

SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUA EN EL ACUÍFERO TULA BUSTAMANTE (2814), ESTADO DE TAMAULIPAS

Contenido

1	GENERALIDADES	2					
Ant	ecedentes	2					
1.1	Localización	2					
1.2	Situación administrativa del acuífero	4					
2	ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD	5					
3	FISIOGRAFÍA	7					
3.2	Provincia fisiográfica	7					
3	Clima	8					
3.3	Hidrografía						
3.4	5						
4	GEOLOGÍA	10					
4.1	Estratigrafía						
4.2	Geología estructural	22					
4.3	5						
5	HIDROGEOLOGÍA						
5.1	Tipo de acuífero						
5.2	Parámetros hidráulicos						
5.3	Piezometría						
	Comportamiento hidráulico						
	4.1Profundidad al nivel estático						
	4.2Elevación del nivel estático						
	4.3Evolución del nivel estático						
5.5	Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea						
6	CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA						
7	BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS						
7.1	Entradas						
	1.1Recarga vertical (Rv)						
	1.2Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)						
	1.3Recarga incidental (Rr)						
	2.1Bombeo (B)						
	2.2Descarga a través de manantiales (Dm)						
	3 Cambio de almacenamiento ΔV(S)						
7.4	\mathbf{S}						
8	Recarga total media anual (R)						
8.1	=						
8.2	Descarga natural comprometida (DNC)						
8.3	Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)						
9	Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)BIBLIOGRAFÍA						
9	DIDLIVUKAFIA	40					

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 Tula-Bustamante, definido con la clave 2814 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en extremo suroccidental del estado de Tamaulipas, en el límite con los estados de San Luis Potosí y Nuevo León, entre los paralelos 23° 36' y 23° 48' de latitud norte y entre los meridianos 99° 32' y 100° 04' de longitud oeste; cubriendo una superficie aproximada de 3,944 km²(figura 1).

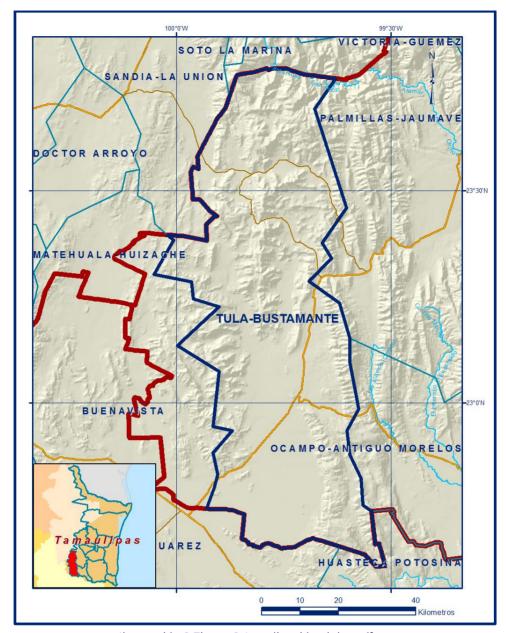


Ilustración 1 Figura 1. Localización del acuífero

Limita al norte y este con el acuífero Palmillas-Jaumave perteneciente al estado de Tamaulipas; al sureste con los acuíferos Ocampo-Antiguo Morelos del estado de Tamaulipas y Huasteca Potosina, del estado de San Luis Potosí; al sur y oeste con Buenavista, perteneciente al estado de San Luis Potosí y al noroeste con el acuífero Sandía-La Unión, del estado de Nuevo León. Geopolíticamente, la mayor parte de su territorio se ubica en los municipios de Tula, Bustamante y Miquihuana, porciones menores de Palmillas y Jaumave y una pequeña área del extremo suroriental en el municipio Ocampo.

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

Tabla 1. Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada del acuífero

ACUIFERO		N-BUSTAMAN					
VERTICE		ONGITUD OF			LATITUD NOI		OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS		GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	99	55	46.3	22	44	56.4	
2	99	54	45.3	22	47	51.2	
3	99	54	15.5	22	49	50.5	
4	99	54	54.1	22	52	53.1	
5	99	52	13.5	22	56	1.1	
6	99	54	51.6	22	56	38.4	
7	99	54	0.6	23	4	25.6	
8	99	59	50.0	23	8	3.4	
9	99	54	0.6	23	13	34.8	
10	99	57	40.0	23	14	40.7	
11	99	57	52.9	23	17	7.0	
12	100	3	9.7	23	18	7.6	
13	100	0	22.5	23	23	0.2	
14	100	1	13.5	23	23	43.9	DEL 14 AL 15 POR E LIMITE ESTATAL
15	99	52	37.4	23	43	14.1	DEL 15 AL 16 POR E LIMITE ESTATAL
16	99	37	45.1	23	45	54.5	
17	99	40	39.6	23	41	37.4	
18	99	36	14.8	23	27	33.5	
19	99	39	37.1	23	22	35.6	
20	99	38	19.8	23	20	28.7	
21	99	41	27.4	23	17	12.0	
22	99	37	11.8	23	14	4.5	
23	99	35	45.4	23	9	6.6	
24	99	35	47.8	23	5	42.5	
25	99	34	31.2	22	59	7.2	
26	99	36	11.5	22	56	1.2	
27	99	35	46.2	22	52	39.2	
28	99	34	13.5	22	49	17.5	
29	99	33	57.3	22	45	30.3	
30	99	32	43.6	22	45	36.6	DEL 30 AL 31 POR I LIMITE ESTATAL
31	99	37	8.7	22	39	36.6	DEL 31 AL 1 POR I
1	99	55	46.3	22	44	56.4	

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero pertenece al Organismo de Cuenca IX "Golfo Norte" y al Consejo de Cuenca Altiplano, instalado el 23 de noviembre de 1999. Su territorio se encuentra parcialmente vedado; la porción norte, nororiental y pequeñas áreas de la zona oriental, están regidas por el "Acuerdo que establece el Distrito de Riego de Llera. Tam., 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 tipo III en las que la capacidad de los mantos acuíferos permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.

En la mayor parte de su superficie no rige ningún decreto de veda para la extracción del agua subterránea. La porción no vedada del acuífero Tula-Bustamante, clave 2814, se encuentra sujeta a las disposiciones del "ACUERDO General por el que se suspende provisionalmente el libre alumbramiento en las porciones no vedadas, no reglamentadas o no sujetas a reserva de los 175 acuíferos que se indican", publicado en el Diario Oficial de la Federación el 5 de abril de 2013, a través del cual en dicha porción del acuífero, no se permite la perforación de pozos, la construcción de obras de infraestructura o la instalación de cualquier otro mecanismo que tenga por objeto el alumbramiento o extracción de las aguas nacionales del subsuelo, sin contar con concesión o asignación otorgada por la Comisión Nacional del Agua, quien la otorgará conforme a lo establecido por la Ley de Aguas Nacionales, ni se permite el incremento de volúmenes autorizados o registrados previamente por la autoridad, sin la autorización previa de la Comisión Nacional del Agua, hasta en tanto se emita el instrumento jurídico que permita realizar la administración y uso sustentable de las aguas nacionales del subsuelo.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 3.

El uso principal del agua subterránea es el agrícola. En su territorio no se localiza distrito o unidad de riego alguna; los usuarios del agua subterránea están organizados en el Comité Técnico del Agua Subterránea (COTAS) del Acuífero Tula-Bustamante, instalado el 30 de septiembre de 2011.

2 ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la superficie que cubre el acuífero se han realizado muy pocos estudios hidrogeológicos de evaluación, algunos de cobertura regional; entre los más importantes se mencionan los siguientes:

SERVICIOS DE PROSPECCIÓN Y LEVANTAMIENTOS GEOLÓGICOS Y GEOFISICOS EN LA ZONA DE MIQUIHUANA Y TULA, ESTADO DE TAMAULIPAS, Realizado en 1980 por Geohidrología Mexicana, S.A. para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Tuvo como objetivo realizar el censo de aprovechamientos, un levantamiento geológico con su interpretación geohidrológica correspondiente y ejecutar sondeos de prospección geofísica resistiva. Además, se recolectaron muestras de agua para la determinación de isótopos naturales de deuterio y oxígeno 18.

ACTUALIZACIÓN DE MEDICIONES PIEZOMÉTRICAS DE LOS ACUÍFEROS DENOMINADOS: PALMILLAS-JAUMAVE Y OCAMPO-ANTIGUO MORELOS, EN EL ESTADO DE TAMAULIPAS, realizado en 2008 por NR MAQUINARIA, S. A. DE C. V para la Comisión Nacional del Agua. 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. Incluyó actividades de campo como piezometría, nivelación de brocales y toma de muestras de agua para su análisis químico correspondiente.

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 platear el balance de aguas subterráneas para calcular la recarga total media anual.

ACTUALIZACIÓN DEL ESTUDIO DE DISPONIBILIDAD DEL ACUÍFERO TULA-BUSTAMANTE, TAMAULIPAS. Realizado en 2012 por Hidrotecnia, Calidad del Agua y Agronomía, S.C. para la Comisión Estatal del Agua de Tamaulipas. Entre sus actividades más importantes destacan el censo de aprovechamientos, hidrometría de las extracciones y piezometría para la elaboración de las configuraciones del nivel estático.

La información piezométrica de este estudio y la recabada posteriormente por la Comisión Estatal del Agua de Tamaulipas, fueron la base para la actualización del balance de aguas subterráneas que se presenta en este documento.

3 FISIOGRAFÍA

3.2 Provincia fisiográfica

De acuerdo a la clasificación fisiográfica de Erwin Raisz (1959), modificada por Ordoñez (1964), el área que cubre el acuífero se ubica completamente en la Provincia Fisiográfica Sierra Madre Oriental, la cual 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 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.

Por otro lado, de acuerdo con la regionalización fisiográfica del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), se ubica en la Provincia Fisiográfica Sierra Madre Oriental, entre dos Subprovincias; la región norte y oriental en la Subprovincia Gran Sierra Plegada en tanto que la zona sur y occidental pertenece a la Subprovincia Sierras y Llanuras Occidentales.

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 presenta.

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 presentan 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.

3 Clima

Con base en los datos históricos de precipitación, temperatura y evaporación potencial de las estaciones climatológicas que se ubican en el área, y con apoyo en la carta de climas; de acuerdo con la clasificación de Köppen, modificada por E. García (1964) para nuestro país, se determina que en la región prevalece grupo de clima templado subhúmedo (Cwo) con lluvias escasas todo el año y porcentaje de precipitación invernal superior al 18 %, con temperatura del mes más cálido mayor de 22° C.En las partes topográficamente más bajas ubicadas al sur, es clima es de tipo BS₁hw semiárido, semicálido, temperatura media anual mayor de 18° C, temperatura del mes más cálido mayor de 22° C.

En la porción norte es de tipo BS₁k(x'); seco templado con lluvias escasas todo el año y precipitación invernal mayor al 18 %. El clima seco estepario (BS), que corresponde con el más seco de este tipo de climas, subtipo semiseco (1), con grado de humedad mayor que 22.9 (coeficiente que resulta de la relación precipitación/temperatura). Su condición de temperatura (k), que es una característica establecida considerando las temperaturas media anual del mes más frío y del más cálido, templado con verano cálido. Por último, en la porción suroriental, se clasifica como cálido, húmedo con lluvias en verano. La temperatura media anual varía entre 15° y 24° C, con oscilaciones extremas mayores de 14° C, siendo mayo el mes más caluroso.

La precipitación pluvial oscila entre 400 y 450 mm/año, aunque en la región sureste alcanza 550 mm/año. Para la determinación de las variables climatológicas se cuenta con información de 16 estaciones que tienen influencia en el área del acuífero: Obregón, San Antonio Peña Nevada, Uvalles, Miquihuana, La Maroma, Bustamante, Mier y Noriega (SMN), Magdaleno Aguilar, Las Antonias, Palmillas, Paso Real de Guerrero, Tula, San Pablo, Callejones, Tepeyac y Magueyes, cuyos registros comprenden el periodo 1981-2013. Con estos datos y utilizando el método de los Polígonos de Thiessen, se determinaron valores medios anuales de precipitación, temperatura y evaporación potencial de **452.2 mm, 19.1 °C** y **1332 mm**, respectivamente. 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. Septiembre es el mes en el que 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 área que cubre el acuífero se encuentra ubicada en su totalidad dentro de la Región Hidrológica 37 "El Salado", Subregión Hidrológica "El Salado", cuenca "El Salado". Esta región hidrológica está comprendida entre los meridianos 99°29' y 102°57' de longitud oeste y los paralelos 21°47' y 25°23' de latitud norte.

Su área es de 94,243 km²; limita al norte con la Región Hidrológica 24c, al noreste con la Región Hidrológica 25, al este y sureste con la Región Hidrológica 26, al suroeste con la Región Hidrológica 12 y al oeste y noroeste con la Región Hidrológica 36. Es una de las vertientes interiores más importantes del país; se localiza en la altiplanicie septentrional y la mayor parte de su territorio se sitúa a la altura del Trópico de Cáncer, que lo atraviesa. Todo este conjunto hidrográfico está constituido por una serie de cuencas cerradas de muy diferentes dimensiones, con escurrimientos de poca importancia.

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, controlado por la pendiente de las sierras y la homogeneidad de los materiales que las constituyen.

3.4 Geomorfología

De acuerdo a los rasgos geomorfológicos presentes en el acuífero, se identifican valles internos, escalonados, orientados en dirección norte-sur o noroeste-sureste, desde el altiplano hasta la planicie costera, así como sierras que los delimitan, constituidas principalmente de rocas calcáreas. Los valles intermontanos de Tula y Miquihuana son de tipo erosional, formados en el núcleo de un anticlinal; En el valle de Miquihuana es posible apreciar afloramientos del basamento precámbrico.

Las formas del valle son suaves, de pendientes moderadas en las porciones central y oriental, con una elevación media de 1,850 msnm. Destacan por su elevación las sierras Piñal y El Chirrión en la región sur; y los cerros La Virgen y la sierra El Macho en el norte; que alcanzan 3000 msnm, y más de 1000 m sobre el nivel del valle.

4 GEOLOGÍA

La zona en la que se ubica el acuífero se localiza dentro de los dominios paleogeográficos de la Cuenca Mesozoica del Centro de México y la Plataforma Valles-San Luis Potosí. En la Plataforma Valles-San Luis Potosí las unidades más antiguas corresponden a rocas metamórficas del Precámbrico y Paleozoico representadas por los Gneis Novillo y los Esquistos Granjeno, respectivamente, sobre las cuales yace discordantemente las rocas de la Formación Huizachal de Triásico, cubierta a su vez discordantemente por una secuencia de calizas, margas y calizas arenosas, conocidas localmente como Margas Miquihuana. (Figura 2).

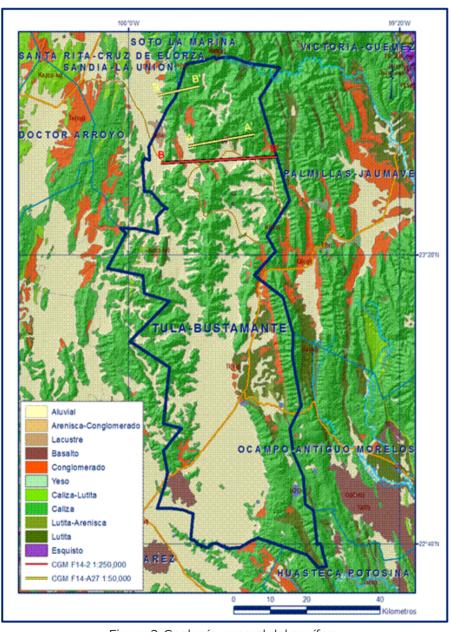


Figura 2. Geología general del acuífero

Concordantemente sobre ellas se presenta las calizas de la Formación Tamaulipas, la Formación Abra y las calizas arenosas de la Formación Cárdenas. De la Cuenca Mesozoica del Centro de México, la unidad más antigua es la Formación La Joya, seguida de las Formaciones Zuloaga, Olvido y La Casita del Jurásico Superior; Cupido, La Peña, Cuesta del Cura, Agua Nueva, San Felipe, y Méndez de Cretácico.

En forma discordante sobre la mayoría de las unidades, coronan la secuencia estratigráfica El Conglomerado Reynosa del Paleógeno-Neógeno, y otros depósitos conglomeráticos en forma de abanicos aluviales y de pie de monte, producto de la disgregación de las rocas preexistentes, los cuales son cubiertos discordantemente por sedimentos arenosos y arcillosos acumulados en los lechos y márgenes de arroyos, así como depósitos lacustres en las zonas topográficamente más bajas.

4.1 Estratigrafía

La geología regional de la zona está representada por rocas metamórficas, sedimentarias marinas y continentales, así como ígneas intrusivas y extrusivas, cuyo registro estratigráfico comprende edades que varían del Precámbrico al Reciente.

A continuación, se describe la secuencia estratigráfica regional, de la más antigua a la más reciente:

ROCAS METAMÓRFICAS PRECÁMBRICAS Y PALEOZOICAS

En el Cañón del Novillo, ubicado en la porción noreste del acuífero, afloran rocas metamórficas que han sido ampliamente estudiados por varios autores. El Ing. E. López Ramos (1980), describe dos unidades metamórficas al oeste de Ciudad Victoria, las cuales corresponden al Gneis Novillo (Precámbrico) y los Esquistos Granjero.

ROCAS ÍGNEAS INTRUSIVAS PREJURÁSICAS

Sus afloramientos son escasos y se restringen a algunas localidades ubicadas al suroeste y oeste de Ciudad Victoria, que se presentan en forma de diques de diferente composición:

Las diabasas (doleitas) afloran el Cañón del Novillo y en el Cañón de La Boca, intrusionando a las capas rojas triásicas, y subyaciendo discordantemente a los hechos rojos del Triásico Superior.

Las rocas de composición granítica afloran cerca del Cañón de Caballeros, intrusionando a los gneises. Presentan color gris claro, ligeramente verdoso, con poco cuarzo, micas y escaso zircón.

En los Cañones Novillo y Peregrina, Heim (1926) observó granitos con bajo grado de metamorfismo. Las traquitas se presentan en forma de diques que cortan a lechos rojos triásicos y se observan en el Cañón de Guayabas y en el Cañón de Novillo (Carrillo, 1960). Por último, las rocas de composición granodiorítica afloran en el Cañón del Rosario, subyaciendo en discordancia a capas de la Formación Huizachal, aparentemente intrusionando a rocas pre-jurásicas.

TRIÁSICO

Formación Huizachal

Nombre propuesto por Seemes en 1921 y publicado por Imlay en 1948, para referirse a una secuencia de hasta 2,000 m de espesor de lutitas, lutitas arenosas, areniscas y conglomerados de color rojo, verde y gris verdoso, cuya localidad tipo se localiza a 20 km al suroeste de Ciudad Victoria, Tamaulipas. Constituye una serie vulcanosedimentaria conformada por lavas interestratificadas con tobas, lutitas, areniscas y conglomerados que en el área del acuífero está representada por una secuencia sedimentaria dominada por limolitas y un conglomerado polimíctico de coloración rojiza con clastos de rocas andesíticas y riolíticas.

La unidad consiste principalmente de lechos rojos, más finos hacia la base y más gruesos hacia la cima, que representan depósitos netamente continentales. Estas rocas han sido interpretadas como resultado de la erosión de horsts formados en el Mesozoico Temprano. No se le ha encontrado fauna marina a estos depósitos, por lo ue su edad ha sido determinada por su posición estratigráfica, que la ubica en el Triásico Superior.

JURÁSICO MEDIO

Formación La Joya

Nombre con el que Nixon (1958) define a una sección constituida por una serie de conglomerados de rocas ígneas y metamórficas, areniscas rojizas, calizas laminares de color gris rojizo, lutitas y areniscas de origen marino, en la localidad tipo situada en los afloramientos ubicados a lo largo del lado Norte del Valle del Huizachal y del Rancho La Joya Verde, localizado sobre el camino Jaumave-Ciudad Victoria.

En la región aflora al suroeste de Ciudad Victoria, en forma de cordones alargados que circundan a dos ventanas geológicas. Está constituida por un conglomerado basal de espesor muy variable, desde unos centímetros hasta más de 20 m, mal clasificado, constituido por fragmentos de rocas ígneas, de rocas metamórficas y de lechos rojos subyacentes.

Sobre el conglomerado descansa un delgado cuerpo de calizas y conglomerados calcáreos. Sobre las calizas se presentan lutitas y limolitas y sobreyaciendo a estas últimas rocas, se observan areniscas de color rojo, verde y gris verdoso. A lo largo del camino que va del Huizachal a Ciudad Victoria, al Oeste del Rancho La Joya, Nixon midió 63.3 m de espesor }

Descansa discordantemente sobre la Formación Huizachal y su contacto superior con la Formación Zuloaga presenta una discordancia erosional muy clara. Su ambiente de depósito refleja condiciones de margen continental con entradas rápidas de mar que permitieron el depósito de delgados espesores de calizas laminares, areniscas y conglomerados marinos.

JURÁSICO SUPERIOR

Formación Zuloaga

Esta formación fue descrita originalmente por Burckhardt (1906) y Bosé (1923) en la región norte-central de México, llamándola "calizas con nerineas". Imlay (1938) asignó el nombre de Formación Zuloaga a una secuencia de calizas dispuestas en estratos gruesos, con nódulos de pedernal negro y contenido fósil de bivalvos y gasterópodos, señalando como localidad tipo la Sierra Sombreretillo, ubicada al norte del Poblado Melchor Ocampo, Zac.

Está representada por una caliza resistente a la erosión que forma los núcleos de los anticlinales en la que se distinguen dos unidades bien definidas: la parte inferior contiene capas de caliza, cuyo color varía de gris claro a ligeramente oscuro, presenta una coloración rojiza o amarillenta al intemperismo, contiene también algunas capas de limolita calcárea débilmente consolidada.

La parte superior está constituida por caliza masiva de color gris, que se caracteriza por presentar estilolitas de gran amplitud y algunos horizontes donde se presentan pequeños nódulos de pedernal de color negro. Se correlaciona con la Formación Olvido, pero a diferencia de esta última no presenta yesos.

Sobreyace a la Formación La Joya en discordancia erosional y subyace a la Formación Olvido en contacto concordante y claro. Por sus relaciones estratigráficas, se le asigna una edad correspondiente a la base del Oxfordiano.

Formación Olvido

Fue definida por Heim, en 1940 para referirse a una secuencia estratigráfica representada por anhidritas, yesos, calizas y lutitas de colores claros que subyace a la Formación La Casita.

Tiene una gran distribución en el Noreste de México y ha sido observada en los cañones de El Huizachal, El Novillo, La Peregrina y Caballeros. Aflora al oeste y suroeste de Ciudad Victoria, en forma de un cordón alargado que circunda a los afloramientos precámbricos, así como sobre la carretera Ciudad Victoria-Jaumave. Se le asigna una edad Oxfordiano Superior.

Formación La Casita

El término fue designado por Imlay (1936) para referirse a los sedimentos de aguas someras del Jurásico Superior limitados en la parte inferior por la Formación La Gloria del Jurásico Superior o Zuloaga y arriba por la Formación Taraises.

Su localidad tipo se localiza en el Cañón La Casita, ubicado aproximadamente a 16 km al sur del poblado General Cepeda, Coahuila y a 50 km al SE de Saltillo (Imlay, 1937), en la cual su litología consiste de 60 m de lutitas que presentan colores que varían de gris oscuro a negro, físiles e interestratificadas con delgadas capas de calizas y areniscas de color amarillento.

Ocasionalmente presenta conglomerados, margas y yesos. Aflora al norte de la zona, en los cortes de la carretera Victoria-Jaumave, en forma de un cordón alargado, que circunda a sedimentos más antiguos.

En algunas localidades no es posible su diferenciación, razón por la que ha sido cartografiada en una sola unidad junto con las formaciones Olvido y Zuloaga, como Jurásico Superior.

Se correlaciona con la Formación Pimienta y de acuerdo con su contenido de fósiles, se le ha asignado al Kimmeridgiano-Tithoniano.

CRETÁCICO INFERIOR

Formación Tamaulipas Inferior

Este nombre fue utilizado originalmente por L. W. Stephenson en 1921 para nombrar a una serie de calizas y dolomías de estratificación mediana a gruesa, de color gris claro y gris oscuro, con nódulos esferoidales de pedernal y dolomitización en su porción basal, en su localidad tipo ubicada en el Cañón de La Borrega, Tamaulipas.

Aflora también en los cañones que cortan la sierra de Tamaulipas, San Carlos y la Sierra Madre Oriental, su exposición está limitada a estas pequeñas áreas, donde está constituida por calizas de textura microcristalina y dolomitas de color gris a gris oscuro, que presentan líneas estilolíticas paralelas a los planos de estratificación, dispuestas en estratos que varían de unos centímetros a dos metros de espesor, con pequeños mantos de óxido de fierro inter-estratificados y lajamiento perpendicular al rumbo de la estratificación.

Su espesor alcanza hasta 400 m. Su contacto superior está bien limitado por el Horizonte Otates de edad aptiana. En la región de Poza Rica gradúa lateralmente a la Formación El Abra, de la cual proviene el nombre Tamabra, que corresponde a rocas del Albiano-Cenomaniano y posiblemente parte del Aptiano.

Rocas de la Formación Tamaulipas Inferior son de las más persistentes en la porción central y este de México y formaron posiblemente parte de la gran Cuenca o Geosinclinal Mexicano Mesozoico. Su edad corresponde al Neocomiano.

Aflora en forma de cordones alargados que circundan a los dos afloramientos de rocas jurásicas.

Su espesor varía de 40 a 260 m, este último se midió en Miquihuana, en donde las rocas presentan abundantes líneas estilolíticas paralelas a la estratificación y nódulos de pedernal de color castaño.

Por sus relaciones estratigráficas, entre las formaciones La Casita y Otates, se asigna al Neocomiano.

Se correlaciona con la Formación Cupido y se considera que fue depositada en un medio ambiente de mar abierto, donde se propiciaba la precipitación de carbonatos.

Formación Cupido

Término definido por Imlay para una sección calcárea que descansa sobre la Formación Taraises y subyace a la Formación La Peña, cuya localidad tipo es la pared norte del Cañón del Mimbre, localizado en la porción media de la Sierra de Parras, aproximadamente a 60 km al SE de la población del mismo nombre, en el estado de Coahuila.

Está representada por rocas muy resistentes y homogéneas constituidas principalmente por calizas de estratificación mediana a gruesa de coloración gris claro, que presentan concreciones de pirita, lentes y nódulos de pedernal color gris y estilolitas; en algunas localidades con intercalaciones de limolitas calcáreas y en menor proporción lutitas.

Sus mejores afloramientos se localizan en el Cañón Mimbre de la porción media de la Sierra de Parras, en Coahuila. Tiene amplia distribución en las sierras de los límites oriente y poniente del acuífero, así como en algunas de la porción central. Presentan fracturamiento y desarrollo de los procesos cársticos, por lo que es una de las unidades calcáreas más importantes desde el punto de vista hidrogeológico. El contacto inferior con la Formación Taraises es nítido y concordante, el superior con la Formación La Peña es brusco y concordante.

En el área estudiada no se observaron cambios de facies. Su edad corresponde a la parte final del Hauteriviano al Aptiano Inferior y se correlaciona con la porción superior de la Formación Tamaulipas Inferior de la Cuenca Tampico-Misantla.

Formación La Peña

El nombre fue introducido por Imlay (1936) para distinguir a un cuerpo compuesto por dos miembros: El inferior constituido por calizas y el superior por lutitas y calizas, que estratigráficamente se ubica entre la Caliza Cupido y la Caliza Aurora. Su localidad tipo se ubica en el flanco norte de la Sierra de Taraises, a 4.8 km al E-SE de la Hacienda La Peña, localizada en el extremo sur del estado de Coahuila. Se describe como un grupo de estratos calcáreo arcillosos, cuya base comienza como una secuencia de calizas de estratificación delgada de color gris claro y continúa en la parte media con calizas que presentan cantidades variables de arcilla deleznable, de color amarillento y gris, con abundante pirita en las calizas y lentes pequeños de sílice blanca.

En la cima se observa una alternancia entre caliza arcillosa, con caliza micrítica con bandas y lentes de pedernal negro y estratificación ondulada. Por su naturaleza arcillosa, es fácilmente erosionable y constituye un horizonte índice ya que su identificación resulta sencilla al formar depresiones entre las calizas más resistentes de la Formación Cupido. Se correlaciona con el horizonte Otates de la Cuenca Tampico-Misantla.

Formación Otates

Nombre propuesto por Muir en 1936, para denominar el intervalo arcillo-calcáreo que separa estratigráficamente a los paquetes de calizas de las Formaciones Tamaulipas Inferior y Superior. Su localidad tipo se encuentra en el Cañón de los Otates, ubicado sobre el flanco occidental de la Sierra de Tamaulipas.

Inicialmente se consideró como horizonte y posteriormente se le ha dado el rango de formación debido a su amplia extensión y significado en cuanto a la magnitud del evento geológico-sedimentológico que representa. Está representada por calizas arcillosas de color gris, gris oscuro y negro con estratos de espesor muy variable desde unos cuantos cm hasta 0.50 m, intercalados en lutita laminada del mismo color.

En ocasiones contiene pedernal negro y es de carácter muy bituminoso. En el noreste del país, Nuevo León y Coahuila, se correlaciona con la Formación La Peña. Se le asigna una edad correspondiente al Aptiano Superior debido a la presencia del fósil índice Dufrenoya Justinae y su ambiente de depósito es de mar abierto con aporte de terrígenos de áreas tectónicamente activas.

Sus contactos inferior y superior son concordantes con las formaciones Tamaulipas Inferior y Superior, respectivamente, y están definidos por el cambio de los cuerpos de micrita de las formaciones encajonantes.

Formación Tamaulipas Superior

Este nombre fue introducido a la literatura geológica por la L.W. Stephenson en 1921, para designar una sección de calizas criptocristalinas de color crema claro y capas medianas, con líneas estilolíticas gruesas paralelas a los planos de estratificación y lentes de pedernal de color gris y castaño oscuro, cuya localidad tipo se localiza en la Sierra de Tamaulipas.

Es posible distinguir dos miembros: el inferior está representado por calizas de textura fina, de color crema en capas de espesor medio y ocasionalmente con lentes de pedernal; el miembro superior se compone de calizas de color amarillento, dispuestas en capas de espesor delgado y con nódulos de pedernal de color gris.

En el norte del país, Nuevo León y Coahuila, se correlaciona con la Formación Aurora. Dentro del área del acuífero consiste en más de 550 m de calcilutitas y calcarenitas de color gris a gris claro, con lentes y nódulos de pedernal, así como pellets, foraminíferos y calciesferúlidos.

Sus contactos inferior y superior son concordantes con las formaciones Otates y Agua Nueva, respectivamente. Aflora en una gran extensión del frente de la Sierra Madre Oriental, zona que paleográficamente se ubica al norte de la Plataforma Valles–San Luis Potosí.

Es esta la razón por la que en esta área los sedimentos corresponden a micritas, mientras que las formaciones depositadas al sur, equivalentes principalmente a la Formación El Abra, que fueron depositadas sobre la plataforma, corresponden en gran proporción a sedimentos arrecifales.

Formación Cuesta del Cura

Imlay (1936) describió por primera vez la Caliza Cuesta del Cura, de acuerdo con los afloramientos de calizas delgadas ondulantes con bandas de pedernal negro que afloran a 6.4 km al W de Parras, Coahuila, área en donde esta unidad se encuentra entre la Caliza Aurora y la Formación Indidura.

Se distribuye en los anticlinales de Parras, Taraises, Prieta y Santiago, al SE de Torreón, pero aflora ampliamente en casi toda la zona Torreón-Monterrey, aunque con espesores menores de 300 m. Su litología consiste principalmente de capas medianas a delgadas y onduladas de caliza de color gris a negra, compacta y un poco arcillosa.

Contiene además nódulos, lentes y bandas de pedernal negro, ocupa generalmente las partes bajas de las sierras, aflorando como una banda de lomeríos alineados. Sus contactos inferior y superior con las formaciones Aurora e Indidura, respectivamente, son concordantes y bruscos.

Por su contenido faunístico fósil, su edad abarca desde el Albiano Medio hasta el Cenomaniano Inferior. Se correlaciona con las formaciones Tamaulipas Superior y El Abra de la Cuenca Tampico-Misantla; y la porción inferior de la Formación Kiamichi, Grupo Washita, con la con la Formación Doctor en el centro México y La Formación Acatita, en el área de Delicias, Chihuahua.

CRETÁCICO SUPERIOR

Formación El Abra

Nombre con el que se designa al complejo calcáreo arrecifal, de edad Albiano-Cenomaniano, que bordea la Plataforma Valles-San Luis Potosí, 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 arrecifal, dolomitizadas o parcialmente dolomitizadas, así como a la zona de interdigitación de calizas de cuenca y la Formación Cuesta del Cura, con calizas clásticas biocalcáreas, derivadas de las zonas arrecifales.

La facies arrecifal 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 clásticos biógenos. El cementante entre los fósiles es generalmente de calcita espática de grano fino. Estas rocas generalmente son compactas y las únicas zonas porosas son algunas cavidades dejadas por los fósiles.

Presenta también porosidad secundaria producida por lixiviación y fracturamiento, desarrollando un complejo sistema de grietas y cavernas. En el centro de los anticlinales presenta fuertemente carstificación por lo que su rasgo geomorfológico más importante lo constituye la gran cantidad de sumideros, circulares a suavemente ovalados.

Formación Agua Nueva

Nombre introducido por Stephenson (1921) y después por Muir, J. M. (1936) para referirse a los sedimentos que descansan directamente sobre la Formación Tamaulipas Superior. Se distinguen dos unidades; la inferior consiste de capas de estratificación gruesa a media (hasta 0.70 m.), que contienen laminaciones de lutita negra quebradiza.

La parte media de la sección es más arcillosa, dispuesta en delgadas capas de carácter laminar, en la que las lutitas negras contienen impresiones de *Inoceramus Labiatus*. La parte superior muestra graduación a rocas de la Formación San Felipe y consiste de calizas de estratificación media y delgada.

En el área del acuífero está constituida por calizas arcillosas de estratificación mediana a gruesa con estructura laminar de color gris obscuro y negro que alternan con lutitas y margas laminadas de color café a gris obscuro, a veces bituminoso y carbonoso.

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

Descrita inicialmente por Jeffreys en 1910, en su localidad tipo de la ranchería de San Felipe, San Luis Potosí, ubicada a 6 km al este de Ciudad Valles, donde consiste de calizas arcillosas de colores gris claro y verde, con frecuentes intercalaciones de lutitas bentoníticas de colores verde y gris claro. Son típicos los intervalos de calizas moteadas con manchas ovaladas oscuras que pueden ser debidas a la presencia de algas. Está constituida por una secuencia rítmica de calizas arcillosas de color gris claro y lutitas calcáreas color café.que presentan intercalaciones de calizas arcillosas, margas de color gris y verde, así como bentonita, que hacia su cima desaparece la presencia de estratos calcáreos. Subyace a la Formación Méndez cuyo contacto es transicional y sobreyace a la Formación Agua Nueva en forma concordante.

Sus aforamientos presentan una gran área de exposición sobre el flanco oriental de la Sierra Madre Oriental, en forma de una serie de pequeños anticlinales y sinclinales, así como en el flanco poniente de la sierra de Tamaulipas. En el subsuelo de la planicie costera del Golfo de México cambia de facies con las formaciones Tamasopo, Soyatal e Indidura. Su espesor promedio es de 130 m y se correlaciona con las formaciones Parras en el estado de Coahuila, Tamasopo de la Plataforma Valles-San Luis Potosí, Indidura de la cuenca del Centro de México, Guzmantla de la Plataforma de Córdoba y Cuautla de la cuenca Guerrero-Morelos.

Formación Méndez

Definida por Jeffreys en 1910, es el nombre que se utilizó para describir a una serie de lutitas calcáreas de colores gris y café con fractura nodular, que sobreyace a la Formación San Felipe. Su localidad tipo se ubica sobre el km 62 de la vía del ferrocarril Tampico-San Luis Potosí, a 300 m al este de la estación Méndez.

Está constituida por una serie de lutitas calcáreas de colores gris azuloso y café, con fractura nodular y concoidal, con aislados estratos de areniscas de grano fino color café, que cubren discordantemente a los conglomerados y/o depósitos aluviales. Su espesor promedio es de 300 m; en el estado de Coahuila se correlaciona con la Formación Difunta y en la región en la que se ubica el acuífero con la unidad arcilloarenosa del Cretácico Superior (Formación Cárdenas).

Se le asigna una edad Campaniano-Maestrichtiano y aparentemente fue depositada en un fondo marino de aguas relativamente profundas, con abundante aporte de material terrígeno fino.

Formación Cárdenas

Fue definida por E. Bosé en 1906, para referirse a los sedimentos arcillo-calcáreos y arenosos del Cretácico Superior que afloran en las cercanías de la estación Cárdenas-San Luis Potosí. Heim en 1925 y C. Buckhardt (1930) las denominaron como Capas Cárdenas; finalmente Imlay en 1944 la definió formalmente con Formación Cárdenas.

Está constituida por una alternancia de margas y delgados cuerpos de areniscas calcáreas de color gris, que cambian de facies hacia la porción noroccidental de la región a rocas más compactas, como calizas arcillosas de estratificación delgada y media. Su depósito ocurrió en un ambiente de aguas someras de alta energía en el cual existía un gran aporte de terrígenos. De acuerdo con su contenido faunístico y posición estratigráfica se le asigna una edad Campaniano–Maestrichtiano. Se ha estimado que su espesor es de 1000 m.

Formación Reynosa

Unidad litoestratigráfica constituida por un conglomerado de cantos de caliza y rocas ígneas, bien empacados 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.

Basalto

Unidad constituida por basaltos de olivino que presentan estructura vesicular y en menor proporción amigdaloide, con relleno de calcita; se presentan desde inalterados hasta muy intemperizados, en forma de derrames lávicos tabulares, que se asocian a la actividad volcánica que tuvo lugar al finalizar la Orogenia Laramide, por lo que se les asigna una edad Paleógeno-Neógeno. Sus áreas de exposición se localizan principalmente al norte del acuífero, en forma aislada sobre los depósitos de las formaciones Méndez y Cárdenas

CUATERNARIO

Aluvión

Está representado por abanicos aluviales, terrazas y depósitos 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. En esta unidad se incluye también a los depósitos lacustres acumulados en pequeñas cuencas localizadas en el extremo noroccidental del acuífero.

4.2 Geología estructural

En la región se interpretan estilos estructurales que afectan a la Plataforma de Valles-San Luis Potosí que corresponden a estructuras caracterizadas por la abundancia de anticlinales y sinclinales, en ocasiones amplios y en otras muy estrechos, sobre todo en el frente de la Sierra Madre Oriental, sus ejes tienen una orientación general NW-SE, con vergencia al noreste y despegues en las zonas plásticas, sin llegar al basamento. En los sedimentos que sobreyacen a los estratos de evaporitas, se generaron estructuras apretadas asociadas a fallas inversas. Las estructuras más importantes corresponden al dominio dúctil-frágil, que se atribuyen a esfuerzos compresivos de la Orogenia Laramide, representados por klippes y cabalgaduras con vergencia al NE, así como el desarrollo de plegamientos de tipo recumbente y de tipo normal y asimétrico.

Del dominio frágil asociado a eventos distensivos post-laramídicos, se produjeron fallas de tipo normal, algunas con estructuras con componente lateral, en dos patrones bien definidos: NW-SE y NE-SW, Asociado a este fallamiento se originaron fosas y pilares tectónicos delimitados por fallas, como la fosa El Carmen, delimitada por las fallas Las Cabras y La Pompeya.

Las rocas sedimentarias mesozoicas que constituyen la Sierra Madre Oriental evolucionaron sobre un basamento paleozoico y precámbrico; algunos autores (carrillo Bravo, 1961; Denison et al, 1971; Ramírez, 1978 y Garrison y Ramírez, 1980), consideran a los Esquistos Granjeno como un complejo metamórfico derivado de una secuencia vulcanosedimentaria de 330 Ma de edad, que por sus características litológicas se supone relacionado con un antiguo arco insular del Sistema Apalachiano.

La Sierra Madre Oriental estuvo sometida al menos a dos eventos tectónicos. El primero es una fase de extensión de edad post-Triásico Superior y pre-Jurásico Inferior que corresponde a lo que Tardy (1973) denominó fase Cimeriana en el Sector Transversal de Parra (Padilla y Sánchez, 1978) y que para Richard S.E. (1977)

Rueda G.J: (1998), inició en el Jurásico Temprano y terminó a finales del Jurásico Medio, asociado a aulacógenos que formaron parte del proceso de apertura del Golfo de México, provocando la formación de pilares y fosas tectónicas, que condicionaron la acumulación tanto de los lechos areno-conglomeráticos continentales del Triásico-Jurásico y de todos los depósitos mesozoicos marinos posteriores.

El segundo evento tectónico corresponde a la Orogenia Laramide, que de acuerdo con Coney P. (1976),se inició a finales del Cretácico Superior y principios del Terciario, provocado por el cambio en el movimiento de las placas tectónicas Norteamericana y Paleopacífica, que convergían de manera oblicua y empezaron a realizarlo frontalmente y con mayor velocidad.

Esto ese manifiesta en la región por una tectónica compresiva y de corrimientos paralelos, notablemente representada por la presencia de estrechos pliegues, anticlinales y sinclinales, cuyos ejes tienen una orientación NNW-SSE, que siguen el rumbo general de las sierras.

De acuerdo con Eguiluz A.S. (2000), la Sierra madre Oriental, constituida por rocas mesozoicas y su complejo basal, fueron levantados, comprimidos y transportados hacia el noreste, formado pliegues y cabalgaduras durante la Orogenia Laramide, mencionando que a lo largo del frente del cinturón plegado se distinguen varios sectores que tienen variantes en el estilo y orientación de deformación, la cual es considera de tipo "thin-skined" (cubierta delgada).

Posteriormente, al cesar los esfuerzos compresivos, siguió una etapa de relajamiento y erosión de las montañas plegadas durante la orogenia, originándose un sistema de fallas con orientación general NNW-SSE, en forma de escalonamientos regionales, formando fosas y pilares (Basin y Range, Stewart, 1978).

La estructura extensional, de tipo Cuencas y Sierras, que posiblemente podría corresponder a este sistema, se manifiesta con la fosa El Carmen, la cual tiene una longitud aproximada de 20 km y 6 km de ancho (Carta Geológico-Minera Miquihuana F14-A27. SGM, 2007. Escala 1:50,000)

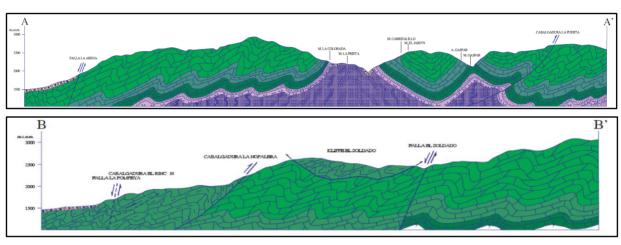
4.3 Geología del subsuelo

De acuerdo con la información hidrogeológica, geofísica 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, así como los depósitos clásticos del Conglomerado Reynosa.

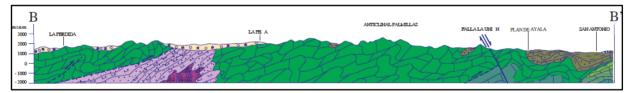
La porción inferior está conformada por la secuencia de lutitas y margas de las formaciones Cárdenas, Méndez y San Felipe, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento.

Este es el acuífero que actualmente se explota para satisfacer las necesidades del uso doméstico-pecuario, de bajo rendimiento, que generalmente proporciona caudales inferiores a 5 lps. Las calizas de las formaciones Zuloaga, Cupido, Cuesta del Cura y El Abra, constituyen horizontes acuíferos profundos explorados en la zona para abastecimiento de agua potable y que pueden presentar condiciones de confinamiento o semiconfinamiento debido a que están sobreyacidas por secuencias arcillosas y arcillo-calcáreas.

Las fronteras y barreras al flujo subterráneo, así como el basamento geohidrológico del acuífero, están representadas por las mismas rocas sedimentarias cuando se presentan inalteradas y al desaparecer el fracturamiento, la secuencia de depósitos terrígenos finos que conforman las lutitas y limolitas así como las rocas metamórficas. A mayor profundidad se considera que el basamento geohidrológico regional está constituido por la secuencia de calizas arcillosas y lutitas del Cretácico Inferior y Jurásico. En la figura 3 se presentan dos secciones geológicas esquemáticas que muestran la disposición de las unidades geológicas del subsuelo.



Fuente: Carta Geológico-Minera Miquihuana F14-A27. SGM 2007. Escala 1:50,000



Fuente: Carta Geológico-Minera Ciudad Victoria F14-2. SGM 2008. 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 por dos medios; uno granular en su porción superior, conformado 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, excepto en los cauces de los ríos y arroyos, donde la permeabilidad y el espesor son mayores.

La porción inferior se aloja en un medio fracturado en las lutitas y lutitas calcáreas que presentan permeabilidad secundaria; que junto con la unidad superior forman un acuífero de baja permeabilidad y de reducida capacidad de almacenamiento. Los flancos de las sierras están constituidos por calizas de distintas facies, que les confieren permeabilidad de baja a alta.

El predominio de sedimentos granulares y conglomerados polimícticos, de granulometría fina, y la presencia de lutitas, le confieren muy baja permeabilidad al acuífero, dado que los bajos caudales que aporta sólo son suficientes para el abastecimiento de las necesidades del uso doméstico-abrevadero. Las calizas cretácicas y jurásicas representan un acuífero potencial que presenta condiciones de semiconfinamiento y confinamiento, debido a que están sobreyacidas por lutitas y limolitas.

5.2 Parámetros hidráulicos

Como parte de las actividades del estudio realizado en 2012, se ejecutaron 15 pruebas de bombeo de corta duración en etapa de abatimiento y recuperación, dos de ellas con pozo de observación.

Adicionalmente, se recopiló información de 30 pruebas más realizadas en los acuíferos vecinos Ocampo-Antiguo Morelos y Palmillas-Jaumave. De los resultados de su interpretación por métodos analíticos convencionales, se establece que los valores de transmisividad varían de 3.8 x10-5 a 261.5 x10-3 m²/s, en tanto que los valores de conductividad hidráulica varían de 1.2 x10-7 a 8.7 x10-7 m/s (0.01 a 75.2 m/d)

De las dos pruebas de bombeo que contaron con pozo de observación, se obtuvieron valores de rendimiento específico de **0.055 a 0.066**.

5.3 Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, se cuenta con la información obtenida de estudios previos, así como la piezometría recabada por el Organismo de Cuenca Golfo Norte de la Comisión Nacional del Agua y de la Comisión Estatal del Agua de Tamaulipas para varios años. Para el balance de aguas subterráneas se eligió el periodo 1991-2014, que tiene mayor cantidad de información y mejor cobertura espacial.

5.4 Comportamiento hidráulico

Debido a que la posición de los niveles del agua subterránea no registró cambios significativos en el periodo de balance, las configuraciones de profundidad y elevación del nivel estático presentan prácticamente la misma posición y distribución geográfica. Por esta razón, únicamente se describen estas configuraciones correspondientes al año 2014.

5.4.1 Profundidad al nivel estático

La configuración de profundidad al nivel estático para el año 2014 muestra que los valores variaron, de manera general, de 40 a 200 m, los cuales se incrementan por efecto de la topografía hacia las estribaciones de las sierras que limitan los valles.

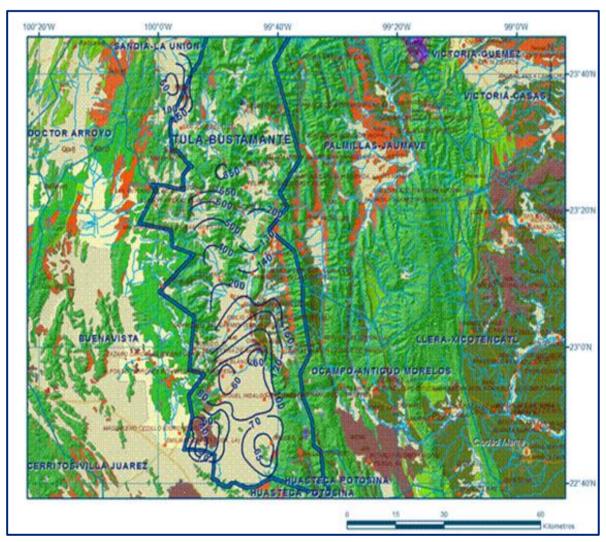


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2014)

Las profundidades más someras, de 40 a 60 m, se presentan en la porción suroccidental del acuífero, en las inmediaciones del poblado Santa Rita, hacia el límite con el acuífero Buenavista del estado de San Luis Potosí, incrementándose por efecto de la topografía hacia el norte y hacia las estribaciones de la sierras; en tanto que los más profundos, de 150 a 200 m.

Se registran en la porción norte del valle de Tula. Localmente, en la porción occidental del acuífero, existen pozos profundos perforados en calizas en los que la profundidad al nivel del agua se registra de 200 a 850 m, como sucede en los poblados Salitrillo, Vicente Guerrero, Las Antonias y Joya de Herrera (figura 4).

5.4.2 Elevación del nivel estático

La elevación del nivel estático en 2014 registró valores que variaron de 1340 a 980 msnm. Las menores elevaciones, de 1300 a 1340 msnm, se registraron en la porción noroccidental del acuífero, en la zona de San José del Llano, en el límite con el acuífero Sandía-La Unión del estado de Nuevo León (figura 5a).

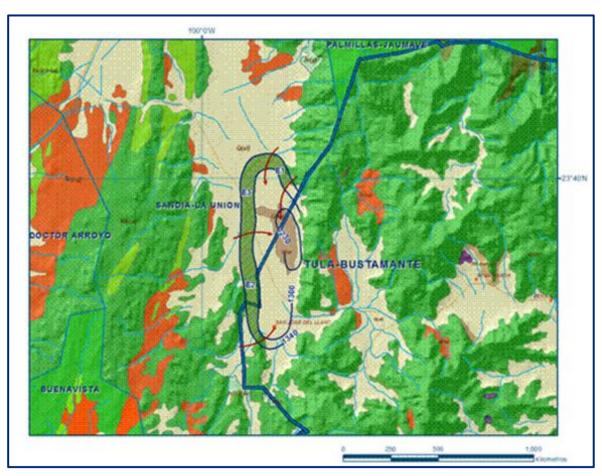


Figura 5a. Elevación del nivel estático en msnm, zona norte (2014)

En la región centro y sur del acuífero los valores de elevación varían de 1060 a 980 msnm, decreciendo de manera general, al igual que la topografía de norte a sur e incrementándose hacia las estribaciones de las sierras que delimitan los valles, con los valores más bajos en el extremo sur, en la zona comprendida entre las localidades Las Cruces y Pastores (figura 5b).

En ambas zonas la dirección preferencial del flujo subterráneo es norte-sur, con alimentaciones de los flancos este, oeste y sur; concéntrica en la zona topográficamente más baja, sin presentar salidas subterráneas. En el valle de Calabacillas, en la zona ubicada al norte de esta población, confluyen los flujos provenientes tanto de la porción sur, desde la entrada hacia el valle de Tula, como del norte desde el poblado San Miguel de Ubaldo.

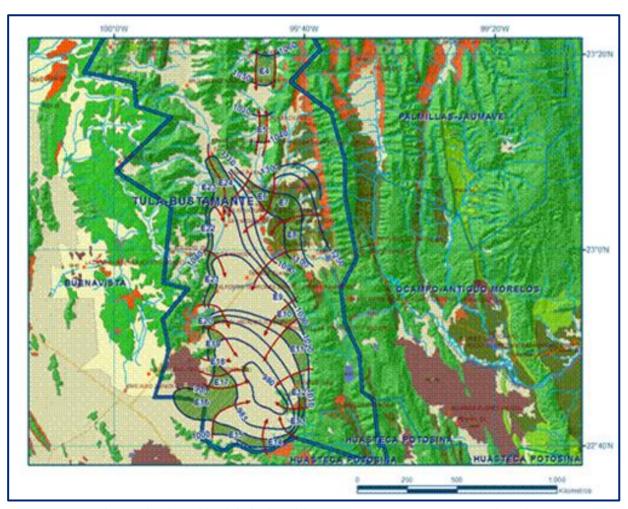


Figura 5b. Elevación del nivel estático en msnm, zona centro y sur (2014)

5.4.3 Evolución del nivel estático

Con respecto a la evolución del nivel estático para el periodo 1991-2014, se registraron valores de abatimiento que varían de 2 a 10 m, sólo en la porción sur del acuífero que es la zona topográficamente más baja y donde se concentra la explotación, con valores puntuales de hasta 15; el promedio anual es de 0.3 m para toda la zona (figura 6).

Los mayores abatimientos, de 10 a 15 m, que presentan un ritmo anual de 0.5 m, se registran en la zona de extracción intensiva para uso agrícola, ubicada al suroeste de Tula y sur de San Pablo (Alfonso Terrones Benítez).

Abatimientos de 5 a 10 m para el periodo analizado, 0.2 a 0.4 m anuales, se presentan entre San Pablo y Miguel Hidalgo y entre Francisco I. Madero y Las Cruces.

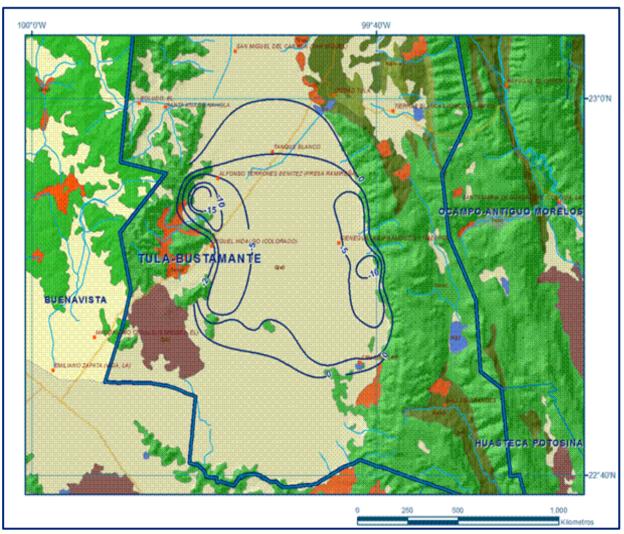


Figura 6. Evolución anual del nivel estático en m (1991-2014)

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en el año 2012, se tomaron 30 muestras de agua subterránea en aprovechamientos distribuidos en la zona de explotación para su análisis fisicoquímico y bacteriológico correspondiente (19 pozos, 1 noria y 10 manantiales).

Las determinaciones incluyeron: temperatura (°C), potencial de hidrogeno (pH), conductividad eléctrica, iones principales, hierro, manganeso, sólidos totales disueltos, alcalinidad, dureza, nitratos, coliformes fecales y totales, para identificar los procesos geoquímicos o de contaminación y comprender el modelo de funcionamiento hidrodinámico del acuífero.

De los resultados obtenidos de los análisis fisicoquímicos, se determina que, de manera general, los valores de concentración de sólidos totales disueltos (STD) varían de 199 a 2000 mg/l, sólo 5 de ellas superan el límite máximo permisible de 1000 mg/l establecido por la modificación a 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. De acuerdo con la clasificación establecida por la American Public Health Association (APHA, 1995), el agua del acuífero se clasifica como agua dulce a salobre, ya que los valores máximos de conductividad eléctrica de algunas muestras superan el valor de 2000 /S/cm y presentan valores extremos de 270 a 4310 µS/cm.

Los valores más bajos de STD y conductividad eléctrica se registran al norte del acuífero y se incrementan en dirección general hacia el sur, confirmando con ello la dirección preferencial del flujo subterráneo. La temperatura del agua varía de 14.2 a 28.7 °C y el pH de 7.0 a 8.3.

Más del 50 % de las muestras presentaron coliformes fecales; 4 muestras presentaron contenido de hierro mayor a 0.30 mg/l que establece como límite máximo permisible la NOM mencionada, en los pozos ubicados al sur del acuífero, en los poblados y/o ejidos Francisco I. Madero, Guadalupe Victoria, Colonia Agrícola Las Cruces y Presa de Ramos.

De acuerdo a las concentraciones de elementos mayores por ion dominante, se clasificaron las muestras en el diagrama de Piper y se identificó que predominan dos familias del agua: bicarbonatada-cálcica y magnésica-sulfatada, la primera representa agua de reciente infiltración que ha circulado a través de rocas calizas y la segunda muestra mayor evolución debido a mayores distancias de recorrido, mayor tiempo de residencia y/o posiblemente disolución de sales evaporíticas.

Para su uso en riego se utilizó la clasificación de Wilcox, que relaciona la conductividad eléctrica con la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), el mayor número de muestras analizadas se clasifican como C_2 - S_1 , que representa agua de salinidad media con bajo contenido de sodio intercambiable; seguida de la clasificación C_1 - S_1 , que representa agua de baja salinidad con bajo contenido de sodio intercambiable; ambas son aptas para la agricultura sin restricción alguna.

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 2012, se registró la existencia de 126 aprovechamientos, de los cuales 96 son pozos, 8 norias y 22 manantiales; del total de aprovechamientos, 83 se encuentran activos y 43 se encuentran inactivos. De los 83 aprovechamientos activos, 27 son para uso agrícola, 38 para uso público-urbano, 6 para uso doméstico-pecuario y los 12 restantes para usos múltiples.

El volumen de extracción se ha estimado en **28.5 hm³** anuales, de los cuales 19.5 hm³ (68.4%) son para uso agrícola, 3.2 hm³ (11.2%) para abastecimiento de agua potable a las comunidades de la región, 0.1 hm³ (0.4 %) para satisfacer las necesidades de los usos doméstico-pecuario y 5.7 hm³ (20.0 %) para usos múltiples.

Adicionalmente, a través de los **22 manantiales** se descarga un caudal conjunto de 35 lps, que equivalen a **1.1 hm³ anuales**, destinados para usos doméstico-pecuario y público urbano.

7 BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

Debido a la gran extensión superficial del acuífero y a que solo en la porción centrosur se realiza la explotación intensiva del agua subterránea, el balance de agua subterránea se planteó en una superficie de **3,940 km²**. 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:

Entradas (E) - Salidas (S) = Cambio de masa

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

Recarga total - Descarga total = Cambio de almacenamiento

7.1 Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico del acuífero, la recarga total que recibe (R) ocurre por tres procesos naturales principales: por infiltración de agua de lluvia que se precipita en el valle y a lo largo de los ríos principales, que en conjunto se consideran como recarga vertical (Rv), y la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de una recarga por flujo horizontal subterráneo (Eh).

De manera incidental, la infiltración de los excedentes del riego agrícola y del agua residual de las descargas urbanas, constituyen otra fuente de recarga al acuífero. Estos volúmenes se integran en la componente de recarga incidental (Ri).

Para este caso, debido a que el volumen utilizado para uso público-urbano es incipiente, solo se considera la infiltración de los excedentes del agua destinada al uso agrícola (Rr).

7.1.1 Recarga vertical (Rv)

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que se cuenta con información para calcular el cambio de almacenamiento (ΔVS), así como las entradas por flujo subterráneo, este valor es la incógnita a despejar en la ecuación de balance.

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

Donde:

Rv: Recarga vertical

Entradas por flujo subterráneo horizontalRr: Recarga Incidental por excedentes de riego

B: Bombeo

Dm: Descarga a través de manantiales

ΔV(S): Cambio de almacenamiento

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

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

7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

La recarga del acuífero tiene su origen en la precipitación pluvial sobre las zonas topográficamente más altas del área de estudio y por la infiltración de los escurrimientos superficiales.

El agua se infiltra por las fracturas de las rocas y a través del pie de monte, para posteriormente recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de explotación.

Para su cálculo se utilizó la configuración de elevación del nivel estático correspondiente al año 2014, mostrada en la figura 5.

Con base en ella se seleccionaron canales de flujo y se aplicó la Ley de Darcy para calcular el caudal "Q" en cada uno de ellos, mediante la siguiente expresión:

$$Q = B *i * T$$

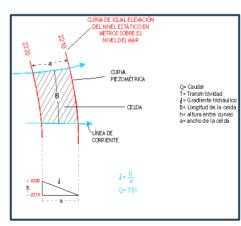
Donde:

Q= Caudal;

B= Largo del canal de flujo;

i= Gradiente hidráulico (i);

T= Transmisividad en el canal de flujo;



La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada una de las celdas establecidas, en la tabla 2 se observan los valores obtenidos en cada celda.

El volumen total de entradas por flujo subterráneo horizontal asciende a **24.2** hm³/año.

Los valores de transmisividad utilizados para el cálculo de las entradas y salidas subterráneas, fueron obtenidos de la interpretación de pruebas de bombeo realizadas en 2014 y en estudios previos, en este acuífero y otros colindantes, que tienen el mismo origen, evolución y constitución geológica, adaptados al espesor saturado de las distintas zonas.

		, ,						
CANAL	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h ₂ -h ₁ (m)	Gradiente i	T (m²/s)	CAUDAL Q (m³/s)	VOLUM EN (hm³/año)	
E1	2950	1075	40	0.03721	0.0003	0.0329	1.0	
E2	10910	1250	40	0.03200	0.0001	0.0349	1.1	
E3	8050	1160	40	0.03448	0.0003	0.0833	2.6	
E4	3220	5725	10	0.00175	0.0015	0.0084	0.3	
E5	1430	5005	10	0.00200	0.0015	0.0043	0.1	
E6	5365	2415	10	0.00414	0.0010	0.0222	0.7	
E7	4830	4470	10	0.00224	0.0002	0.0022	0.1	
E8	6080	2860	10	0.00350	0.0002	0.0043	0.1	
E9	8050	1075	10	0.00930	0.0010	0.0749	2.4	
E10	2950	3575	10	0.00280	0.0012	0.0099	0.3	
E11	8225	2325	10	0.00430	0.0012	0.0425	1.3	
E12	6615	1250	10	0.00800	0.0012	0.0635	2.0	
E13	5365	625	10	0.01600	0.0010	0.0858	2.7	
E14	5005	1430	10	0.00699	0.0010	0.0350	1.1	
E15	9835	1790	10	0.00559	0.0008	0.0440	1.4	
E16	4830	7150	5	0.00070	0.0010	0.0034	0.1	
E17	2325	4470	5	0.00112	0.0012	0.0031	0.1	
E18	2860	1610	5	0.00311	0.0012	0.0107	0.3 0.7	
E19	5725	1340	5	0.00373	0.0010	0.0214		
E20	4115	895	10	0.01117	0.0010	0.0460	1.4	
E21	9655	1075	10	0.00930	0.0005	0.0449	1.4	
E22	9300	715	10	0.01399	0.0005	0.0650	2.1	
E23	5725	5365	10	0.00186	0.0012	0.0128	0.4	
E24	5185	5725	10	0.00175	0.0012	0.0109	0.3	
						Total entradas	24.2	

Tabla 2. Cálculo de entradas por flujo subterráneo (2014)

7.1.3 Recarga incidental (Rr)

Aún en sistemas de riego muy eficientes, un cierto volumen del agua aplicada en el riego no es usado como uso consuntivo, 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 de láminas de riego por cultivo, se consideró que un 5% del volumen aplicado al uso agrícola retorna al acuífero en forma de recarga efectiva, tomando en cuenta la profundidad al nivel del agua subterránea de 40 a 60 m en las zonas agrícolas y la presencia de estratos de permeabilidad media a baja en el subsuelo. De esta manera, considerando que para el uso agrícola se utilizan 19.5 hm³ anuales y que un 5% de éste recarga de manera efectiva al acuífero, se obtiene una recarga incidental por los retornos del riego agrícola de 1.0 hm³ anuales. **Rr = 1.0** hm³ anuales.

7.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre por bombeo (B) y a través de manantiales (Dm).

7.2.1 Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción de agua subterránea asciende a **28.5 hm³ anuales.**

7.2.2 Descarga a través de manantiales (Dm)

De acuerdo con el censo realizado en 2012, se identificó la existencia de 22 pequeños manantiales, que en conjunto descargan 35 lps, que equivalen a **1.1 hm³ anuales.**

7.3 Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$

Para la estimación del cambio de almacenamiento se tomó en cuenta la configuración de la evolución del nivel estático 1991-2014 (figura 6). Con base en ella y un valor de coeficiente de almacenamiento de 0.05, se determinó la variación del almacenamiento en el área de balance de 2,424 km², mediante la siguiente expresión:

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

Donde:

ΔVS: Cambio de almacenamiento en el período analizado

S: Coeficiente de almacenamiento promedio de la zona de balance

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

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

Evolución (m)	Abatimiento medio (m)	Área (km²)	Sy	ΔV(S) (hm³/año)	
0	0	2009.0	0.05	0.0	
0 a -2	-1.0	103.2	0.05	-5.2 -38.5 -29.2 -1.8 -2.6	
-2 a -5	-3.5	220.2	0.05		
-5 a -10	-7.5	77.9	0.05		
-10	-10	3.5	0.05		
-15	-15	3.4	0.05		
-10 a -15	-12.5	6.8	0.05	-4.3	
Área de	balance	2424.0	TOTAL	-81.5	
	-3.5				

Tabla 3. Cálculo del volumen de cambio de almacenamiento (1991-2014)

Los valores obtenidos para cada variación piezométrica durante el período 1991-2014 se presentan en la tabla 3. El volumen del cambio de almacenamiento es de -3.5 hm³ anuales. $\Delta V(S) = -3.5 \text{ hm}^3$ anuales.

Solución de la ecuación de balance

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

Rv = B + Dm + ETR
$$\pm \Delta V(S)$$
 - Eh - Rr
Rv = 28.5 + 1.1 +17.7 - 3.5 - 24.2 - 1.0
Rv = 18.6 hm³ anuales

De esta manera, la recarga total media anual está definida por la suma de las entradas:

7.4 Balance hidrometeorológico

Como se comentó anteriormente, en la porción norte del acuífero no existe información piezométrica actual ni histórica; la escasa información disponible procedente de recorridos de campo, es puntual y se encuentra dispersa en tiempo y espacio, de tal manera que no es posible elaborar configuraciones del nivel estático que permitan el planteamiento de un balance de aguas subterráneas en esta región. Aunado a esto, existen escasos aprovechamientos del agua subterránea y se encuentran muy dispersos en pequeños valles intermontanos.

Por todas estas razones, se optó por plantear el balance hidrometeorológico en una superficie de 1,520 km², que no está incluida en el balance de aguas subterráneas, para estimar de manera conservadora el volumen de agua susceptible de infiltrarse para recargar al acuífero. La recarga vertical total que recibe el acuífero (volumen susceptible de infiltrarse) se obtuvo mediante el planteamiento de un balance hidrometeorológico, mediante la siguiente expresión:

$$V_{LL} = V_{ETR} + V_{ESC} + V_{INF}$$
 (3)

V_{LL}= Volumen de Iluvia;

V_{ETR}= Volumen evapotranspirado;

V_{ESC}= Volumen escurrido;

V_{INF}= Volumen infiltrado;

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

$$V_{INF} = V_{LL} - V_{ETR} - V_{ESC}$$
 (4)

El volumen de lluvia que se precipita en la superficie cubierta por el acuífero se obtiene al multiplicar su área 1,520 km² por la lámina media de precipitación anual (450 mm):

$$V_{LL}$$
= 1,520 km² (0.450 m) = **684.0 hm³ anuales**

Para la estimación de la evapotranspiración real se utilizó la ecuación empírica de Coutagne, considerando los valores promedio anual de precipitación de 450 mm y temperatura de 18.4° C, obtenidos como promedio de las estaciones climatológicas Miquihuana, Bustamante y Tula, durante el periodo 1963-2010. Coutagne propuso la ecuación siguiente para calcular la evapotranspiración real:

COUTAGNE ETR = P-
$$\chi$$
P²

Donde:
ETR= Evapotranspiración m/año
P = precipitación en m/año
 $\chi = 1/(0.8 + 0.14 \text{ t})$
t = temperatura en °C

La fórmula sólo es aplicable para valores de la precipitación media anual (P) comprendidos entre 1/8X y 1/2X, en la que ETR y P se expresa en metros, y T en °C. Si P es menor que $1/8\lambda$ la ETR es igual a la precipitación, es decir, no existe escurrimiento; si la precipitación es mayor que $1/2\lambda$ la ETR es prácticamente independiente de P y su valor está dado por ETR = 0.20 + 0.035 T.

Aplicando la fórmula de Coutagne se obtiene una lámina de evapotranspiración real de 390.0 mm anuales. Por lo tanto el volumen de ETR es:

$$V_{ETR}$$
 = 1,520 km² (0.390 m) = **592.8 hm³ anuales**

Para determinar el volumen de escurrimiento debido a la lluvia se utilizó el método establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, publicada en el Diario Oficial de la Federación, de fecha 27 de marzo de 2015, 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 norma establece la siguiente relación:

VOLUMEN ANUAL DE PRECIPITACIÓN *
ESCURRIMIENTO = ANUAL DE LA
NATURAL DE LA CUENCA CUENCA CUENCA *

COEFICIENTE DE
CUENCA *

COEFICIENTE DE
CUENCA 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 del conocimiento de campo, se clasifican los suelos 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 4 y se determina el uso actual del suelo.

Existen diferentes tipos y usos de suelo, el valor de K se calcula como la resultante de subdividir el área de balance en zonas homogéneas para obtener el promedio ponderado.

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

Si K resulta menor o igual que 0.15, Ce = K (P-250) / 2000;Si K es mayor que 0.15, Ce = K (P-250) / 2000 + (K-0.15) / 1.5;

Donde:

P= Precipitación anual;

Ce = Coeficiente de escurrimiento anual;

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

Tabla 4. Valores de k en función del tipo y uso del suelo (NOM-011-CONAGUA-2015)

	TIPO DE SUELO TIPO DE SUELO TIPO DE SUELO								
USO DE SUELO	Α	В	С						
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 0.26						
Cubierto del 50 al 75%	0.12	0.22							
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		CARACTERISTICAS							
А	Suelos permeables, tales como arenas profundas y loes poco compactos								
В	Suelos medianamente permeables, tales como arenas de mediana profundidad; loes algo más compactos que los correspondientes a los suelos Tipo A; terrenos migajosos								
С	Suelos casi impermeables, tales como arenas o loes muy delgados sobre una capa impermeable, o bien arcillas								

De acuerdo con la cartografía del CONABIO escala 1:1'000,000 para el tipo y uso de suelo, predominan los tipos Regosol, Xerosol y Castañozem (figura 7).

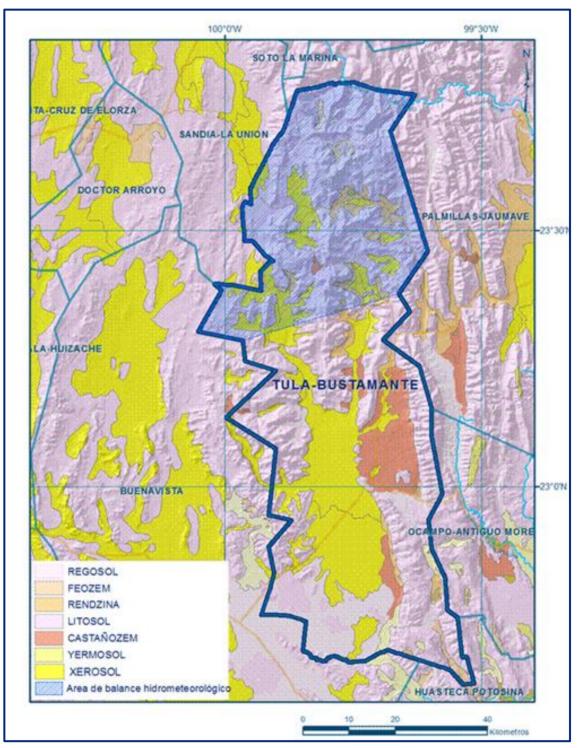


Figura 7. Tipo de suelo

En cuanto al uso de suelo (figura 8) de acuerdo con la cartografía de INEGI escala 1:1,000,000, el 48% del área está cubierta por matorral con cobertura de pastizal con cobertura menor del 50%, suelo tipo B, por lo que K=0.28; 10% es de zona agrícola de granos pequeños, suelo tipo B con K=27, el 42% restante de la superficie está cubierta por bosque, con cobertura del 25 al 50%, suelo tipo B, por lo que K=0.26; K ponderado = 0.28 (0.48) + 0.27 (0.10) + 0.26 (0.42) = 0.2706

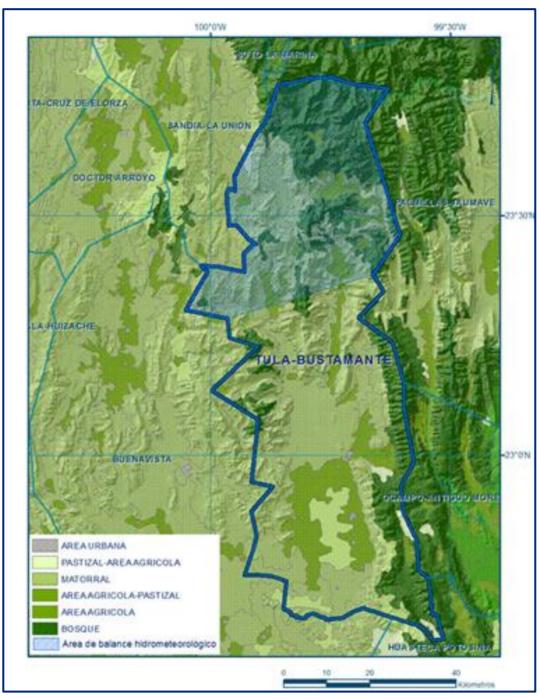


Figura 8. Uso de suelo

De esta manera, el valor de K es igual a 0.2706, valor que se aplicó en la siguiente ecuación para obtener el coeficiente de escurrimiento (Ce):

Aplicando este coeficiente de escurrimiento al valor de la lluvia se obtiene el volumen del escurrimiento:

$$V_{esc} = 0.1075 (684.0 \text{ hm}^3) = 73.5 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

Sustituyendo valores en la ecuación (4), se obtiene lo siguiente:

$$V_{INF} = V_{LL} - V_{ETR} - V_{ESC}$$

 $V_{INF} = 684.0 - 592.8 - 73.5$
 $V_{INF} = 17.7 \text{ hm}^3/\text{año}$

Al dividir el volumen promedio anual infiltrado, entre el volumen anual promedio precipitado, que es de 684.0 hm³/año, se obtiene el coeficiente de infiltración de 0.026. De acuerdo con lo anterior, el volumen susceptible de infiltrarse es de 17.7 hm³/año en la superficie de 1520 km². Por lo tanto **Rv = 17.7 hm³/año.** La recarga total, tanto en el área de balance de aguas subterráneas como en la superficie del balance hidrometeorológico es:

$$R = 26.1 + 17.7 = 43.8 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

8 DISPONIBILIDAD

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

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

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 43.8 hm³/año, todos ellos son de recarga natural.

8.2 Descarga natural comprometida (DNC)

La descarga natural comprometida se determina sumando los volúmenes de agua concesionados de los manantiales y del caudal base de los ríos que está comprometido como agua superficial, alimentados por el acuífero, más las descargas que se deben conservar para no afectar a los acuíferos adyacentes; sostener el gasto ecológico y prevenir la migración de agua de mala calidad hacia el acuífero. Para este caso, su valor es de **1.1 hm³ anuales,** que corresponde a las salidas subterráneas que presenta el acuífero.

8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)

La extracción de aguas subterráneas se determina sumando los volúmenes anuales de agua asignados o concesionados por la Comisión mediante títulos inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), los volúmenes de agua que se encuentren en proceso de registro y titulación y, en su caso, los volúmenes de agua correspondientes a reservas, reglamentos y programación hídrica, todos ellos referidos a una fecha de corte específica.

En el caso de los acuíferos en zonas de libre alumbramiento, la extracción de aguas subterráneas será equivalente a la suma de los volúmenes de agua estimados con base en los estudios técnicos, que sean efectivamente extraídos aunque no hayan sido titulados ni registrados, y en su caso, los volúmenes de agua concesionados de la parte vedada del mismo acuífero.

Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de **40,796,988 m³ anuales,** que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **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.

DMA = R - DNC - VEAS DMA = 43.8 - 1.1 - 40.796988 DMA = 1.903012 hm³/año.

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **1,903,012 m³ anuales.**

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 NR Maquinaria, S.A. de C.V.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), 1980. Servicios de Prospección y Levantamientos Geológicos y Geofísicos en la Zona de Miquihuana y Tula, estado de Tamaulipas. Realizado por Geohid.