ETR = \frac{P}{\left[0.9 + \left(\frac{P^2}{L^2}\right)\right]^{\frac{1}{2}}}$$

La limitación teórica para la utilización de la fórmula de Turc es que la precipitación no debe ser menor a la relación 0.31L. En caso contrario se obtiene una ETR > P y para estos casos se debe considerar a ETR = P. De acuerdo con lo anterior, se obtiene un valor de lámina de evapotranspiración es de 1441.2 mm anuales.

$ETR(mm) = \frac{P(mm)}{\sqrt{0.90 + \left(\frac{P^2(mm)}{L^2}\right)}}$		$L = 300 + 25T + 0.05T^3$
T (°C) =	24.9	
P(mm) =	2600	P ² = 6760000
L =	1694.41245	L ² = 2871033.55
ETR (mm)	1441.2	

Por lo tanto, el volumen de la ETR es:

$$V_{ETR} = 9,651 \text{ km}^2 (1.4412 \text{ m}) = \mathbf{13,909.0 \text{ hm}^3 \text{ anuales}}$$

Para determinar el volumen de escurrimiento debido a la lluvia se utilizó el método establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000, publicada en el Diario Oficial de la Federación, de fecha 17 de abril de 2002, en la que se señala que para los casos en los que no se cuente con suficiente información para determinar el volumen anual de escurrimiento natural, se puede aplicar el método indirecto denominado precipitación-escurrimiento.

El volumen anual medio de escurrimiento natural es igual a la precipitación media anual por el área y por un coeficiente de escurrimiento.

Para determinar el valor de escurrimiento, la normatividad establece la siguiente relación:

$$\text{VOLUMEN ANUAL DE ESCURRIMIENTO NATURAL DE LA CUENCA} = \text{PRECIPITACION ANUAL DE LA CUENCA} * \text{AREA DE LA CUENCA} * \text{COEFICIENTE DE ESCURRIMIENTO}$$

El coeficiente de escurrimiento (Ce) se puede determinar, según la norma antes citada, en función del parámetro K que depende del tipo y uso de suelo, de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS).

Con apoyo de cartografía del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática y de visitas de campo se clasifican los suelos de la cuenca en estudio, de acuerdo con los tres diferentes tipos:

A (suelos permeables), B (suelos medianamente permeables) y C (suelos casi impermeables), que se especifican en la tabla 2 y se determina el uso actual del suelo.

En el caso de que en la cuenca en estudio existan diferentes tipos y usos de suelo, el valor de K se calcula como la resultante de subdividir la cuenca en zonas homogéneas para obtener el promedio ponderado.

Tabla 2. Valores de k en función del tipo y uso del suelo

USO DE SUELO	TIPO DE SUELO	TIPO DE SUELO	TIPO DE SUELO
	A	B	C
Barbecho, áreas incultas y desnudas	0.26	0.28	0.3
Cultivos:			
En hilera:	0.24	0.27	0.3
Legumbres o rotación de pradera	0.24	0.27	0.3
Granos pequeños	0.24	0.27	0.3
Pastizal:			
% del suelo cubierto o pastoreo			
Más del 75% -poco-	0.14	0.2	0.28
Del 50 al 75% -regular-	0.2	0.24	0.3
Menos del 50% -excesivo-	0.24	0.28	0.3
Bosque:			
Cubierto más del 75%	0.07	0.16	0.24
Cubierto del 50 al 75%	0.12	0.22	0.26
Cubierto del 25 al 50%	0.17	0.26	0.28
Cubierto menos del 25%	0.22	0.28	0.3
Zonas urbanas	0.26	0.29	0.32
Caminos	0.27	0.3	0.33
Pradera permanente	0.18	0.24	0.3
TIPO DE SUELO	CARACTERÍSTICAS		
A	Suelos permeables, tales como arenas profundas y loes poco compactos		
B	Suelos medianamente permeables, tales como arenas de mediana profundidad; loes algo más compactos que los correspondientes a los suelos Tipo A; terrenos migajosos		
C	Suelos casi impermeables, tales como arenas o loes muy delgados sobre una capa impermeable, o bien arcillas		

Dependiendo del valor obtenido para K, el coeficiente de escurrimiento (Ce) se calcula mediante las fórmulas siguientes, en la que P es la precipitación media anual expresada en mm:

Si K resulta menor o igual que 0.15, $C_e = K (P-250) / 2000$;

Si K es mayor que 0.15, $C_e = K (P-250) / 2000 + (K - 0.15) / 1.5$;

Donde:

P= Precipitación anual;

C_e = Coeficiente de escurrimiento anual;

K = Parámetro que depende del tipo, uso y cubierta del suelo;

De acuerdo con la cartografía de CONABIO escala 1:1000,000 para el tipo de suelo, predominan los tipos acrisol y regosol. En cuanto al uso de suelo de acuerdo con la cartografía de INEGI escala 1:1,000,000, el 53.9 % de la superficie del acuífero está cubierta por selva en la que el suelo es tipo C, cubierta más del 75%, por lo que $K=0.24$; 23.3% del acuífero presenta bosques, suelo tipo C, con cobertura menor del 50% al 75%, por lo que $K=0.26$; el pastizal se presenta en 20% de la superficie del acuífero, suelo tipo C, con cobertura menor del 25%, por lo que $K=0.3$; finalmente, un 2.8 % del área del acuífero tiene otros usos menores, tipo C, por lo que $K= 0.3$.

$$K_{\text{ponderado}} = 0.24(0.539) + 0.26(0.233) + 0.3(0.20) + 0.3(0.028) = 0.2583$$

De esta manera, el valor de K se obtuvo como promedio ponderado y es igual a 0.2583, valor que se aplicó en la siguiente ecuación para obtener el coeficiente de escurrimiento (C_e):

$$C_e = K (P-250)/2000 + (K-0.15)/1.5 = 0.3757$$
$$C_e = 0.3757$$

Aplicando este coeficiente de escurrimiento al valor de la lluvia se obtiene el volumen del escurrimiento: $V_{ESC} = 0.3757 (25,092.6 \text{ hm}^3) = 9,427.3 \text{ hm}^3$ anuales.

Sustituyendo valores en la ecuación (2), se obtiene lo siguiente:

$$V_{INF} = V_{LL} - V_{ETR} - V_{ESC} \quad (2)$$
$$V_{INF} = 25,092.6 - 13,909.0 - 9,427.3$$
$$V_{INF} = 1756.3 \text{ hm}^3/\text{año}$$

Al dividir el volumen promedio anual infiltrado, entre el volumen anual promedio precipitado, que es de 2,5092.6 hm³/año, se obtiene el coeficiente de infiltración de 0.07. El coeficiente de infiltración es representativo de las unidades sedimentarias del Cretácico al Reciente que afloran en las regiones topográficamente más bajas. Las sierras están constituidas básicamente por rocas metamórficas e ígneas intrusivas, que al igual que las secuencias de limolitas y areniscas y lutitas-areniscas, se consideran de baja permeabilidad, lo que permite el escurrimiento del agua de lluvia, que ya fue evaluado mediante el coeficiente de escurrimiento.

Por lo anterior, el coeficiente de infiltración se aplicará a una superficie de 1,419 km², en la que están expuestos depósitos aluviales, areniscas y conglomerados. De esta manera, la recarga vertical por efecto de la lluvia, es: (1,419 km²) (2.6 m) (0.07) = 258.3 hm³ anuales, por lo que la **R = 258.3 hm³ anuales**. De acuerdo con la cartografía de CONABIO escala 1:1000,000 para el tipo de suelo, predominan los tipos acrisol y regosol (figura 4). En cuanto al uso de suelo (figura 5).

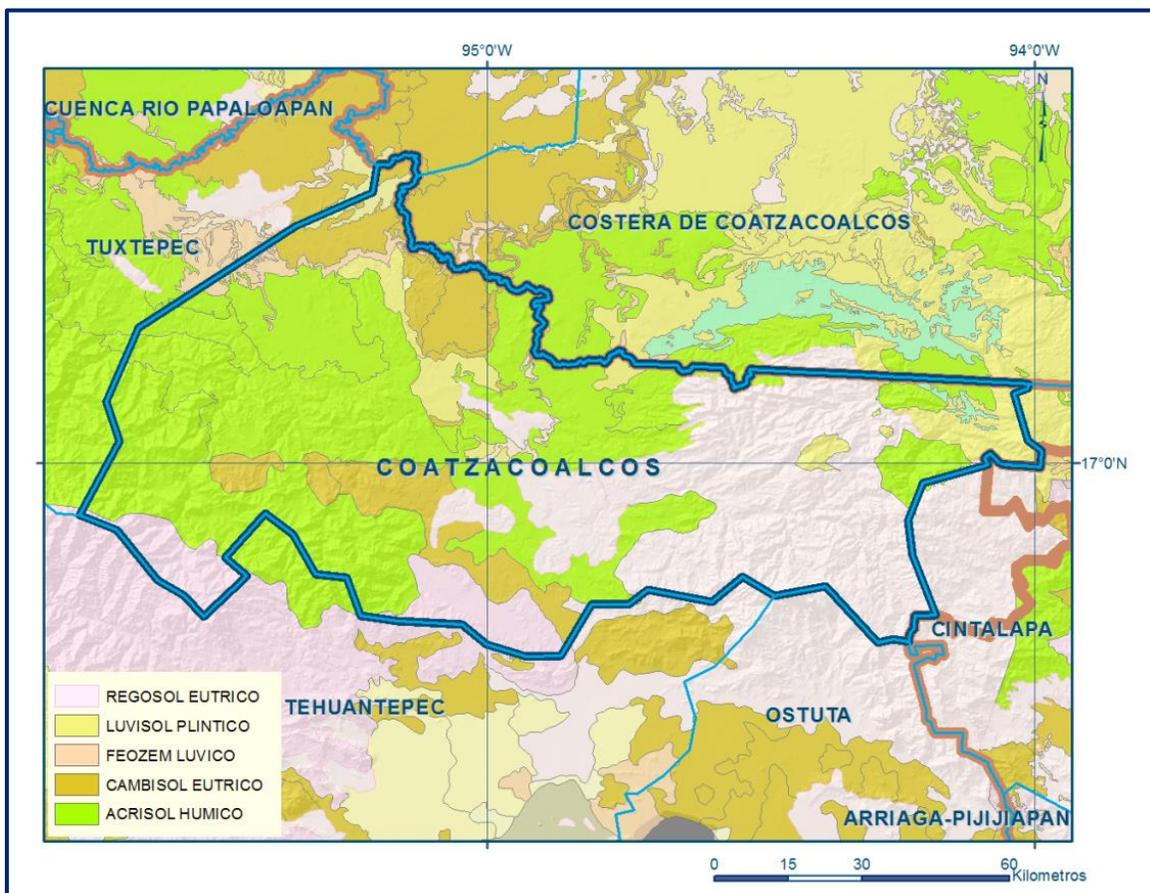


Figura 4. Tipo de suelo

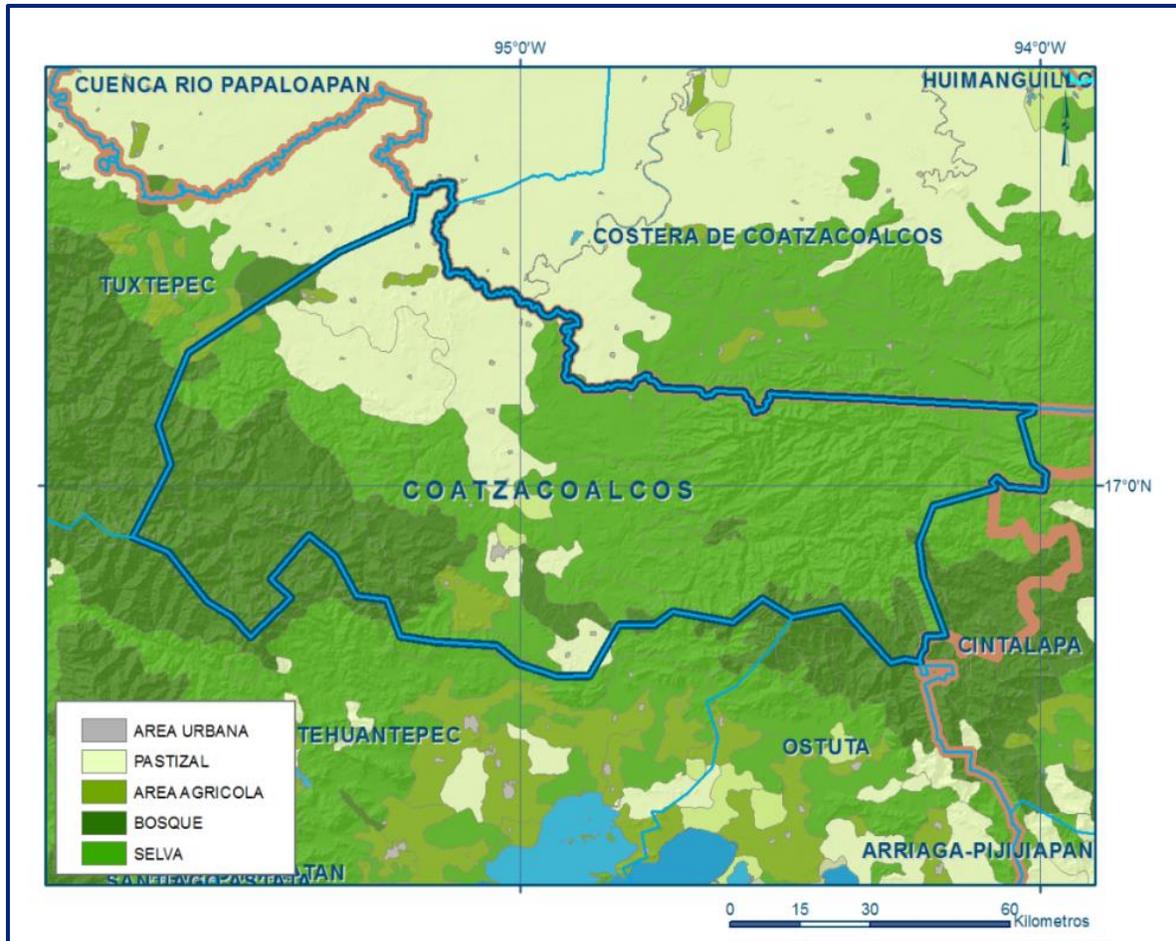


Figura 5. Uso de suelo

7.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente por bombeo (B), a través de manantiales (Dm), posiblemente a través de salidas subterráneas (Sh) pero no se cuenta información piezométrica para su estimación y evapotranspiración de niveles freáticos someros (ETR).

7.2.1 Extracción por Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo calculado es de **0.3 hm³/año**.

7.2.2 Descarga a través de Manantiales (Dm)

De acuerdo con el censo de aprovechamientos, únicamente se registraron dos manantiales; sin embargo, en las inmediaciones de Matías Romero se identificó la existencia de una gran cantidad de pequeños manantiales o “lloraderos”.

De acuerdo con la información de las concesiones de agua superficial procedente de manantiales (2010), en el territorio del acuífero existen 108 títulos por un volumen concesionado de **2.4 hm³ anuales**, que representan un caudal aproximado de 76 lps.

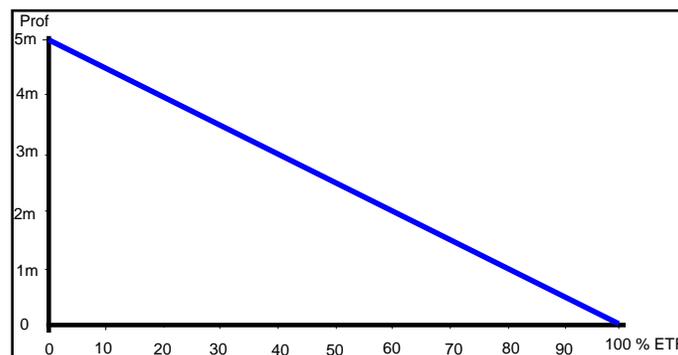
7.2.3 Evapotranspiración (ETR)

Este parámetro es la cantidad de agua transferida del suelo a la atmósfera por evaporación y transpiración de las plantas, por lo tanto se considera una forma de pérdida de humedad del sistema. Existen dos formas de evapotranspiración: la que considera el contenido de humedad en el suelo y la que considera la etapa de desarrollo de las plantas (Evapotranspiración Potencial y la Evapotranspiración Real). Para la obtención de este parámetro se utilizó la ecuación empírica de Turc, como se describió en el balance hidrometeorológico, y se obtuvo un valor de 1441.2 mm anuales.

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 evapotranspiración 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.

De esta manera, tomando en cuenta una superficie de 150 km² en la que afloran los sedimentos aluviales a lo largo del cauce de los ríos Jaltepec y Blanco, donde se localizan las norias que explotan los niveles freáticos someros, al aplicar la lámina de ETR de 1441.2 mm anuales se obtiene una ETR = 150 km² (1.4412 m) (0.4) = 86.5.

Por lo tanto la **ETR = 86.5 hm³/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:

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

Donde:

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

8.1 Recarga total media anual (R)

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

Para este caso, su valor es de **258.3 hm³/año**.

8.2 Descarga natural comprometida (DNC)

La descarga natural comprometida se determina sumando los volúmenes de agua concesionados de los manantiales y del caudal base de los ríos que está comprometido como agua superficial, alimentados por el acuífero, más las descargas que se deben conservar para no afectar a los acuíferos adyacentes; sostener el gasto ecológico y prevenir la migración de agua de mala calidad hacia el acuífero. Para este caso, su valor es de **DNC = 63.0 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 **16,145,009 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022**.

8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)

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

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

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= \text{R} - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 258.3 - 63.0 - 16.145009 \\ \text{DMA} &= 179.154991 \text{ hm}^3/\text{año.} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **179,154,991 m³ anuales.**

9. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua, 2010. 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 BESTCO, S.A. de C.V.