

Provincias hidrogeológicas de México

Luis Velázquez Aguirre

Subgerencia de Exploración Geohidrológica/Gerencia
de Aguas Subterráneas/CNA

Anselmo Ordaz Ayala

Jefatura del Proyecto de Prospección
Geohidrológica/Gerencia de Aguas Subterráneas/CNA

En este artículo se enumeran y describen las características fisiográficas, climatológicas e hidrológicas de las once provincias hidrogeológicas en que se ha dividido la República Mexicana: Península de Baja California, Planicies costeras del Pacífico, Sierra Madre Occidental, Cuencas aluviales del Norte, Sierra Madre Oriental, Meseta Central, Planicie costera del Golfo de México, Faja volcánica Transmexicana, Sierra Madre del Sur, sierras y valles del Sureste y Península de Yucatán. Con ello se proporciona un panorama hidrogeológico completo del país.

Antecedentes

La división de la República Mexicana en provincias hidrogeológicas (véase ilustración 1), es la respuesta a la necesidad de identificar regionalmente a ciertas áreas que se singularizan por su fisiografía y homogeneidad geológico-estructural, así como por ciertas características hidráulicas como la porosidad, permeabilidad y transmisividad de las rocas.

En esta delimitación de provincias hidrogeológicas se tomaron como base la división de las regiones hidrológicas de la SARH, las de las provincias fisiográficas y geológicas así como la de los terrenos tectonoestratigráficos del país. Además, se consideró como parte fundamental el comportamiento del agua subterránea en cada una.

Se destaca que gran parte de la información de algunas de las provincias hidrogeológicas que se presentan para nuestro país, se tomó de la publicación *Hidrogeology*, que fue realizada con la colaboración de técnicos mexicanos para la Sociedad Geológica de América en 1988, con motivo del Primer Centenario de la citada sociedad.

Al considerar los diferentes factores a los que se hizo mención, el país se dividió en 11 provin-

cias hidrogeológicas, resaltando de cada una su distribución y extensión, así como sus condiciones climáticas e hidrogeológicas (véase cuadro 1).

Con el propósito de tener un panorama general sobre el comportamiento de las rocas con respecto al agua subterránea en las diferentes regiones, se presenta esta primera versión.

Provincias hidrogeológicas

Península de Baja California

- **Localización.** La Península de Baja California (véase ilustración 2) comprende una superficie de 143 492 km² y en ella quedan incluidos en su totalidad los estados de Baja California y Baja California sur; su característica es estar constituida por montañas de forma irregular, con una orientación general noroeste-sureste, teniendo a sus alrededores cuencas rellenas con materiales sedimentarios. La elevación de la Península varía desde el nivel del mar, en el Océano Pacífico y el Golfo de California, hasta 2000 m, en la parte más alta de las montañas.
- **Clima.** La temperatura media anual fluctúa de 16°C en la zona costera a 21°C en el desierto,

con una variación de 38°C en verano y un clima tipo mediterráneo en el área costera; la precipitación ocurre principalmente en el invierno, variando de 50 mm/año en el desierto, entre 100 y 300 mm/año a lo largo de la costa y hasta 450 mm/año en las zonas montañosas.

- **Hidrogeología.** Las áreas montañosas, por su alta elevación y precipitación, son las principales zonas de recarga y donde se inician las corrientes superficiales más importantes que llegan hasta las cuencas aluviales más bajas. Las rocas consolidadas que forman parte de las montañas, constituyen acuíferos con transmisividades menores a 185 m²/día y conductividades hidráulicas menores a 3 m/día; las características hidráulicas son generalmente el resultado de la permeabilidad por fracturamiento, y cerca de la superficie por el intemperismo de las rocas.

La Formación Salada del Cuaternario Reciente, constituida por areniscas arcillosas, arenas, limos y arcillas de tipo marino, aluvial, eólico y deltaico, representa los principales acuíferos en explotación.

En la península de Baja California las cuencas aluviales del Cuaternario Reciente son pequeñas. El relleno sedimentario es menor de

100 m, con un espesor y una anchura promedio de 5 km; son de forma irregular y los cauces de las corrientes se interdigitan y se extienden de 8 a 15 km, tierra adentro desde la costa. Debajo de los cauces de los arroyos estas rocas sedimentarias del Plioceno y Pleistoceno consisten en areniscas y lutitas intercaladas con conglomerados y estratos de arena y arcilla; los sedimentos producen menos agua que el aluvión, cubren una mayor área y tienen como máximo espesor 600 metros.

La mayoría del área de tierra adentro consta de montañas formadas principalmente por rocas ígneas y metamórficas pre-cenozoicas; el tipo de roca dominante es granito, el cual produce agua básicamente de un sistema de fracturas que llega como máximo hasta 100 m de profundidad. Los granitos remanentes se intemperizan con facilidad y la desintegración granítica produce agua para pozos menores de 30 m de profundidad. En el nivel regional la ocurrencia y el movimiento del agua subterránea del acuífero son en gran parte controlados por la topografía.

La cordillera peninsular se extiende desde Tijuana-Mexicali hasta los Cabos, con aproxi-

1. Provincias hidrogeológicas de México



1. Descripción y resumen de características hidráulicas

Región	Situación hidrogeológica	Rango de variación de las características hidráulicas de los acuíferos dominantes*	T m²	K m/d	R mm/año	Q l/s
1.- Península de Baja California	Valles relativamente planos que tienen como base gruesos depósitos de aluvión separados por montañas alineadas, compuestas por rocas sedimentarias y metamórficas de edad mesozoica y rocas volcánicas del Cenozoico.	10-200	1-100	5-50	10-150	
2.- Planicie costera de Pacífico	Planicies costeras que en algunas áreas se internan al continente varias decenas de kilómetros, compuestas por sedimentos arenosos hacia el interior; su base la forman rocas intrusivas y metamórficas del Mesozoico y volcánicas del Cenozoico.	10-100	5-100	5-50	5-150	
3.- Sierra Madre Occidental	Una región disectada relativamente alta, compuesta por una compleja secuencia de rocas volcánicas del Cenozoico cubiertas en algunos lugares por delgados depósitos de suelos residuales.	100-10 000	10-500	10-100	5-50	
4.- Cuencas aluviales del norte	Valles relativamente planos que tienen como base gruesos depósitos aluviales separados por alargadas y discontinuas cadenas de montañas compuestas, en parte, de rocas sedimentarias paleozoicas y mesozoicas y en parte, de rocas volcánicas del Cenozoico.	10-2000	10-200	5-50	10-150	
5.- Sierra Madre Oriental	Área relativamente alta de cadenas de montañas anticlinales y valles sinclinales compuestos por rocas sedimentarias del Mesozoico cubiertas por delgadas capas de suelos residuales.	10-1000	1-50	5-50	10-200	
6.- Meseta central	Valles relativamente planos que tienen como base gruesos depósitos aluviales separados por suaves cadenas de montañas compuestas por rocas sedimentarias del Paleozoico y Mesozoico y por rocas volcánicas del Cenozoico.	10-2000	10-200	5-50	10-100	
7.- Planicies costeras del Golfo de México	Planicies relativamente bajas poco disectadas que descansan sobre una interstratificación compleja de arenas, limos y arcillas del Mesozoico y Cenozoico que progresivamente se hacen más densos hacia la costa.	500-10 000	5-100	5-500	10-100	
8.- Faja volcánica transmexicana	Un área de montañas altas compuesta por una secuencia compleja de rocas volcánicas del Cenozoico, con fosas profundas rellenadas con material lacustre del Terciario y Cuaternario.	100-10 000	10-500	10-100	10-150	
9.- Sierra Madre del Sur	Área montañosa altamente disectada, compuesta por rocas metamórficas y paleozoicas, rocas sedimentarias del Mesozoico y rocas volcánicas del Mesozoico y Cenozoico, cubiertas en las altiplanicies por suelos residuales y en las costas por material granular.	5-5000	1-200	10-100	1-100	
10.- Sierras y valles del sureste	Área relativamente alta de cadenas de montañas anticlinales y valles sinclinales compuestos por rocas sedimentarias del Mesozoico cubiertas por delgadas capas de suelos residuales.	10-1000	1-50	5-5	10-200	
11.- Península de Yucatán	Una extensa planicie baja construida por rocas carbonatadas consolidadas a semiconsolidadas del Cenozoico.	10-2000	10-200	5-100	10-100	

T = transmisividad; K = conductividad; R = lámina de recarga; Q = producción por pozo

*Datos tomados y adecuados de la tabla 2. "Hydrogeologic Situation and Common Ranges of Selected Hydraulic Characteristics of the Ground-Water Regions of North America". *The Geology of North America*, Vol. O-2 Hydrogeology, GSA., 1988.

madamente 1700 km de largo y de 50 a 100 km de ancho. Las cordilleras montañosas al norte son largos batolitos graníticos que en los flancos tienen rocas metamórficas y sedimentarias del Mesozoico y, al sur, predominan rocas sedimentarias y volcánicas del Cenozoico.

La península, en lo general, es un gran bloque de falla que se está separando de la parte continental de México. Sus acuíferos, a excepción del de Mexicali, son casi inexistentes debido a la falta de infiltración, al resultado de precipitaciones dispersas en pequeñas áreas de captación y a la baja permeabilidad de las rocas.

Planicies costeras del Pacífico

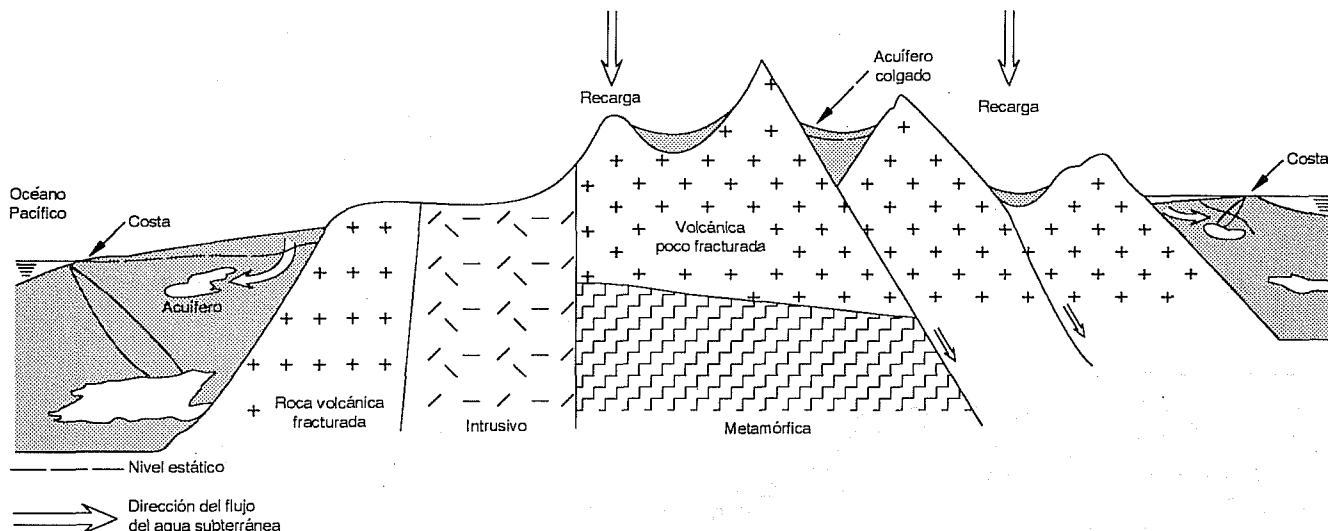
- **Localización.** Esta provincia hidrogeológica (véase ilustración 3) abarca una superficie aproximada de 104 491 km² y comprende la porción occidental de los estados de Sonora, Sinaloa y Nayarit; limita al norte con el Valle Imperial en los Estados Unidos, al oriente con la Sierra Madre Occidental y al sur y poniente, con el Océano Pacífico. La elevación de toda esta provincia varía desde el nivel del mar hasta los 200 metros.

- **Clima.** Las condiciones climáticas varían de desérticas a semidesérticas; la temperatura media anual cambia de 16°C en la zona costera a 21°C en el desierto, y alcanza los 38°C en el verano. La precipitación ocurre principalmente en el invierno, variando de 50 mm/año en el desierto hasta 380 mm/año a lo largo de la costa, incrementándose hacia los flancos de la Sierra Madre Occidental.
- **Hidrogeología.** Las rocas que predominan son sedimentarias; metamórficas e ígneas; estas últimas ocupan una gran área y suprayacen a antiguas superficies de erosión de rocas sedimentarias y plutónicas; en general, estas rocas son bordeadas por los sedimentos aluviales que, junto a los derrames volcánicos del Cenozoico constituyen los mejores acuíferos.

Los principales acuíferos están asociados a deltas cercanos a las costas; al oriente, hacia las partes altas, se encuentran en los abanicos aluviales formados de materiales gruesos provenientes de las montañas cercanas, son de poco espesor y de niveles profundos.

Los espesores más potentes de la planicie costera se encuentran en sedimentos continentales y marinos intercalados por derrames basálticos. La Formación Baucari, constituida por

2. Sección hidrogeológica esquemática de la provincia de Baja California



conglomerados, subyace a los mejores acuíferos en depósitos aluviales; esta formación, de origen sedimentario continental, presenta una permeabilidad de media a baja, ya que en ella prevalece el contenido de arcillas compactas.

En la meseta arenosa de San Luis Río Colorado, el acuífero está constituido por los sedimentos clásticos semiconsolidados que rellenan las depresiones formadas por las rocas pre-terciarias y cuya recarga subterránea proviene del lado norteamericano. El inconveniente de esta región es que el nivel estático del acuífero es profundo, por arriba de los 100 metros.

En el resto de los acuíferos que se localizan desde Caborca, en Sonora, hasta el Valle de Bahía de Banderas en Nayarit, la gran mayoría está constituida por sedimentos arenosos aluviales con buena porosidad y permeabilidad.

Sierra Madre Occidental

- **Localización.** Cubre aproximadamente 358 845 km². Esta cadena tiene 1500 km de longitud y es esencialmente paralela a la costa occidental de México. Se extiende desde el límite internacional, cerca de la población de Agua Prieta, en dirección sureste, hasta la región del Cinturón volcánico, en el paralelo 20° de latitud norte. El ancho promedio de la sierra es de 220 kilómetros (véase ilustración 4).
- **Clima.** Las condiciones climatológicas de esta zona varían desde húmedo templado, con lluvias todo el año en las partes altas de la sierra,

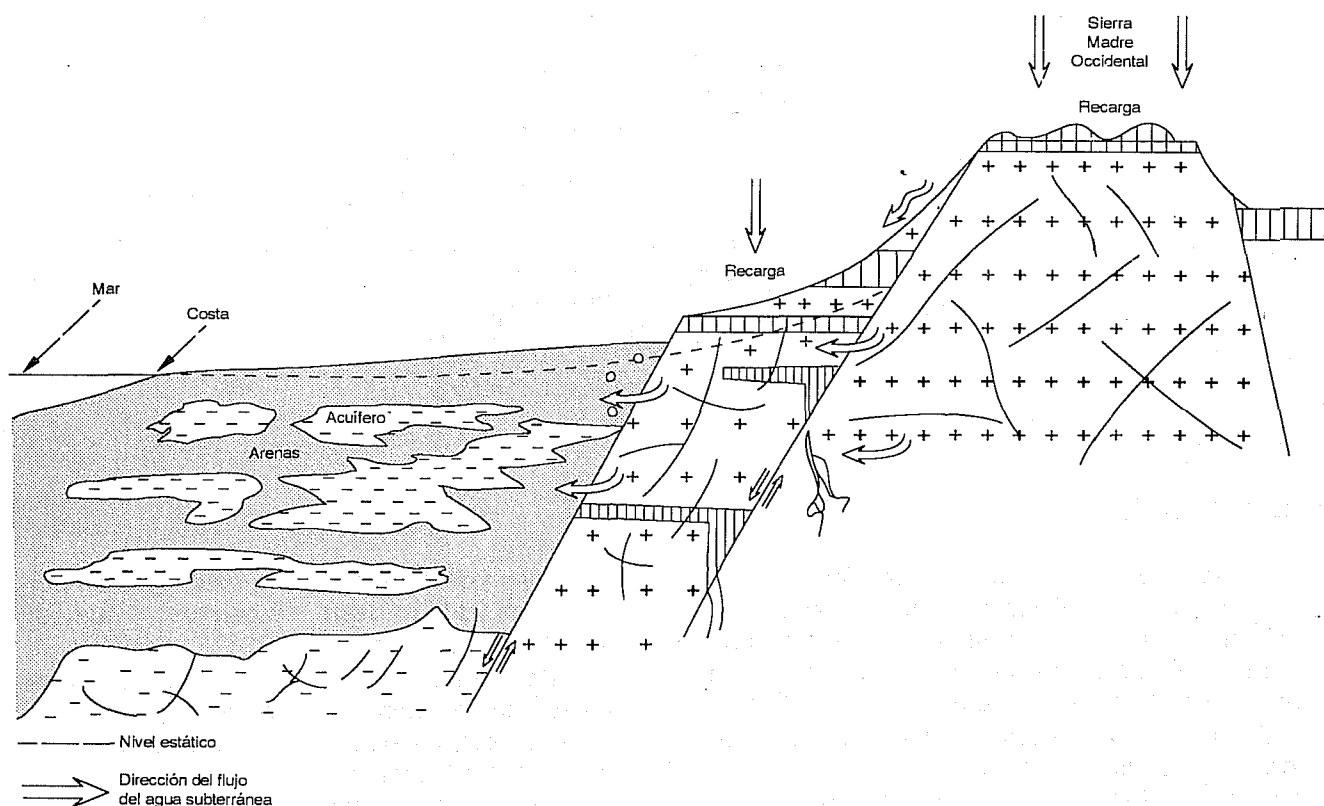
a un clima de estepa seco al este, y en las partes bajas, al lado oeste, es caluroso y húmedo con lluvias en el verano.

La precipitación en la Sierra Madre Occidental es principalmente de tipo orogénico; hacia la parte sur y cerca del Pacífico, la lluvia es mayor que 1600 mm por año; en la parte central, el promedio de la lluvia es ligeramente menor y en la porción oriental decrece hasta 600 mm. La precipitación máxima sucede de junio a septiembre y la mínima va de marzo a mayo; la temperatura media anual varía desde 12°C en el área alta hasta 22°C en las áreas bajas de la vertiente del Océano Pacífico; en la región de la Meseta central. La temperatura media es de 16°C; la evaporación potencial excede a los 2000 mm por año.

- **Hidrogeología.** Los ríos que descargan en el Pacífico son virtualmente perennes y los cauces en la parte baja son de gran longitud; por ejemplo, los ríos Yaqui y Culiacán tienen 680 y 340 km, respectivamente. Los principales ríos que fluyen hacia las cuencas aluviales del norte y Mesa Central son intermitentes, como el Conchos y el Nazas con longitudes respectivas de 480 y 400 km. Las grandes cantidades de agua superficial y subterránea que drenan al Pacífico son resultado de las abundantes lluvias que caen sobre las rocas con un amplio rango de permeabilidades.

Hacia el oriente, donde se encuentra el altiplano o las áreas de mesetas altas, hay flujos de lava, asociados con piroclásticos y conglomerados, donde la infiltración es pequeña debido a lo compacto de estos materiales y a lo abrupto

3. Sección hidrogeológica esquemática de la provincia Planicie costera del Pacífico



de la topografía que favorece más bien una gran disección fluvial.

El flujo de las corrientes aumenta por el flujo base de las rocas de baja permeabilidad que afloran a lo largo del cauce. Los principales ríos son el Yaqui, con un flujo promedio anual de 2700 Mm³/año; el Culiacán, con 3500 Mm³/año, el Nazas con 1100 Mm³/año, y el Conchos, con 5100 Mm³/año. La alta precipitación y los numerosos embalses son una contribución directa para los sistemas de agua subterránea. La recarga afecta a los manantiales que están a decenas de kilómetros de los embalses.

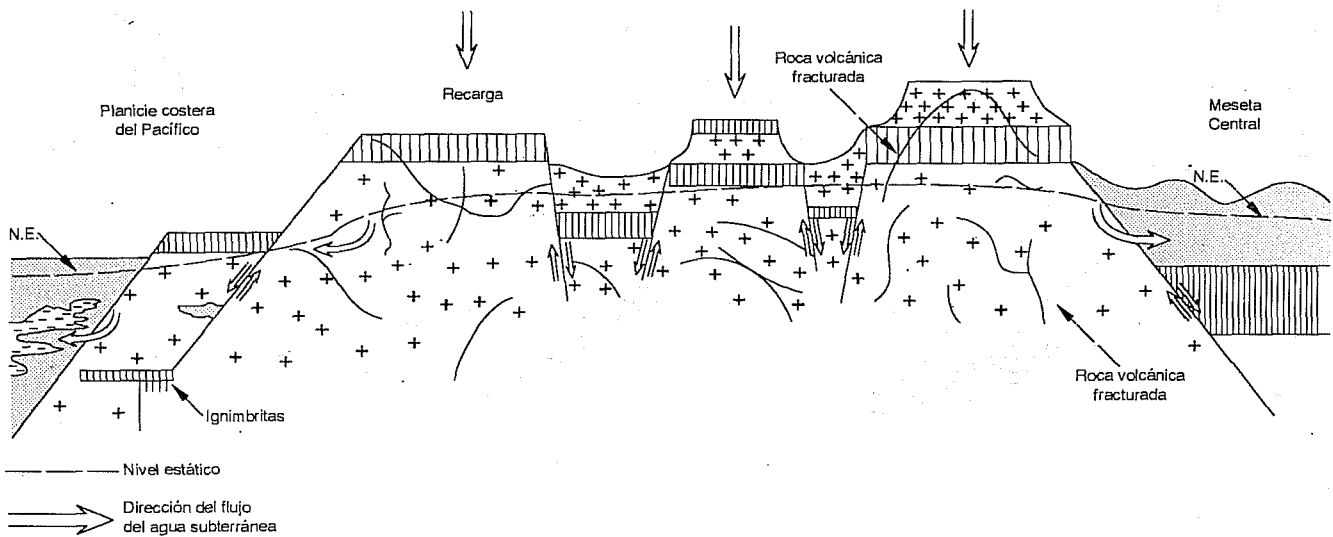
Hacia la porción occidental, esta provincia se encuentra constituida por densos bloques de lava inclinados, con grandes fallas, que dan idea de los fuertes eventos tectónicos a que estuvieron sometidas estas rocas de carácter riolítico fuertemente compactas y con poca infiltración. Estas rocas de baja permeabilidad constituyen el acuitardo. Su ancho y gran espesor, así como la relativa posición topográfica horizontal que tienen, hacen que la explotación del agua del subsuelo sea en pequeña escala y sólo se use para el suministro de pequeños poblados.

En general, el carácter hidrogeológico de esta provincia es tal, que la gran cantidad de agua captada en las cadenas montañosas se descarga local y regionalmente para escurrir a lo largo de las principales corrientes superficiales, salir de éstas e infiltrarse y recargar los grandes acuíferos de las provincias adyacentes.

Cuencas aluviales del norte

- **Localización.** Las cuencas aluviales del norte de México abarcan una superficie aproximada de 205 000 km². La forma del terreno del área es característica de una fisiografía de cuencas y cordilleras con formación de montañas que se levantan separadas por extensas planicies aluviales. Las estructuras que se presentan manifestando el hundimiento vertiginoso de las rocas preexistentes se efectúa durante el Terciario Medio y Superior; la tendencia de las montañas es en general norte-noroeste y dividen al área en varias cuencas; el término cuenca se refiere al *graben* rellenado por sedimentos situados entre las montañas, las cuales pueden tener drenaje endorreico y exorreico (véase ilustración 5).

4. Sección hidrogeológica esquemática de la provincia Sierra Madre Occidental



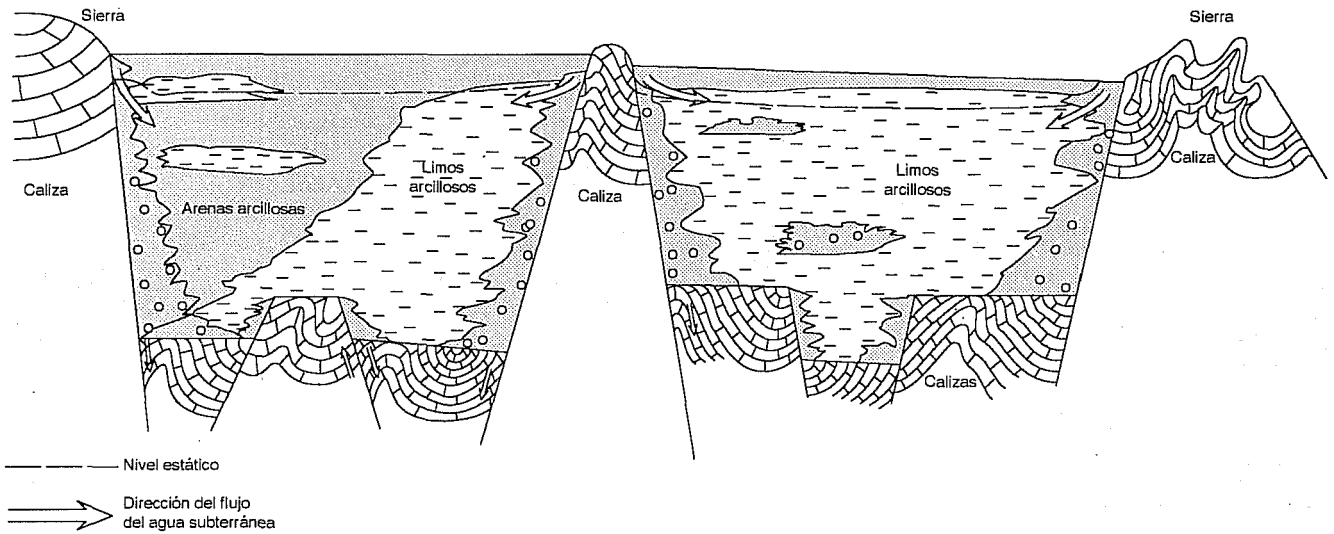
- **Clima.** En esta región varía de árido a semiárido y la temperatura media anual oscila entre 14°C y 18°C en toda la provincia. La precipitación está relacionada con la altitud de la superficie del terreno y en esta área la precipitación media anual varía de 400 a 800 mm. Las lluvias son sumamente raras y son absorbidas rápidamente por un suelo sediento, por lo que dichas aguas nunca llegan a verter al mar ni se juntan en cantidades grandes en el interior de los bolsones; por esta circunstancia en esta provincia no existen verdaderas corrientes.
- **Hidrogeología.** La región de las cuencas aluviales del norte incluye rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias, que pueden dividirse en dos amplios grupos de edades correspondientes al pre-Cenozoico y al Cenozoico. Las rocas de ambos grupos difieren en estructura, tipo y características del acuífero; en general, las pre-cenozoicas forman las montañas que bordean las cuencas aluviales.

Las montañas están constituidas de granito de edad pre-cámbrica, esquistos, *gneiss*, filitas, pizarras y cuarcitas (del pre-Cámbrico al Terciario Inferior); rocas sedimentarias carbonatadas, areniscas, limolitas y lutitas del Paleozoico al Mesozoico, y diversos tipos de rocas ígneas intrusivas y extrusivas del Cretácico Superior. Aunque estas rocas no forman parte significativa del acuífero, proporcionan la fuente de los materiales que rellenan las cuencas. También, sus características litológicas y estructurales influyen en las salidas de agua y en la infiltración, de allí que el agua circule y abastezca a las cuencas.

Las rocas del Cenozoico que rellenan las cuencas consisten en depósitos clásticos consolidados y no consolidados, interdigitados con rocas volcánicas. Los sedimentos fueron depositados durante y desde la formación de las cordilleras y cuencas propiciadas por fallas. Los depósitos más viejos son del Terciario Inferior al Medio y pueden tener varios miles de metros de espesor en algunos lugares. Las extensas áreas de dichos depósitos son poco conocidas. Intercalados con éstos se encuentran amplios depósitos de rocas volcánicas del Terciario Medio; los sedimentos fueron depositados en cuencas cerradas con orientación nortenoeste creadas por la tectónica extensiva.

Los abanicos aluviales en la base de las montañas se unen para formar extensos depósitos de pie de monte y los depósitos tipo playa ocurren cerca del centro, en la zona más baja de la cuenca; este tipo de medio ambiente de depósitos produce dos *facies* generales de cuenca: grano fino y bien seleccionado cerca del centro de la cuenca y grano grueso y pobremente seleccionado cerca del frente de la montaña; las *facies* de grano fino, en general, se localizan hacia el interior de la cuenca limitada por las fallas; en las cuencas cerradas las evaporitas se asocian íntimamente con las *facies* de sedimentos finos. La evaporita más común es el yeso, el cual está diseminado dentro de los depósitos finos o en estratos delgados. La anhidrita masiva y los depósitos de halita están presentes en algunas cuencas profundas y pueden tener cientos de metros de espesor. La *facie* de grano grueso es altamente heterogénea

5. Sección hidrogeológica esquemática de la provincia Cuencas aluviales del Norte



y los sedimentos varían desde limos y arcillas a guijarros y cantos rodados.

Las extensas áreas de los depósitos de cuenca fueron alteradas como resultado de un cambio en los esfuerzos tensionales de tipo regional que se produjeron durante el Mioceno Medio y Superior, el fallamiento normal profundo progresó de oeste a este durante ese periodo y fue acompañado por vulcanismo basáltico. Este periodo de formación de fallas dio lugar a la actual distribución de cordilleras y cuencas. Las cuencas del norte de México poseen su desagüe superficial cerrado; la mayoría de ellas también tiene un sistema de agua subterránea cerrado. Los depósitos del centro de las cuencas en gran parte son lacustres y consisten principalmente en limos, arcillas y evaporitas.

Los mayores acuíferos del área están compuestos de sedimentos de cuenca del Cenozoico, los cuales están contenidos dentro de los *grabens*, entre los bloques montañosos, y las montañas actúan como límites hidrogeológicos. Los sedimentos en la cuenca, en general, están hidráulicamente interconectados y forman un acuífero simple; localmente, la separación en una o varias unidades confinadas y una unidad superior libre, ocurre como resultado de la intervención de unidades de grano fino y, en algunos lugares, por intercalaciones de rocas volcánicas. Los sedimentos de cuenca se estiman de 2000 m de espesor y en algunos otros lugares pueden contener menos de 300 metros.

En general, el marco hidrológico de las cuencas cerradas es de dos tipos, endorreicas o exorreicas, como la de la Laguna de Guzmán

y Santa María, en el estado de Chihuahua. Se desconoce el flujo del agua superficial o el de la subterránea, al salir de la cuenca. Antes de su desarrollo, el mecanismo de descarga consistía en evaporación y transpiración de la vegetación, lo cual ocurre cerca del centro de la cuenca cerrada, bajo las presentes condiciones de desarrollo, siendo la mayor parte de la descarga a través de pozos.

Algunas de las cuencas que no son cerradas pueden estar hidráulicamente interconectadas y la salida de una puede ser parte de la entrada de otra en la dirección que baja el gradiente; muchas de las cuencas aluviales que son abiertas y están incluidas en un sistema regional en el cual, por lo general, se alinean en la misma dirección del flujo y tienen el sistema de salida del agua superficial. El flujo del agua subterránea en cada cuenca es controlado por el volumen y distribución del área de recarga y descarga y por las propiedades hidráulicas de los materiales del acuífero. La recarga está relacionada con la cantidad de precipitación alrededor de las montañas; dicha recarga se incrementa con la altitud y ocurre principalmente en el área de contacto aluvión-roca, en el frente de la montaña y a lo largo de la superficie de desagüe, cerca del eje central de la cuenca. El flujo subterráneo que entra y sale de las cuencas ocurre en la zona de unión entre ellas pero casi siempre es pequeño; sin embargo, puede constituir una gran parte del total de la recarga en la mayoría de las cuencas del norte de Sonora. Bajo las condiciones anteriores al desarrollo, la descarga de

las cuencas con sistemas de desagüe ocurre como flujos subterráneos, evapotranspiración y corrientes.

La influencia geológica en la hidrología de las cuencas aluviales del norte es importante porque determina la ocurrencia y el movimiento de las aguas subterráneas. Los límites laterales y verticales del sistema acuífero en una cuenca están controlados por los cambios litológicos y de permeabilidad, los cuales se relacionan con la forma de depositación aluvial y con la estructura geológica.

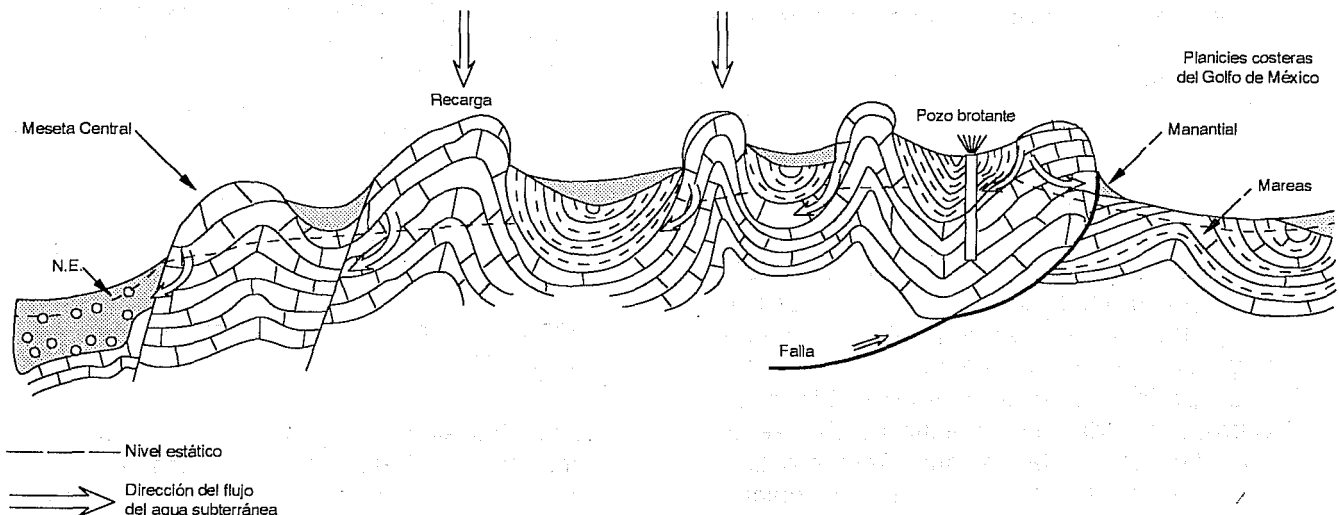
Las rocas pre-cenozoicas y volcánicas cenozoicas generalmente son de baja permeabilidad y dificultan el movimiento del agua subterránea, pero pueden ocurrir en rocas carbonatadas que no tienen que ser significativamente perturbadas a nivel estructural. El material aluvial que forma el acuífero principal en las cuencas fue erosionado de las montañas adyacentes por las corrientes con fuerte gradiente y depositado como abanicos aluviales. En general, los depósitos en abanico se van haciendo cada vez más finos hacia el centro de las cuencas; sin embargo, algunos estratos de grano grueso pueden extenderse hasta la parte central, permitiendo que los altos y bajos de la conductividad hidráulica de los materiales tiendan a disminuir con el incremento en los grados de deformación y consolidación y con el incremento en las proporciones de material grueso y fino. Los depósitos de pre-cuenca y de las cordilleras están interdigitados con rocas volcánicas y son deformados en el nivel estructural; se presentan de moderada a altamente

consolidados y constituyen acuíferos pobres. Las cuencas bajas rellenas cerca de la grieta del río Grande fueron perturbadas por una falla normal pero no tienen inclinación fuerte y son acuíferos importantes. Cerca de los centros de las cuencas a lo largo del río Grande, éstas se rellenaron con material fino y, en consecuencia, no son buenas productoras de agua.

Sierra Madre Oriental

- **Localización.** Esta provincia cubre una superficie de 250 096 km² (véase ilustración 6). Se divide en tres subregiones: la norte, la central y la sur, que se han designado, respectivamente, como: sector Sierra del Burro, sector Ojinaga-La Paila y sector Sierra Madre Torreón-Monterrey-Tamazunchale.
- **Clima.** Las condiciones climáticas de la Sierra Madre Oriental varían con la topografía y la latitud. Predominan dos tipos principales de climas: el templado-semicálido-semiárido que abarca desde el río Bravo y el centro de Coahuila y continúa por toda la porción occidental de la sierra; aquí la precipitación media anual es de 500 mm y la temperatura de 22°C, que disminuye localmente en algunos sitios altos hasta los 16°C. El otro tipo de clima en la porción oriental de la sierra abarca desde el sur de Monterrey hasta el límite con la Faja volcánica transmexicana; se caracteriza por variar de tropical húmedo o templado a subhúmedo y semicálido a húmedo; la precipitación media anual en esta zona varía de 700 mm en la cercanía de

6. Sección hidrogeológica esquemática de la provincia Sierra Madre Oriental



Monterrey hasta 2000 mm en la porción norte del estado de Hidalgo. La temperatura media anual es de 22°C.

- *Hidrogeología.* La infiltración, circulación y ocurrencia del agua subterránea en la Sierra Madre Oriental están directamente influidas por la litología y estructura de las rocas. Esta región se compone básicamente de una serie de rocas calcáreas plegadas de edad cretácica, que tienen una orientación general noroeste-sureste. La característica principal de esta provincia es que esta secuencia de rocas carbonatadas permeables se encuentra empaquetada entre dos secuencias de carácter arcillo-calcáreo en la base y arcillo-arenoso en la cima, correspondientes a los depósitos del Jurásico Superior y Cretácico Superior, respectivamente, y que forman los materiales confinantes.

– Sector Sierra del Burro

Las rocas del Cretácico Inferior y Medio que se localizan en esta sierra son altamente solubles, calizas de estratificación mediana con pequeñas cantidades de lutitas. Estas rocas varían lateralmente dentro del arrecife Stuart City, el cual tiene una alta porosidad primaria y algunas fracturas que incrementan la permeabilidad. Las rocas del Cretácico Superior contienen más arcilla y tienen una permeabilidad más baja.

El flanco este de la Sierra del Burro está cubierto por rellenos aluviales y conglomerados del Terciario y Cuaternario, producidos por la erosión e intemperismo de las regiones topográficamente más altas. Estos depósitos tienen un espesor aproximado de 50 m, son altamente permeables y contienen importantes volúmenes de agua subterránea.

Las diferentes unidades de rocas que existen en la subregión contienen acuíferos confinados. Algunas de las estrechas capas confinantes se rompieron por esfuerzos tensionales que mejoraron el grado de interconexión hidráulica entre los acuíferos. Estos son recargados por el agua de lluvia que se infiltra en las partes altas de la Sierra del Burro y, generalmente, fluyen al noreste.

La prolongación sureste de la Sierra del Burro, conocida como el anticlinal Peyote, es un anticlinal con flancos suavemente buzantes. Aquí los afloramientos de la Formación Austin están constituidos por rocas calcáreas

con pequeñas cantidades de pizarras. En la parte fracturada de esta formación ocurre un acuífero somero de pequeño potencial. El flanco de la Sierra del Burro está cubierto por aluvión granular permeable de 30 a 50 m de espesor, el cual es recargado por el acuífero en las calizas.

– Sector Ojinaga–La Paila

Esta subregión en rocas calcáreas plegadas del Cretácico forma una serie de anticlinales que, a su vez, producen sierras orientadas NW–SE. Las sierras emergen en forma aislada dentro de las planicies formadas por el material aluvial. Estos sedimentos del Cretácico fueron depositados en un mar abierto sobre una plataforma y están constituidos por micrita densa, con poca o nula permeabilidad primaria. Dichos sedimentos no forman acuíferos, excepto en las zonas plegadas que han sido fracturadas, donde la disolución a lo largo de las fracturas resulta del desarrollo de buena permeabilidad.

En esta subregión se localizan dos tipos de acuíferos: los que ocurren en los rellenos granulares sedimentarios y aquellos que se presentan en las calizas.

Los acuíferos en los sedimentos granulares de los valles y cuencas contienen arenas y arcillas de baja permeabilidad y aguas salinas derivadas de la evaporación de los materiales acumulados en las porciones centrales de las cuencas. Los acuíferos en las calizas del Cretácico Medio afloran en las sierras y son recargados directamente por la lluvia; esta recarga se mueve hacia la parte baja de los valles. Las perforaciones profundas localizadas en los flancos de las sierras penetraron a los acuíferos a profundidades de 1000 y 2000 m. Cerca de los pisos de los valles, las fracturas que penetran los acuíferos dan lugar a grandes manantiales, como los de Múzquiz, Monclova y Cuatro Ciénegas, con gastos de 1000 litros/segundo.

– Sector Sierra Madre Torreón–Monterrey–Tamazunchale

Entre las sierras que se encuentran en las cercanías de Torreón existen valles intermontaños y cuencas constituidas por materiales aluviales formadores de acuíferos. La región

de la Laguna de Torreón es un área de clima árido y una de las principales regiones agrícolas de México. En ella existen alrededor de 3000 pozos para irrigación que tienen sobreexplotado al acuífero aluvial. Hacia el oeste y sur, los acuíferos de las rocas carbonatadas presentan espesores mayores de 1000 metros.

Las calizas pueden o no contener pequeñas cantidades de lutitas, están dolomitizadas y han estado sujetas a disolución. Este acuífero recarga a los aluviones sobreexplotados de la región lagunera, como se confirmó por los estudios isotópicos.

En la zona de Monterrey, en la parte más grande de la sierra, existen complejos arrecifales con una permeabilidad primaria que aumenta por el fracturamiento y forma zonas altamente permeables. Las elevaciones más altas representan las zonas de recarga y en las más bajas se localizan los acuíferos. Los anticlinales que forman los cerros de esta región tienen fuertes pendientes con flancos inclinados y estratos escarpados que favorecen la porosidad primaria y la secundaria, lo que permite el desarrollo de acuíferos de gran potencial. Sobre los flancos y anticlinales con nariz buzante de estas estructuras, el agua se encuentra a una profundidad aproximada de 1000 m y bajo condiciones artesianas. Este tipo de acuífero es principalmente explotado en la zona de Monterrey-Salttillo, donde la abundante producción satisface las necesidades de Monterrey, la tercera metrópoli más grande del país.

En la parte sur de la Sierra Madre Oriental, en la zona de Tamazunchale, el agua se infiltra en las porciones altas de ésta y es descargada a través de grandes manantiales en la base de las sierras adyacentes a la planicie costera. Los patrones de sedimentación de los carbonatos juegan un papel fundamental en el desarrollo del acuífero, la extensión del complejo arrecifal, el abra-doctor que se formó en las márgenes de la plataforma Valles-San Luis Potosí en el Albiano Cenomaniano, contiene carbonatos con alta permeabilidad. En el área existen numerosas dolinas y huecos donde el agua se infiltra, fluye lateralmente y descarga en forma de manantiales en la base de la sierra. Estos manantiales, como el Coy y Frío, se consideran entre los más grandes del mundo, ya que tienen descargas de 25 m³/segundo.

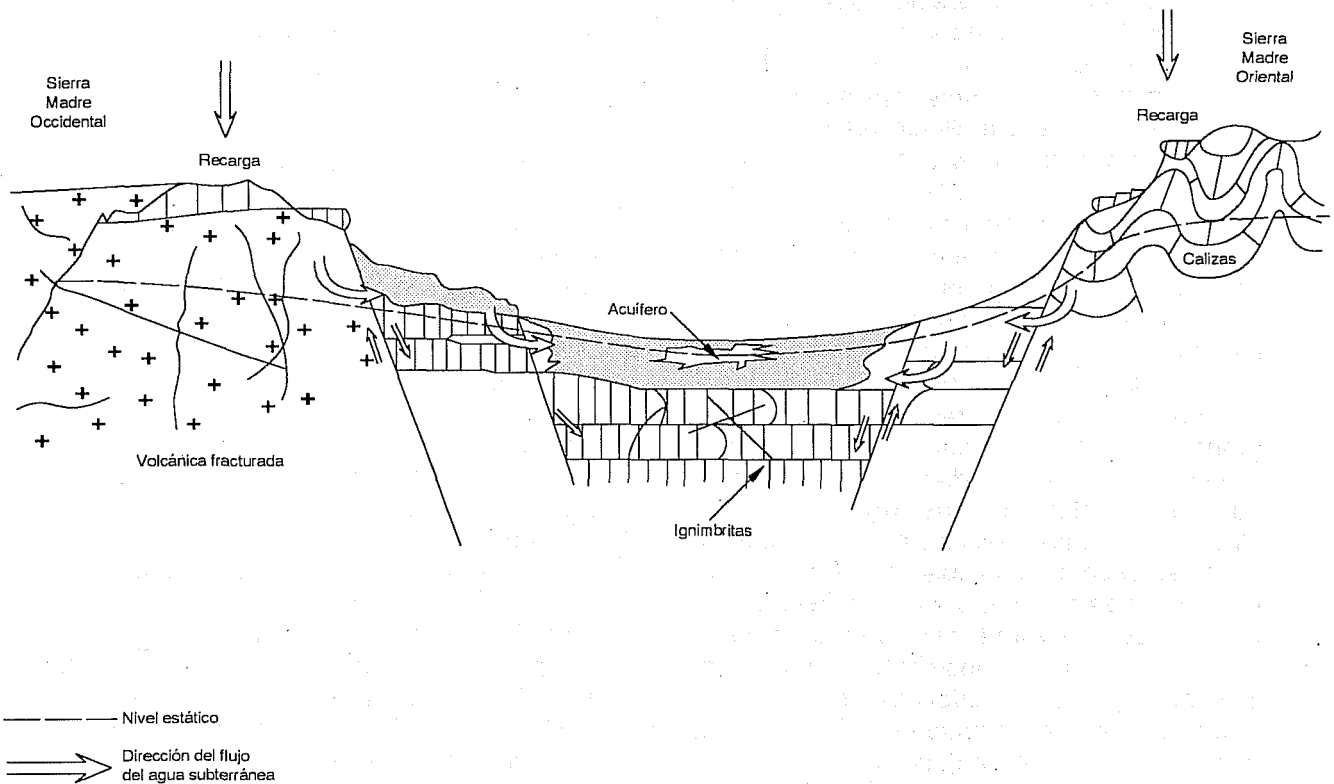
Meseta Central

- **Localización.** La Meseta Central (véase ilustración 7) se ubica en la parte central del país. Comprende una superficie de aproximadamente 102 519 km² e incluye parte de los estados de Durango, Zacatecas, San Luis Potosí, Aguascalientes, Jalisco, Guanajuato y Querétaro. Limita en sus porciones boreales y orientales con la Sierra Madre Oriental; al sur, con la Franja volcánica transmexicana y al poniente, con la Sierra Madre Occidental.
- **Clima.** La Meseta Central es muy uniforme en sus condiciones climáticas debido probablemente a su latitud y a su característica morfológica; en la mayor parte de la provincia predomina un clima de templado-semiseco a semiárido, con un microclima (al sur de San Juan de Guadalupe, Durango) semicálido, seco o árido. La precipitación media anual varía de 350 mm/año en San Juan de Guadalupe, a 600 mm/año en la zona de Sombrerete, Zacatecas; en general, en toda la provincia predomina la de 400 mm/año. La temperatura media anual oscila entre 16°C y 18°C en toda la provincia.
- **Hidrogeología.** La Meseta Central abarca parte de varias cuencas hidrológicas como las cerradas y áridas del norte, donde el agua es un recurso bajo y exiguo; la de Aguanaval; la de Nazas en su parte media; la del Grande de Santiago con los ríos Juchipila, Verde, San Juan de los Lagos y sus tributarios más orientales; así como los afluentes del Lerma y las sierras y llanuras del norte de Guanajuato.

En esta provincia hidrogeológica se encuentran rocas metamórficas, sedimentarias, consolidadas y no consolidadas y rocas ígneas extrusivas e intrusivas. En este conjunto existen algunas que son permeables, otras poco permeables y otras impermeables.

Entre las rocas permeables se considera a los conglomerados y areniscas de la Formación Nazas, las calizas de las formaciones Zuloaga y Cuesta del Cura, las rocas riolíticas en algunas áreas y los sedimentos granulares que rellenan los extensos valles. De estos materiales, los que constituyen los principales acuíferos de toda la provincia son los sedimentos granulares, aunque en algunas zonas como la ixtlera, la mayoría de estos acuíferos contiene agua de mala calidad. Entre los acuíferos donde se encuentran estos materiales destacan, entre otros, los de Calera, Vicente Guerrero, La Blanca, Aguascalientes, Ojo Caliente y San Luis Potosí, la

7. Sección hidrogeológica esquemática de la provincia Meseta Central



mayoría con problemas de sobreexplotación. Las rocas volcánicas riolíticas tienen una permeabilidad anisotrópica, debido posiblemente al fracturamiento en las zonas de falla o a sus características físicas, adquiridas durante las etapas de piroconsolidación. Existen varias zonas donde estas rocas constituyen acuíferos: la de Ojo Caliente, en Zacatecas, el Llano en Aguascalientes, Villa de Arriaga y Gogorrón, en San Luis Potosí y San Juan del Río en Durango. Entre éstas, las que más destacan son las de Gogorrón y San Juan del Río por haber pozos brotantes con caudales mayores a los 80 l/s. Sin embargo, es conveniente aclarar que en otras áreas, como El Llano y Villa de Arriaga, los niveles son profundos y los caudales modestos.

Una característica de los acuíferos riolíticos es el termalismo de sus aguas, que en ocasiones alcanzan hasta 42°C. En lo que se refiere a las calizas de la Formación Cuesta del Cura, dado que son rocas depositadas en una cuenca con porosidad primaria casi nula, es muy posible que ésta se haya incrementado por el fracturamiento como consecuencia del plegamiento y afallamiento sufridos durante la revolución laramídica. Como evidencia de que

estas rocas son permeables en algunas áreas, se tiene el pozo emplazado en la zona del Calabazal en Sombrerete, Zacatecas, el cual proporciona un caudal de 130 l/s, con una profundidad del nivel dinámico de 60 m. Otro sitio donde se encuentra otro pozo en estas calizas es el poblado de Manuel Avila Camacho, al sureste de San José de los Morteros, al norte de Zacatecas, el cual resultó brotante con 1 l/s. En Aguascalientes, al poniente de la Sierra de Tepezala, en un lugar denominado Las Pilas, se localizó otro pozo con 72 l/s. En Durango, por la zona de Ramón Corona, se conocen varias grutas, lo que significa que por lo menos en algunos lugares estas rocas están afectadas por la disolución.

Las rocas en las cuencas aluviales incluyen metamórficas, ígneas y sedimentarias del Paleozoico Superior al Reciente; en general, estas rocas están bordeadas por los sedimentos aluviales. Las rocas son: esquistos, calizas, areniscas y lutitas del Mesozoico e ígneas intrusivas y extrusivas del Mesozoico y Cenozoico. Aunque no forman parte de los acuíferos de la región, sí funcionan como basamento o barrera para el flujo subterráneo, además son las que

han dado origen a los sedimentos granulares que constituyen el sistema acuífero de mayores almacenamientos de agua subterránea en esta provincia.

Los depósitos granulares aluviales van del Terciario Medio hasta el Reciente y consisten en clásticos consolidados y no consolidados, intercalados con rocas volcánicas, entre las que predominan las ignimbritas riolíticas. Dichos depósitos granulares tienen varios cientos de metros de espesor y fueron, en gran parte, el relleno de depresiones o cuencas formadas en fosas tectónicas que se produjeron durante la revolución laramídica.

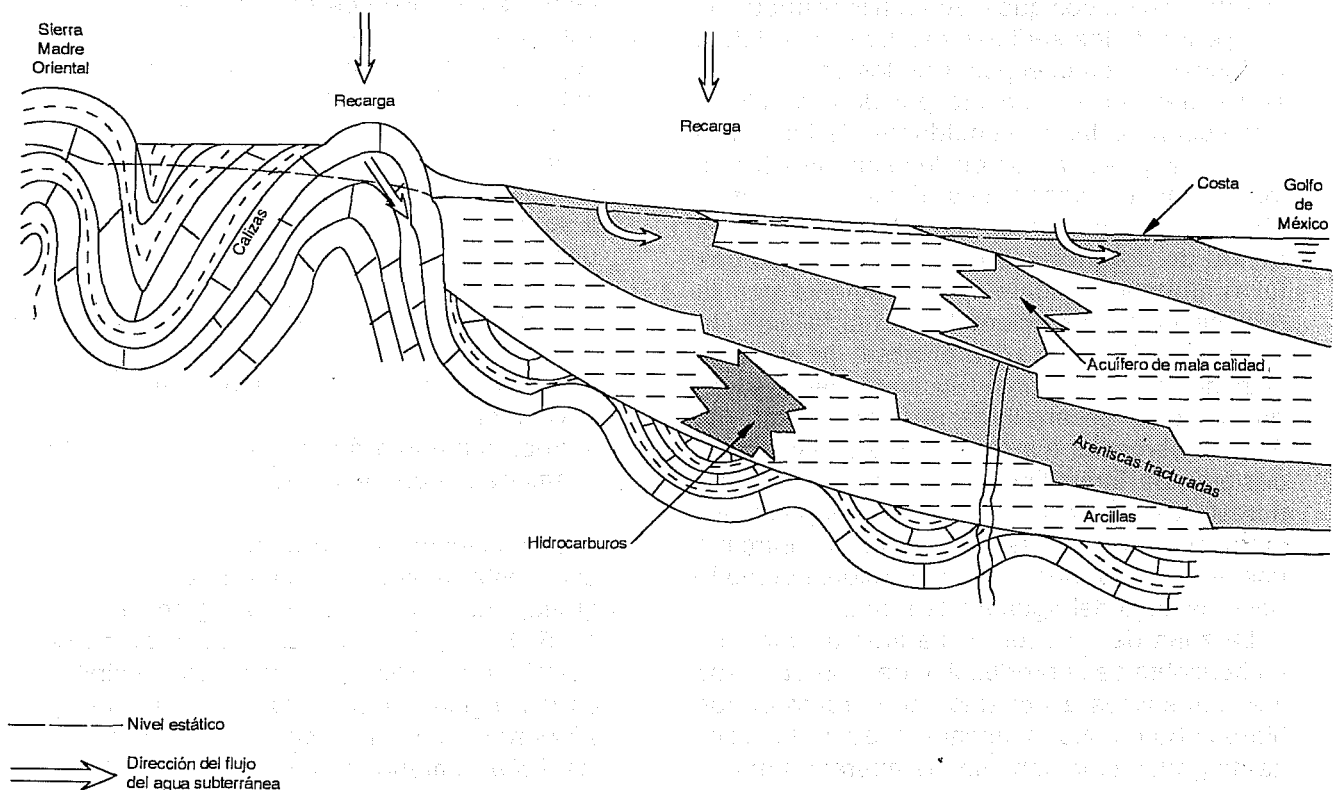
Los depósitos granulares abarcan del Terciario Inferior hasta el Cuaternario. Los abanicos aluviales están formados al pie de las montañas de las diversas cuencas cerradas del centro de México, propiciando el depósito de sales asociadas con arcillas, limos y arenas. La mayoría de las cuencas está separada y no tiene conexión hidráulica, por lo que el análisis geohidrológico de cada una no resulta tan complejo. Los principales acuíferos de esta provincia hidrogeológica lo constituyen los materiales granulares depositados en cuencas cerradas o

abiertas, salvo en casos excepcionales, como el Valle del Guadiana en Durango, donde el acuífero se encuentra en rocas volcánicas.

Planicies costeras del Golfo de México

- **Localización.** La provincia fisiográfica de la Planicie costera del Golfo (véase ilustración 8), se desarrolla de suavemente ondulada a plana y ocupa un área de 183 313 km², extendiéndose desde el río Bravo hasta la Laguna de Términos, cerca del suroeste de la península de Yucatán.
- **Clima.** Esta planicie costera tiene un clima muy variado, por ejemplo, en la parte norte predomina el cálido-semiárido; hacia la porción central, en las cercanías de Tampico, se tiene el tropical lluvioso cálido-subhúmedo y hacia la costa de Veracruz varía de tropical-cálido-subhúmedo a muy cálido-húmedo. La precipitación media anual oscila entre 500 mm al norte hasta 4 000 mm en las costas de Tabasco y Veracruz. La temperatura media anual es de 22°C al norte y 26°C al sur.
- **Hidrogeología.** Las Planicies Costeras del golfo se encuentran cubiertas por una cuña de rocas sedimentarias consolidadas y no consolidadas

8. Sección hidrogeológica esquemática de la provincia Planicies costeras del Golfo de México



del Cenozoico. Estos sedimentos descansan sobre las rocas del Mesozoico y tienen un espesor que varía de pocos metros, cerca de sus límites hacia tierra, a más de 6 000 m en la zona costera. Las rocas cenozoicas consisten en su mayoría de arena, limo y arcilla, derivados de la erosión de las zonas continentales altas. En estos sedimentos se han desarrollado muchos acuíferos regionales. Los sedimentos más antiguos de la planicie costera (cretácicos) en México, consisten en rocas de origen marino, con una permeabilidad mínima y regionalmente no contienen acuíferos importantes, debido a

- la presencia de áreas extensas de depósitos bentoníticos, y a
- la ocurrencia de material grueso en una matriz de sedimentos de grano fino, y sobre todo
- al predominio de sedimentos parecidos a los esquistos y areniscas compactas.

La permeabilidad que ocurre en las rocas cenozoicas es muy significativa; el contenido de fluidos es típicamente de agua salada o aceite. Las rocas de la Planicie costera se profundizan suavemente hacia el Golfo de México, excepto donde hay rasgos estructurales regionales tales como arcos, fallas, bahías, fosas, y levantamientos tectónicos que afectaron la distribución y espesor de los sedimentos. La profundidad, y algunas veces el espesor de los sedimentos, se ve afectada localmente por domos salinos que suben de las profundidades de los estratos de sal jurásica, los cuales son intrusivos a los sedimentos cenozoicos. El incremento más abrupto de espesor en unidades individuales dentro de distancias cortas está asociado con fallas (formadas contemporáneamente con la depositación). Relacionada con el fallamiento regional, existe una zona anormal de alta presión de fluidos (también llamada geopresión) que ha sido desarrollada por sedimentos del Eoceno cercanos a la costa, en algunas partes costeras de Tamaulipas y en la porción norte y noreste de Nuevo León. La alta geopresión o la transición de la presión hidrostática normal a una alta presión anormal, se considera como la base del flujo del agua subterránea.

La zona de geopresión ha sido típicamente un horizonte de la producción de hidrocarburos y aguas salinas asociadas con el retiro de los hidrocarburos. Normalmente, el agua de la zona de geopresión tiene una temperatura mayor de 100°C y contiene cantidades variantes de

metano. La energía concerniente a la década pasada se ha dirigido con una mayor atención a la zona de geopresión y a las aguas que ahí ocurren. La profundidad de esta zona varía desde 2000 a 4500 m.

El movimiento del agua en la zona de geopresión es lento y los datos de presión indican que generalmente es hacia arriba, donde se encuentra la zona de meteorización. Sin embargo, a causa de la permeabilidad insignificante de los sedimentos, el volumen de agua que fluye fuera de la zona de geopresión es relativamente muy pequeño en relación con el que circula en los sedimentos que contienen aguas meteóricas. La rápida depositación de los sedimentos ha provocado que se hundan poco a poco en la cuenca del Golfo de México, lo que ha dado como resultado un gran volumen de sedimentos compuestos bajo la actual línea costera.

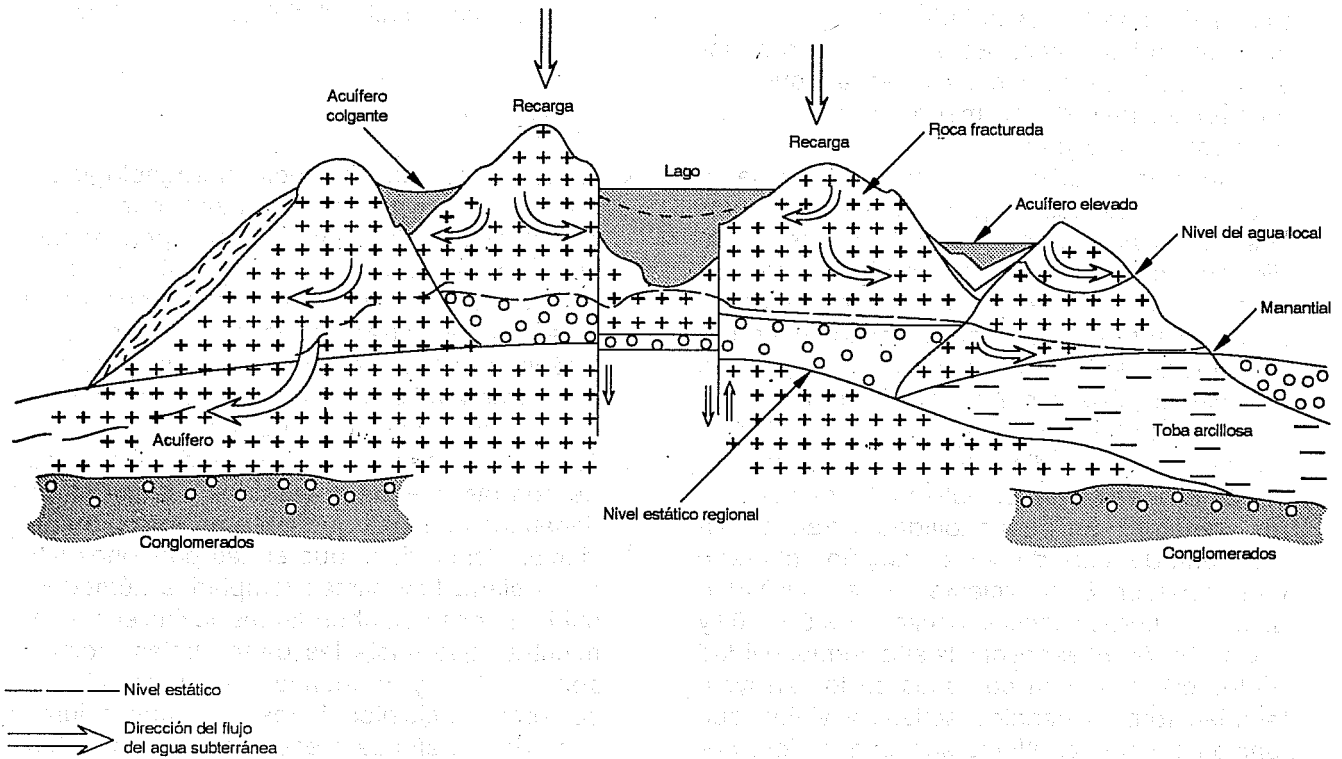
Faja volcánica transmexicana

- **Localización.** La región hidrogeológica conocida como Franja volcánica transmexicana (véase ilustración 9), coincide aproximadamente con la provincia fisiográfica del mismo nombre; se localiza en el centro del país, cubre un área de casi 130 000 km² y se extiende parcial o totalmente sobre algunos estados de la República Mexicana, incluyendo el Distrito Federal. Esta región es alargada y de forma irregular, con una longitud de 950 km este-oeste y una anchura promedio de 110 kilómetros.
- **Clima.** Tiene una gran variedad de condiciones climáticas debido a su topografía montañosa y a su amplio rango de elevaciones. Los climas dominantes son:

- Tropical y húmedo templado en la porción oeste.
- Subhúmedo árido templado en la Mesa Central.
- Frío, húmedo a árido en las áreas montañosas de la porción noreste.

La precipitación oscila entre 300 y 4000 mm/año y está determinada en principio por la orografía; una gran parte de la región recibe más de 500 mm/año y sólo en pocas áreas de la porción norte recibe menos. La precipitación en las regiones montañosas es superior a los 1200 mm/año y en las sierras más altas excede los 2000 mm/año; la temporada de lluvias es en verano, a principios de otoño y disminuye en

9. Sección hidrogeológica esquemática de la provincia Faja volcánica transmexicana



invierno; en general, hay un patrón de lluvias aisladas en la región y abundan las heladas en los picos más altos. La temperatura promedio anual varía, en relación con la altitud, entre 13°C y 23°C; las temperaturas registradas son menores en las áreas montañosas y aumentan en las partes bajas de la cuenca. En el verano, el promedio de la temperatura diaria tiene rangos de 15°C a 26°C, con altas de 36°C; durante el invierno el promedio de temperatura diaria es de 12°C a 20°C, con bajas de -5°C en las montañas.

Las condiciones anteriores producen valores de evaporación potencial de 1600 a 2000 mm/año, aunque su promedio sea mayor que la precipitación. Hay un exceso de ésta durante la estación de lluvias, las cuales generan flujo y recargas a los acuíferos.

- **Hidrogeología.** Los derrames basálticos y la mayoría de rocas que se extienden en toda la Faja volcánica transmexicana se caracterizan por una alta permeabilidad que varía en un amplio rango, controlado principalmente por su grado de fracturamiento, la presencia de tubificaciones en los derrames y la intercalación de material escoriaceo.

En el subsuelo de los valles, las rocas consolidadas y no fracturadas abajo del nivel regional de saturación forman barreras para el flujo de agua subterránea, tales como los derrames andesíticos que funcionan como basamento geohidrológico; en el caso de los valles tectónicos, este basamento se puede encontrar a cientos de metros de profundidad. Los derrames de rocas no fracturadas intercaladas con relleno aluvial en diferentes profundidades forman acuíferos locales independientes en rocas adyacentes. En contraste, la mayoría de las rocas de composición riolítica presente en la parte norte de esta región y que se extiende dentro de las cuencas aluviales en el sur, forma acuíferos de gran densidad y de permeabilidad moderada debido a su fracturamiento.

En las partes más bajas de las cuencas, los acuíferos en derrames volcánicos fracturados están cubiertos por depósitos lacustres y aluviales de menor permeabilidad, por lo que son acuíferos confinados o semiconfinados y se caracterizan por un coeficiente de almacenamiento bajo, debido a su virtual incompresibilidad.

Los piroclastos tienen una alta porosidad, aunque su permeabilidad sea baja; en la zona

de saturación funcionan como acuitardos, los cuales en escala regional, pueden producir o transmitir grandes cantidades de agua a los acuíferos adyacentes. Estos materiales abundan en la base de los volcanes aunque con un espesor menor, son menos porosos y más permeables que los de arriba.

Ampliamente distribuidos en la superficie se encuentran los depósitos lacustres muy porosos y de poca permeabilidad del Plioceno Tardío, que forman acuitardos de algunos metros de espesor y de grandes volúmenes de agua. En un nivel regional, estos depósitos contribuyen al gran volumen de agua de los acuíferos adyacentes, ya sea natural o de bombeo.

Los materiales aluviales no consolidados, gravas, arenas y sedimentos finos están ampliamente expuestos en los valles y forman acuíferos someros. Su permeabilidad y transmisividad varía de acuerdo con el tamaño del grano y del espesor. El coeficiente de transmisividad de los acuíferos aluviales oscila entre 5×10^{-4} y $5 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$. El espesor y la alta permeabilidad de los clásticos son comunes en los arroyos, también forman canales activos y viejos que funcionan como acuíferos semiconfinados. Sobre las extensas llanuras inundadas, los clásticos de granos medios a finos y permeabilidad moderada a baja son más abundantes.

El agua circula preferencialmente a través de los estratos más permeables, los cuales presentan menos resistencia al flujo del agua subterránea y tienden a cruzar los estratos menos permeables por la ruta más corta. Cuando estos estratos se encuentran en la parte superior de la secuencia estratigráfica, la mayoría de las aguas infiltradas se incorpora al sistema local, caso muy frecuente en la Faja volcánica transmexicana. Los flujos de lava basáltica y los gruesos paquetes de piroclásticos que forman el mayor volumen de las rocas volcánicas jóvenes, producen excelentes áreas de recarga y rápidamente transmiten el agua a profundidad, alimentando al acuífero profundo, abajo de los valles adyacentes.

En el subsuelo de los valles y planicies lacustres, el agua se desplaza hacia las áreas de descarga. De acuerdo con las observaciones realizadas y con planteamientos teóricos parece que hay una continuidad hidráulica de la zona saturada, consistente en el relleno, que constituye un sistema de flujo solo, además de que todos los estratos están hidráulicamente interconectados. No obstante, debido a la

heterogeneidad y anisotropía del relleno, hay diferencias significantes en la carga hidráulica, temperatura y calidad del agua en el sentido vertical.

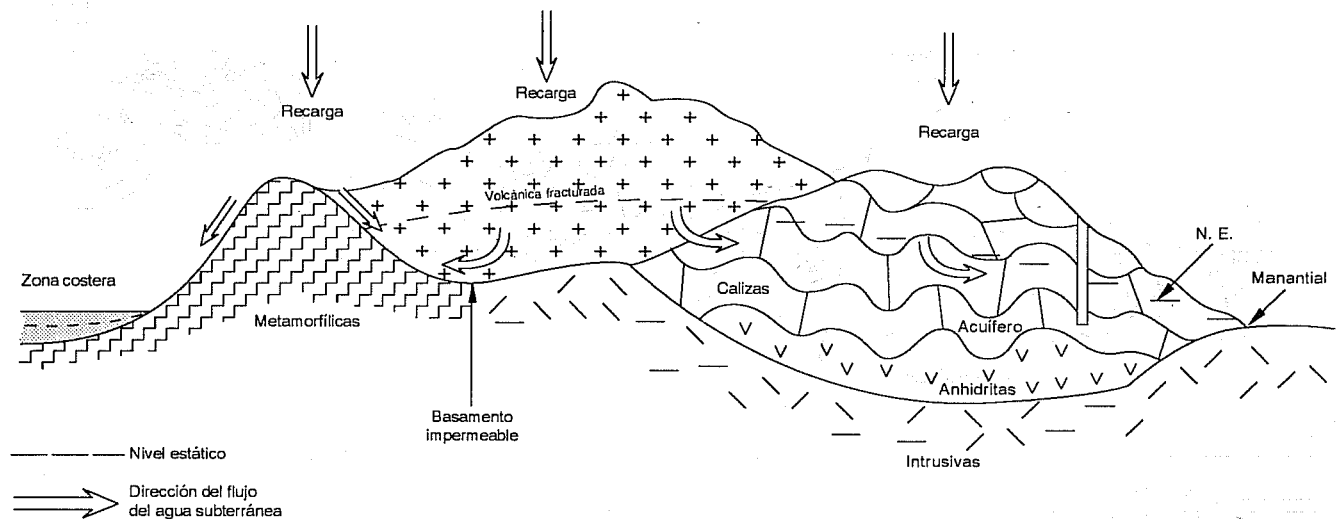
Sierra Madre del Sur

- **Localización.** Esta provincia hidrogeológica toma su nombre de las montañas que son las características fisiográficas más permanentes en la región (véase ilustración 10); cubre un área de 258 274 km². Limita al norte con la Faja volcánica transmexicana; al sur, con el Océano Pacífico y al oriente, con las provincias de sierras y valles del sureste y con la parte sur de la Planicie costera del Golfo.
- **Clima.** Se presenta una variedad de climas acorde con las diferentes latitudes y altitudes que tienen las regiones que integran esta gran provincia. Así se tiene que en las porciones altas de la sierra hay climas templados húmedos y subhúmedos con abundantes lluvias en verano, mientras que hacia las partes bajas, como la zona costera y la cuenca del Balsas, el clima se torna semicálido-húmedo y muy caluroso húmedo; en ambas áreas la precipitación también se presenta en el verano. La precipitación media anual en esta provincia varía de 500 mm/año en la presa del Infiernillo y la Cañada oaxaqueña, hasta 5000 mm/año en la Sierra de Juárez. La temperatura media anual es también muy variable, pues va de 18°C en las partes altas hasta 26°C en las zonas costeras, con mínimas de 0°C en la zona de Altamirano, Guerrero.
- **Hidrogeología.** La Sierra Madre del Sur es una cadena montañosa compuesta principalmente por un basamento de rocas metamórficas que fueron desplazadas durante el Jurásico y un batolito que constituye el Macizo de Oaxaca. Esta área también sirve de base para otras formaciones impermeables compuestas de dolomías, calizas recristalizadas y lechos rojos compuestos de arcilla, arena y limo del Paleozoico, Triásico y Jurásico.

Por sus rasgos geomorfológicos, esta provincia se ha dividido en dos subregiones que se denominan: la Planicie costera y las Sierras transversales.

La primera es una franja estrecha que abarca desde unos cuantos metros hasta 25 km de ancho y se extiende paralelamente a la línea costera. Está compuesta principalmente de aluvión cuaternario limoso, derivado de la erosión

10. Sección hidrogeológica esquemática de la provincia Sierra Madre del Sur



de la Sierra Madre del Sur y depositado por las corrientes que fluyen al Océano Pacífico. Este aluvión de grano fino constituye acuíferos de baja producción. Algunas de las principales características hidrológicas de las Planicies costeras son las numerosas lagunas que contienen los materiales de grano fino y los abundantes detritos orgánicos. La planicie es un área pantanosa compuesta de sedimentos de grano fino con bajo potencial de almacenamiento de agua subterránea.

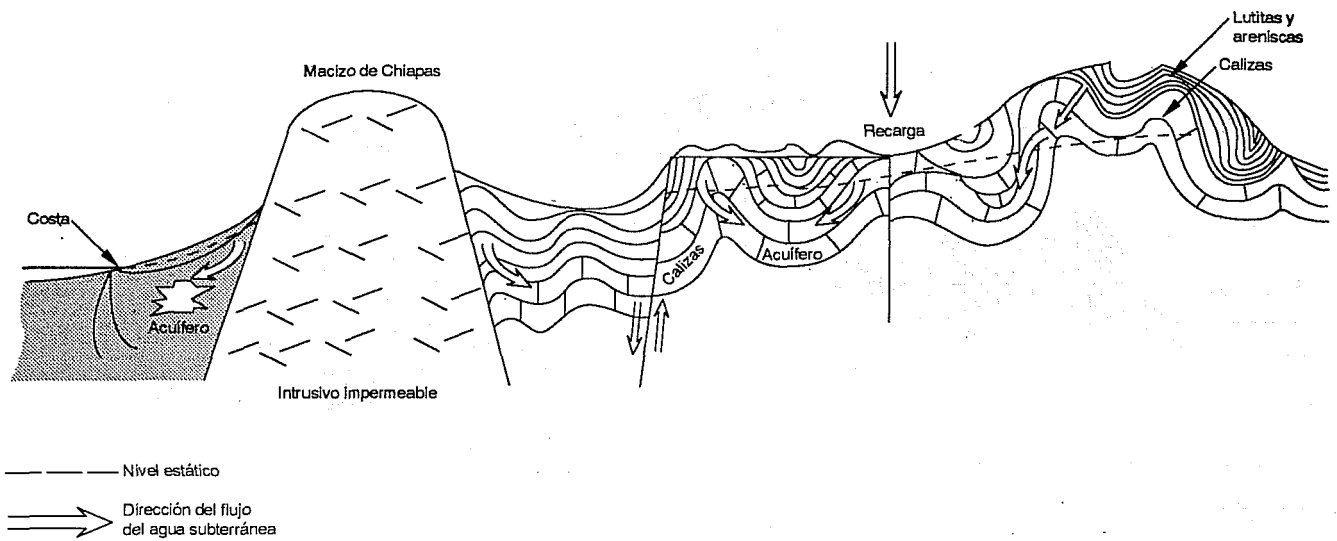
Las Sierras transversales contienen las principales rocas permeables de la provincia y, en consecuencia, la mayor ocurrencia de agua subterránea. Están compuestas por una serie de cadenas montañosas y valles. Las montañas están formadas principalmente por calizas y dolomías del Cretácico, las cuales están altamente carstificadas. Las mesetas y valles altos están compuestos de rocas sedimentarias continentales del Terciario, aluvión del Holoceno y gruesos depósitos de sedimentos piroclásticos del Cuaternario. El área de desagüe de estas montañas es compleja debido a los rangos tan amplios de la permeabilidad de las rocas y por las numerosas estructuras tectónicas; comúnmente las corrientes se pierden en las cavidades de las calizas y reaparecen como manantiales que forman magníficas cascadas abajo de las cordilleras. En otros lugares, las corrientes reaparecen en forma de lagos que sirven como centros de diversión y dan lugar a nacimientos de ríos. Todas estas aguas finalmente drenan a los principales ríos, otras van por la tierra o en forma de flujo subterráneo,

hacia la Planicie costera, antes de descargar en el Océano Pacífico. Las calizas y dolomías de esta área tienen un espesor aproximado de 2800 m y consisten en una secuencia alternada de calizas litográficas con pedernal, calizas dolomitizadas, dolomías y calizas arcillosas. La porosidad y permeabilidad son principalmente secundarias, debido al fracturamiento y a la disolución. En algunos sitios las rocas calcáreas están cubiertas por material terrígeno impermeable del Terciario. Esta área sufrió una gran actividad tectónica durante la cual se produjeron *horst* y *gravens*.

Sierras y valles del sureste

- **Localización.** Esta provincia hidrogeológica (véase ilustración 11) comprende una superficie de 84 280 km² y abarca todo el estado de Chiapas y parte de Oaxaca y Tabasco. Limita al norte con la Planicie costera del Golfo, al sur con el Océano Pacífico, al occidente con la Sierra Madre del Sur y al oriente con la frontera de México-Guatemala.
- **Clima.** Las condiciones climáticas de esta provincia varían de templado a semicálido húmedo en las partes altas de la sierra de Soconusco y sierras de Chiapas a cálido subhúmedo en las llanuras costeras, así como en la Depresión central de Chiapas. La temperatura media anual es de 25°C con una mínima de 16°C y una máxima de 40°C. Aunque la época más lluviosa es en el verano, las precipitaciones se presentan casi todo el año. Estas varían de 1000 a 4500 mm/año en el Istmo de Tehuantepec, en

11. Sección hidrogeológica esquemática de la provincia Sierras y valles del Sureste



la zona del Tacaná y en las sierras plegadas del norte.

- **Hidrogeología.** Esta provincia hidrogeológica es una de las más privilegiadas en cuanto a riqueza hidráulica se refiere, ya que su precipitación pluvial es de las más elevadas del país, además de que cuenta con algunos de los ríos más caudalosos de México como el Grijalva y el Usumacinta. Sin embargo, a pesar de las abundantes lluvias y escurrimientos superficiales, éstos se concentran en un periodo del año y su almacenamiento es fundamentalmente en las partes bajas, que para conducirlos a otras áreas donde se requieren, el costo sería muy grande. Por esto, en extensas áreas de la provincia, los acuíferos son la única opción para cualquier tipo de desarrollo, sea urbano, agrícola o industrial.

En la Planicie costera la litología está representada por arenas, limos y arcillas, derivados principalmente de la erosión de las rocas graníticas. Estos materiales constituyen el acuífero costero y tienen un espesor que varía de 8 a más de 200 m. Tiene como basamento rocas metamórficas y graníticas. El acuífero recibe la recarga directamente de la lluvia o a través de los ríos y arroyos que descienden de las montañas y que descargan sus aguas en el Pacífico.

En la sierra de Chiapas, constituida por un macizo granítico, se presentan condiciones desfavorables para la explotación acuífera, reduciéndose el aprovechamiento de pequeños manantiales originados en zonas de rocas fracturadas. Es la región de mayor precipitación, pero

por la baja permeabilidad de sus materiales, el agua escurre por ambos flancos de la sierra a través de arroyos que descienden vertiginosamente hasta la parte de pendiente suave, sitios a donde se lleva a cabo la infiltración de gran parte del agua.

La Depresión central del estado de Chiapas es un *graben* compuesto por rocas sedimentarias del Mesozoico Superior y del Cenozoico. Tiene una topografía suave hacia el noreste, no así hacia el suroeste, donde empiezan las estribaciones de la sierra de Chiapas. La baja permeabilidad de los sedimentos es la causa de la baja producción de los acuíferos, obteniéndose en pequeñas cantidades. Las diversas perforaciones exploratorias que se han realizado en esta región, han demostrado que las calizas arcillosas del Cretácico Superior no constituyen acuíferos importantes, sirviendo únicamente para abastecer por medio de excavaciones poco profundas las necesidades de agua para usos domésticos de pequeñas comunidades, donde la extracción en general se hace por medios manuales. Más al sur, dentro de la Depresión, los rellenos son de poco espesor, de 2 a 3 m. Y como basamento se tiene al granito, por lo que sus posibilidades acuíferas son prácticamente nulas.

En el altiplano de Chiapas y en las sierras plegadas del norte, hacia las zonas de Ocozucua y Comitán, se han ejecutado varias perforaciones exploratorias en las calizas y dolomías que han resultado con buenos caudales (60–70 l/s) aunque también se han tenido pozos con bajos rendimientos, sin embargo, esto es

normal ya que corresponde al comportamiento clásico de los terrenos calcáreos. Hacia las áreas de mayor altura, donde llueve más, se lleva a cabo la recarga de los acuíferos calcáreos que están actualmente en explotación.

La morfología tectónica (morfotectónica) dominante refleja por lo menos dos etapas de plegamiento y fracturamiento que generaron grandes estructuras anticlinales que dan paso a los terrenos calcáreos altos con un gran desarrollo de aparatos cársticos con numerosos "picos", "torres" y "sumideros". Con excepción de las grandes corrientes en lo profundo de los valles, las corrientes menores son escasas y recorren distancias muy cortas para terminar abruptamente en hundimientos o "tragaderos" comunes de "valles ciegos". El flujo del agua subterránea es controlado por el patrón de fracturamiento, originando la descarga principal hacia las corrientes profundas dado este drenaje subterráneo profundo, los niveles del agua se encuentran a bastante profundidad.

Península de Yucatán

- **Localización.** La península de Yucatán cubre un área de 136 240 km² en la porción este del país (véase ilustración 12); está limitada en el oeste y norte por el Golfo de México; en el este por el mar Caribe; en el suroeste se une con la Planicie costera del golfo y hacia el sur limita con la Sierra Madre del Sur.
- **Clima.** El clima de la península es de cálido a muy cálido y subhúmedo, con variación a cálido semiseco en la porción septentrional, con lluvias que van desde 500 mm/año en el noroeste, a 1300 mm/año en la costa este y 1500 mm/año en la isla de Cozumel, fuera de la costa este; aproximadamente el 90% de la lluvia ocurre en el periodo de mayo a octubre. La temperatura media anual es de 25°C, siendo la más alta en julio y agosto con 46°C y la más baja en diciembre y enero, de 4°C. La alta temperatura y abundante vegetación son causa de que se pierda alrededor del 85% del agua de lluvia

por evapotranspiración; el otro 15% se infiltra al subsuelo. Virtualmente, no existen corrientes ni cuerpos de agua superficial en la península.

• Hidrogeología

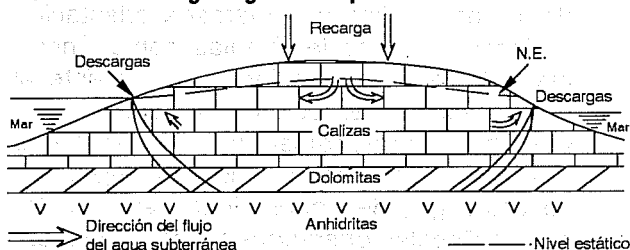
Por sus características hidrológicas y morfológicas, esta provincia se ha subdividido en cuatro regiones que son:

– Planicie cárstica con cenotes del norte

Esta región ocupa la porción norte de la península; desde la línea costera su elevación se incrementa suavemente tierra adentro, hacia el sur, hasta 35 a 40 m cerca de la base de la Sierrita de Ticul. El relieve local alguna vez excede los 10 m. Esta área está formada por carbonatos marinos del Terciario que han estado sujetos a una gran disolución; los grandes orificios de disolución y cavidades se han originado por infiltración de la lluvia y han formado acuíferos altamente permeables. El alto grado de carstificación permite una rápida infiltración y no hay flujos superficiales. En ausencia de la erosión por estas corrientes, existe una fuerte erosión del subsuelo que da como resultado el desarrollo de la topografía cárstica típica. En el subsuelo se presentan ambos tipos de erosión, química y mecánica.

La erosión mecánica ocurre cerca de la superficie donde las arcillas son lavadas, abiertas y depositadas debajo de la superficie calichosa. La ausencia de suelo es una de las características de la planicie; las arcillas se encuentran a profundidades de 0.5 a 1.5 m. Debajo de la superficie donde son atrapadas por las raíces de las plantas, la rápida infiltración del agua de lluvia en el acuífero da como resultado un agua insaturada, la cual conserva un alto potencial de disolución; ésta agranda las fisuras y cavidades, produciendo mayores aberturas y cavernas. El colapso de las rocas produce las dolinas y sumideros conocidos localmente como "cenotes", palabra de origen maya. Estos rasgos cársticos son de varios tipos y se forman en respuesta a las fluctuaciones del nivel freático. Este nivel se presenta a profundidades de 4 a 20 m en las elevaciones superficiales. La mayoría de los cenotes es circular, con paredes verticales y diámetro cercano a 100 m, donde

12. Sección hidrogeológica de la península de Yucatán



la profundidad del agua tiene aproximadamente 15 m. Diversos trabajos muestran que los cenotes se estrechan con la profundidad y tienen forma cónica.

Con frecuencia, el techo del cenote se ha derrumbado completamente; en otros casos es semiesférico con pequeñas aberturas de 1 a 3 m de diámetro. Estas típicas aberturas se hacen más grandes con la profundidad y sus diámetros pueden alcanzar algunas decenas de metros; la formación de estos cenotes, así como los otros rasgos cársticos, está en función del nivel freático. A esta profundidad, el agua es cargada con bióxido de carbono promoviendo la formación de ácido carbónico, el cual disuelve los carbonatos del subsuelo; varios niveles de disolución señalan que el nivel freático ha fluctuado aparentemente en respuesta a la emergencia gradual de la península. En la parte norte de ésta, los carbonatos del Terciario están horizontales y muestran significativos cambios de facies, los cuales controlan la ocurrencia de zonas de diferentes grados de carstificación. Los cenotes o sumideros ocurren a lo largo de grandes longitudes de la península, pero son más notables y numerosos en ciertas zonas, donde una faja alargada se caracteriza por abundantes rasgos cársticos, especialmente de gran tamaño.

– Planicie cárstica montañosa del sur

En esta zona la topografía es variada; existen formas aisladas de bajo relieve, cerros con formas cársticas cónicas de aproximadamente 40 m de altitud en relación con la superficie que los rodea. La altitud máxima de esta región es de 300 msnm.

La planicie está formada por carbonatos del Eoceno incluyendo calizas, calizas dolomíticas y dolomías. Algunos de los carbonatos presentan un ligero grado de silicificación. Los estratos se presentan desde formas horizontales hasta pequeños pliegues con inclinación de 15° a 20° y se encuentran altamente fracturados.

La alta permeabilidad de estos carbonatos fracturados refleja un bajo gradiente en el nivel freático. En algunos lugares, dicho nivel se encuentra a 100 m de profundidad, haciendo difícil y costosa la explotación del agua subterránea. Por esta razón pocos hay

pozos privados o no existen debido a la alta topografía y profundidad de los acuíferos.

La presencia de rocas evaporíticas que se localizan aflorando en la porción central, al sur de la península, propicia acuíferos con agua de mala calidad que son descargados siguiendo el patrón estructural regional hacia las zonas externas, mezclándose con aguas de mejor calidad, "contaminando" a éstas, como al parecer ocurre hacia las zonas de Calkiní y Tenabo en Campeche y la de Polyuc en Quintana Roo.

– Sierrita de Ticul

Entre las extensas planicies del norte de la península y las sierras del sur se presenta una forma topográfica alta conocida como Sierrita de Ticul. Está constituida por calizas del Eoceno, de orientación noroeste a sureste; tiene 160 km de longitud y 15 km de ancho. La Sierrita es un escarpe de falla formada por una falla normal, en la que el bloque caído es el norte. La altitud en la región es de 150 msnm y de 100 a 110 m, en relación con la planicie norte. Las elevaciones a lo largo del escarpe son prácticamente los únicos rasgos geomórficos que interrumpen el paisaje característico de la península.

– Región de bloques afallados del este

Esta área, de aproximadamente 80 km de ancho, se extiende desde Cabo Catoche, en la parte noroeste de la península hasta el sur, en el límite con la República de Belice. En esta región las rocas carbonatadas se deben a una serie de fallas normales con tendencia norte-noreste (Falla de río Hondo) formando *horst* y *grabens*, las fallas varían en longitud y desplazamiento y algunas se pueden observar en la superficie.

La expresión más notable de estas fallas a lo largo de la costa caribeña, incluyendo la isla de Cozumel, es un bloque limitado al este y oeste por grandes fallas. Cerca de la costa existe una marcada orientación y alimentación de las bahías como Chetumal y la de la Ascensión. Ligeramente al interior, existen depresiones elongadas de 10 a 15 m de profundidad que forman lagos y regiones pantanosas. Buenos ejemplos de estas grandes depresiones son los lagos de Bacalar, orientados noroeste-sureste

y noreste-suroeste y que fueron formados por la caída de bloques de 8 a 10 m. Abajo de la superficie que los rodea, estos lagos varían en lo ancho desde los más pequeños, de 2 a 10 m hasta los de 50 km de longitud. Más al noroeste, cerca de la costa, rasgos similares pero más pequeños se presentan a pocos metros sobre el nivel del mar, formando pantanos y pequeños lagos. En la zona costera el agua subterránea descarga en el mar Caribe disolviendo los carbonatos y formando caletas y lagunas.

Bibliografía

Atlas del Agua de la República Mexicana. Secretaría de

Recursos Hidráulicos, 1976.

Benavides, G. L., *Notas Sobre la Geología Petrolera de México*. Simposio Sobre Yacimientos de Petróleo y Gas, XX Congreso Geológico Internacional., 1956

Comisión del Plan Nacional Hidráulico. *Inventario Regional de Aguas Subterráneas*, Doc. núm. 19, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, México, 1977.

Coney P. J., y Campa M. F. "Tectono-stratigraphic Terranes and Mineral Resource Distributions in México", *Can. Jour. Earth Sci.*, v. 20, pp. 1040-1051, 1983.

López Ramos, E., *Geología de México* p. 296-298., 1980. *The Geology of North America* Vol. 0-2 Hydrogeology, The Geological Society of America, 1988.

Raisz, E. *Physiographic Provinces Prepared for the Geography Branch of the Office of Naval Research*, Cambridge, Mass. 1959.