3.0 Geología

La geología de Puerto Rico es un factor importante que influye en la disponibilidad y calidad de los recursos de agua. La geología de la Isla es variada para su área superficial relativamente pequeña, con una diversidad de formaciones y depósitos consolidados y no-consolidados (Figura 5.1). Estudios detallados de la geología de la Isla han sido publicados por la Academia de las Ciencias de Nueva York entre 1915 y 1933, Meyerhoff (1931, 1933), Zapp y otros (1948), Briggs y Ackers (1965), Monroe (1980), Seigle y Moussa (1984) y más recientemente por Renken y otros (2002). A continuación se provee un marco general simplificado de la geología de la Isla desde el punto de vista de la hidrología, particularmente los acuíferos.

En general y en términos simples, la Isla puede dividirse en tres regiones geográficas donde predominan las formaciones geológicas principales que juegan un papel importante en la hidrología. Estas regiones incluyen:

- La región central de las cordilleras de la Isla, formada por rocas de origen volcánico en general poco estudiadas y complejas debido a su alto grado de fracturas. Estas rocas de origen volcánico datan de la era Mezozoica (hace 250 millones de años).

- Las regiones de rocas calizas de origen marino en las regiones Norte y Sur de la Isla. En la Región Norte, las rocas calizas del Período Terciario Medio (hace 60 millones de años) compuestas principalmente de carbonato de calcio forman los acuíferos más importantes en la Isla. Estos acuíferos tienen una extensión de aproximadamente 760 mi^2 (489,150 cuerdas) en la Región del Karso (el término Karso se deriva de la palabra yugoslava "karst", que define el sistema de colinas y sumideros típicos de zonas calizas). Esta región se extiende aproximadamente 60 millas de este a oeste desde Carolina hasta Aguada, con un ancho promedio de 10 millas desde la costa hasta el contacto con las laderas de rocas volcánicas de la Cordillera Central. En la Región Sur de la Isla ocurren también depósitos calizos de origen marino del Período Terciario, extendiéndose desde Juana Díaz hasta Peñuelas. Sin embargo, debido al alto contenido de cienos y barros, estas rocas no forman un acuífero significativo.

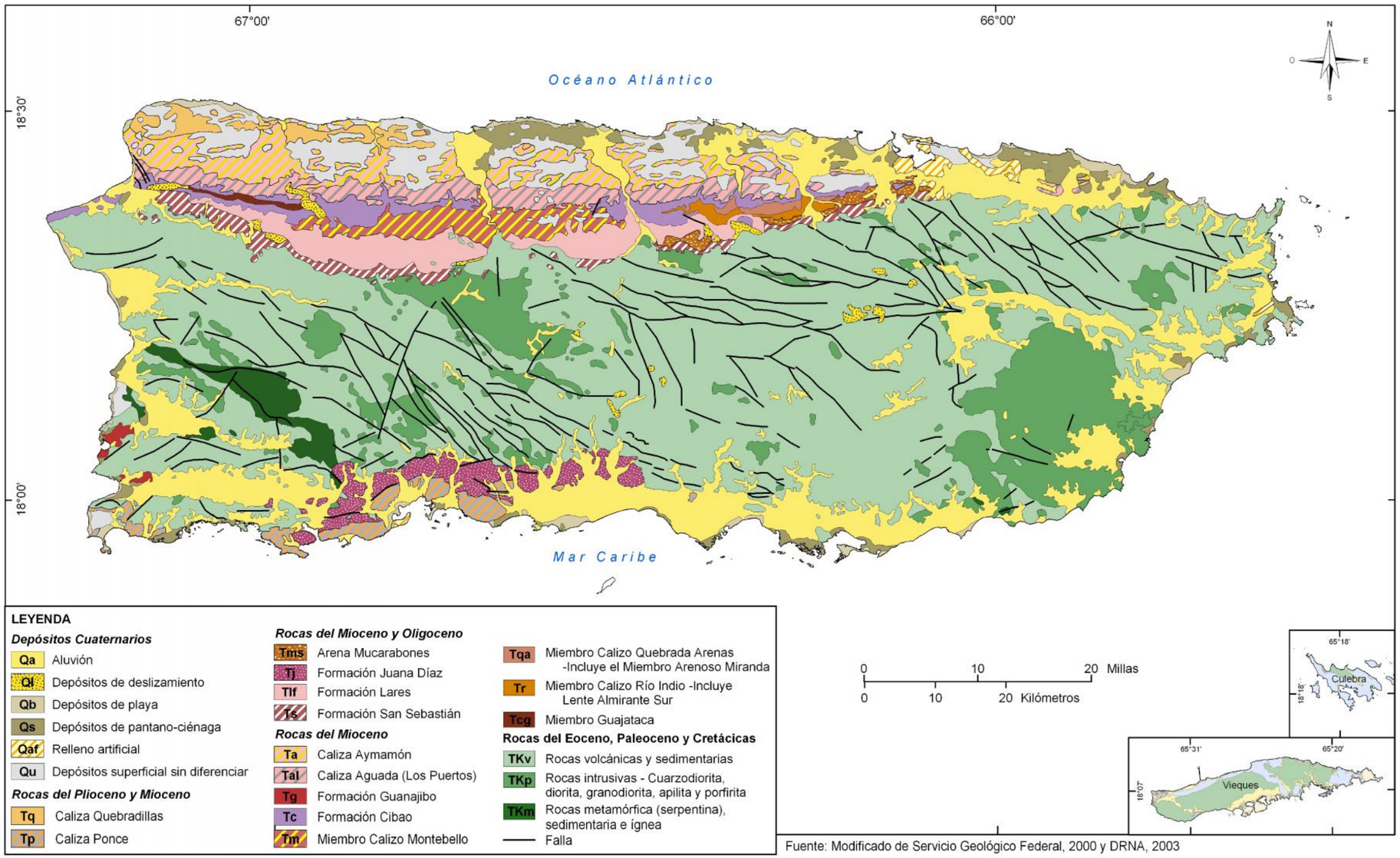
- La tercera región de importancia la componen los valles aluviales costaneros, particularmente los de las regiones Norte y Sur. El aluvión es una mezcla no-consolidada de arena, grava y piedra que se origina como un producto de la erosión de las rocas volcánicas en las cordilleras. A través de millones de años, el material erosionado en las montañas es transportado por los ríos hacia la costa, depositándose en los valles que forman los acuíferos aluviales costaneros. Estos acuíferos son de gran importancia, ya que el aluvión exhibe porosidades de hasta 20 % por volumen, lo que permite el almacenamiento de agua en el espacio entre los poros. Su espesor, particularmente en la zona de Juana Díaz donde alcanza hasta 3,000 pies, contribuye a que los acuíferos que forman almacenen de grandes cantidades de agua. Aunque existen depósitos aluviales en las regiones este y oeste de la Isla, estos son de menor importancia y no representan acuíferos significativos. También ocurren depósitos aluviales en los valles interiores de Caguas, Cayey y Cidra, que forman acuíferos productivos pero de extensión y profundidades reducidas.

La diversidad geológica de Puerto Rico y sus islas adyacentes está relacionada a los períodos geológicos de su formación, que comprende las Eras Mesozoica y Cenozoica (para propósitos de referencia, se nombrarán las Eras, Periodos y Formaciones geológicas en orden cronológico desde las más antiguas hasta las más recientes). Como punto de referencia, la Era Mesozoica comenzó a manifestarse en la isla hace aproximadamente 138 millones de años, mientras que la Cenozoica data de hace 70 millones de años. Los cinco periodos geológicos comprendidos en estas dos Eras son: Triásico, Jurásico, Cretácico, Terciario y Cuaternario. La Tabla 3-1 resume estos períodos y sus comienzos aproximados. El desarrollo geológico de Puerto Rico durante estos cinco periodos es responsable en gran parte de la diversidad de formaciones representadas en la superficie y el subsuelo. Las formaciones geológicas más antiguas en Puerto Rico, incluyen la de Sierra Bermeja en la parte suroeste de la isla (Figura 3.1). Se cree que estas formaciones datan del periodo Jurásico con una edad de más de 138 millones de años. Evidencia científica de formaciones pertenecientes a esta Era pueden encontrarse en las zonas costaneras de las regiones este, oeste y sur-oeste de Puerto Rico.

Tabla 3-1. Eras, Periodos y Series geológicas.

Tiempo	Tiempo atrás	Era	Periodo	Series
Más antiguo	Hace más de 250 millones de años	Mesozoica	Triásico	- - -
	Hace más de 138 millones de años		Jurásico	- - -
	Hace más de 70 millones de años		Cretácico	Cretácico Inferior
				Cretácico Superior
	Hace 1.6 a 70 millones de años	Cenozoica	Terciario	Paleoceno
				Eoceno
				Oligoceno
				Mioceno
				Plioceno
	Hace 1.6 millones de años al presente		Cuaternario	Pleistoceno
Más reciente				Holoceno

Fuente: http://vulcan.wr.*USGS*.gov/Glossary/geo_time_scale.html (*USGS*, 2003).



Fuente: Modificado de Servicio Geológico Federal, 2000 y DRNA, 2003

Fuente: *US Geological Survey*, 2000 y Departamento de Recursos Naturales y Ambientales, 2004.

Figura 3-1. Mapa generalizado de la geología de Puerto Rico.

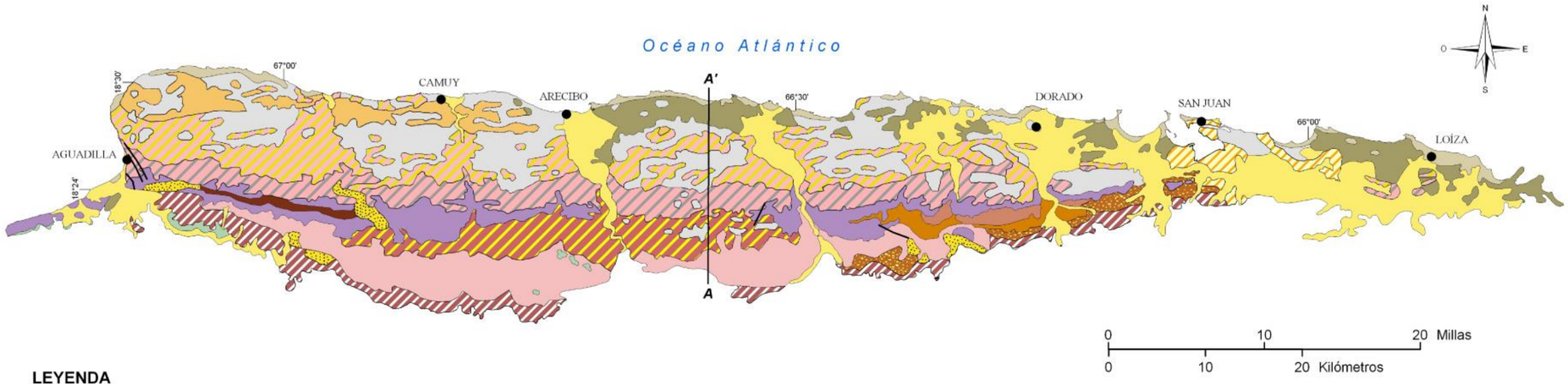
La mayoría de las formaciones geológicas en la Región Central de la Isla datan del Periodo del Cretáceo, hace aproximadamente 70 millones de años. Una teoría que trata de explicar la formación de estas capas de rocas compuestas mayormente de lava y material de origen volcánico es la Meyerhoff (1931). Este indica que el origen de las rocas está relacionado a erupciones volcánicas en el Caribe, que durante milenios arrojaron lava formando la base de lo que es ahora la Isla. Movimientos sísmicos de gran magnitud en las placas geológicas cercanas a la Isla contribuyeron a elevar, reducir, distorsionar, fragmentar y modificar la lava, propiciando la intrusión de grandes masas del material previamente depositado. La naturaleza o formación de estas rocas varía según su origen formativo: en algunas regiones de origen intrusivo y en otras de origen extrusivo. Las rocas intrusivas pueden exponerse mediante la erosión de la roca volcánica y de este modo promover aún más los procesos erosivos de cuencas como ocurre en el área del Batolito de Utuado. El proceso erosivo es la descomposición de rocas volcánicas acelerado por la agresividad del agua y los minerales que esta acarrea. El Batolito de Utuado rinde una gran cantidad de sedimentos al erosionarse. Las rocas extrusivas en la parte central-este de Puerto Rico han estado sometidas a un proceso lento pero continuo de climatización – exposición a la superficie de la Tierra – lo cual las hace más resistentes a los procesos de erosión. El marco estructural de las formaciones volcánicas de la parte central de la Isla está mayormente influenciado por fallas y lineamientos geológicos. Estos lineamientos, o discontinuidades en los estratos de suelos terrestres, influyen en los procesos de descomposición de las rocas volcánicas y determinan el desarrollo del flujo de agua por conductos producidos por la solución o erosión de las rocas. En algunas áreas estas fallas resultan en manantiales termales y capturan una porción significativa de la precipitación pluvial.

Figura 3-2. Vista aérea del sumidero Tres Pueblos, este sumidero es el resultado de un proceso de erosión de la caliza, de textura y pureza localmente distinta (*USGS*, 1990).

Meyerhoff (1933) describe que al final del Período Cretácico, Puerto Rico estaba formado por grandes cimas de volcanes apagados sobresaliendo del Mar Caribe. Posteriormente, comenzando en el Período Terciario y durante millones de años, grandes cantidades de residuos de organismos marinos se depositaron en las áreas llanas de las faldas de estas cimas volcánicas, tanto en el norte como en el sur. A través de los milenios, estos residuos compuestos esencialmente de carbonato de calcio, formaron capas de gran espesor, alcanzando en la Región Norte hasta 3,500 pies. Al mismo tiempo, los ríos prehistóricos descargaban al mar sedimentos erosionados de la Región Central, incluyendo grandes cantidades de arena y arcilla, mezclándose no-uniformemente con los depósitos marinos calcáreos. Movimientos sísmicos posteriores en varias etapas elevaron la plataforma de la Isla sobre el nivel del mar, exponiendo a la atmósfera las capas de depósitos marinos calcáreos. La acción combinada de la lluvia, el viento y los ríos que descendían de las montañas de la Región Central volcánica, comenzó a erosionar estos depósitos calcáreos. Durante millones de años este proceso de solución contribuyó a la formación de la Zona del Karso en la Región Norte. La alta porosidad del material calcáreo promovió canales de solución subterráneos en lugar de superficiales como ocurre en la zona volcánica. El sistema de mogotes y sumideros de la Región del Karso surge de este proceso de solución selectivo de las rocas calizas, resultando en un patrón de drenaje subterráneo, donde la mayor parte de la escorrentía se infiltra al subsuelo, contrario a lo que ocurre en la Región Montañosa donde predominan las rocas de origen volcánico (Figura 3.2). Este patrón de drenaje es de gran importancia para los acuíferos de la Región Norte, ya que la mayor parte de la recarga de agua que reciben los mismos proviene de la infiltración de la lluvia a través de fracturas y sumideros en la Región del Karso.

Existen depósitos calizos del Período Terciario medio en la parte central-oeste y la parte central-sur de la Isla. Muchos de estos depósitos pertenecen a las series del Oligoceno, Mioceno y Plioceno. Estos depósitos están dispersos entre las rocas de origen volcánico y no forman acuíferos significativos.

Paralelo con el desarrollo de la Región del Karso a través de millones de años, los ríos comenzaron a depositar sobre las capas calizas grandes cantidades de arena, grava y piedras erosionadas de las zonas del interior de la Isla. Este material, denominado aluvión, cubrió la mayor parte de las zonas costaneras desde Arecibo hasta Carolina, alcanzando espesores de hasta 500 pies en Manatí y Vega Alta. Debido a la alta porosidad del aluvión, una gran cantidad de agua está almacenada en este material (Figuras 3-3 y 3-4).



LEYENDA

Depósitos Cuaternarios

- Qa Aluvión
- Ql Depósitos de deslizamiento
- Qb Depósitos de playa
- Qs Depósitos de pantano-ciénaga
- Qaf Relleno artificial
- Qu Depósitos superficial sin diferenciar

Rocas del Plioceno y Mioceno

- Tq Caliza Quebradillas

Rocas del Mioceno

- Ta Caliza Aymamón
- Tal Caliza Aguada (Los Puertos)
- Tc Formación Cibao
- Tm Miembro Calizo Montebello
- Tqa Miembro Calizo Quebrada Arenas
  -Incluye el Miembro Arenoso Miranda
- Tr Miembro Calizo Río Indio -Incluye Lente Almirante Sur
- Tcg Miembro Guajataca

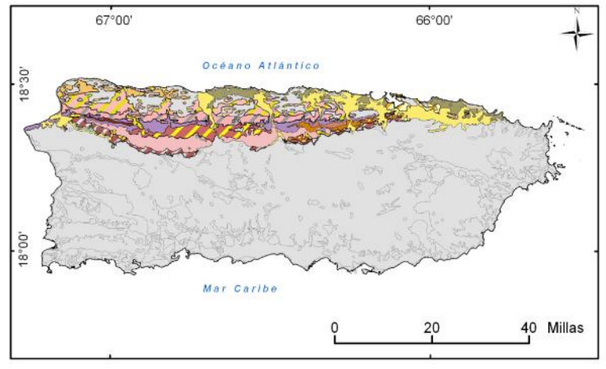
Rocas del Mioceno y Oligoceno

- Tms Arena Mucarabones
- Tlf Formación Lares
- Ts Formación San Sebastián

Rocas del Eoceno, Paleoceno y Cretácicas

- TKv Rocas volcánicas y sedimentarias

A A' Línea de sección hidrogeológica



Fuente: *US Geological Survey*, 2000; Departamento de Recursos Naturales y Ambientales, 2003.

Figura 3-3. Mapa generalizado de la geología de la costa norte de Puerto Rico. Refiérase a Figura 3-4 para detalles de sección transversal.

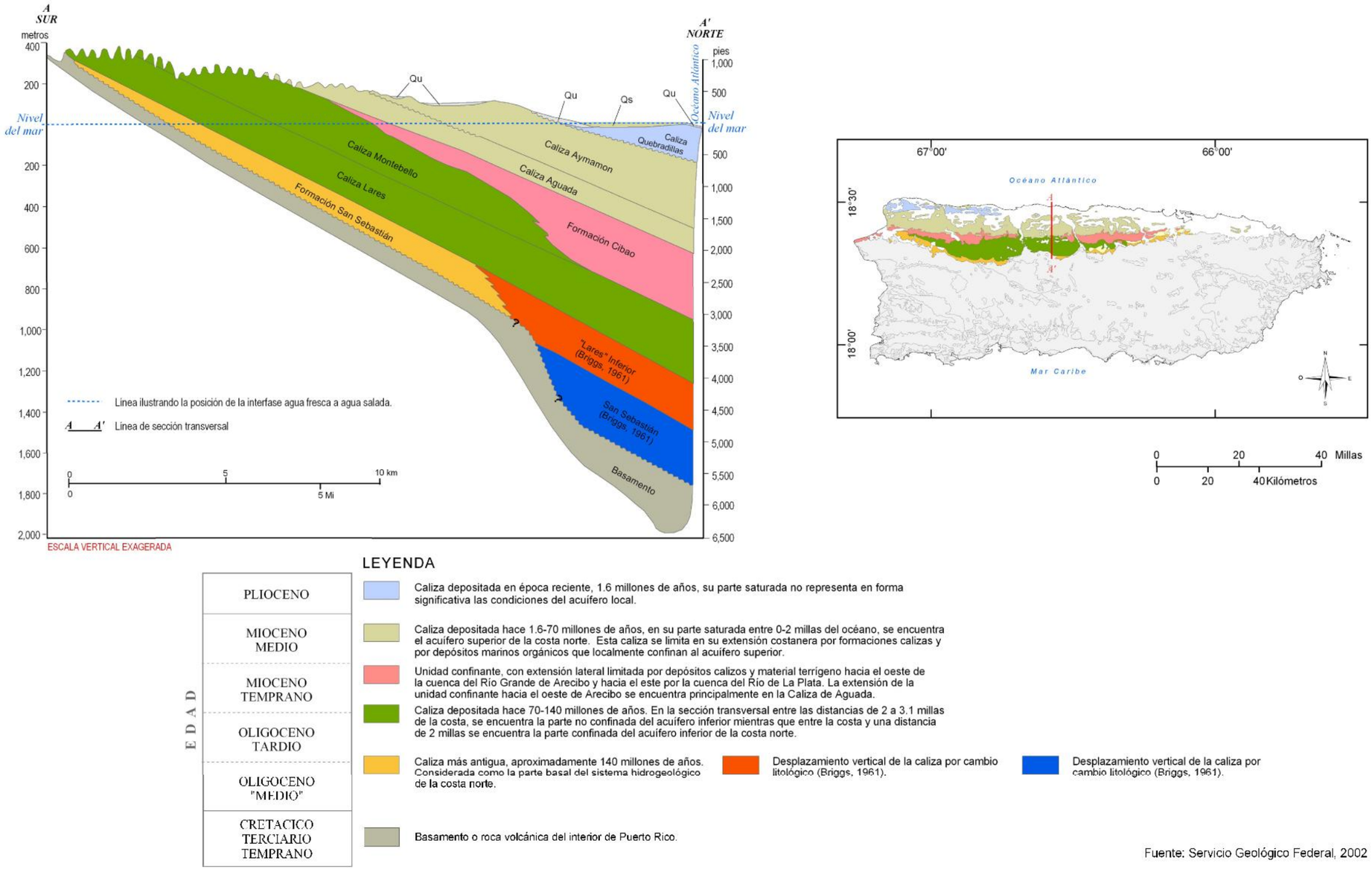
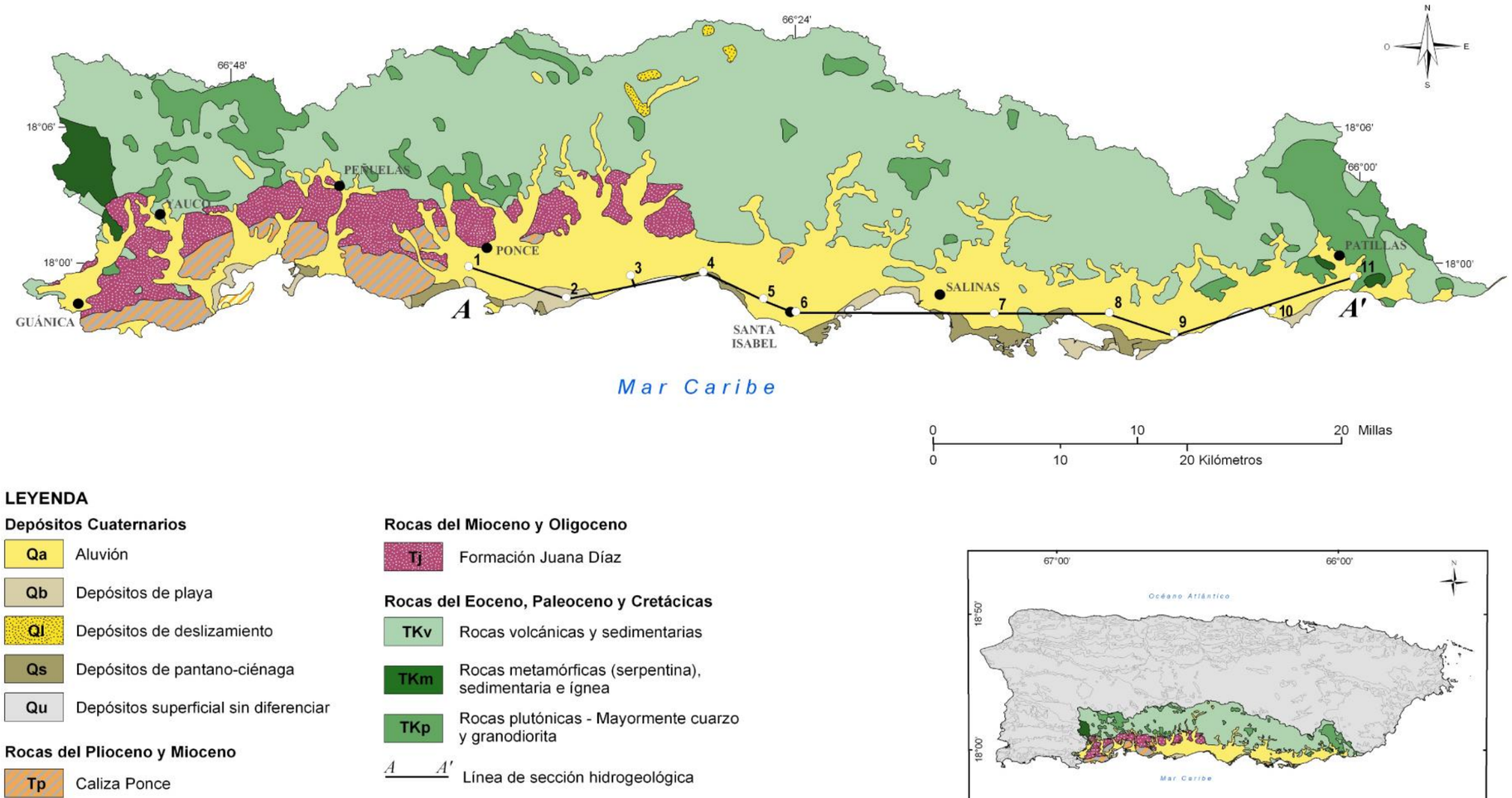


Figura 3-4. Sección transversal generalizada ilustrando la distribución de formaciones geológicas de la costa norte de Puerto Rico.



LEYENDA

Depósitos Cuaternarios

- Qa — Aluvión
- Qb — Depósitos de playa
- Ql — Depósitos de deslizamiento
- Qs — Depósitos de pantano-ciénaga
- Qu — Depósitos superficial sin diferenciar

Rocas del Plioceno y Mioceno

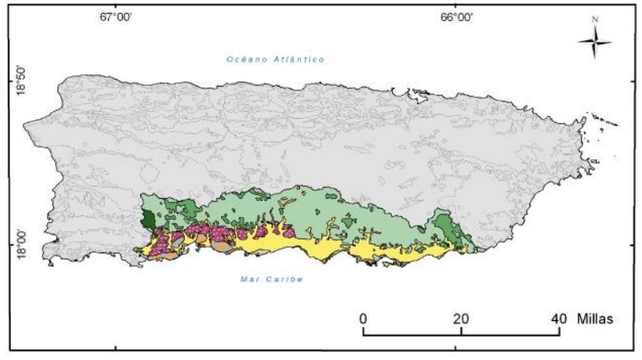
- Tp — Caliza Ponce

Rocas del Mioceno y Oligoceno

- Tj — Formación Juana Díaz

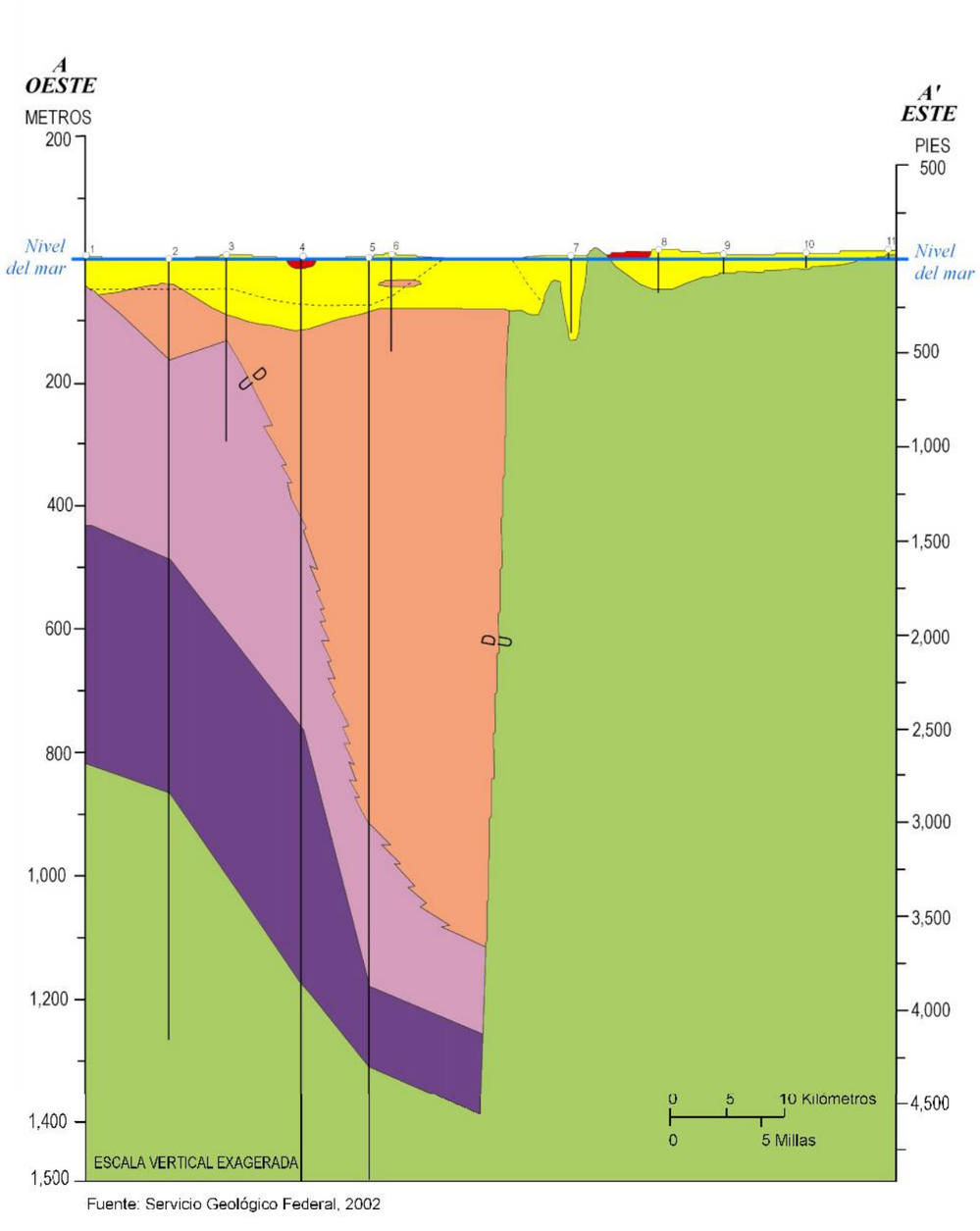
Rocas del Eoceno, Paleoceno y Cretácicas

- TKv — Rocas volcánicas y sedimentarias
- TKm — Rocas metamórficas (serpentina), sedimentaria e ígnea
- TKp — Rocas plutónicas - Mayormente cuarzo y granodiorita
- A — A' Línea de sección hidrogeológica



Fuente: Modificado del Servicio Geológico Federal, 2000; Departamento de Recursos Naturales y Ambientales, 2003

Figura 3-5. Sección geológica generalizada de la costa sur de Puerto Rico (modificada de Renken 2002, refiérase a la Figura 3-6 para detalles de sección transversal).



Fuente: Servicio Geológico Federal, 2002

LEYENDA

Rocas del Mioceno al Cuaternario

- Sedimentos clásticos no-consolidados. --Peñones a arcilla y cieno clástico depositado mayormente durante el Pleistoceno y Holoceno.
- Sedimentos no-consolidados a pobremente consolidados. --Peñones a arcilla y cieno, trazas de caliza depositados mayormente en condiciones marinas o marinas llanas. Sedimentos enterrados con edades tan remotas como la edad miocénica equivalentes a la Caliza Ponce. Depósitos superiores son de edad Pleistocena y Holocena.
- Caliza -- Consiste de depósitos llanos de fauna marina. Se consideran equivalentes en edad a la Caliza Ponce.
- Secuencia estratos calizos -- Consiste de calizas formadas en ambientes profundos marinos dominados por foramífera planktoniza y béntica. Se considera equivalente en edad a la Formación Caliza Juana Díaz.

Rocas del Cretáceo a Terciario temprano

- Roca madre --Consiste de secuencia y camas litificadas de conglomerado de roca arenisca, sílica, volcánica e ígnea, con trazas de caliza.
- Unidad confinante
- Línea ilustrando la posición de la interfase agua fresca a agua salada.
- A — A' Línea de sección transversal
- U/D Falla --U, parte en alzada, D, parte en descanso. Entrecortada donde es inferida.
- 1 Punto de control y número de identificación

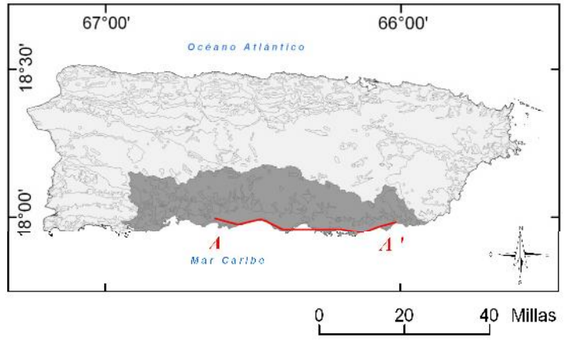


Figura 3-6. Sección geológica generalizada de la Región Sur de Puerto Rico (modificado de Renken, 2002, (Refiérase a la Figura 3-6 para localización).

Aunque el desarrollo de los acuíferos aluviales en la Región Sur de la Isla fue paralelo al de los acuíferos de la Región Norte, las condiciones geológicas y geoquímicas fueron diferentes (Figura 3-5 y 3-6). Los depósitos calizos de la Región Sur, que se extienden desde Juana Díaz hasta Peñuelas, no fueron disueltos o erosionados en forma similar a las rocas calizas de la Región Norte debido a su alto contenido de arcilla. Los ríos que fluyen por las laderas sur de la Isla arrastraron y depositaron grandes cantidades de aluvión sobre la zona de rocas calizas entre Juana Díaz y Ponce, y sobre zonas extensas de rocas de origen volcánico donde no ocurrieron depósitos calcáreos. En zonas como Juana Díaz, estos depósitos aluviales tienen un espesor de hasta 3,000 pies. El aluvión formó una serie de acuíferos deltaicos aluviales en los valles individuales que se extienden desde Patillas hasta Ponce, con depósitos adicionales menores en Tallaboa y Yauco.

Las formaciones geológicas recientes, del Terciario Medio y el Cuaternario, declinan hacia los océanos y mares con una pendiente promedio de tres (3) grados (º) en la Región Norte y entre 10º y 30º en la Región Sur. Esto representa una pendiente máxima en las formaciones de la Región Norte equivalente a una tercera parte de la pendiente de las formaciones en la Región Sur de la Isla. La pendiente o declive de las formaciones geológicas es indicativo de la energía acumulada en una cuenca. A mayor pendiente o declive, mayor la energía acumulada. La pendiente, espesor y distribución generalizada de las formaciones geológicas en las regiones Norte y Sur de Puerto Rico se ilustran en las Figuras 3-3 y 3-5.

Los estratos en la sección geológica representativa de la Región Norte de Puerto Rico se ilustran en la Figura 3-3. En esta sección están representadas las secuencias (de mayor a menor profundidad) de las tres eras geológicas predominantes. La definición de estos estratos integra procesos de sedimentación influenciados por cambios en la elevación promedio del mar a través de las eras geológicas, y cambios morfológicos causados por efectos climáticos y evolutivos en las rocas calizas (Figura 3-7 y 3-8). Los cambios que puedan derivarse de estos con el tiempo no serán descritos en este documento. Las secuencias predominantes en la costa norte de Puerto Rico son:

1) Formaciones no-diferenciadas del Cretácico Superior y el Terciario bajo,
2) Formaciones del Terciario medio
3) Depósitos del Cuaternario.

En las formaciones del Cretácico Superior (Cretáceo Superior) se pueden diferenciar más de 200 estratos basados en las propiedades físicas y químicas y el ambiente presente en el tiempo de deposición de las capas. Estos estratos consisten de material en forma de cenizas, en aglomerados de lava y entrelazados de flujos de lava en camas relativamente finas de caliza que han sido parcialmente cristalizadas en muchos lugares. Estas rocas volcánicas han sido dobladas, partidas y sometidas a un proceso complejo de metamorfosis de forma intrusiva produciendo rocas diorititas. Estas rocas masivas de composición intrusiva dioritita han sido expuestas por procesos de erosión en dos lugares en Puerto Rico (los batolitos de Utuado y San Lorenzo). Rocas masivas y densas de serpentinita y sílices asociadas componen grandes porciones de tierra en la parte suroeste de la Isla. La parte del estrato inferior perteneciente al Terciario Bajo contiene un alto contenido de material terrígeno o de arrastre que más bien es considerado por hidrogeólogos como el basamento del sistema calizo de la Región Norte de Puerto Rico. A lo largo de la Región Norte, el basamento rocoso puede encontrase a una profundidad de hasta 1,500 pies bajo la superficie.

En los estratos superiores se ilustra la secuencia de formaciones calizas pertenecientes al Terciario Medio. Estos estratos o formaciones incluyen: la Formación de San Sebastián; las Arenas de Mucarabones; la Caliza Lares; los miembros de la Formación Cibao: Río Indio, Quebrada Arenas, Guajataca, Montebello y parte clástica de Cibao; la Caliza Aguada; y la Caliza Aymamón. El espesor y profundidad de las formaciones contenidas en esta sección también se ilustra en la Figura 3-3.

Los estratos de la sección geológica representativa de la Región Sur de Puerto Rico se ilustran en la Figura 3-6. Igualmente, en esta sección están representadas las secuencias (de mayor a menor profundidad) de las tres eras geológicas predominantes. Las secuencias predominantes en la Región Sur de Puerto Rico incluyen:

1) Formaciones no-diferenciadas del Cretáceo Superior,
2) Formaciones del Terciario Medio y
3) Depósitos del Cuaternario.
4) Formaciones no-diferenciadas del Cretáceo Superior,
5) Formaciones del Terciario medio y
6) Depósitos del Cuaternario.

Figura 3-7. Los mogotes son el legado de las formaciones calizas de Puerto Rico. Esta foto ilustra su forma abultada la cual es típica en la isla.

Figura 3-8. Vista desde el interior de cavernas localizadas en las calizas de la Región Norte de Puerto Rico (foto cortesía del *USGS*, 1990).