

***Actualización de la disponibilidad media anual  
de agua en el acuífero Ocampo-Antiguo Morelos  
(2812), Estado de Tamaulipas***

*Publicada en el Diario Oficial de la Federación  
20 de abril de 2015*

## Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea

Publicada en el diario oficial de la federación el 20 de Abril de 2015

El artículo 22 segundo párrafo de la Ley de Aguas Nacionales (LAN), señala que para el otorgamiento de una concesión o asignación, debe tomarse en cuenta la disponibilidad media anual del agua, que se revisará al menos cada tres años; sujetándose a lo dispuesto por la LAN y su reglamento.

Del resultado de estudios técnicos recientes, se concluyó que existe una modificación en la disponibilidad de agua subterránea, debido a cambios en el régimen natural de recarga, volumen concesionado y/o descarga natural comprometida; por lo que se ha modificado el valor de la disponibilidad media anual de agua.

La actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea publicada en este documento corresponde a una fecha de corte en el **Registro Público de Derechos de Agua al 30 de junio de 2014.**

CLAVE	ACUÍFERO	R	DNCOM	VCAS	VEXTET	DAS	DÉFICIT
		CIFRAS EN MILLONES DE METROS CÚBICOS ANUALES					
ESTADO DE TAMAULIPAS							
2812	OCAMPO-ANTIGUO MORELOS	40.0	8.9	16.960235	8.2	14.139765	0.000000

R: recarga media anual; DNCOM: descarga natural comprometida; VCAS: volumen concesionado de agua subterránea; VEXTET: volumen de extracción de agua subterránea consignado en estudios técnicos; DAS: disponibilidad media anual de agua subterránea. Las definiciones de estos términos son las contenidas en los numerales “3” y “4” de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015.



**Comisión Nacional del Agua**  
**Subdirección General Técnica**  
**Gerencia de Aguas Subterráneas**  
**Subgerencia de Evaluación y**  
**Ordenamiento de Acuíferos**

***DETERMINACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA EN  
EL ACUÍFERO OCAMPO-ANTIGUO MORELOS (2812),  
ESTADO DE TAMAULIPAS***

**México D.F., Abril de 2011**

## CONTENIDO

1.	GENERALIDADES .....	1
	Antecedentes .....	1
1.1.	Localización .....	1
1.2.	Situación administrativa del acuífero .....	4
2.	ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD .....	4
3.	FISIOGRAFÍA .....	5
3.1.	Provincia fisiográfica .....	5
3.2.	Clima .....	6
3.3.	Hidrografía .....	7
3.4.	Geomorfología .....	7
4.	GEOLOGÍA .....	8
4.1.	Estratigrafía .....	9
4.2.	Geología estructural .....	13
4.3.	Geología del subsuelo .....	13
5.	HIDROGEOLOGÍA .....	14
5.1.	Tipo de acuífero .....	14
5.2.	Parámetros hidráulicos .....	14
5.3.	Piezometría .....	14
5.4.	Comportamiento hidráulico .....	14
5.4.1.	Profundidad al nivel estático .....	15
5.4.2.	Elevación del nivel estático .....	16
5.4.3.	Evolución del nivel estático .....	18
5.5.	Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea .....	20
6.	CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA .....	21
7.	BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS .....	21
7.1.	Entradas .....	22
7.1.1.	Recarga vertical (Rv) .....	22
7.1.2.	Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh) .....	23
7.1.3.	Retornos de riego (Rr) .....	24
7.2.	Salidas .....	25
7.2.1.	Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh) .....	25
7.2.2.	Evapotranspiración (ETR) .....	25
7.2.3.	Bombeo (B) .....	28
7.3.	Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$ .....	28
8.	DISPONIBILIDAD .....	29
8.1.	Recarga total media anual (Rt) .....	29
8.2.	Descarga natural comprometida (DNCOM) .....	30
8.3.	Volumen concesionado de aguas subterráneas (VCAS) .....	30
8.4.	Disponibilidad de aguas subterráneas (DAS) .....	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-2000 “Norma Oficial Mexicana que establece el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales”. Esta norma ha sido preparada por un grupo de especialistas de la iniciativa privada, instituciones académicas, asociaciones de profesionales, gobiernos estatales y municipales y de la CONAGUA.

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

Los resultados técnicos que se publiquen deberán estar respaldados por un documento en el que se sintetice la información, se especifique claramente el balance de aguas subterráneas y la disponibilidad de agua subterránea susceptible de concesionar.

La publicación de la disponibilidad servirá de sustento legal para la autorización de nuevos aprovechamientos de agua subterránea, transparentar la administración del recurso, planes de desarrollo de nuevas fuentes de abastecimiento, resolver los casos de sobreexplotación de acuíferos y la resolución de conflictos entre usuarios.

### **1.1. Localización**

El acuífero Ocampo-Antiguo Morelos, definido con la clave 2812 en el Sistema de Información Geográfica para el Manejo de Agua Subterránea (SIGMAS) de la CONAGUA, se ubica en la porción suroriental del estado de Tamaulipas, entre los paralelos 22°22' y 23°15' de Latitud Norte y los meridianos 98°53' y 99°35' de Longitud Oeste, abarcando una superficie de 2,798 km<sup>2</sup>.

Limita al norte con el acuífero Palmillas-Jaumave, al este con el acuífero Llera-Xicoténcatl, al sur con los acuíferos Huasteca-Potosina y Tamuín, ambos pertenecientes al estado de San Luis Potosí, y al oeste con el acuífero Tula-Bustamante (figura 1).

Geopolíticamente se encuentra ubicado casi en su totalidad dentro de los municipios de Ocampo y Antigua Morelos, así como pequeñas porciones de los municipios de Gómez Farías, Tula, El Mante y Llera.

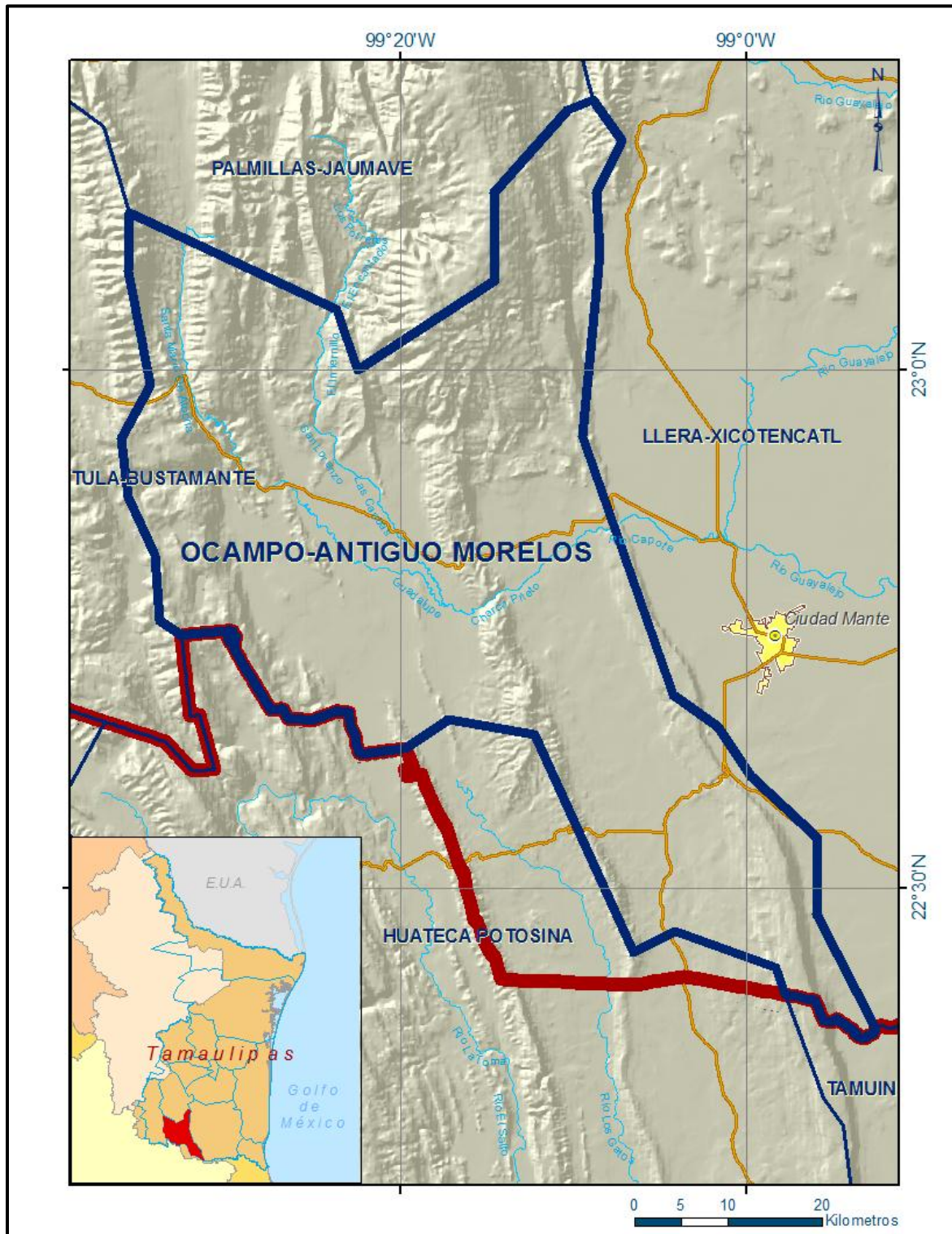


Figura 1. Localización del acuífero

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

Tabla 1. Coordenadas de la poligonal simplificada del acuífero

ACUÍFERO 2812 OCAMPO-ANTIGUO MORELOS							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRA	MIN	SEG	GRA	MIN	SEG	
1	98	52	32.5	22	21	50.1	DEL 1 AL 2 POR EL LIMITE ESTATAL
2	98	57	48.1	22	23	49.4	
3	98	58	19.2	22	25	25.5	
4	99	4	8.3	22	27	30.2	
5	99	6	32.5	22	26	17.4	
6	99	12	16.9	22	38	51.2	
7	99	17	17.6	22	39	45.2	
8	99	19	45.6	22	38	3.8	DEL 8 AL 9 POR ELLIMITE ESTATAL
9	99	32	43.6	22	44	36.6	
10	99	33	57.3	22	45	30.3	
11	99	34	13.5	22	49	17.5	
12	99	35	46.2	22	52	39.2	
13	99	36	11.5	22	56	1.2	
14	99	34	31.2	22	59	7.2	
15	99	35	47.8	23	5	42.5	
16	99	35	45.4	23	9	6.6	
17	99	23	44.7	23	3	31.1	
18	99	22	32.3	23	0	0.7	
19	99	14	34.2	23	5	11.4	
20	99	14	35.9	23	10	14.3	
21	99	10	21.4	23	15	0.5	
22	99	8	53.9	23	15	37.9	
23	99	7	12.3	23	13	15.9	
24	99	8	39.8	23	10	15.6	
25	99	8	30.9	23	6	47.8	
26	99	9	28.4	22	56	6.6	
27	99	4	14	22	41	11.9	
28	99	1	39	22	39	21.2	
29	98	59	44.9	22	36	25.3	
30	98	55	52.6	22	32	54.5	
31	98	55	58.1	22	28	30.7	

## 1.2. Situación administrativa del acuífero

El acuífero Ocampo-Antiguo Morelos pertenece al Organismo de Cuenca IX “Golfo Norte”. Casi la totalidad de su territorio se encuentra sujeto a las disposiciones del *“Acuerdo que establece el Distrito de Riego de Llera, Tamaulipas, y declara de utilidad pública la construcción de las obras que lo formen y la adquisición de los terrenos necesarios para alojarlas y operarlas.”* publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 21 de febrero de 1955, esta veda se clasifica como de tipo III, la cual permite extracciones limitadas para usos doméstico, industrial, de riego y otros. Sólo en una pequeña porción de su extremo suroriental no existe veda.

En su porción norte se ubica parte de la Reserva de la Biosfera “El Cielo”.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2011, los municipios de Ocampo, Antiguo Morelos, Gómez Farías, Tula, El Mante y Llera, se clasifican como zona de disponibilidad 7.

El uso principal del agua subterránea es el público-urbano. En el acuífero no existe Distrito o Unidad de Riego alguna, ni se ha constituido a la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS). El acuífero pertenece al Consejo de Cuenca Río Pánuco.

## 2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la superficie que comprende el acuífero se han realizado algunos estudios hidrogeológicos de cobertura regional. Entre los más importantes podemos mencionar los siguientes:

**ACTUALIZACIÓN DE MEDICIONES PIEZOMÉTRICAS DE LOS ACUÍFEROS DENOMINADOS: PALMILLAS-JAUMAVE Y OCAMPO-ANTIGUO MORELOS, EN EL ESTADO DE TAMAULIPAS, realizado para la Comisión Nacional del Agua por la Empresa NR MAQUINARIA, S. A. DE C. V durante el mes de septiembre de 2008.** El objetivo de este estudio fue realizar un recorrido piezométrico y nivelar los brocales de una red de pozos piloto que se definió para el monitoreo de los niveles del agua subterránea; con la información obtenida fue posible elaborar las configuraciones del nivel estático.

Incluyo actividades de campo como piezometría, nivelación de brocales y toma de muestras de agua para su análisis químico correspondiente. Entre sus conclusiones más importantes destacan que los valores de profundidad al nivel estático varían de 2 a 32 m, con los valores más profundos registrados en el extremo sureste; la dirección preferencial del flujo subterráneo es noroeste-sureste. Se definió una piezométrica y se registró la existencia de 119 aprovechamientos (30 pozos, 88 norias y 1 galería filtrante). Los valores de conductividad eléctrica variaron entre 400 y 900  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .



## **ESTUDIOS PARA DETERMINAR LA DISPONIBILIDAD DE LOS ACUÍFEROS: PALMILLAS-JAUMAVE, OCAMPO-ANTIGUO MORELOS Y SAN CARLOS EN EL ESTADO DE TAMAULIPAS.**

**Realizado en el año 2010 por la empresa Sanx Ingeniería Integral y Desarrollo S. A. de C. V.**

Este estudio tuvo como objetivo general el conocimiento de las condiciones geohidrológicas de los acuíferos mediante el diagnóstico y el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, para contar con información necesaria que permita calcular su recarga y determinar la disponibilidad media anual de agua subterránea. Mediante la realización de actividades de campo que incluyeron censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría de las extracciones, realización de pruebas de bombeo y reconocimientos geológicos, fue posible plantear el balance de aguas subterráneas para calcular la recarga total media anual.

Los resultados y conclusiones de este estudio fueron la base para la elaboración del presente documento, por lo que sus conclusiones y resultados se analizan en los apartados correspondientes.

### **3. FISIOGRAFÍA**

#### **3.1. Provincia fisiográfica**

De acuerdo con la clasificación de Provincias Fisiográficas de Erwin Raisz (1964) y de INEGI (1997), la superficie cubierta por el acuífero se localiza en la Provincia Fisiográfica Sierra Madre Oriental, Subprovincias Gran Sierra Plegada y Sierras y Llanuras Occidentales. La mayor parte del acuífero se encuentra en la subprovincia La Gran Sierra Plegada.

La Sierra Madre Oriental, corre en sentido paralelo a la Costa del Golfo de México desde la frontera norte del país hasta sus límites con el Eje Neovolcánico. A la altura de Monterrey, N. L. una de sus ramas tuerce abruptamente al oeste para extenderse hasta la Sierra Madre Occidental; la otra continúa hacia el norte para terminar en la región de Big Bend, Texas. Está integrada principalmente por sedimentos calcáreos del Cretácico y Jurásico (principalmente calizas, lutitas y areniscas) que se encuentran plegados, formando valles estructurales (Manuel Álvarez Jr.) en los sinclinales y serranías en los anticlinales cuando las formaciones son resistentes a la erosión, pero cuando estos últimos dejan al descubierto un núcleo constituido por rocas menos resistentes, entonces se forman valles en su centro. Debido a la intensidad de los plegamientos, la topografía es sumamente accidentada, ofreciendo perfiles típicamente aserrados

La Subprovincia Gran Sierra Plegada presenta sistemas de topoformas que se designan como sierra pliegue y sierra compleja, pero también se encuentran bajadas, lomeríos, mesetas, llanuras y valles. En esta subprovincia existe gran diversidad de vegetación, que depende en gran medida de las variaciones climáticas que imperan en esta sierra.

La Subprovincia Sierras y Llanuras Occidentales se localiza al oeste de la Gran Sierra Plegada y en ella predominan las sierras constituidas principalmente por calizas, orientadas en sentido norte-sur, y enlazadas entre sí por brazos cerriles que siguen ese mismo sentido o de forma oblicua. Los sistemas de topoformas que se encuentran en la porción tamaulipeca de esta subprovincia son: en el norte, las sierras complejas, y las bajadas -aunque hay pequeñas llanuras y valles-; en el sur, las llanuras de diferentes tipos.

Hacia las partes topográficamente bajas se presentan lomeríos de formas suaves, sobre los flancos de las sierras de Tamalave y Cucharas, que constituyen pies de monte y abanicos aluviales. El valle corresponde por lo general a una estructura sinclinal con dirección similar a las sierras mencionadas.

### **3.2. Clima**

De acuerdo con la clasificación de Köppen, modificada por E. García para nuestro país, se determina que en la región del acuífero Ocampo-Antiguo Morelos, prevalecen los grupos de climas templados, cálidos y semicálidos.

En la franja central del acuífero prevalece el tipo de clima cálido subhúmedo (Aw2) y semicálido húmedo (A)C(m), los cuales presentan temperaturas medias anuales de 22 y 18°C, respectivamente. Sin embargo, pequeñas zonas al norte, presentan variantes de estos tipos de climas, como son el (A)C(w2), el C(w2) y el C(m), que corresponden a climas semicálido subhúmedo, templado subhúmedo y templado húmedo, respectivamente, con temperaturas medias de 18°C para el primero y entre 12 y 18°C para los demás.

Para la determinación de las variables climatológicas se cuenta con información de 2 estaciones climatológicas que tienen influencia en el área del acuífero: La Boquilla (zona Ocampo) y El Oyul (zona Antiguo Morelos), cuyo registro comprende el periodo 1960-2077 y 1970-2007, respectivamente. Con estos datos y utilizando el método de los Polígonos de Thiessen, se determinaron valores de precipitación y temperatura media anual de **1280.4 mm** y **21.3 °C** respectivamente, para la zona de Ocampo y de **982.7 mm** y **24.4 °C** respectivamente, para la zona de Antiguo Morelos. De igual manera, con respecto a la evaporación potencial, se obtuvo un valor general de toda la zona de **1674.8 mm anuales**.

El régimen pluvial presenta, en términos generales, dos periodos de ocurrencia, uno de mayo a octubre, cuando se registran los valores más altos, y otro de octubre a noviembre, con precipitaciones menos significativas. En el mes de septiembre se presentan los valores más altos de precipitación y en abril se registra la lámina más baja. En cuanto a la distribución mensual de la temperatura media, mayo es el mes más cálido; en tanto que los meses de enero y febrero registran la menor temperatura media.

### **3.3. Hidrografía**

El acuífero pertenece a Región Hidrológica No. 26 “Río Pánuco” dentro de las cuencas B, Río Tamesí subcuenca Río Comandante y Cuenca Río Tamuín subcuenca del Río de los Naranjos.

La Cuenca del Río Tamesí tiene una superficie de 15,256.5 km<sup>2</sup> y se encuentra delimitada al norte por la cuenca hidrológica del Río Soto-La Marina, al este por la cuenca hidrológica Laguna de San Andrés-Laguna Morales, al sur por las cuencas Río Tamuín y Río Panuco en el estado de Veracruz, al oeste con la cuenca Sierra Madre. Sus principales afluentes son los ríos Pánuco, Tamesí, Guayalejo, Chihue, Comandante, Jaumave, Cojo y San Vicente; los arroyos más importantes son los denominados Las Ánimas y Las Maravillas. Las principales corrientes se originan en el estado de Tamaulipas y son los afluentes más importantes del Río Pánuco. Gran parte de su recorrido lo realizan con el nombre de Río Guayalejo, drenado con un rumbo dominante noroeste-sureste. El Río Guayalejo nace al norte de Miquihuana a una elevación de 3,400 msnm, en esta zona se le conoce como río Alamar; sin embargo, al recibir las aguas del arroyo Maravillas cambia su nombre por el Río Chihue, hasta llegar a la confluencia del Río Jaumave, donde ya se le denomina como Río Guayalejo.

El valle es atravesado por el río Guayalejo, el cual procede del norte y atraviesa el valle en dirección oeste-este; a la altura de Jaumave cambia de dirección hacia el este y cruza la sierra, llegando a la planicie costera a la altura de Llera, para después continuar su recorrido hasta su desembocadura en el Golfo de México.

En la zona no existen estaciones hidrométricas ni tampoco infraestructura hidráulica para el almacenamiento y control de las corrientes superficiales. La red de drenaje presenta un patrón dendrítico.

### **3.4. Geomorfología**

De acuerdo a los rasgos geomorfológicos presentes en el acuífero se identifican los valles de Ocampo y Antiguo Morelos, las sierras calcáreas pertenecientes a la Sierra Madre Oriental y la Planicie Costera del Golfo de México en el extremo oriental.

En la zona dominada por el acuífero, se presentan varias Sierras, de importancia. Hacia el noroeste se encuentra la Sierra Mocha que presenta elevaciones de entre 1000 a 2700 msnm. Hacia la parte central, en la zona de valle, se localizan tres sierras: La Argentina, Mezquitillos y Sierrita de Canoas, con elevaciones que van de 100 a 1000 msnm.

La sierra más grande, que cruza el acuífero es la Sierra Talamave, donde se encuentra la Reserva de la Biósfera “El Cielo”, y al este en los límites con el acuífero Llera-Xicoténcatl, se encuentra la Sierra

Cucharas que se extiende de norte a sur, pero también en algunas zonas es de este a oeste. Estas dos sierras, presentan sus elevaciones de 100 a 1000 msnm y en algunas partes alcanza hasta 2000 msnm.

En general, en los valles donde se realiza la extracción del agua subterránea, presenta elevaciones que varían de 100 a 500 msnm.

#### **4. GEOLOGÍA**

De manera general la zona donde se encuentra el acuífero queda comprendida en los terrenos tectonoestratigráficos denominados Terreno Sierra Madre y Terreno Coahuila. Además parte de esta zona se ubica en el límite oriente de la unidad paleogeográfica del Mesozoico llamada Plataforma Valles-San Luis Potosí (Carrillo Bravo, 1971) (Carta Geológica-Minera “Ciudad Mante” F14-5, Escala: 1:250,000, SGM, 1999).

Con la invasión de los mares del Jurásico Superior, sobre gran parte del Noreste de México; se comienzan a definir los elementos paleogeográficos que actuaron durante el mesozoico y controlaban la sedimentación y las deformaciones tectónicas posteriores.

Entre los principales elementos paleogeográficos que actuaron durante el Mesozoico, se encuentran el Geosinclinal Mexicano, la Plataforma San Luis-Valles, la Península o Isla de Coahuila, la Península o Archipiélago de Tamaulipas y el Antiguo Golfo de México.

A fines del Jurásico la zona quedó restringida a un archipiélago de islas y al inicio del Cretácico a una vasta y alargada plataforma sumergida (Humphrey 1958). Durante la primera parte del Cretácico Inferior (Neocomiano Aptiano), ocurrieron depósitos de mar abierto en el antiguo golfo de México, produciéndose la sedimentación de calizas de grano fino y de estratificación gruesa de la Formación el Abra en el Aptiano superior. El norte del país estuvo sometido a movimientos verticales y a un gran aporte de sedimentos arcillosos que junto con la precipitación de carbonatos constituyeron las calizas arcillosas y lutitas carbonosas de la Formación Otates.

Esta formación refleja la existencia de una cuenca de depósito más profunda dado que la velocidad de precipitación es más lenta, teniendo como resultado un espesor menor.

Al inicio del Albiano los mares neríticos se hacen más profundos ocasionando la depositación de sedimentos calcáreos, acompañado de lodos calcáreos hubo precipitación de gel de sílice que al litificarse, lo hicieron en forma de bandas y otras en forma de pequeños lentes de pedernal negro, produciéndose además una estratificación ondulante correspondiente a los sedimentos de la Formación Tamaulipas Superior y Cuesta del Cura.

En el inicio del Cretácico Superior, cambia el régimen de sedimentación en el oriente de México, con el aporte de sedimentos detríticos provenientes del occidente, en donde tenía lugar un levantamiento asociado a la actividad volcánica y plutónica.

En el Cenomaniano y Turoniano se inicia un descenso gradual de los fondos marinos, que influenciados por el aporte de sedimentos arcillosos y junto con la precipitación de sedimentos calcáreos produjeron la estratificación delgada y laminar de calizas y lutitas de la formación Agua Nueva.

En el Coniaciano-Santoniano hay incremento en la profundidad del fondo marino, con emersiones y sumersiones bien definidas, esto es evidenciado por la estratificación delgada y laminar de calizas y lutitas de la formación San Felipe, Además por la presencia de sedimentos arcillosos y arenosos del norte del país, donde los mares se retiraron hacia el Sur.

En el Campaniano-Maestrichtiano la profundidad de los mares se mantuvo sin interrumpirse y el depósito de los sedimentos arcillosos y arenosos de la formación Méndez y Velasco fue constante depositándose en una vasta área.

Las primeras manifestaciones de las deformaciones orogénicas de los inicios del cenozoico son los depósitos de tipo Flysch, asociados a los deltas progradantes del Cretácico Superior y a la Antefosa formada en el área de Chicontepec (Paleoceno), en donde se depositan grandes secuencias de terrígenos en aguas profundas. Al final del Maestrichtiano y principios del paleoceno se inicia el levantamiento de la Sierra de Cucharas y Tamalave motivado por los esfuerzos tangenciales de la Orogenia Laramide.

El período cuaternario está representado por depósitos aluviales. En la figura 2, se muestra el mapa geológico del acuífero.

#### **4.1. Estratigrafía**

La distribución de las unidades litoestratigráficas es el resultado de los eventos geológicos que definieron diferentes ambientes y medios de depósito a través del tiempo geológico. La geología regional de la zona está representada por rocas sedimentarias marinas y continentales así como ígneas extrusivas, cuyo registro estratigráfico comprende edades que varían del Cretácico al Reciente. La distribución de las diferentes unidades litológica se presenta en la figura 2. A continuación se hace una descripción de las formaciones existentes en la zona, iniciando en orden cronológico por la más antigua:

**Formación El Abra.** Con este nombre se conoce al complejo calcáreo arrecifal, de edad Albiano-Cenomaniano, que bordea la Plataforma Valles-San Luis Potosí y que se puede correlacionar con la formación arrecifal de la Faja de Oro y la Formación El Doctor.

Se considera como facies pre-arrecifal de la formación "El Abra", a un conjunto litológico constituido por rocas clásticas de talud arrecife, dolomitizadas o parcialmente dolomitizadas. Así mismo, a la zona de interdigitación de calizas de la cuenca y la Formación Cuesta del Cura, con calizas clásticas biocalcáreas, derivadas de las zonas arrecifales.

La facies arrecifal de la Formación El Abra, en general, está representada por calizas masivas de color crema amarillento y gris crema, constituidas principalmente por un conjunto de bancos arrecifales de caprínidos, separados uno de otro por calcarenitas, calcarenitas oolíticas y elásticos biógenos. El cementante entre los fósiles es generalmente de calcita espática de grano fino. Estas rocas generalmente son compactas y las únicas zonas porosas se encuentran en algunas cavidades dejadas por los fósiles. La porosidad secundaria producida por lixiviación y fracturamiento ha desarrollado un complejo sistema de grietas y cavernas.

Al centro de los anticlinales se presenta fuertemente karstificada, por lo que su rasgo geomorfológico más importante lo constituye la gran cantidad de sumideros, circulares a suavemente ovalados. Esta formación constituye las sierras de Tamalave y de Cucharas.

**Formación Cuesta del Cura.** En el área del acuífero está representada por un paquete de 200 m de espesor de calizas que se pueden dividir en tres cuerpos: el primero en la base con 10 m de espesor corresponde a un horizonte masivo de calizas de color gris y gris oscuro. El miembro intermedio tiene un espesor de 160 m y corresponde a capas delgadas y medianas de calizas de color gris oscuro y gris claro, moteadas, de estratificación ondulada con bandeamiento de pedernal oscuro y con frecuentes intercalaciones de margas laminares de color gris claro pardusco y al intemperismo rosado. La porción superior de esta formación está constituida por 30 m de capas de regular espesor de calizas grises laminares y escasos lentes de pedernal negro. Su ambiente de depósito está asociado a lares poco profundos en los que junto con la precipitación del carbonato de calcio se depositaron arenas, arcillas y sílice que formó la gran cantidad de bandas de pedernal negro.

**Formación Agua Nueva.** Está constituida por calizas arcillosas de estratificación mediana a gruesa con estructura laminar de color gris oscuro y negro que alternan con lutitas y margas laminadas de color café a gris oscuro, a veces bituminosas y carbonosas. Es común encontrar hacia la base de esta formación, capas de bentonita de color verde que sirven como horizonte índice para marcar su contacto inferior. Por su contenido faunístico, se le ha asignado una edad Cenomaniano-Turoniano y se le correlaciona con la Formación Indidura del noreste del país. Sobreyace a la Formación Cuesta del Cura y subyace a la Formación San Felipe.

**Formación San Felipe.** Esta formación fue descrita inicialmente por Jeffreys en 1910, en su localidad tipo de la rancharía de San Felipe y San Luis Potosí, ubicada a 6 km al este de Ciudad Valles, donde consiste de calizas arcillosas de colores gris claro y verde, con frecuentes intercalaciones de lutitas bentoníticas de colores verde y gris claro. Su espesor promedio es de 130 m y se correlaciona con la Formación Parras en el estado de Coahuila.

Está constituida por una alternancia de calizas y lutitas grises que presentan intercalaciones de calizas arcillosas, margas de color gris y verde, así como bentonita. En el área se encuentra sobre los flancos de las sierras. Subyace a la Formación Méndez cuyo contacto es transicional y sobreyace a la Formación Agua Nueva en forma concordante.

**Formación Méndez.** Es el nombre que Jeffreys utilizó, para describir a una serie de lutitas calcáreas de colores gris azulado 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 está representada por lutitas de fractura concoidal con aislados estratos de areniscas de grano fino color café. Su fracturamiento es típico por el intemperismo, produciéndose un intenso lajamiento y pizarrosidad, dando origen a montículos con apariencia de dunas, subyace discordantemente a los conglomerados y/o depósitos aluviales. Su espesor promedio es de 300 m y en el estado de Coahuila se correlaciona con la Formación Difunta.

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.

**Conglomerado Reynosa:** Unidad litoestratigráfica constituida por un conglomerado de cantos de caliza y rocas ígneas, bien empaçados por un cementante calcáreo. Presenta un color gris claro y son poco resistentes al intemperismo. Tiene un espesor muy variable, pero generalmente pequeño de 2 a 15 m, forma lomeríos redondeados. Su depósito se llevó a cabo por corrientes fluviales y se encuentra cubriendo discordantemente a rocas preexistentes, principalmente del Cretácico Superior.

**Rocas ígneas extrusivas.** En la porción centro-oriental y norte del acuífero se encuentran afloramientos de rocas ígneas extrusivas donde afloran una serie de materiales lávicos y piroclásticos. Están representadas por basaltos vesiculares de olivino, asociados con productos piroclásticos. Se presentan en forma de derrames lávicos de forma tabular y se asocian a la actividad volcánica que tuvo lugar al finalizar la Orogenia Laramide, por lo que se les asigna una edad Paleógeno-Neógeno.

**Aluvi3n Cuaternario.** Está representado por abanicos aluviales, terrazas y dep3sitos granulares, constituidos principalmente por arcillas y gravas, producto de la erosión de las rocas calcáreas que constituyen las sierras, que se acumularon en las partes topográficamente más bajas. Su espesor es

muy reducido en los valles, menor de 20 m, y aumenta un poco en los cauces fluviales principalmente en la porción norte del acuífero.

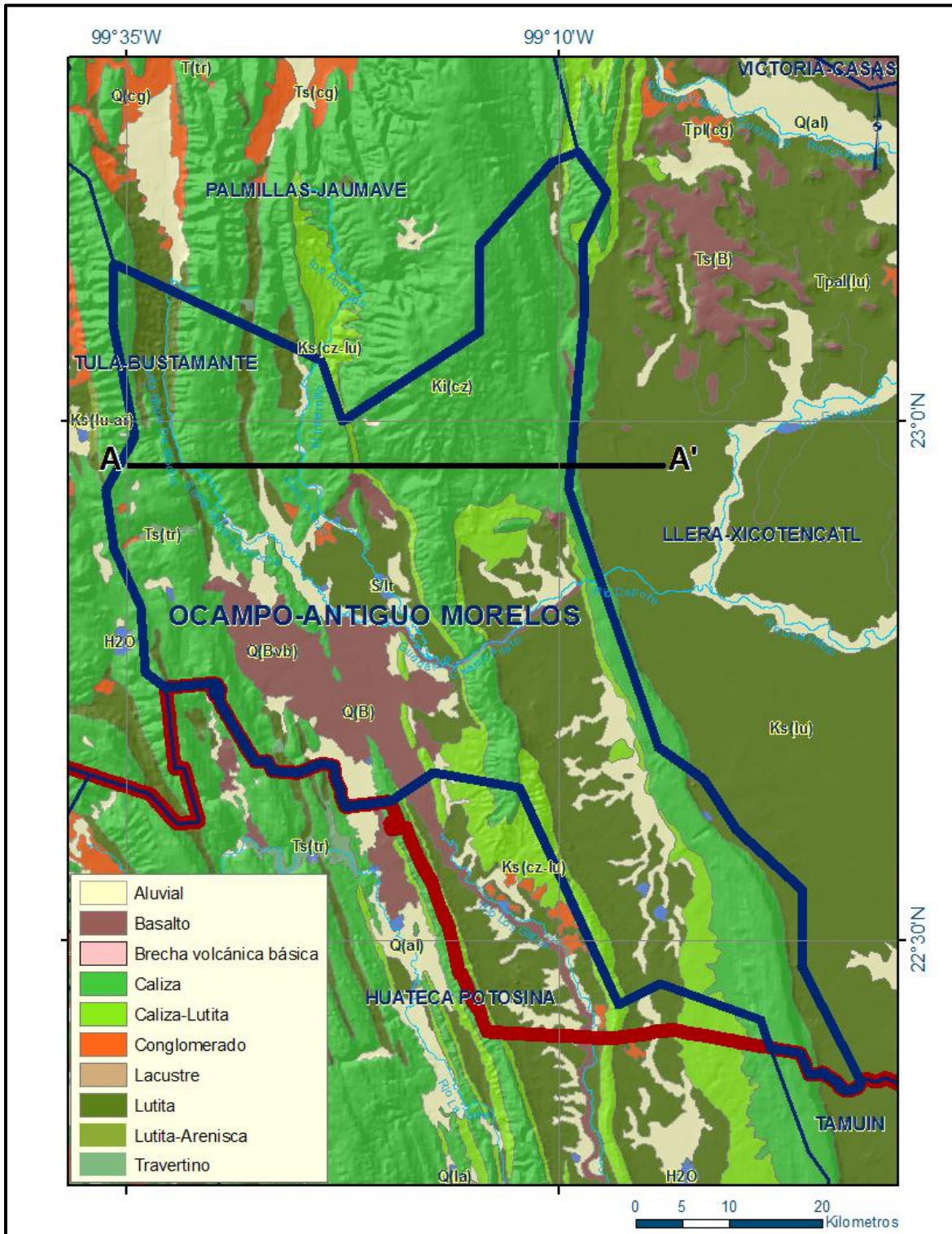


Figura 2. Geología general del acuífero



## 4.2. Geología estructural

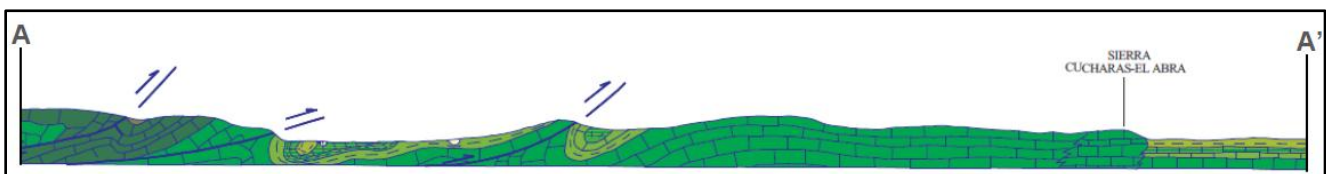
La posición, modelo y fisiografía de la Sierra de Cucharas y Tamalave, son el resultado de un desarrollo estructural sujeto a una serie de disturbios ocurridos a principios del Neógeno. Se estima que las características tectónicas de las estructuras que constituyen la zona de estudio son el reflejo de la acción de esfuerzos compresionales que produjeron un levantamiento y suave plegamiento en dirección E-W, paralelo a los ejes de las estructuras anticlinales y sinclinales. El segundo periodo de desarrollo estructural se debió a una intensa actividad ígnea, en donde la secuencia sedimentaria de edad cretácica fue intrusionada, el tercer periodo lo constituye la actividad volcánica y se considera un evento más tardío el cual se atribuye a un fenómeno de distensión.

Las rocas y estructuras mencionadas anteriormente se encuentran afectadas por fallas inversas, formadas como consecuencia de los plegamientos, se encuentran también fallas de tipo normal y fracturas que afectan las rocas anteriormente descritas. En la zona de estudio la estructura de mayor interés geohidrológico se tiene en la zona de El Refugio, correspondiente a un anticlinal emplazado en las rocas de la Formación El Abra.

## 4.3. Geología del subsuelo

De acuerdo con la información hidrogeológica y de la geología superficial recabada en el acuífero y por correlación con acuíferos vecinos, es posible definir que el acuífero se encuentra alojado, en su porción superior, en los sedimentos aluviales de granulometría variable y conglomerados, de permeabilidad baja a media, que constituyen los valles y los piedemonte. La porción inferior está conformada por los depósitos clásticos del Conglomerado Reynosa así como la secuencia de lutitas y margas de las formaciones Méndez, San Felipe y Agua Nueva, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento. Este es el acuífero que actualmente se explota, de bajo rendimiento, que generalmente proporciona caudales inferiores a 5 lps. Las calizas de las formaciones Cuesta del Cura y El Abra constituyen horizontes acuíferos profundos que no han sido explorados en la zona.

Las fronteras al flujo subterráneo y el basamento geohidrológico del acuífero están representados por las mismas rocas sedimentarias, al desaparecer el fracturamiento. En la figura 3 se presenta una sección geológica, ubicada en la porción norte del acuífero.



Fuente: Carta Geológica-Minera F14-5 "Ciudad Mante", SGM, 1999. Escala 1:250,000

Figura 3. Secciones geológicas esquemáticas

## **5. HIDROGEOLOGÍA**

### **5.1. Tipo de acuífero**

Las evidencias geológicas, geofísicas e hidrogeológicas, permiten definir la presencia de un acuífero de **tipo libre**, heterogéneo, tanto en sentido horizontal como vertical, constituido en su porción superior, por sedimentos aluviales de granulometría variada y conglomerados, producto de la erosión de las rocas que constituyen las sierras que delimitan los valles, cuyo espesor es muy reducido y presentan permeabilidad generalmente baja, los cuales están subyacentes por lutitas alteradas y fracturadas que presentan permeabilidad secundaria. Los flancos y la parte inferior del acuífero están constituidos por lutitas y calizas de diferentes facies, que les confieren permeabilidad de baja a alta, permitiendo la aparición de algunos manantiales.

Debido a la alternancia de secuencias arcillo-calcáreas es posible inferir la presencia de horizontes acuíferos confinados en las calizas cuyas áreas de recarga se localizan en las sierras limítrofes del valle. Estas unidades no han sido exploradas aún.

### **5.2. Parámetros hidráulicos**

Como parte de las actividades del estudio realizado en 2010, se realizaron 15 pruebas de bombeo de corta duración, en etapa de abatimiento y recuperación. Para su análisis e interpretación se utilizaron los métodos de Neuman, Theis y Jacob. De los resultados de su interpretación por métodos analíticos mencionados, se establece que los valores de transmisividad varían de 0.02 a 4.34 m<sup>2</sup>/s, con un valor promedio de **1.74 x 10<sup>-3</sup> m<sup>2</sup>/s** y los valores de conductividad hidráulica son del orden de **38 x 10<sup>-4</sup> m/s**.

Ninguna de las pruebas de bombeo contó con pozo de observación, por lo que no fue posible obtener valores del coeficiente de almacenamiento, pero debido al tipo de materiales que constituyen la parte superior del acuífero, se le asignó un valor de rendimiento específico de **0.01**.

### **5.3. Piezometría**

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, se cuenta con información piezométrica correspondiente a 2008 y 2010.

### **5.4. Comportamiento hidráulico**

Debido a que la posición de los niveles del agua subterránea no registró cambios significativos en el periodo 2008-2010, únicamente se describen las configuraciones correspondientes al año 2010. Para fines del planteamiento del balance se identificaron 2 zonas: Antiguo Morelos y Ocampo.

#### 5.4.1. Profundidad al nivel estático

Las configuraciones de profundidad al nivel estático para las zonas de Antiguo Morelos y Ocampo se presentan en las figuras 4 y 5, respectivamente. Para la zona Antiguo Morelos, se registran profundidades que varían de 1 a 9 m, aumentando gradualmente a lo largo del cauce de los ríos y arroyos, conforme se asciende topográficamente, la mayor parte de la zona presenta niveles someros entre 2.5 y 4 m. Las mayores profundidades se presentan en la zona cercana al Ejido Los Puentes. Para la Zona Ocampo los valores varían de 1 a 12 m, con valores entre 1 y 5 m en la mayor parte de la zona.

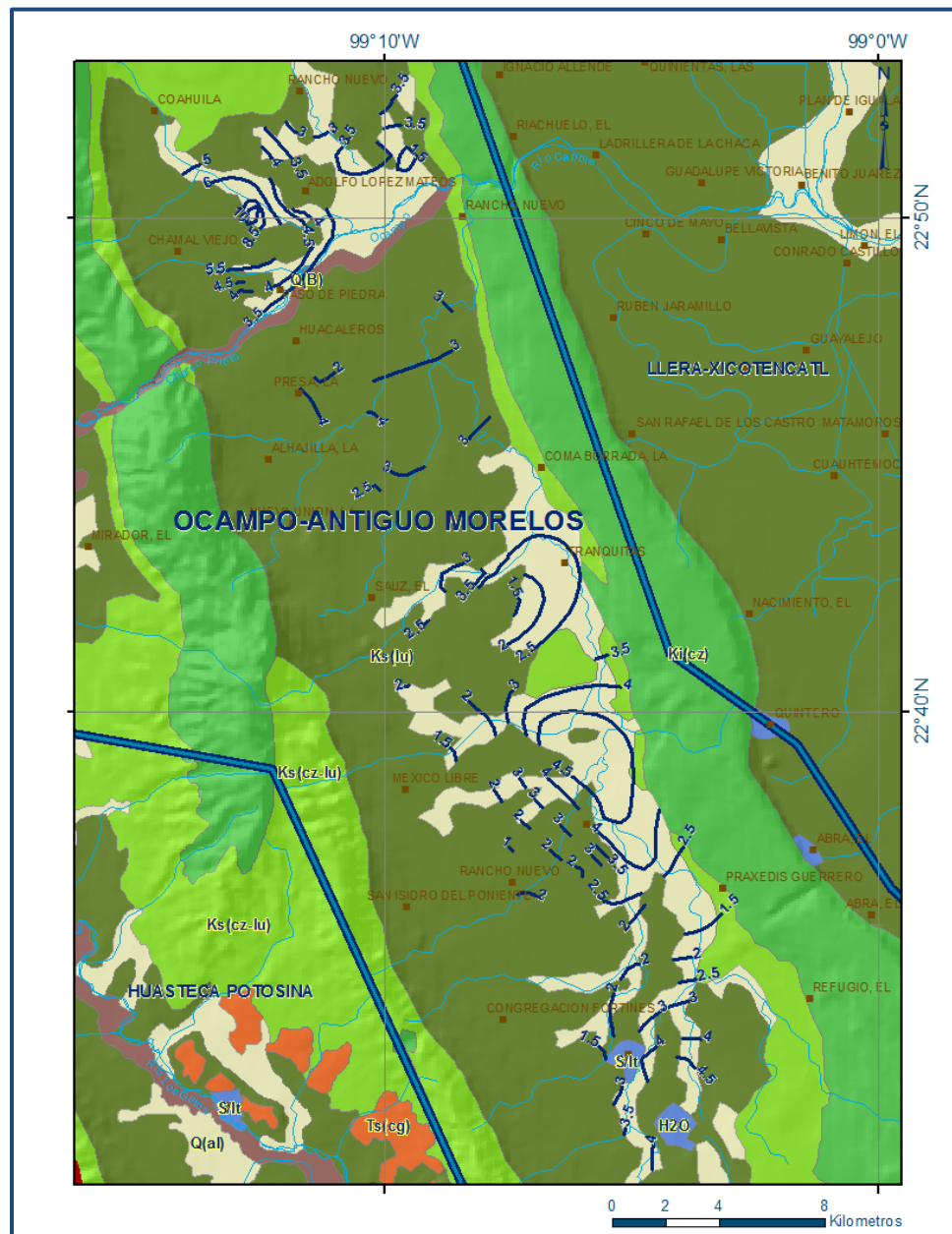


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m en la zona Antiquo Morelos (2010)

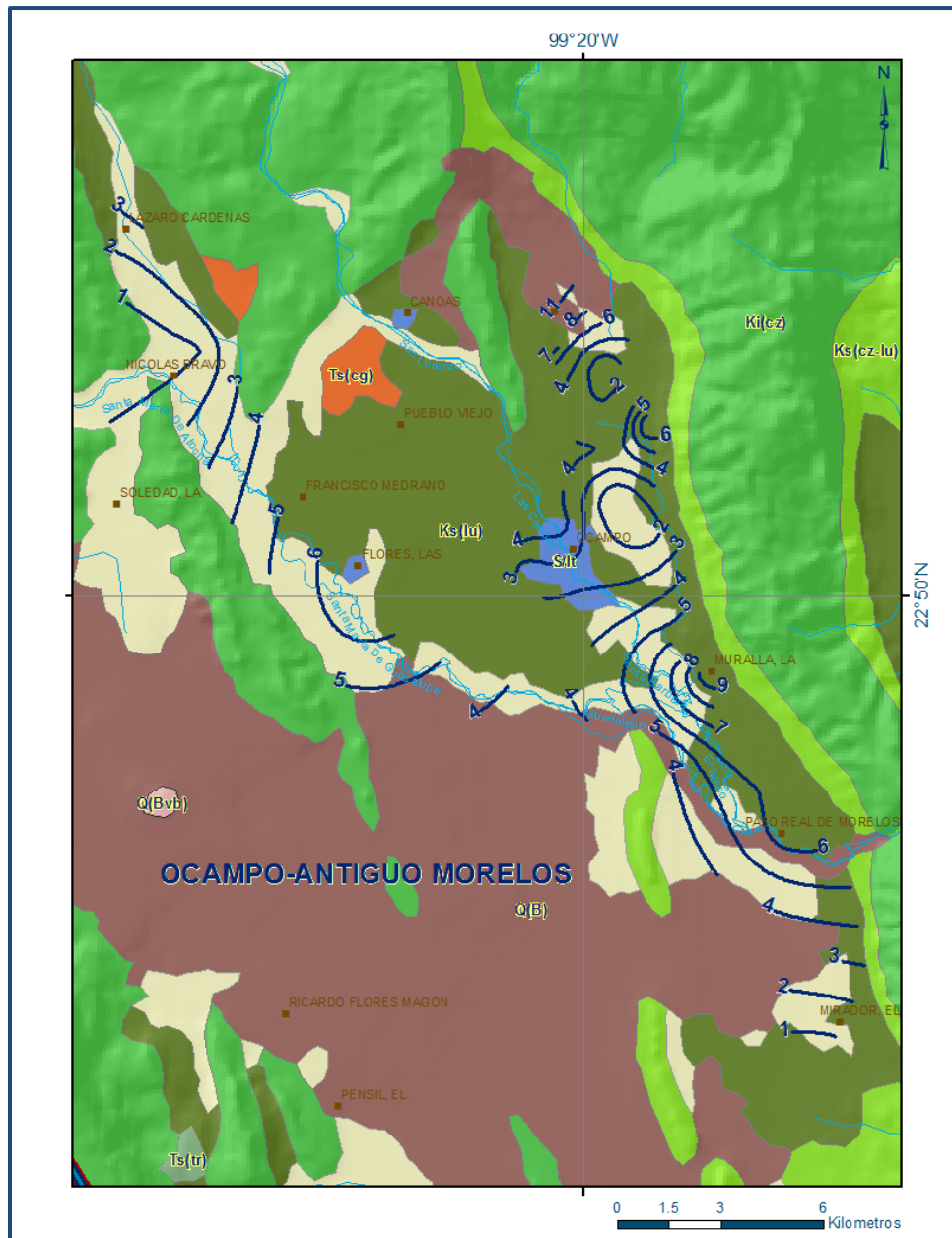


Figura 5. Profundidad al nivel estático en m en la zona Ocampo (2010)

#### 5.4.2. Elevación del nivel estático

De acuerdo con la configuración de elevación del nivel estático para el año 2010, en la zona de Antiguo Morelos (figura 6), se observa que los valores varían entre 225 y 110 msnm, mostrando el reflejo de la topografía, al igual que los valores de profundidad. Los valores más bajos se localizan en la porción nororiental de la zona, en el Ejido Rancho Nuevo (El Coyote), desde donde se incrementan gradualmente por efecto de la topografía hacia la porción sur y noroccidental hacia el Ejido Las Flores, mostrando de esta manera una dirección preferencial del flujo subterráneo de noroeste-sureste y sur a norte, a los largo de la dirección de escurrimiento de los arroyos. La primera dirección

preferencial parte de los ejidos Coahuila y Rancho Nuevo, pasa por los ejidos del Chamal viejo y Adolfo López Mateos termina en el ejido Rancho Nuevo (El Coyote); en tanto que la segunda dirección parte de los ejidos Las Flores, Antiguo Morelos y Congregación Fortines, pasa por los ejidos de Praxedis Guerrero, Rancho Nuevo y Las Pintas y termina confluyendo al Río El Capote.

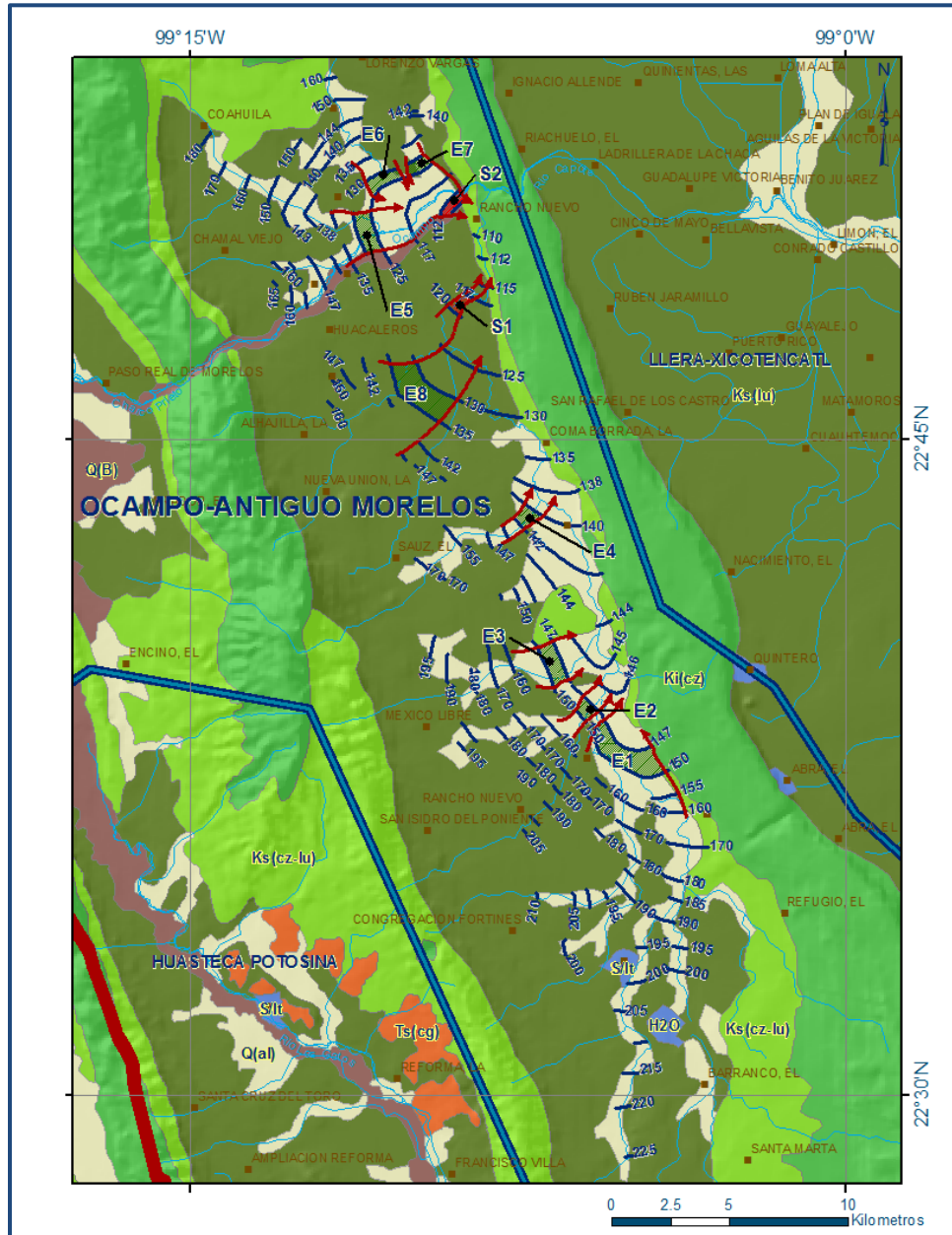


Figura 6. Elevación del nivel estático en msnm en la zona Antiguo Morelos (2010)

En la zona de Ocampo (figura 7), los valores de elevación varían de 490 msnm que se registran en el Ejido Lázaro Cárdenas, a 300 msnm en el Ejido Paso Real de Morelos. Se identifican dos direcciones preferenciales del flujo subterráneo que coinciden con la dirección de escurrimiento de los arroyos. La primera tiene una dirección norte-sureste y es paralela al curso del arroyo Santa María de Guadalupe,

desde el Ejido Lázaro Cárdenas hasta el Ejido Paso Real de Morelos. La otra dirección de flujo es noroeste-sureste, paralela al arroyo Santa Bárbara, desde el Ejido El Tigre hasta el Ejido Paso Real de Morelos; desde cuya confluencia se modifica la dirección del flujo hacia el este.

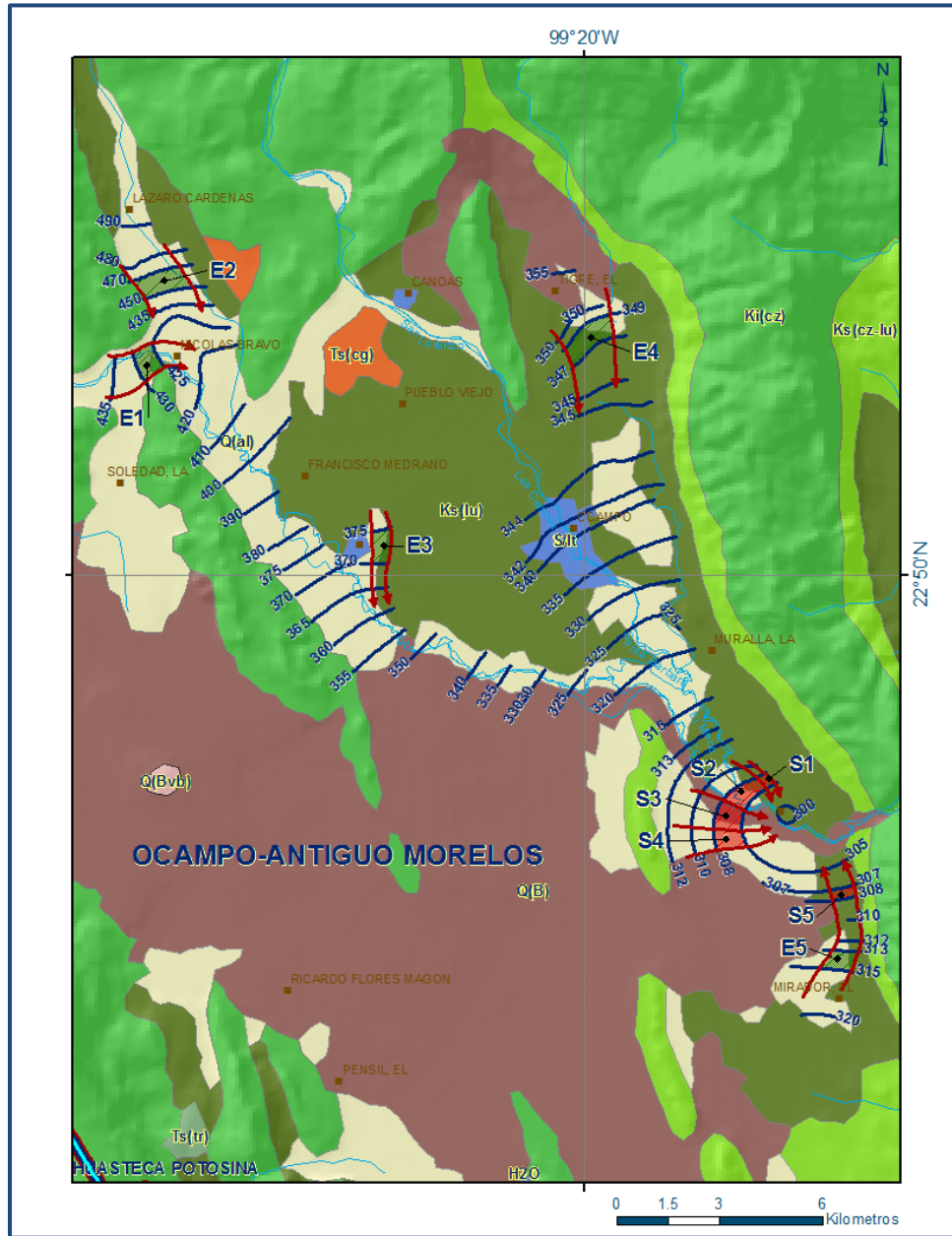


Figura 7. Elevación del nivel estático en msnm en la zona Ocampo (2010)

### 5.4.3. Evolución del nivel estático

Para el análisis de la evolución del nivel estático se consideró el periodo 2008-2010, para ambas zonas de explotación. Para la zona Antiguo Morelos (figura 8), se registran valores extremos de 0.8 a -1.8 m. Los valores de abatimiento se registran en la porción norte y centro, entre Antiguo Morelos y



el Ejido La Presa, en tanto que los valores de recuperación se presentan en la región sur. En general, la mayor parte de la zona presenta valores entre -0.8 a 0.8 m.

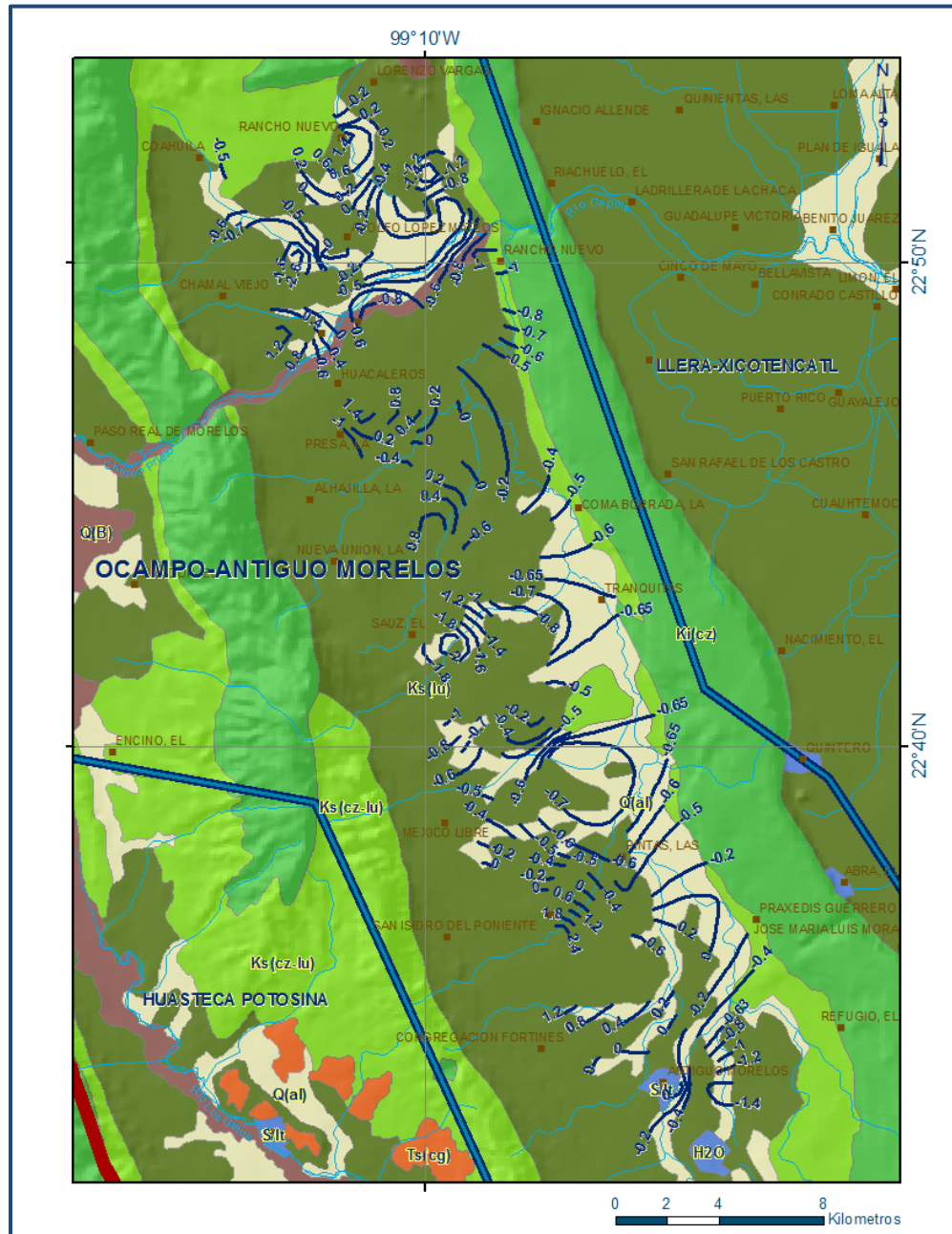


Figura 8. Evolución del nivel estático en m en la zona Antiguo Morelos, periodo 2008-2010

Para la zona Ocampo (figura 9) se observa que predominan valores de recuperación de 0.4 a 0.8 m para dicho periodo, entre Ocampo y los Ejidos El Mirador y Nicolás Bravo. De manera general, se observa que los niveles del agua subterránea no han sufrido cambios significativos en su posición.

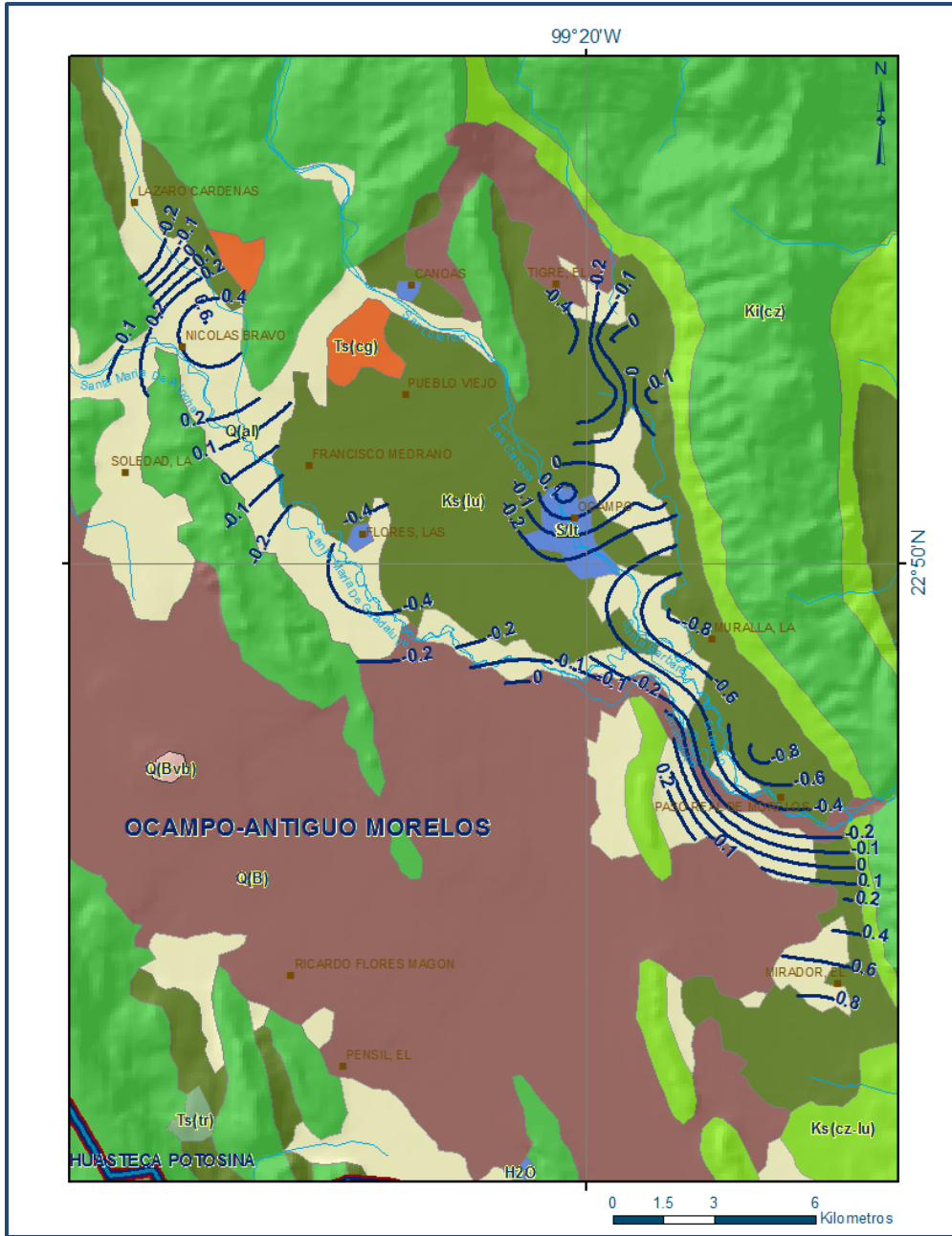


Figura 9. Evolución del nivel estático en m en la zona Ocampo, periodo 2008-2010

## 5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en el año 2010, se tomaron 53 muestras de agua subterránea en aprovechamientos distribuidos en la zona de explotación (39 norias y 14 pozos), para su análisis fisicoquímico correspondiente. Las determinaciones incluyeron: Temperatura (°C), Potencial de Hidrogeno (pH), Conductividad Eléctrica ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ ), y Sólidos Totales Disueltos ( $\text{mg}/\text{l}$ ), para identificar los procesos geoquímicos o de contaminación y comprender el modelo de funcionamiento hidrodinámico del acuífero.



De manera general, las concentraciones de los diferentes iones y elementos no sobrepasan los límites máximos permisibles que establece la Norma Oficial Mexicana, para los diferentes usos. La concentración de sólidos totales disueltos (STD) presenta valores que varían de 229 a 450 ppm, los cuales no sobrepasan el límite máximo permisible de 1000 ppm establecido la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 de STD para el agua destinada al consumo humano.

En el área de Ocampo la concentración más baja se ubica en la porción noroeste de la zona de explotación, donde se localiza la principal zona de recarga al acuífero. La distribución de las concentraciones de los sólidos disueltos totales se incrementa de noroeste a sureste y de norte a sur, en dirección de los ríos Santa María de Guadalupe Atocha y Santa Bárbara, evidenciando las direcciones preferenciales del flujo subterráneo. En la zona de Antiguo Morelos, las concentraciones más bajas se localizan al oeste de la zona de explotación, las cuales se incrementan de noroeste-sureste y sur a norte, mostrando de esta manera las direcciones preferenciales del flujo subterráneo, a lo largo de la dirección de escurrimiento de los arroyos.

De acuerdo con los iones dominantes, predomina la familia del agua bicarbonatada-cálcica que representa agua de reciente infiltración que ha circulado a través de rocas calizas.

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

De acuerdo con la información del censo de aprovechamiento realizado como parte del estudio llevado a cabo en el 2010, se registró la existencia de 109 aprovechamientos que se encuentran registrados en la red piezométrica, de los cuales 79 son norias (78 activas, 1 inactiva) y 30 pozos (29 activos, 1 inactivo). Dentro de las 79 norias, 5 son para uso agrícola, 21 para uso doméstico, 25 para uso pecuario y 28 para uso público-urbano. En cuanto a los 30 pozos, 6 son para uso agrícola, 1 para uso doméstico, 3 para uso pecuario y 20 para uso público-urbano.

El volumen de extracción total se estimó en **8.2 hm<sup>3</sup> anuales** (5.2 hm<sup>3</sup> en Antiguo Morelos y 3.0 hm<sup>3</sup> en Ocampo), de los cuales 7.6 (92.7%) se destinan al uso público urbano, 0.5 hm<sup>3</sup> (6.1%) para uso agrícola y 0.1 hm<sup>3</sup> (1.2 %) para satisfacer las necesidades de los usos doméstico y pecuario.

## **7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS**

El balance de aguas subterráneas se planteó para el periodo 2008-2010, en un área total de **202 km<sup>2</sup>** del acuífero que corresponde a las zonas donde se cuenta con información piezométrica y en la que se localizan los aprovechamientos (81 km<sup>2</sup> en Ocampo y 121 km<sup>2</sup> en Antiguo Morelos).

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 de un acuífero:

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

### **7.1. Entradas**

De acuerdo con el modelo conceptual del funcionamiento hidrodinámico del acuífero, la recarga total que recibe ( $R_t$ ) ocurre por dos procesos naturales principales: por infiltración de agua de lluvia en el valle, por infiltración de los escurrimientos a lo largo de los arroyos principales, que en conjunto se consideran como recarga vertical ( $R_v$ ), y la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de una recarga por flujo subterráneo ( $E_h$ ).

De manera inducida, la infiltración de los excedentes del agua destinada al uso 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 otra fuente de recarga al acuífero. Estos volúmenes se integran en la componente de recarga inducida ( $R_i$ ). Para este caso, dado que no existen poblaciones urbanas importantes, se considerará como recarga inducida solamente al agua destinada al uso agrícola ( $R_r$ ).

#### **7.1.1. Recarga vertical ( $R_v$ )**

La recarga vertical se integra básicamente por la infiltración del agua que precipita directamente en la zona de balance, además de la infiltración del agua producida por el escurrimiento superficial que se presentan en las estribaciones que rodean a las planicies que se desarrollan en las porciones central y sureste del acuífero.

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

$$E_h + R_v + R_r - S_h - B - ETR = \pm \Delta V(S) \quad (1)$$

Donde:

**Eh:** Entrada por flujo subterráneo horizontal;

**Rv:** Recarga vertical;

**Rr:** Retorno de riego;

**B:** Bombeo;

**Sh:** Salidas por flujo subterráneo horizontal;

**ETR:** Evapotranspiración real;

**$\Delta V(S)$ :** Cambio de almacenamiento;

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

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

### 7.1.2. Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

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

Para su cálculo se utilizaron las configuraciones de elevación del nivel estático para el año 2010, mostradas en las figuras 6 y 7, para las áreas de explotación Ocampo (AE1) y Antiguo Morelos (AE2). Con base en estas configuraciones 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:

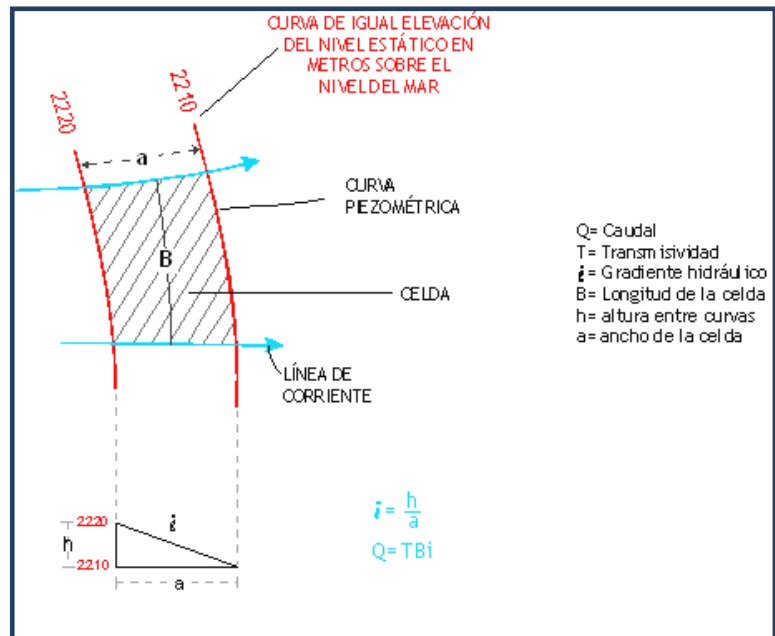
$$Q = B * i * T$$

Donde:

**B=** Largo del canal de flujo;

**i=** Gradiente hidráulico ( $i = h_2 - h_1 / a$ );

**T=** Transmisividad;



La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada uno de los canales establecidos. En la tabla 2, se muestran los valores obtenidos.

Tabla 2. Cálculo de entradas subterráneas por flujo horizontal

CANAL	ANCHO a (m)	$h_2-h_1$ (m)	Gradiente i (m/m)	LONGITUD B ( m)	T ( $10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ )	Q ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	VOL. ANUAL ( $\text{hm}^3$ )
<b>ENTRADAS HORIZONTALES PARA EL AÑO 2010, ZONA OCAMPO (AE1)</b>							
E1	649	5	0.00771	862	4.042	26.863	0.8
E2	666	20	0.03001	1341	4.41	177.473	5.6
E3	984	5	0.00508	470	3.675	8.774	0.3
E4	641	2	0.00312	1545	0.031	0.149	0.005
E5	619	2	0.00323	783	1.517	3.837	0.1
<b>TOTAL</b>							<b>6.8</b>
<b>ENTRADAS HORIZONTALES PARA EL AÑO 2010, ZONA ANTIGUO MORELOS (AE2)</b>							
E1	995	3	0.003016	3172	0.401	3.836	0.12
E2	698	3	0.004296	767	0.821	2.705	0.09
E3	667	3	0.0045	1792	0.56	4.516	0.14
E4	822	2	0.002432	775	0.104	0.196	0.01
E5	707	5	0.007077	1781	6.63	83.565	2.64
E6	600	5	0.008333	1443	6.63	79.723	2.51
E7	538	5	0.009302	991	5.304	48.894	1.54
E8	1142	5	0.004378	3047	0.02	0.267	0.01
<b>TOTAL</b>							<b>7.1</b>

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

El valor de las entradas subterráneas es de  $6.8 \text{ hm}^3/\text{año}$  en la zona de Ocampo y de  $7.1 \text{ hm}^3/\text{año}$  para Antiguo Morelos, por lo que el volumen total de entradas asciende a  **$E_h = 13.9 \text{ hm}^3/\text{año}$** .

### 7.1.3. Retornos de riego (Rr)

Aún en sistemas de riego muy eficientes, un cierto volumen del agua aplicada en el riego no es usado como uso consuntivo, sino que se infiltra y eventualmente alcanza la superficie freática, dependiendo de propiedades del suelo, de las condiciones climáticas y de la profundidad al nivel estático. Esta contribución al acuífero se le conoce como retorno de riego y según Jacob Bear (1970) su valor varía entre el 20 y 40 % del volumen usado en la irrigación. Debido a la falta de información confiable de láminas de riego por cultivo, por correlación con acuíferos vecinos, se consideró un 20% del volumen aplicado al uso agrícola que retorna al acuífero en forma de recarga inducida.

El volumen extracción de agua subterránea para uso agrícola es de  $0.5 \text{ hm}^3$  anuales; adicionalmente en la zona Antiguo Morelos se utilizan  $3.9 \text{ hm}^3/\text{año}$  provenientes de la Presa "El Oyul", para el riego de una superficie de 650 hectáreas. Por lo tanto el volumen de agua que se destina al uso agrícola (subterránea y superficial) es de  $4.4 \text{ hm}^3/\text{año}$ . Si consideramos que el 20% del volumen aplicado al uso agrícola retorna al acuífero, obtenemos que el  **$R_r = 0.9 \text{ hm}^3/\text{año}$** . De los cuales 0.2 corresponden a la zona de Ocampo y 0.7 a Antiguo Morelos.

## 7.2. Salidas

En el acuífero Ocampo-Antiguo Morelos, las descargas provienen principalmente de las salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh), bombeo (B) y por Evapotranspiración real (ETR).

### 7.2.1. 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 del elevación del NE del año 2010, mostradas en las figuras 6 y 7. El valor estimado del volumen, se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Calculo de salidas por flujo subterráneo

CANAL	ANCHO a	$h_2-h_1$	Gradiente i	LONGITUD B	T	Q	VOL. ANUAL
	(m)	(m)	(m/m)	( m)	( $10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ )	( $\text{m}^3/\text{s}$ )	( $\text{hm}^3$ )
<b>SALIDAS HORIZONTALES PARA EL AÑO 2010, ZONA OCAMPO (AE1).</b>							
<b>S<sub>1</sub></b>			0.00723	248	0.463	0.001	0.03
<b>S<sub>2</sub></b>			0.00555	1011	4.669	0.026	0.82
<b>S<sub>3</sub></b>			0.00416	758	0.463	0.001	0.03
<b>S<sub>4</sub></b>			0.00371	558	4.669	0.01	0.32
<b>S<sub>5</sub></b>			0.00307	653	0.463	0.001	0.03
<b>TOTAL</b>							<b>1.2</b>
<b>SALIDAS HORIZONTALES PARA EL AÑO 2010, ZONA ANTIGUO MORELOS (AE2).</b>							
<b>S<sub>1</sub></b>			0.0034	559	6.63	0.013	0.41
<b>S<sub>2</sub></b>			0.0041	1165	6.63	0.032	1.01
<b>TOTAL</b>							<b>1.4</b>

El valor de las salidas subterráneas es igual a  $1.2 \text{ hm}^3/\text{año}$  en la zona de Ocampo y de  $1.4 \text{ hm}^3/\text{año}$  para Antiguo Morelos. Por lo que el volumen total de salidas asciende a  **$Sh = 2.6 \text{ hm}^3/\text{año}$** .

### 7.2.2. Evapotranspiración (ETR)

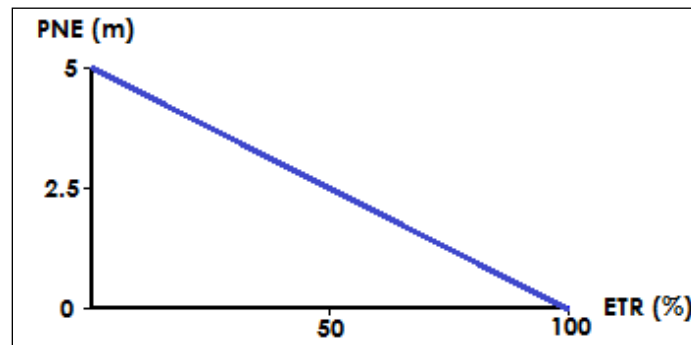
Este parámetro es la cantidad de agua transferida del suelo a la atmósfera por evaporación y transpiración de las plantas, por lo tanto es considerada una forma de pérdida de humedad del

sistema. Existen dos formas de Evapotranspiración: la que considera el contenido de humedad en el suelo y la que considera la etapa de desarrollo de las plantas (Evapotranspiración Potencial y la Evapotranspiración Real). El escurrimiento y el volumen de evapotranspiración real (ETR) es un parámetro utilizado para la recarga potencial de infiltración. Para la obtención de este parámetro se utilizó la ecuación empírica de Turc, que se muestra a continuación:

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

Para la zona de Ocampo, se consideraron los valores medios anuales de temperatura (21.3 °C) y precipitación (1280.4 mm), por lo que la lámina de ETR que se obtiene es de 942.1 mm; mientras que para la zona de Antiguo Morelos, se consideraron los valores medios anuales de temperatura (24.4 °C) y precipitación (982.7 mm), por lo que la lámina de ETR es de 875.2 mm.

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 proceso tiene influencia hasta una profundidad máxima de 5 m, 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 2.5 m el 50%, a 1 m el 80%, etc.



De las configuraciones de profundidad al NE mostradas en las figuras 4 y 5, correspondientes al año 2010, se consideran las curvas menores e iguales a 5 m, se calcula el área entre ellas y se toma el valor promedio (por ejemplo, entre las curvas de 1 y 2 metros en valor promedio será 1.5). El resultado de multiplicar el valor promedio por el área entre las curvas, deberá ponderarse de acuerdo

a la relación lineal mencionada anteriormente, en este caso, por ejemplo, el valor medio de profundidad de 1.5 m, se multiplicará por 0.7 (que significa que a esta profundidad, el 70 % es susceptible de evapotranspirarse. Lo mismo se hace para cada área comprendida entre dos curvas de profundidad menor a 5 m. Al final se obtendrá la suma de los volúmenes evapotranspirados.

Para realizar una estimación más real del valor de la evapotranspiración, se tomará en cuenta únicamente la evapotranspiración del agua freática que se produce durante los meses de estiaje que es cuando el agua se transfiere del subsuelo a la atmósfera por el proceso de evapotranspiración y durante el periodo de lluvias, el agua susceptible de evapotranspirarse es la que queda almacenada en la superficie, sobre todo en depresiones del terreno, antes de infiltrarse al subsuelo. De esta manera, considerando que el periodo de lluvias se presenta en 4 meses, de junio a septiembre, el periodo de estiaje representa el 67 % del año, dicho factor se aplicará a la lámina de ETR obtenida por el método de Turc:

Zona de Ocampo:  $ETR = (0.9421 \text{ m}) (0.67) = 0.631 \text{ m}$

Zona de Antiguo Morelos:  $ETR = (0.8752 \text{ m}) (0.67) = 0.586 \text{ m}$

En el área de balance de Ocampo existe una superficie de 59.3 km<sup>2</sup>, y en el área de Antiguo Morelos la superficie es de 61.8, para el año 2010, donde se presentan niveles freáticos someros (entre 0 y 5 m). Tomando en cuenta el 67 % de la lámina de ETR y las profundidades promedio al nivel del agua subterránea, se obtienen los resultados mostrados en la tabla 4.

Tabla 4.Cálculo del volumen evapotranspirado

INTERVALO CURVAS (m)	PROF. CONSIDERADA (m)	ÁREA (km <sup>2</sup> )	PORCENTAJE (%)	ETR (m)	VOL ETR (hm <sup>3</sup> /año)
<b>EVAPOTRANSPIRACIÓN EN EL AÑO 2010, ZONA OCAMPO (AE1)</b>					
0 A 1	0.5	4.1	0.9	0.631	2.34
1 A 2	1.5	9.8	0.7	0.631	4.34
2 A 3	2.5	12.4	0.5	0.631	3.9
3 A 4	3.5	14.5	0.3	0.631	2.74
4 A 5	4.5	18.5	0.1	0.631	1.17
<b>TOTAL</b>		<b>59.3</b>			<b>13.32</b>
<b>EVAPOTRANSPIRACIÓN EN EL AÑO 2010, ANTIGUO MORELOS (AE2)</b>					
0 A 1	0.5	9.7	0.9	0.586	5.14
1 A 2	1.5	7.6	0.7	0.586	3.12
2 A 3	2.5	6.3	0.5	0.586	1.84
3 A 4	3.5	35.4	0.3	0.586	6.23
4 A 5	4.5	2.8	0.1	0.586	0.16
<b>TOTAL</b>		<b>61.8</b>			<b>16.49</b>

El valor de la evapotranspiración real calculado es de 13.3 y 16.5 hm<sup>3</sup>/año, respectivamente para las zonas de Ocampo y Antiguo Morelos, por lo que el volumen total asciende a **29.8 hm<sup>3</sup> anuales**.

### **7.2.3. Bombeo (B)**

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el volumen de extracción por bombeo asciende a **8.2 hm<sup>3</sup>/año**.

### **7.3. Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$**

Para la estimación del cambio de almacenamiento se utilizó el software Surfer V.8.01, a partir de la configuración de la evolución del nivel estático para el periodo 2008-2010 que se muestra en las figuras 8 y 9 para las áreas de balance de Antiguo Morelos y Ocampo. Con base en ella y tomando en cuenta un valor promedio de rendimiento específico  $S_y$  de 0.01, se determinó la variación del almacenamiento mediante la siguiente expresión:

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

Donde:

**$\Delta VS$** = Cambio de almacenamiento en el período analizado;

**A**= Área de influencia de curvas de igual evolución del nivel estático (km<sup>2</sup>);

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

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

Para la zona de Ocampo se calculó un cambio de almacenamiento anual de -21.2 hm<sup>3</sup> y para la zona de Antiguo Morelos -38.2 hm<sup>3</sup>, que representa el volumen drenado del acuífero en el área de balance de 81 y 121 km<sup>2</sup>. Si tomamos en cuenta los valores del volumen drenado y la superficie de cada zona de balance, se obtiene en ambos casos un promedio anual de abatimiento 0.3 m. Con este valor y un rendimiento específico de 0.01 para ambas zonas:

Zona Ocampo:  $\Delta V(S) = 81 \text{ km}^2 (-0.3 \text{ m}) (0.01) = -0.2 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$

Zona Antiguo Morelos:  $\Delta V(S) = 121 \text{ km}^2 (-0.3 \text{ m}) (0.01) = -0.4 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$

### **Solución de la ecuación de balance**

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

$$R_v = Sh + B + ETR - Eh - R_r \pm \Delta V(S) \quad (2)$$



Zona de Ocampo (AE1)

$$Rv = 1.2 + 3.0 + 13.3 - 6.8 - 0.2 - 0.2$$

$$\mathbf{Rv = 10.3 \text{ hm}^3/\text{año}}$$

Zona de Antiguo Morelos (AE2)

$$Rv = 1.4 + 5.2 + 16.5 - 7.1 - 0.7 - 0.4$$

$$\mathbf{Rv = 14.9 \text{ hm}^3/\text{año}}$$

El valor de la recarga vertical total (Rv) es igual a la suma de ambas zonas:

$$\mathbf{Rv = Rv_{AE1} + Rv_{AE2}}$$

$$Rv = 10.3 + 14.9$$

$$\mathbf{Rv = 25.2 \text{ hm}^3 \text{ anuales}}$$

Por lo tanto el valor de la recarga total (Rt) es igual a la suma de todas las entradas:

$$\mathbf{Rt = Eh + Rv + Rr}$$

$$Rt = 13.9 + 25.2 + 0.9$$

$$\mathbf{Rt = 40.0 \text{ hm}^3 \text{ anuales}}$$

## **8. DISPONIBILIDAD**

Para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas, se aplica el procedimiento de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000, que establece la metodología para calcular la disponibilidad media anual de las aguas nacionales; en su fracción relativa a las aguas subterráneas, menciona que la disponibilidad se determina por medio de la siguiente expresión:

$$\mathbf{DAS = Rt - DNCOM - VCAS} \quad (3)$$

Donde:

**DAS**= Disponibilidad media anual de agua subterránea en una unidad hidrogeológica;

**Rt**= Recarga total media anual;

**DNCOM**= Descarga natural comprometida;

**VCAS**= Volumen de agua subterránea concesionado e inscrito en el REPDA;

### **8.1. Recarga total media anual (Rt)**

La recarga total media anual que recibe el acuífero (Rt), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto en forma de recarga natural como inducida. Para este caso, el valor estimado de la recarga total media anual es de **40.0 hm<sup>3</sup>/año**.

## **8.2. Descarga natural comprometida (DNCOM)**

La descarga natural comprometida se determina sumando los volúmenes de agua concesionados de los manantiales y del caudal base de los ríos que están comprometidos 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 Ocampo-Antiguo Morelos se considera que el valor de la descarga natural comprometida corresponde al 30% de la evapotranspiración real para proteger el ecosistema ribereño. Respecto a las salidas por flujo subterráneo horizontal, no se consideran comprometidas porque descargan dentro del área de balance para el caso de la zona de Ocampo y para el caso de Antiguo Morelos no es susceptible de aprovecharse aguas abajo debido a que se encuentra en una zona de serranía y no existe infraestructura hidráulica para su aprovechamiento, por lo tanto, este volumen de salida no se puede considerar como comprometido.

Por lo que la **DNCOM = 8.9 hm<sup>3</sup>/año**.

## **8.3. Volumen concesionado de aguas subterráneas (VCAS)**

El volumen anual de extracción, de acuerdo con los títulos de concesión inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDa), de la Subdirección General de Administración del Agua hasta el **31 marzo de 2011 es de 9'348,617 m<sup>3</sup>/año**.

## **8.4. Disponibilidad de aguas subterráneas (DAS)**

La disponibilidad de aguas subterráneas, constituye el volumen medio anual de agua subterránea disponible en un acuífero, al que tendrán derecho de explotar, usar o aprovechar los usuarios, adicional a la extracción ya concesionada y a la descarga natural comprometida, sin poner en peligro a los ecosistemas. Conforme a la metodología indicada en la norma referida anteriormente, de acuerdo con la expresión (3), se obtiene de restar al volumen de recarga total media anual, el valor de la descarga natural comprometida y el volumen de aguas subterráneas concesionado e inscrito en el REPDa.

$$\mathbf{DAS = Rt - DNCOM - VCAS} \quad (3)$$

$$DAS = 40.0 - 8.9 - 9.348617$$

$$\mathbf{DAS = 21.751383 \text{ hm}^3 \text{ anuales}}$$

El resultado indica que actualmente existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **21'751,383 m<sup>3</sup> anuales**, para otorgar nuevas concesiones.

## **9. BIBLIOGRAFÍA**

Comisión Nacional del Agua. 2008. Actualización de Mediciones Piezométricas de los Acuíferos denominados: Palmillas-Jaumave y Ocampo-Antiguo Morelos, en el estado de Tamaulipas. Realizado por la Empresa NR Maquinaria, S.A. de C.V.

Comisión Nacional del Agua. 2010. Estudios para Determinar la Disponibilidad de los Acuíferos: Palmillas-Jaumave, Ocampo-Antiguo Morelos y San Carlos, en el estado de Tamaulipas. Realizado por la empresa Sanx, Ingeniería Integral, S.A. de C.V.

Servicio Geológico Mexicano. 1999. Carta Geológico-Minera Carta Geológica-Minera "Ciudad Mante" F14-5, Escala: 1:250,000.