

**ESTADO LIBRE ASOCIADO DE PUERTO RICO
DEPARTAMENTO DE RECURSOS NATURALES Y AMBIENTALES**

**Condiciones Hidrogeológicas y
Estrategias para la Protección de los
Acuíferos Superior e Inferior
de la Región Norte de Puerto Rico**

Preparado por:

**Sigfredo Torres-González
y
Ferdinand Quiñones, PE**

Oficina del Plan de Agua

2004

Condiciones Hidrogeológicas y Estrategias para la Protección de los Acuíferos Superior e Inferior de la Región Norte de Puerto Rico

Contenido

Resumen Ejecutivo.....	
Tabla de Contenido	
Trasfondo del Informe.....	
Descripción General de los Acuíferos de la Región Norte.....	
Geología y Geomorfología.....	
Estructura y Características.....	
Acuífero Superior o Llano	
Extensión Horizontal y Vertical	
Zonas de Recarga	
Características Hidráulicas	
Capacidad de Producción Sustentable	
Intrusión Salina.....	
Contaminación Química	
Acuífero Inferior o Artesiano	
Extensión Horizontal y Vertical	
Zonas de Recarga	
Características Hidráulicas	
Capacidad de Producción Sustentable.....	
Contaminación Química	
Balance de Agua Acuíferos de la Región Norte	
Estrategias para el Manejo, Restauración y Conservación	
Modelos Matemáticos de los Acuíferos	
Cambios en los Patrones de Extracción de Agua.....	
Conservación Zonas Recarga	
Aumentos Artificiales en Recarga.....	
Otras Alternativas	
Conclusiones y Recomendaciones.....	
Restricciones de Desarrollo	
Control de Extracciones	
Restauración de Pozos Artesianos.....	
Sustitución Abastos Zona Florida	
Recarga Artificial Zona de Dorado.....	
Otras Recomendaciones	
Referencias	

Condiciones Hidrogeológicas y Estrategias para la Protección de los Acuíferos Superior e Inferior de la Región Norte de Puerto Rico

Figuras

1. Acuíferos de la Región Norte de Puerto Rico
2. Extensión de los acuíferos calizos de la Región Norte de Puerto Rico
3. Geología generalizada de la Región Norte de Puerto Rico
- 4a. Sección longitudinal generalizada de la Región Norte de Puerto Rico
- 4b. Sección transversal generalizada de la Región Norte de Puerto Rico
5. Distribución de recarga a los acuíferos de la Región Norte, Puerto Rico
6. Transmisividad del Acuífero Superior de la Región Norte, Puerto Rico
7. Niveles de agua del Acuífero Superior medidos en piezómetro de observación USGS Sabana Hoyos, Vega Alta, Puerto Rico
8. Cambios en extracciones netas, Acuífero Superior de la Región Norte, Puerto Rico
9. Áreas contaminadas del Acuífero Superior, con orgánicos volátiles, trazas de metales y nutrientes, Puerto Rico
10. Transmisividad del Acuífero Inferior (Artesiano) de la Región Norte, Puerto Rico
11. Cambios en extracciones netas, Acuífero Inferior (Artesiano) de la Región Norte, Puerto Rico
12. Cambios en niveles potenciométricos (artesianos), Acuífero Inferior (Artesiano) de la Región Norte, 1955-2003, Puerto Rico
13. Esquemático de arreglo fraccionado de los estratos o unidades permeables de los acuíferos de la Región Norte de Puerto Rico
14. Uso de terrenos en la Región Norte de Puerto Rico

Tablas

- 1.

Condiciones Hidrogeológicas y Estrategias para la Protección de los Acuíferos Superior e Inferior de la Región Norte de Puerto Rico

Resumen Ejecutivo

Trasfondo del Informe

La Región Norte de Puerto Rico contiene los acuíferos más productivos de Puerto Rico. Estos son generalmente referidos como los acuíferos calizos de la Región Norte, aunque los mismos están compuestos de capas o mezclas de depósitos sedimentarios marinos de orígenes marinos y volcánicos (figura 1). Estos depósitos calizos ocupan un área superficial de aproximadamente 2,000 millas cuadradas, formando dos acuíferos de importancia, actualmente identificados como el Acuífero Llano o Superior, y el Acuífero Profundo o Inferior (también conocido como el acuífero artesiano). Para efectos de este informe, de aquí en adelante nos referimos a estos acuíferos por sus nombres como los Acuíferos de la Región Norte, o la Región del Karso.

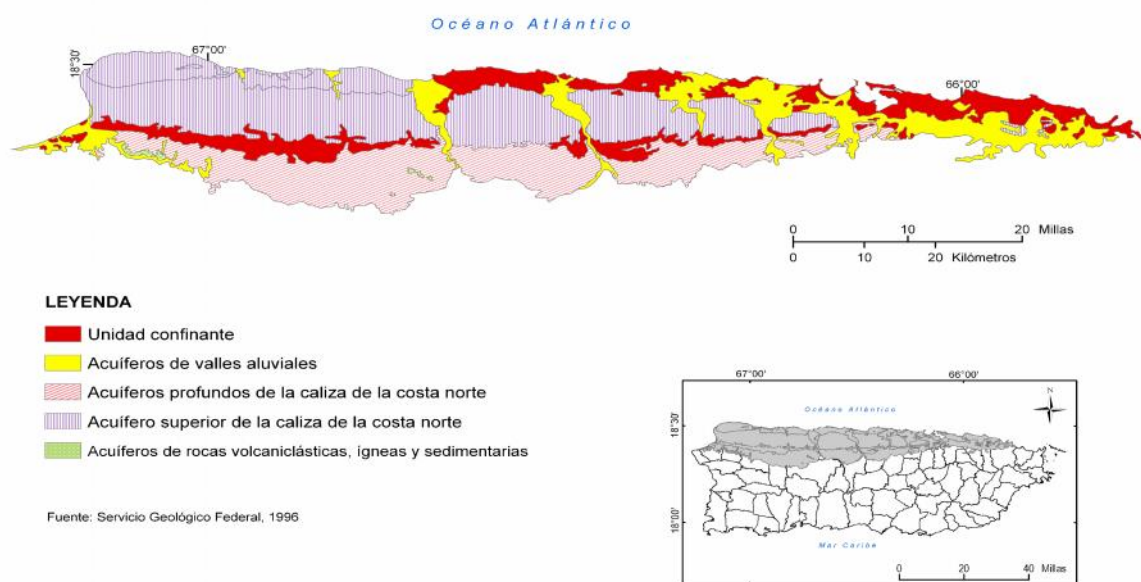


Figura 1. Acuíferos de la Región Norte de Puerto Rico.

[CORREGIR SHADING UNIDAD SEMI-CONFINANTE COSTANERA]

Durante los últimos 75 años los acuíferos de la Región del Norte han sido utilizados como fuente de abasto de agua para usos diversos. Originalmente se extraía agua principalmente para actividades agrícolas, incluyendo el riego de caña de azúcar y piñas. Comenzando en la década de 1970, el desarrollo industrial en la Región Norte promovió el hincado de pozos para este uso, principalmente del Acuífero Inferior (anteriormente referido como Profundo o Artesiano) por empresas farmacéuticas. Al presente el uso principal de los acuíferos es para abasto público provisto por la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados (AAA), seguido por el uso agrícola e industrial. Datos del USGS y la OPA establecen que en el 2004 el uso total de agua de los acuíferos de la Región Norte era de 76 mgd, de los cuales, la AAA extraía aproximadamente 40 millones de galones por día (mgd) para consumo

doméstico y comercial, el sector agrícola 25 mgd, y 11 mgd el sector industrial. De este total, 64 mgd se producen en el Acuífero Superior mientras que 12 mgd se producen en el Acuífero Inferior.

INSERTAR PIE DIAGRAM DEL USO DE AGUA EN LA REGION NORTE

La importancia de los acuíferos de la Región Norte ha resultado en varios estudios hidrogeológicos diseñados para definir sus características y capacidad de almacenaje y producción sustentable de agua. Estos estudios incluyen las investigaciones de Meyerhoff (1933), Monroe (1980), Sieglie y Moussa (1984) y recientemente Renken (2002). Diferentes regiones de los acuíferos fueron estudiadas por Giusti y Bennett (1972), Anderson (1976), Torres-González (1985), Quiñones-Aponte (1986), Gómez-Gómez y Torres Sierra (1988), Quiñones-Aponte (1989), Torres-González (1996), y Cherry (2001).

Durante los últimos 30 años las extracciones excesivas de agua subterránea de los acuíferos de la Región Norte han resultado en disminuciones significativas en los niveles del manto freático. Estos cambios han alterado el equilibrio hidrodinámico entre las zonas de agua fresca y salada que ocurren cerca de la costa, induciendo intrusión salina y aumentos en las concentraciones de sólidos disueltos en el agua extraída. Como ejemplo, en los sectores de Coto Sur, en Manatí y Cruce Dávila, en Barceloneta, los niveles de bombeo en los acuíferos han descendido considerablemente en relación a la posición del manto freático y superficie potenciométrica al compararse con los niveles antes del desarrollo de la infraestructura de pozos de extracción. El desarrollo industrial de la zona también ha contribuido al deterioro de los acuíferos, resultando en derrames de productos químicos que han contaminado sectores del Acuífero Superior. En Barceloneta y Vega Alta persisten dos sectores designados como áreas de “Superfondo” por la Agencia de Protección Ambiental Federal (EPA), debido a contaminación química. El vertedero municipal de Barceloneta (ahora cerrado), contribuye químicos tóxicos al Acuífero Superior. Por otro lado, las extracciones excesivas, reducciones en la recarga y escapes en pozos profundos, han resultado en reducciones significativas en los niveles potenciométricos en el Acuífero Artesiano o Inferior.

El objetivo de este informe es resumir las condiciones hidrológicas e hidrogeológicas de los acuíferos del carso, así como aspectos importantes relacionados al manejo de los recursos de agua subterráneos de la zona. El informe fue preparado como parte de las actividades de la Oficina del Plan de Aguas (OPA) del Departamento de Recursos Naturales y Ambientales (DRNA) para actualizar el “Plan Integral de Conservación, Desarrollo y Uso de los Recursos de Agua de Puerto Rico” (Plan de Aguas). El Plan de Aguas fue preparado en 1996 en cumplimiento con la Ley de Aguas de Puerto Rico (Ley Núm. 136 del 3 de junio de 1976). El DRNA lo actualiza al presente para incluir políticas públicas adicionales que permitan optimizar el manejo y conservación del agua en la Isla. La Ley de Aguas específicamente requiere al DRNA identificar las condiciones presentes de los recursos de agua subterráneos para poder promover su conservación, desarrollo y uso prudente.

Anteriormente en el 2003, la OPA preparó un informe similar sobre las condiciones hidrogeológicas de los acuíferos de la Región Sur de Puerto Rico.

Descripción General de los Acuíferos de la Región Norte de Puerto Rico

Los Acuíferos de la Región Norte son los sistemas subterráneos más importantes de Puerto Rico. Estos acuíferos se componen de: 1) dos sistemas calizo con nivel alto a moderado de desarrollo de fracturas y 2) sistemas aluviales desarrollados por el transporte de sedimentos de los ríos principales desde la parte central volcánica hacia las costas al norte de la isla (figura 1). El área geográfica que contiene los Acuíferos de la Región Norte es de aproximadamente **¿700?** millas cuadradas y se extiende desde Aguadilla en el oeste hasta Loíza en el este.

El Acuífero de la Región Norte es complejo en su aspecto estructural y características de flujo, formado por los Acuíferos Superior e Inferior. Esta división se basa en un estrato geológico relativamente impermeable que separa las zonas principales de flujo de agua subterránea en forma distintiva. La figura 2 ilustra la ubicación y extensión de los Acuíferos de la Región Norte de Puerto Rico.

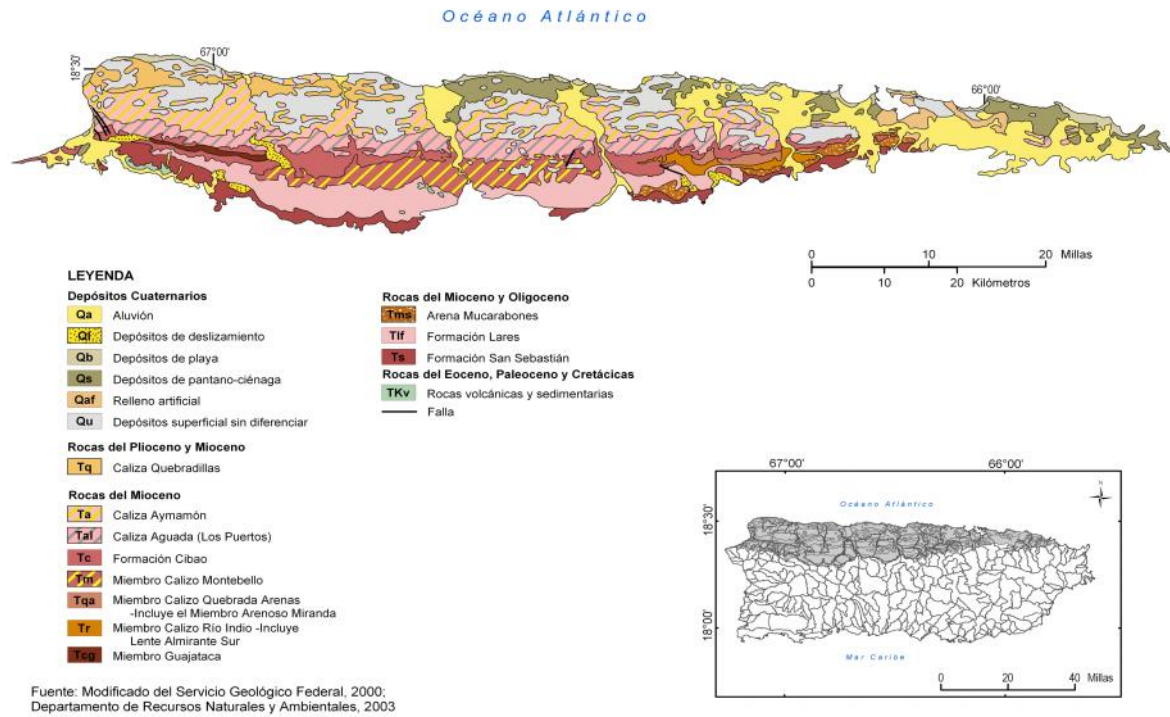


Figura 2. Extensión de los acuíferos calizos de la Región Norte de Puerto Rico.

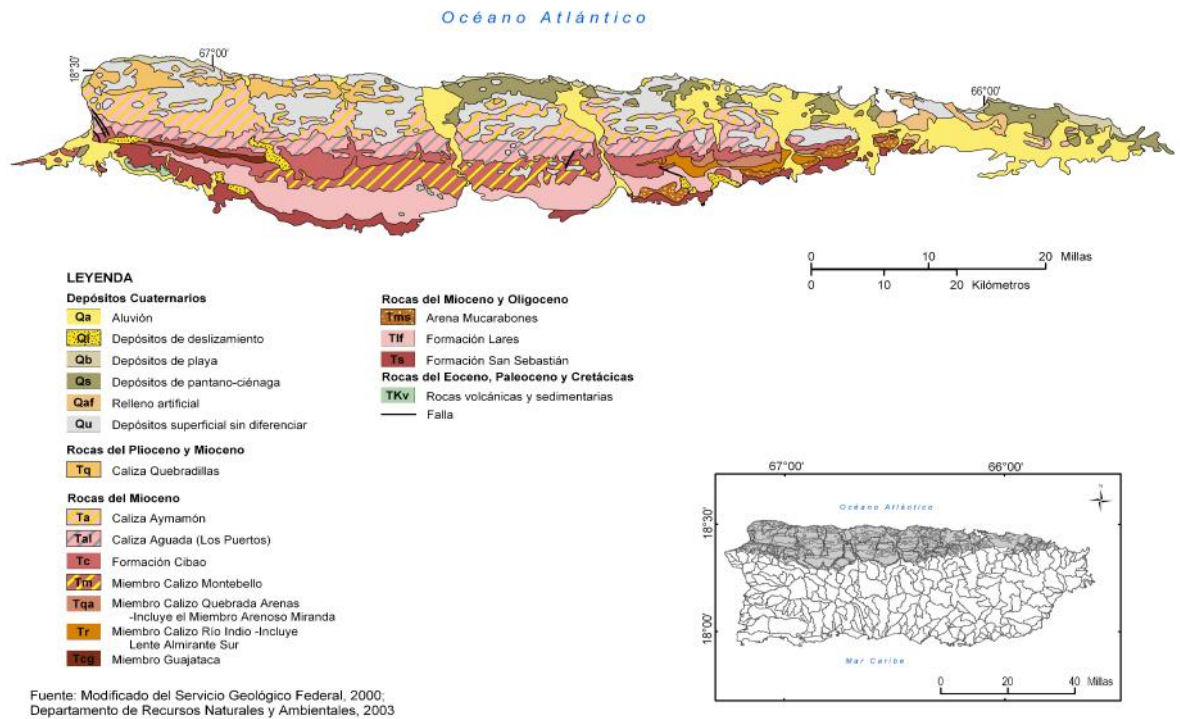


Figura 2. Extensión de los acuíferos calizos de la Región Norte de Puerto Rico.

Geología

Los Acuíferos de la Región Norte de Puerto Rico se componen de rocas calizas del Período geológico Terciario Medio y de material no-consolidado de origen volcánico proveniente de la parte central de la isla (figura 3). Estas rocas forman a su vez una secuencia de estratos conocida como secuencia del Terciario Medio. Esta secuencia de estratos se agrupa en seis formaciones de más antigua a más joven, incluyendo: la Formación San Sebastián perteneciente al Oligoceno temprano; Formación Lares del Oligoceno tardío; la Formación Cibao del Oligoceno y Mioceno; las Calizas de Aguada y Aymamón pertenecientes al Mioceno; y la Formación Camuy del Plioceno. Arena blanca 'blanket sands' y depósitos aluviales del Plioceno y el Cuaternario se encuentran mayormente en la zona propensa a inundación en el valle y las áreas costaneras (Monroe, 1976). La inclinación de la formación entre el contacto entre la Caliza de Aymamón y la Caliza Aguada en promedio es de 6.5 grados (Torres-González, 1996) en la parte sur descendiendo a cerca de 2 grados en la planicie costanera (Monroe, 1980). La geología generalizada de la Región Norte de Puerto Rico se ilustra en la figura 3, mientras que en la figura 4 se ilustra una sección transversal de la geología generalizada. El lector es referido al informe reciente de Renken y otros (USGS, 2002) para más detalles sobre la geología e hidrogeología de la Región Norte de la Isla.

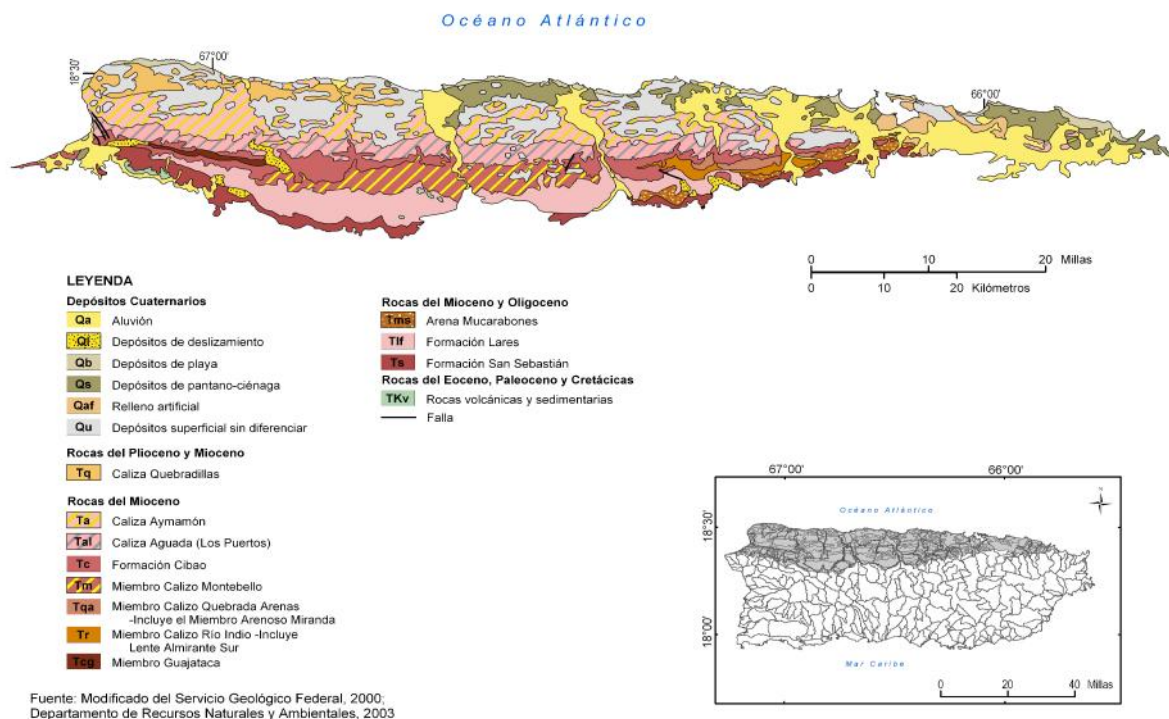


Figura 3. Geología generalizada de la Región Norte de Puerto Rico.

La geología de esta región se puede describir de forma general. A continuación una descripción breve de cada formación geológica.

- o La Formación San Sebastián se compone de material fluvial terrígeno-clástico, con arcillas marinas-marginales y caliza. **[REVISAR]**
- o La Formación Lares consiste de carbonatos depositados en una plataforma interior a media.
- o La Formación Cibao consiste mayormente de piedra arcillosa, depósitos marinos orgánicos y caliza con contenido terrígeno. Esta formación está dividida en dos miembros principales: la Caliza de Montebello y la parte superior sin nombrar de la Formación Cibao. Otros miembros de menor importancia son: Guajataca, Río Indio, Quebrada Arenas, Arenas Miranda y Mucarabones. La caliza de Montebello es una caliza depositada en una plataforma media. La parte superior sin nombrar de la Formación Cibao consiste mayormente de depósitos marginales marinos, depósitos marinos orgánicos y calizos.
- o La caliza de Aguada consiste de depósitos de carbonato en una plataforma interior localmente terrígenos, convirtiéndose gradualmente en tiza y piedra arcillosa a medida que avanza hacia la planicie costanera (Monroe, 1976).
- o La caliza Aymamón, litológicamente uniforme en su parte expuesta, consiste mayormente de una caliza densa y pura ancha y en camadas y en su mayoría no contiene cuarzo.
- o La Formación Camuy está compuesta de tiza formada en un ambiente saturado profundo y se expone a lo largo de las costas en el norte de Puerto Rico (Monroe, 1976).

Estructura y Características

Los depósitos aluviales ocurren mayormente a lo largo de los ríos principales que cortan las formaciones calizas en su trayecto desde la Cordillera Central hasta desembocar en el Océano Atlántico. Estos depósitos geológicos recientes pueden alcanzar espesores saturados desde 130 pies en la costa hasta un máximo de 300 pies en el valle del Río Grande de Manatí.

Entre 70 y 140 millones de años atrás Puerto Rico estuvo sumergido bajo el océano creando así la oportunidad para la acumulación de depósitos marinos actualmente evidenciados por una riqueza de fósiles de conchas marinas. Estos depósitos marinos constituyen la roca caliza rica en carbonatos de alta pureza. Estos carbonatos a su vez constituyen los acuíferos cársticos de la Región Norte. Los espesores máximos de las calizas del Acuífero Superior (Llano) se estiman como sigue: 650 pies para la Formación Camuy (Giusti, 1978); 290 pies para la Formación

Aguada (Giusti, 1978); y 410 pies para la Formación Aymamón (Monroe, 1976). El espesor saturado máximo de las calizas del Acuífero Inferior (Artesiano) de la Región Norte de Puerto Rico es de aproximadamente 1,000 pies (Renken 2002).

Una de las características más importantes de esta región es la topografía cárstica. La topografía cárstica se caracteriza por la formación de sumideros y mogotes en la roca caliza. Los sumideros se generan por la disolución gradual de la roca creando puntos débiles que se colapsan con el paso del agua de escorrentía y la lluvia local. Los mogotes a su vez son el material remanente que aunque este rodeado de sumideros es roca caliza que aún no ha sido afectada por el drenaje natural del agua y por consiguiente no ha sufrido erosión y desgaste significativo. Estructuralmente, los mogotes son columnas de piedra caliza esculpidas por el viento y la lluvia durante millones de años y se encuentran en muy pocas localizaciones a través del planeta. Los mogotes se clasifican de acuerdo a su arreglo y forma. Pueden ser cónicos, en hileras, aislados, entre otras.

La estructura irregular de conductos hace de estas formaciones cársticas excelentes zonas de recarga a acuíferos. La permeabilidad de los acuíferos calizos del norte es mayor a medida que estas formaciones entran en contacto con el agua de lluvia o la escorrentía producto de la misma. La lluvia al igual que la escorrentía acelera el desarrollo de los conductos o fracturas. Aunque estructuralmente el Acuífero Inferior es más profundo que el Acuífero Superior, el material terrígeno y arcilloso contenido en fracturas del Acuífero Inferior limita y retarda la transferencia de agua. Esto, sin embargo, no ocurre en la caliza Aymamón debido al alto grado de pureza del carbonato de calcio depositado en un ambiente marino. La agresividad química de la lluvia y escorrentía laminar sobre estos depósitos, desarrolló planos de porosidad en conductos (porosidad secundaria) que transfieren agua a velocidades mayores a sistemas subterráneos porosos, como por ejemplo el acuífero aluvial del Río Grande de Arecibo.

A continuación se resumen las condiciones hidrológicas de los Acuíferos Superior e Inferior de la Región Norte de Puerto Rico. También se incluye un resumen de los problemas más importantes de contaminación de estos acuíferos, incluyendo intrusión salina y contaminación química.

Acuífero Superior o Llano

El Acuífero Superior de la Región Norte es uno compuesto por depósitos calizos y material sedimentario a lo largo de los cauces de los ríos que fluyen desde la Cordillera Central a través de las rocas calizas y valles aluviales en su paso al Océano Atlántico. Este acuífero es el más productivo de Puerto Rico a pesar de la contaminación química de varios sectores en los municipios de Barceloneta, Manatí, Vega Baja y Vega Alta. Aunque anteriormente este acuífero era referido como el Acuífero Freático de la Región Norte, en realidad el agua en el mismo existe bajo diferentes condiciones que contradicen su definición. Condiciones freáticas pueden

apreciarse desde el afloramiento de las formaciones Aguada hacia el sur hasta localizaciones cerca de la costa. Condiciones semi-confinadas cerca de la costa son comunes debido a depósitos estratificados orgánicos, formaciones de piedra de playa (*beach rock*) y eoleonita y otros depósitos sedimentarios en la cercanía de los ríos principales que localmente confinan al acuífero superior. Por esta razón en este informe se utiliza el término de Acuífero Superior o Llano.

Extensión Horizontal y Vertical

El área superficial del Acuífero Superior es de aproximadamente ¿? millas cuadradas. Este acuífero se extiende de este a oeste desde el municipio de Loíza hasta Aguadilla. El acuífero ha sido estudiado en forma fragmentada para facilitar el procesamiento y análisis de los datos existentes, y consiste de las siguientes áreas costaneras de este a oeste: 1) Loíza a San Juan, 2) San Juan a Bayamón, 3) Bayamón a Toa Alta, 4) Río de La Plata a Río Cibuco, 5) Río Cibuco a Río Grande de Manatí, 6) Río Grande de Manatí a Río Camuy y 7) Río Camuy a Aguadilla. En su vertiente norte-sur el Acuífero Superior se extiende desde el litoral o zona costanera hasta las colinas al sur (figura 2). En promedio este acuífero posee una longitud de ¿? millas y un ancho de ¿? millas.

La extensión vertical del Acuífero Superior se determina de la porción saturada del acuífero según su definición. Los estratos saturados de agua fresca en las rocas calizas del acuífero se estima que tienen un espesor de hasta 450 pies en su sección más ancha en el área de los pozos de Santana en el municipio de Arecibo. Hacia el oeste el espesor saturado de agua fresca es de 150 pies en el pozo Paloma #1 en Camuy. Hacia el este el espesor saturado puede alcanzar 400 pies en los pozos no-confinados en el área de Cruce Dávila en Barceloneta, y hasta 250 pies en el área de los pozos de Sabana Hoyos #2 en Vega Baja. El espesor saturado disminuye hacia el norte, hasta cero en las costas y en la parte tierra adentro cerca del afloramiento de la formación caliza de Aguada (figura 4a, b).

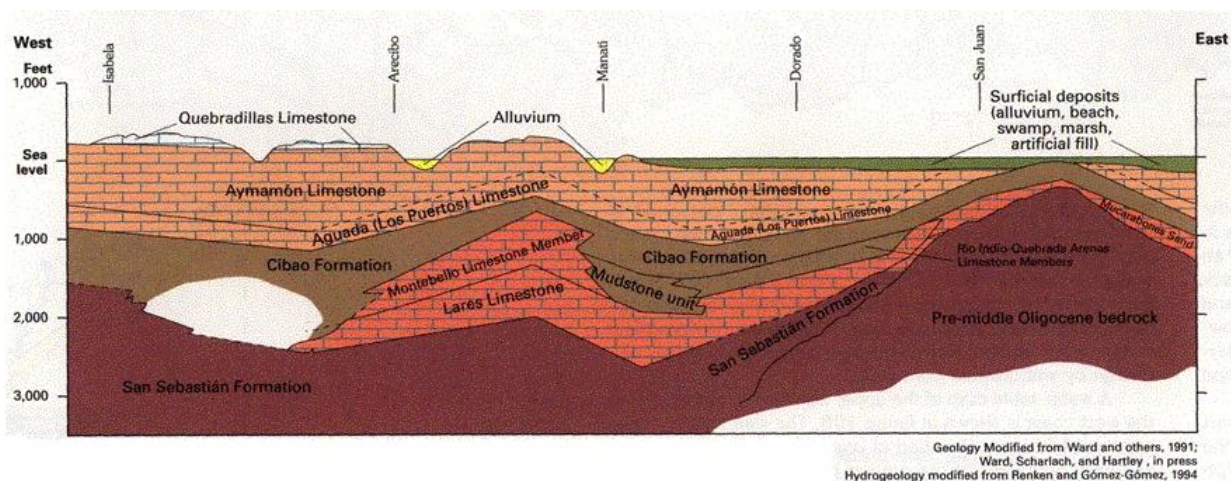


Figura 4a. Sección longitudinal generalizada de la Región Norte de Puerto Rico.

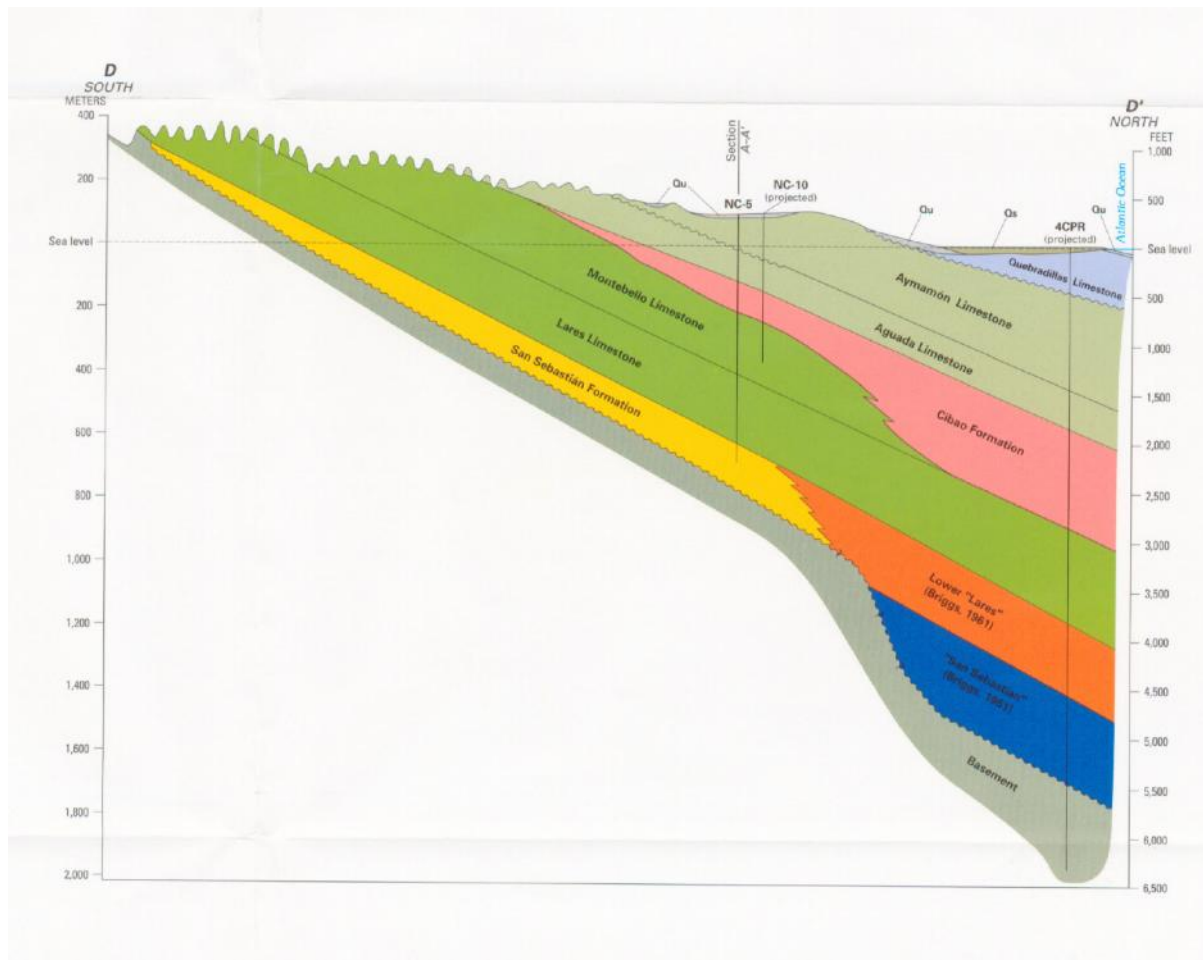


Figura 4b. Sección transversal generalizada de la Región Norte de Puerto Rico.

Zonas de Recarga

Uno de los aspectos más importantes de acuíferos altamente permeables es la definición de las áreas o zonas de recarga de los mismos. Se estima que el Acuífero Superior se recargue a una razón promedio entre 10 y 15 pulgadas por año (Giusti, 1978; Torres-González, 1996; Cherry, 2001). Esto representa una recarga anual neta de **500 mgd [VERIFICAR]**. Sin embargo, la razón de recarga varía considerablemente entre el material sedimentario depositado a lo largo de los cauces principales y los valles calizos costeros. Se estima que la recarga promedio de los valles aluviales costeros sea entre 5 y 7 pulgadas por año. Esto representa menos de la mitad de la recarga neta estimada en las formaciones calizas. La recarga máxima documentada, la cual ocurre en la región de mogotes y sumideros, puede alcanzar las 28 pulgadas por año (Torres-González, 1996). Mientras que existen áreas donde no existe un componente de recarga principalmente como resultado de condiciones localmente confinadas cerca de la costa limitando la infiltración natural o inducida de recarga al acuífero en estas áreas.

La figura 5 ilustra la distribución espacial de recarga de agua de lluvia del Acuífero Superior de la Región Norte de Puerto Rico. Estimados parciales o totales de recarga neta al Acuífero Superior existen para las seis regiones de:

1. Loíza a San Juan, (Anderson, 197_??)
2. San Juan a Toa Alta (Anderson, 197_??, Torres-González, 198__),
3. Río de La Plata a Río Cibuco (Gómez-Gómez y otros, 1988; Sepúlveda, 199_??),
4. Río Cibuco a Río Grande de Manatí, (Cherry, 199_),
5. Río Grande de Manatí a Río Camuy (Torres-González, 1996) y
6. Río Camuy a Aguadilla (Giusti 197__).

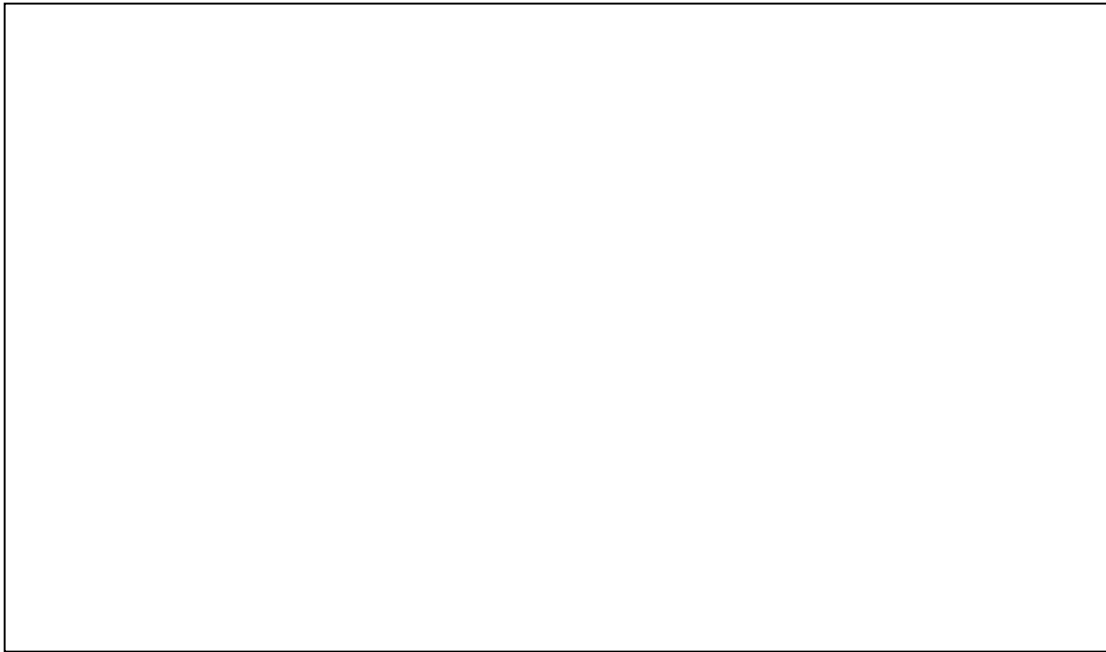


Figura 5. Distribución de recarga a los acuíferos de la Región Norte, Puerto Rico.

Características Hidráulicas

La permeabilidad de los sistemas calizos ha sido aproximada y calibrada utilizando modelos matemáticos de flujo donde se incorporan datos de recarga y descarga al igual que tendencias en los niveles potenciométricos o superficie de agua en el Acuífero Superior. Los valores estimados de permeabilidad representan la capacidad de transmitir agua de un material poroso, ejemplo: arena. Sin embargo, en el caso de la zona cárstica, material fracturado, este valor ha sido promediado, mediante el uso de modelos matemáticos que utilizaron estimados de capacidad específica en pozos para determinar la capacidad de transmisión neta de una columna de agua en el acuífero promediada al espesor saturado total del mismo (ecuaciones 1 y 2). Debido a que el Acuífero Superior existe bajo condiciones localmente confinadas en la costa, el valor ampliamente utilizado para describir la transferencia de agua a través de una columna de agua en las rocas es la transmisividad. Los valores de transmisividad una vez son calibrados pueden ser re-evaluados para entonces aproximar el valor de la permeabilidad de los acuíferos en la Región Norte.

Valores de capacidad específica, extracción en galones por minuto por cada pie de descenso en nivel potenciométrico, para el Acuífero Superior varían desde valores menores de 1 galón por minuto por pie hasta sobre 2,000 galones por minuto por pie (Giusti, 1978). Estos valores representan estimados de transmisividad de aproximadamente uno a 5 pies cuadrados por día hasta tan altos como 380,000 pies cuadrados por día (USGS 1826550663334, Torres-González, 1988). Al utilizar estos valores en los modelos matemáticos de flujo de agua subterránea y ajustarlos por las condiciones de recarga y descarga al Acuífero Superior encontramos que un valor más adecuado de transmisividad puede alcanzar los 150,000 pies cuadrados por día. La figura 6. ilustra la distribución de valores de transmisividad para el Acuífero Superior de la Región Norte de Puerto Rico.

La velocidad de transferencia del agua subterránea en un acuífero freático puede aproximarse mediante la ecuación de Darcy (1). Aunque esta ecuación solo aplica a sistemas porosos, en Puerto Rico ha sido utilizada para aproximar el flujo o descarga de agua subterránea. Giusti (1978) estimó el valor de conductividad hidráulica (K) entre 0.1 pies por segundo y 1.0 pie por segundo en sistemas con flujo por conductos. No obstante, estos valores son promediados verticalmente por lo que representan solo una fracción de la velocidad de Darcy para acuíferos calizos.

$$K = -A/q [D x / D h] \quad (1)$$

Donde:

K es la conductividad hidráulica, en pies por segundo,
q es la descarga o flujo de agua subterránea, en pies cúbicos por segundo,
D x / D h es el inverso del gradiente hidráulico, en pies/pie
A es el área perpendicular al flujo, en pies cuadrados.

El signo negativo hace la ecuación positiva al corregir y hacer positivo el cambio en elevación potenciométrica ($h_2 - h_1$). Esto implica que el nivel potenciométrico en el acuífero deberá ser menor en la posición de flujo 2 cuando se compara con la posición de referencia 1.

Como indicamos, debido a que los acuíferos calizos de la Región Norte son acíferos calizos de roca fracturada, el promedio de conductividad hidráulica determinado para estratos en una columna vertical parte de datos de capacidad específica. Este promedio resulta en un flujo promedio de agua subterránea considerable que al compararse con los componentes de flujo del sistema físico resulta ser muchísimo mayor en magnitud. El resultado de esta discrepancia en flujos de agua subterránea en la Región Norte es un gradiente hidráulico (Dh / Dx) relativamente pequeño lo cual es indicativo de un cambio insignificante en la superficie potenciométrica del Acuífero Superior. Esta es la razón por la cual para los acuíferos calizos de la Región Norte de Puerto Rico se utilizan valores de transmisividad y no de conductividad hidráulica. La transmisividad es el producto del promedio de la conductividad hidráulica y el espesor saturado total (2).

$$T = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_i m_i \quad (2)$$

Donde,

T es la transmisividad del acuífero, en pies cuadrados por día,

N es el número total de estratos saturados,

i es un estrato saturado,

K es la conductividad hidráulica del estrato i , en pies por segundo y

m es el espesor saturado del estrato i , en pies.

La transmisividad del Acuífero Superior de la Región Norte de Puerto Rico, según documentada, varía en magnitud desde aproximadamente 1,000 pies cuadrados por día en las colinas al sur de la latitud $18^{\circ}24'$ y aumenta hasta alcanzar valores de hasta 150,000 pies cuadrados por día en la planicie costanera. Estos valores de transmisividad disminuyen en el eje transversal cerca de los valles aluviales que cortan la caliza superior en su avance hacia el mar. La transmisividad del Acuífero Inferior alcanza un valor máximo en la Formación Montebello donde se ha estimado en cerca de 5,000 pies cuadrados por día. La distribución de valores de transmisividad promedio en ambos acuíferos (Superior e Inferior) se ilustra en la figuras 6a,b.

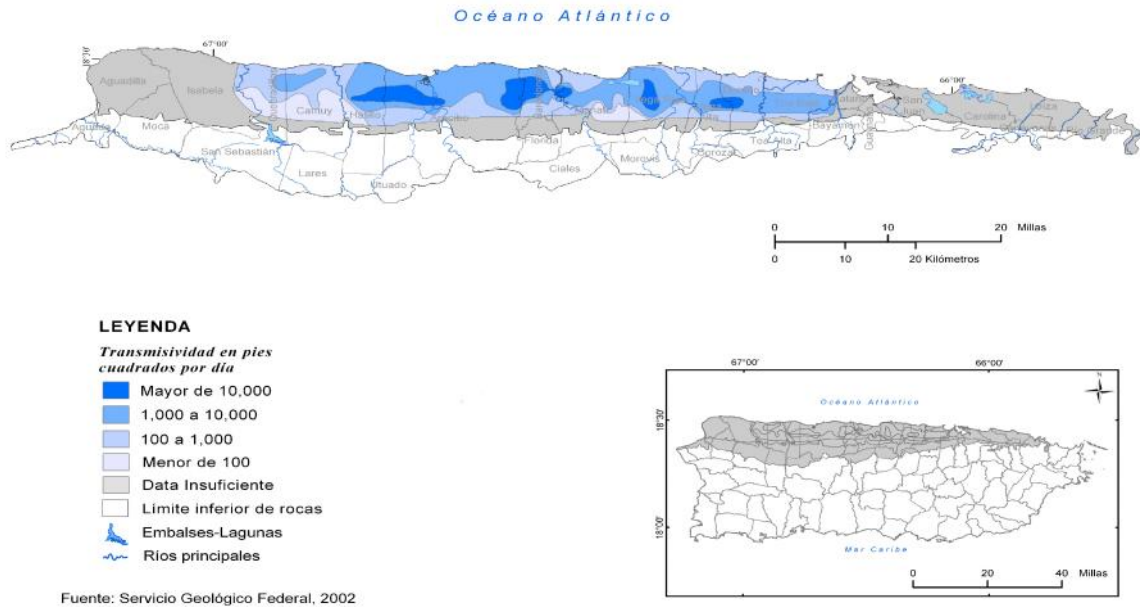


Figura 6a. Transmisividad del Acuífero Superior de la Región Norte de Puerto Rico. [Corregir unidades y valores en la leyenda para reflejar valores de T de hasta 150,000 pies cuadrados por día]

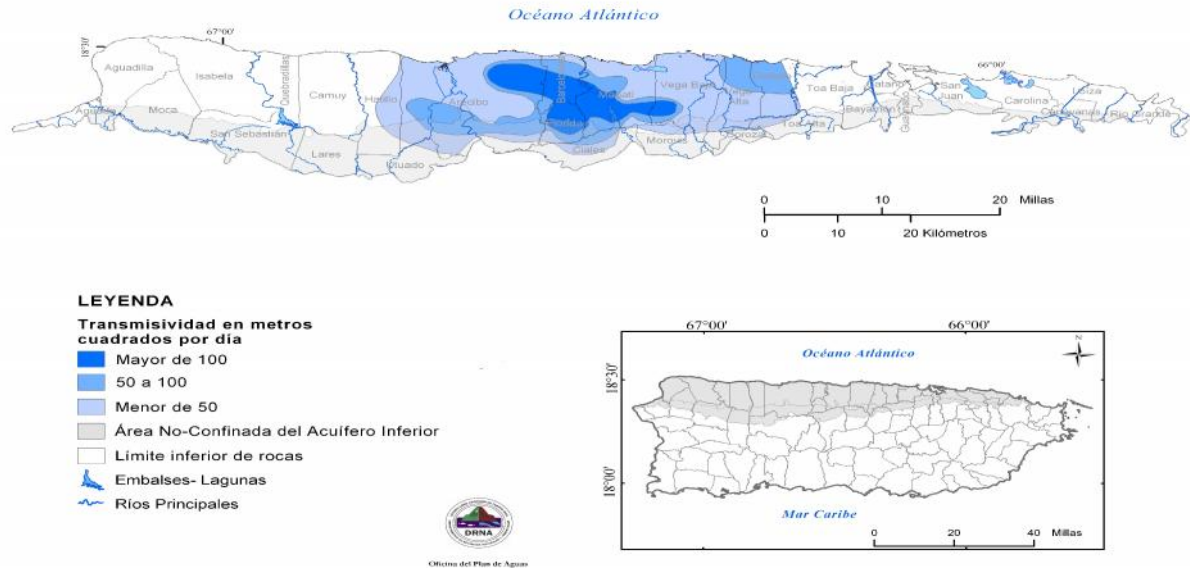


Figura 6b. Transmisividad del Acuífero Inferior de la Región Norte de Puerto Rico. [Corregir unidades y valores en la leyenda para reflejar valores de T de hasta 5,000 pies cuadrados por día]

Capacidad de Producción Sustentable

La capacidad de producción sustentable del Acuífero Superior esta determinada por cambios en los patrones de recarga natural por ende cambios en la precipitación pluvial promedio anual. El cambio en almacenamiento de agua subterránea en el Acuífero Superior es pequeño debido a la alta capacidad de transferencia de agua a través de los conductos y fracturas en la roca caliza. Es importante analizar la tendencia en el descenso en los niveles potenciométricos con tiempo para poder determinar el efecto de las extracciones de agua subterránea en años sucesivos. Un acuífero 'recargado' puede producir más agua de forma instantánea pero esta producción depende de la recarga neta durante un ciclo normal de uso. El ciclo normal de uso consiste de un periodo de un año donde coinciden periodos húmedos y secos de recarga donde el componente hidrológico lo que predomina es la extracción de agua subterránea.

Durante los últimos 40 años, la extracción de agua subterránea del Acuífero Superior ha aumentado en un 150 por ciento. Actualmente la extracción total de agua subterránea es de aproximadamente **64 mgd**, comparada con 50 mgd en 1960. En este mismo periodo han ocurrido eventos de contaminación de las aguas subterráneas en Vega Alta, Barceloneta y Arecibo lo que provocó la construcción de nuevos pozos en áreas alejadas de la nube de contaminación causada por volátiles orgánicos principalmente e intrusión salina en un segundo plano de importancia. La figura 7 ilustra los cambios en patrones de uso de agua superficial y subterránea en la Región Norte entre 1980 y el año 2001.

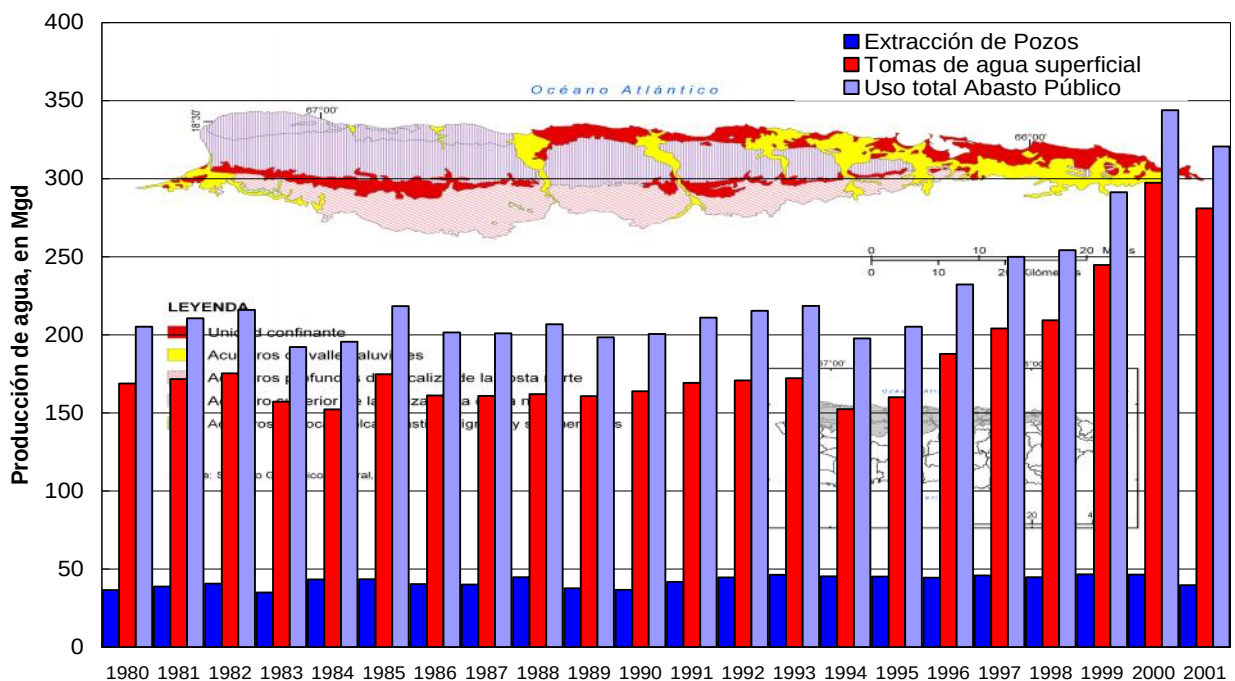


Figura 7. Producción de agua superficial y subterránea para abasto público en la costa norte de Puerto Rico (región solo incluye aquellos pueblos costaneros donde se utilizan ambos recursos).

Un ejemplo del efecto de las extracciones de agua subterránea en el Acuífero Superior es la reacción de los niveles en el pozo de observación de Sabana Hoyos (figura 8). Este pozo es parte de la red de monitoreo del USGS y mide los niveles en el acuífero en intervalos de 15 minutos. Este pozo de monitoreo mide el nivel freático en esta zona del Acuífero Superior entre el Río Cibuco y el Río de La Plata. Los datos recopilados en esta estación de medición de niveles se extienden desde el 11 de mayo de 1959 hasta el presente. El análisis de esta figura y los valores mínimos permite dividir los escenarios de extracciones de agua en 4 periodos principales: 1) 1960-1982, 2) 1982-1986, 3) 1987-1995, y 4) 1996 hasta el presente.

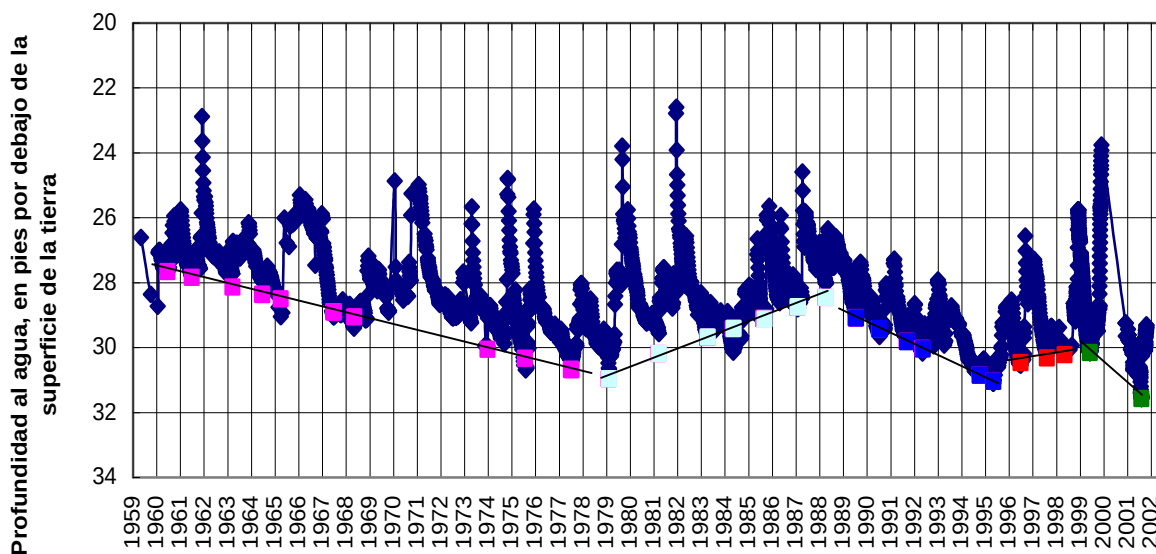


Figura 8. Piezómetro de observación USGS Sabana Hoyos, Vega Alta, Puerto Rico.

La expansión de los centros urbanos y la necesidad de satisfacer la demanda de abasto público se combinaron para detener el descenso en los niveles de agua subterránea. La proliferación de pozos sépticos y drenajes concentrados de centros urbanos contribuyó a un aumento significativo en la recarga de los sistemas. Esto se puede apreciar claramente luego de la desaparición de la producción de caña de azúcar reemplazada por el sector industrial y luego el comercial a partir de 1970. A continuación un análisis de las condiciones hidrológicas que propiciaron estos cambios en la profundidad del agua observada en el pozo Sabana Hoyos #2 en Vega Baja:

- Las tendencias en los niveles del Acuífero Superior en Vega Alta básicamente responden a un aumento paulatino en las extracciones de agua subterránea para el primer periodo, 1960-1982, de 3.5 mgd a **20 mgd**.
- Una recuperación en los niveles del acuífero en el segundo periodo, 1982-1986, como resultado de la contaminación del acuífero en el área próxima al pueblo de Vega Alta y la reducción en las extracciones de agua subterránea en áreas próximas al derrame de contaminantes en el sector de Ponderosa en Vega Alta.

- La construcción de pozos adicionales hacia el este y cerca del Río de La Plata en el tercer periodo, 1987-1995 causó otro descenso en los niveles de agua subterránea.
- Desde el 1996 las condiciones hidrológicas han respondido a una precipitación por debajo de lo normal y bombeo excesivo entre 12-20 mgd de los pozos en el área costanera entre el Río Cibuco y el Río de La Plata.
- Actualmente la extracción en esta área del Acuífero Superior en Vega Alta es de **18 mgd**. Las tendencias en los niveles de agua en esta área son similares a las otras áreas que componen el acuífero.

Descensos continuos en los niveles mínimos en el Acuífero Superior contribuyen a reducir el espesor de la columna de agua fresca en el acuífero, lo que ocasiona un levantamiento sutil de la interfase salina. El efecto de estos descensos en los niveles mínimos en el pozo de observación utilizado es representativo del uso de agua subterránea en el acuífero. Estos descensos en niveles quizás no afecten la calidad del agua en el pozo de observación, pero obviamente indican una tendencia a largo plazo que de no atenderse puede ocasionar problemas serios de intrusión salina en pozos localizados cerca de la costa. Este fenómeno comúnmente conocido como intrusión salina, aunque existe en forma natural en islas, frecuentemente limita la utilización del agua subterránea debido al alto contenido de sales.

Intrusión Salina en el Acuífero Superior

Un ejemplo de cómo puede ocurrir intrusión salina en un acuífero es el afinamiento de la columna de agua fresca en el Acuífero Superior en el área de Vega Alta o entre el Río Cibuco y el Río de La Plata. La figura 8 ilustra las tendencias de niveles de agua en este acuífero como resultado de extracciones de agua subterránea de pozos. A medida que el nivel de agua subterránea desciende la columna de agua fresca en el acuífero se afina causando un levantamiento de la interfase salina. Como regla general por cada pulgada que desciende el nivel de agua subterránea, la interfase salina sube 40 pulgadas. Evaluando estas tendencias mediante el análisis de los niveles mínimos en cada uno de los cinco periodos descritos anteriormente, podemos concluir que el descenso promedio entre 1960 y 1978 fue de 2.1 pulgadas por año de agua subterránea o 84 pulgadas por año de ascenso de la interfase salina.

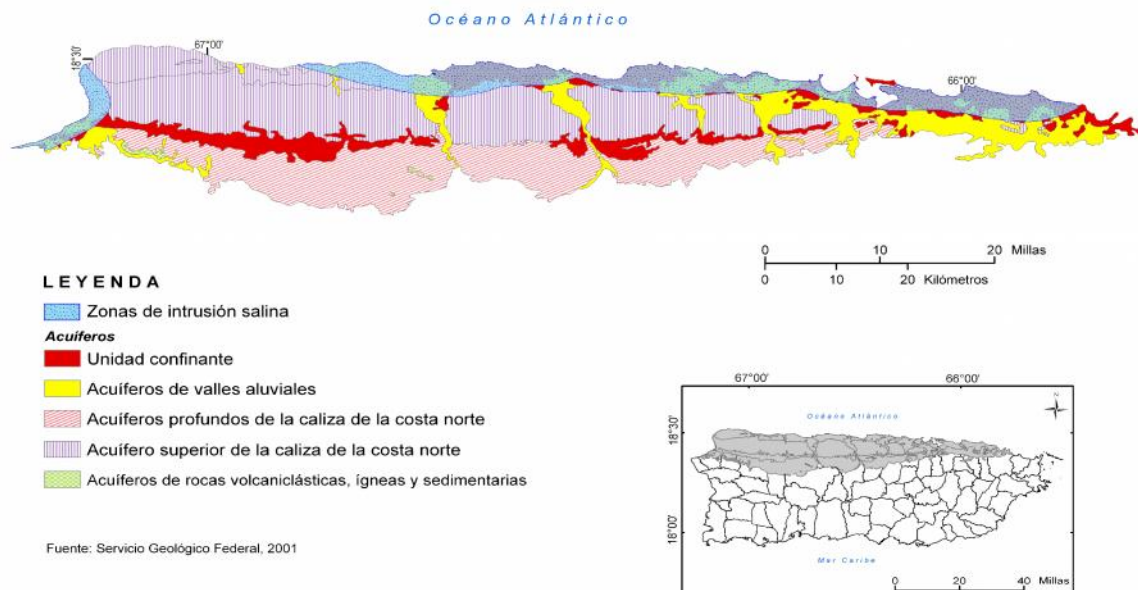


Figura 8. Extensión transversal de la cuña de agua salada en el Acuífero Superior de la Región Norte de Puerto Rico.

Los niveles freáticos en el acuífero se recuperaron en la década de 1980, al reducirse la extracción de agua en la zona debido al cierre de los pozos de abasto público en el área de Ponderosa de Vega Alta. En esta zona ocurrió un derrame industrial de solventes que afectó la calidad del agua en el acuífero. El cierre de estos pozos permitió la recuperación del acuífero a una tasa de aproximadamente 3.0 pulgadas por año o 120 pulgadas por año de descenso de la interfase salina, y para 1988 los niveles freáticos en la zona eran similares o superiores a los niveles a principios de la década de 1960.

Entre 1989 y 1995 se construyeron pozos hacia el este y norte del área contaminada en el área de Vega Alta, lo que causó un descenso promedio anual de 4.0 pulgadas en los niveles freáticos o 160 pulgadas por año de ascenso de la interfase salina. Desde entonces los niveles freáticos se han mantenido en la vecindad de 29 pies en el pozo de Sabana Hoyos, y no se ha registrado una tendencia de recuperación a causa de una reducción en las extracciones. Los datos también reflejan varios eventos significativos de recarga producto de la lluvia y recarga inducida por los Huracanes Hortensia y Georges. Entre los años 1995 y 1999, los niveles freáticos aumentaron aproximadamente 1.5 pulgadas por año. Al presente, los niveles disminuyen a razón de 0.7 pulgadas por año. Esto representa un ascenso de la interfase salina de 28 pulgadas por año.

Para poder apreciar el efecto acumulador del descenso paulatino pero consistente en los niveles freáticos en el Acuífero Superior, es necesario considerar el efecto en la posición de la interfase de agua salina. En general el espesor de la capa de agua fresca en el Acuífero Superior se ha reducido (afinado) probablemente entre 1 y 5 pies. En el área de Vega Alta este afinamiento es de 2 pies, lo que ha resultado en el ascenso de la interfase salina de aproximadamente 80 pies. Este efecto de levantamiento de la interfase salina ha afectado pozos en su mayoría construidos cerca de la costa, donde los efectos de la intrusión salina generalmente son más evidentes y perjudiciales.

Finalmente, el resultado de la sobre-explotación del Acuífero Superior entre 1959 y el presente se evidencia en: 1) cierre de pozos en áreas costaneras, 2) aumento en las concentraciones de sólidos disueltos a niveles superiores a los 1,000 miligramos por litro y 3) niveles potenciométricos mínimos históricos. De continuar este patrón de sobre-explotación, y considerando la pérdida de volumen en almacenamiento en el acuífero entre el Río Camuy y el Río de La Plata de cerca de **75,000 acre-pies por año**, se estima que en aproximadamente 10 años sectores importantes del Acuífero Superior cerca de la costa no podrán utilizarse como fuente de abasto de agua fresca. Es importante considerar que una vez ocurre intrusión salina en un acuífero costanero, desplazar la cuña de agua salada o salobre hacia el mar puede tomar décadas o hasta cientos de años.

Contaminación Química

La contaminación en el Acuífero Superior con orgánicos volátiles, trazas de metales y nutrientes también limita el rendimiento y vida útil de este importante recurso (figura 9). La contaminación química usualmente está relacionada a derrames de solventes que debido a su solubilidad han penetrado hasta el nivel freático en el acuífero, o saturan las rocas en la zona vadosa para luego ser disueltos lentamente por el agua que se infiltra desde la superficie. Algunos de estos solventes y compuestos orgánicos presentes en varios sectores del Acuífero Superior incluyen el tricloroetileno, tetracloroetileno, tetracloruro de carbono, cloroformo (CCl_4), acetona, y otros derivados de estos compuestos.

El consumo humano prolongado de agua conteniendo compuestos orgánicos volátiles en concentraciones que exceden los niveles máximos establecidos por la EPA y el Departamento de Salud, esta relacionado con el posible desarrollo de cáncer en humanos. En la mayor parte de los casos, las concentraciones máximas permitidas en agua potable son del orden de décimas o centésimas de microgramos por litro. En los casos de los derrames de Barceloneta y Vega Alta, la EPA y el DS ordenaron a la AAA el cierre de varios pozos importantes.

El agua subterránea en los acuíferos de Barceloneta y Vega Alta contiene zonas de contaminación conocidas como plumachos de contaminantes. El agua contaminada en estas zonas migra de forma radial pero lentamente hacia la costa, representando una amenaza a pozos en el Acuífero Superior. En el área de Barceloneta existen residuos de tetracloruro de carbono (CCl_4), mientras que en la zona de Vega Alta los contaminantes principales son tricloro- (TCE) y tetracloroetileno (PCE). La masa estimada de compuestos orgánicos derramada en cada evento se calcula en _____ libras de CCl_4 y 12,800 libras de TCE (Sepúlveda, 1999). Otros compuestos volátiles orgánicos encontrados en el agua subterránea son el 1,2-dicloroetano, PCE y 1,1-dicloroetano (Bechtel Environmental, Inc., 1990; Geraghty & Millar, Inc., 1991, 1992, 1994).

Otras fuentes de contaminación que afectan al Acuífero Superior incluyen fertilizantes químicos aplicados por los agricultores en el área de Barceloneta y Manatí, así como filtraciones de pozos sépticos. Ambas fuentes han contribuido a la recarga inadvertida de nutrientes al acuífero en la zona de Manatí, principalmente nitratos. Estos compuestos altamente solubles en agua también son nocivos a la salud particularmente a los niños en ocasiones causándole el síndrome del niño azul o _____. Gómez-Gómez y otros (19__) estimaron la masa de nitratos en el Acuífero Superior en el área de Manatí en _____ libras. En este estudio se determinó la contribución por separado de nitratos originados de degradación de nitrógeno vegetal y nitrógeno de desechos humanos. En ambos casos la cantidad neta de carga de nitratos es significativa y se desconoce el destino de varios cientos de toneladas de nitratos, que probablemente también se han infiltrado al acuífero. La figura 9 ilustra los lugares en la Región Norte de Puerto Rico donde han ocurrido derrames de compuestos químicos que han afectado el Acuífero Superior.

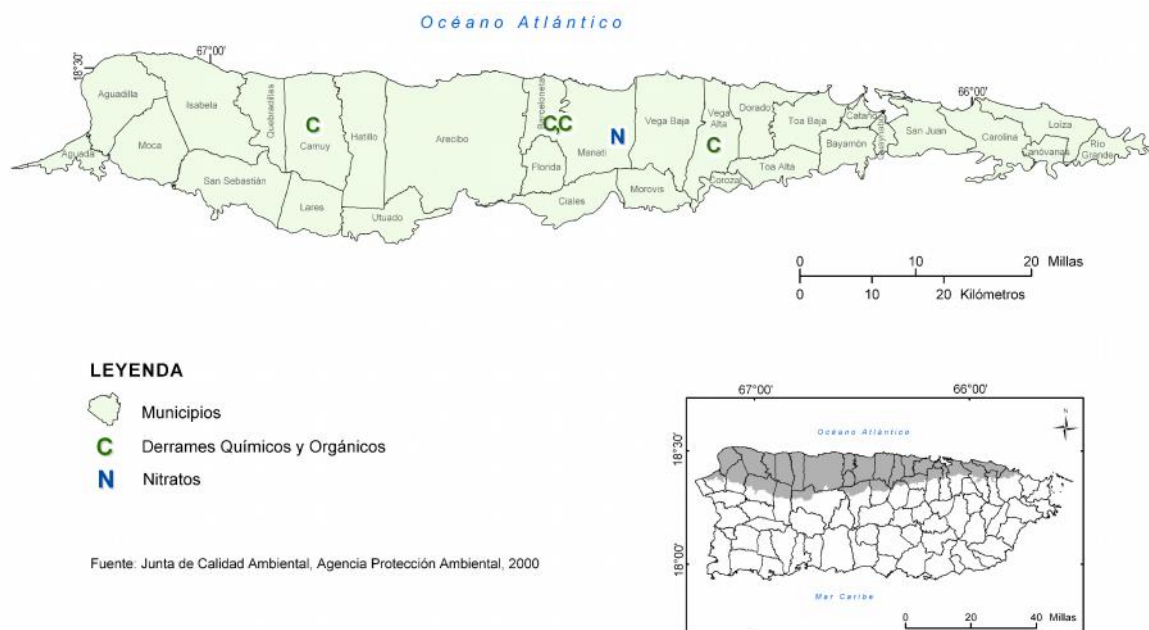


Figura 9. Áreas contaminadas del Acuífero Superior, con compuestos volátiles orgánicos y nutrientes, Puerto Rico

Acuífero Inferior o Artesiano

El Acuífero Inferior de la Región Norte, comúnmente conocido como el Acuífero Artesiano, se extiende desde la parte este-noreste del embalse Guajataca hasta el llano costanero del Río de La Plata, y desde la costa hacia el sur aproximadamente **¿??** millas. El Acuífero Inferior está limitado en profundidad en gran parte por la Formación San Sebastián, la cual constituye el basamento geológico sobre el que descansan las rocas calizas que lo forman. El acuífero está confinado localmente hacia el este del Río Grande de Arecibo por la parte superior no denominada de la Formación Cibao, y por la Formación Aguada (Los Puertos) hacia el oeste del Río Grande de Arecibo (figura 2).

Desde el punto de vista hidrogeológico, en condiciones de confinamiento en un acuífero, los niveles freáticos se expresan como un nivel potenciométrico. Esto se refiere al potencial de elevación sobre un punto de referencia (en este caso el nivel del mar) que el agua alcanza debido a la presión ocasionada por la capa confinante. En el caso del Acuífero Inferior, la capa confinante de la Formación Cibao limita el flujo del agua que se recarga en zonas al sur de las rocas calizas a medida que se mueve hacia el norte y la costa. En condiciones no-artesianas, el nivel freático alcanza un equilibrio en respuesta a el agua recargada y la presión atmosférica. El nivel del agua es representativo de este equilibrio. En el Acuífero Inferior el agua no puede alcanzar este equilibrio atmosférico debido a que la capa confinante acumula la presión del agua. Esto causa un aumento en presión en la zona confinada. El nivel potenciométrico representa la elevación que el agua tendría relativa al punto de referencia si no estuviera confinada. En el caso el Acuífero Inferior, los niveles potenciométricos antes del desarrollo de pozos en 1965, era equivalente a **160 #/pulg²** (libras por pulgada cuadrada) en el área de Cruce Dávila en Barceloneta. Esta presión equivale a 360 pies sobre el nivel del mar. Actualmente, como se documenta en la próxima sección, el nivel potenciométrico se ha reducido a menos de 245 pies sobre el nivel del mar, o **107 #/pulg²**.

[VERIFICAR VALORES]

Extensión Horizontal y Vertical

El área superficial del Acuífero Inferior es de aproximadamente **¿?** millas cuadradas. Este acuífero se extiende de este a oeste desde el municipio de Vega Alta hasta Isabela. En su vertiente norte-sur el Acuífero Inferior se extiende desde el afloramiento de la Formación Cibao con un ancho promedio de **xx** millas en dirección sur (figura 2). En promedio este acuífero posee una longitud de **¿?** millas.

La extensión vertical del Acuífero Inferior se determina de la porción saturada del acuífero según su definición. Los estratos saturados de agua fresca en las rocas calizas del acuífero se estima que tienen un espesor de hasta 1,000 pies en el pozo NC-5 Tiburones, en el municipio de Barceloneta. Hacia el oeste el espesor saturado de agua fresca es de _____ pies en el piezómetro NC-11 (Otilio) en Isabela. Hacia el este el espesor saturado puede alcanzar _____ pies en los pozos no-confinados en el área del Paso del Indio cerca de Vega Baja. El espesor saturado disminuye hacia el sur y en la parte costanera, hasta cero (figura 4a, 4b). La extensión en dirección hacia el mar es aún desconocida aunque este acuífero se afina gradualmente a medida que pierde presión en los puntos de descarga.

Zonas de Recarga

Las zonas de recarga al Acuífero Inferior se limitan por el afloramiento de las formaciones relativamente permeables de Montebello y Lares, principalmente hacia el sur de la latitud 18°23' N, en una línea de este a oeste aproximadamente a 2 millas desde la costa. Estudios del USGS (Renton, 2000) indican que las áreas que contribuyen más recarga al acuífero incluyen la zona cercana al pueblo de Florida y áreas al norte del pueblo de Morovis y el Río Indio, el embalse Guajataca y la zona cárstica en general.

La recarga neta al Acuífero Inferior en las zonas donde este no está confinado se estima en 5 pulgadas por año. Esta recarga es mucho menor que la recarga estimada para el Acuífero Superior debido al drenaje por conductos a los ríos que cortan la caliza en su trayectoria hacia el mar y la permeabilidad mucho menor del Acuífero Inferior.

Características Hidráulicas

La transmisividad del Acuífero Inferior es mayor en el área industrial de Barceloneta con valores de hasta 5,000 pies cuadrados por día (figura 6b). Estos valores de transmisividad se reducen rápidamente a 1,000 pies cuadrados por día entre el Río Grande de Arecibo y Río Grande de Manatí, reduciéndose más aún a valores entre 100 a 500 pies cuadrados por día en los extremos del acuífero hacia el este y el oeste. El espesor saturado máximo de las calizas del Acuífero Inferior se distribuye como sigue: la Formación San Sebastián, 1,030 pies; la Formación Lares, 1,015 pies; y la Formación Cibao con 700 pies (Rodríguez, J., 199__).

Capacidad de Producción Sustentable

La capacidad de producción sustentable del Acuífero Inferior se estima entre 5 a 7 mgd. Este estimado se basa en el flujo natural de los pozos artesianos industriales y de abasto público en el área de Barceloneta previo al desarrollo de pozos en las áreas de recarga en el pueblo de Florida. Datos del USGS establecen que en 1965, las presiones artesianas en la zona de Barceloneta alcanzaban hasta **160 #/pulg²**. Luego del hincado de pozos al sur del área, hacia Florida, las presiones artesianas en los pozos de la zona de Barceloneta se han reducido paulatinamente (Figura ¿??). Es probable que la capacidad de recarga del acuífero ocurra en un periodo mayor de tiempo al que ha tomado extraer el agua utilizada desde 1965. De ser así, esencialmente el acuífero está siendo minado irrevocablemente a menos que se reduzcan las extracciones en la zona de recarga, y posiblemente se induzca recarga artificial adicional.

El Municipio de Florida recibe agua potable de varias baterías de pozos hincados por la AAA al norte de la zona urbana, en las áreas identificadas como de recarga del Acuífero Inferior. En esta área el Acuífero Inferior no está confinado, y está en equilibrio con la presión atmosférica. El aumento en la demanda de agua potable en Florida ha resultado en el hincado de pozos adicionales para sustituir pozos domésticos y acueductos rurales, incrementando sustancialmente la extracción de agua subterránea en esta zona. Esto a su vez ha resultado en reducciones en los niveles freáticos en las inmediaciones de los pozos y la zona de recarga del Acuífero Inferior. Datos del USGS (Gómez-Gómez, 2003) establecen que los niveles freáticos en esta zona de Florida se han reducido aproximadamente en **150 pies** entre 1965 y 1995. La figura 11 ilustra el cambio e historial de extracciones de agua (Gómez-Gómez, comunicación escrita 2003). **[VERIFICAR]**

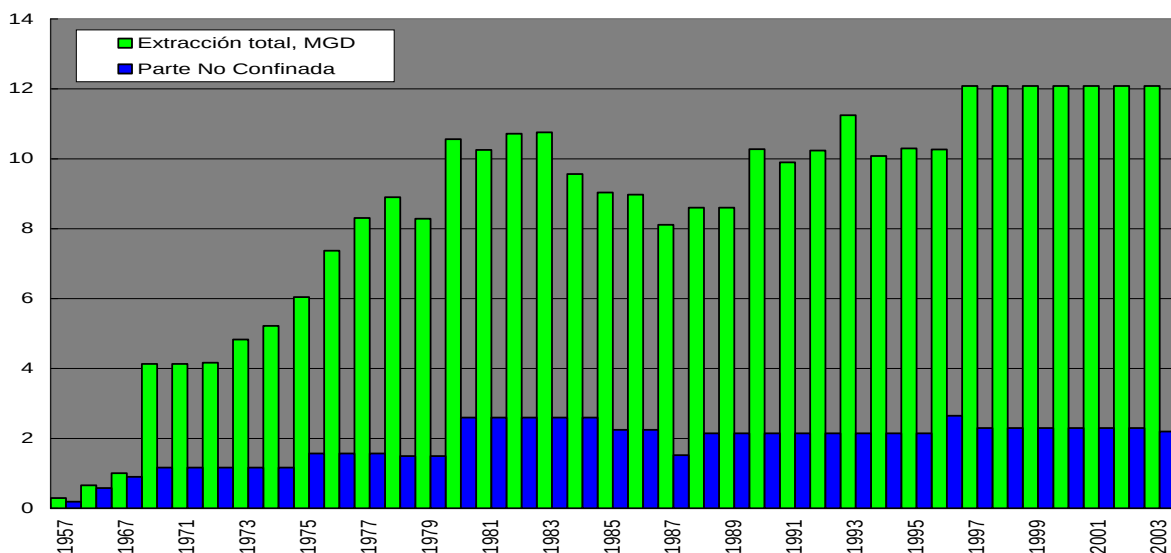


Figura 11. Extracción total (incluyendo estimado de pérdidas en camisillas de pozos hincados en parte confinada del Acuífero Inferior de la Costa Norte, Puerto Rico

Los niveles de agua subterránea en el Acuífero Inferior han disminuido en forma significativa desde que comenzó la sobre-explotación del agua subterránea no solamente en la zona de recarga de Florida, sino también en el área de Manatí a Barceloneta. En Manatí y Barceloneta, principalmente en la vecindad de la Carretera PR-2, se hincaron **2_?** pozos artesianos para suplir la demanda industrial, principalmente para la industria farmacéutica. Datos del USGS establecen que en 1982, la extracción de agua del Acuífero Inferior de pozos artesianos alcanzó **10.56** mgd (Referencia). Recientemente, con la construcción y operación del pozo Garrochales, y aumentos en extracción en el pozo Tiburones, la extracción total incluyendo escapes de agua a través de las camisillas de los pozos con presión artesiana se estima en **12** mgd.

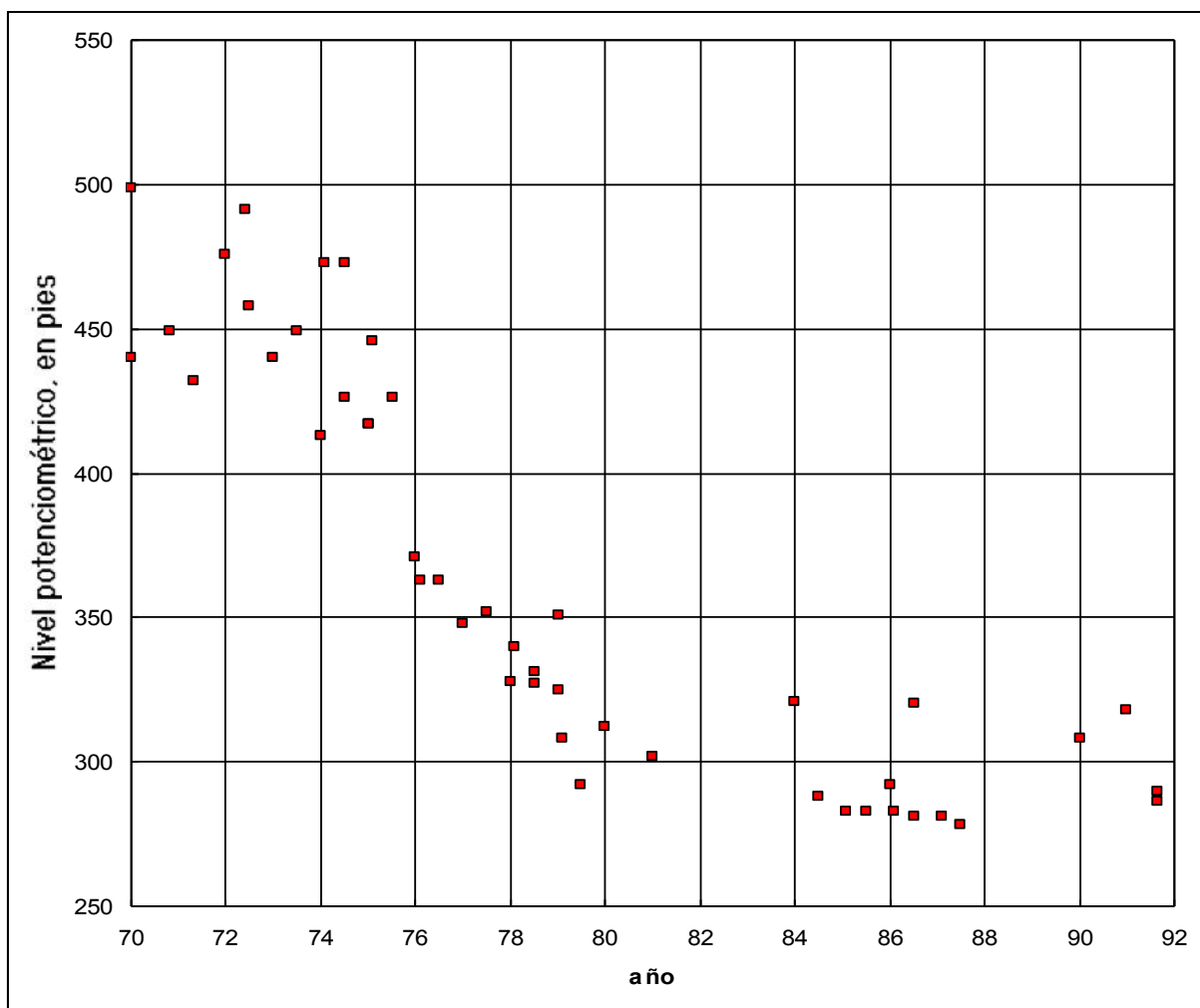


Figura 12. Cambios en niveles potenciométricos en el Acuífero Inferior en el área de Cruce Dávila en Barceloneta, 1970-1992, Puerto Rico

Es importante indicar que el descenso desde 1970 en niveles artesianos de alrededor de **175** pies en el Acuífero Inferior en la zona de Manatí y Barceloneta, ha causado que muchos pozos que fluían de forma natural ahora requieran ser bombeados. Esto se debe a que el nivel artesiano se ha reducido por debajo del nivel de la tierra. Algunos de estos pozos son explotados a una razón de bombeo excesiva causando conos de depresiones en los niveles potenciométricos y efectos de carácter regional a medida que los conos de influencia se expanden y sobreponen entre pozos artesianos cercanos. Como resultado de esta interferencia de los pozos bombeados excesivamente, los sectores donde se operaban pozos artesianos no se recuperan a su nivel artesianos.

Contaminación Química

La contaminación química del Acuífero Inferior se limita a las áreas de recarga del mismo. Actualmente la planta de tratamiento de aguas usadas operada por la AAA en Florida descarga su efluente tratado a nivel secundario directamente al acuífero a través de un sumidero. Al momento esta práctica no aparenta tener impactos adversos en la calidad del agua subterránea extraída para abasto público del acuífero. Esto posiblemente se debe a que el tiempo de travesía del agua recargada en Florida hasta los pozos artesianos costaneros en Manatí y Barceloneta puede ser mayor de 1,500 años (Referencia???). Además, el acuífero actúa como un filtro biológico que separa los sedimentos, trazas de metales y compuestos orgánicos, y provee un ambiente para la digestión anaeróbica de nutrientes en el comienzo de la travesía hacia la zona confinada.

El Acuífero Inferior es afectado también por contaminación química asociada a la columna de agua salada que muchos pozos artesianos atraviesan, en el Acuífero Superior, para poder extraer agua fresca confinada cerca del litoral costanero. Esta capa de agua salada ocurre naturalmente en la parte costanera profunda del Acuífero Superior o Llano, debido a la alta porosidad de las rocas y la elevación bajo el nivel del mar del fondo de dicho acuífero. El agua salobre en esta columna corroe y eventualmente rompe los sellos hidráulicos en los pozos artesianos profundos. Esto causa que el agua del Acuífero Inferior se escape al Acuífero Superior, y que agua salada pueda infiltrarse hacia las camisillas de los pozos artesianos construidos en el Acuífero Inferior. Además, este escape de agua contribuye a reducir las presiones artesianas, que es vital para poder mantener la cantidad y calidad de agua del Acuífero Inferior. Esto ha motivado el uso de protección catódica y diseño de camisillas inoxidables para prevenir o minimizar el deterioro de los sellos y la estructura del pozo, y así mantener la integridad de la misma. Esta protección, sin embargo, es temporera debido a la agresividad erosiva del agua salada sobre los metales que forman la columna del pozo. Este problema ha precipitado reparaciones a muchos de los pozos artesianos costaneros construidos desde 1970 en áreas desde Manatí hasta Arecibo, para poder mantener la calidad del agua y reducir las pérdidas en presión. Uno de los procedimientos utilizados consiste en reparaciones de camisillas con roturas utilizando un sello anular o un “arreglo telescópico”. En

ambos procedimientos se insertan tubos de menor diámetro en el tubo original afectado por la corrosión, permitiendo a la vez el sellado de las secciones del pozo entre los dos tubos concéntricos con concreto, grava y bentonita. Aún así, el USGS estima que ¿??? pozos artesianos que se suplen del Acuífero Inferior descargan aproximadamente ¿??mgd de agua de alta calidad a la zona de agua salobre del Acuífero Superior, debido a filtraciones en las columnas de tubería de los pozos.

Balance de Agua Acuíferos de la Región Norte de Puerto Rico

Balances hidrológicos de la Región Norte de Puerto Rico han sido publicados por Giusti y Bennett (1976), Gómez-Gómez y Torres-Sierra (1988), Torres-González y otros (1995), Sepúlveda (19__) y Cherry (199__). Entre los parámetros publicados se encuentran: el flujo hidráulico en mgd, el tiempo de travesía del agua subterránea en años, el volumen del acuífero en millones de metros cúbicos (Mm^3) y la extracción neta del acuífero en mgd. Mediante un análisis de los datos publicados se estima que cuando la extracción se aproxima al 50 por ciento del flujo hidráulico, el acuífero alcanza su rendimiento máximo. En resumen, la tabla xx.x presenta un estimado del balance de agua para cada las seis regiones que componen el acuífero calizo y sedimentario de la Región Norte de Puerto Rico. Este estimado también incluye valores publicados para cada región a modo de poder comparar cambios en las condiciones hidrológicas entre la fecha de la publicación y este informe.

Tabla xx.x ESTIMADOS DE FLUJO DE AGUA SUBTERRANEA, Y RENDIMIENTO POTENCIAL PARA LOS ACUIFEROS DE LA REGIÓN NORTE DE PUERTO RICO

ACUIFERO/ REGIÓN	Flujo Hidráulico (Mgd)	Tiempo de travesía (años)	Volumen (Mm3)	Rendimiento Potencial (Mgd)	Bombeo 2002 (Mgd)	Comentarios
Acuífero Superior						
Aguadilla- Arecibo	60	50	4.15E+09	30	5	Giusti E.V. (1975) estimó flujo hidráulico de 71 Mgd. Gómez- Gómez F. (1990) estimó flujo hidráulico de 52 Mgd.
Arecibo- Manatí	114	60	9.46E+09	60	24	
Manatí- Cibuco	45	60	3.73E+09	25	10	
Cibuco-La Plata	30	50	2.07E+09	15	7	
La Plata- Loiza	15	70	1.45E+09	10	5	Giusti E.V. (1975) estimó flujo hidráulico de 30 Mgd. Gómez- Gómez F. (1990) estimó flujo hidráulico de 10 Mgd.
<i>Subtotal:</i>	264		2.09E+10	140	51	
Acuífero Inferior						
Recarga	122	2000	3.37E+11		2	
Descarga					5	
- Costanera	30					
- Ríos	92					
<i>Subtotal:</i>	122		3.37E+11	61	7	
<i>Total:</i>	386		3.58E+11	201	58	

Tabla xx.x ESTIMADOS DE FLUJO DE AGUA SUBTERRANEA, Y RENDIMIENTO POTENCIAL PARA LOS ACUIFEROS DE LA REGIÓN NORTE DE PUERTO RICO

ACUIFERO/ REGIÓN	Flujo Hidráulico (Mgd)	Tiempo de travesía (años)	Volumen (Mm3)	Rendimiento Potencial (Mgd)	Bombeo 2002 (Mgd)	Comentarios
Areas específicas:						
Dorado- Vega Baja	19.2	60	1.59E+09	9.6	12	Se estima que el rendimiento potencial es equivalente al 50 por ciento del flujo hidráulico.
Vega Baja- Manatí	20.4	60	1.69E+09	10.2	10	
Manatí- Arecibo	66.1	60	5.48E+09	33.05	24	
Arecibo- Camuy	8.4	60	6.97E+08	4.2	3	
Camuy- Guajataca	4.1	60	3.40E+08	2.05	1	
Guajataca- Aguada	6	60	4.98E+08	3	1	
<i>Total:</i>	124.2		1.03E+10	62.1	51	Compara con estudios previos

Estrategias para el Manejo, Restauración y Conservación de los Acuíferos de la Región Norte de Puerto Rico

La condición general de los Acuíferos Superior e Inferior puede considerarse crítica cuando se toman en cuenta todos los elementos adversos descritos en las secciones anteriores. Los acuíferos sufren de explotación excesiva, contaminación química, intrusión salina, interferencia con las zonas de recarga, reducciones en los niveles artesianos y pérdidas de agua de alta calidad a la capa salobre entre ambos acuíferos.

La restauración y conservación de los acuíferos de la Región Norte es esencial como elemento integral del manejo efectivo de los recursos de agua en la Isla. Es necesario desarrollar e implantar un plan metódico y agresivo que permita al DRNA revertir el proceso de deterioro de los acuíferos, de modo que las generaciones futuras puedan disfrutar del agua abundante y de alta calidad que estos pueden producir. A continuación se incluyen una serie de medidas que tienen que ser aplicadas para la restauración y manejo adecuado de estos acuíferos:

1. Disminuir en dos años la extracción de agua subterránea en el Acuífero Superior en un 20 por ciento. Reemplazar la utilización del agua subterránea en los acuíferos de la Región Norte con agua superficial.
2. Reducir en dos años la extracción de agua del Acuífero Inferior en un 50 por ciento. El efecto mayor en las mermas en niveles potenciométricos en este acuífero es causado por los pozos industriales y de abasto público, ya que obedecen a una demanda imperante del recurso agua especialmente en procesos farmacéuticos y para abasto en comunidades costaneras de pocos recursos. El uso de estos pozos debe ser sustituido por agua superficial siempre y cuando esto sea económicamente viable.
3. Mejorar la información de datos de producción de cada pozo en la Región Norte. Es necesario requerir a los tenedores de franquicias de cada pozo en la Región, sin excepciones, someter los informes de extracción y niveles freáticos requeridos por las reglas vigentes. Para obtener la información máxima, será necesario actualizar el inventario de pozos y franquicias de la Región, e implantar sistemas más efectivos de medir extracciones y niveles de agua. Estas medidas tienen que aplicarse a aquellas agencias de gobierno, instituciones, industrias, comercios y organizaciones privadas que utilicen agua subterránea en la Región.
4. Iniciar un programa inmediato de definir por lo menos dos veces al año los niveles freáticos y potenciométricos en los acuíferos de la Región.
 - a. El programa cooperativo entre el USGS y el ELA necesita modificarse para que se utilicen los fondos disponibles con este propósito y se reduzca la red de pozos de monitoreo que no contribuyen al manejo inmediato de los acuíferos.
 - b. Como parte de este programa es necesario re-evaluar la red de pozos de monitoreo que opera el USGS y determinar si es necesario construir pozos adicionales dedicados a observar niveles freáticos o potenciométricos en la Región.

- c. Identificar pozos índices donde se instalen instrumentos automáticos que provean al DRNA en tiempo real datos de cambios en los niveles freáticos o potenciométricos.
5. Actualizar e Integrar al banco de datos de la OPA los modelos matemáticos de los acuíferos de la Región Norte desarrollados por el USGS. Será necesario destacar personal del USGS en el DRNA para convertir los modelos en herramientas prácticas que puedan ser utilizadas en el manejo efectivo de estos recursos.
6. Establecer un programa de sellado de pozos que afectan el Acuífero Inferior. Es necesario completar un análisis sistemático de cada pozo para determinar con certeza los que filtran y la magnitud de las filtraciones, e iniciar un programa de reparaciones.
7. Implantar el programa de sellado de pozos abandonados o cerrados en el Acuífero Superior, para evitar vandalismo y el uso del mismo como ruta para la infiltración de contaminantes.
8. Definir con más precisión las áreas de recarga a los acuíferos y limitar algunas prácticas en los usos de terrenos que pueden propiciar la generación de contaminantes al subsuelo y eventualmente a los acuíferos.
9. En la zona de Florida, sustituir las fuentes de abasto de la AAA con aguas superficiales, potencialmente del Río Grande de Manatí, y prohibir el hincado de pozos adicionales o fuentes de contaminantes en la zona.
10. Establecer un programa de educación comunitaria donde se establezcan como metas medidas de conservación de agua y de conocimiento general relacionado a los sistemas subterráneos y superficiales que abastecen de agua a cada comunidad con énfasis en la cuenca hidrográfica.
11. Desarrollar un plan de emergencia de operación de los pozos durante sequías, para asegurarse que no ocurre la sobre-explotación de los acuíferos.
12. Identificar áreas donde se pueda recargar los acuíferos con aguas sanitarias o pluviales tratadas, e iniciar proyectos pilotos en Dorado y Barceloneta.
13. Adquirir terrenos en áreas de recarga de los acuíferos para protegerlos en carácter permanente.
14. Crear un comité técnico-ambiental para atender los problemas técnicos asociados a los Acuíferos del Carso, y que anualmente evalúe los efectos de las medidas propuestas en los acuíferos y sugiera políticas públicas de conservación, desarrollo y manejo de este recurso.
15. Preparar un informe anual de la condición de los acuíferos y revisar el progreso y beneficio de estas y nuevas medidas cada cinco años o antes, dependiendo de cambios significativos en las condiciones hidrológicas.

Modelos Matemáticos de los Acuíferos de la Región Norte

El balance hidrológico del Acuífero Superior e Inferior de la Región Norte puede verificarse mediante el diseño, construcción, calibración y verificación de modelos matemáticos de flujo de agua subterránea. Estos modelos integran todos aquellos componentes hidrológicos: ríos, pozos, riego, precipitación pluvial, evapotranspiración, movimiento lateral de la interfase de agua fresca-salada, permeabilidad de los estratos y permeabilidad del lecho del río.

Los datos correspondientes son representados en forma finita lo cual permite estudiar todo el acuífero una vez este se fracciona o divide en pequeñas unidades conocidas como nodos. Estos nodos son polígonos cuadriláteros que interaccionan creando el efecto de continuidad del acuífero simulado. La figura 13 ilustra en forma esquemática el fraccionamiento de los estratos o unidades permeables de un acuífero en nodos (bloques).



Figura 13. Esquemático de arreglo fraccionado de los estratos o unidades permeables de los acuíferos de la Región Norte de Puerto Rico.

Aunque este método de fraccionamiento espacial de los datos es comúnmente utilizado (McDonald et al, 1996) con la limitación de que el mismo solo es una aproximación de los niveles y flujos volumétricos observados en el acuífero. Otro aspecto limitante de los modelos de flujo de agua subterránea es que están diseñados para acuíferos porosos y la Región Norte posee en su mayoría acuíferos calizos fracturados. Esta característica, sin embargo, ha sido analizada utilizando como argumento la escala regional en la cual se han diseñado y construido estos modelos.

El análisis regional producto de estos modelos matemáticos no puede utilizarse para evaluar lo que sucede a nivel local. Como ejemplo, nótese que típicamente estos modelos son calibrados con una incertidumbre de 16.40 pies (5 metros) en el estimado del nivel potenciométrico cuando se comparan con niveles locales.

En la actualidad existen cuatro modelos de diferencia finita de flujo de agua subterránea en la Región Norte. La simulación de las condiciones hidrológicas existente consiste de un modelo de flujo para el área de: 1) Río Cibuco a Río de La Plata, conocida como el Acuífero de Vega Alta (Gómez-Gómez et al, 1988), 2) Río Grande de Manatí a Río Cibuco (Cherry, 199_), 3) Río Camuy a Río Grande de Manatí (Torres-González et al, 1996), y 4) Aguadilla a Río Camuy (Tucci, 199_). Estos documentos describen aspectos hidrológicos importantes como: la recarga neta a los acuíferos, la interacción entre el agua subterránea y el agua superficial, la extracción de agua subterránea, la descarga a la costa, manantiales y lagunas costaneras, capacidad de almacenamiento, estimados de coeficientes de almacenamiento, anisotropía horizontal, nivel potenciométrico durante el estudio y en pre-desarrollo, y la permeabilidad horizontal. Todos estos componentes y parámetros han sido determinados de forma espacial y temporal. Aún no existe un modelo documentado para definir el flujo de agua subterránea del Acuífero Inferior.

Cambios en los Patrones de Extracción de Agua

El recurso de agua subterránea es uno que reacciona lentamente a impactos de desarrollo ocasionados por el hombre. Como consecuencia las extracciones de agua subterránea mediante bombeo usualmente van en incremento hasta alcanzar un máximo que se limita por cambios en la calidad del agua subterránea y/o por el descenso en los niveles de agua en el pozo. Recientemente, la demanda de mayores abastos y la limitación física de los acuíferos para proveer la misma han resultado en extracciones excesivas y aumentos en la concentración de sólidos disueltos. La figura 10 ilustra como ha aumentado la extracción de agua en el Acuífero Superior en el área de Río Cibuco a Río de La Plata y del Río Grande de Manatí a Río Cibuco. La figura 11 ilustra los cambios en extracciones en el Acuífero Inferior.

Limitaciones Zonales

Las zonas de recarga de los acuíferos de la Región Norte de Puerto Rico son áreas de suma importancia debido a que en estas se infiltra el agua de lluvia y escorrentía local. La roca caliza, zona del carso, posee fracturas que facilitan la percolación del agua. Las zonas de recarga usualmente poseen un alto grado de madurez de la piedra caliza donde el desarrollo de sumideros y cavernas es característico. Los patrones de recarga incluyendo su magnitud y distribución deben ser considerados en las limitaciones zonales del acuífero.

La magnitud y distribución de la recarga a los acuíferos de la Región Norte se ilustran en la figura 5. La recarga promedio del Acuífero Superior es de 15 pulgadas por año y esta mayormente ocurre a lo largo de la extensión caliza entre las latitudes 18°__'N y 18°2'_N. La recarga promedio del Acuífero Inferior (Artesiano) es de __ pulgadas por año y esta mayormente ocurre a lo largo de la extensión caliza entre las latitudes 18°2'_N y 18°__N.

Debido a la velocidad de flujo del agua subterránea en estos sistemas calizos fracturados, es importante proteger estas zonas de: 1) descargas de aguas usadas, 2) aplicación excesiva de fertilizantes y 3) actividades industriales que por su naturaleza puedan afectar la calidad de las aguas de escorrentía. Las descargas de aguas usadas provienen de pozos sépticos construidos en el área. La aplicación de fertilizantes y abono químico es muy común. Actividades industriales no solo se limitan a farmacéuticas, centros de servicio automotriz, vertederos municipales y hospitales, también incluyen hospitales, centros agropecuarios, vaquerías y otras actividades humanas.

La relación entre la degradación de la calidad del agua subterránea y el uso de terrenos (figura 14) también puede utilizarse para limitar las zonas con actividades humanas. La conservación de áreas de bosques y sin impacto humano en zonas de recarga debe continuar. La adquisición de terrenos en zonas de recarga es necesaria y servirá para proteger los recursos de agua subterráneos.

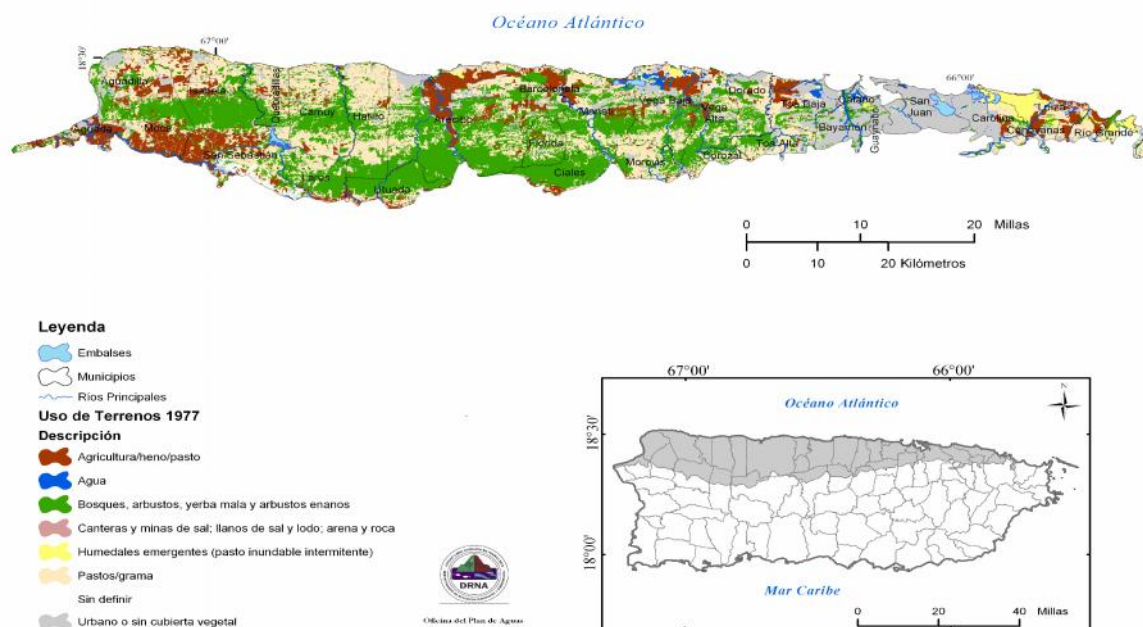


Figura 14. Uso de terrenos en la Región Norte de Puerto Rico.

Conservación Zonas de Recarga

Uno de los problemas que más atención a tenido es el de protección de zonas de recarga de los acuíferos en zona cárstica o afloramientos calizos caracterizados por la presencia de mogotes y sumideros. Esta zona de mogotes y sumideros se ubica hacia el sur de los llanos costaneros donde se encuentra el Acuífero Superior a profundidades menores de 200 pies y el Acuífero Inferior a profundidades mayores de 1,000 pies.

Diversas iniciativas dirigidas a la adquisición de terrenos ubicados en la zona cárstica se han efectuado dando paso a medidas sometidas al Congreso de los Estados Unidos (19__). Otras medidas consecuentes identificaron áreas de protección y conservación (Fondo del Fideicomiso de Conservación, 2002) y la formación de grupos y entidades comunitarias encaminadas a la protección y conservación de las áreas de recarga de los acuíferos calizos.

Algunos de los recursos de información que pueden utilizarse para este propósito son los modelos matemáticos diseñados, contruidos, calibrados y (algunos) verificados para reproducir el movimiento de agua subterránea en estos sistemas calizos. Quizás el parámetro a observarse con detenimiento será la recarga neta calibrada para modelos regionales publicados para las regiones cársticas. La recarga neta en la región cárstica se ilustra en la figura 5. En algunas localizaciones la recarga neta puede alcanzar hasta el 40 porciento de la lluvia promedio o 28 pulgadas por año. Esto representa una fuente importante de agua que en su transcurso hacia la costa contribuirá al almacenamiento de agua para abasto público y otros usos.

Aumentos de Recarga Artificial

No existen referencias de casos de recarga artificial en el Acuífero Superior de la Región Norte, aunque la permeabilidad relativa de las fracturas de la roca caliza permite la recarga natural e involuntaria de aguas aplicadas. Estos efectos no son detectables con facilidad debido a la alta porosidad de las rocas en el acuífero, lo que limita la habilidad de detectar recargas menores en comparación con la recarga natural. Áreas de este acuífero con poca permeabilidad pueden utilizarse como reservas naturales de agua subterránea. Sin embargo, estas áreas son de poca extensión y gran parte del agua almacenada drena con rapidez a partes y estratos subterráneos con mayor permeabilidad.

En el Acuífero Inferior se practica la recarga artificial mediante la inyección de aguas usadas tratadas al norte del pueblo de Florida. Similarmente, muchas comunidades en esta área descargan aguas usadas de pozos sépticos en sumideros que eventualmente recargan el acuífero local. Esta práctica debe ser evaluada para evitar la acumulación de sales y trazas de metales en lugares donde ocurren estas descargas. El agua recargada al Acuífero Inferior en el pueblo de Florida tarda un mínimo de **1,500** años en llegar al área e Cruce Dávila en Barceloneta. No obstante, existen varias hipótesis de descarga regional desde el Acuífero Inferior que pueden afectar la calidad de las aguas del Acuífero Superior.

- La primera hipótesis presenta puntos de descarga costanera y aunque no se ha determinado aún, no existen evidencias concretas sobre diferencias estratigráficas que establezcan una continuidad en la capa confinante en y a lo largo de la zona costanera (Briggs, 19__).
- La segunda hipótesis, la cual ha tenido más aceptación presenta puntos de descarga a lo largo del corte de la caliza por los ríos principales que la cruzan de sur a norte en su paso hacia el Océano Atlántico. Estos puntos de descarga, sin embargo, ocurren en el subsuelo de depósitos aluviales debido a la erosión de la capa confinante (Renken, 2000).
- Finalmente, la construcción de pozos en el Acuífero Inferior presenta problemas de escapes o pérdidas de agua a través del espacio anular de los pozos lo que facilita o permite la recarga de agua de este acuífero al superior. Actualmente, la calidad del agua del Acuífero Inferior es excelente, y no existe evidencia de efectos adversos como resultado de la recarga de aguas usadas en el área de Florida.

Restricciones al Desarrollo

Una medida de conservación de los recursos de agua que puede detener rápidamente el deterioro de la cantidad y calidad de los mismos es la planificación acertada y adecuada de los usos de terrenos en Puerto Rico, especialmente en los terrenos calizos. Como puede apreciarse en zonas del carso cerca del municipio de Manatí (y con mucha probabilidad en los municipios de Florida, Arecibo, Camuy, Hatillo, Quebradillas e Isabela), la proliferación de unidades de vivienda puede resultar en el colapso de terrenos calizos. Esto representa un peligro para la propiedad y la vida y deben identificarse estas áreas de alto riesgo previo a la construcción de viviendas, carreteras o cualquier otra actividad humana que altere los patrones de drenaje superficial y subterráneo en estos terrenos calizos.

Control de Extracciones

El control de extracciones es una medida de suma importancia que finalmente puede ser considerada luego de añadir el Acueducto del Norte y otras obras de infraestructura que pueden ser utilizadas como fuentes alternas de abasto. Como indicamos anteriormente los acuíferos de la Región Norte de Puerto Rico pueden producir hasta 76 mgd. Sin embargo existen problemas de sólidos disueltos totales en los pozos costaneros y contaminación con orgánicos volátiles y nutrientes que limitan la extracción en áreas permeables de los acuíferos calizos. Esto ha motivado la proliferación de pozos en áreas de permeabilidad relativamente menor lo cual ha generado descensos en los niveles potenciométricos considerables de hasta 300 pies. Los recursos más afectados lo son el Acuífero Superior en el área de Manatí, Arecibo y Vega Alta (incluyendo el área de Dorado) y el Acuífero Inferior en el municipio de Florida. En estas áreas se debe de limitar la extracción de agua subterránea para permitir la recuperación natural del almacenamiento de agua en los acuíferos.

Otras Alternativas

Complementariamente, la reforestación de las cuencas hidrográficas en la Región Norte, contribuiría a la eventual recuperación de los niveles potenciométricos en los acuíferos de la zona. Esta medida, que de ser aplicada de forma efectiva, tomará décadas en tener efectos en el sistema de acuíferos. Parte del éxito en esta faena se relaciona con el clima en el Caribe y su efecto en la parte occidental donde se encuentra Puerto Rico. La reforestación no solo ayudará, a largo plazo, los niveles potenciométricos sino que también proveería de un efecto termal que ayudaría a reducir la temperatura ambiental propiciando mayor condensación de agua y acelerando la disponibilidad hidrológica. Esta hipótesis está condicionada a que los efectos de calentamiento global se estabilicen y las condiciones climáticas en el Caribe no cambien significativamente.

Conclusiones y Recomendaciones

Los acuíferos de la Región Norte son los más productivos de Puerto Rico. Dos acuíferos independientes de gran capacidad de almacenaje de agua y productividad ocurren en la zona del karso, que cubre aproximadamente 2 millas cuadradas desde San Juan hasta Aguadilla. El Acuífero Superior sule aproximadamente 76 mgd de agua principalmente para usos domésticos y agrícolas. El Acuífero Inferior sule aproximadamente **12.0?** mgd principalmente para usos industriales.

La condición de los acuíferos de la Región Norte es crítica, debido a extracciones de agua excesivas en los últimos 30 años y contaminación química y salina. La producción combinada de ambos acuíferos es de aproximadamente 76 mgd, mientras que su capacidad sustentable bajo las condiciones vigentes es de aproximadamente **50-65** mgd. Sectores importantes del Acuífero Superior sufren de contaminación química, intrusión salina y mermas sustanciales de hasta 200 pies en los niveles freáticos. Decenas de pozos domésticos y agrícolas se han cerrado debido a estos efectos. El Acuífero Inferior sufre de pérdidas sustanciales en los niveles potenciométricos de hasta 235 pies y fugas de agua de alta calidad debido a roturas en las camisillas de pozos.

La rehabilitación de los acuíferos de la Región Norte requerirá medidas drásticas y sustentadas, que a su vez conllevarán la inversión de fondos sustanciales. Será necesario reducir sustancialmente las extracciones de agua de ambos acuíferos; desarrollar programas de protección y limitación de extracciones de agua en las zonas de recarga; desarrollar programas de recarga artificial; reparar los pozos filtrantes que se nutren del Acuífero Inferior; obtener datos actualizados y frecuentes de las condiciones de los acuíferos; actualizar e implantar en el DRNA modelos matemáticos de los acuíferos; y promover programas de conservación y reforestación de las cuencas hidrográficas que sirven de zonas de recarga.

Referencias

Anderson, H.R., 1976, Ground water in the San Juan metropolitan area, Puerto Rico: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 41-75, 34 p.

Arnaw, Ted, 1961, Water-bearing properties of the rocks in the Arecibo-Barceloneta area, Puerto Rico: in Short Papers in the Geologic and Hydrologic Sciences, Articles 147-292, Geological Survey Research 1961, U.S. Geological Survey Professional Paper 424-C, Article 221, p. C201-C202.

Arnaw, Ted, and Bogart, D.B., 1959, Water problems of Puerto Rico and a program of water-resources investigations: Transactions of the Second Caribbean Geological Conference, Mayagüez, Puerto Rico, January 4-9, 1959, p. 120-129.

Arnaw, Ted, and Crooks, J.W., 1960, Public water supplies in Puerto Rico: U.S. Geological Survey Water-Resources Bulletin 2, 34 p.

Atkins, J.B., Pérez-Blair, Francisco, and Pearman, J.L., 1999, Analisis of flow durations for selected streams in Puerto Rico through 1994: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 98-4189, 32 p.

Bennett, G.D., 1976, Electrical analog simulation of the aquifers along the south coast of Puerto Rico: U.S. Geological Survey Open-File Report 74-4, 101 p.

Referencias, continuación...

Briggs, R.P., and Akers, J.P., 1965, Hydrogeologic map of Puerto Rico and adjacent islands: U.S. Geological Survey Hydrologic Investigations Atlas HA-197, 1 sheet.

Cherry, G.S., 2001, Simulation of flow in the upper north coast limestone aquifer, Manatí-Vega Baja area, Puerto Rico: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 00-4266, 82 p.

Conde-Costas, C.E., and Rodríguez-Rodríguez, G.A., 1997, Reconnaissance of ground-water quality in the Manatí quadrangle, Puerto Rico, August-November 1992: U.S. Geological Survey Open-File Report 96-628, 16 p.

Conde-Costas, C.E., and Rodríguez-Rodríguez, G.A., 1997, Reconnaissance of ground-water quality in the Manatí quadrangle, Puerto Rico, August-November 1992: U.S. Geological Survey Open-File Report 96-628, 16 p.

Conde-Costas, Carlos, and Gómez-Gómez, Fernando, 1998, Nitrate contamination of the upper aquifer in the Manatí-Vega Baja area, Puerto Rico - Proceedings of the Third International Symposium on Water Resources: Fifth Caribbean Islands Water Resources Congress, American Water Resources Association, July 1998, San Juan, Puerto Rico, p. 15-20.

Conde-Costas, Carlos, and Gómez-Gómez, Fernando, 1999, Assessment of nitrate contamination of the upper aquifer in the Manatí-Vega Baja area, Puerto Rico: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 99-4040, 43 p.

Conde-Costas, Carlos, and Rodríguez, Gilberto, 1997, Potentiometric surface and hydrologic conditions of the upper aquifer in the Manatí-Vega Baja area, north central Puerto Rico, March 1995: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 96-4184, 1 sheet.

Díaz, J.R., 1973, Chemical quality of water in Caño Tiburones, Puerto Rico, A reconnaissance study carried out in 1967: U.S. Geological Survey Open-File Report, Map Series no. 2, 2 sheets.

Díaz, P.L., Aquino, Zaida, Figueroa-Alamo, Carlos, Vachier, R.J., and Sánchez, A.V., 2000, Water resources data Puerto Rico and the U.S. Virgin Islands, Water Year 1999: U.S. Geological Survey Water-Data Report PR-99-1, 599 p.

Dopazo, Teresa, and Molina-Rivera, W.L., 1995, Estimated water use in Puerto Rico, 1988-89: U.S. Geological Survey Open-File Report 95-380, 31 p.

Giusti, E.V., 1978, Hydrogeology of the karst of Puerto Rico: U.S. Geological Survey Professional Paper 1012, 68 p., 2 pls.

Referencias, continuación...

Giusti, E.V., and Bennett, G.D., 1976, Water resources of the north coast limestone area, Puerto Rico: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 42-75, 42 p.

Gómez-Gómez, Fernando, 1984, Water resources of the lower Río Grande de Manatí Valley, Puerto Rico: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 83-4199, 42 p.

Gómez-Gómez, Fernando, 1987, Planning report for the Caribbean Islands Regional Aquifer-System Analysis project: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 86-4074, 50 p., 3 pls.

Gómez-Gómez, Fernando, and Heisel, J.E., 1980, Summary appraisals of the Nation's ground-water resources - Caribbean Region: U.S. Geological Survey Professional Paper 813-U, 32 p., 2 pls.

Gómez-Gómez, Fernando, and Torres-Sierra, Heriberto, 1988, Hydrology and effects of development on the water-table aquifer in the Vega Alta quadrangle, Puerto Rico: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 87-4105, 54 p.

Gómez-Gómez, Fernando, Dacosta, Rafael, and Orona, Miguel, 1983, Estimated water use in Puerto Rico, 1980 - U.S. Geological Survey Water-Use Information Program: U.S. Geological Survey Open-File Report 83-689, 1 sheet.

Gómez-Gómez, Fernando, Quiñones, Ferdinand, and López, Marisol, 1984, Public water supplies in Puerto Rico, 1983: U.S. Geological Survey Open-File Data Report 84-126, 102 p.

Guzmán-Ríos, Senén, 1988, Hydrology and water quality of the principal springs in Puerto Rico: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 85-4269, 30 p.

Guzmán-Ríos, Senén, and Quiñones-Márquez, Ferdinand, 1985, Reconnaissance of trace organic compounds in ground water throughout Puerto Rico, October 1983: U.S. Geological Survey Open-File Data Report 84-810, 1 sheet.

Heisel, J.E., González, J.R., and Cruz, Carlos, 1983, Analog model analysis of the north coast limestone aquifers, Puerto Rico: U.S. Geological Survey Open-File Report 82-52, 49 p.

Kaye, C.A., 1959, Geology of the San Juan metropolitan area, Puerto Rico, and notes on age of Mona passage: U.S. Geological Survey Professional Paper 317-C, 140 p., 3 pls.

Referencias, continuación...

Kaye, C.A., 1959, Shoreline features and quaternary shoreline changes Puerto Rico: U.S. Geological Survey Professional Paper 317-B, 140 p., 3 pls.

McGuinness, C.L., 1946, Records of wells in Puerto Rico: U.S. Geological Survey Open-File Report, 267 p.

Molina-Rivera, W.L., 1996, Ground-water use from the principal aquifers in Puerto Rico during calendar year 1990: U.S. Geological Survey Fact Sheet 188-96, 3 p.

Molina-Rivera, W.L., 1998, Estimated water use in Puerto Rico, 1995: U.S. Geological Survey Open-File Report 98-276, 28 p.

Monroe, W.H., 1976, The karst landforms of Puerto Rico: U.S. Geological Survey Professional Paper 899, 69 p., 1 pl.

Monroe, W.H., 1980, Geology of the middle Tertiary Formations of Puerto Rico: U.S. Geological Survey Professional Paper 953, 93 p., 1 pl.

Quiñones-Aponte, Vicente, 1986, Water resources of the lower Río Grande de Arecibo alluvial valley, Puerto Rico: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 85-4160, 38 p., 1 pl.

Rodríguez-Martínez, Jesús, 1995, Hydrogeology of the North Coast Limestone Aquifer System of Puerto Rico: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 94-4249, 22 p.

Rodríguez-Martínez, Jesús, 1997, Characterization of springflow in the north coast limestone of Puerto Rico using physical, chemical, and stable-isotope methods: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 97-4122, 53 p, 2 pls.

Torres-González, Arturo, 1985, Use of surface-geophysical techniques for ground-water exploration in the Canóvanas-Río Grande area, Puerto Rico: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 83-4266, 29 p.

Torres-González, Arturo, and Díaz, J.R., 1984, Water resources of the Sabana Seca to Vega Baja area, Puerto Rico: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 82-4115, 53 p.

Torres-González, Sigfredo, 1991, Compilation of ground-water level measurements obtained by the United States Geological Survey in Puerto Rico, 1958-1985: U.S. Geological Survey Open-File Data Report 88-701, 163 p.

Referencias, continuación...

Torres-González, Sigfredo, Planert, Michael, and Rodríguez, J.M., 1996, Hydrogeology and simulation of ground-water flow in the upper aquifer of the Río Camuy to Río Grande de Manatí area, Puerto Rico: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 95-4286, 102 p.

Torres-González, Sigfredo, Gómez-Gómez, Fernando, and Warne, Andrew G., 2002, Ground-Water Resource Assessment in the Río Grande de Manatí Alluvial Plain, Río Arriba Saliente Area, Puerto Rico: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 02-4132, 35 p.

Tucci, Patrick, and Martínez, M.I., 1995, Hydrogeology and simulation of ground-water flow in the Aguadilla to Río Camuy area, Puerto Rico: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 95-4028, 39 p.

Ward, P.E., and Truxes, C.S., 1964, Water wells in Puerto Rico: U.S. Geological Survey Water-Resources Bulletin 3, 249 p.