

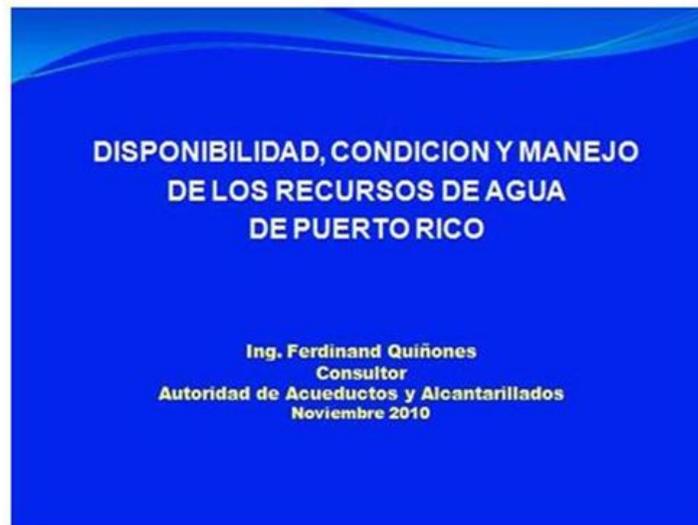
Disponibilidad, Condición y Manejo de los Recursos de Agua de Puerto Rico

Por Ferdinand Quiñones, PE

Resumen Ejecutivo

Datos sobre la disponibilidad, condición y manejo de los recursos de agua de Puerto Rico se resumen como parte de la presentación del tema durante el Simposio de Urbanismo llevado a cabo en San Juan, Puerto Rico el 11 de noviembre de 2010. Los datos incluyen:

- Resumen del clima de Puerto Rico y las tendencias históricas de la precipitación, temperaturas, evapotranspiración y escorrentía
- Información de la cantidad y disponibilidad de las aguas superficiales y subterráneas en la Isla
- Descripción de los acuíferos principales y su condición en cuanto a desarrollo, intrusión salina, contaminación, y capacidad productiva remanente
- Datos sobre el uso de agua desde 1960 por los sectores domésticos (AAA), agrícolas, e industriales
- Análisis estadísticos y comparativos de las tendencias históricas en la precipitación, escorrentía, y las extracciones de agua para usos variados
- Resumen del desarrollo histórico de los embalses en Puerto Rico, su importancia en el abasto público, hidroeléctrico, y para riego agrícola, además de su condición actual en cuanto a sedimentación y pérdida de capacidad
- Proyecciones futuras de la disponibilidad de aguas superficiales y subterráneas, y medidas y proyectos potenciales necesarios para garantizar su preservación para todos los usos culturales y ambientales por el futuro predecible.



INTRODUCCION

Este informe resume los elementos de la hidrología y los recursos de agua de Puerto Rico. El propósito del informe es presentar un cuadro general y abarcador, pero a la misma vez relativamente sencillo, que permita a la mayor parte de los ciudadanos en la Isla entender mejor la magnitud, condición y disponibilidad del agua. El agua es vida, y su uso y manejo adecuado es esencial para la preservación de la salud y el bienestar de los residentes, así como para una agricultura vigorosa, industrias florecientes, y un comercio ágil y variado. Por supuesto, el agua es también vital para un gran número de sistemas naturales y las especies de flora y fauna que los habitan, incluyendo los mismos ríos que la transportan, los humedales, los estuarios, y los bosques. La complejidad de la fisiografía, el clima, y la geología de Puerto Rico hacen laboriosa la tarea de presentar en un escrito limitado un tema tan abarcador y variado, aún para una isla de solamente 3,500 millas cuadradas de área superficial. Sin embargo, somos afortunados de contar con datos científicos abundantes y confiables a relativo largo plazo de nuestro clima e hidrología. Las investigaciones en la Isla del Servicio Nacional Meteorológico (NWS) datan de principios del siglo 20, y proveen un caudal de información climática que son una ventana a los patrones y tendencias de la lluvia en la Isla en tiempo y espacio, así como su confiabilidad estadística. Comenzando en 1957, el Servicio Geológico Federal (USGS) ha operado en la Isla una red extensa de estaciones para medir con precisión los flujos de agua en ríos y quebradas; los niveles en los embalses; los niveles de agua subterránea en los acuíferos principales; y la calidad general de las aguas superficiales y subterráneas. El USGS ha integrado muchos de estos datos en cientos de estudios y análisis científicos detallados sobre la hidrología superficial y subterránea de la mayor parte de la Isla. Existen otras fuentes de información hidrológica confiable en la Isla que nos permiten entender mejor los elementos de nuestro ciclo hidrológico, incluyendo estudios de la Agencia de Protección Ambiental Federal (EPA); del Cuerpo de Ingenieros del Ejército (COE); del Servicio Forestal Federal (USFS); del Servicio Federal de Conservación de Recursos Nacionales (NRCS); del Servicio Federal de Pesca y Vida Silvestre (USFWS); y de varias agencias locales incluyendo la Junta de Calidad Ambiental (JCA), el Departamento de Recursos Naturales y Ambientales (DRNA), la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados (AAA), la Autoridad de Energía Eléctrica (AEE), y el Instituto de Investigaciones de Recursos de Agua (IIRA) del Recinto Universitario de Mayagüez (nuestro antiguo Colegio). En los análisis en este informe se utilizaron primordialmente datos del USGS, el NWS, el DRNA, y la AAA.

Los datos disponibles permiten concluir que el agua en la Isla es abundante, y que disfrutamos de lluvias copiosas y escorrentía abundante, con acuíferos amplios y productivos para el tamaño de la Isla. Los recursos de agua disponibles podrán satisfacer las demandas culturales y ambientales de la Isla en el futuro predecible, sujeto a cambios en el manejo y conservación del recurso. Desafortunadamente, también es categórica la conclusión de que dicho manejo y conservación han resultando en condiciones críticas en todos los acuíferos principales; agotamiento de flujos mínimos en muchos ríos y quebradas; y la sedimentación acelerada de los embalses, los cuales proveen hasta el 70 por ciento del agua que extrae la AAA.

CLIMA

El clima de Puerto Rico incluye los vientos, la temperatura y la precipitación (lluvia). La evaporación y la evapotranspiración son importantes componentes del clima que varían con las temperaturas, el viento y la lluvia. El clima de la Isla, particularmente la lluvia, es diverso para su extensión territorial relativamente pequeña. Esta diversidad en el clima es causada por varios factores, pero principalmente por los vientos Alisios y la geografía de la Isla, que resultan en el efecto orográfico. Los vientos Alisios soplan primordialmente desde el este-noreste, transportando grandes masas de aire cuya humedad es controlada por la evaporación marina. Las lluvias son causadas por la condensación de la humedad de origen marino en el aire a medida que se enfría al ser impulsado por los vientos hacia las cimas de las cordilleras. El efecto ocurre en todas las regiones costaneras de la Isla, aunque en menor grado en la Región Sur. En la Región Oeste, vientos provenientes del oeste crean el mismo efecto en las montañas de la zona, causando lluvias vespertinas frecuentes. La intensidad mayor del efecto orográfico es en la Región Norte, debido a que los vientos del este-noreste prevalecen sobre la Isla la mayor parte del año. El efecto en la Región Norte contribuye también a que la lluvia sea menos abundante en la Región Sur. Una vez el aire cruza por encima de la Cordillera Central hacia los valles de la Región Sur, pierde parte de su humedad al producir lluvia en las laderas del norte. El aire que desciende por las laderas de la Región Sur es más seco que el que fluye en el norte, lo que contribuye a menor lluvia. La temperatura controla estas interacciones, pero es a su vez afectada por los vientos.

Además de las interacciones del viento y temperaturas que influyen el efecto orográfico, el clima de la Isla es afectado por frentes de frío y disturbios tropicales incluyendo vaguadas, tormentas y huracanes. Estos sistemas climáticos pueden inducir lluvias de alta intensidad y larga duración, resultando en inundaciones que afectan la Isla. El clima de la Isla es también afectado por la deforestación y la impermeabilización de las zonas urbanas. Los bosques también contribuyen humedad a la atmósfera al transpirar agua en el proceso de fotosíntesis. Igualmente, la impermeabilización de los terrenos altera los patrones de escorrentía y de evaporación, lo que también impacta el clima. En las zonas urbanas costaneras las temperaturas son más elevadas debido a la combinación de los procesos de evaporación y ausencia de vegetación. Sin embargo, en Puerto Rico no se han llevado a cabo estudios sistemáticos que determinen con precisión el efecto de estos factores en el clima.

Temperatura

Los datos de temperatura atmosférica obtenidos por el *NWS* establecen que la temperatura promedio en Puerto Rico es de 82 grados Fahrenheit ($^{\circ}$ F), con una variación entre 78 $^{\circ}$ y 88 $^{\circ}$ F la mayor parte de los días del año (Figuras 1 y 2). Extremos instantáneos o diarios desde 40 $^{\circ}$ F hasta 102 $^{\circ}$ F ocurren a través de la Isla. En general, las temperaturas son más altas en los valles costaneros que en las montañas, así como en la Región Sur en comparación con la Región Norte. Los datos históricos de temperaturas a través de la Isla sugieren que los promedios han aumentado en las regiones costaneras, siendo la Región Sur el área con registros de

temperatura más elevados, seguida de las regiones costaneras Oeste, Este y Norte. Los aumentos generales en temperatura son evidentes de datos de la estación meteorológica que opera el NWS en el Aeropuerto Internacional Luis Muñoz Marín en San Juan. Valores de temperaturas máximas y mínimas en dicha estación desde 1955 a 1990. El promedio de las temperaturas máximas y mínimas para esta estación meteorológica es de 86° y 74° F, respectivamente.

Figura 1. Temperaturas promedio en Puerto Rico.

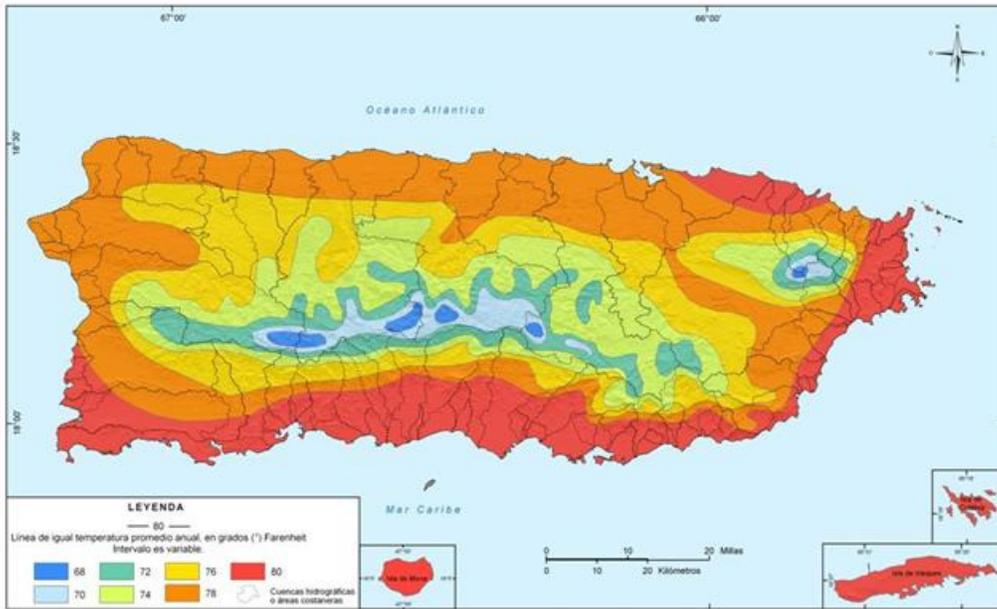
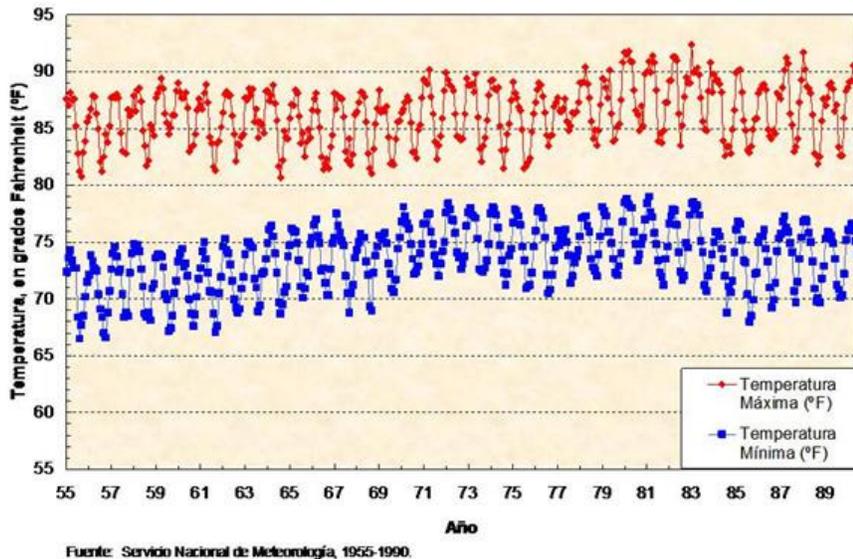


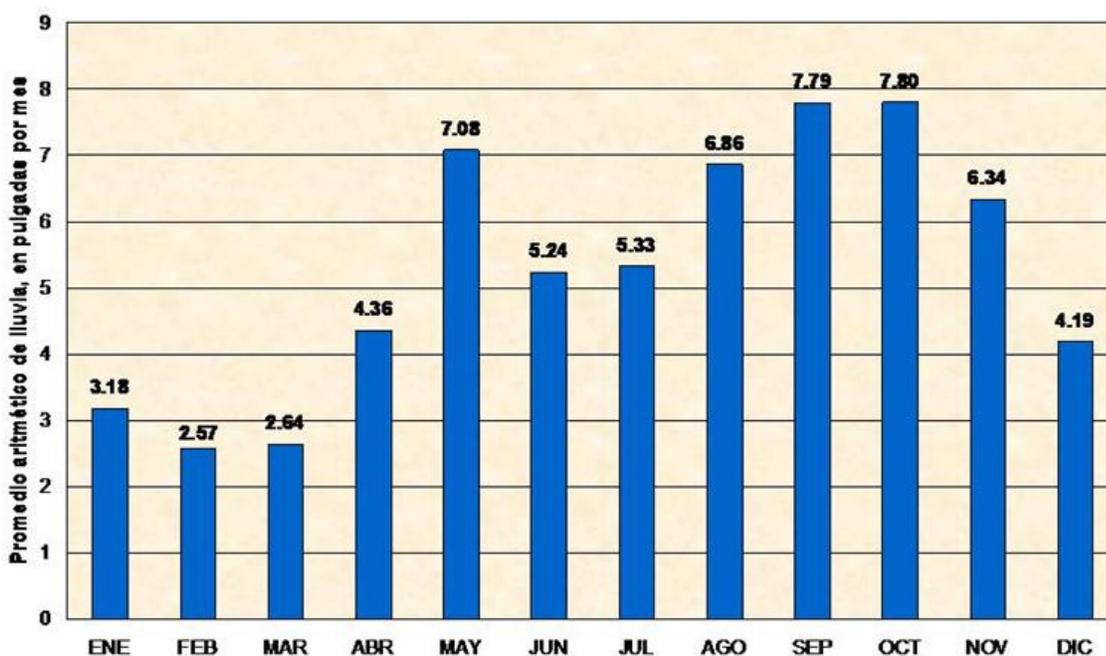
Figura 2. Variaciones diurnas en la temperatura promedio en Puerto Rico.



Precipitación

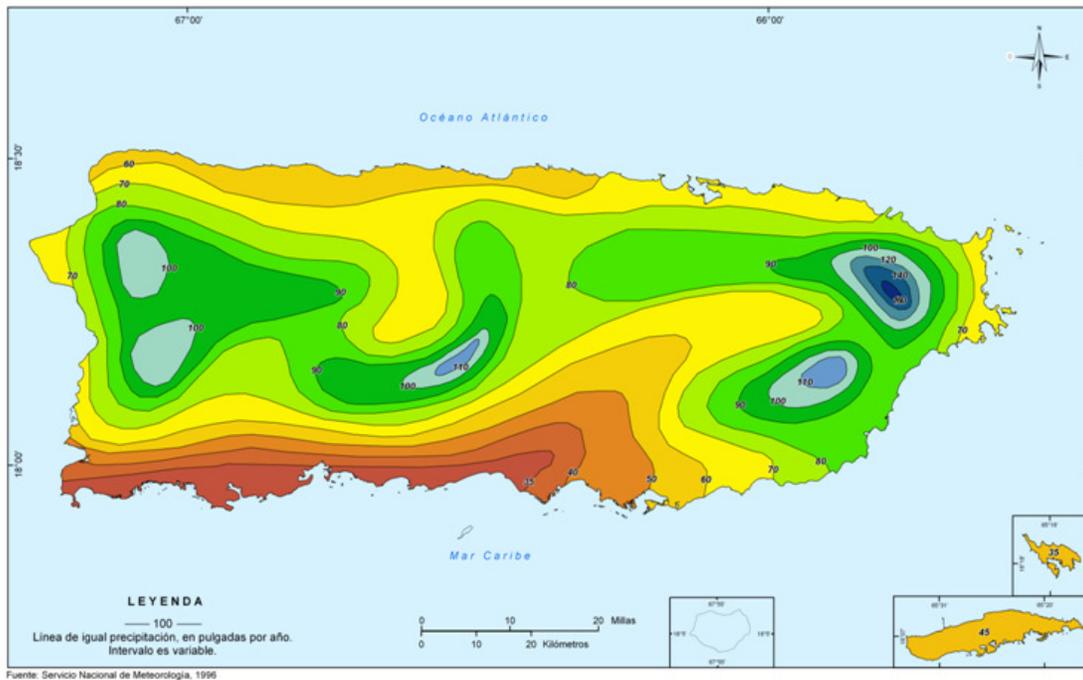
La precipitación pluvial (lluvia) en Puerto Rico es variable en su carácter temporal y espacial. Temporalmente, un periodo relativamente seco comienza generalmente en diciembre y finaliza en marzo o abril, usualmente seguido de un periodo de lluvias intensas tarde en abril y a principios de mayo. La lluvia disminuye sustancialmente en junio y julio, hasta que comienza el período tradicional húmedo de lluvias abundantes que se extiende desde agosto hasta noviembre. Estos patrones pueden variar regionalmente y anualmente, dependiendo de los Vientos Alisios y los sistemas climáticos que afectan la Isla. En general, aproximadamente el 50 % de la lluvia anual ocurre durante este período a finales del año. La distribución mensual promedio de la lluvia en la Isla basada en datos del NWS durante los últimos 96 años se resume en la Figura 2, mientras que la distribución promedio anual se ilustra en la Figura 3. En dicha figura pueden apreciarse los centros de gran lluvia con promedios de hasta 170 pulgadas anuales (El Yunque), y en exceso de 90 pulgadas anuales en más de la mitad de la Isla. En comparación, la zona más seca es la del Valle de Lajas, donde la lluvia promedio anual apenas alcanza 35 pulgadas.

Figura 3. Lluvia promedio mensual en Puerto Rico.



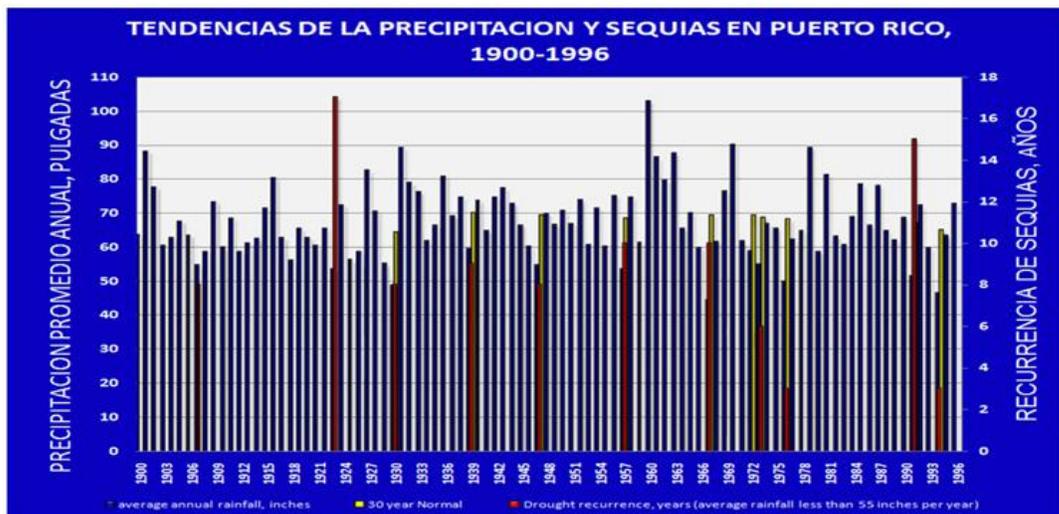
Fuente: Servicio Nacional de Meteorología, 1900-1996.

Figura 4. Precipitación promedio anual en Puerto Rico.



Los datos de lluvia del NWS demuestran que la cantidad de lluvia sobre Puerto Rico no ha disminuido desde 1900 al presente. Las tendencias de precipitación y sequías en la Isla se ilustran en la Figura 5, incluyendo el promedio anual desde 1900 y los promedios normales (ciclos de 30 años) durante ese periodo. No son evidentes cambios en los patrones de lluvia total que puedan adjudicarse al cambio climático en progreso sobre el planeta.

Figura 5. Tendencias históricas de la lluvia en Puerto Rico desde 1900.

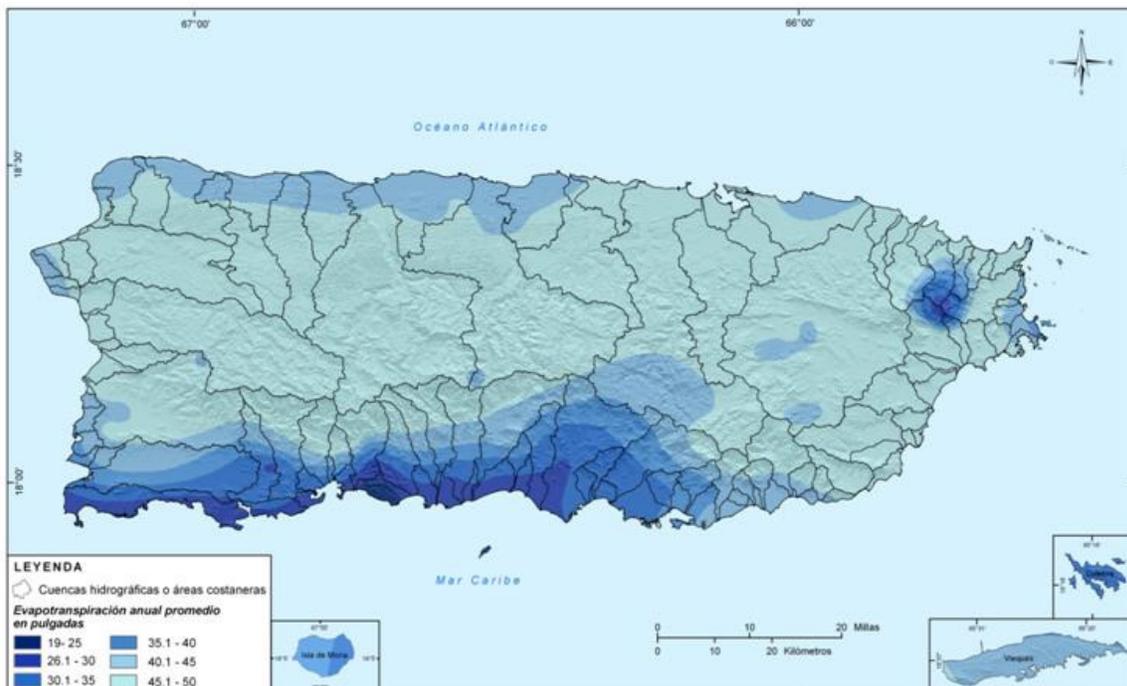


Evapotranspiración

Una parte significativa de la lluvia que se precipita sobre Puerto Rico se evapora o evapotranspira antes de discurrir por los ríos y quebradas o infiltrarse a los acuíferos. La evapotranspiración incluye dos componentes: 1) evaporación del agua directamente de la superficie de ríos, embalses, lagunas y humedales debido a la radiación solar y por el viento debido a efectos de convección y 2) transpiración a la atmósfera de parte del agua que es absorbida por las plantas como parte de sus procesos de fotosíntesis. La evapotranspiración es uno de los mecanismos de intercambio de energía de las plantas con su medioambiente, y juega un papel importante en el clima. La transpiración de vapor de agua por las plantas aumenta la saturación en la atmósfera, contribuyendo a efectos climáticos locales y la intensidad de las lluvias. En los bosques lluviosos tropicales tales como El Yunque en la Sierra de Luquillo, la evapotranspiración representa un componente importante del balance de agua, lo que afecta directamente la escorrentía y el potencial de infiltración a los acuíferos. La evaporación máxima es de cerca de 160 pulgadas por año, tomando en cuenta la incidencia máxima de radiación solar sobre el planeta tierra y aplicando esta energía exclusivamente a la evaporación del agua.

La evapotranspiración promedio en Puerto Rico es de aproximadamente 44 pulgadas por año. Esta varía desde 40 pulgadas en los valles del sur, hasta 20 pulgadas en las áreas montañosas en el este de Puerto Rico (Figura 6). En general, la evapotranspiración equivale a cerca de un 64 % de la lluvia promedio aunque puede llegar hasta un 90 % en algunas áreas costaneras.

Figura 6. Evapotranspiración promedio anual en Puerto Rico.



Sequías

El clima de Puerto Rico varía a través del año, mermando la lluvia significativamente durante los meses de diciembre a abril. Estos períodos de poca lluvia son más intensos en la Región Sur debido al efecto de sombra de lluvia en las laderas del sur descrito anteriormente. Periódicamente, cambios en el clima regional limita la lluvia en los meses de abril y mayo, extendiéndose el período seco hasta agosto. Además de estas sequías anuales, Puerto Rico sufre de sequías generales periódicas causadas por efectos climáticos regionales que afectan el clima en toda la Isla y el Caribe. Las sequías de 1934 y 1974 son representativas de estas condiciones generales de poca lluvia en la Isla y en el Caribe. La sequía de 1967 afectó principalmente la Región Sur de la Isla, mientras que la de 1994 fue principalmente en la Región Norte, cuando se redujeron drásticamente los niveles en los embalses de Loíza y La Plata, resultando en que la AAA tuviera que racionar el agua potable a los residentes de la Zona Metropolitana de San Juan desde mayo hasta agosto de 1994. Datos del NWS establecen que la sequía más severa conocida fue la de 1964, que se extendió hasta 1967. La lluvia mermó aproximadamente en un 30 % del promedio anual, lo que representó un déficit de aproximadamente 40 pulgadas en dos años. Un evento similar en tiempos modernos sería catastrófico a la Isla debido al aumento en el uso del agua, particularmente en la Zona Metropolitana de San Juan. Las sequías pueden ser también regionales debido a las diferencias orográficas entre las cuencas. Como ejemplo, la sequía de 1998 afectó severamente la cuenca del Río Guajataca, mientras que la lluvia era abundante en otras zonas de la región central de la Isla.

Cuencas y Escorrentía

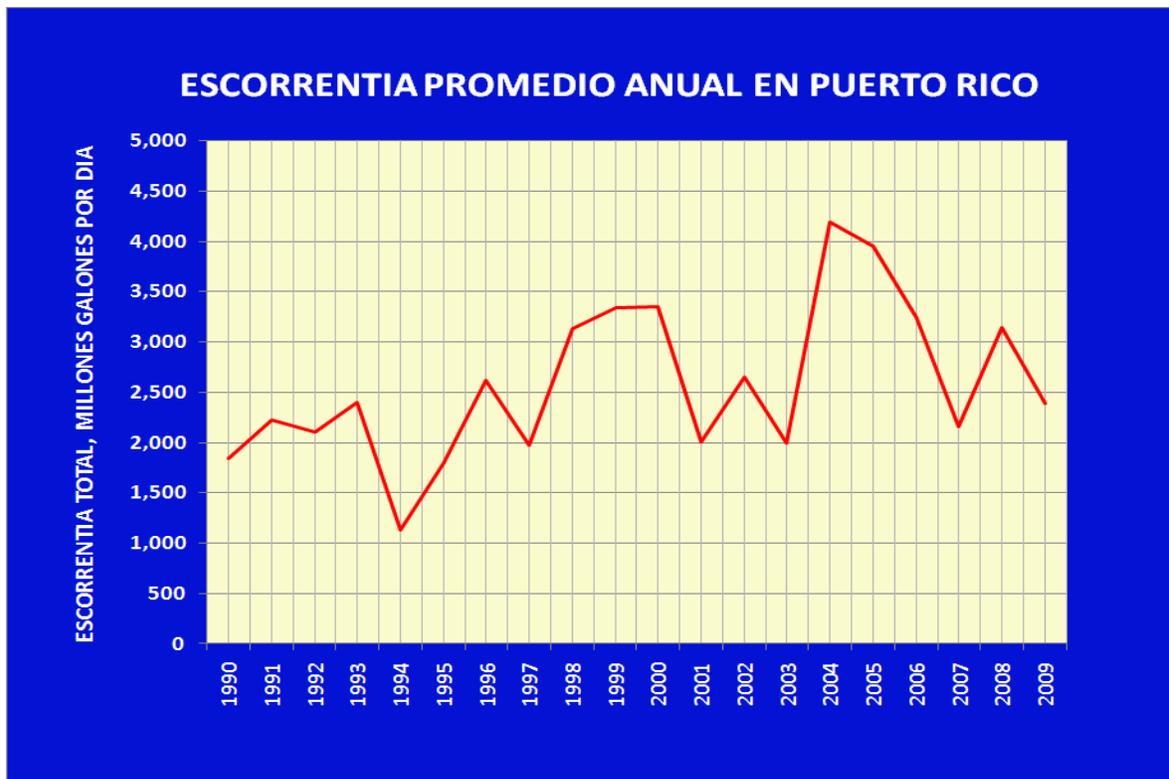
La mayor parte de la superficie de Puerto Rico es drenada por 134 cuencas principales que forman ríos de características variadas (Figura 8). Las cuencas de mayor tamaño ocurren en las regiones Norte y Oeste, incluyendo las del Río Grande de Loíza, Río Grande de Manatí, Río Grande de Arecibo, Río de La Plata, Río Culebrinas y Río Grande de Añasco. El área de captación cumulativa de estas seis cuencas principales es de aproximadamente 1,310 mi², lo que representa el 39% del área superficial de 3,500 millas cuadradas de la Isla. En comparación, las cuencas principales de la Región Sur, desde Cabo Rojo hasta Patillas, tienen un área de captación combinada de solamente 550 mi². Esta diferencia significativa en el área de drenaje entre las regiones norte-oeste y sur se debe al desplazamiento hacia el sur de la Cordillera Central relativo al eje central de la Isla. Esto hace que la mayor parte del área superficial en las laderas de la cordillera se encuentre en las pendientes del norte-oeste. Este hecho se comprueba con la longitud promedio de los ríos que drenan la Región Norte, que es de 25 mi, siendo el Río de la Plata el de mayor longitud con 58.5 millas, en comparación con una longitud promedio de 14 millas en los ríos que drenan las laderas del sur. La implicación hidrológica de este hecho es que los ríos de las regiones Norte y Oeste descargan una cantidad mucho mayor de la escorrentía total de la Isla que los ríos de la Región Sur.

están desplazadas hacia el sur aproximadamente dos terceras ($2/3$) partes del ancho de 35 millas de la Isla. Los cauces de los ríos que fluyen desde las montañas hacia los valles del norte y el mar tienen una longitud mayor que los ríos que drenan hacia el sur. Debido al desplazamiento de las montañas, los valles costaneros del norte tienen una extensión territorial mayor que los del sur. En comparación, en la Isla de Vieques ocurre lo opuesto, y el desplazamiento es de aproximadamente 2.5 millas hacia el norte desde la costa sur. El valle principal, Esperanza, tiene una extensión mayor debido a su ubicación al sur de la isla de Vieques. La cuenca hidrográfica de mayor extensión territorial en la Isla es la del Río Grande de Loíza, con un área de captación de 290 mi². Esta cuenca drena desde la parte este-central de Puerto Rico hacia el norte y el Océano Atlántico. En comparación, la cuenca de menor extensión territorial es una cuenca que drena directamente al Canal de Mona cerca de Rincón, en la Región Oeste, con un área de captación de 0.05 mi² (Figura 8).

La escorrentía o flujo de agua natural de los principales ríos en Puerto Rico ha sido medida de forma casi continua desde la década de 1940. La antigua Autoridad de Fuentes Fluviales (AFF) inició la operación de estaciones de medir el flujo de los ríos en puntos estratégicos en la Isla, principalmente en las cuencas donde operaban o planificaban embalses y sistemas hidroeléctricos o de riego. En el 1957, la División de Recursos de Aguas del *US Geological Survey (USGS)* comenzó operaciones en la Isla, incluyendo un programa para determinar en forma continua el caudal y la calidad del agua en los ríos principales. Los datos de flujo anteriormente recolectados por la AFF fueron eventualmente integrados a la base de datos del *USGS*, que ahora comprende aproximadamente 175 localizaciones en Puerto Rico, incluyendo los niveles de agua en los embalses principales. En el año 2005, el *USGS* operó aproximadamente 120 estaciones de escorrentía y niveles en embalses (Figura 8), datos que están disponibles en sus publicaciones en la Internet (pr.water.usgs.gov). Estos datos son de gran valor para la planificación de la conservación y uso de los recursos de agua en la Isla. Los datos permiten llevar a cabo análisis estadísticos sobre los flujos mínimos, promedios y máximos, y cambios en niveles en los embalses, información esencial para el manejo adecuado de las aguas superficiales en la Isla.

5. Los datos en la Figura 10 ilustran los efectos significativos de la sequía de 1994 en la escorrentía en la Isla, cuando la escorrentía total se redujo a aproximadamente un promedio de 1,200 mgd. En contraste, la figura ilustra el máximo de 4,200 mgd en el 2004, casi cuatro veces el flujo durante la sequía de 1994.
6. Los datos también reflejan una tendencia general de aumento en la escorrentía total descargada desde la Isla al mar, resultante de la abundante lluvia que se ha experimentado en el período posterior a 1994.

Figura 10. Hidrograma de la escorrentía total descargando desde Puerto Rico hacia el mar durante el período de 1990 al 2009.

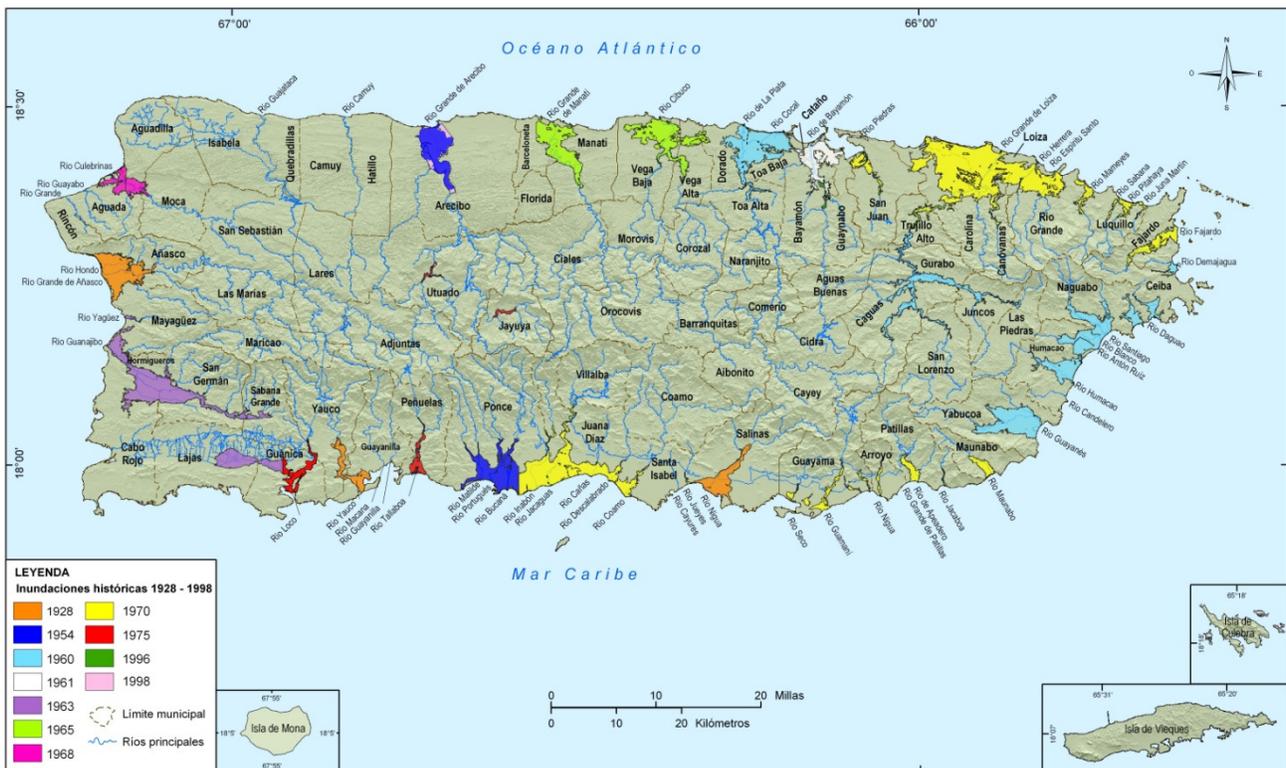


Inundaciones

La mayor parte de los valles costaneros en Puerto Rico sufren inundaciones periódicas de gran magnitud que afectan miles de residencias, negocios, industrias y la infraestructura de la Isla, especialmente las carreteras y puentes (Figura 11). Esta incidencia de inundaciones se debe a la intensidad de las lluvias causadas por fenómenos tropicales, que incluye frentes de frío, vaguadas, tormentas tropicales y huracanes. En promedio, Puerto Rico sufre los efectos adversos de inundaciones una vez cada diez años, principalmente como consecuencia de los huracanes que azotan la

Isla o su vecindad (Quiñones, 1992). Entre 1988 y 1994 la Isla ha sido afectada por 17 inundaciones severas (USGS, 1999). Nueve de estas inundaciones se originaron de tormentas y ondas tropicales. Los efectos de estas inundaciones se acentuaron debido al desarrollo urbano en los valles de los ríos principales, mayormente en los valles costaneros. La Junta de Planificación estima que aproximadamente 160,000 familias en la Isla residen en zonas propensas a inundación, siendo afectados por las inundaciones periódicas. Esto incluye sectores en la Zona Metropolitana de San Juan, en las cuencas del Río Piedras y el Río Grande de Loíza. Excepto por los valles del Río de Bayamón en Bayamón, el Río Bucaná en Ponce y el Río Yagüez en Mayagüez, donde el cauce ha sido canalizado para controlar las inundaciones, los demás ríos en la Isla inundan periódicamente grandes sectores rurales y urbanos. Los estudios del USGS, FEMA y la JP han definido la frecuencia, magnitud y extensión de las inundaciones en los valles costaneros y algunos valles interiores en Puerto Rico. El USGS publica mapas de las inundaciones históricas basados en datos de campo recopilados luego de una inundación (Figura 10). Estos mapas están disponibles en el USGS y sirven como base para los estudios que lleva a cabo FEMA para definir los niveles de las inundaciones en distintos sectores de la Isla. La JP adopta estos mapas de FEMA para definir las zonas de inundación en un cauce, y reglamentar la construcción de obras en los valles propensos a inundación (Figura 10).

Figura 10. Inundaciones históricas en los principales valles costaneros y centrales de Puerto Rico.



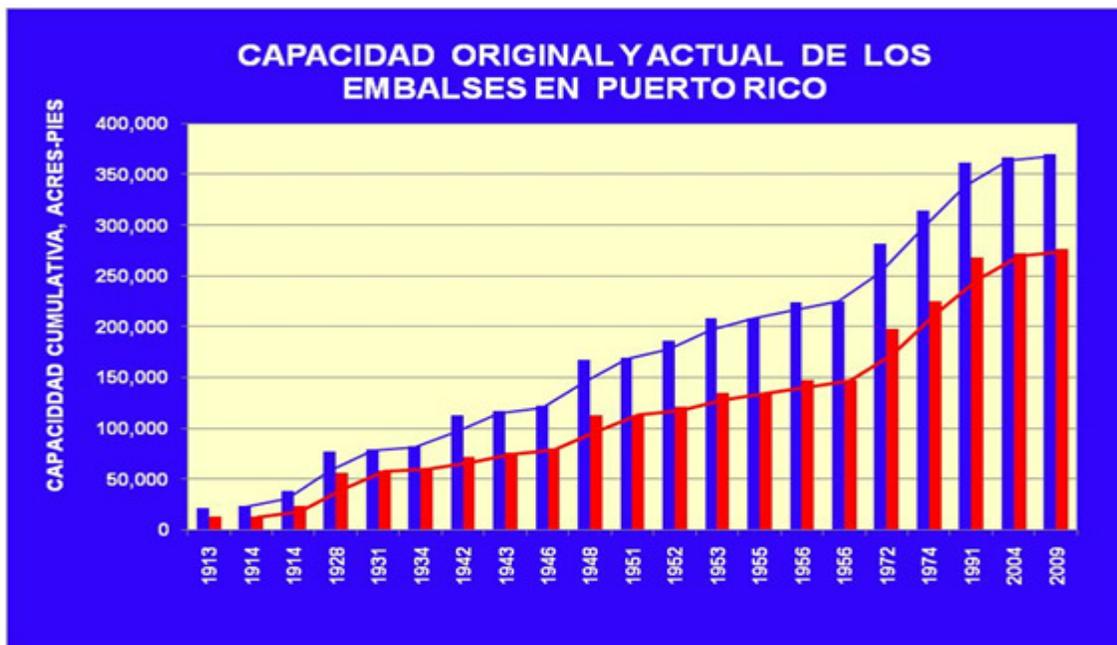
zonas bajo la influencia de las mareas y la intrusión salina, por lo que las aguas que contienen son salobres, con concentraciones de sales marinas variables.

Los embalses son la fuente principal de agua cruda que utiliza la AAA para producir agua potable en la Isla, además de suplir agua para riego principalmente en los valles costaneros de la Región Sur. Los embalses suplen aproximadamente 400 mgd de agua cruda a las plantas de filtración operadas por la AAA, lo que constituye el 68 % del agua potable producida en la Isla. Paralelamente, los embalses proveen aproximadamente 39 mgd de agua para riego agrícola en los valles costaneros de las regiones Sur y Norte. Además, proporcionan agua para generar aproximadamente el 1.9 % de la energía eléctrica que produce la AEE, y proveen control parcial a las inundaciones en varias cuencas. También son fuente de recreación para miles de residentes dedicados a la pesca deportiva y navegación en la zona montañosa. Finalmente, son refugios de aves y vida silvestre acuática, incluyendo peces, camarones y tortugas.

En Puerto Rico, la sedimentación de los embalses es uno de los problemas más importantes en el manejo de los recursos de agua. La acumulación de sedimentos ha reducido la capacidad de almacenaje de agua en todos los embalses, alcanzando condiciones críticas en algunos de los más importantes. Las pérdidas de capacidad de los embalses en la Isla se deben a varios factores naturales e inducidos por actividades humanas. Las represas que forman los embalses son escollos en el paso de un río en su descenso de las zonas altas de su cuenca hacia su desembocadura en otro río o el mar. En todas las cuencas ocurre en menor o mayor grado erosión de los suelos, que luego son transportados hacia los cauces de las quebradas y los ríos. Estas tasas naturales de erosión y transporte de sedimentos aumentan o disminuyen en intensidad en proporción a la cantidad e intensidad de la lluvia, las características de los suelos, las pendientes de las cuencas y su cubierta forestal. En comparación, la deforestación y remoción de la corteza terrestre aceleran la erosión de los suelos y el transporte de sedimentos hacia los cuerpos de agua y eventualmente a los embalses. Los estudios del *USGS* en la Isla demuestran que en cuencas menos desarrolladas, la tasa de generación de sedimentos es menor que en las desarrolladas. Como resultado, los embalses en cuencas desarrolladas se llenan de sedimentos más rápidamente que aquellos en cuencas que mantienen su cubierta vegetal.

La construcción de los embalses principales en la Isla comenzó en 1913, incrementándose la capacidad a medida que las demandas de agua aumentaron pero también con el desarrollo de los sistemas de riego e hidroeléctricos construidos por la antigua Autoridad de las Fuentes Fluviales, agencia predecesora de la AEE. Los embalses más recientes son los de Cerrillos (1991), Fajardo (2004), y Río Blanco (2009). La capacidad total construida desde 1913 al presente es de aproximadamente 375,000 acres-pies. En comparación, como se ilustra en la Figura 11, la capacidad actual es de aproximadamente 275,000 acres-pies. La sedimentación progresiva de los embalses ha resultado en una merma de capacidad del 27 por ciento del total construido.

Figura 11. Reducción en la capacidad de los embalses en Puerto Rico.



La sedimentación acelerada de los embalses en la Isla es el resultado combinado de la construcción de la presa que obstruye el paso del río y la precipitación de los sedimentos que el agua arrastra desde las montañas en el lago formado por la presa. Sin embargo, el transporte de sedimentos desde las cuencas hasta los cauces obedece a la combinación de la erosión natural de los suelos y la erosión inducida por actividades agrícolas y urbanas. Los estudios del USGS en el Bosque de Carite documentan que aún en bosques vírgenes las lluvias intensas que periódicamente caen sobre sus cuencas inducen cientos de derrumbes que exponen los suelos a la erosión y el transporte de sedimentos hacia las quebradas y ríos. Las actividades agrícolas y desarrollos urbanos aceleran la erosión de los suelos exponiéndolos a ser transportados hacia los ríos. Las lluvias ciclónicas que ocurren periódicamente en la Isla pueden transportar en un día hasta el 90 por ciento de los sedimentos que descarga anualmente un río en un punto dado. Un ejemplo de este proceso fueron las lluvias de aproximadamente 25 pulgadas que ocurrieron los días 21 y 22 de septiembre de 2008. Como se ilustra en la Figura 12, este evento de lluvias y escorrentía en la cuenca del Río Grande de Loíza resultó en la descarga al Embalse Loíza de aproximadamente 1.46 millones de toneladas de sedimentos al Embalse Loíza (Carraízo). Esta cantidad de sedimentos redujo la capacidad útil del embalse en aproximadamente el 8.5 por ciento de la capacidad remanente antes del evento de lluvia indicado. Igualmente importante es que el sedimento descargado durante el evento consumió aproximadamente el 32 por ciento de la capacidad ganada en el embalse cuando fue dragado en 1998 a un costo total de \$65 millones. Esta pérdida de capacidad debido al evento equivale a una pérdida de aproximadamente \$22 millones.

Figura 12. Escorrentía y transporte de sedimentos al Embalse Loíza durante las lluvias de septiembre 21-22 de 2008.



Este incidente de pérdida de capacidad extraordinaria en el Embalse Loíza en dos días de lluvias intensas no es único a la cuenca del Río Grande de Loíza. Todas las cuencas en la Isla experimentan eventos similares, aunque los datos del USGS demuestran que la erosión y transporte de sedimentos hacia los ríos es menor en las cuencas menos desarrolladas. Aún así, la mayor parte de los embalses principales en la Isla sufren de sedimentación excesiva y pérdida de capacidad acelerada. La Tabla 1 resume las características y condiciones actuales de los embalses principales en la Isla, enfocado a aquellos de mayor tamaño que proveen la mayor parte del agua que la AAA utiliza. Los datos en dicha Tabla 1 apuntan a la condición crítica de los embalses Loíza y Dos Bocas, que son la fuente de hasta 200 millones de galones de agua por

día en la Región Norte desde Arecibo hasta la Zona Metropolitana de San Juan, incluyendo a Caguas y Gurabo.

Tabla 1. Sedimentación de los embalses principales en Puerto Rico.

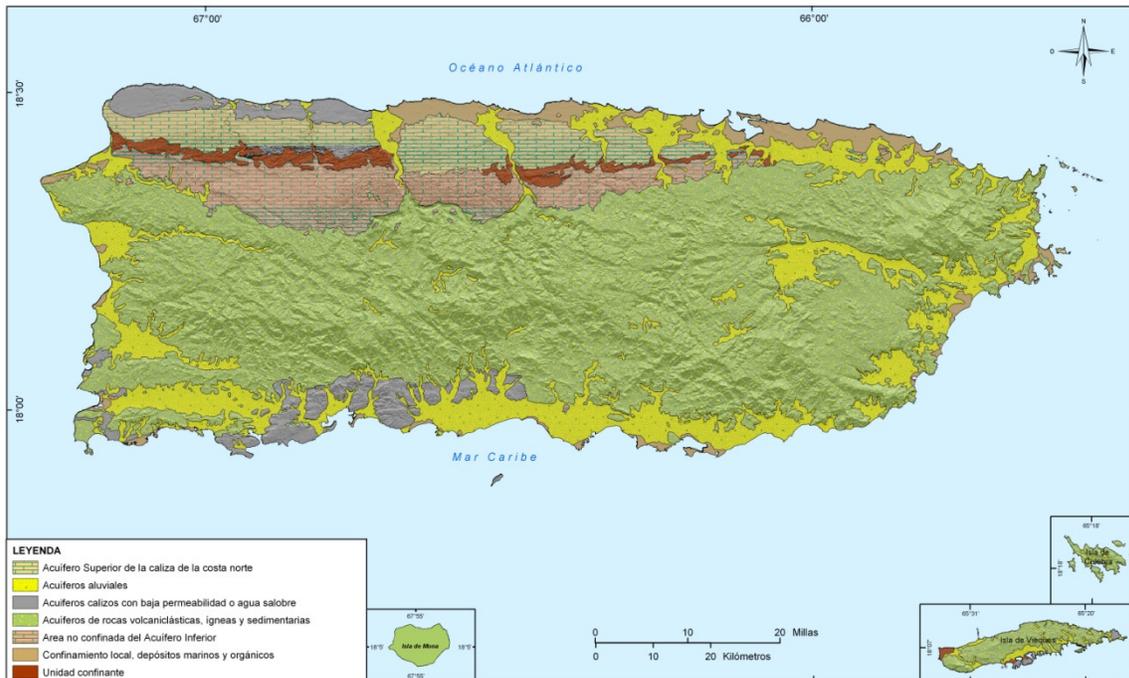
	Caonillas	Carite	Cerrillos	Cidra	Dos Bocas	Fajardo	Garzas	Guajataca	Guayabal	Guayo	La Plata	Loíza	Lucchetti	Patillas	Toa Vaca
Cuenca	Río Grande de Arecibo	Río de La Plata	Río Bucaná	Río Bayamón	Río Grande de Arecibo	Río Fajardo	Río Grande de Arecibo	Río Guajataca	Río Jacaguas	Río Grande de Añasco	Río de La Plata	Río Grande de Loíza	Río Yauco	Río Grande de Patillas	Río Jacaguas
Capacidad Original, acres-pies	45,100	11,300	47,900	5,300	30,400	4,455	4,700	39,300	9,580	15,565	32,600	21,700	16,500	14,300	55,900
Tasa de Sedimentación, acres-pies/año	209	30	49	12.4	277	1.0	10.6	70.6	49.5	52.0	161	245	143	89.2	131
Capacidad Restante en el 2010 acres-pies	32,200	5,380	47,000	4,510	11,200	4,450	4,000	33,500	4,500	12,800	26,800	13,200	8,200	10,100	50,800
Porcentaje de Capacidad Restante (%)	71	48	98	85	37	100	85	85	47	82	82	61	50	71	91
Vida Útil Remanente años	160	285	958	370	48	2,000	385	481	97	269	171	60	62	126	394
Caudal Anual Promedio de Entrada, acres-pies/año	201,100	31,500	41,500	11,800	325,000	13,500	13,500	84,700	19,600	58,500	235,700	336,500	28,000	50,200	17,500
Rendimiento Seguro en el 2004 millones galones por día	70	56	25	6	52	12	10	42	20	12	63	55	13	23	14

Las altas tasas de sedimentación de los embalses construidos en el cauce de los ríos indujeron al Dr. Greg Morris a proponer que las nuevas represas se construyan fuera del cauce para evitar la acumulación excesiva de sedimentos. Los nuevos embalses Fajardo y Río Blanco incluyen diseños que reducen significativamente los problemas de sedimentación. Estos embalses se desarrollan fuera del cauce del río que los abastece, en hondonadas naturales donde se construye una represa. Una toma en el río aguas arriba de la ubicación del embalse desvía el agua hacia la represa, la cual fluye por gravedad a través de una tubería soterrada. El diseño de la toma promueve la precipitación de una gran parte de los sedimentos suspendidos en la escorrentía en el río. El agua que fluye hacia los embalses contiene cantidades menores de sedimentos, reduciendo así la tasa de sedimentación y prolongando su vida útil.

Acuíferos

Puerto Rico posee una diversidad de acuíferos a través de su extensión geográfica y constituyen un recurso hídrico de gran valor e importancia (Figura 6.12). En general, la productividad de los acuíferos en la Isla es una función de los materiales que los forman. Estos materiales incluyen rocas calizas sedimentarias de permeabilidad primaria y secundaria variable, pero generalmente alta; depósitos aluviales no consolidados de alta porosidad y permeabilidad; y rocas de origen volcánico de permeabilidad limitada donde pueden abundar fracturas capaces de almacenar grandes cantidades de agua. Los principales acuíferos en la Isla incluyen aquellos formados por rocas calizas y aluvión de la Provincia de la Costa Norte; los acuíferos aluviales de los valles costaneros de las Provincias de la Costa Sur; los acuíferos aluviales en los valles interiores de Caguas, Cayey y Cidra (Provincia Interior); y los acuíferos menores en los valles ribereños en las Provincias Oeste y Este de la Isla. En la Provincia del Interior en la región montañosa, fracturas en las rocas de origen volcánico y depósitos aluviales en los valles de los ríos, forman acuíferos de menor importancia y productividad que en las otras provincias.

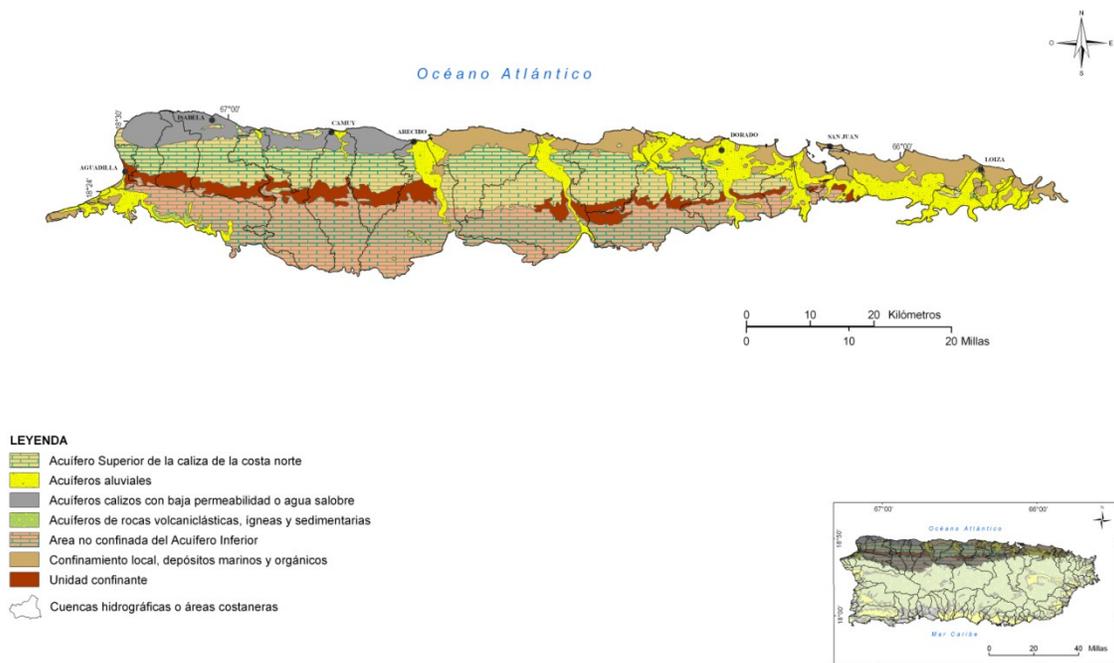
Figura 13. Mapa de los acuíferos principales de Puerto Rico



Acuíferos de la Región Norte:

La Provincia del Norte de Puerto Rico se extiende desde Luquillo hasta Aguadilla, ocupando un área de aproximadamente 905 mi². La zona incluye desde la costa hasta la divisoria de la Cordillera Central de la Isla y la Sierra de Luquillo en el este. La Provincia del Norte incluye los acuíferos más importantes en la Isla en la Región del Karso. Dos sistemas de acuíferos principales, denominados el Acuífero Superior (anteriormente referido como el Acuífero Llano o Freático) y el Acuífero Inferior (anteriormente el Acuífero Profundo o Artesiano), fueron formados por procesos y depósitos geológicos. Estos acuíferos incluyen: 1) un sistema de rocas calizas con niveles altos a moderados de fracturas y canales de solución; 2) un sistema aluvial tipo abanico formado por la deposición de sedimentos de los ríos principales que fluyen a través de la zona y de depósitos marinos acumulados en varios periodos geológicos hasta 100 millones de años en el pasado cuando la zona estuvo bajo el mar. Existen además zonas de sedimentos relativamente impermeables que actúan como capas confinantes entre los dos acuíferos resultando en las condiciones artesianas del Acuífero Inferior. Los acuíferos de la Región del Karso son extremadamente complejos en su estructura y funcionamiento.

Figura 14. Acuíferos de la Región del Karso en la Provincia del Norte.



1. **Acuífero Superior (Freático o Llano):**

- a. El Acuífero Superior se compone de material sedimentario terrestre y marino depositado sobre rocas calizas (primordialmente carbonato de calcio) del período geológico Terciario Mediano (Épocas del Mioceno y Oligoceno, desde unos 40-50 millones de años (Monroe, 1980)), extendiéndose a lo largo y ancho de los valles formados por 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. Estos valles aluviales se extienden de este a oeste desde Toa Baja hasta Arecibo, y de norte a sur desde la vecindad de la antigua Carretera PR-2 hasta la costa norte. El material sedimentario es primordialmente aluvión (arena, grava y rocas de origen volcánicas) transportado por los ríos desde la Región Montañosa a medida que los suelos fueron erosionados por la lluvia y el viento. Hacia la costa el aluvión está mezclado con depósitos de origen marino (arena, residuos de corazas de animales marinos, y barros).
- b. La secuencia geológica de importancia es que el aluvión y los depósitos marinos descansan sobre rocas calizas generalmente porosas de las formaciones Aymamón y Aguada. Estos tres componentes forman el Acuífero Superior, donde los estratos saturados de agua fresca tienen un espesor de hasta 450 pies en su sección más ancha en el área de los pozos del sector Santana en el municipio de Arecibo (Figura 15). Hacia el oeste, en Camuy, el espesor saturado es de 150 pies, mientras que hacia el este el espesor saturado puede alcanzar hasta 400 pies en el área del Cruce Dávila en Barceloneta. El espesor saturado disminuye hacia Vega Baja (hasta 250 pies) y Toa Baja (100 pies). De sur a norte el espesor saturado del acuífero disminuye hacia las costas, donde es cero, así como tierra adentro desde la vecindad de la antigua Carretera PR-2, siendo cero cerca del afloramiento de la formación caliza de Aguada en la zona de contacto con las rocas volcánicas.
- c. El Acuífero Superior es el más importante y productivo de Puerto Rico debido a su extensión lateral (Gómez, 2008); su gran espesor saturado; y la alta porosidad del aluvión y rocas calizas que lo forman. Las zonas más productivas son aquellas donde el espesor saturado es mayor y el drenaje subterránea a través de las rocas calizas sustentan recargas cuantiosas de la lluvia en los áreas de recarga del acuífero. Estas zonas de alta productividad incluyen los valles de Arecibo, Manatí, Vega Alta, y Vega Baja. Al oeste de Hatillo el aluvión esencialmente desaparece y la porosidad de las rocas calizas disminuye, por lo que la productividad se reduce drásticamente.
- d. La capacidad de producción sustentable de un acuífero está determinada por cambios en los patrones de recarga natural, los que a su vez dependen de la lluvia promedio anual. Sin embargo, en el caso del Acuífero Superior, el cambio anual y a largo plazo en el almacenamiento de agua subterránea en el acuífero es relativamente pequeño. Esto se debe a la alta porosidad del aluvión y de la solubilidad de las rocas calizas que ha resultado en la formación de conductos subterráneos, suplementado por fracturas geológicas en dichas rocas calizas. Esta condición es favorable porque el

rendimiento confiable es relativamente constante aún en años de sequía o de lluvia abundante. El USGS (Giusti, 1978; Gómez, 1985) estimó el rendimiento seguro o confiable de este acuífero en aproximadamente 120 millones de galones de agua por día (mgd). Sin embargo, la realidad y tragedia actual ante el manejo inadecuado del acuífero, es que dicho rendimiento confiable es posiblemente no mayor de 50 mgd. Las causas de esta reducción de más de un 50 % en el rendimiento confiable del Acuífero Superior incluyen:

- i. Sobre-explotación por décadas extrayendo una cantidad mayor de agua de la que se recarga por la lluvia y escorrentía (Gómez, 2008). En efecto, se ha estado minando el acuífero lo que ha resultado en mermas significativas en el nivel freático (nivel del agua) desde Dorado hasta Manatí. Extracciones para usos agrícolas, abasto público, y usos industriales contribuyen y han contribuido a minar el acuífero.
- ii. El exceso de bombeo a su vez ha inducido intrusión salina en el acuífero desde Toa Baja hasta Arecibo (Figura 16). Al reducirse el espesor de la columna de agua dulce, la cuña natural de agua salada costanera se desplaza tierra adentro hasta llegar a un nuevo equilibrio con el agua dulce. La intrusión salina ha resultado en el cierre de decenas de pozos de la AAA, agrícolas, e industriales, esto debido a las altas concentraciones de cloruro de sodio en el agua que limitan su uso. El avance tierra adentro hacia el sur de la cuña de agua salobre es inexorable, y continuará por el futuro previsible. Este proceso de intrusión salina es relativamente irreversible, y se estima tomará en exceso de 100 años e inversiones cuantiosas retornar el acuífero a una estabilidad relativa.
- iii. Contaminación de sectores significativos del Acuífero Superior debido a derrames químicos, incluyendo las áreas de Vega Alta (Ponderosa); Manatí (GE), y Barceloneta (Upjohn). En estas zonas la presencia de contaminantes químicos, primordialmente Tricloroetileno (TCE), limitan la extracción de agua.

Figura 15. Productividad del Acuífero Superior de la Región del Karso (expresada como Transmisividad en metros cuadrados por día, que es la unidad utilizada para medir productividad de un acuífero) (Renken, 2002).

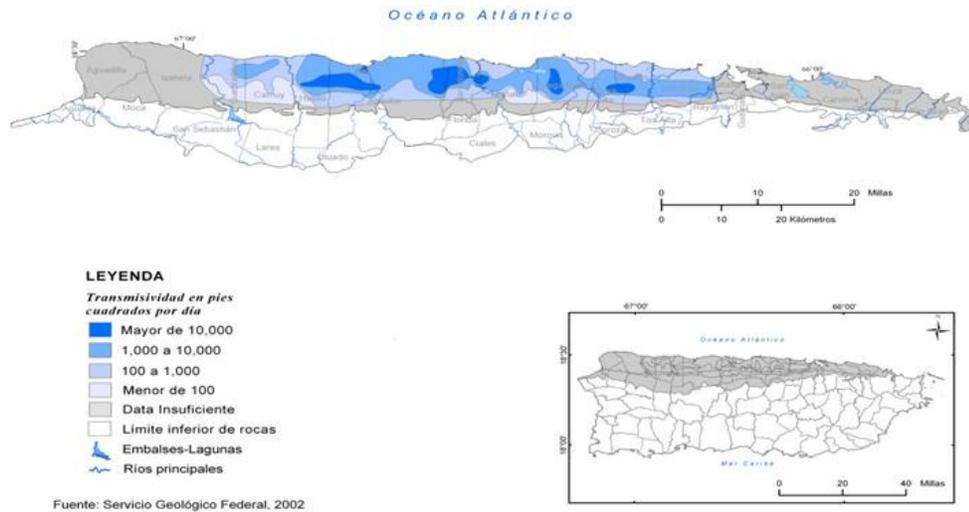
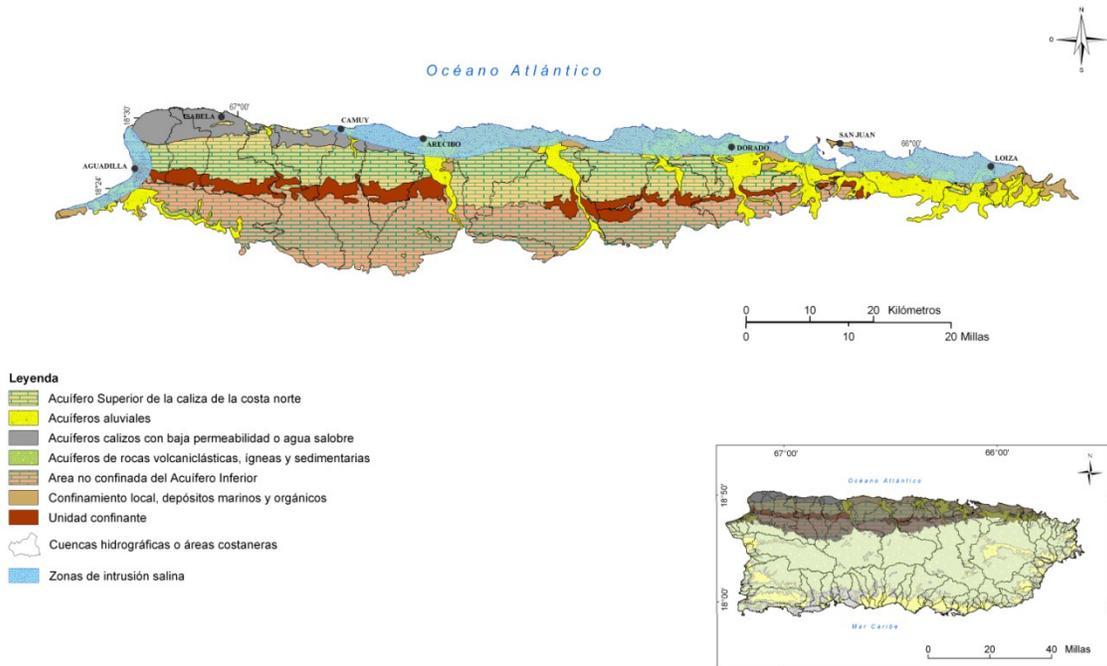


Figura 16. Intrusión salina en el Acuífero Superior de la Región del Karso (Renken, 2002).



- e. Hasta el 2005, la extracción total de agua subterránea del Acuífero Superior en los municipios costaneros de la Región del Karso era de aproximadamente 50 mgd, similar a la de 1960, y aproximadamente igual a su rendimiento sustentable bajo las condiciones antes descritas (Figura 17). Esto implica que al presente no es viable extracciones adicionales de agua del acuífero. La AAA es el usuario principal de agua subterránea del Acuífero Superior, operando pozos desde Toa Baja hasta Camuy. En adición a las extracciones indicadas, los municipios no-costaneros de Toa Alta, Florida, Corozal, y Cidra extraen otros 10 mgd de agua del Acuífero Superior, para un total aproximado de 60 mgd.

Figura 17. Extracciones de agua del Acuífero Superior y de fuentes superficiales en los municipios costaneros de la Región del Karso (USGS,2005).

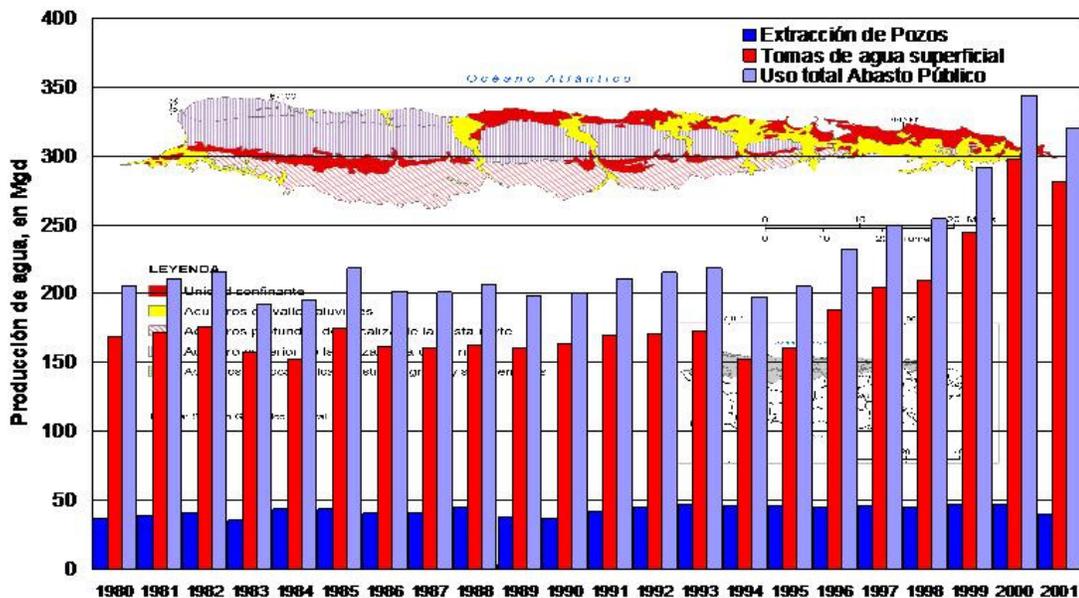


Figura 7. Producción de agua superficial y subterránea para abasto público en la costa norte de Puerto Rico (región solo incluye aquellos pueblos costaneros donde se utilizan ambos recursos).

2. Acuífero Inferior (Artesiano):

- a. El Acuífero Inferior (Profundo o Artesiano) es formado por rocas calizas de las formaciones San Sebastián, Montebello, y Lares, separadas del Acuífero Superior por la capa de rocas calizas impermeables de la Formación Cibao (Monroe, 1980; Renken, 2002). Las zonas productivas del Acuífero Inferior se extienden desde la vecindad de Vega Baja hasta Hatillo. Al oeste de Hatillo este acuífero se extingue o se encuentra a grandes profundidades y las rocas que lo forman son de baja porosidad por lo que su productividad es mínima. La zona de mayor productividad se extiende de este a oeste desde Manatí hasta Barceloneta (Cruce Dávila), y hasta Florida hacia el sur. En la zona del Cruce Dávila radican

un gran número de industrias farmacéuticas que operan pozos profundos (hasta 2,000 pies de profundidad) que extraen agua del acuífero. La calidad del agua del Acuífero Artesiano es excelente, lo que añade valor a este recurso natural.

- b. Los estudios del USGS establecen que la capacidad de producción sustentable del Acuífero Inferior se estima entre 5 a 7 mgd, mientras que al presente se extraen hasta 12 mgd (Gómez, comunicación escrita, 2005, Figura 19). Estos estimados de rendimiento seguro y extracciones se basan 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. Al igual que el Acuífero Superior, el Acuífero Inferior también está siendo minado irrevocablemente, y su condición no mejorará a menos que se reduzcan las extracciones en la zona de recarga, y posiblemente se induzca recarga artificial adicional (Figura 20).

Figura 18. Productividad del Acuífero Inferior (Artesiano) de la Región del Karso (USGS, 2002).

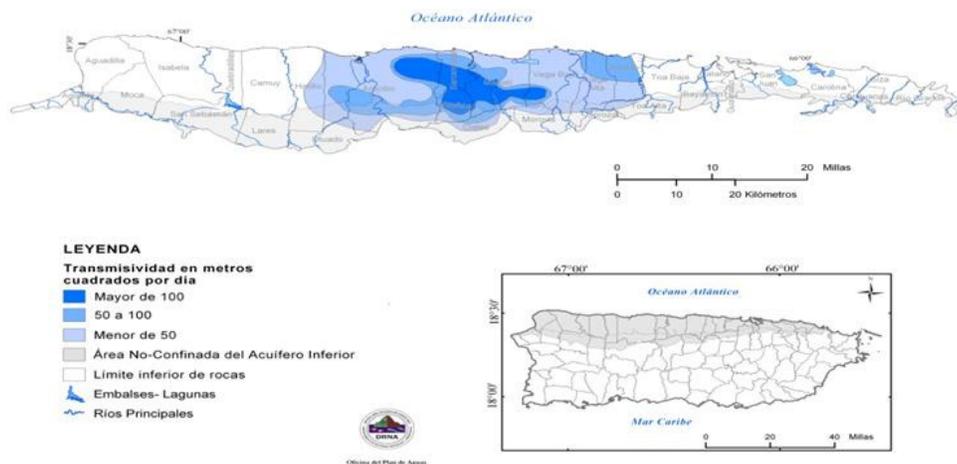


Figura 19. Extracción total, incluyendo estimado de perdidas en camisillas de pozos hincados en la parte confinada del Acuífero Inferior de la Región del Karso de Puerto Rico.

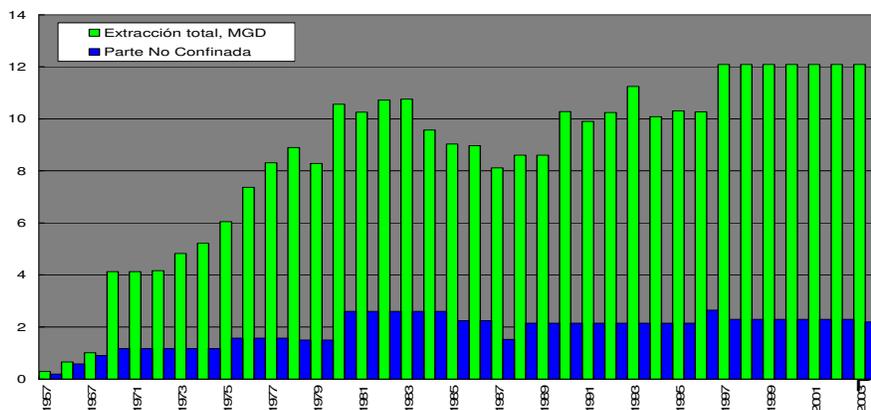
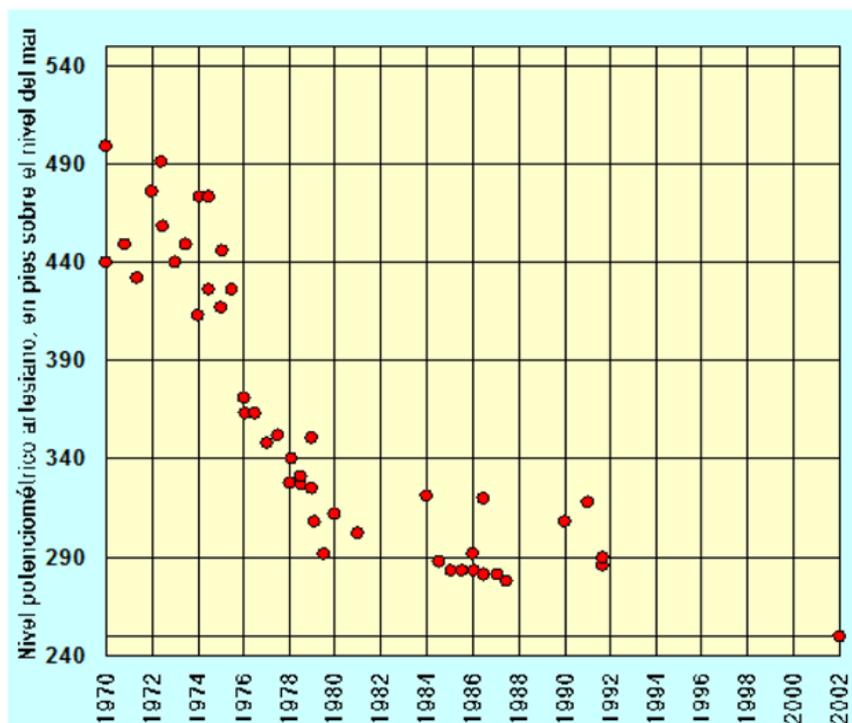


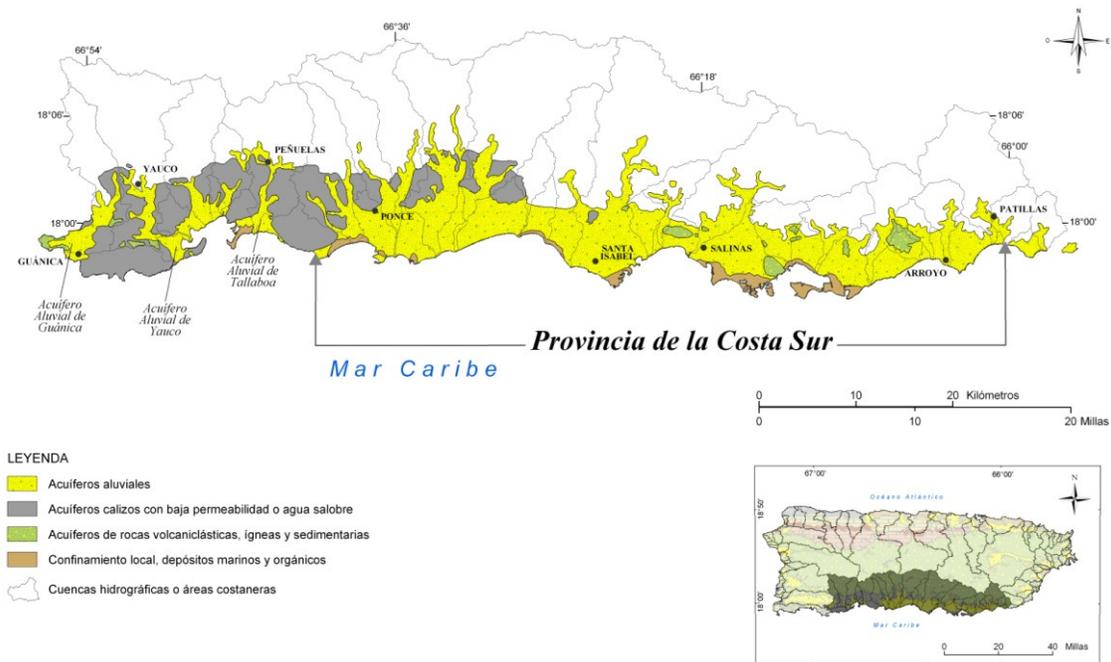
Figura 20. Mermas en el nivel potenciométrico en el Acuífero Inferior.



Acuíferos de la Región Sur:

La Provincia de la Costa Sur incluye una serie de acuíferos aluviales costaneros que se extienden desde Patillas hasta el Valle de Lajas. Estos acuíferos están formados por capas de aluvión (arena, piedra y grava) en una serie de “abanicos” deltaicos que yacen sobre rocas calizas y de origen volcánico. No existe lo que comúnmente se refiere como el “Gran Acuífero del Sur”. Cada valle aluvial forma un acuífero independiente, y las extracciones de agua en un valle no afectan los valles cercanos. Los acuíferos principales se encuentran en los valles aluviales de Patillas a Arroyo; Guayama a Salinas; Coamo; y Juana Díaz a Ponce (Figura 21). Aunque el sector de Patillas a Salinas incluye acuíferos independientes en los valles aluviales de Patillas, Arroyo, Guayama y Salinas, los datos existentes limitan su evaluación individual, y fueron agregados en una sola unidad. Al oeste de Ponce existen tres acuíferos aluviales adicionales menores también independientes: Tallaboa, Yauco y Guánica. En la zona desde Juana Díaz hacia Ponce y hasta Peñuelas, las rocas calizas forman un acuífero de baja productividad, aunque en la parte norte de Peñuelas existen pozos de gran capacidad. En el Valle de Lajas el acuífero no es significativo o contiene agua salina, debido al clima y la geología de la zona.

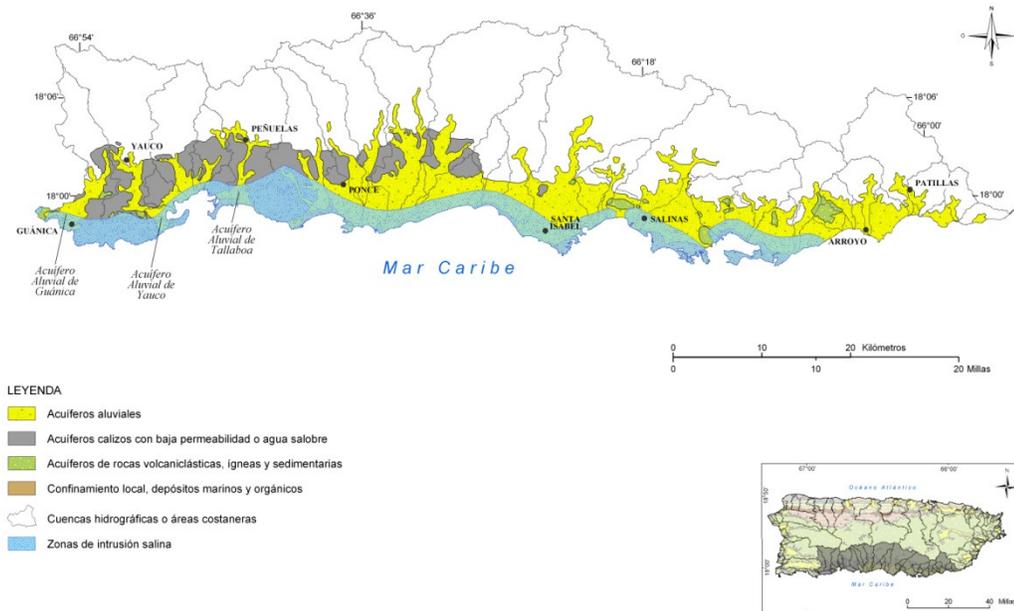
Figura 21. Acuíferos de la Provincia del Sur de Puerto Rico.



Los acuíferos de la Región Sur son una fuente importante de agua para consumo humano y actividades agrícolas, produciendo aproximadamente el 31 % de toda el agua que se utiliza en la zona. En los municipios de Salinas, Santa Isabel, Coamo y Guánica, la fuente principal de agua potable son los acuíferos aluviales. En el 2005, los acuíferos proveyeron 50 mgd de agua en la Provincia de la Costa Sur, de los cuales la AAA extrajo 25 mgd, las fincas agrícolas 23 mgd, y las industrias dos (2) mgd. Sin embargo, al igual que en la Provincia del Norte, los acuíferos de la Región Sur han sido explotados más allá de su capacidad y rendimiento seguro. Extracciones excesivas para riego agrícola de la desaparecida industria de caña de azúcar, así como abastos públicos, han contribuido a que los niveles freáticos en varios sectores de la región (primordialmente entre Santa Isabel a Salinas) se hayan reducido significativamente. Otro factor que ha contribuido a la merma en los niveles freáticos en la zona es el cambio en los sistemas de riego. Anteriormente se regaban los cañaverales y otros cultivos inundando los surcos con agua proveniente de los canales de riego que opera la AEE (canales de Juana Díaz; Guamaní; y Carite). Comenzando en 1980, al eliminarse la caña de azúcar como cultivo principal y sustituirse con vegetales y frutas, se instalaron sistemas de riego por goteo. El riego por goteo consume una fracción del agua que requiere el riego por inundación. El exceso de riego por inundación se infiltraba a los acuíferos ayudando a mantener los niveles freáticos artificialmente elevados. Ahora, aunque las extracciones de agua han disminuido, exceden aún la

recarga natural de los acuíferos y han resultado en depresiones en el nivel freático y intrusión salina en toda la Región Sur (Figura 22).

Figura 22. Intrusión salina en los acuíferos de la Provincia del Sur.



Acuíferos menores interiores y costaneros también ocurren en los valles de Cagüas, Cayey, y Cidra, así como en los valles costaneros de Fajardo, Humacao, Maunabo, Guanajibo, Añasco, y Culebrinas. Estos acuíferos son formados por depósitos llanos de arena y grava (aluvión) depositados por los ríos en cada valle. La capacidad de almacenaje y producción de estos acuíferos es menor en comparación con los acuíferos de las Provincias Norte y Sur. Sin embargo, pozos de relativa alta producción se han hincado en sectores de Cagüas, Gurabo, Cayey, Cidra, Guanajibo, y Aguada, con producciones de hasta 500 galones por minuto. Estos acuíferos contribuyen menos del uno (1) por ciento del abasto público que provee la AAA.

Manantiales:

En Puerto Rico existen cientos de manantiales de agua fresca y salina, primordialmente en la Región del Karso en la Provincia de la Costa Norte, así como en la zona montañosa de la Provincia del Interior. Aunque la mayoría de los manantiales de agua fresca descargan cantidades limitadas de agua subterránea a la superficie, existen manantiales que mantienen un flujo constante significativo. El USGS evaluó en el 1988 los manantiales principales en la Isla (Figura 6.32), concluyendo que el flujo promedio es de aproximadamente 23.5 mgd (Guzmán, 1984). Algunos de estos manantiales son la fuente principal de agua para abasto público a comunidades rurales que operan acueductos de agua potable privados (sistemas “Non-PRASA”).

En la Región del Karso, donde abundan conductos formados por la solución de las rocas calizas, el agua emana de dichos conductos entre mogotes y en los bancos y el fondo de los ríos. Hacia los valles costaneros, cuando la elevación del manto freático en los acuíferos superficiales alcanza la superficie, los manantiales emanan en las lagunas y humedales costaneros. La Laguna Tortuguero (Vega Alta) y el Caño Tiburones (Manatí a Barceloneta) reciben aportaciones significativas de manantiales que emanan del aluvión y los afloramientos de las formaciones calizas de la Región del Karso. Los manantiales de agua fresca principales y su flujo estimado se resumen en la Tabla 2.

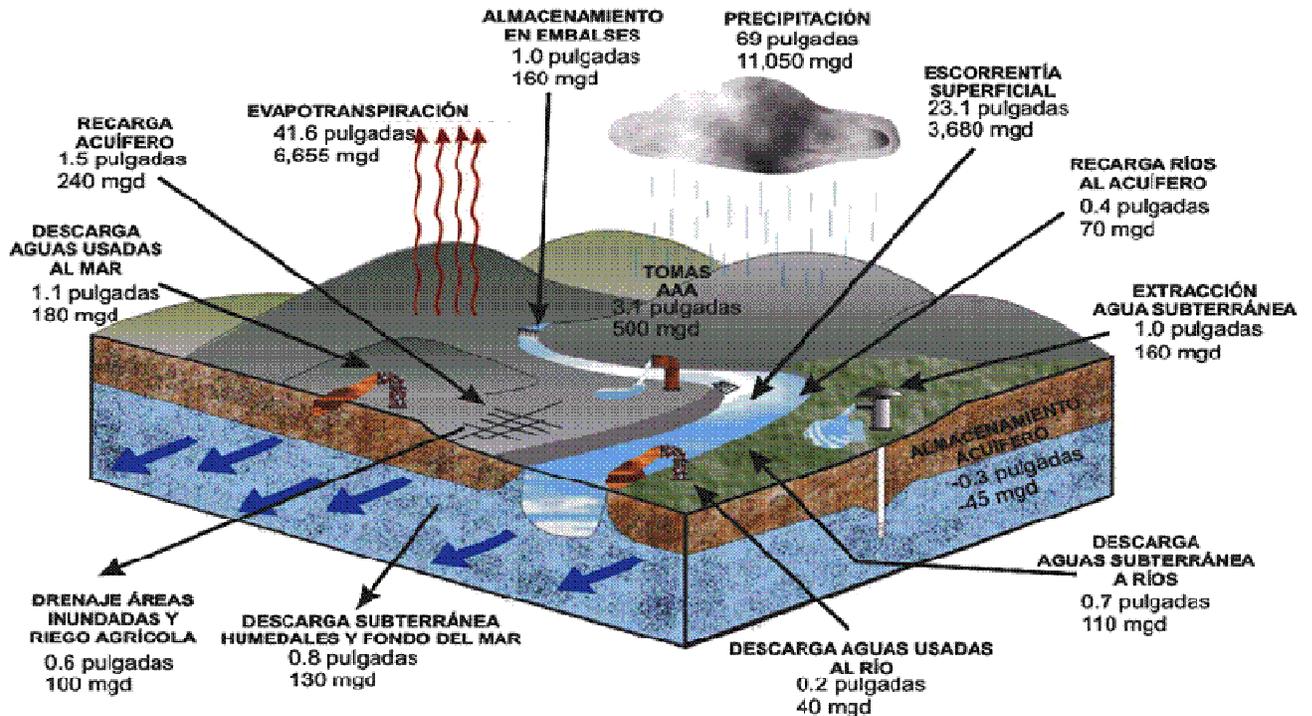
Tabla 2. Rango de flujo de los manantiales principales en Puerto Rico.

Número de Manantial	Nombre de Manantial	Rango de Flujo millones de galones por día (mgd)
1	Ojo de Agua cerca de Aguadilla	0.31-1.3
2	Salto Collazo cerca de San Sebastián	0.19-0.28
3	Zumbadora en los Puertos cerca de Camuy	0.15-0.37
4	Sonadora cerca de Camuy	0.19-1.55
5	Tiburón cerca de Camuy	0.19-0.46
6	San Pedro cerca de Arecibo	2.0-22.6
7	Zanja Fría en Caño Tiburones	4.7-45.2
8	La Cambija en Caño Tiburones	4.8-6.4
9	Ojo de Guillo cerca de Manatí	0.61-1.03
10	Aguas Frías cerca de Ciales	3.4-7.1
11	Represa Sonadora en Ciales	0.10-0.35
12	Ojo de Agua cerca de Morovis	0.12-0.14
13	Ojo de Agua en Vega Baja	0.27-6.08
14	Maguayo ceca de Dorado	0.26-1.1
15	Baños de Coamo cerca de Coamo ¹	0.03-0.08
16	Baños Quintanas cerca de Ponce	0.006-0.02
17	Pozo de la Virgen cerca de Sabana Grande	0-0.006

Ciclo Hidrológico de Puerto Rico

El análisis en las secciones anteriores sobre el clima y las aguas superficiales y subterráneas en Puerto Rico nos permiten estimar el ciclo hidrológico de la Isla. Este ciclo describe gráficamente y numéricamente la distribución física y espacial de los componentes de dicho ciclo, incluyendo: lluvia; evapotranspiración; escorrentía; almacenaje en los acuíferos y embalses; extracciones para agua potable y descargas de aguas sanitarias por la AAA; extracciones para usos agrícolas; descargas naturales al mar; y recargas a los acuíferos por los ríos. El ciclo hidrológico de la Isla en el 2005 se ilustra gráficamente en la Figura 23, donde resaltan la gran cantidad de lluvia, evapotranspiración, y escorrentía en la Isla. El hecho de que ilustra datos del 2005 no difiere significativamente de las condiciones actuales, ya que los parámetros climáticos e hidrológicos no varían estadísticamente en 5 años.

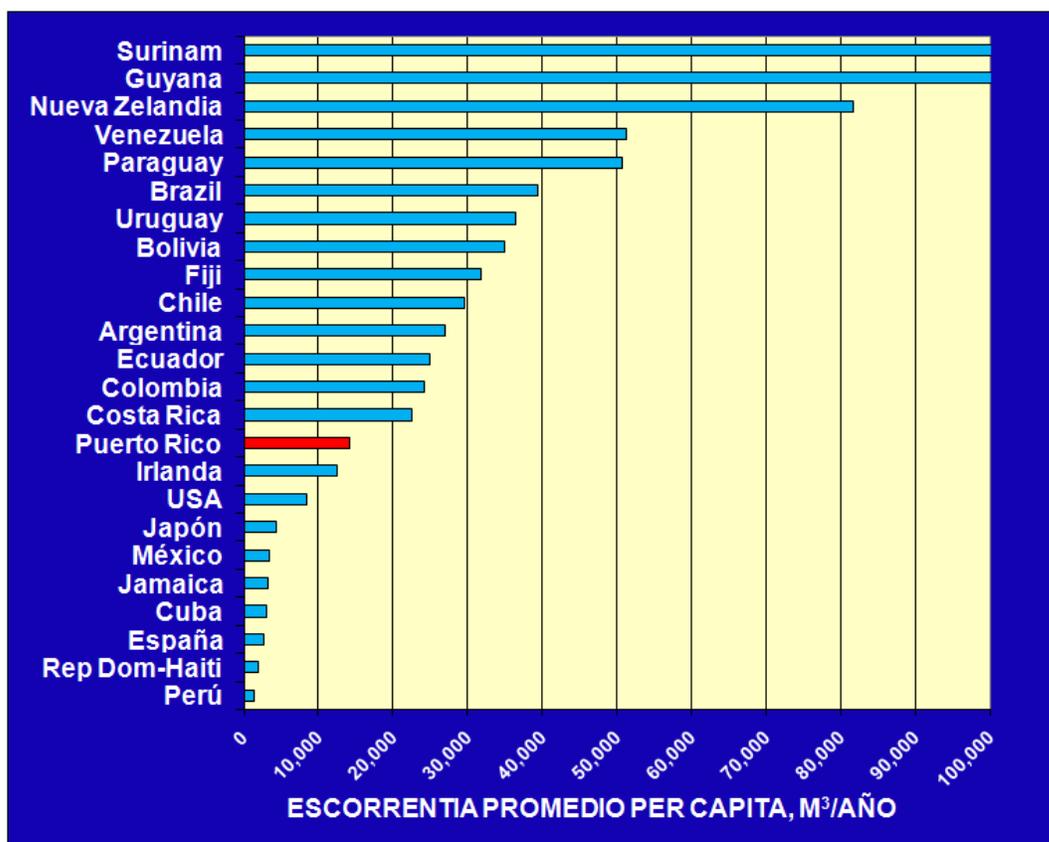
Figura 23. Ciclo hidrológico de Puerto Rico en el 2005.



El disponer de datos hidrológicos abundantes nos permite comparar la escorrentía pluvial en Puerto Rico con otros países en el planeta, particularmente islas y países en el Continente Americano. Existen datos confiables de la cantidad de agua disponible en los países ilustrados en la Figura 24, lo que permite compararlos con Puerto Rico.

Esta comparación es importante debido a que se ha divulgado en la comunidad científica en la Isla la percepción de que el agua es relativamente escasa. Los datos en la Figura 24 permiten concluir que el agua es abundante en Puerto Rico, y que esta abundancia excede el valor per cápita de un gran número de países e islas de importancia. Esta conclusión se documenta con mayor certeza en las secciones siguientes de este informe.

Figura 24. Comparación de la cantidad de agua per cápita en Puerto Rico con islas y otros países en el Continente Americano, Europa y Asia (escorrentía en metros cúbicos por año, M³/año)



Los datos históricos de escorrentía en Puerto Rico (obtenidos de las estaciones del USGS) y la información de extracciones de agua por parte de la AAA, nos permiten llevar a cabo una comparación que sustenta la tesis de la abundancia de agua en la Isla. Los datos de escorrentía promedio anual que fluyó al mar desde cada uno de los ríos principales en la Isla se obtuvieron de las estaciones del USGS. Igualmente, el año de menor flujo promedio anual en cada uno de estos ríos se obtuvo de estas estaciones. Los datos de escorrentía promedio anual y mínima se segregaron representando las estaciones del USGS en las regiones operadas por la AAA. Por ejemplo, la Región Norte-Central incluye la escorrentía que discurre hacia el mar medida en las estaciones en los ríos Arecibo, Manatí, La Plata, Bayamón, Loíza,

Camuy, Guajataca, Fajardo, y Río Piedras. Las extracciones de agua de la AAA en cada uno de estos ríos se obtuvieron de los informes de producción de la agencia para el mes de junio de 2010. Los datos de escorrentía y flujos mínimos se ilustran en la Figura 25 a continuación.

Figura 25. Escorrentía y flujos mínimos en la Región Norte de Puerto Rico.

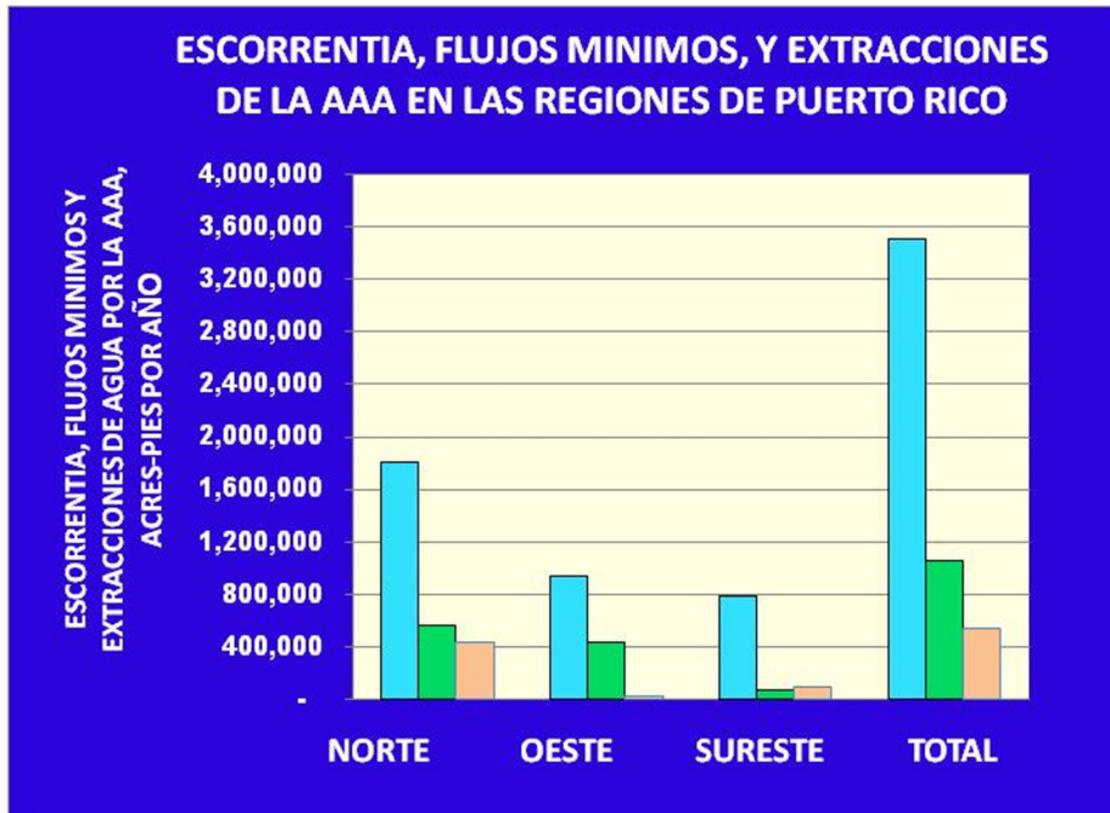


Este proceso se repitió para las regiones oeste y el combinado del sur y este, además de agregarse el total para toda la Isla, como se ilustra en la Figura 26 a continuación. De estos datos se puede concluir lo siguiente:

1. El agua es más abundante en la Región Norte, gracias al mayor número de cuencas y ríos más caudalosos.
2. Aunque la Región oeste incluye solamente tres ríos principales (Culebrinas, Añasco y Guanajibo), la escorrentía es cuantiosa, siendo casi el 50 % que la que descargan los 9 ríos principales de la Región Norte. Las extracciones de agua por parte de la AAA son mayores en la Región Norte y menores en la Región Oeste.
3. Los flujos mínimos de un año son críticos en la Región Sur, y máximos en la Región Norte.

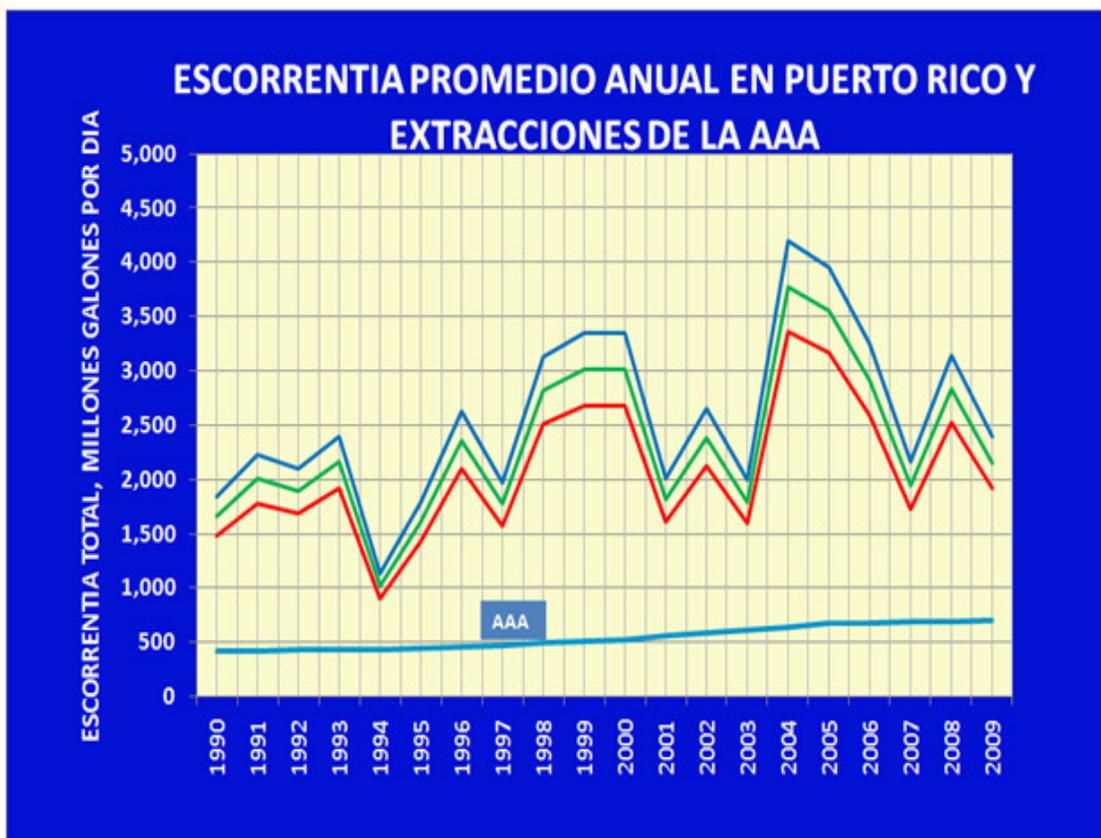
4. La suma de la escorrentía, extracciones y flujos mínimos para toda la Isla demuestra que una cantidad de agua siete veces mayor que las extracciones de la AAA fluyen hacia el mar, mientras que los flujos mínimos en toda la Isla exceden las extracciones de la AAA. Esto se debe en parte a las extracciones del agua almacenada en los embalses de la Isla.

Figura 26. Flujos promedios, mínimos y extracciones por la AAA.



Otra prueba general de la abundancia de escorrentía en la Isla se llevó a cabo comparando los datos de escorrentía total promedio anual ilustrada en la Figura 10 anterior, que presenta los datos de todas las estaciones del USGS en la Isla. Los valores de escorrentía para los años de 1990 al 2009 se redujeron en un 10 % y en un 20 % y se compararon con las extracciones anuales de la AAA informadas en los estudios de cada 5 años sobre uso de agua en la Isla que publica el USGS. Estos datos se ilustran en la Figura 27 siguiente.

Figura 27. Escorrentía promedio anual en Puerto Rico comparada con las extracciones de la AAA incluyendo reducciones de un 10% y 20 % en la escorrentía.



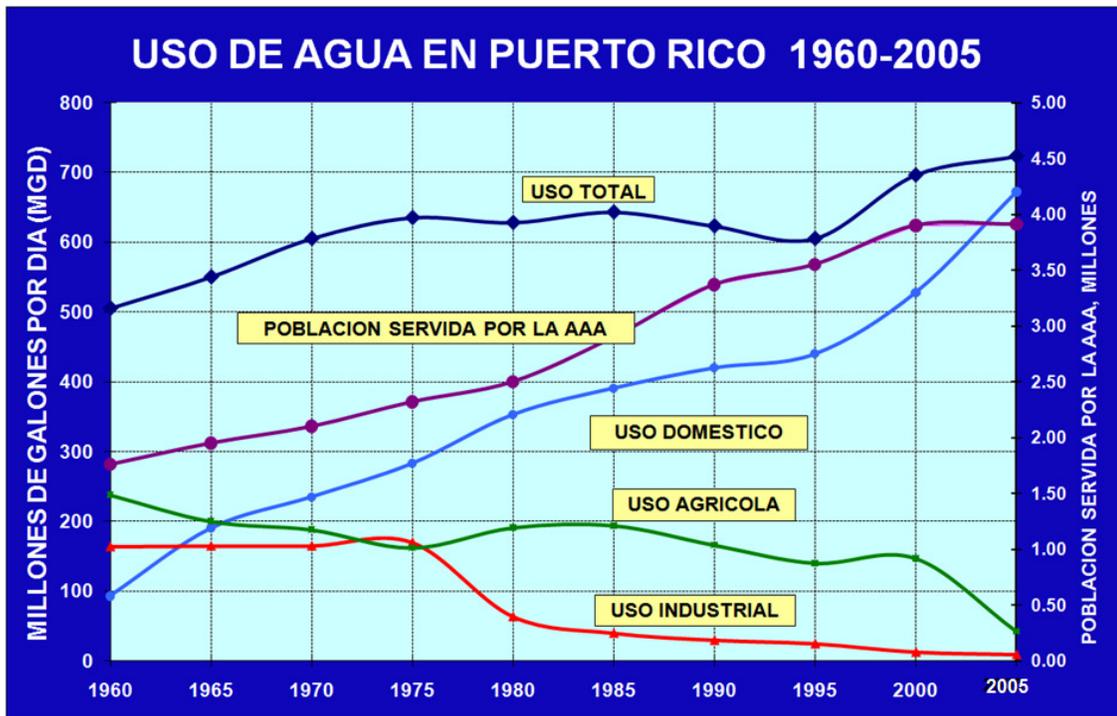
Uso de Agua y Extracciones de la AAA

El USGS mantiene un programa cooperativo con varias agencias del Gobierno de Puerto Rico para determinar la cantidad de agua total que se usa en las actividades principales que utilizan el recurso. Estos usos de agua incluyen las extracciones por la AAA, extracciones para usos agrícolas, y usos industriales. Los datos se publican desde 1960 en informes de cada 5 años e incluyen la cantidad de agua que utiliza la AEE para generación hidroeléctrica, la cual se devuelve a los ríos embalses y no se consume. Los datos de 1960 al 2005 se resumen en la Figura 28 siguiente reflejando las extracciones promedios diarios en millones de galones por día (mgd) por la AAA, el sector agrícola, y las industrias. Además se incluye la población servida agua potable por la AAA. Estos datos reflejan cambios históricos en el uso de agua en la Isla que han ocurrido desde 1960 y permiten concluir lo siguiente:

1. La AAA es el usuario principal de agua en la Isla, extrayendo aproximadamente 625 mgd en el 2005. La extracción para uso doméstico en el 2010 por la AAA es de aproximadamente 638 mgd, mientras que las extracciones totales en la Isla

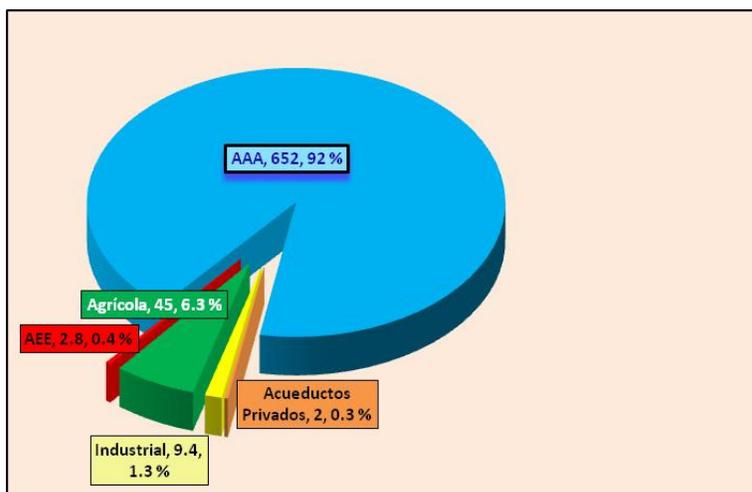
- suman aproximadamente 725 mgd. Estas cantidades incluyen aproximadamente 2 mgd extraídos por acueductos comunitarios operados por residentes.
2. Desde 1960, el número de habitantes servidos por la AAA aumentó de 290,000 a aproximadamente 3.9 millones. Este incremento sustancial se refleja en el aumento de extracciones netas en el mismo periodo de tiempo, de 100 mgd en 1960 a los 638 mgd al presente.
 3. Los usos agrícolas e industriales en la Isla se han reducido marcadamente debido a los cambios operacionales en ambos sectores.
 - a. El riego agrícola alcanzó aproximadamente 200 mgd en el 1985, cuando la industria azucarera comenzó a desaparecer, y al presente se utilizan solamente 50 mgd en toda la Isla para actividades agrícolas.
 - b. Las extracciones para usos industriales se han reducido de un máximo de 175 mgd en 1974 a menos de 15 mgd al presente. Esta reducción obedece primordialmente a la desaparición de las industrias farmacéuticas y agrícolas (refinerías de azúcar) en la década de los 80. Además, el sector industrial reusa una gran parte del agua que extrae, esto para minimizar los efectos de los permisos de descargas industriales requeridos por la JCA y la EPA.

Figura 28. Uso histórico de agua en Puerto Rico por los sectores domésticos (AAA), agrícolas y industriales (USGS, 1960-2005).



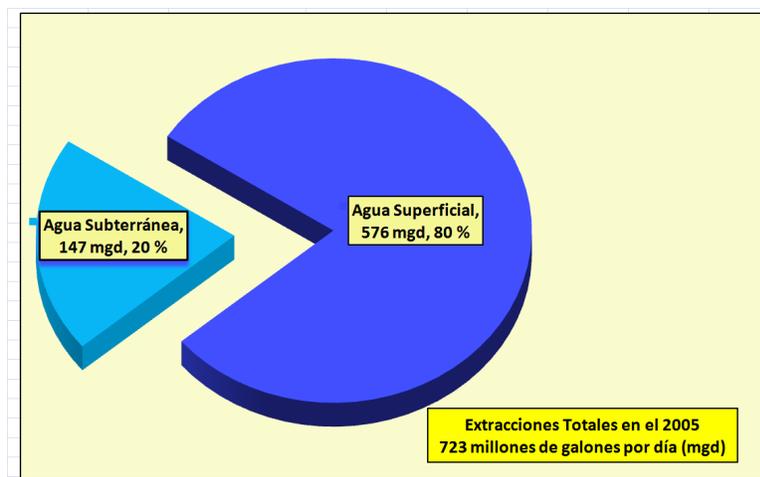
En términos de la proporción de estas extracciones de agua en el 2005 por los sectores indicados, la distribución porcentual era como se ilustra en la Figura 29 a continuación. Estas contribuciones no han cambiado mucho desde entonces hasta el presente, excepto que la AAA ha aumentado sus extracciones en aproximadamente 25 mgd adicionales.

Figura 29. Distribución de las extracciones de agua en Puerto Rico en el 2005.



Los datos del USGS en el 2005 establecían que el agua superficial representaba aproximadamente 576 mgd (el 80 % del total), mientras que las aguas subterráneas suplían aproximadamente 147 mgd, equivalente al 20 % del total (Figura 30). Esta razón entre las extracciones en el 2005 no ha cambiado significativamente. La desalinización es un factor menor en el balance de agua en la Isla, siendo menos de 10 mgd incluyendo las plantas desalinizadoras de la AAA en Culebra (0.1 mgd); la AES en Guayanilla (3 mgd) y la AEE en varios lugares (6 mgd).

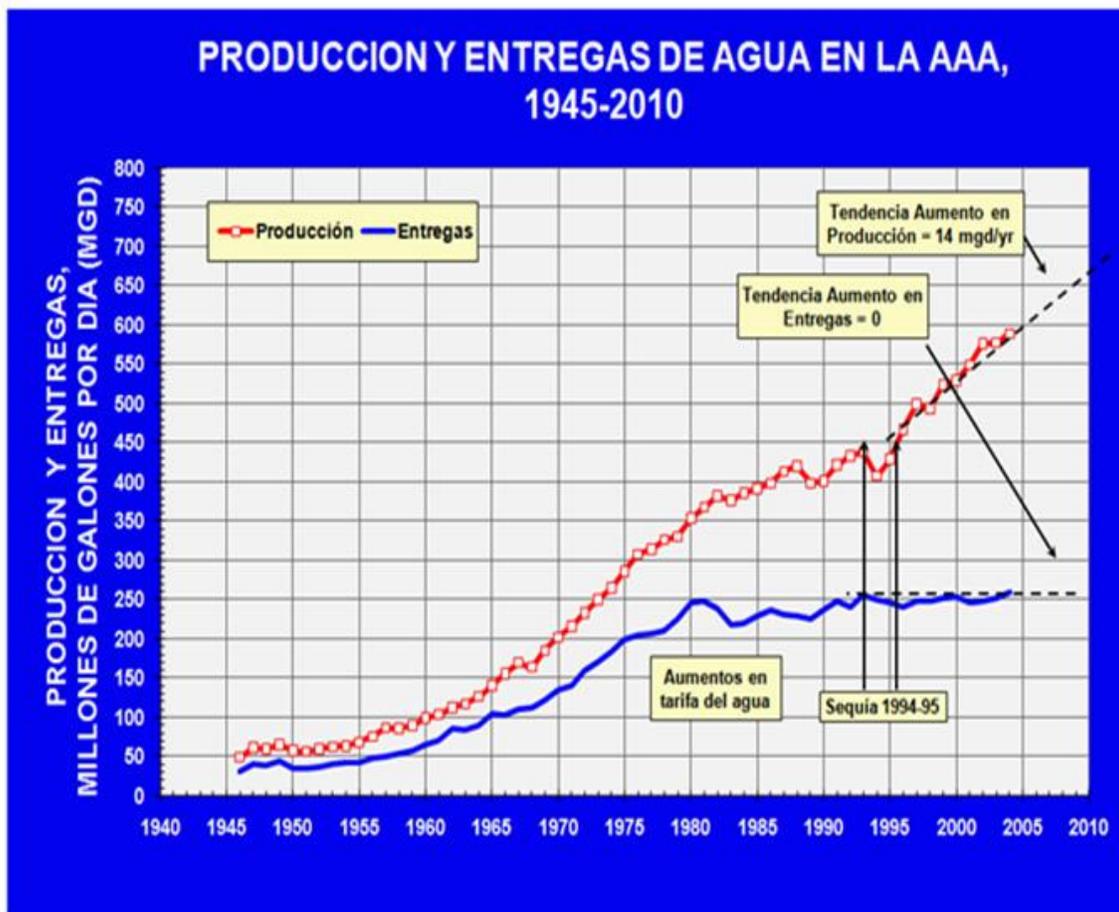
Figura 29. Contribuciones de las aguas superficiales y subterráneas al uso total de agua en Puerto Rico en el 2005 (USGS, 2005).



Las extracciones por parte de la AAA al presente se estiman en aproximadamente 650 mgd, incluyendo aguas superficiales y subterráneas. Uno de los problemas operacionales y gerenciales más importante al que se enfrenta la AAA es la cantidad de agua no-contabilizada en sus sistemas de distribución. Datos históricos de la producción de agua por la AAA comparados con la cantidad facturada establecen que aproximadamente el 63 % del agua no está contabilizada (Figura 30). Esto incluye tres componentes: pérdidas reales por filtraciones, roturas y desbordes; robo del agua; y consumo no-facturado debido a diversos factores. Estudios recientes llevados a cabo por consultores de la AAA sugieren que hasta el 50 % del agua no-contabilizada pudiera deberse al primer factor: pérdidas reales en los sistemas de distribución.

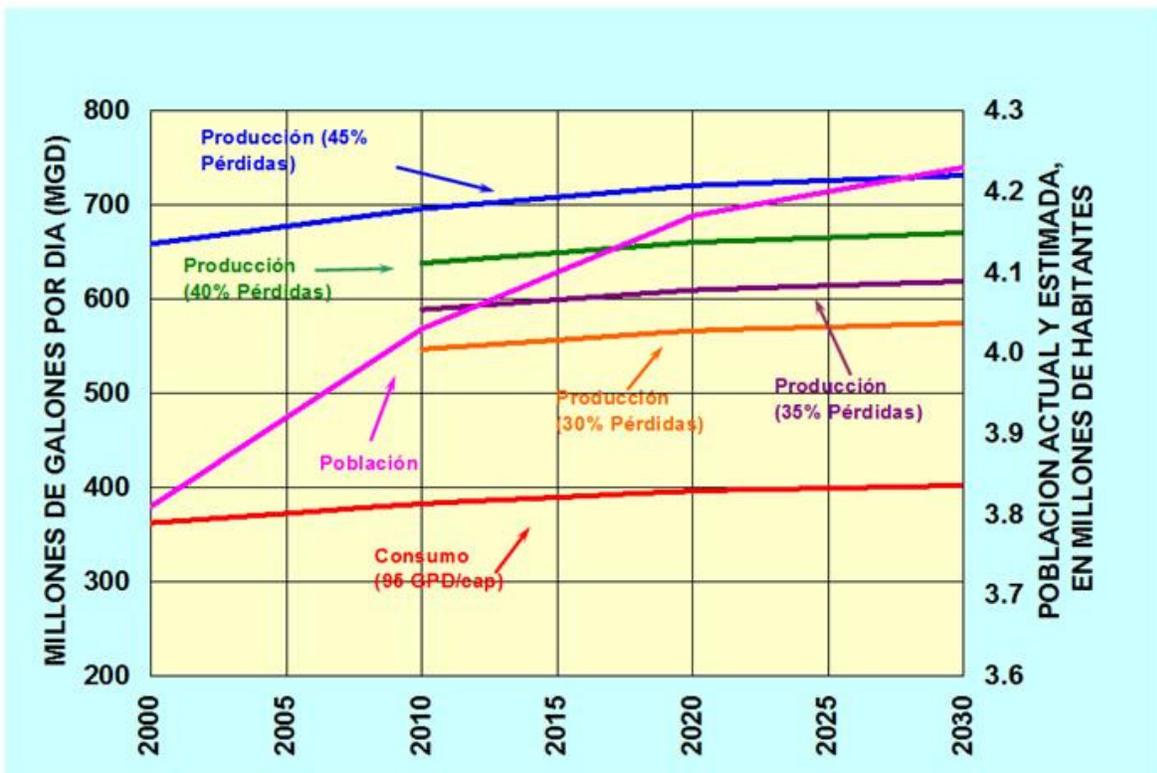
La AAA ha iniciado un programa agresivo para recobrar el máximo del agua no-contabilizada con la meta de reducir en la próxima década este factor a la mitad del valor actual estimado. Varios estudios pilotos para detectar pérdidas se han llevado a cabo en comunidades y urbanizaciones en varios municipios de la Isla. Este programa se intensificará en el próximo año, incluyendo inversiones cuantiosas en infraestructura diseñada para reducir el valor del agua no-contabilizada.

Figura 30. Producción y facturación de agua por la AAA de 1945-2010.



La importancia de implantar un plan agresivo de control de pérdidas en la AAA puede apreciarse mejor mediante las curvas de escenarios variados ilustrados en la Figura 31 a continuación. En esta figura se evalúan escenarios de necesidad de producción de agua potable para distintos niveles de agua no-contabilizada, variando desde 30 % al 45 % (lo que es 18 % menor que el agua no-contabilizada estimada al presente). Una reducción en el agua no-contabilizada al 35 % de la producción resultaría en una economía de hasta 100 mgd, equivalente a toda el agua que produce el Superacueducto de la Costa Norte.

Figura 31. Escenarios de reducción en el agua no-contabilizada en la AAA y necesidad de producción de agua potable.



Uso y Proyecciones de Demanda de Agua en la Agricultura

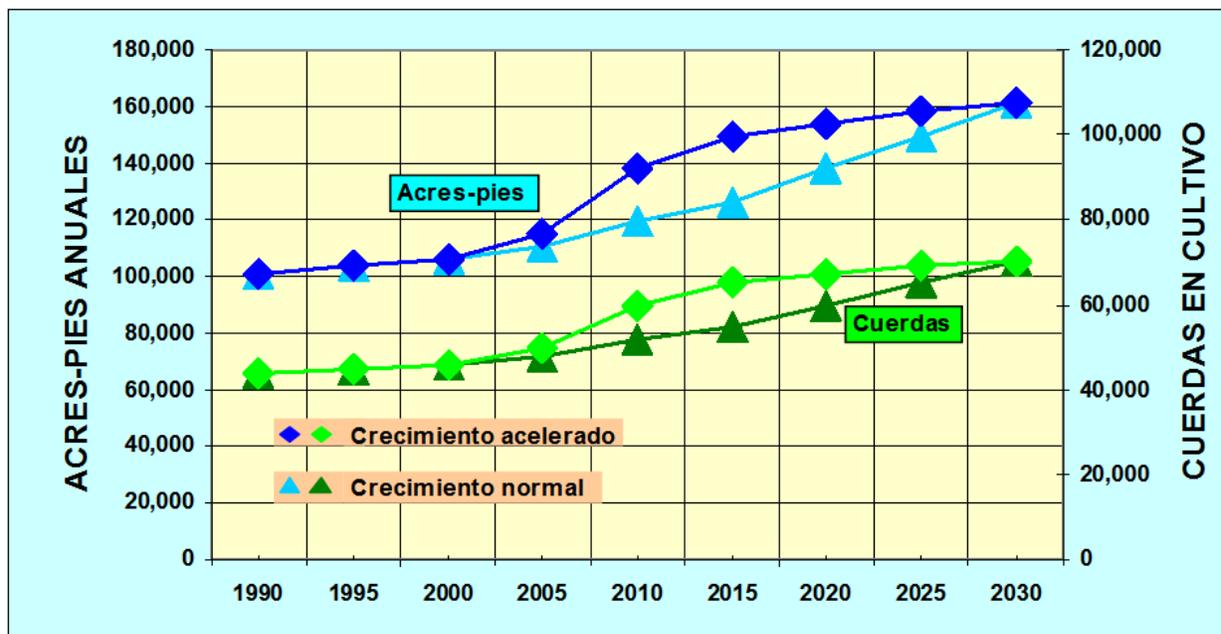
La agricultura es un sector importante de la economía y el bienestar de los Puertorriqueños. Las actividades agrícolas principales en la Isla que consumen agua en cantidades significativas incluyen la producción de frutas, vegetales y farináceos; actividades avícolas; producción de carne de ganado porcino y vacuno, incluyendo cultivos de heno y yerbas alimenticias; producción de leche; y producción de plantas y árboles ornamentales. Los valles aluviales de la Provincia del Sur y el Valle de Lajas son los focos principales de la actividad agrícola en la Isla, con aproximadamente 38,000 cuerdas en cultivos de frutas, vegetales y farináceos (plátanos y guineos). El agua para riego proviene de aguas superficiales de los cinco sistemas de riego operados por la AEE (Canal de Patillas; Canal de Guamaní; Canal de Juana Díaz; Canal de Lajas; y el Canal de Isabela-Aguadilla), y de pozos privados y públicos para uso agrícola. Los sistemas de riego de la AEE se nutren de una serie de embalses en la Cordillera Central que llevan el agua por túneles y canales a las fincas en los valles del sur y al distrito de riego de Isabela a Aguadilla (Figura 32).

Figura 32. Los sistemas de riego de la AEE en Puerto Rico.



El DRNA llevó a cabo en el 2005 un estudio sobre el uso de agua en la agricultura y proyecciones de demandas al 2030. El estudio (llevado a cabo por el Departamento de Ciencias Agrícolas del RUM) determinó el número de cuerdas en producción agrícola en la Isla desde el 1990 hasta el 2004, proyectando luego varios escenarios de aumentos en las cuerdas bajo cultivo. Estos escenarios tomaron en cuenta los planes de desarrollos agrícolas extensos en el Valle de Lajas, el Valle de Culebrinas, y varios sectores en la Región Norte. El RUM utilizó como base el número de cuerdas en cultivo en el 2004 en toda la Isla, estimadas en 45,000 cuerdas. Se proyectaron escenarios de aumentos del número de cuerdas en cultivo hasta el 2030, hasta un máximo de 70,000 cuerdas. La cantidad de agua necesaria para regar las cuerdas que requieran agua adicional a la lluvia de la zona donde ubican se estimó en base a la cantidad de agua utilizada para riego en el 2004, estimada en 105,000 acres-pies anuales. Escenarios agresivos y normales de desarrollo adicional se proyectaron, resultando en una demanda total potencial de agua para riego de 160,000 acres-pies anuales. Estas proyecciones se ilustran en la Figura 33.

Figura 33. Proyecciones de demanda de agua por el sector agrícola al 2030.

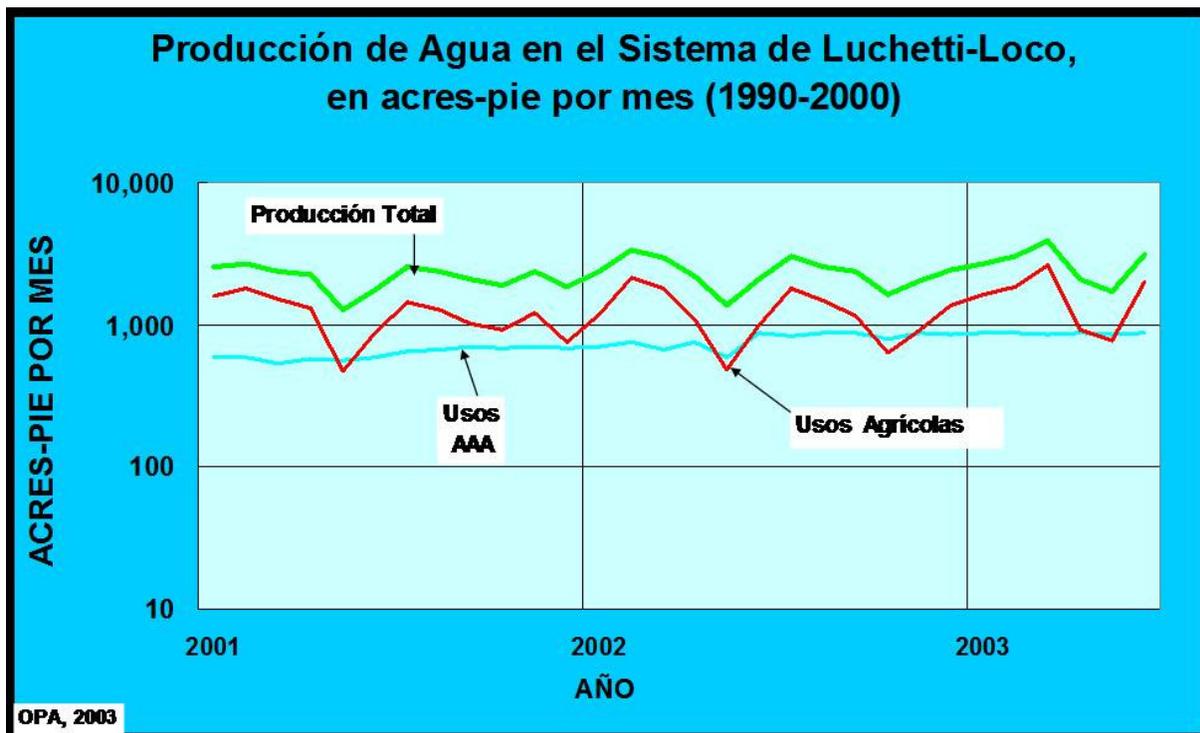


La pregunta lógica es si se dispone de esa cantidad de 160,000 acres-pies anuales de agua de modo que el sector agrícola alcance su desarrollo máximo. Los datos de la AEE, el USGS y la AAA permiten concluir lo siguiente:

1. El desarrollo amplio de la agricultura en el Valle de Lajas no puede llevarse a cabo con el agua disponible en el Sistema de Riego del Canal de Lajas. Sin embargo, estudios del agua que fluye a través del Proyecto del Suroeste que nutre el Canal de Lajas establecen que la mayor parte del agua en dicho sistema se descarga al mar luego de generar electricidad. Estos datos se resumen en la

Figura 34 siguiente, donde se ilustran el agua que fluye desde el Embalse Loco hacia el mar, las extracciones de dicho sistema por la AAA, y el agua que fluye hacia el Valle de Lajas para riego agrícola. Estos datos demuestran que el Proyecto del Suroeste produce agua abundante para los usos futuros potenciales de la agricultura y la AAA (notar que la escala vertical es logarítmica). El promedio anual de agua descargada desde el Embalse Loco hacia el mar es de aproximadamente 90,000 acres-pies anuales, mientras que la agricultura del Valle de Lajas utiliza solamente un promedio de 30,000 acres-pies anuales.

Figura 34. Abastos de agua en el Proyecto del Suroeste y el Valle de Lajas.



Es claro que la utilización del agua que se derrama al mar desde el Embalse Loco requeriría el desarrollo de embalses adicionales para su almacenaje, preferiblemente en el mismo Valle de Lajas. Esta misma situación de derrames de grandes cantidades de agua desde los embalses que nutren el sistema de riego del Valle de Lajas se repite en los proyectos de los canales de Juana Díaz, Patillas, Guamaní, y Guajataca. De modo que podemos concluir que disponemos del agua necesaria para aumentar el riego agrícola sustancialmente, pero no tenemos dónde almacenar el agua.

Calidad de las Aguas Superficiales y Subterráneas en Puerto Rico

La calidad de las aguas superficiales en Puerto Rico varía desde excelente en las zonas montañosas rurales donde no ubican residencias (parques estatales, parques federales, el interior de la Región del Carso, cañones y cimas elevadas), hasta pobre en tramos de quebradas y ríos aguas abajo de zonas urbanas. En el caso de las aguas subterráneas, la calidad es excelente en la mayor parte de los acuíferos, aunque ocurren sectores en las provincias del Norte y del Sur donde el agua está contaminada con químicos industriales y residuos agrícolas y domésticos.

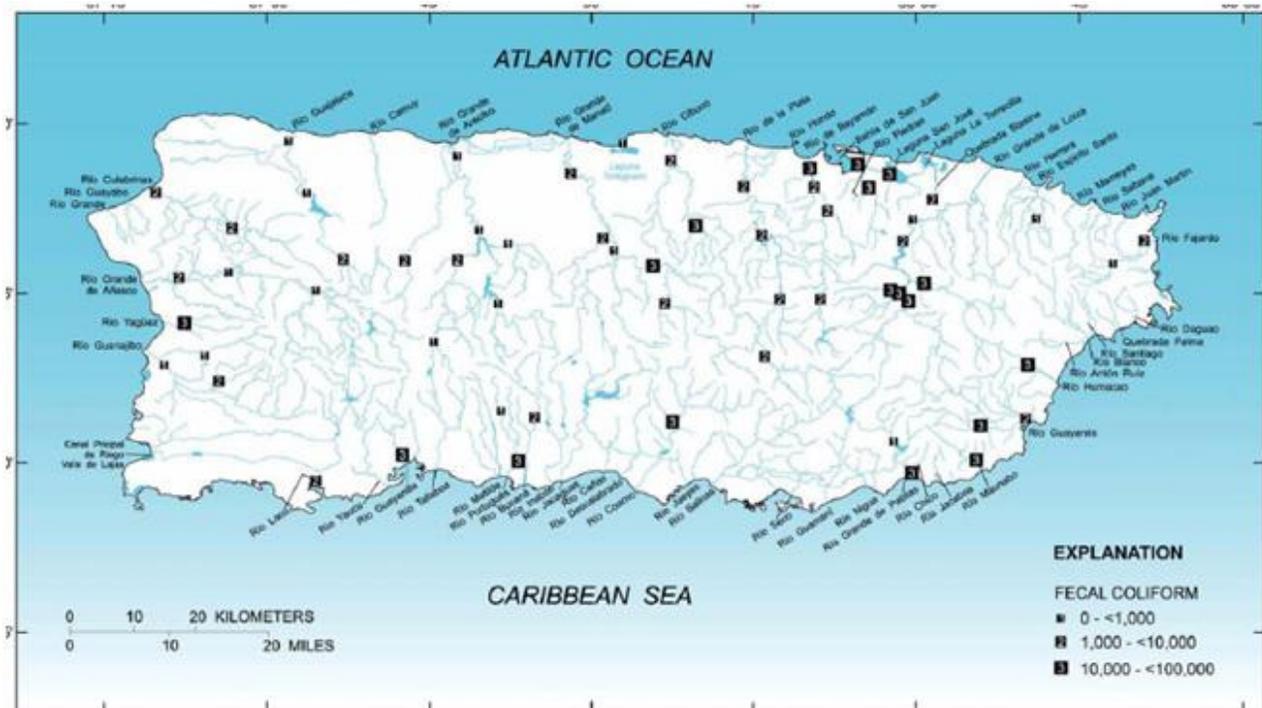
Aguas Superficiales: Las aguas superficiales en Puerto Rico sufren y han sufrido por décadas contaminación bacteriológica de origen fecal proveniente de humanos y animales. Estudios del USGS y la JCA desde 1970 documentan la presencia de concentraciones elevadas de coliformes fecales en la mayor parte de los cuerpos de agua superficiales en la Isla.

1. Hasta 1980 una parte sustancial de estas bacterias provenían de descargas sanitarias parcialmente tratadas descargadas de plantas de tratamiento sanitarias operadas por la AAA. Iniciativas de la AAA y la EPA eliminaron esta fuente de bacterias y ahora las ¿??plantas sanitarias que la AAA opera en la Isla cumplen con los requisitos de la AAA de desinfectar el efluente a los ríos y quebradas.
2. La segunda fuente importante de bacterias fecales son las ganaderías y porquerizas que operan en toda la Isla. Aunque los efluentes de estas actividades ganaderas han mejorado gracias a las iniciativas de la JCA y la EPA, un gran número de charcas de retención de ganaderías y porquerizas descargan a las aguas superficiales efluentes conteniendo altas concentraciones de bacterias, particularmente luego de lluvias e inundaciones.
3. Los pozos sépticos son la tercera fuente importante de material fecal descargada a las aguas superficiales y subterráneas. En el caso de los pozos sépticos sus contribuciones han aumentado, debido a que al presente aproximadamente el 55 % de las residencias y negocios en la Isla utilizan estos sistemas para disponer de las aguas sanitarias. Desafortunadamente, la reglamentación local y federal ha sido inadecuada y en la Isla operan cientos de miles de pozos sépticos inadecuados que son fuentes directas pero dispersas de bacterias y otros contaminantes domésticos a las aguas superficiales y subterráneas

Hasta el 2005 el USGS publicaba resúmenes de las concentraciones de coliformes fecales (FC) en los ríos principales en la Isla. Los datos de las estaciones monitoreadas periódicamente por el USGS y la JCA en el 2005 se resumen en la Figura 36, donde se documentan altas concentraciones de coliformes fecales en la mayor parte de los ríos en la Isla. Es importante apuntar que los procesos de desinfección requerido por la EPA en las plantas de filtración operadas por la AAA

remueve todos los coliformes fecales, virus y otras bacterias normalmente presente en aguas superficiales. Las condiciones actuales (2010) de contaminación fecal en los ríos en la Isla no han mejorado significativamente debido a que las fuentes de bacterias están dispersas en todas las cuencas principales (pozos sépticos y descargas agrícolas). Es prácticamente imposible eliminar todas estas fuentes dispersas, pero es posible con inversiones cuantiosas reducirlas a una fracción del número y efecto actual.

Figura 36. Concentraciones de coliformes fecales en el 2005 en los ríos principales en Puerto Rico (USGS, 2005).



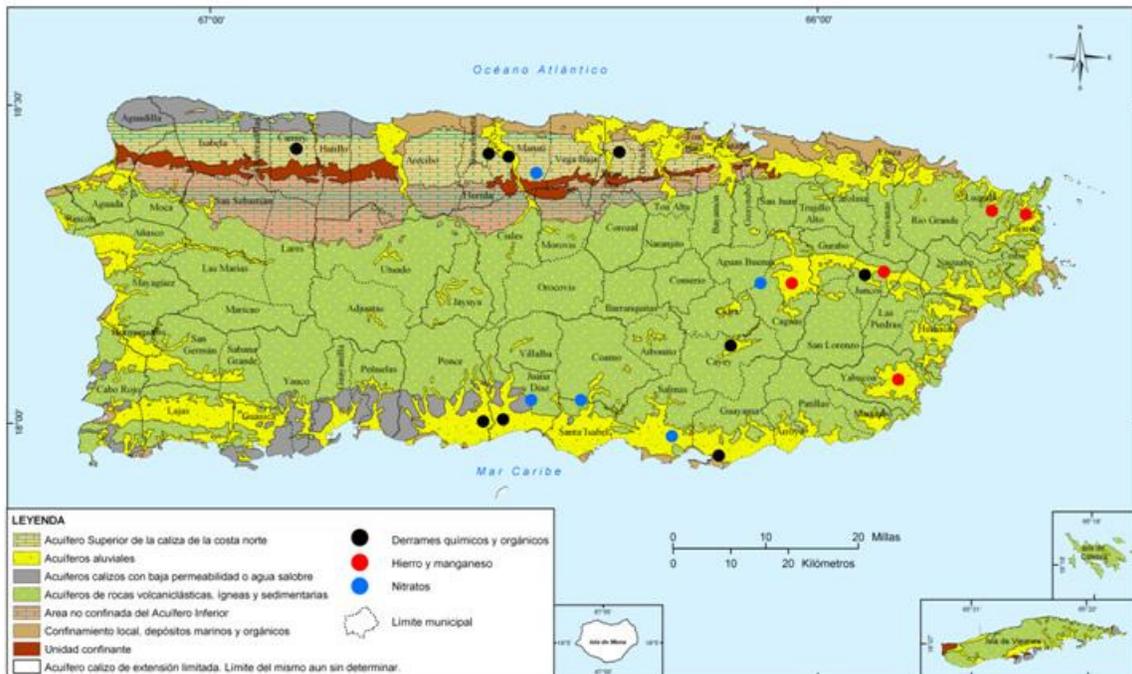
Aguas Subterráneas:

La mayor parte del agua subterránea en Puerto es de calidad excelente y no sufre contaminación significativa. El agua en el Acuífero Inferior (Artesiano) de la Región Norte es de calidad extraordinaria, ya que las capas de arcilla impermeable que separan el acuífero de la superficie y la hidráulica de la zona artesiana impiden la migración de contaminantes a este acuífero. En la mayor parte de las áreas del Acuífero Superior de la Región Norte, y en los acuíferos aluviales de la Región Sur y los valles interiores aluviales (Cagüas-Gurabo; Cayey; Cidra), la calidad del agua es también excelente.

Sin embargo, en todos los acuíferos de la Isla existen bolsillos de contaminación que limitan o impiden la extracción de agua para usos domésticos (Figura 37). En la Región Norte sectores del Acuífero Superior en Vega Alta y Barceloneta fueron contaminados hace tres décadas con compuestos orgánicos (Tetracloruro de Carbono y

Tricloroetileno) derramados accidentalmente por industrias de la zona. Aunque las concentraciones de estos contaminantes son relativamente bajas, los estándares de calidad de la EPA y el Departamento de Salud limitan el uso del agua en estas zonas a actividades industriales y asperjación. En la Región Sur los focos principales de contaminación son los antiguos complejos petroquímicos Fibers (Guayama) y Corco (Peñuelas-Guayanilla), donde una variedad de compuestos orgánicos se derramaron e infiltraron a los acuíferos. Existen focos menores de contaminación con Tricloroetileno en sectores de los acuíferos interiores de Caguas, Cayey y Cidra, debido a derrames industriales en la década del 1980. Los estudios del USGS también han detectado concentraciones elevadas de nitratos y residuos de fertilizantes agrícolas en sectores del Acuífero Superior cerca de Manatí y del Acuífero de Salinas-Santa Isabel cerca de Aguirre.

Figura 37. Focos de contaminación de las aguas subterráneas en Puerto Rico.



Abastos de Agua en la Zona Metropolitana de San Juan y Condición de los Embalses que la Suplen

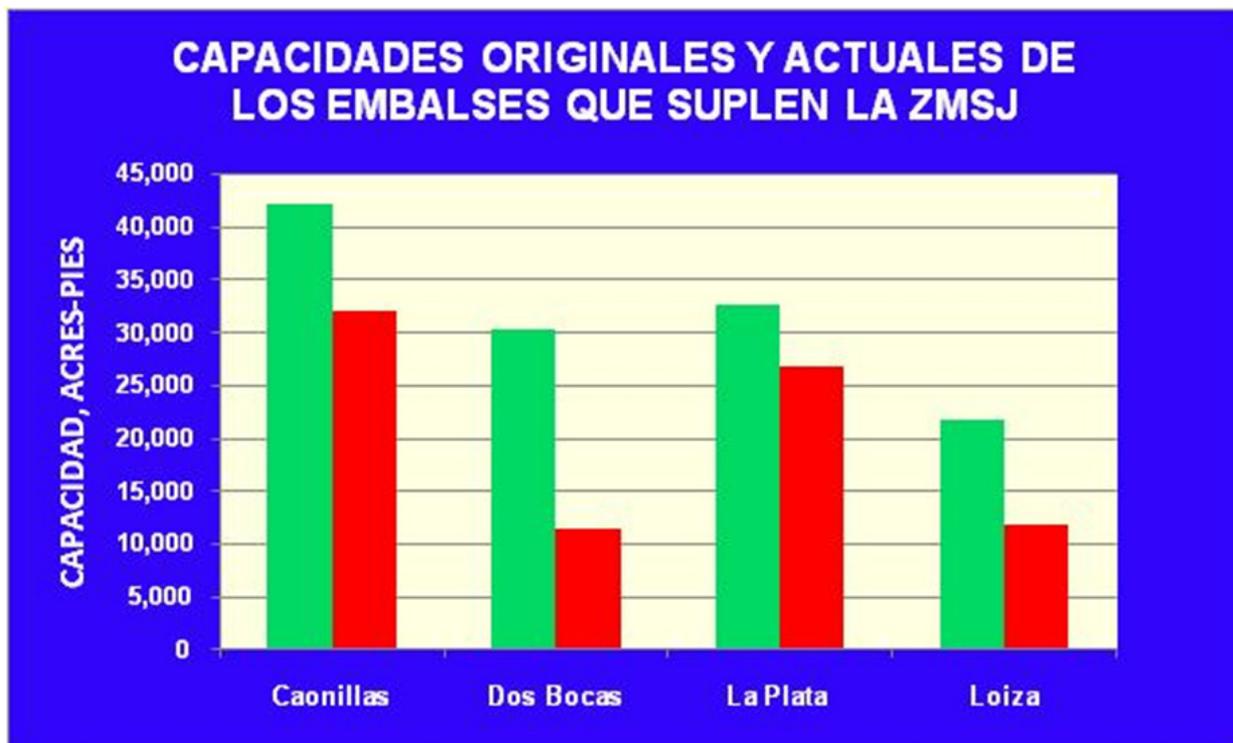
El sistema de producción y distribución de la AAA es la Zona Metropolitana de San Juan (ZMSJ) es el de mayor capacidad y relativa importancia en Puerto Rico. Esto no implica que el resto de los sistemas en otras zonas, municipios y barrios de la Isla no son importantes, sino que en la ZMSJ se supe agua a aproximadamente 1.4 millones de habitantes, a cientos de negocios y comercios, redes de hospitales, y la gama de agencias de gobiernos municipales y el Gobierno Central. El sistema que abastece la ZMSJ se nutre de cuatro embalses principales y dos tomas directamente en ríos al este de Carolina, que contribuyen hasta 285 mgd a la red de tanques, estaciones de bombeo y tuberías del sistema de distribución del agua potable. Estos sistemas se ilustran en la Tabla 3 a continuación, incluyendo algunas de las características de rendimiento seguro de los embalses Dos Bocas, La Plata y Loíza. Además, la Tabla 3 incluye un análisis de la cantidad de agua que estaría disponible en la eventualidad de sequías severas (90 días) y extremas (150 días).

Tabla 3. Fuentes de abasto de agua a la Zona Metropolitana de San Juan.

PLANTA FILTRACION	Fuente de Agua	Producción, mgd	Flujo a ZMSJ, mgd	Rendimiento Seguro, mgd	Producción hacia ZMSJ en Sequía de 90 Días	Producción hacia ZMSJ en Sequía de 150 Días
Santiago Vázquez	Embalses Dos Bocas y Caonillas	100.0	87.0	100.0	75.0	60.0
La Plata	Embalse La Plata	70.0	70.0	64.0	60.0	50.0
Sergio Cuevas	Embalse Loíza	90.0	90.0	65.0	65.0	50.0
Canóvanas Nueva	Río Canóvanas y Canovanillas	5.0	5.0	5.4	4.0	3.0
El Yunque	Río Grande	20.0	20.0	3.2	10.0	5.0
TOTALES		285.0	272.0	237.6	214.0	168.0

En adición a los datos de las fuentes de agua en la Tabla 3, es importante considerar la condición de los tres embalses que suplen la mayor parte del agua a la ZMSJ, esto en términos de su capacidad actual y rendimiento seguro. Esta información se incluyó en la Tabla 1 en la sección de Embalses, mientras que las capacidades iniciales y actuales de los tres embalses se resumen en la Figura 38 a continuación.

Figura 38. Capacidades originales y actuales de los embalses Caonillas, Dos Bocas, La Plata, y Loíza.



Los datos en la Tabla 3 y Figura 38 anteriores nos permiten concluir lo siguiente:

1. Las extracciones de los embalses y tomas que suplen la ZMSJ exceden el rendimiento seguro de estos sistemas. Esto es posible debido a que una gran parte del tiempo la extracción de agua proviene de la escorrentía excesiva representada por las frecuencias de flujos altos. Durante sequías moderadas, el agua almacenada en los embalses es adecuada para satisfacer las demandas del sistema.
2. Durante una sequía general severa en las cuencas de la Región Norte-Central (de hasta 90 días sin lluvia), la producción de los sistemas que suplen a la ZMSJ podría reducirse hasta 214 mgd, o aproximadamente el 75 % de la producción promedio actual. Esta cantidad de agua debería ser suficiente para satisfacer las demandas de la ZMSJ sujeto a reducciones en las presiones en los sistemas de distribución.
3. En la eventualidad de una sequía extrema de hasta 150 días sin lluvia en la Región Norte-Central (similar a las de 1967 y 1994), el abasto de agua a la ZMSJ podría reducirse hasta un mínimo de 168 mgd. Esta cantidad de agua, (tomando en cuenta las pérdidas no-contabilizadas de más de la mitad del agua producida) sería insuficiente para satisfacer las demandas básicas de la ZMSJ.
4. Los datos de la Figura 34 apuntan a la condición crítica de pérdida de capacidad de los dos embalses principales que suplen la ZMSJ (Dos Bocas y Loíza). La

sedimentación acelerada de estos embalses requerirá un programa agresivo para restituir al máximo su capacidad y rendimiento seguro. El dragado de ambos embalses costaría aproximadamente \$350 millones, fondos que no están disponibles. La AAA y la AEE han adoptado en principio un plan para iniciar el dragado “a perpetuidad” de ambos embalses, diseñado para extraer anualmente una cantidad de sedimentos un poco mayor que la que reciben. Esta estrategia resultará en aumentar en pasos la capacidad de los embalses dentro de los recursos económicos disponibles anualmente a ambas agencias.

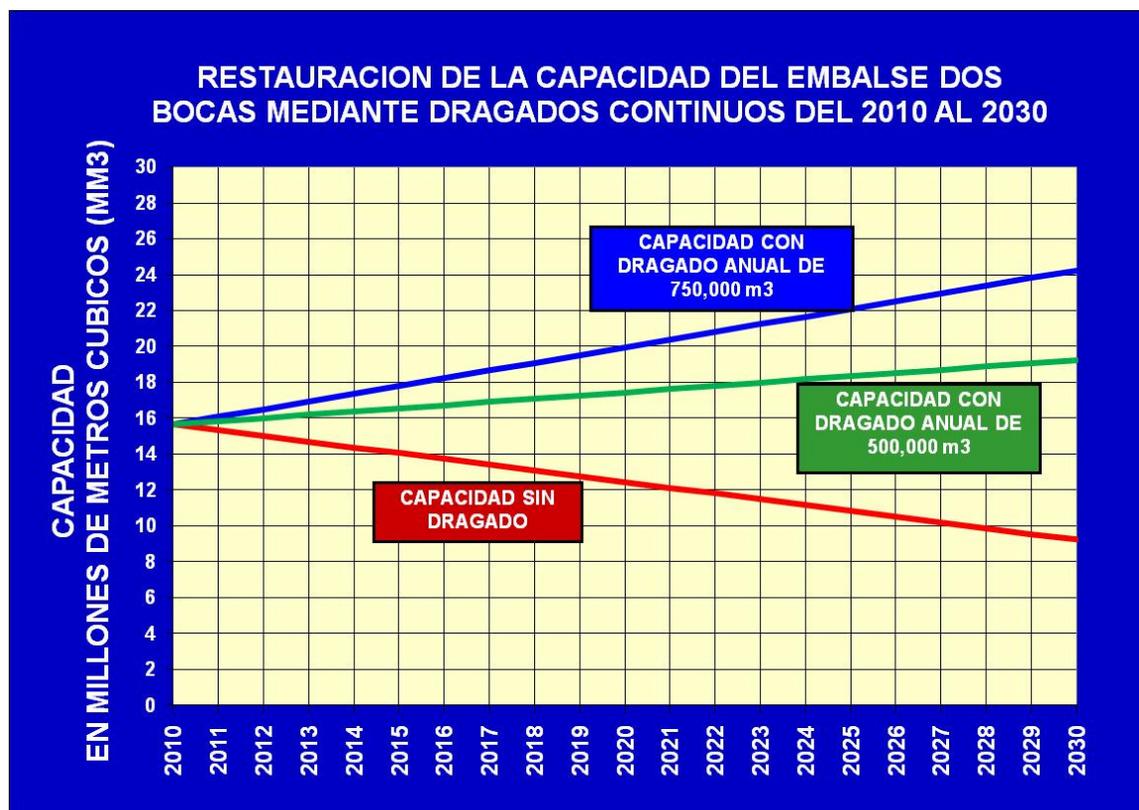
Estrategias e Iniciativas para la Conservación de los Recursos de Agua de Puerto Rico

Existen oportunidades reales para mejorar las condiciones de las fuentes de agua en Puerto Rico de modo que las generaciones futuras puedan disfrutar de agua limpia, abundante y segura, tal como ocurre al presente. Estas oportunidades requieren compromisos programáticos y económicos por parte de varias agencias locales, incluyendo principalmente a la AAA, la AEE, y el DRNA. Es claro que las limitaciones económicas que sufren estas agencias requerirán asignaciones legislativas que provean los fondos necesarios para llevar a cabo la mayor parte de los proyectos requeridos. Aún el programa de Alianzas Público Privadas (APP), que promete estimular inversiones privadas en programas de infraestructura de agua, requerirá inversiones sustanciales por parte de las agencias antes indicadas. Además, la viabilidad de muchas de varias de estas iniciativas depende de reducciones en la cantidad de agua no-contabilizada en los sistemas de la AAA. En teoría, al reducirse las pérdidas en los sistemas de distribución de la AAA, el agua “recobrada” puede dirigirse a actividades que sustituyan fuentes críticas tales como aguas subterráneas y flujos mínimos.

En orden de prioridad, los siguientes son algunos proyectos que podrían iniciarse de inmediato para la conservación de las fuentes de agua en la Isla, ya sea a través de las APP, o individualmente por las agencias:

- 1. Restauración de los Embalses:** Como apuntamos antes, los embalses son la infraestructura de agua más importante en Puerto Rico, proveyendo hasta el 68 % del agua que produce la AAA. Es urgente iniciar la restauración de la capacidad de varios de los embalses mediante dragados enfocados a aquellos que han perdido una gran parte de su capacidad y que son críticos a sistemas de acueductos. Los embalses Loíza, Dos Bocas, y Lucchetti deben ser prioritarios, debido a su importancia para la ZMSJ (Loíza y Dos Bocas) y el Valle de Lajas (Lucchetti). Esto debe llevarse a cabo mediante un “dragado a perpetuidad” a través de una APP en un plazo de 20 años, con la meta de restituir su capacidad al 90 % de la inicial. La estrategia propuesta para el Embalse Dos Bocas se ilustra en la Figura 39.

Figura 39. Proyecciones de ganancia en la capacidad del Embalse Dos Bocas mediante dragados continuos.



- 2. Restauración de los Acuíferos de las Provincias del Norte y Sur:** La condición de los acuíferos en las regiones del Norte y Sur es crítica, sufriendo sobre-explotación que ha reducido significativamente el almacenaje de agua y los niveles freáticos. En el Acuífero Superior (Llano) de la Región Norte y los acuíferos aluviales de la Región Sur, la merma en niveles freáticos ha inducido intrusión salina que ha resultado en el cierre de cientos de pozos. El Acuífero Inferior (Artesiano) de la Región Norte es también sobre-explotado y sus niveles potenciométricos continúan reduciéndose aceleradamente. Es posible a largo plazo restaurar estos acuíferos a un equilibrio dinámico que permita su aprovechamiento máximo y conservación mediante las siguientes iniciativas:
- a. El desarrollo e implantación de modelos matemáticos gerenciales que el DRNA y la AAA puedan utilizar día a día para manejar y operar los pozos en los acuíferos.
 - b. Reducciones en las extracciones de agua de estos acuíferos hasta que la recarga sea igual o mayor que las extracciones. Los modelos gerenciales proveerían guías para estas normas operacionales.
 - c. Desarrollo de proyectos de recarga de sectores de los acuíferos en el Norte y Sur. Existen oportunidades de reusar aguas sanitarias tratadas a

nivel terciario y escorrentía pluvial excesiva almacenada en reservas en los valles costaneros de ambas regiones.

- d. Desarrollo de un programa agresivo de reparación y sustitución de una serie de pozos en el Acuífero Inferior (Artesiano) de la Región Norte que filtran grandes cantidades de agua de la zona artesiana a la zona salada del Acuífero Superior.
3. **Restauración de Flujos Ambientales (Mínimos):** Las extracciones de agua para usos variados exceden a menudo la cantidad máxima que garantice un flujo mínimo necesario para la vida acuática. Es necesario sustituir fuentes de agua en estos sistemas, o desarrollar almacenamientos moderados que permitan mantener estos flujos mínimos en la época de sequía.

Conclusiones y Recomendaciones

- El agua es abundante en Puerto Rico
- La copiosa lluvia genera suficiente escorrentía e infiltración para satisfacer a largo plazo la mayor parte del tiempo las demandas de agua para todos los usos culturales y ambientales
- El manejo de los recursos de agua en la Isla ha sido una tragedia
- Existen oportunidades reales de mejorar la condición de los recursos de agua y su manejo y conservación

Curriculum Vitae

Ferdinand Quiñones, P.E. fquinon@msn.com 615-509-4078
P.O. Box 3387, Brentwood, TN 37024-3387

Educación:

- BS, Ingeniería Química, Recinto Universitario de Mayagüez, 1965.
- Masters Ingeniería Ambiental, Universidad de Florida en Gainesville, 1974.
- Candidato Doctoral en Ingeniería Ambiental, Vanderbilt University, Nashville, Tennessee, 1988-90.
- Ingeniero Licenciado Profesional (P.E.) certificado en Tennessee y Puerto Rico.

Experiencia Profesional en Recursos de Agua e Ingeniería Ambiental:

- **1968-94**, Hidrólogo en la División de Recursos de Agua del U.S. Geological Survey (USGS), incluyendo asignaciones en Puerto Rico, Kentucky, y Tennessee. Director del Distrito del Caribe del USGS en Puerto Rico (1981-86) y del Distrito del USGS en Tennessee (1987-94), responsable de proveer liderato científico a hidrólogos y científicos ambientales en investigaciones sobre los recursos de agua.
- **1994-presente**, Consultor independiente especializado en Recursos de Agua e Ingeniería Ambiental, enfocado en la preparación de documentos ambientales y planes estratégicos de proyectos de infraestructura pública y privada en Puerto Rico. Estas experiencias incluyen:

Afiliaciones Profesionales

- Anterior miembro de la Academia de Artes y Ciencias de Puerto Rico; pasado presidente y fundador de la Asociación de Recursos de Agua de Puerto Rico (1983-85); fundador y pasado presidente de la Asociación de Recursos de Agua de Tennessee (1992-1993); delegado en 1993 de la Región Sureste a la Asociación Americana de Recursos de Agua (AWRA); premio nacional como Ingeniero Federal del Año 1985 de la Sociedad Nacional de Ingenieros Profesionales.
- Autor de aproximadamente 100 papeles y artículos sobre recursos de agua y ambiente en Puerto Rico, Kentucky, y Tennessee.

Referencias

- Adams, B.D., and Hefner, J.M., 1999, Humedales (translated in Spanish by Teresa Dopazo): U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2425, 6 p.
- Adolphson, D.G., Seijo, M.A., and Robison, T.M., 1977, Water resources of the Maunabo Valley, Puerto Rico: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 115-76, 38 p.
- Anders, R.B., 1968, Reconnaissance of the water resources of the Central Guanajibo Valley, Cabo Rojo, Puerto Rico: U.S. Geological Survey Open-File Report (unnumbered), 15 p.
- Anderson, H.R., 1977, Ground water in the Lajas Valley, Puerto Rico: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 76-68, 46 p.
- Arnow, 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.
- Barnes, H.H., Jr., and Bogart, D.B., 1961, Floods of September 6, 1960, in eastern Puerto Rico: U.S. Geological Survey Circular 451, 13 p.
- Bennett, G.D., and Giusti, E.V., 1972, Ground water in the Tortuguero area, Puerto Rico - As related to proposed harbor construction: U.S. Geological Survey Water-Resources Bulletin 10, 25 p.
- 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.
- Cobb, E.D., 1978, Estimates of 7-day, 10-year minimum flows at selected stream sites in Puerto Rico: U.S. Geological Survey Open-File Report 78-583, 47 p.
- Colón-Dieppa, Eloy, and Mansue, L.J., 1976, Water resources of the proposed copper mining area, Puerto Rico, 1958-74 (2 Parts): U.S. Geological Survey Open-File Report 76-1 and 76-2, 414 p.

Colón-Dieppa, Eloy, and Quiñones-Aponte, Vicente, 1985, Estimates of 7-day, 10-year low flow at ungaged streams in Puerto Rico: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 84-4089, 1 sheet.

Colón-Dieppa, Eloy, and Quiñones-Márquez, Ferdinand, 1985, A reconnaissance of the water resources of the Central Guanajibo Valley, Puerto Rico: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 82-4050, 47 p.

Colón-Dieppa, Eloy, and Torres-Sierra, Heriberto, 1991, Puerto Rico floods and droughts - National Water Summary 1988-89: U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2375, p. 475-482.

Colón, José A., 1977, Geovisión de Puerto Rico. Editorial Universitaria, Universidad de Puerto Rico en Río Piedras, Puerto Rico.

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, 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.

Crooks, J.W., Grossman, I.G., and Bogart, D.B., 1968, Water resources of the Guayanilla-Yauco area, Puerto Rico: U.S. Geological Survey Water-Resources Bulletin 5, 55 p., 7 pls.

Díaz, J.R., 1979, Seawater intrusion, south coast of Puerto Rico, 1966-77: U.S. Geological Survey Open-File Report 79-1334, 20 p.

Díaz, J.R., and Jordan, D.G., 1987, Water resources of the Río Grande de Añasco - lower Valley, Puerto Rico: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 85-4237, 48 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.

Ellis, S.R., 1976, History of dredging and filling of lagoons in the San Juan area, Puerto Rico: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 38-76, 25 p., 4 pls.

Ellis, S.R., and Gómez-Gómez, Fernando, 1975, Water-quality and hydraulic data, San Juan lagoon system, Puerto Rico: U.S. Geological Survey Open-File Report 75-2, 142 p.

Ellis, S.R., and Gómez-Gómez, Fernando, 1976, Hydrologic characteristics of lagoons at San Juan, Puerto Rico, during a January 1974 tidal cycle: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 38-75, 45 p.

Ewel, J.J. y J.L. Whitmore, 1973. The Ecological Life Zones of Puerto Rico and the U.S. Virgin Islands. Institute of Tropical Forestry, Forest Service, U.S. Department of Agriculture, Rio Piedras, Puerto Rico.

Fields, F.K., 1971, Floods in the Añasco area, Puerto Rico: U.S. Geological Survey Hydrologic Investigations Atlas HA-375, 1 sheet.

Fields, F.K., 1971, Floods in the Yabucoa area, Puerto Rico: U.S. Geological Survey Hydrologic Investigations Atlas HA-382, 1 sheet.

Fields, F.K., 1971, Floods in the Guayanilla-Yauco area, Puerto Rico: U.S. Geological Survey Hydrologic Investigations Atlas HA-414, 1 sheet.

Fields, F.K., 1972, Floods at Caguas, Gurabo, Juncos, and San Lorenzo, Puerto Rico: U.S. Geological Survey Hydrologic Investigations Atlas HA-438, 1 sheet.

Fields, F.K., and Jordan, D.G., 1972, Storm-wave swash along the north coast of Puerto Rico: U.S. Geological Survey Hydrologic Investigations Atlas HA-430, 2 sheets.

Figueroa-Alamo, Carlos, 1991, Sedimentation survey of Lago Toa Vaca, Puerto Rico, July 1985: U.S. Geological Survey Open-File Report 90-199, 9 p.

Gellis, A.C., Webb, R.M.T., Wolfe, W.J., and McIntyre, C.I., 1999, Effects of land use on upland erosion, sediment transport, and reservoir sedimentation, Lago Loíza basin, Puerto Rico: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 99-4010, 60 p., 1 pl.

Gellis, Allen, 1993, The effect of Hurricane Hugo on suspended-sediment loads Lago Loíza basin, Puerto Rico: Earth Surface Process and Landforms, v. 18, p. 505-517.

Giusti, E.V., 1968, Water resources of the Juana Díaz area, Puerto Rico - A preliminary appraisal, 1966: U.S. Geological Survey Water- Resources Bulletin 8, 43 p.

Giusti, E.V., 1971, Water resources of the Coamo area, Puerto Rico: U.S. Geological Survey Water-Resources Bulletin 9, 31 p.

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

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.

Giusti, E.V., and López, M.A., 1967, Climate and streamflow of Puerto Rico: Caribbean Journal of Science, September-December 1967, v. 7, no. 3-4, p. 87-93.

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, 1997, Hurricane Hortense: Impact on ground water in Puerto Rico: U.S. Geological Survey Fact Sheet 012-97, 2 p.

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 Ellis, S.R., 1983, Hydrologic characteristics of lagoons at San Juan, Puerto Rico, during an October 1974 tidal cycle: U.S. Geological Survey Open-File Report 82-349, 34 p.

Gómez-Gómez, Fernando, Rodríguez-Martínez, Jesús, Santiago-Rivera, Luis, Oliveras-Feliciano, M.L., and Conde-Costas, Carlos, 2001, Surface-water, water-quality, and ground-water assessment of the municipio of Caguas, Puerto Rico, 1997-99: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 00-4280, 42 p., 2 pls.

Graves, R.P., 1989, Water resources of the Humacao-Naguabo area, eastern Puerto Rico: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 87-4088, 69 p.

Graves, R.P., 1991, Ground-water resources in Lajas Valley, Puerto Rico: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 89-4182, 55 p.

Grossman, I.G., 1961, Ground-water conditions in the lower Tallaboa Valley, Puerto Rico: Geological Survey Research 1961, in Short Papers in the Geologic and Hydrologic Sciences, Article 147-292, U.S. Geological Survey Professional Paper 424-C, Article 222, p. 202-203.

Grossman, I.G., Bogart, D.B., Crooks, J.W., and Díaz, J.R., 1972, Water resources of the Tallaboa Valley, Puerto Rico: U.S. Geological Survey Water-Resources Bulletin 7, 115 p.

Guariguata, M.R., and Larsen, M.C., 1990, Preliminary map showing locations of landslides in El Yunque quadrangle, Puerto Rico: U.S. Geological Survey Open-File Report 89-257, 1 sheet.

Guzmán-Ríos, Senén, 1983, Reconnaissance of the principal springs of Puerto Rico, 1982-83: U.S. Geological Survey Open-File Data Report 83-683, 1 sheet.

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., and González, J.R., 1979, Water budget and hydraulic aspects of artificial recharge, south coast of Puerto Rico: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 78-58, 102 p.

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.

Johnson, K.G., Quiñones, Ferdinand, and Alicea, José, 1982, Flood of September 16, 1975, at Utuado, Puerto Rico: U.S. Geological Survey Open-File Report 81-413, 1 sheet.

Johnson, K.G., Quiñones, Ferdinand, and González, Ralph, 1987, Hydraulic analyses of water-surface profiles in the vicinity of the Coamo Dam and Highway 52 bridge, southern Puerto Rico: Flood analyses as related to the flood of October 7, 1985: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 87-4039, 26

Jordan, D.G., 1970, Water and copper-mine tailings in karst terrane of Río Tanamá basin, Puerto Rico: U.S. Geological Survey Open-File Report 71-163, 24 p.

Larsen, M.C., 1990, Landslides caused by the intense precipitation of Hurricane Hugo in El Yunque and surrounding areas: Boletín Oficial de la Sociedad de Historia Natural de Puerto Rico, v. 24, no. 12, p. 8.

Larsen, M.C., 2000, Analysis of 20th century rainfall and streamflow to characterize drought and water resources in Puerto Rico: Physical Geography, v. 21, no. 6.

Larsen, M.C., and Stallard, R.F., 2000, Water, energy, and biogeochemical budgets Luquillo mountains, Puerto Rico: U.S. Geological Survey Fact Sheet, FS 163-99, 4 p.

Larsen, M.C., and Torres Sanchez, A.J., 1998, The frequency and distribution of recent landslides in three montane tropical regions of Puerto Rico: *Geomorphology*, v. 24, p. 309-331.

Larsen, M.C., and Torres-Sánchez, A.J., 1992, Landslides triggered by Hurricane Hugo in eastern Puerto Rico, September 1989: *Caribbean Journal of Science*, v. 28, no. 3-4, p. 113-125.

Larsen, M.C., and Torres-Sánchez, A.J., 1996, Geographic relations of landslide distribution and assessment of landslide hazards in the Blanco, Cibuco, and Coamo basins, Puerto Rico: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 94-4029, 56 p.

López, M.A., Colón-Dieppa, Eloy, and Cobb, E.D., 1979, Floods in Puerto Rico, magnitude and frequency: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 78-141, 68 p.

Lugo, Ariel, 1986. *Water and the Ecosystems of the Luquillo Experimental Forest*. Institute of Tropical Forestry, Forest Service, USDA.

Lugo, Ariel, 1995. *Humedales de Puerto Rico: Los Humedales de Montaña*. Vol. 2, Núm. 4, Proyecto Protección e Humedales. DRNA – División de Zona Costanera, San Juan, Puerto Rico.

Lugo, Ariel y Andrés García Martinó, 1996. *Cartilla del Agua para Puerto Rico*, Instituto de Dasonomía Tropical, Servicio Forestal del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América, San Juan, Puerto Rico.

Lugo, Ariel E., Ferdinand Quiñones Marques, Peter L. Weaver. *La erosión y sedimentación en Puerto Rico*. *Caribbean Journal of Science*, 16 (1-4) 1980.

McClymonds, N.E., 1967, Water resources of the Guánica area, Puerto Rico - A preliminary appraisal, 1963: U.S. Geological Survey Water-Resources Bulletin 6, 43 p.

McClymonds, N.E., 1972, Water resources of the Ponce area, Puerto Rico: U.S. Geological Survey Water-Resources Bulletin 14, 26 p.

McClymonds, N.E., and Díaz, J.R., 1972, Water resources of the Jobos area, Puerto Rico - A preliminary appraisal, 1962: U.S. Geological Survey Water-Resources Bulletin 13, 32 p.

McClymonds, N.E., and Ward, P.E., 1966, Hydrologic characteristics of the alluvial fan near Salinas, Puerto Rico: in *Geological Survey Research 1966*, Chap. C, U.S. Geological Survey Professional Paper 550-C, p. 231-234.

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

Molina-Rivera, W.L., and Dopazo, Teresa, 1995, Estimated water use in Puerto Rico, 1986-87: U.S. Geological Survey Open- File Report 95-358, 31 p.

Odum, H.T. et al. A Tropical Rain Forest, Division of Technical Information, U.S. Atomic Energy Commission. Río Piedras, Puerto Rico, 1970.

Pérez-Blair, Francisco, 1997, Ground-water resources of alluvial valleys in northeastern Puerto Rico -- Río Espíritu Santo to Río Demajagua area: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 96-4201, 25 p., 2 pls.

Puig, J.C., and Rodríguez, J.M., 1990, Potentiometric surface of the alluvial aquifer and hydrologic conditions near Gurabo and Juncos, Puerto Rico, March 1988: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 90-4059, 2 sheets.

Puig, J.C., and Rodríguez, J.M., 1993, Ground-water resources of the Caguas-Juncos valley, Puerto Rico: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 91-4079, 52 p.

Quiñones, Ferdinand, and Alicea-Ortiz, José, 1985, Agua subterránea en Puerto Rico: U.S. Geological Survey Open-File Report 85-642, 6 p.

Quiñones, Ferdinand, and Johnson, K.G., 1987, The floods of May 17-18, 1985, and October 6-7, 1985, in Puerto Rico: U.S. Geological Survey Open-File Report 87-123, 22 p.

Quiñones, Ferdinand, Colón-Dieppa, Eloy, and Juarbe, Max, 1984, Flow duration at streamflow gaging stations in Puerto Rico: U.S. Geological Survey Open-File Data Report 84-127, 93 p.

Quiñones, Ferdinand, Green, Bruce, and Santiago, Luis, 1989, Sedimentation survey of Lago Loíza, Puerto Rico, July 1985: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 87-4019, 17 p.

Quiñones, Ferdinand, Meléndez, Frank, and Bonnet, Carlos, 1989, Sedimentation survey of Lago Dos Bocas, Puerto Rico, June 1985: U.S. Geological Survey Open-File Report 86-241, 14 p.

Quiñones-Aponte, Vicente, 1986, Simulation of ground-water flow in the Río Yauco alluvial valley, Yauco, Puerto Rico: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 85-4179, 32 p.

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.

Quiñones-Aponte, Vicente, and Gómez-Gómez, Fernando, 1987, Potentiometric surface of the alluvial aquifer and hydrologic conditions in the Salinas quadrangle, Puerto Rico, March 1986: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 87-4161, 1 sheet.

Quiñones-Aponte, Vicente, Gómez-Gómez, Fernando, and Renken, R.A., 1997, Geohydrology and simulation of ground-water flow in the Salinas to Patillas area, Puerto Rico: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 95-4063, 37 p.

Quiñones-Márquez, Ferdinand, 1973, Chemical-quality and flow-duration curves for selected streams in Puerto Rico: U.S. Geological Survey Open-File Report PR-7.

Quiñones-Márquez, Ferdinand, 1975, Chemical composition of rainfall at selected sites in Puerto Rico: U.S. Geological Survey Open-File Report 75-364, 17 p.

Quiñones-Márquez, Ferdinand, 1978, Selected chemical properties of rainfall in the Río Piedras basin, Puerto Rico: U.S. Geological Survey Open-File Report 78-159, 14 p.

Quiñones-Márquez, Ferdinand, 1980, Limnology of Lago Loíza, Puerto Rico: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 79-97, 113 p.

Quiñones-Márquez, Ferdinand, 1981, Frecuencia de magnitud y flujos en los ríos principales de Puerto Rico: U.S. Geological Survey Open-File Data Report.

Quiñones-Márquez, Ferdinand, and Fusté, L.A., 1978, Limnology of Laguna Tortuguero, Puerto Rico: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 77-122, 86 p.

Quiñones-Márquez, Ferdinand, Guzmán-Ríos, Senén, 1986, Determinación de caudal y técnicas de muestreo en agua superficial: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 85-89, 68 p.

Ramos-Ginés, Orlando, 1991, Elevation of water table and hydrologic conditions in the Río Lapa to Río Majada area, Puerto Rico, for December 1988, and April, July, and October 1989: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 90-4125, 4 p., 1 sheet.

Ramos-Ginés, Orlando, 1994, Effects of changing irrigation practices on the ground-water hydrology of the Santa Isabel-Juana Díaz area, south central Puerto Rico: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations 91-4183, 22 p.

Ramos-Ginés, Orlando, 1994, Hydrology, water quality, and potential alternatives for water-resources development in the Río Majada and Río Lapa basins near the Albergue Olímpico, southern Puerto Rico: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations 91-4174, 35 p.

Ramos-Ginés, Orlando, 1999, Estimation of magnitude and frequency of floods for streams in Puerto Rico: new empirical models: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 99-4142, 41 p.,

Renken, R.A., and Gómez-Gómez, Fernando, 1994, Potentiometric surfaces of the upper and lower aquifers, north coast limestone aquifer system, Puerto Rico: U.S. Geological Survey Open-File Report 93-499, 16 p., 4 pls.

Renken, R.A., Ward, W.C., Gill, I.P., Gómez-Gómez, Fernando, Rodríguez-Martínez, Jesús and others. Geology and Hydrogeology of the Caribbean Islands Aquifer System of the Commonwealth of Puerto Rico and the U.S. Virgin Islands. Reston, Virginia, 2002.

Rodríguez, J.M., 1996, Ground-water quality in the Caguas-Juncos valley, Puerto Rico, April to October 1990: U.S. Geological Survey Open-File Report 96-139, 15 p.

Rodríguez-del-Río, Félix, and Gómez-Gómez, Fernando, 1990, Potentiometric surface of the alluvial aquifer and hydrologic conditions in the Santa Isabel-Juana Díaz area, Puerto Rico, March to April 1987: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 89-4116, 1 sheet.

Rodríguez-del-Río, Félix, and Quiñones-Aponte, Vicente, 1990, Potentiometric surface of the principal aquifer and hydrologic conditions in the Ponce-Juana Díaz area, Puerto Rico, April to May 1987: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 89-4115, 1 sheet.

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, 1996, Hydrogeology and ground-water/surface-water relations in the Bajura area of the municipio of Cabo Rojo, southwestern Puerto Rico: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 95-4159, 31 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.

Santiago-Rivera, Luis, 1992, Low-flow characteristics at selected sites on streams in eastern Puerto Rico: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 92-4063, 46 p.

Santiago-Rivera, Luis, 1996, Low-flow characteristics at selected sites on streams in southern and western Puerto Rico: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 95-4147, 46 p.

Santiago-Rivera, Luis, 1998, Low-flow characteristics at selected sites on streams in northern and central Puerto Rico: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 98-4200, 53 p.

Santiago-Rivera, Luis, and Quiñones-Aponte, Vicente, 1995, Hydrology of Laguna Joyuda, Puerto Rico: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 93-4135, 26 p.

Soler-López, L.R., 2001, Sedimentation survey results of the principal water-supply reservoirs of Puerto Rico, in Sylva, W.F., ed.: Proceedings of the Sixth Caribbean Islands Water Resources Congress, Mayagüez, Puerto Rico, February 2001, unpaginated CD.

Soler-López, Luis, 1998, Sedimentation survey of Lago Guayo, Puerto Rico, October 1997: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 99-4053, 20 p., 1 pl.

Soler-López, Luis, 1999, Sedimentation survey of Lago de Cidra, Puerto Rico, November 1997: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 99-4144, 19 p., 1 pl.

Soler-López, Luis, 1999, Sedimentation survey of Lago Prieto, Puerto Rico, October 1997: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 99-4169, 11 p., 2 pls.

Soler-López, Luis, 2001, Sedimentation survey of Lago Caonillas, Puerto Rico, February 2000: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 01-4043, 25 p., 1 pl.

Soler-López, Luis, 2001, Sedimentation survey of Lago Dos Bocas, Puerto Rico, October 1999: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 00-4234, 19 p., 1 pl.

Soler-López, Luis, 2001, Sedimentation survey of Lago Lucchetti, Puerto Rico, March 2000: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 01-4105, 22 p., 2m pl.

Soler-López, Luis, and Carrasquillo, R.A., 2001, Sedimentation survey of Lago Carite, Puerto Rico, October 1999: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 00-4235, 22 p., 1 pl.

Soler-López, Luis, and Webb, R.M.T., and Carrasquillo, R.A., 2000, Sedimentation survey of Lago Guajataca, Puerto Rico, January 1999: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 99-4143, 20 p., 2 pls.

Soler-López, Luis, and Webb, R.M.T., and Carrasquillo, R.A., 2000, Sedimentation survey of Lago La Plata, Puerto Rico, October 1998: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 00-4045, 23 p., 3 pls.

Soler-López, Luis, and Webb, R.M.T., and Pérez-Blair, Francisco, 1999, Sedimentation survey of Lago Garzas, Puerto Rico, September 1996: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 99-4143, 20 p., 2 pls.

Soler-López, Luis, and Webb, R.M.T., and Pérez-Blair, Francisco, 1999, Sedimentation survey of Lago Patillas, Puerto Rico, April 1997: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 99-4030, 14 p., 1pl.

Soler-López, Luis, and Webb, R.M.T., and Pérez-Blair, Francisco, 1999, Sedimentation survey of Lago Yahuecas, Puerto Rico, March 1997: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 98-4259, 15 p., 2 pls.

Soler-López, Luis, and Webb, Richard M.T., 1998, Sedimentation survey of Lago Dos Bocas, Puerto Rico, June 1997: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 98-4188, 14 p., 2 pls.

Torres-González, Arturo, 1985, Simulation of ground-water flow in the water table aquifer near Barceloneta, Puerto Rico: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 84-4113, 39 p.

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, 1989, Reconnaissance of the ground-water resources of Vieques Island, Puerto Rico: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 86-4100, 37 p.

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-Sierra, Heriberto, 1996, Flood of January 5-6, 1992, in Puerto Rico: U.S. Geological Survey Open-File Report 95-374, 13 p.

Torres-Sierra, Heriberto, 1997, Flood of October 6-7, 1985, in the Ponce-Santa Isabel area, Puerto Rico: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 95-4166, 2 sheets.

Torres-Sierra, Heriberto, 1997, Hurricane Hortense: Impact on surface water in Puerto Rico: U.S. Geological Survey Fact Sheet 014-97, 4 p.

Torres-Sierra, Heriberto, 1998, Flood of September 10, 1996, in Bayamón, Puerto Rico: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 98-4120, 2 sheets.

Torres-Sierra, Heriberto, and Avilés, Ada, 1986, Estimated water use in Puerto Rico, 1980-82: U.S. Geological Survey Open-File Data Report 85-557, 77 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.

Veve, T.D., and Taggart, B.E., 1996, Atlas of ground-water resources in Puerto Rico and the U.S. Virgin Islands: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 94-4198, 151 p.

Webb, R.M.T., and Gómez-Gómez, Fernando, 1996, Sedimentation survey of Lago Dos Bocas, Puerto Rico, August 1994: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 95-4214, 20 p., 3 plates.

Webb, R.M.T., and Soler-López, L.R., 1996, Sedimentation survey of Lago Caonillas, Puerto Rico, February 1995: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 96-4153, 27 p., 1 pl.

Webb, R.M.T., and Soler-López, L.R., 1997, Sedimentation history of Lago Loíza, Puerto Rico, 1953-94: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 97-4108, 18 p., 9 pls.

Zack, A.L., and Class-Cacho, Angel, 1984, Restoration of freshwater in the Caño Tiburones area, Puerto Rico: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 83-4071, 33 p., 1 pl.