ACTA CIENTÍFICA

ASOCIACIÓN DE MAESTROS DE CIENCIA DE PUERTO RICO

AMC Puerto Rico

ISSN. 1940-1148



VOL. 25 NUMS. 1-3, 2011

Editor
Ariel E. Lugo

Editores invitados
Ferdinand Quiñones
Mildred Alayón
Andrés García Martinó

Editor de producción
Evelyn Pagán

Oficial administrativo
Mildred Alayón

Lectores
Gisel Reyes
Jorge Morales

PORTADA

Vista aérea del embalse de Carraízo también conocido como el embalse o lago de Loíza. La cobertura urbana aguas abajo al embalse es notable. Los jacintos de agua son las plantas acuáticas flotando aguas arriba a la represa ubicada en la parte central superior de la foto. La foto fue suministrada por Alberto M. Lázaro de la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados.

Acta Científica 25(1-3):1, 2011

EDITORIAL

La situación del agua en Puerto Rico cambia rápida y continuamente. El cambio no necesariamente se debe a un cambio en la disponibilidad natural del preciado líquido, el cual es suficiente para nuestras necesidades; se debe sin embargo a las acciones de los puertorriqueños. Desde que se publicó la primera edición de la Cartilla del Agua en Puerto Rico, se han construido represas fuera de los cauces de ríos; se han designado secciones de ríos como lugares prístinos y escénicos; las pérdidas de agua continúan en aumento a pesar de esfuerzos significativos para reducirlas; las áreas urbanas aparentan inundarse más que nunca; y la cobertura de bosques y zonas urbanas continúan su aumento a expensas de la cobertura agrícola. Además, la población ha tomado conciencia sobre la posibilidad de los efectos potenciales del cambio climático sobre Puerto Rico y es común hablar de seguridad alimentaria, de cambios fundamentales a la economía y cómo nos relacionamos con los recursos naturales ante los cambios globales que obligan a las naciones a mirar a sus futuros. El agua es esencial para la vida, la economía y para sostener las aspiraciones que tengamos para el país. Por eso sigue siendo el centro de atención de los que se preocupan por el futuro de Puerto Rico.

Desde su publicación en **Acta** en el 1996, la Cartilla del Agua ha sido uno de los números de la revista más leídos, con cientos de copias circuladas en una impresión separada. La Cartilla del Agua se ha diseminado ampliamente y ha sido citada en periódicos y otros medios noticiosos del país. Sin embargo, debido a los cambios en la situación del agua en Puerto Rico, fue necesario elaborar una segunda edición con materiales más recientes y con más atención al manejo del agua en la isla. Aunque el ciclo natural del agua no cambie, el ciclo del agua bajo la influencia del ser humano sí cambia y por eso es necesario entender tanto el ciclo natural del agua como el antropogénico. Eso justifica esta segunda edición.

Para la segunda edición contamos con la colaboración del ingeniero Ferdinand Quiñones, quien en un momento fue director de la oficina de aguas del Servicio Geológico de los Estados Unidos de América en Puerto Rico. Además, Andrés García Martinó fungió como vice presidente de la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados y la Cartilla se benefició de su experiencia. Como es costumbre en las Cartillas que publicamos, la misma está basada en preguntas específicas y respuestas objetivas basadas en datos o conocimiento disponible. El objetivo de esta Cartilla es proveerle al maestro, estudiante o al lector interesado la información que le permita entender los asuntos relacionados al agua en Puerto Rico. Con esta información en manos de la gente, contribuimos al debate y a la educación del país.

Aunque **Acta** es ahora una revista electrónica, este número de **Acta** se imprime gracias a la colaboración de la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados, en especial a su Presidente Ejecutivo, el ingeniero Alberto Lázaro.

Ariel E. Lugo
Editor

LA MARAVILLA DEL AGUA

El agua es una molécula maravillosa pues tiene propiedades que hacen posible la vida en el planeta. El agua:

- es el solvente universal. Eso quiere decir que el agua puede disolver muchas sustancias químicas y eso permite que lixivie las superficies y transporte nutrientes y minerales de un sitio a otro. Jugos, medicamentos, limpiadores y alimentos en forma líquida dependen de la cualidad solvente del agua;

- puede estar como gas (en la atmósfera), sólido (como nieve o hielo) o líquido (en ríos y quebradas o lluvia), lo que le da una versatilidad enorme y permite el ciclo hidrológico;

- puede pasar del estado sólido al gaseoso sin pasar por el líquido lo que facilita técnicas como el congelado en seco (freeze-dry) para preservar alimentos.

- al convertirse en hielo reduce su densidad, lo que hace que el hielo flote. Esto permite la sobrevivencia de la vida acuática debajo del hielo;

- tiene una alta capacidad de almacenar calor, lo que modera el clima y ayuda a enfriar las superficies cuando se evapora. La evaporación del sudor es un mecanismo efectivo en la regulación de la temperatura de muchos animales. Las plantas evaporan agua (transpiración) para enfriar sus hojas;

- tiene una alta capacidad de adhesión (atracción entre distintas sustancias) y cohesión (atracción entre moléculas de la misma sustancia). La adhesión le da fortaleza al agua para formar columnas continuas desde la raíz hasta las hojas de los árboles más altos, facilitando el movimiento de nutrientes a las hojas y asegurándole la sobrevivencia a las plantas. La cohesión le permite a los insectos caminar sobre el agua. Estas propiedades nos permite mojarnos y bañarnos con agua.

Tabla de Contenido

Introducción	4
Ciclo Natural del Agua	5
Abundancia y Distribución Natural del Agua	6
Cuencas Hidrográficas	18
Ríos y Quebradas	22
Acuíferos	35
Manantiales	42
Lagunas	44
Humedales	44
Estuarios	47
Manglares	49
Bosques	50
Embalses	52
Calidad del Agua	65
Tomas de Agua	70
Sequías	71
Inundaciones	73
Canalizaciones	79
Demanda de Agua en Puerto Rico	83
Manejo del Agua en Puerto Rico	97
Purificación del Agua	99
Venta del Agua	112
Aguas Sanitarias	114
Aguas de Escorrentía	120
Desperdicio del Agua	121
Valor y Conservación del Agua	122
Opinión: La Conservación Paga	124
Agradecimientos	124
Bibliografía	124
Apéndices	129
Indice	132

Acta Científica 25(1-3):4, 2011

CARTILLA DEL AGUA PARA PUERTO RICO[1]

ARIEL E. LUGO
Instituto Internacional de Dasonomía Tropical
Servicio Forestal del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América
1201 Calle Ceiba, Jardín Botánico Sur, Río Piedras, PR 00926-1115

ANDRÉS GARCÍA MARTINÓ
Autoridad de Acueductos y Alcantarillados
Región Este
Barrio Bairoa, Caguas, PR
y
FERDINAND QUIÑONES MÁRQUEZ
Brentwood, Tennessee, EEUU

INTRODUCCIÓN

Objetivos de esta cartilla -- Los objetivos de esta *Cartilla* son: (1) presentar la información necesaria para entender el ciclo del agua, la complejidad de su manejo y la necesidad de su conservación; (2) proveer los elementos de juicio que ayuden a fiscalizar la labor del gobierno en la administración de este recurso; (3) proveer los conocimientos para una mayor participación y responsabilidad ciudadana.

Nota sobre unidades de medidas, definición de términos y conceptos y fuentes de información -- Los informes principales sobre el agua en Puerto Rico utilizan unidades inglesas mientras que los trabajos científicos, incluso *Acta Científica*, utilizan unidades métricas. En esta *Cartilla* reportamos las unidades según aparecen en los trabajos citados no importa el sistema y en paréntesis presentamos la conversión al sistema alterno cuando la conversión sea necesaria. El apéndice 1 contiene un listado de todas las unidades utilizadas en la *Cartilla*, sus abreviaciones y su conversión de un sistema a otro. Además, el apéndice 2 contiene las abreviaciones y siglas utilizadas en la *Cartilla*.

En esta *Cartilla* usamos **negrillas** la primera vez que utilizamos un término o concepto que se define al momento de introducirlo o más adelante en el documento. Además, a efectos de simplificar la lectura, los nombres de agencias o términos poco usuales para el lector, se deletrearán en su totalidad. La base de información en el texto, figuras y tablas se origina de datos oficiales de agencias federales y estatales, de la literatura científica, y en algunos casos, de periódicos o revistas de circulación general. Muchos de los análisis son originales para esta versión de la *Cartilla* o para la primera edición. Aunque en algunas ocasiones citamos los trabajos originales, generalmente no lo hacemos, aunque los trabajos utilizados se encuentran en la Bibliografía.

¿*De quién es el agua en Puerto Rico*? -- Los puertorriqueños son los dueños del agua en Puerto Rico. El agua es un bien de **dominio**

[1]Esta segunda edición de la *Cartilla del Agua* sustituye la primera edición que apareció en Acta Científica 10(1-3), 1993.

público no patrimonial, es decir, le pertenece a todos por igual y a nadie en particular. La Ley de Aguas de 1976 formaliza esto de la siguiente forma: "se declaran las aguas y cuerpos de agua de Puerto Rico propiedad y riqueza del Pueblo de Puerto Rico."

¿Quién es el custodio del agua en Puerto Rico? -- La Ley de Aguas de Puerto Rico (Ley Núm. 136 del 3 de junio de 1976) delega al Departamento de Recursos Naturales y Ambientales la conservación, desarrollo y uso de los recursos de agua en la Isla y sus islas territoriales (Vieques, Culebra y Mona).

CICLO NATURAL DEL AGUA

¿Qué es el ciclo natural del agua? -- El ciclo del agua es el movimiento perpetuo del agua a nivel planetario. **Ciclo hidrológico** es otro nombre para el ciclo del agua. La energía solar, en acción con la fuerza de gravedad, es la fuerza motriz del ciclo hidrológico natural, pues la intervención humana con el uso de energía fosil (energía química) altera el ciclo en ciertas áreas del planeta.

¿En qué consiste el ciclo hidrológico? -- El sol evapora el agua de la superficie del planeta y los vientos la transportan a lo largo de la tierra o el mar donde el vapor del agua se condensa y se precipita como lluvia, nieve o granizo. Aproximadamente la mitad de la lluvia que cae sobre la tierra se evapora por evaporación directa o es absorbida por las raíces de las plantas y cuando llega a las hojas se evapora por **transpiración**. El vapor de agua regresa a la atmósfera para continuar el ciclo. El balance fluye como **escorrentía** sobre el suelo donde una parte se infiltra a los **acuíferos** fluyendo subterráneamente hacia las costas y el mar o descargando en forma de **manantiales** o directamente a **quebradas** y ríos. La otra parte de la escorrentía llega a las quebradas y los **ríos** donde fluye también hacia el mar.

¿Cuáles son los procesos principales del ciclo hidrológico? -- Los procesos principales del ciclo hidrológico son: la **condensación**, la **precipitación**, la generación de escorrentía, la **infiltración**, la **evaporación** y la transpiración.

¿Qué es la condensación? -- La transformación del agua de estado gaseoso a estado líquido debido a cambios en temperatura y presión se conoce como condensación.

¿Qué es la precipitación? -- La precipitación es la caída del agua bajo el efecto de la gravedad principalmente como lluvia, aunque también incluye el granizo y la nieve.

¿Qué es la infiltración? -- La infiltración es la percolación del agua desde el suelo donde se convierte en agua subterránea.

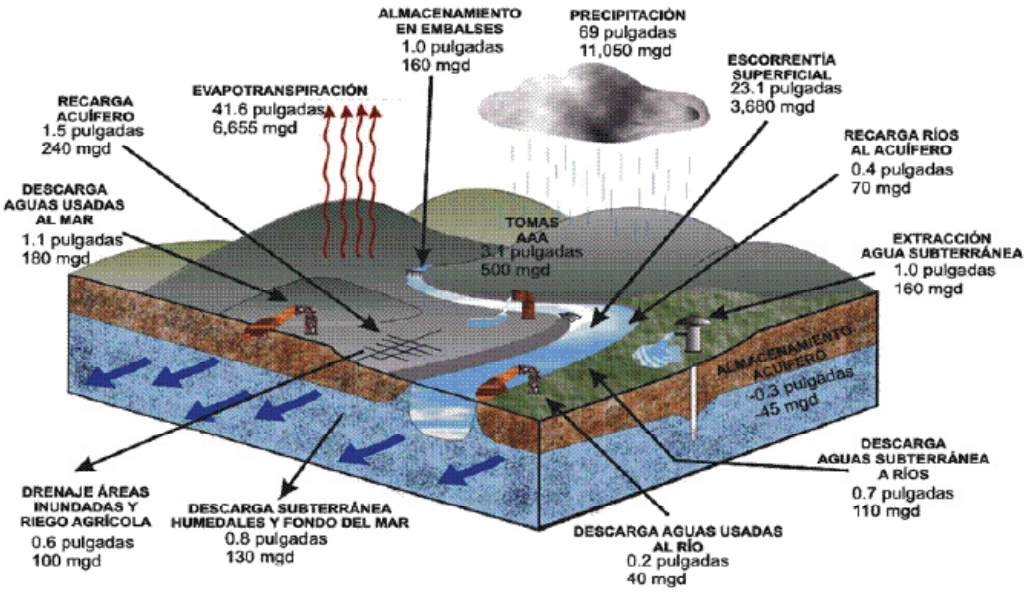
¿Qué es la evaporación? -- La evaporación es el proceso donde el agua pasa del estado líquido al estado gaseoso. Parte del agua que se precipita hacia la tierra se evapora de las superficies o de los cuerpos de agua. Por ejemplo, en el bosque de tabonuco esta evaporación desde las superficies foliares, conocida como **intercepción**, o el agua de lluvia que se evapora antes de llegar al suelo, puede sobrepasar el 50 por ciento de la lluvia anual.

¿Qué es la transpiración? -- La transpiración es el proceso mediante el cual se evapora el agua de las plantas principalmente a través de las **estomas** en sus hojas. La **evaporación total** (evaporación más transpiración) se le conoce como la **evapotranspiración**.

¿Cuál es la magnitud del ciclo hidrológico de Puerto Rico? -- El ciclo hidrológico anual promedio de Puerto Rico tanto en pulgadas como en millones de galones por día se ilustra en la figura 1. La figura incluye el almacenaje del agua en los acuíferos y **embalses**; las **extracciones** para agua potable y descargas de **aguas sanitarias** (también conocidas como **aguas usadas**) por la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados; extracciones para usos agrícolas; **descargas** naturales al mar; y recargas a los acuíferos por los ríos.

¿Cuál es la importancia del ciclo hidrológico? -- El ciclo hidrológico es importante porque de él depende cuánta agua

Figura 1. El ciclo hidrológico ilustrado con valores para la isla de Puerto Rico en el 2005 (Servicio Geológico de los Estados Unidos de América). Para convertir pulgadas a mm multiplique por 25.4 y para convertir mgd a m^3/s multiplique por 0.0438126365741.



se mueve de un sitio a otro, en qué estado se encuentra y su disponibilidad a los ecosistemas y a la gente. El volumen de agua en el planeta es esencialmente constante[2], lo que cambia es su estado físico y su distribución. El agua es una sustancia maravillosa (ver contraportada) que puede estar presente como líquido, sólido o gas y se distribuye entre los cuerpos de agua sobre la superficie de la tierra, los cuerpos de agua subterráneos, el océano y la atmósfera.

ABUNDANCIA Y DISTRIBUCIÓN NATURAL DEL AGUA

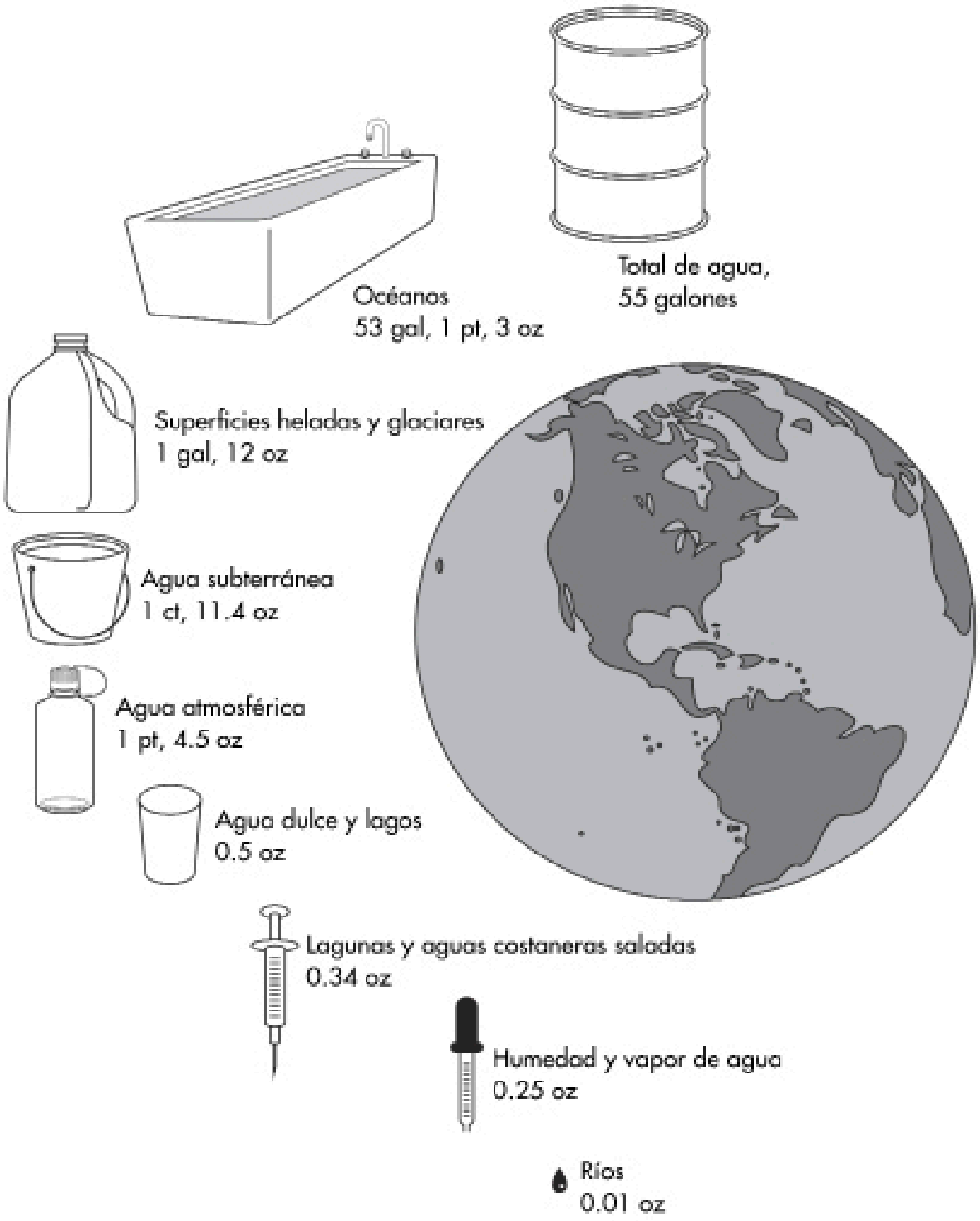
¿Cómo se distribuye el agua en el Planeta? -- El 97.6 por ciento del agua está en el océano como agua salada (Fig. 2). El 2.08 por ciento está en la forma de hielo en los polos. El agua subterránea representa el 0.29 por ciento del total de agua, los suelos almacenan el 0.005 por ciento, 0.017 por ciento está en los ríos y lagos y 0.0009 por ciento en la atmósfera.

¿De dónde proviene el agua en Puerto Rico? -- El agua en Puerto Rico proviene fundamentalmente del mar y llega a la Isla de acuerdo al clima, es decir, por medio de los vientos, la temperatura y la precipitación (lluvia). Además, la evapotranspiración es un componente importante del clima que varía con las temperaturas, el viento, la lluvia y con la vegetación.

¿Cómo se relacionan los otros componentes del clima con las lluvias en Puerto Rico? -- 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

[2]Hay procesos naturales y artificiales que separan las moléculas de agua en oxígeno, hidrógeno y energía los cuales reducen la cantidad de agua y otros que forman agua de la unión de oxígeno e hidrógeno. Sin embargo, el volumen de agua en estos procesos es mínimo en relación al volumen total de agua.

Figura 2. Distribución proporcional del agua en el Planeta. El dron de 55 galones (208 litros) representa la cantidad total de agua en todo el planeta y las otras imágenes ilustran cómo están distribuidos esos 55 galones o 208 litros.



geografía de la Isla (Fig. 3), 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 producidas por la condensación de la humedad en el aire de origen marino. Este aire se enfría al ser impulsado por los vientos hacia las cimas de las cordilleras. 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 menos lluvia. La temperatura controla estas interacciones, pero es a su vez afectada por los vientos.

Además de las interacciones del viento y las temperaturas que influyen en el efecto orográfico, el clima de la Isla es afectado por frentes de frío y disturbios tropicales como **vaguadas** (sistemas de lluvia de la atmósfera alta), tormentas y huracanes. Estos sistemas climáticos pueden ocasionar lluvias de alta intensidad y larga duración, resultando en **inundaciones** que afectan la Isla.

Por ser El Yunque un lugar especial para el ciclo hidrológico de Puerto Rico, el recuadro 1 resume algunos datos relevantes al ciclo de agua de las montañas de Luquillo. Esta información proviene de la página cibernética http://recursosaguapuertorico.com, donde se explica la hidrología de El Yunque y periódicamente se actualizan los datos utilizados en el recuadro 1.

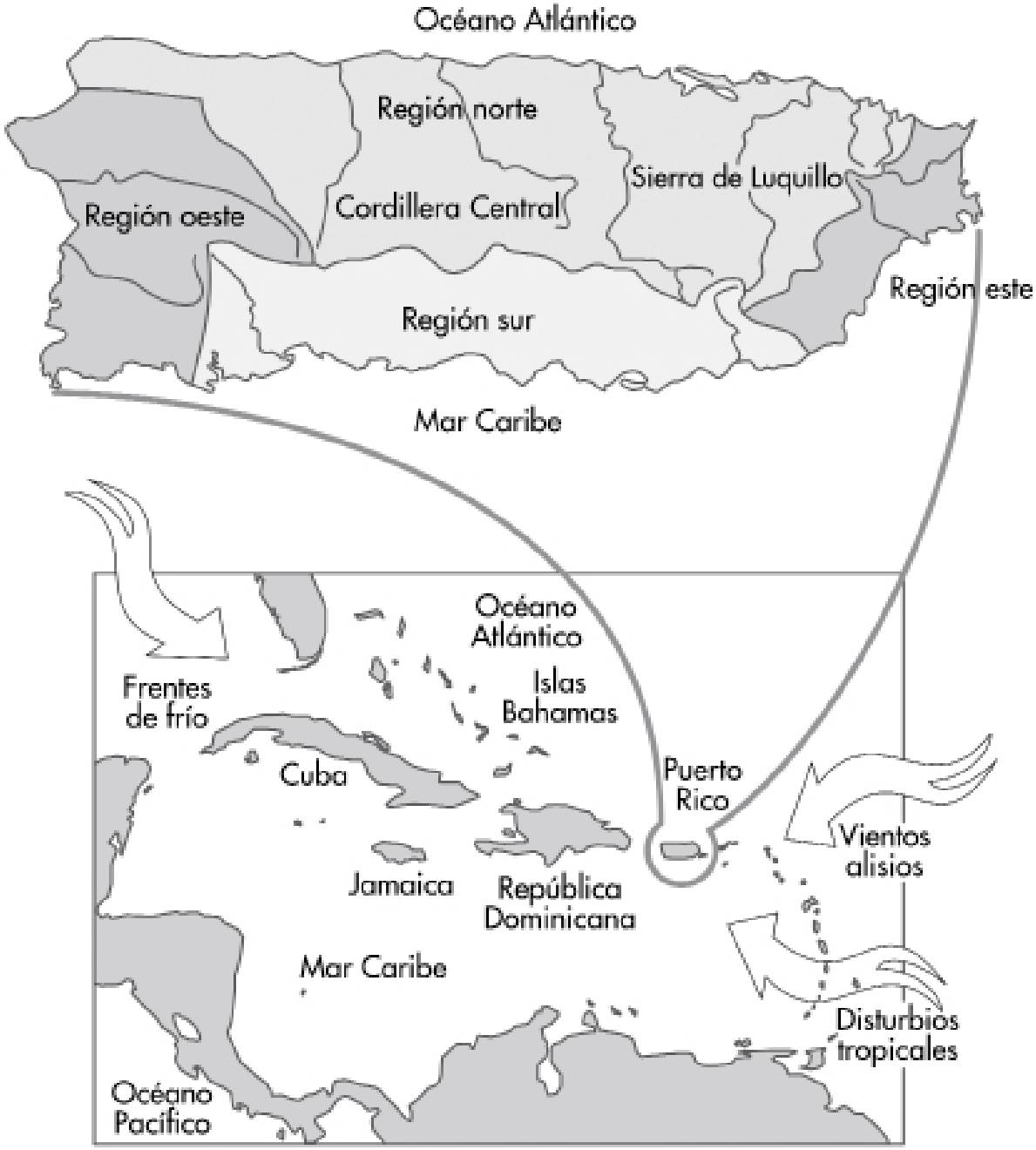
¿Qué es el efecto orográfico? -- El efecto orográfico es el enfriamiento de una masa de aire a medida que se eleva sobre la topografía. Durante este proceso la masa de aire pierde su capacidad de cargar humedad, lo que causa la precipitación del agua. En Puerto Rico este proceso ocurre desde el nivel del mar hasta que el aire rebasa las montañas a sobre 1,000 metros (3,281 p) de elevación.

¿Dónde ocurre el efecto orográfico en Puerto Rico? -- El efecto orográfico 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 orográfico en la región norte contribuye también a que la lluvia sea menos abundante en la región sur.

¿Cómo se forma la lluvia? -- Las lluvias en Puerto Rico se originan a través de dos mecanismos: (1) **lluvias orográficas** y (2) **lluvias frontales**. Las lluvias orográficas se deben al enfriamiento de las masas de aire saturadas de agua al elevarse sobre las cordilleras y montañas de la Isla. El aire caliente proveniente del mar es más liviano y tiene más capacidad para almacenar vapor de agua. Por el contrario, el aire frío es más pesado y tiene poca capacidad para almacenar vapor de agua. A medida que el aire del mar saturado con vapor de agua se eleva por las montañas, se enfría y parte del agua que contiene en forma de vapor se condensa, lo que causa la precipitación en las montañas y laderas de las costas (lluvias orográficas). Las lluvias frontales son parte de tormentas que se mueven del mar a la Isla como sistemas más organizados. Estas lluvias frontales son ocasionadas por vaguadas provenientes del mar Caribe, frentes de frío del norte, tormentas tropicales y por huracanes.

¿Cómo se mide la lluvia? -- La lluvia se mide con instrumentos conocidos como pluviómetros que se ubican por toda la Isla de acuerdo a la importancia hidrológica de las **cuencas hidrográficas**. Por ejemplo, en la cuenca hidrográfica del embalse de Loíza (Carraízo) hay cerca de 28 pluviómetros. La unidad de medida de la lluvia es la pulgada (pulg) en el sistema inglés y el milímetro (mm)

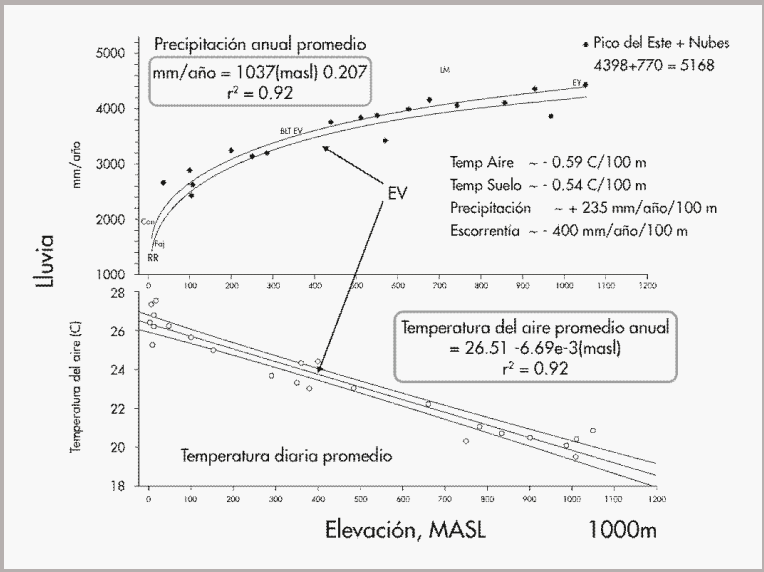
Figura 3. Dirección de los tres sistemas de vientos principales que traen el agua a Puerto Rico y las cuatro zonas hidrográficas principales que capturan esas aguas.



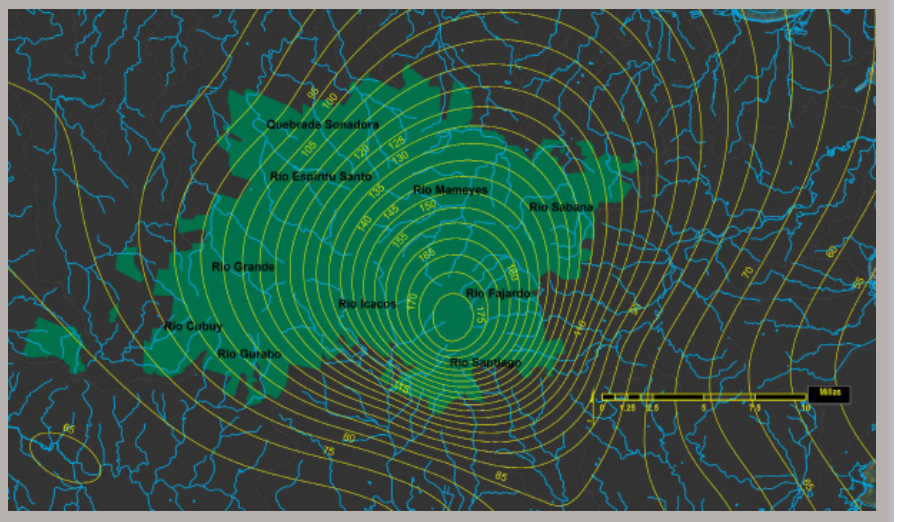
en el sistema métrico. Una pulgada de lluvia es igual a 25.4 mm. Cuando llueve una pulgada, lo que implica es que el agua que se precipitó es de una pulgada de profundidad sobre la superficie terrestre o marítima. En Puerto Rico funcionan aproximadamente 150 pluviómetros operados principalmente por el Servicio Nacional de Meteorología y el U.S. Geological Survey. Algunos de los pluviómetros miden la lluvia automáticamente cada 5 minutos y en otros manuales se mide la lluvia cada 24 horas. El Servicio Nacional de Meteorología

Recuadro 1. La hidrología de El Yunque, tomado de la página cibernetica http://recursosagua-puertorico.com.

La gran biodiversidad de El Yunque está relacionada a su clima, posición geográfica, e historial geológico y biogeográfico. El libro editado por Brokaw et al. (2012) contiene la síntesis más completa sobre la ecología de esta región de Puerto Rico. La hidrología de El Yunque juega un papel primordial en el mantenimiento de su biodiverisdad y la provisión de servicios ecológicos, incluyendo abastos de agua de alta calidad a los puertorriqueños.

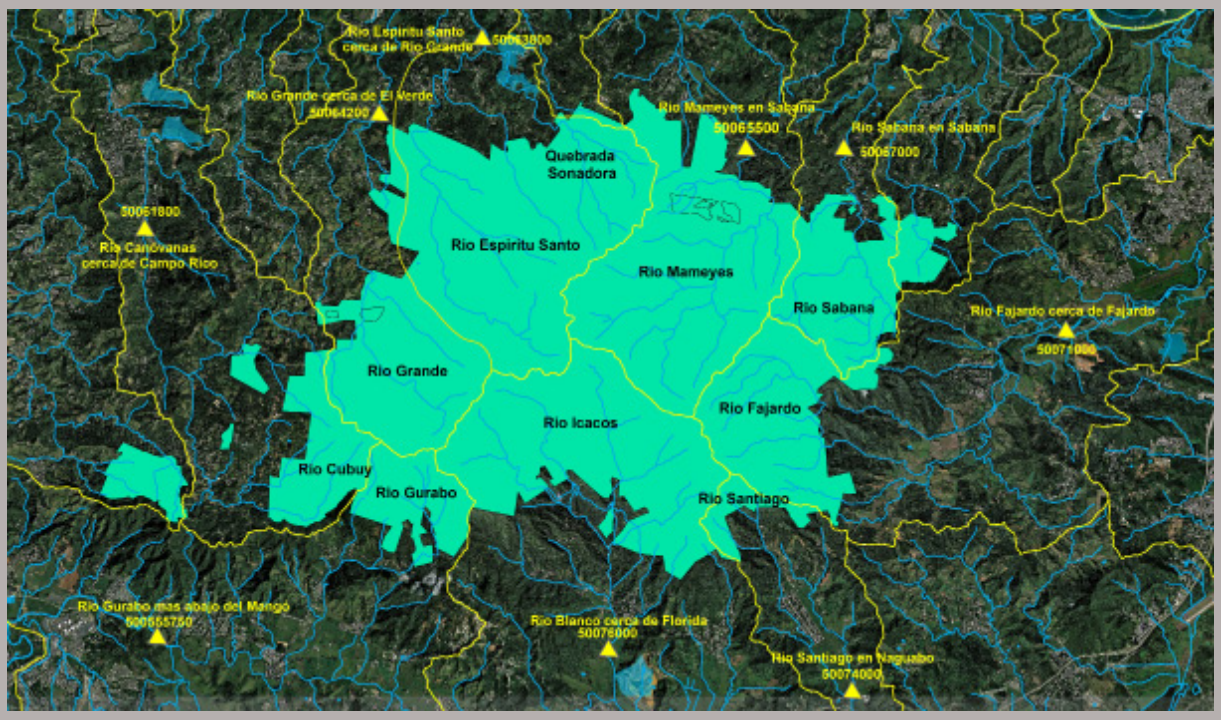


La figura 1-1 (izquierda) ilustra el cambio en la lluvia y la temperatura desde el nivel del mar hasta el tope de El Yunque. A lo largo de ese gradiente la temperatura del aire disminuye 0.59 C/100 m de elevación, la temperatura del suelo disminuye 0.54/100 m de elevación, la lluvia aumenta 235 mm/año por cada 100 m de elevación y la escorrentía aumenta 400 mm/año por cada 100 m de elevación. Estos datos y análisis son cortesía de F.N. Scatena y sus estudiantes.



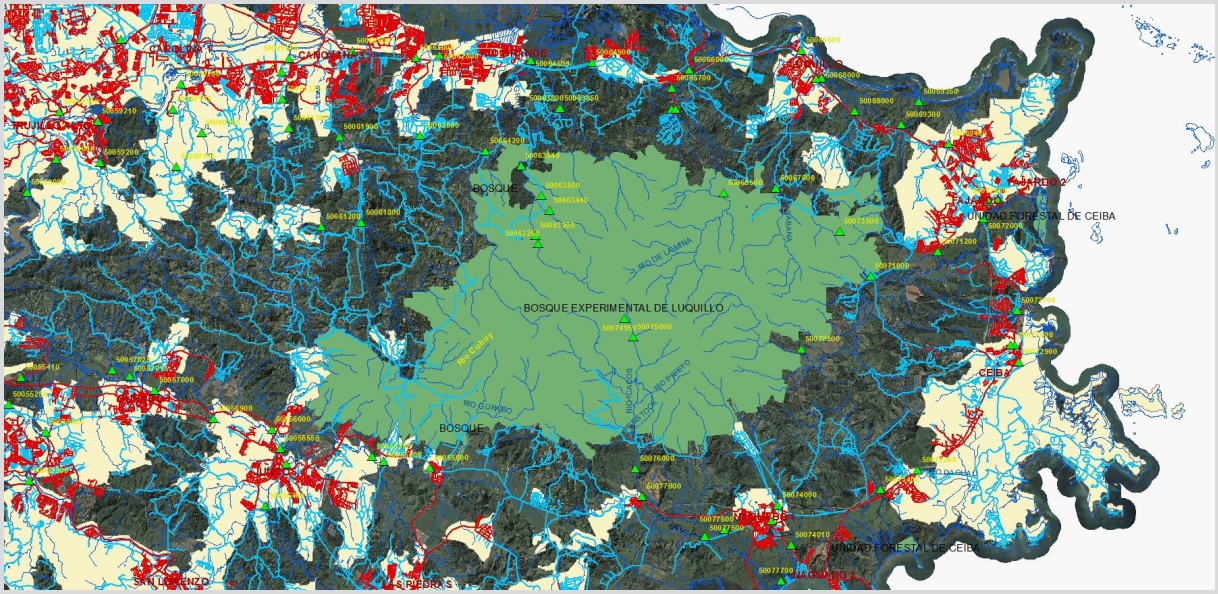
La figura 1-2 (derecha) sobrepone sobre el territorio de El Yunque lineas de igual intensidad de lluvia para ilustrar la distribución geográfica de la lluvia.

La figura 1-3 (tope) ilustra las cuencas hidrográficas de El Yunque y la ubicación de estaciones de muestreo de escorrentía del USGS (triángulos). La escorrentía histórica de todos los ríos que se originan en El Yunque se ilustra en la figura 1-4 (abajo). La merma en escorrentía en el 1994 refleja la sequía que ocurrió ese año.





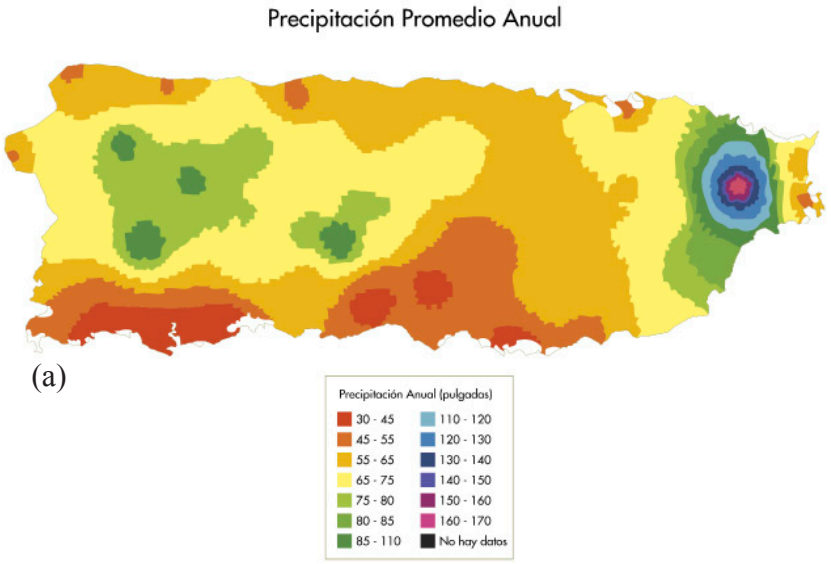
La figura 1-5 (debajo) contiene las tuberías de agua potable (en azul) y sanitarias (en rojo) en la periferia de El Yunque. Se estima que unos 500,000 clientes de la AAA viven en el área cubierta por esta imagen, lo que sugiere la dependencia de la población de los recursos de agua de El Yunque.

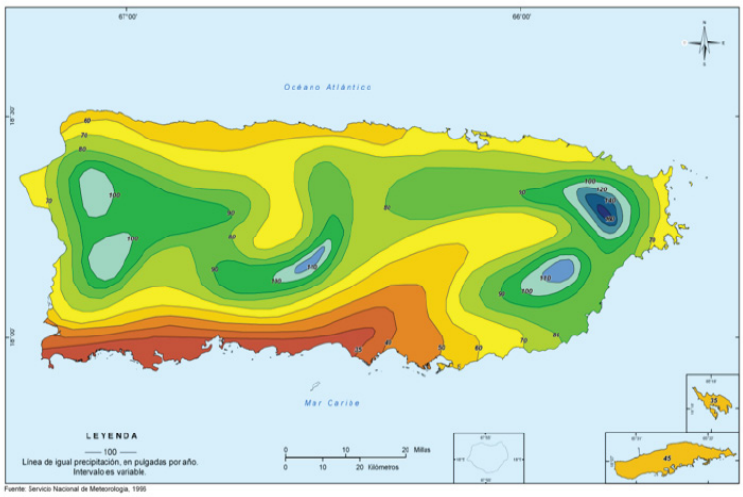


mantiene los datos oficiales de lluvia en todo Puerto Rico que datan de 1898, aunque existen datos desde 1850 cuando la Isla era parte de España.

¿Cuánto llueve en Puerto Rico? -- De acuerdo al meteorólogo José Colón, el promedio de lluvia, si se toma en consideración toda el área geográfica de Puerto Rico, es de unas 65 a 68 pulgada anuales (1,651 a 1,727 mm). Sin embargo, de acuerdo al Servicio Nacional de Meteorología el promedio anual de lluvia para Puerto Rico es entre 72 y 76 pulgadas (1,828 a 1,930 mm). Los valores más utilizados son los últimos aunque hay evidencia que sugiere que el estimado del doctor Colón es el correcto. En el 2005, el Departamento de Recursos Naturales y Ambientales calculó la lluvia promedio en la Isla utilizando datos de 145 estaciones del Servicio Nacional de Meteorología, y concluyeron que el promedio de lluvia desde 1898 es de aproximadamente 69 pulgadas anuales (1,753 mm). Como la lluvia varía con el tiempo, el Servicio Nacional de Meteorología también calcula la **lluvia normal** promedio utilizando el promedio de los últimos 30 años de datos (Fig. 4a).

¿Cómo se distribuye geográficamente la lluvia en Puerto Rico? -- Distintas regiones de Puerto Rico reciben distintas cantidades de lluvia (Fig. 4a, b, c y Larsen 1997). La sierra de Luquillo en el noreste de Puerto Rico es la región con mayor lluvia y recibe en algunos lugares altos de la montaña hasta 250 pulgadas anuales (6,350 mm). Las regiones del Faro en Cabo Rojo e Isla de Mona son los lugares con menor lluvia en Puerto Rico con unas 20 pulgadas anuales (508 mm). Entre estos dos extremos, se observa un gradiente ascendente de lluvia de la costa sur (35 pulg o 889 mm) a la costa norte (60 pulg o 1,524 mm), de la costa a la montaña (100 pulg o 2,540 mm) y del oeste al este. Áreas al sotavento de los vientos alisios





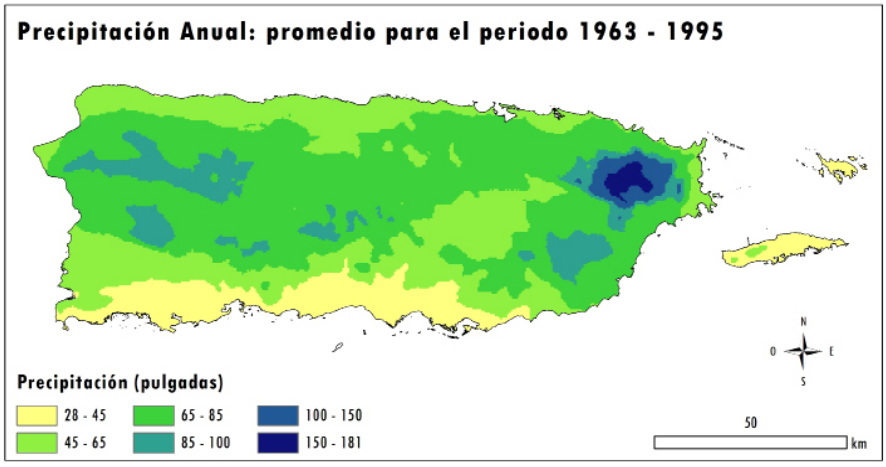


Figura 4. Tres mapas de la distribución geográfica de la lluvia anual en Puerto Rico. (a) Mapa de la lluvia normal promedio (1971-2000) para Puerto Rico de acuerdo a la Administración Nacional de los Océanos y la Atmósfera. (b) Con otra base de datos, mapa de lluvia promedio histórico de acuerdo al Servicio Nacional de Metereología. (c) Con datos entre el 1963 y 1995, un mapa generado tomando en consideración el efecto de aspectos espaciales y topográficos sobre la lluvia (Daly et al. (2003). Aunque los patrones generales se reflejan en los tres mapas, cada uno tiene detalles que el otro no tiene. El mapa de lluvia normal refleja tendencias recientes, mientras que el histórico refleja todo el record de lluvias disponible. El mapa de Daly et al. refleja mayores detalles espaciales de la lluvia ausentes en los otros dos. Para convertir pulgadas a mm multiplique por 25.4.

(protegidas por las montañas) reciben menos lluvia que las expuestas al viento (barlovento). Por ejemplo, el valle de Caguas está protegido por las montañas al este, incluyendo las de la sierra de Luquillo y sólo recibe 60 pulgadas o 1,524 mm anuales.

¿Cómo se distribuye estacionalmente la lluvia en Puerto Rico? -- La lluvia en Puerto Rico tiene dos períodos con mayor precipitación (Fig. 5). Estos ocurren en mayo y en septiembre-octubre en todas las regiones de la Isla. Entre junio y agosto ocurre un período de lluvia relativamente menor a los anteriores. De junio a septiembre cae el 42 por ciento de la lluvia anual. Las lluvias frontales son más frecuentes durante el mes de septiembre, cuando también son más abundantes los huracanes, tormentas, ondas tropicales y vaguadas. Por ejemplo, en septiembre del 1995, el huracán Hortensia produjo 23 pulgadas (584 mm) de lluvia sobre las cuencas de las montañas de Luquillo y Cayey en solo 24 horas. Durante la época de invierno (diciembre a marzo), Puerto Rico está bajo la influencia de altas presiones atmosféricas que no producen lluvia y esa es la época de menor lluvia en Puerto Rico. A pesar de esta estacionalidad, en Puerto Rico llueve todos los meses del año contrario a climas continentales donde el periodo de sequía es más marcado.

¿Cómo varía la lluvia en Puerto Rico de un año a otro? -- La lluvia promedio anual en Puerto Rico varía de año en año (Fig. 6a). Los extremos son un mínimo de 44 pulgadas

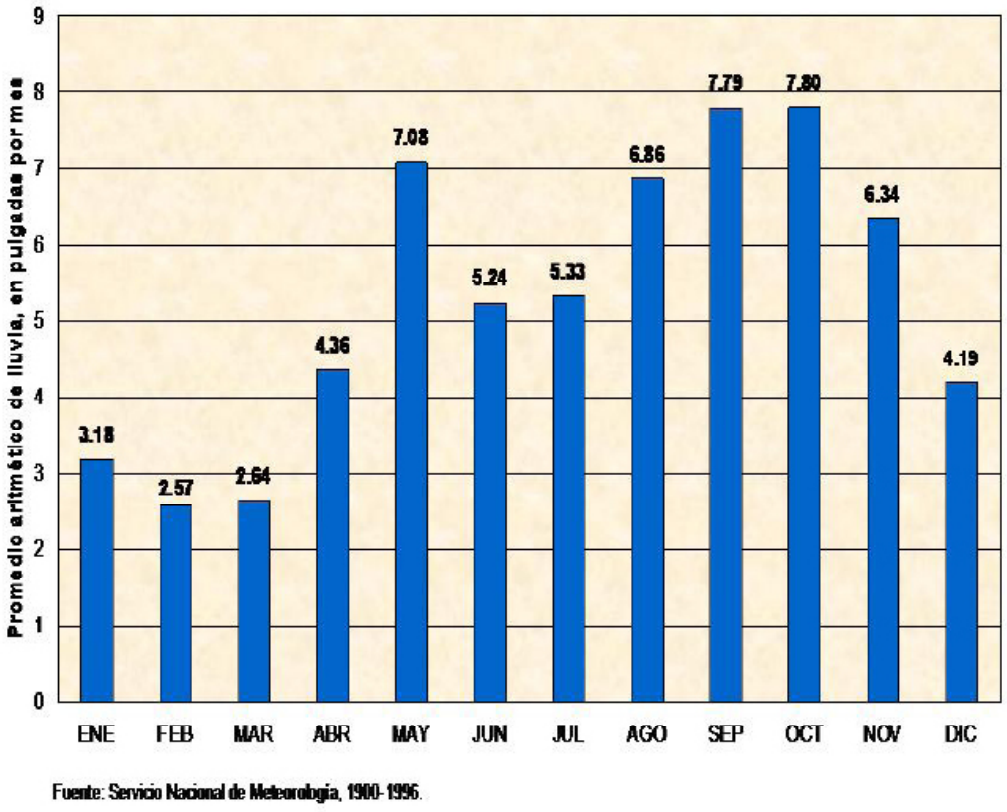


Figura 5. La distribución mensual promedio de la lluvia en Puerto Rico basada en datos del Servicio Nacional de Metereología para los últimos 96 años. Para convertir pulgadas a mm multiplique por 25.4.

en 1967 (1,118 mm) y un máximo de 83 pulgadas (2,108 mm) en el 2010 (Fig. 6b). En la figura 6b se nota que todas las semanas del año 2010 excedieron el promedio de lluvia correspondiente. Las variaciones anuales de la lluvia son impredecibles, pues dependen de las temperaturas y vientos en el Atlántico, el Caribe y en el territorio de la Isla. Las épocas con mucha o poca lluvia son de duración variable pero pueden durar décadas.

¿A qué se debe la variación anual en la lluvia en Puerto Rico? -- La variación de año a año se debe a fenómenos globales cíclicos, como el fenómeno de **El Niño**[3] y la Oscilación del Atlántico Norte, que aseguran épocas recurrentes de grandes sequías y épocas recurrentes de grandes lluvias. La Oscilación del Atlántico Norte es un fenómeno climático de la fluctuación en la diferencia en presión atmosférica al nivel del mar entre la baja presión en Islandia y la alta presión en las Azores. Este fenómeno influye sobre Puerto Rico más que El Niño y controla la fuerza y dirección de los huracanes en el Atlántico.

¿Cuál es el significado de los extremos climáticos? -- Los extremos climáticos en Puerto Rico son las sequías prolongadas, las lluvias intensas y continuas y los huracanes y tormentas. Todos son recurrentes por lo que es necesario preparar a la infraestructura y la ciudadanía para enfrentarlos. Algunas lluvias en Puerto Rico son generalmente intensas pero de corta duración. Estas son lluvias asociadas a procesos convectivos locales; es decir, calentamiento, ascenso, enfriamiento y condensación de masas de aire locales. Las lluvias asociadas a los frentes, ondas, vaguadas, tormentas y huracanes son intensas y de larga duración. Tanto las lluvias de corta como las de larga duración, pueden causar inundaciones y desprendimientos de tierra. Durante estos eventos la producción de sedimentos aumenta considerablemente. Normalmente ocurren periodos de poca precipitación durante pocos meses, pero ocasionalmente ocurren sequías prolongadas que dramáticamente reducen la precipitación anual. Estos eventos crean problemas para los sistemas naturales y urbanos debido a que los ríos reducen sus descargas a valores mínimos y los suelos pierden sus almacenajes de agua por lo que se le dificulta obtener agua para las plantas y los cultivos. En la figura 6 se observan años con mucha lluvia y años con poca lluvia. Un dato fundamental para la planificación del recurso agua es conocer la **frecuencia de recurrencia** de eventos climáticos.

¿Qué significa la frecuencia de recurrencia de un evento de lluvia? -- La frecuencia de recurrencia de un evento de lluvia indica en años el tiempo promedio en que un evento en particular se repite. Por ejemplo, en la figura 7, un evento de lluvia de 559 milímetros (22 pulg) en 24 horas para la estación seleccionada tiene una frecuencia de recurrencia de 100 años, mientras que un evento de lluvia de 1,016 milímetros (40 pulg) en 30 días tiene también una frecuencia de recurrencia de 100 años.

¿Cómo se calcula la frecuencia de recurrencia de lluvia? -- Las curvas de frecuencia de recurrencia de lluvias se basan en el récord histórico en las estaciones donde se calculan el intervalo de recurrencia en años. Una vez se ha calibrado una estación para determinar estos intervalos, los eventos se comparan con la curva publicada por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica. Las revisiones se hacen luego de un número de años de colección de datos que provea una serie de datos estadísticamente significativos. Por ejemplo, hasta el 2005 se utilizaban las curvas del documento identificado como

[3]El Niño es un fenómeno atmosférico sobre el océano Pacífico que tiene como efecto el cambio de la dirección de los vientos y corrientes marinas entre América del Sur y Australia. Como consecuencia, el clima en la región cambia y se observan efectos en todo el planeta, como en el Caribe, donde el patrón de lluvia y la frecuencia de huracanes cambian. Se le llama el fenómeno de El Niño porque inicialmente sus efectos se notaban en la época navideña.

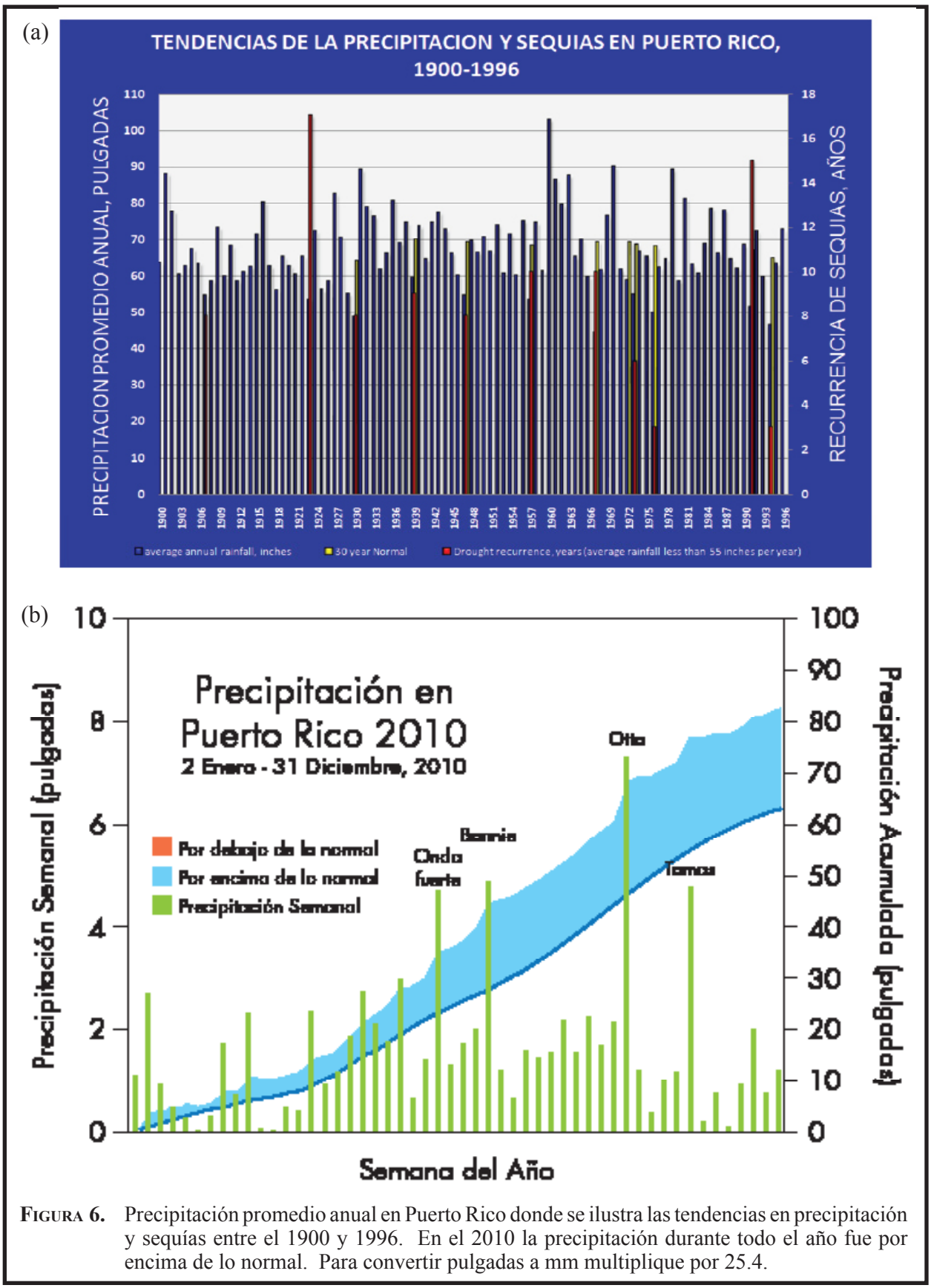


Figura 6. Precipitación promedio anual en Puerto Rico donde se ilustra las tendencias en precipitación y sequías entre el 1900 y 1996. En el 2010 la precipitación durante todo el año fue por encima de lo normal. Para convertir pulgadas a mm multiplique por 25.4.

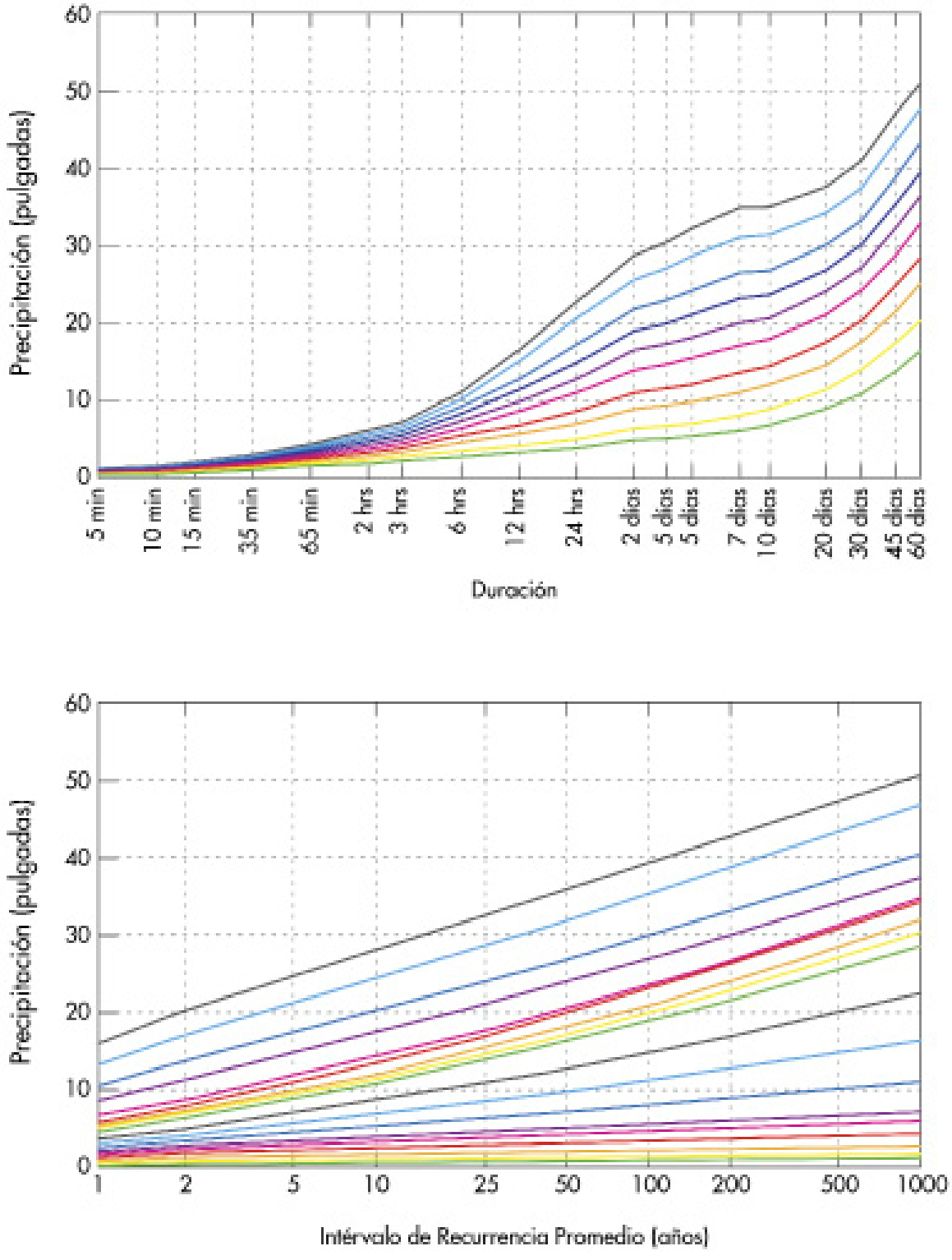


Figura 7. Curvas de frecuencia de lluvias en una estación meteorológica en Puerto Rico (coordenadas 18.2000, -66.2500) basado en Bonnin et al. (2006). Para convertir pulgadas a mm multiplique por 25.4. Esta figura se obtuvo de la página electrónica del Servicio Nacional de Meteorología.

TP-42, publicado en 1961 con una revisión en 1965. En el 2006 la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica publicó una nueva revisión de este documento que tiene todas las curvas de frecuencias actualizadas para lluvias de 24 horas en Puerto Rico e Islas Vírgenes (Bonnin et al. 2006). Las revisiones a estos documentos no se hacen hasta que no aumente significativamente el número de eventos que puedan o no resultar en revisiones a las curvas.

¿Dónde se almacena el agua cuando no está lloviendo? -- El agua dulce se almacena naturalmente en los **humedales**, los acuíferos, las **lagunas** y en los suelos. Desde estos almacenajes el agua fluye al mar por ríos, quebradas, pozos y manantiales. El agua también se almacena artificialmente en embalses, cisternas y tanques de agua de donde fluye por tuberías a los usuarios.

¿Cuál es el balance de agua en Puerto Rico? -- El balance de agua de Puerto Rico se presenta en pulgadas en la figura 1 y aquí lo hemos convertido a millones de galones por día usando un área de 3,340 mi^2 (8,651 km^2) para la Isla. La lluvia promedio es de 12,078 millones de galones por día (529.2 m^3/s), de los cuales se evapora el 59.2 por ciento. El restante 40.8 por ciento se distribuye en escorrentía que va de los ríos al mar (35.8 por ciento de la lluvia), el agua que recarga los acuíferos (3.6 por ciento de la lluvia), el agua que se almacena en los embalses (1.3 por ciento de la lluvia) y el agua directamente consumida por la gente (0.1 por ciento de la lluvia). El almacenaje de agua en los acuíferos es equivalente a tres veces la lluvia anual y 245 veces el almacenaje en los embalses.

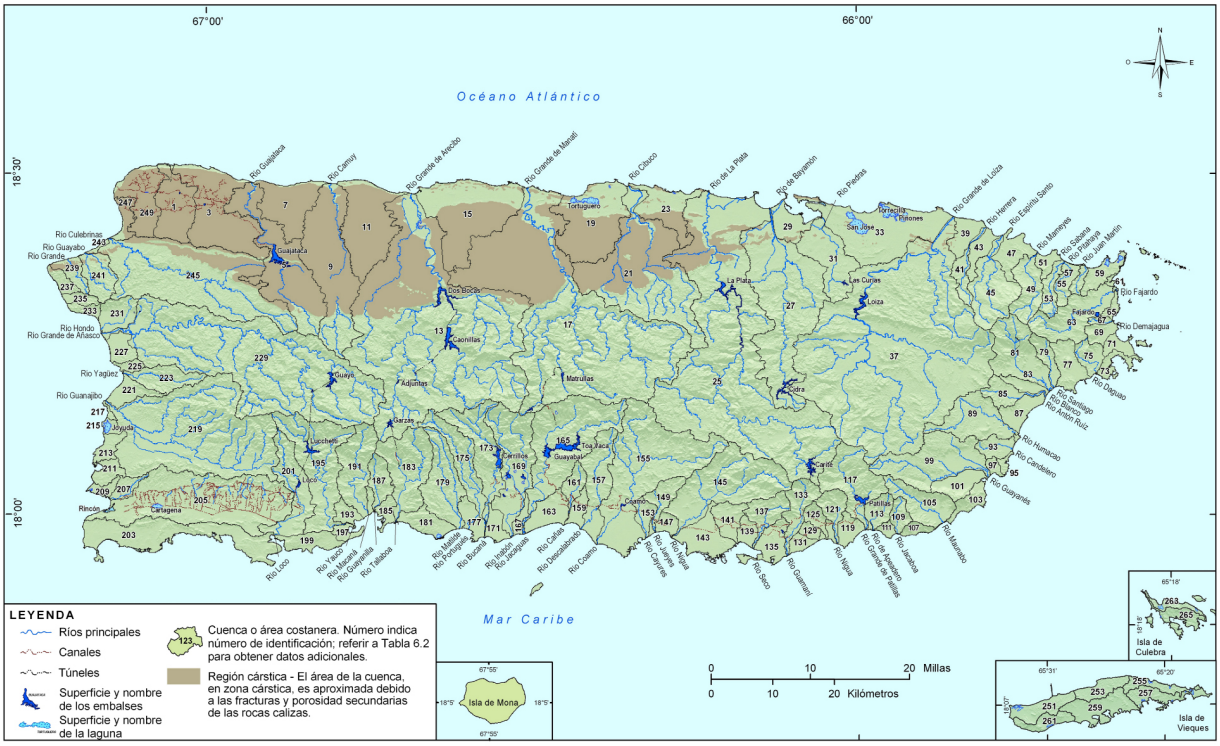
CUENCAS HIDROGRÁFICAS

¿Qué es una cuenca hidrográfica? -- Una cuenca hidrográfica es toda el área de terreno que contribuye al flujo de agua en un río o quebrada. También se conoce como el área de captación de agua. Todo sistema acuático, no importa su designación (río, quebrada, lago, laguna, humedal, **estuario**, embalse, acuífero, manantial o **pantano**), tiene un área de captación o un área de terreno donde se recolectan sus aguas.

¿Cuáles son las cuencas hidrográficas más importantes de Puerto Rico? -- Puerto Rico se divide en cuatro grandes regiones dentro de las cuales se ubican las cuencas de los ríos principales de la Isla (Figs. 3 y 8). La región más extensa y más húmeda incluye los ríos que fluyen hacia la costa norte: los ríos Grande de Loíza, Piedras, Bayamón, Grande de La Plata, Grande de Arecibo, Grande de Manatí y Guajataca. Le sigue en magnitud las cuencas del oeste, que incluye los ríos Culebrinas y Grande de Añasco. La región sur incluye un gran número de cuencas, desde Patillas hasta Guanajibo, pero en general, la lluvia menor en laderas del sur resulta en ríos de menor caudal que en el norte y oeste. Las cuencas del este, que incluye los ríos Fajardo y Blanco, aunque de menor tamaño, producen grandes cantidades de agua debido a la gran cantidad de lluvia sobre la zona. La cuenca hidrográfica más grande en Puerto Rico es la del Río Grande de Loíza.

¿Cómo funcionan las cuencas hidrográficas? -- Las cuencas hidrográficas reciben agua de lluvia, la transportan al mar, la regresan a la atmósfera o la almacenan temporalmente en los suelos y acuíferos. La lluvia que cae sobre la cuenca hidrográfica tiene tres rutas alternas de transporte en su retorno al mar o la atmósfera: (1) puede evaporarse; (2) puede infiltrar el terreno; o (3) puede correr sobre la superficie en función a la topografía y las pendientes. El agua que se evapora retorna a la atmósfera. El agua que se infiltra puede almacenarse en el suelo o en los acuíferos o puede moverse por gravedad subterráneamente hasta llegar al río, quebrada, manantial o al océano. El agua que corre sobre la superficie se mueve por gravedad hasta el río o quebrada, puede infiltrarse a medida que corre o puede evaporarse y retornar a la atmósfera. Los

Figura 8. Mapa de las cuencas hidrográficas de Puerto Rico donde se ilustran los principales ríos y embalses.



suelos en las cuencas hidrográficas se pueden comparar con una esponja. Estas absorben una gran cantidad de agua de lluvia en un período corto y van liberando esta agua en períodos de tiempo más largos.

El agua retenida en los suelos y contenida en los acuíferos en las cuencas hidrográficas es lo que mantiene a los ríos y quebradas con agua. Para que los ríos y quebradas siempre tengan agua tienen que ocurrir dos cosas. En primer lugar, la lluvia que cae debe ser suficiente para infiltrarse en los suelos y acuíferos a la vez que repone el agua que retorna a la atmósfera por evaporación y la que discurre en escorrentía al mar. En segundo lugar, el agua necesita tiempo y las condiciones adecuadas para infiltrarse antes de llegar al cauce de los ríos y quebradas. Si no hay tiempo suficiente ni oportunidad de infiltración, aumenta la escorrentía y el agua se escapa al mar y como resultado los ríos tienden a secarse.

¿Cómo se relacionan las características de una cuenca hidrográfica con la cantidad de agua en esta? -- La cantidad de agua en una cuenca hidrográfica depende de: la cantidad de lluvia que recibe y el tamaño y la forma de la cuenca. El tamaño y la forma de la cuenca incluyen sus pendientes, el área de captación, la geología, el tipo de suelo y los usos del terreno. Bajo condiciones normales, mientras más grande la cuenca hidrográfica, mayores son las descargas de los ríos. De igual manera, su extensión geográfica permite que mientras en la parte baja de una cuenca no esté lloviendo, en las partes altas llueva copiosamente, causando grandes descargas en las partes bajas. La orientación y elevación de la cuenca con respecto a los sistemas que traen lluvia regula su

pluviosidad o cuan húmeda va a ser la cuenca. Por otro lado, la presencia de rocas calizas y suelos arenosos permite mayor infiltración. En comparación a las rocas calizas, las rocas volcánicas y los suelos arcillosos permiten más escorrentía y menos infiltración. El alto grado de pavimentación restringe la infiltración y aumenta la escorrentía.

¿Por qué los ríos tienen agua cuando no llueve? -- Las cuencas hidrográficas almacenan el agua de lluvia en los suelos, en los humedales y en los acuíferos, y de esos almacenajes el agua fluye lentamente a los cauces de los ríos y quebradas de suerte que aun durante periodos sin lluvia, estos reciben agua de su cuenca hidrográfica. Esta escorrentía en la época de sequía define lo que llamamos **flujos mínimos**.

¿Cuáles son los principales procesos geológicos en las cuencas hidrográficas? -- Hay cuatro procesos geológicos principales en las cuencas hidrográficas: **lixiviación**, **desgaste de rocas**, **erosión** y **sedimentación**.

¿Qué es lixiviación? -- El lavado o solución y transporte de sustancias químicas (nutrientes o minerales) de la superficie en la cuenca hidrográfica se conoce como lixiviación. Las superficies que se lavan son los suelos, las hojas de las plantas, la hojarasca sobre el piso del bosque y otras partes vegetales. Mientras más pura el agua, más capacidad tiene para lixiviar. Las sustancias lixiviadas se mantienen en solución y se transportan con las aguas de infiltración o las aguas de escorrentía.

¿Qué es el desgaste de rocas? -- El desgaste de rocas resulta en la formación de suelos por los efectos del clima y las reacciones químicas y físicas en la superficie de las rocas.

¿Qué es erosión? -- Erosión es el proceso por el cual el suelo se fractura o se fragmenta en partículas individuales o sedimentos y se transporta a otros lugares.

¿Qué es sedimentación? -- Sedimentación es el proceso por el cual se depositan las partículas creadas y transportadas por la erosión.

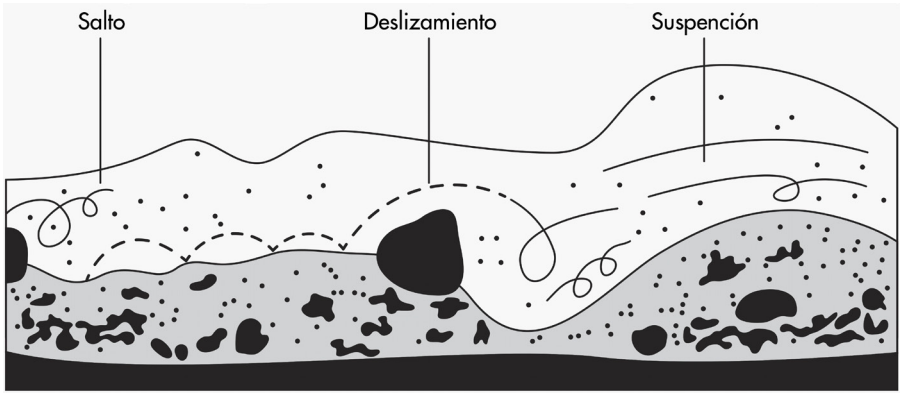
¿Cuáles son las causas de la erosión y la sedimentación? -- La fuerza con que caen las gotas de lluvia sobre el suelo más la energía de la escorrentía, es decir la velocidad del agua sobre el terreno, son las causas de la erosión y del transporte de sedimentos en la cuenca hidrográfica. Mientras más empinada la topografía, más rápido o con más energía se mueven las aguas y por lo tanto, la intensidad de estos procesos aumentará. La intensidad de la lluvia también aumenta la erosión. El viento sobre terrenos sin cubierta vegetal también puede causar erosión.

¿Cómo se afecta la susceptibilidad de una cuenca a las fuerzas de erosión y lixiviación? -- La susceptibilidad de una cuenca a las fuerzas de erosión y lixiviación depende del tipo de formación geológica y de suelo existente y del tipo y cantidad de material orgánico acumulado sobre este. La presencia de cubierta vegetal en forma de yerbas, arbustos y árboles contribuye a reducir la erosión y retener los suelos en las laderas de las cuencas al reducir los procesos de lixiviación, erosión y sedimentación[4]. Por ejemplo: la capa vegetal absorbe la energía del impacto del agua, aumenta la infiltración y la evaporación y disminuye la escorrentía; las raíces absorben nutrientes y evitan su pérdida; los animales como las lombrices de tierra y las hormigas hacen huecos que aumentan la infiltración y el almacenaje de agua; la hojarasca absorbe la energía de la escorrentía y reduce la erosión; el suelo filtra el agua y la purifica; rocas, árboles caídos, pozas de agua, y **meandros** en los cauces de los ríos desaceleran la velocidad del agua, ayudan a

[4]Procesos como la evolución de bióxido de carbono por la respiración en los suelos, pueden duplicar la solución de minerales en las aguas de percolación.

retener sedimentos y mejoran la calidad del agua. Los ríos y quebradas alternan entre la erosión y sedimentación (deposición) a lo largo de sus cauces y siempre la tendencia es hacia un balance entre los dos procesos.

¿Qué factores afectan el transporte de sedimentos en una cuenca hidrográfica? -- Los sedimentos producto de la erosión son generalmente transportados desde la parte más alta de las cuencas por las aguas de escorrentía en las quebradas y ríos llegando finalmente al mar. Sin embargo, la habilidad de las aguas de escorrentía para transportar sedimentos es función de su velocidad de flujo y del tamaño de los sedimentos (Fig. 9a). A más velocidad de flujo, mayor la capacidad para transportar sedimentos. Cuando las aguas pierden velocidad, tienden a depositar su carga de sedimentos y ocurre entonces la sedimentación. Los sedimentos más finos son transportados por más distancia que los gruesos. Los embalses de agua se sedimentan cuando las aguas de escorrentía pierden velocidad al llegar al embalse y primero depositan los materiales más gruesos seguido de los más finos de



(a)

(b)

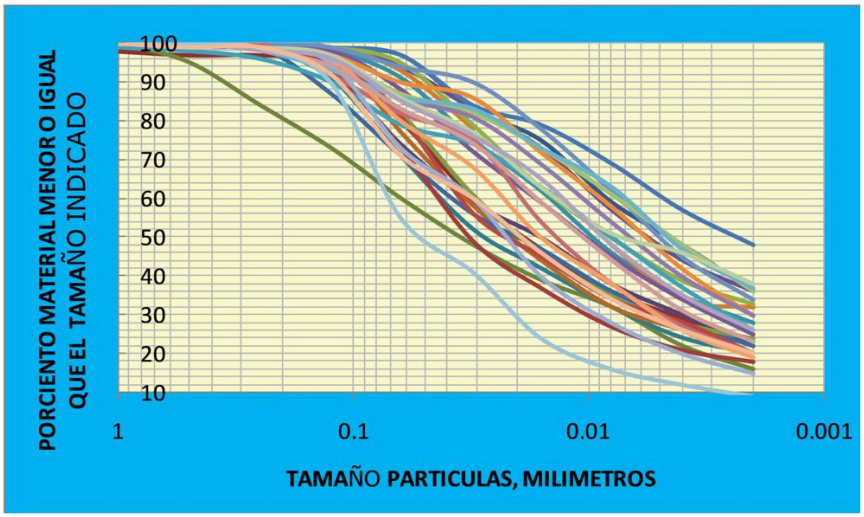


Figura 9. (a) Capacidad de acarreo de un río y su relación al tamaño del sedimento. Los sedimentos más finos se quedan en suspensión y son arrastrados por la corriente mientras que los más grandes se mueven muy poco. Las rocas grandes sólo se arrastran durante grandes descargas. (b) Distribución del tamaño de las partículas de sedimentos en ríos de Puerto Rico. Cada línea representa un río. La diversidad y variación de los tamaños de partículas en los ríos es significativa.

acuerdo a cuánto tiempo permanece el agua en el embalse.

¿Cómo varía el tamaño de partículas de sedimento en las aguas de los ríos? -- La variación en el tamaño de las partículas de sedimentos en las aguas de los ríos es muy amplia (Fig. 9b), por lo que requiere ser medida para poder estimar el efecto de las aguas en procesos hidrológicos, geológicos y ecológicos.

¿Cómo se mantiene la calidad de las aguas en las cuencas hidrográficas? -- El agua cambia en calidad a medida que fluye por la cuenca hidrográfica. En términos generales, las aguas tienen su máxima pureza en las partes altas de las cuencas hidrográficas y se van cargando de sedimentos, nutrientes y minerales a medida que fluyen por las superficies de la montaña, entran a los valles y llegan al mar. La mayor parte de los ríos en Puerto Rico sufre de contaminación de sus aguas con bacterias y nutrientes, y la concentración de estos y otros contaminantes aumenta a medida que el agua avanza hacia el mar. Los mecanismos de conservación de suelos de la cuenca hidrográfica generalmente contribuyen a mantener la calidad del agua, aunque durante eventos de grandes lluvias las aguas siempre fluyen cargadas de sedimentos, aun bajo cubierta total de vegetación natural. Sin embargo, la cantidad de sedimentos producidos por un mismo evento en un área con cobertura vegetal, aunque alta, es generalmente mucho menor que la cantidad de sedimentos en un área equivalente sin vegetación.

RÍOS Y QUEBRADAS

¿Qué es un río? -- Un río es una corriente de agua superficial, continua y más o menos caudalosa que va a desembocar en otra corriente o en el mar. Los ríos existen en forma perenne o intermitente. Los ríos perennes tienen agua todo el año, mientras que los intermitentes tienen agua sólo durante la época de lluvia. Esencialmente todos los ríos en la región norte de la Isla son perennes, mientras que muchos de los ríos en los valles de la región sur son intermitentes debido a la menor lluvia en esa zona y la construcción de represas para riego (Foto 1) y producción de agua potable.

¿Qué es una quebrada? -- Una quebrada es un arroyo o riachuelo que corre por una quiebra, hendedura o abertura de la tierra entre los montes. Al igual que los ríos, las quebradas pueden ser perennes o intermitentes.

¿Dónde están los ríos y quebradas en Puerto Rico? -- La figura 10 ilustra los ríos, quebradas y canales principales de Puerto Rico. Estos sistemas permean a casi toda la isla similar a como el sistema vascular permea nuestros cuerpos. Los nombres de los ríos principales aparecen en la figura 8. En la región montañosa central se originan miles de quebradas que forman unos 70 ríos que fluyen hacia los valles costaneros del norte, sur, este y oeste. Muchos de los ríos que fluyen hacia el norte se combinan en cauces principales, y a través de la **región del carso**[5] (zona cársica o karso) desde San Juan hasta Aguadilla fluyen solamente ocho ríos (Piedras, Bayamón, Grande de La Plata, Cibuco, Grande de Manatí, Grande de Arecibo, Camuy y Guajataca). Algunos ríos como el Camuy, el Tanamá, y el Guajataca desaparecen por sumideros y se convierten en ríos subterráneos en tramos cortos. El Río Piedras es un río urbano con la totalidad de su cuenca ubicada en el Municipio de San Juan. Los ríos del este de Puerto Rico se distinguen por tener una alta cantidad de tributarios debido a la gran cantidad de lluvia en la sierra de Luquillo. Los ríos del noroeste tienen una menor cantidad de tributarios debido a que hacia el norte bordean la región del carso

[5]La región del carso se extiende mayormente desde Loíza hasta Aguadilla, cubre el 27 por ciento de Puerto Rico y se caracteriza por sus rocas calizas de carbonato de calcio (Lugo et al. 2001).

Foto 1. Vista aérea (izquierda) y foto del embalse Garzas (derecha). En la foto aérea la represa se ve en la parte superior derecha y las áreas de captación cercanas al embalse están forestadas. En la foto de la derecha se ve la toma y las aguas relativamente claras del embalse (fotos de Alberto M. Lázaro de la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados).

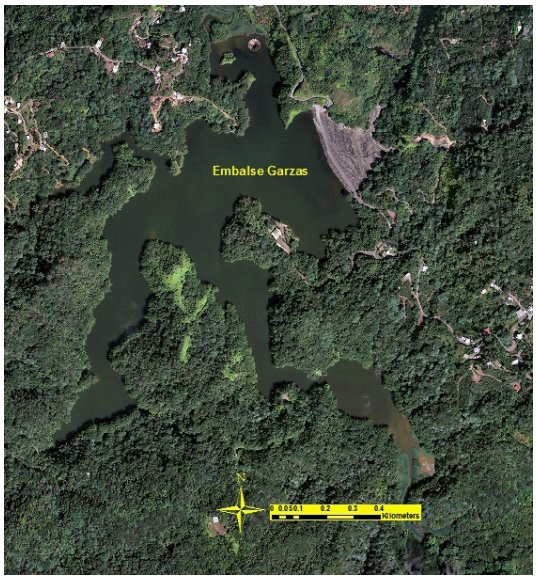
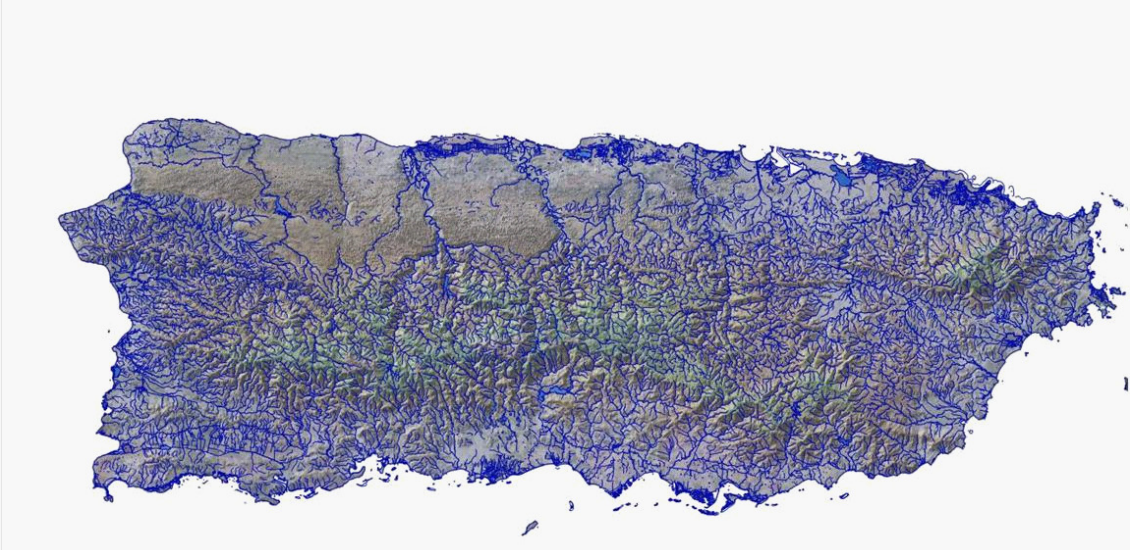




Figura 10. Los ríos, quebradas y canales de Puerto Rico según los datos del Servicio Geológico de los Estados Unidos de América. En la región del carso al noroeste, los ríos son predominantemente subterráneos y por eso la densidad de cauces es menor en esa región.



donde no ocurren muchas quebradas ni ríos. La ausencia de ríos, quebradas o canales en la zona noroeste de Puerto Rico se debe a que en la zona de rocas calizas la mayor parte del agua se infiltra al subsuelo y fluye subterráneamente. La alta porosidad de las rocas calizas y la presencia de sumideros y cuevas en toda la región explican la alta infiltración. En general, los ríos de Puerto Rico son cortos, de poca profundidad y con pendientes empinadas (Fig. 11).

¿Cómo se caracterizan los ríos y quebradas? -- Los ríos y quebradas se caracterizan por su tamaño y ubicación en forma similar al sistema vascular o al de carreteras, donde cauces pequeños convergen y forman cauces cada vez más grandes. A cada tributario se le asigna un valor numérico correspondiente al orden del río o quebrada y de esa manera se clasifica el cuerpo de agua objetivamente. Existen varios métodos para clasificar los ríos y quebradas. La figura 12 ilustra el sistema de Strahler. La efectividad de la clasificación depende de la resolución espacial en que se esté trabajando. Mientras mayor es la resolución, más precisa es la clasificación porque se logra captar quebradas que en mapas con menos resolución espacial no se observan (Fig. 13).

¿Cómo funcionan los ríos y quebradas? -- El funcionamiento del río o quebrada varía de acuerdo al lugar por donde fluye. En su paso de la montaña al mar, los ríos y quebradas fluyen por cuatro regiones contrastantes: (1) la región de origen; (2) las pendientes intermedias a elevaciones intermedias; (3) los valles aluviales; y (4) la región estuarina.

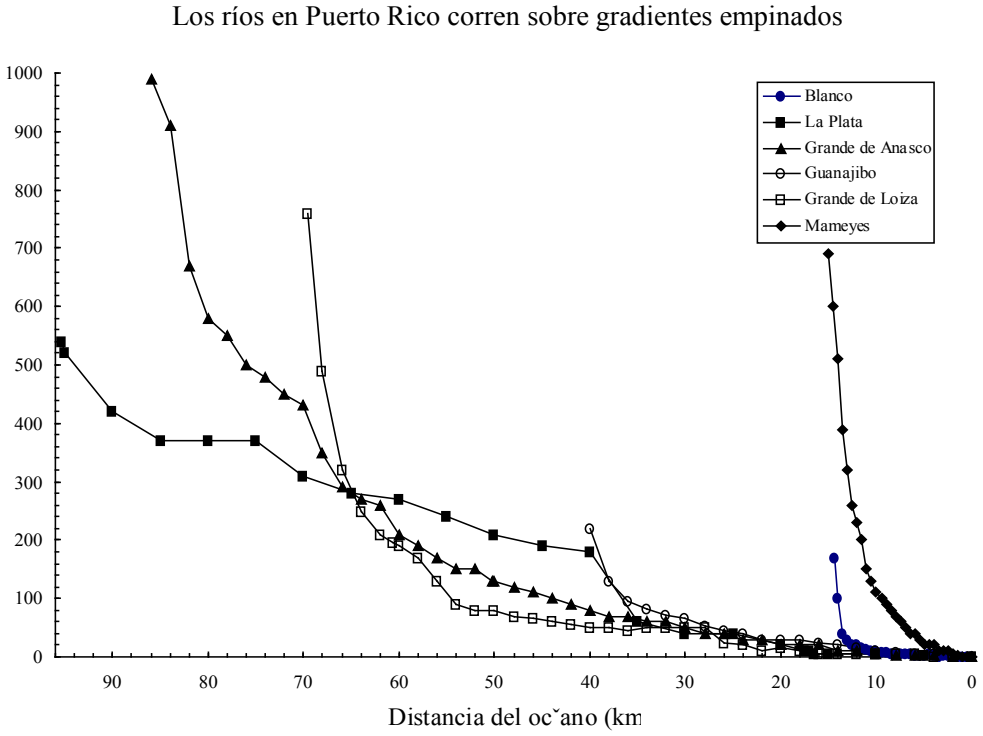
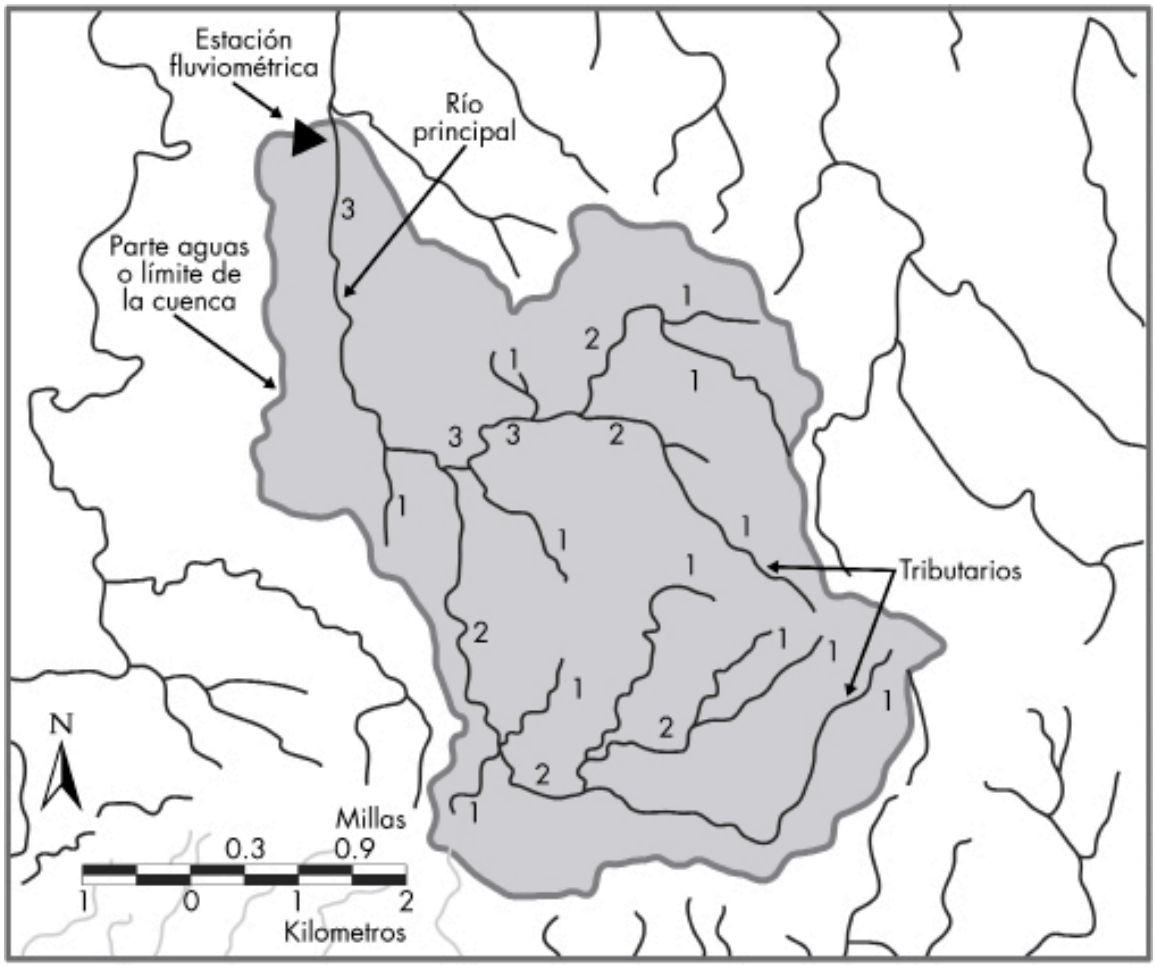


Figura 11. Perfiles de seis ríos en Puerto Rico. Se han seleccionado: Grande de La Plata por ser el río más largo, el Mameyes por tener la caída más perpendicular, el Blanco por ser el de origen a menor elevación, Grande de Añasco por ser el de origen con mayor elevación y el Grande de Loíza por tener el valle más largo.

Figura 12. Sistema de clasificación Strahler aplicado a los ríos y quebradas de la cuenca hidrográfica del río Canóvanas aguas arriba de la estación fluviométrica. Las cabeceras fluviales se clasifican como quebradas de orden 1. Cuando dos quebradas de orden 1 se encuentran, se forma una quebrada de orden 2. Cuando dos quebradas de orden 2 se encuentran, se forma un río de orden 3. Cuando un cuerpo de agua de menor orden se encuentra con un cuerpo de agua de mayor orden el cuerpo de agua resultante conserva la clasificación del mayor de las dos órdenes. Todos los ríos y quebradas fluyen hacia la estación donde se mide la descarga de toda la cuenca.



En su origen los ríos tienen altas pendientes, cauces pequeños, valles de limitada extensión y laderas empinadas. A medida que continúa su trayectoria al mar, el río adquiere cauces más grandes y profundos y dependiendo de los alrededores, sus valles aumentan en tamaño. Los ríos "cortan" sus valles y forman cañones cuando el corte vertical es mayor a su movimiento lateral. Los cañones también se forman por movimientos tectónicos. Como resultado, el río crea la impresión de estar encañonado, como ocurre en el río Usabón cuando atraviesa por el cañón de San Cristóbal. Los ríos forman cataratas en regiones con fallas geológicas donde las rocas se han desplazado unas en referencia a otras creando un desnivel en el cauce, el cual se convierte en la catarata (Foto 2). La catarata más alta de Puerto Rico ubica en el río Sanamuerto, tributario del Río Grande de Manatí entre Orocovis y Morovis. Generalmente los ríos forman pozas y canales a medida que bajan de la montaña. En las pozas, el agua se retiene por más tiempo ya que es más profundo el cauce. En los canales el agua fluye con más rapidez por ser el canal más llano.

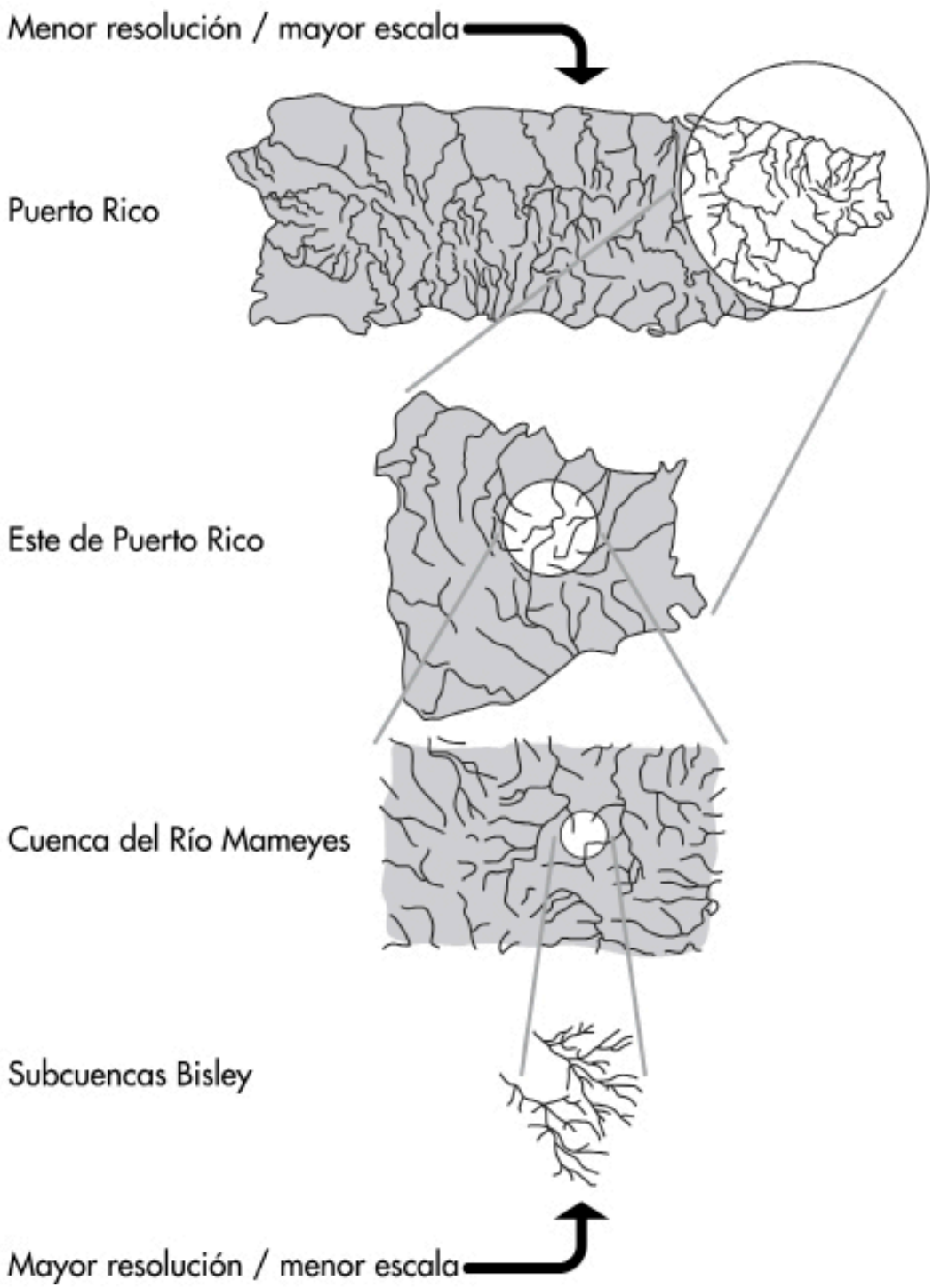
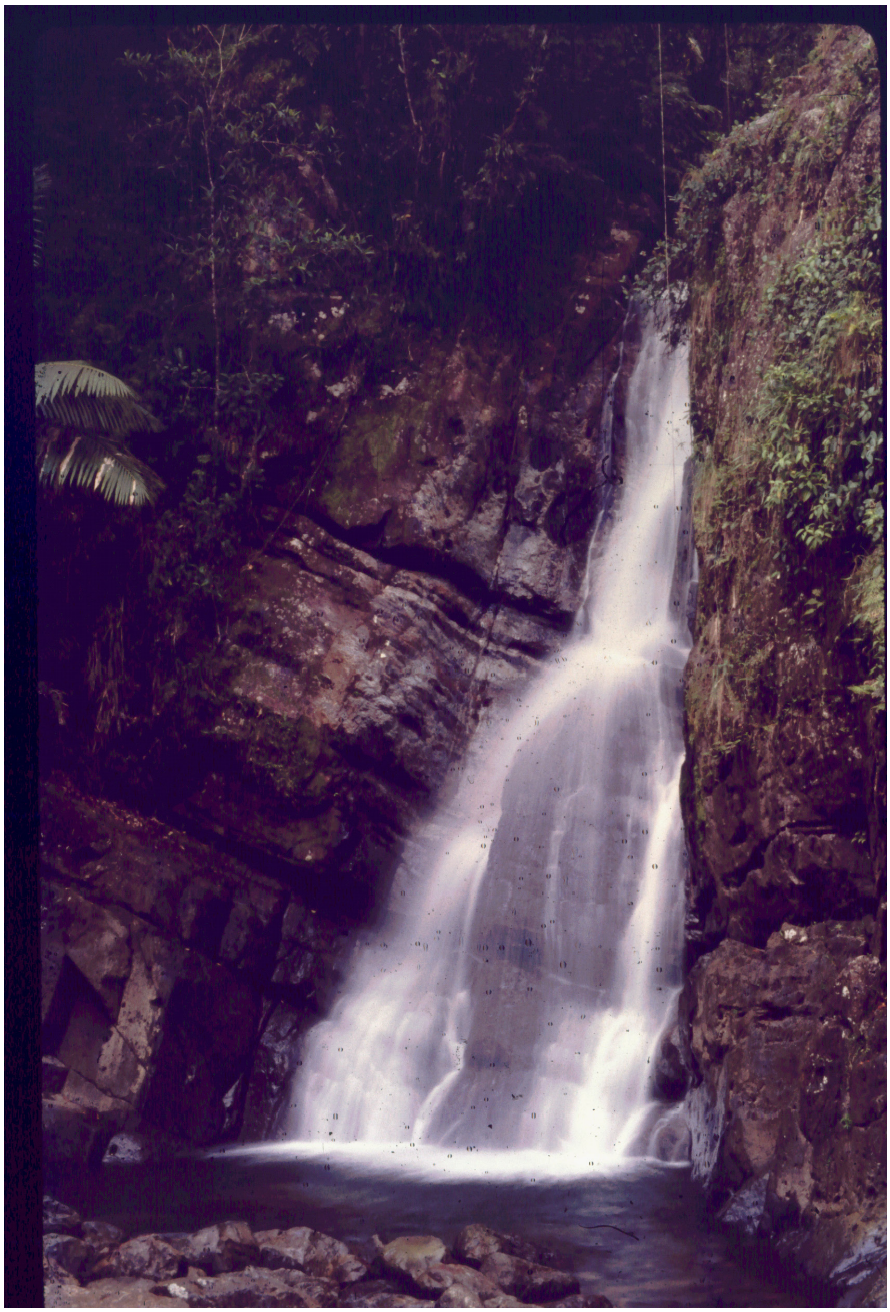


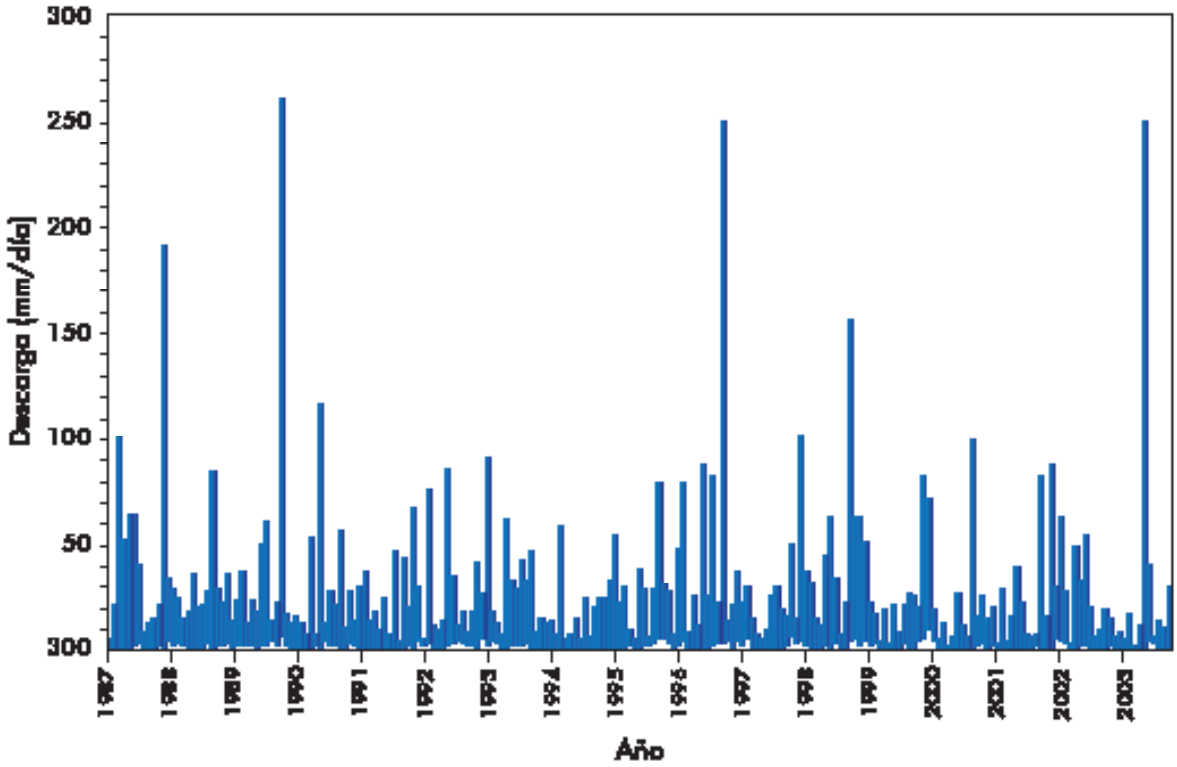
Figura 13. Ilustración de cómo la escala espacial de análisis afecta la resolución en la detección de ríos y quebradas. La primera ilustración es un mapa de los ríos principales de Puerto Rico. Luego se aumenta la escala espacial para ilustrar los ríos del este de Puerto Rico y esta se aumenta nuevamente para ilustrar los tributarios del río Mameyes. Finalmente se aumenta la escala espacial para ilustrar las quebradas en el sector Bisley del río Mameyes, donde se llevan a cabo estudios detallados de los ríos y quebradas. Los cuerpos de agua de Bisley no aparecen en las ilustraciones anteriores y sólo se revelan cuando la escala espacial de análisis es muy fina.

Foto 2. Catarata La Mina en el Bosque Nacional El Yunque (foto de Jerry Bauer del Servicio Forestal de los Estados Unidos de América).



El flujo del río o quebrada (también conocido como la descarga) varía constantemente dependiendo de la lluvia (Fig. 14). Sin embargo, se notan dos estados de flujo contrastantes. El **flujo base** del río es el flujo normal cuando no está lloviendo. Ríos con cuencas grandes y alta cobertura boscosa tienden a tener mayores flujos bases. El **flujo en alta** o de crecida es el flujo grande que ocurre a consecuencia de lluvias fuertes. Las lluvias fuertes causan que el río se desborde cubriendo la planicie inundable adyacente a su cauce. En ocasiones, aguaceros intensos en las partes altas de la montaña causan que el río suba de nivel súbitamente.

Figura 14. Flujo o descarga diaria de una quebrada en Bisley tributaria del río Mameyes entre el 1987 y 2003. La mayor parte del tiempo la quebrada tiene descargas bajas. Las descargas altas son esporádicas y se nota como el flujo base (los valores más bajos) varía con el tiempo.



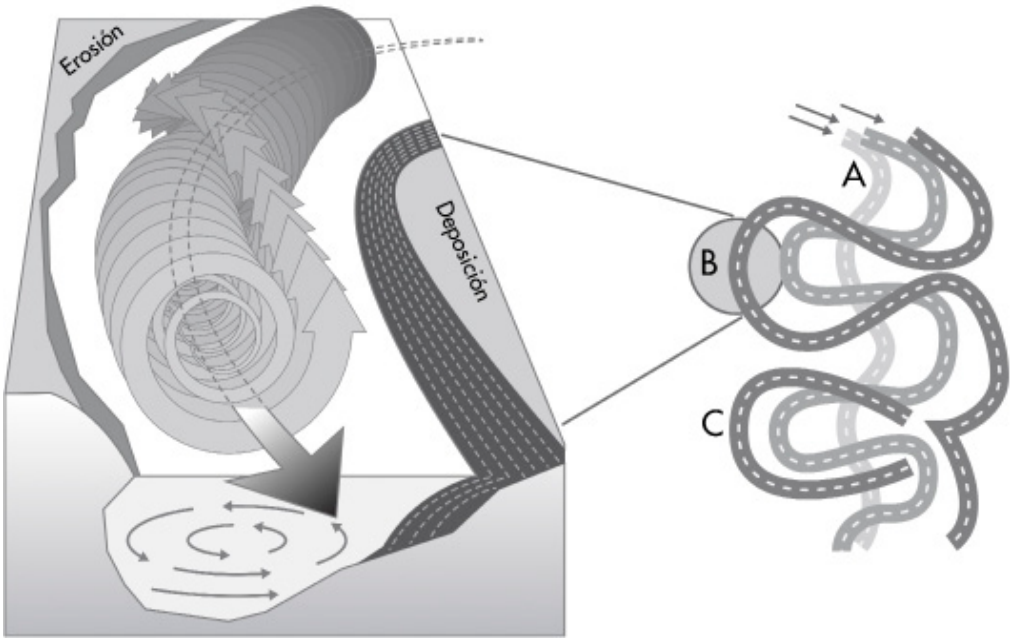
Esto se conoce como "el golpe del río" por su rapidez e intensidad.

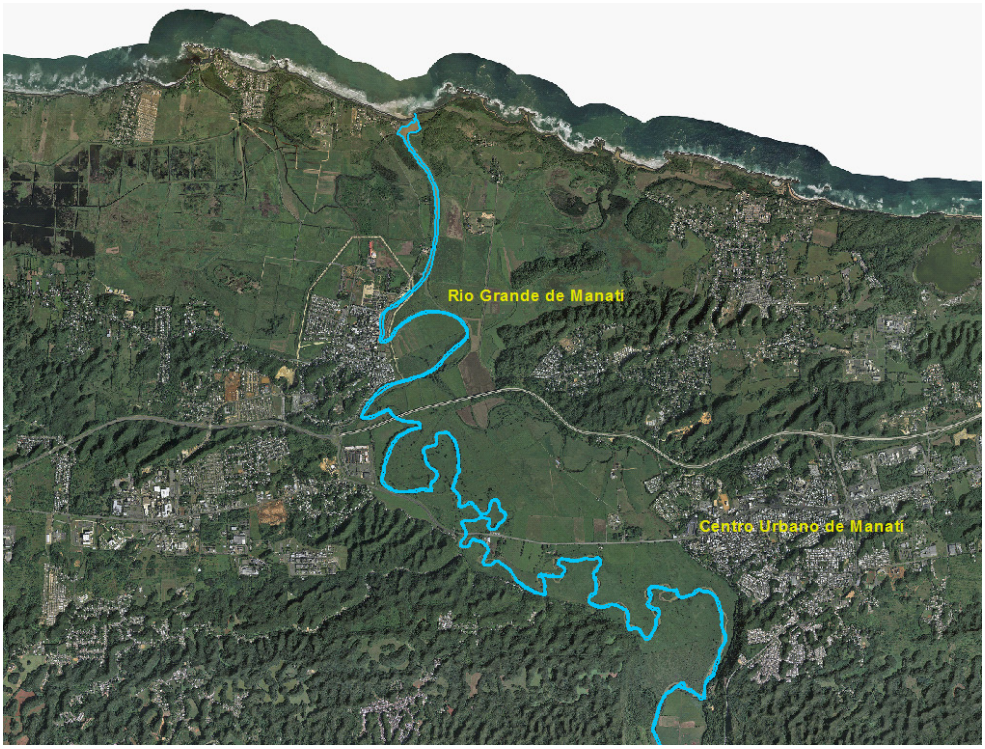
Cuando el río llega al valle, el cauce pierde gran parte de su pendiente empinada (gradiente), bajando la velocidad del agua. Esto hace que en algunos valles (Arecibo, Manatí, La Plata), el cauce tienda entonces a merodear por el valle inundable que ahora llega a su máxima extensión. El río entonces forma meandros. Meandros son las vueltas que da el río a medida que atraviesa el valle aluvial en su última etapa de flujo al mar. Estos meandros ocurren en planicies con poco relieve donde es posible que el río cambie de rumbo, abandone los meandros existentes y forme nuevos meandros (Fig. 15).

El canal o cauce del río es más ancho y más profundo a medida que se acerca al mar. Cerca de la costa, y dependiendo de la elevación del terreno, el río se mezcla con el agua de mar que sube canal arriba impulsada por la marea. Toda la zona de mezcla entre el agua del río y el agua de mar se conoce como el estuario.

¿Cuál es la importancia natural de los ríos y quebradas? -- Los ríos y quebradas son las arterias principales para el transporte de agua, nutrientes, minerales, materia orgánica, sedimentos y organismos en las cuencas hidrográficas. Son parte esencial del ciclo hidrológico y del ciclo geológico del planeta. Los ríos y quebradas hacen posible el transporte de sedimentos y minerales de las montañas a los valles y estuarios. Además, son las avenidas principales para las migraciones de organismos acuáticos entre el mar, el estuario y la montaña. Los ríos y quebradas también diluyen las aguas contaminadas, proveen

Figura 15. Diagrama (arriba) e imagen (abajo) del desplazamiento lateral de un río en el valle aluvial. Las volteretas se conocen como meandros. Los ríos pueden cambiar de curso a medida que forman nuevos meandros y abandonan los anteriores. Por ejemplo, el río Grande de Loíza en una ocasión desembocaba por el área de Boca de Cangrejos. Aquí se ilustran los meandros del río Grande de Manatí. A) cause inicial del río, B) modificación del cauce inicial del río por causa de la erosión y la deposición natural de sedimentos, y C) cauce final del río.





recreación, transportación, fuentes de abasto de agua y alimentación por medio de la pesca.

¿Cuánta agua descargan los ríos y quebradas en Puerto Rico? -- En un año promedio los ríos de Puerto Rico descargan al mar 1,350,500,000,000 galones de agua (5,111,642,500 m^3 o 1.4 trillones de galones o 5.1 billones de m^3 de agua). Esta descarga es suficiente para cubrir toda la isla con una profundidad de 0.6 metro (2 p). Esta cantidad es menor a la que cae por lluvia debido a que la descarga de los ríos es igual a la lluvia menos el agua que se evapora. En años de lluvia abundante sobre el promedio, la descarga de los ríos hacia el mar puede alcanzar hasta 4.2 trillones de galones (15.9 billones m^3), como se ilustra en la figura 16.

¿Cuánto cambia la descarga de un río o quebrada? -- La descarga del río o quebrada cambia continuamente dependiendo de cómo varían la lluvia, el tamaño de la cuenca hidrográfica, la cantidad de tributarios que drenan el río, la localización geográfica de la cuenca hidrográfica y el uso de terrenos en la cuenca. El Río Grande de La Plata descarga un promedio de 188 millones de galones por día (8.24 m^3/s) al mar, pero ese valor puede subir a 26,000 millones de galones por día (1,139 m^3/s) durante un evento de lluvia extremo o bajar a un mínimo de 2 millones de galones por día

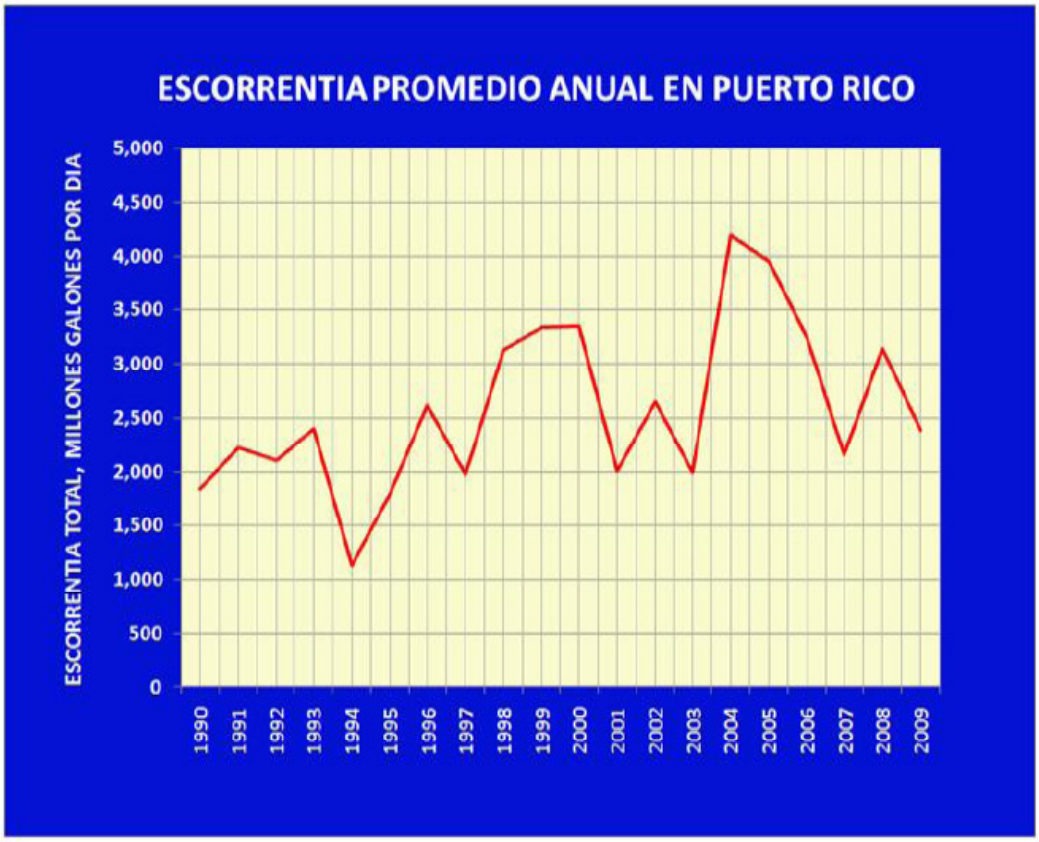
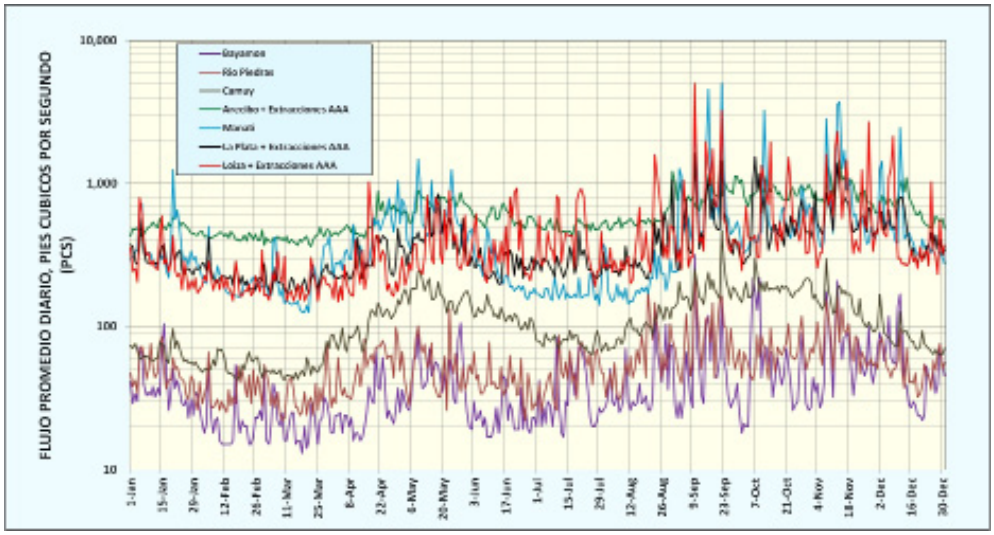


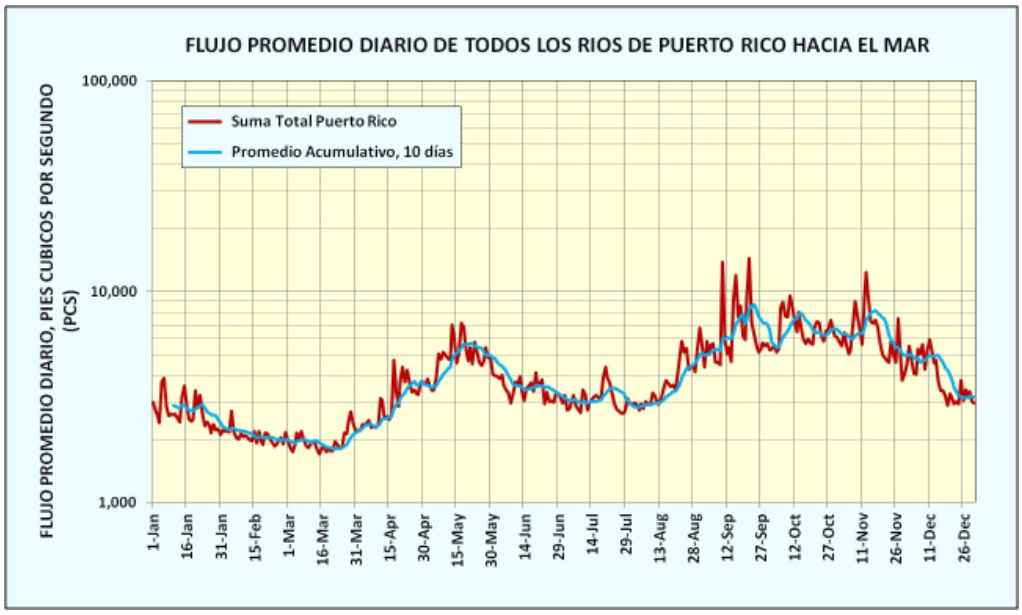
Figura 16. Descarga o escorrentía anual promedio de los ríos de Puerto Rico entre el 1990 y 2009. Para convertir mgd a m^3/s multiplique por 0.0438126365741.

Figura 17. Ciclo anual de escorrentía de siete ríos en Puerto Rico (a) y de todos los ríos de Puerto Rico combinados (b).



(a)

(b)



(0.09 m^3/s) durante una sequía. El Río Grande de Manatí tiene una descarga promedio de 247 millones de galones por día (10.82 m^3/s), pero puede aumentar a 36,000 millones de galones por día (1,577 m^3/s) o disminuir a 22 millones de galones por día (0.96 m^3/s). La Fig. 17a ilustra el ciclo anual de la descarga de siete ríos en distintas partes de Puerto Rico y la Fig. 17b combina los datos de todos los ríos de Puerto Rico para presentar un cuadro integrado de las descargas de nuestros ríos. Las variaciones en las descargas a causa de la variación en la lluvia, la posición (costa norte o sur, por ejemplo) o tamaño de la cuenca son evidentes al comparar los siete ríos. El efecto de los meses de lluvia y de sequía es evidente en la curva que combina a todos los ríos.

¿Cómo se sabe cuánta agua cargan los ríos y quebradas? -- 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 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 U.S. Geological Survey comenzó operaciones en la Isla, inclusive 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 Autoridad de Fuentes Fluviales fueron eventualmente integrados a la base de datos del U.S. Geological Survey, que ahora comprende aproximadamente 175 localizaciones en Puerto Rico, lo que incluye los niveles de agua en los embalses principales. En el año 2005, el U.S. Geological Survey operó aproximadamente 120 estaciones de escorrentía y niveles en embalses y los datos 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.

¿Cómo se expresan las descargas de los ríos y quebradas? -- La descarga de un río o quebrada se mide determinando el volumen de agua que pasa por un punto dado del río o quebrada por unidad de tiempo. Las unidades de volumen por tiempo más usadas son pies cúbicos por segundo (p^3/s) en el sistema inglés o m^3/s en el sistema métrico. Un (p^3/s) es igual a 448.831 gal/min o 0.646317 millones de galones por día. Un m^3/seg es igual a 35.31 (p^3/s).

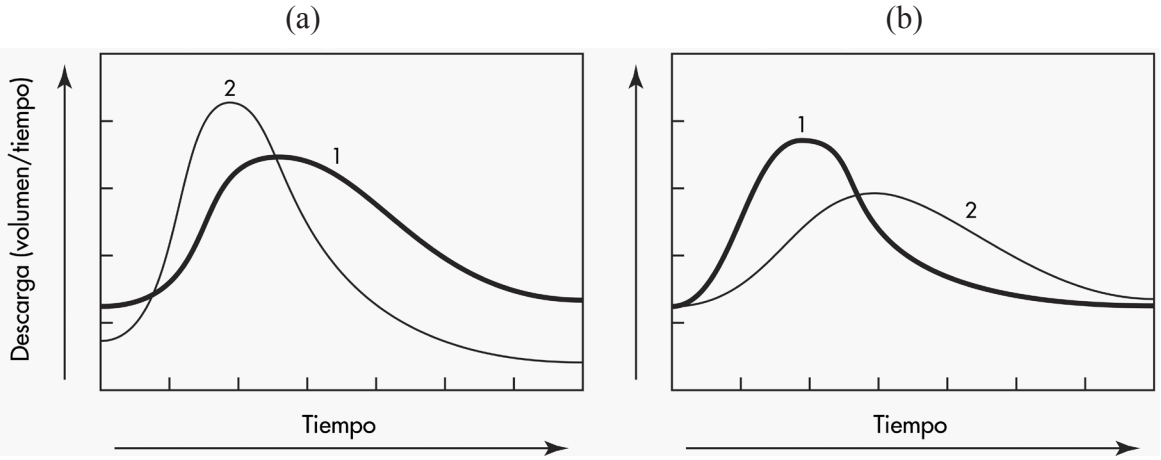
Además de la descarga también se mide la velocidad de la corriente de agua. La velocidad de la corriente es la distancia recorrida por unidad de tiempo sin alusión al volumen de agua. La velocidad de una corriente de agua se expresa en pies por segundo (p/s) o metros por segundo (m/s). Una pequeña quebrada y un gran río pueden tener aguas moviéndose a la misma velocidad pero sus descargas son muy diferentes ya que el río llevará mayor cantidad (volumen) de agua que la pequeña quebrada.

¿Cómo se interpreta el hidrograma? -- El **hidrograma** describe el flujo de agua en los ríos y quebradas. El hidrograma es una curva o relación entre la descarga y el tiempo. Describe cómo cambia el flujo en el río o quebrada como función del tiempo (Fig. 18a). Durante una crecida, típicamente el río o quebrada aumenta su descarga rápidamente, llega a una descarga máxima y sigue un descenso en descarga más lento que la subida en descarga. La descarga del río o quebrada cuando no está lloviendo se conoce como el flujo base. Las pendientes de esta curva dependen de la magnitud del evento de lluvia y las condiciones en la cuenca hidrográfica, es decir, la topografía, la geología, la vegetación y los usos de terreno.

¿Cómo se interpreta la curva de duración de flujo? -- La curva de **frecuencia de flujo** o **curva de duración de flujo** (Fig. 19) también representa el flujo de un río o quebrada. Esta curva provee información estadística sobre la recurrencia de flujos o descargas del río o quebrada. Para cada probabilidad de recurrencia de un evento, se especifica cuál va a ser la descarga del río. Por ejemplo, de esta gráfica se puede estimar qué descarga del río o quebrada se excede el 99 por ciento del tiempo, el 90 por ciento del tiempo, el 50 por ciento del tiempo, o cualquier otro por ciento del tiempo que sea de interés. Nótese que a medida que aumenta la descarga, disminuye el por ciento del tiempo en que se excede ese valor. Visto de otra forma, las crecidas máximas ocurren con menos frecuencia.

Cada uno de los por cientos en el eje horizontal inferior de la figura 19 también pueden expresarse como años de recurrencia

Figura 18. Hidrograma de un río antes (1) y después (2) de la pavimentación de su cuenca (a) y antes (1) y después (2) de entrar a un embalse (b). El tiempo depende del tamaño de la cuenca y la duración del evento de lluvia. Para cuencas pequeñas y eventos comunes el hidrograma dura horas, pero para cuencas y eventos grandes el hidrograma puede durar días o semanas.

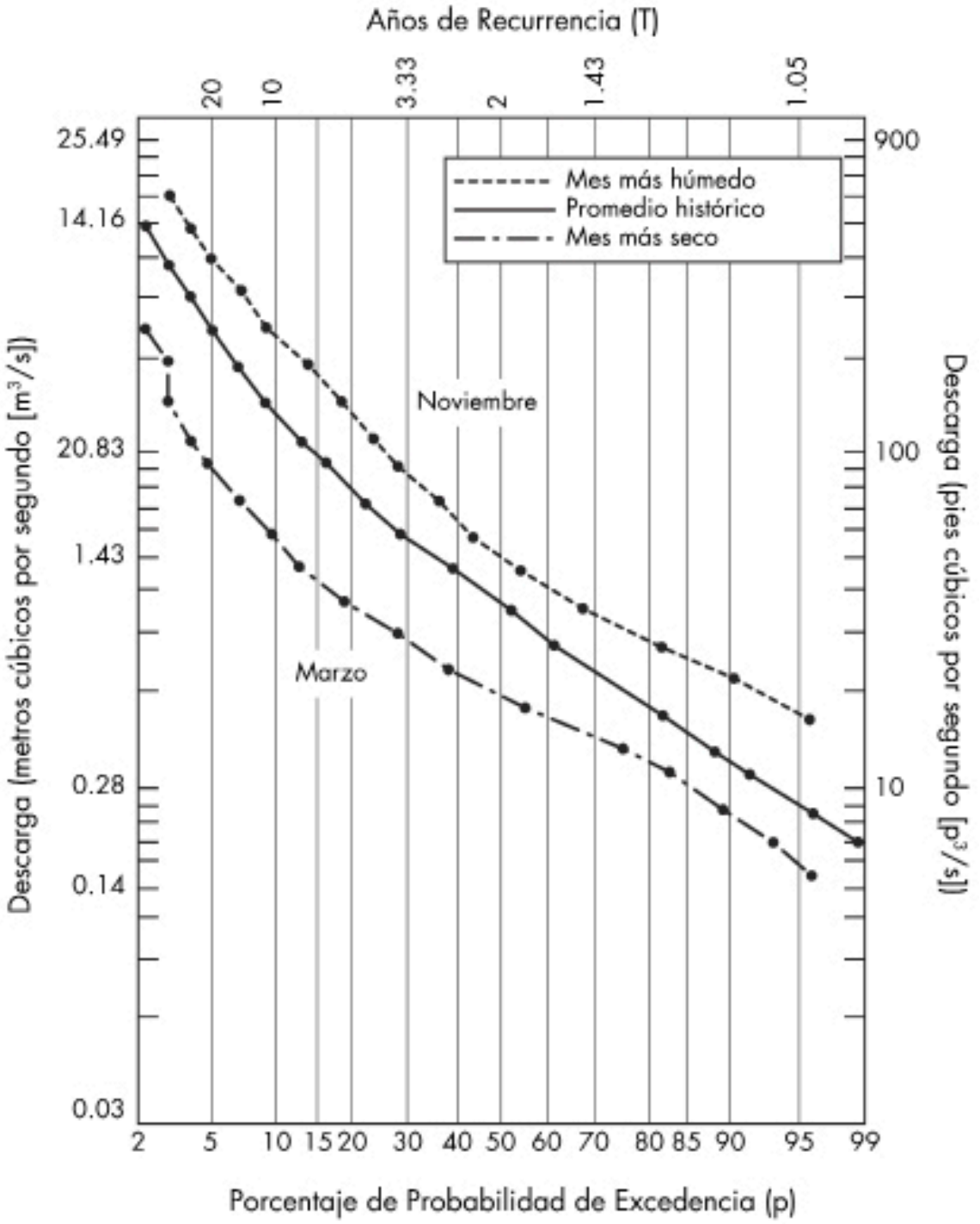


(eje horizontal superior). Una descarga que se excede 50 por ciento del tiempo equivale a una descarga de dos años de recurrencia (T = 2). Esto quiere decir que el evento ocurre en promedio cada dos años. Mientras más grande es el evento, menor es el por ciento de excedencia y mayor es el tiempo de recurrencia. Como ejemplo usemos el huracán Hortensia. Este huracán impactó el este de Puerto Rico causando un efecto distinto en las diferentes cuencas hidrográficas. Hortensia produjo una descarga de cincuenta años de recurrencia (T = 50) en el río Bayamón, una descarga de cuarenta años de recurrencia (T = 40) en el Río Grande de Manatí en Ciales y una descarga de veinte años de recurrencia (T = 20) en el Río Piedras.

¿Cuál es la utilidad de las curvas de frecuencia de flujo? -- Las curvas de frecuencia de flujo son útiles para estimar qué descarga del río o quebrada es "descarga segura" pues ocurre la mayor parte del tiempo. Para propósitos de planificación de abastos de agua se utilizan valores de descarga que exceden el 99 por ciento del tiempo. Así se asegura que ese abasto de agua estará disponible casi todo el tiempo. Para propósitos de la planificación del control de inundaciones es necesario considerar las descargas poco frecuentes, en otras palabras, las crecidas máximas.

¿Qué es el caudal mínimo requerido en un río? -- El **caudal mínimo requerido** se refiere al caudal mínimo que debe mantener el río aguas abajo del punto de medición para satisfacer demandas ecológicas. El Plan Integral de Recursos de Agua establece como regla la aplicación de un flujo mínimo requerido equivalente al Q_{99} para los ríos de Puerto Rico. Se refiere a que cualquier actividad de extracción de agua de río o manipulación de la cuenca, de manera individual o acumulativa, debe garantizar el flujo mínimo que estadísticamente está presente en ese río el 99 por ciento del tiempo. Por ejemplo, el Q_{99} del río Fajardo es de 6.3 millones de galones por día (0.28 m^3/s), lo que significa que los datos históricos de flujo indican que el 99 por ciento del tiempo el caudal en el río es de 6.3 millones de galones por día (0.28 m^3/s) o más. Ninguna actividad de extracción de agua en esa cuenca puede bajar el caudal a menos de 6.3 millones de galones por día (0.28 m^3/s).

Figura 19. Curva de duración de flujo del río Fajardo. La curva sólida es el promedio histórico del río. Las curvas entrecortadas representan el comportamiento promedio del río durante el mes de menos descarga (marzo) y el mes de mayor descarga (noviembre). El eje horizontal inferior ilustra el por ciento del tiempo que un flujo dado se excede. El equivalente en años de recurrencia para ese flujo se presenta en el eje horizontal superior. Los datos se recopilaron en la estación del río Fajardo, cercana al pueblo de Fajardo.



ACUÍFEROS

¿Qué es un acuífero? -- Un acuífero es una formación geológica subterránea de grava, arena o piedra con poros capaces de almacenar y rendir agua. Las condiciones geológicas e hidrológicas determinan el tipo y funcionamiento del acuífero. Por ejemplo, la porosidad de las rocas puede variar entre el 5 y el 20 por ciento, dependiendo del tipo de roca. En la zona montañosa central, debido a su origen volcánico, la mayor parte de las rocas tiene porosidades bajas. En comparación, las rocas calizas de la región del carso exhiben porosidades altas debido a la disolución del carbonato de calcio que las forma.

¿Cuántos tipos de acuíferos hay? -- Hay dos tipos de acuíferos: **confinados** y **no confinados** (Fig. 20). En los acuíferos confinados el agua está atrapada entre estratas impermeables de las rocas, o entre rendijas de la formación rocosa, y como consecuencia, puede encontrarse almacenada a presión. A esa presión se le llama **presión artesiana**. Si se hinca un pozo en un acuífero confinado, el nivel de agua en el pozo aumenta en proporción a la presión artesiana. Cuando dichas presiones son altas, los pozos pueden fluir naturalmente sin necesidad de una bomba. En ese caso se les conoce como pozos artesianos. Los acuíferos artesianos profundos en la isla pueden tener un espesor de hasta de 3,000 pies (914 m) y pueden rendir hasta 1,200 gal/min (75.7 L/s) equivalente al caudal de ríos y quebradas de tamaño intermedio. En acuíferos no confinados, el agua no está almacenada a presión al no estar encapsulada en las rocas. En este caso, de hincarse un pozo, el agua tendría que ser bombeada a la superficie.

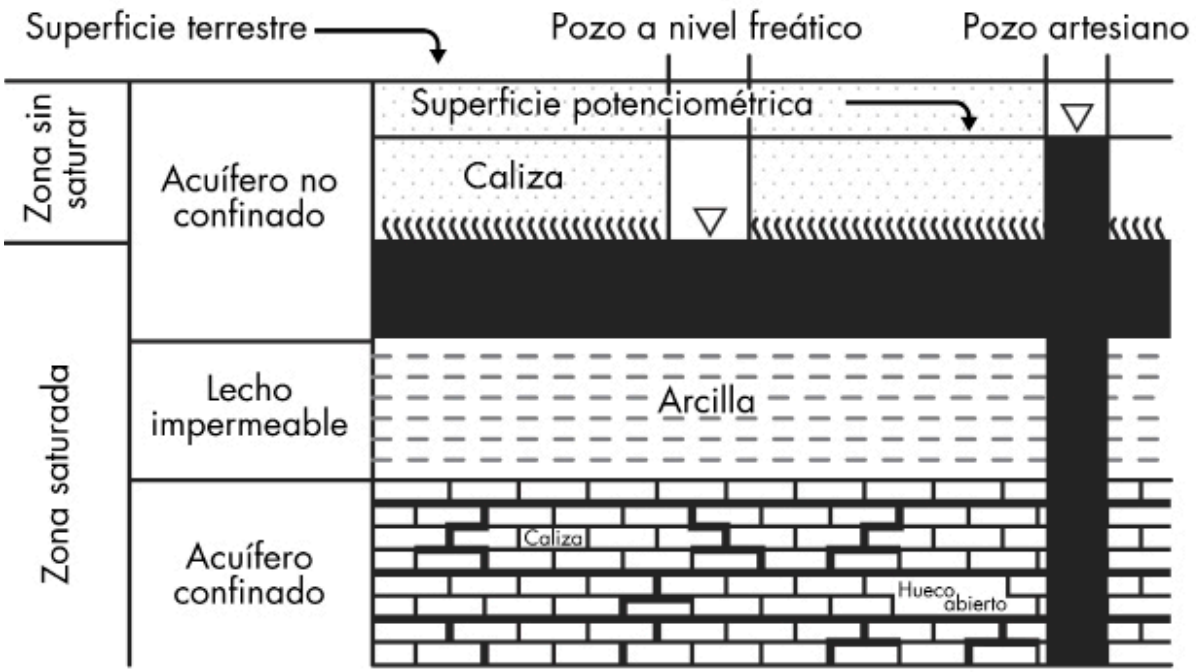


Figura 20. Corte transversal de un acuífero. Se ilustra un acuífero confinado por un estrato de arcillas y uno no confinado en un estrato de arena. La superficie potenciométrica representa el nivel al que sube el agua en un pozo artesiano. El agua sube más en el pozo artesiano que en el pozo no artesiano. La zona de movimiento capilar representa la tendencia del agua de subir por los poros del suelo. La zona no saturada no contiene agua subterránea, la cual está en la zona saturada.

¿Dónde están los acuíferos en Puerto Rico? -- Puerto Rico posee una diversidad de acuíferos a lo largo de su extensión geográfica (Fig. 21). Los principales acuíferos en la Isla incluyen aquellos formados por rocas calizas en la región del carso; los acuíferos aluviales de los valles costaneros de las provincias de la costa norte y 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.

¿Dónde están ubicados los acuíferos aluviales y cómo se forman? -- Los valles aluviales de los ríos han formado acuíferos no confinados en todas las costas. A través de los siglos, a medida que la erosión transportó aluvión (mezcla de arena, grava y cienos) desde las montañas a los valles costaneros, este material se depositó en los valles inundables de los ríos formando los acuíferos aluviales. En la región norte los acuíferos aluviales se extienden desde Toa Baja hasta Arecibo, formados en los valles de los ríos Bayamón, Grande de La Plata, Cibuco, Grande de Manatí, y Grande de Arecibo. Los ejemplos de estos son: en el norte el Río Grande de Arecibo, Río Grande de Manatí, y otros ríos, en el este la región de Humacao, en el sur el área entre Ponce y Guánica y en el oeste el área entre Mayagüez, Aguada y Añasco. Los valles aluviales entre Canóvanas y Fajardo tienen acuíferos de poca capacidad y todos están conectados a los ríos y quebradas de la región. En estos casos, la extracción de uno afecta al otro. En la isla de Vieques hay un acuífero de valle aluvial al sur y oeste de la isla (Esperanza) aunque de tamaño y capacidad limitada. 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. Los más importantes son los

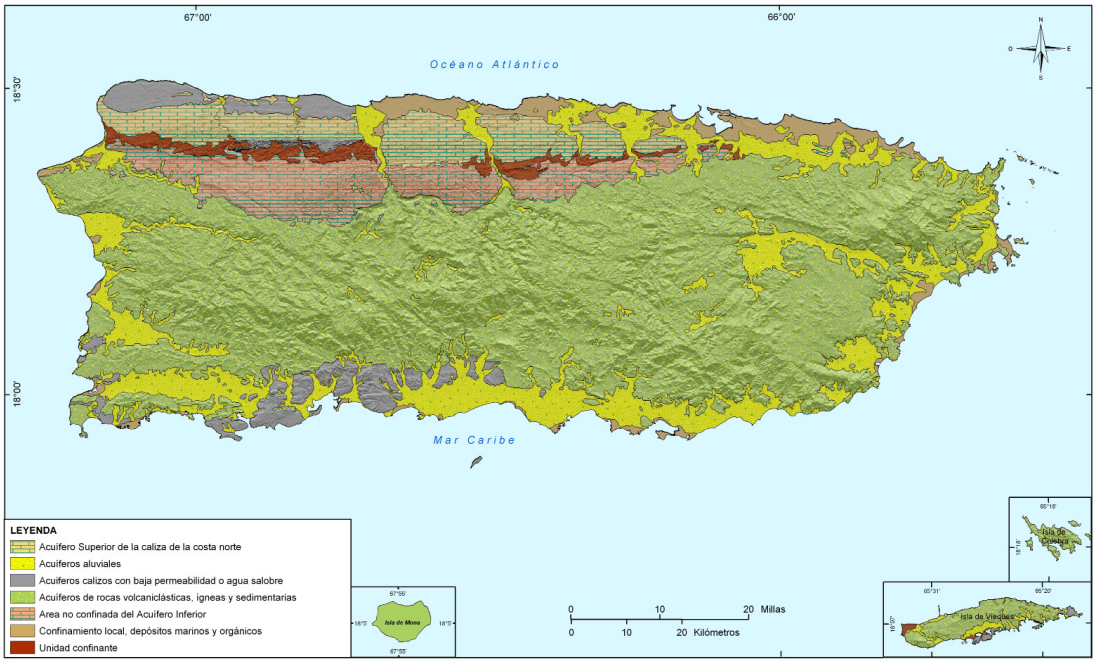


Figura 21. Mapa de los acuíferos de Puerto Rico de acuerdo al Servicio Geológico de los Estados Unidos de América.

acuíferos aluviales de los valles interiores de Caguas-Gurabo, Cayey y Cidra.

¿Cuáles son ejemplos de acuíferos de poca capacidad en Puerto Rico? -- Las dunas de arena en la costa norte forman acuíferos locales no confinados de poca capacidad. En estas dunas el agua dulce forma un lente de agua sobre el agua salobre o salada[6]. Las rocas volcánicas son menos propensas a formar acuíferos por ser rocas más densas y por eso no hay acuíferos de importancia en la masa volcánica de la Cordillera Central. Sin embargo, aún en rocas volcánicas densas, las fracturas en las mismas pueden almacenar cantidades significativas de agua y resultar en pozos productivos.

¿Cómo funcionan los acuíferos lejos del mar? -- Los acuíferos tienen áreas de recarga por donde se infiltra el agua de lluvia en su jornada hacia el subsuelo (Figs. 1 y 22). Estas áreas de recarga pueden ser los bosques en los mogotes o los valles aluviales con suelos de alta infiltración. En la región del carso del norte de la isla la recarga a los acuíferos ocurre principalmente a través de sumideros y desde los ríos y quebradas que cruzan la zona de rocas calizas, particularmente en los casos de ríos subterráneos como el río Encantado (Manatí) y los tramos subterráneos del Tanamá, el Camuy y el Guajataca. Todos los ríos que cruzan la región del carso recargan también los acuíferos aluviales en los valles de la costa norte. Este mismo proceso de recarga ocurre en los valles aluviales de la región sur, y en menor cantidad en las costas este y oeste. La recarga máxima de los acuíferos en la región del carso es de unas 20 pulgadas (508 mm) anuales. En los valles aluviales principales de las costas norte y sur la recarga es de unas 5 pulgadas (127 mm) anuales. El promedio para toda la Isla es de 2.7 pulgadas (68 mm) anuales.

El agua en el acuífero continúa su flujo lento hacia el mar y en su paso puede descargar por ríos, quebradas, manantiales o lagunas, como la laguna de Tortuguero en Vega Baja y el caño Tiburones entre Barceloneta y Arecibo. La calidad del agua se modifica a medida que se mueve por las capas de suelos y rocas por las cuales fluye. Poco a poco el agua lixivia o disuelve las formaciones rocosas por las cuales atraviesa y adquiere minerales y sustancias químicas que alteran su calidad. Por otro lado, el material que forma los acuíferos arenosos en los valles aluviales actúa como un filtro que remueve partículas y contaminates del agua que se infiltra al subsuelo.

¿Cómo funcionan los acuíferos cerca del mar? -- Las aguas de los acuíferos costaneros generalmente descansan sobre capas de agua salada, procedentes del mar (Fig. 23). Esto no causa problemas bajo condiciones naturales pues el agua de mar y el agua dulce no se mezclan debido a las diferencias en densidades. Estas diferencias (1.000 g/cm^3 para agua dulce y 1.028 g/cm^3 para agua salada) hacen que el agua dulce flote sobre la salada, y que por cada pie (0.30 m) de agua dulce que se remueva, el nivel de la zona de mezcla de agua dulce y agua salada aumente hasta 40 pies (12.2 m). En otras palabras, si se reduce la profundidad del agua dulce del acuífero por una pulgada (2.54 cm), el nivel del agua de mar puede subir hasta 40 pulgadas (102 cm).

¿Cuál es la consecuencia del sobre-uso de un acuífero costero? -- De sobre-utilizarse el acuífero de agua dulce, el agua salada sube a ocupar los espacios abandonados por el agua dulce y como consecuencia se saliniza el acuífero (Fig. 23) lo cual lo hace inservible para uso humano. Este proceso se conoce como **intrusión salina**. La sobre- explotación por bombeo también puede alterar la relación entre un acuífero y un río que lo recarga, y en ocasiones secar el río (Fig. 22).

[6]Estos lentes de agua fresca se conocen por el nombre de quienes los descubrieron, i.e., Ghyben-Herzberg.

Figura 22. Recarga, almacenaje y movimiento de agua en los acuíferos. La zona de recarga es la superficie del terreno (a). El agua subterránea fluye hacia un río y mantiene su descarga. Con la extracción de agua subterránea por medio de un pozo se crea un cono de depresión en el punto de extracción (b y c). Si el pozo está cerca del río y se extrae más agua de la disponible, se invierte el flujo del agua de suerte que el río pierde agua y recarga al acuífero (d). De continuar el bombeo, se puede secar el río y eventualmente el acuífero.

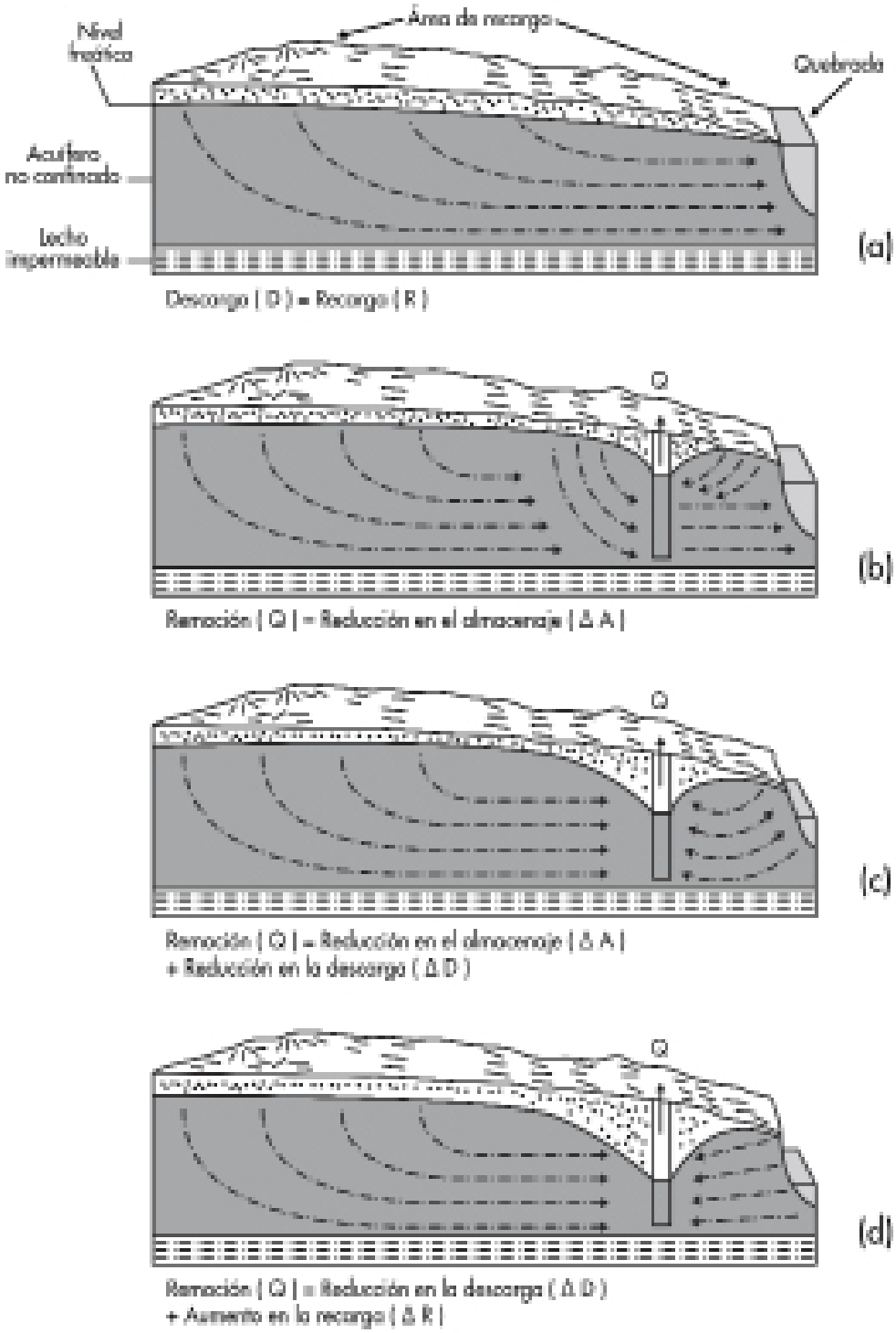
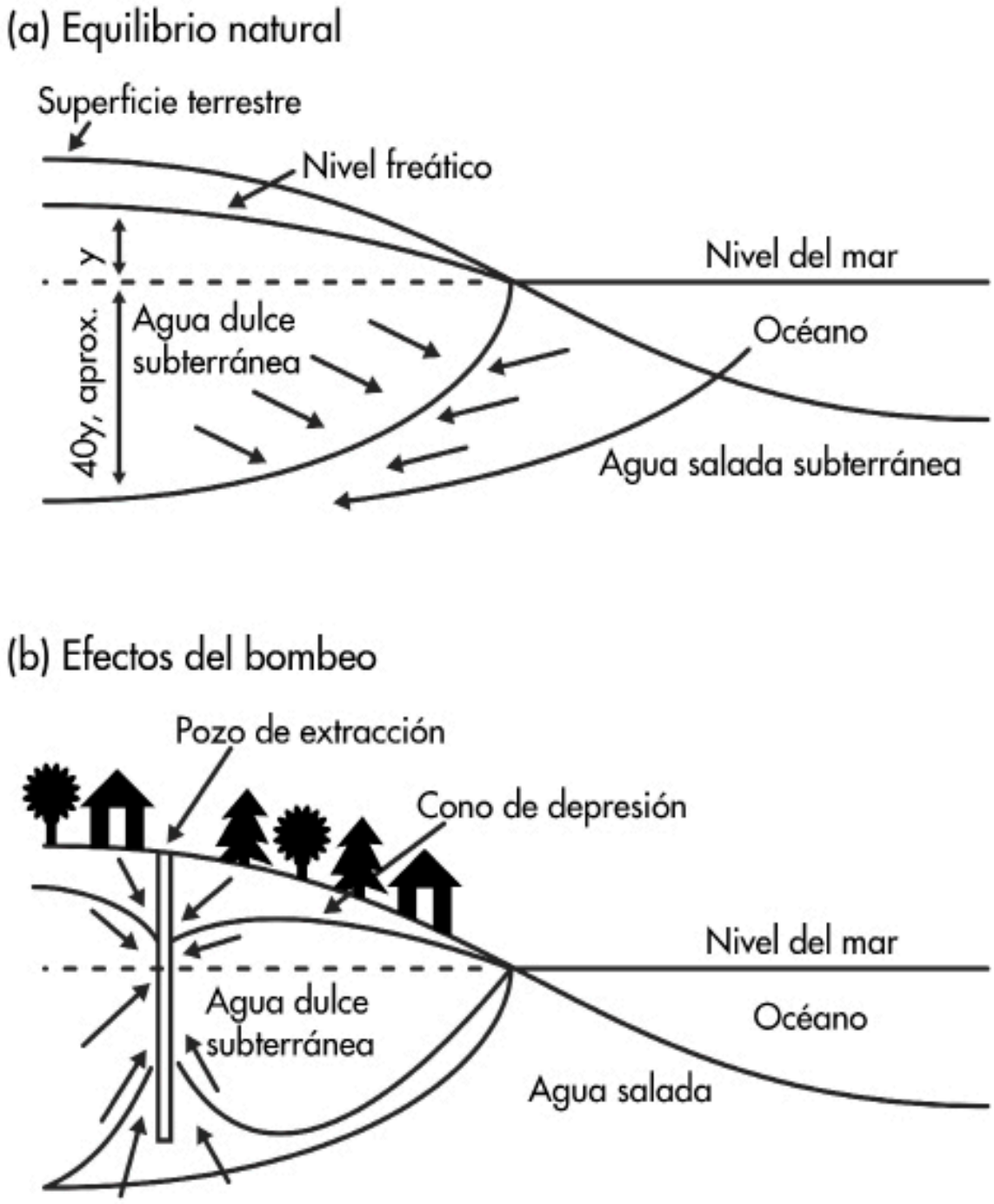


Figura 23. Relación entre el agua dulce y el agua de mar cerca de la costa. Se nota que el agua dulce flota sobre el agua de mar y no se mezcla. Debido a la diferencia en densidad por cada pulgada (2.54 cm) de agua dulce sobre el nivel del mar, se necesitan 40 pulgadas (102 cm) de agua dulce subterránea para evitar la entrada (salinización) del agua de mar (a). Al extraer mucha agua dulce, el cono de depresión causa la entrada de agua salada al acuífero. Este proceso se conoce como el principio Ghyben-Herzberg que opera principalmente en las dunas de arena de la costa norte de Puerto Rico y en otros acuíferos costaneros no confinados (b).



¿Cuál es la importancia de los acuíferos en Puerto Rico? -- Aproximadamente el 20 por ciento del agua que se utilizaba en Puerto Rico en el 2005 procedía de acuíferos (Fig. 1). Los usos del agua procedente de acuíferos son diversos aunque predomina el abasto público del agua (Tabla 1). En la región sur el 40 por ciento del agua que se usa es de los acuíferos. En la región norte el 10 por ciento de la demanda de agua se satisface de los acuíferos. En el pueblo de Arecibo se extraen 12 millones de galones por día (0.53 m^3/s) de los acuíferos. Las farmacéuticas en Manatí y Barceloneta, y las industrias electrónicas en varios lugares en la Isla usan agua de acuíferos. De hecho, las industrias extraen cerca de 7 millones de galones por día (0.31 m^3/s) de los acuíferos del norte. La industria azucarera extraía hasta 100 millones de galones por día (4.38 m^3/s) de los acuíferos de la costa sur. En el 2005 el uso anual por riego se había reducido a 53 millones de galones de agua (0.2 millones m^3). En el 1974 se estimaba que en Puerto Rico había unos 6,000 pozos para extraer aguas subterráneas y se hincaban nuevos pozos a razón de 75 a 150 anualmente. En el 2005 un inventario de pozos llevado a cabo por el Departamento de Recursos Naturales y Ambientales encontró aproximadamente 700 pozos activos, con cerca de 400 operados por la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados, unos 200 para riego y otros usos agrícolas, y el balance (100) para usos industriales. Los acuíferos tienen la ventaja de que el agua no se evapora por estar subterránea. Además es más difícil contaminarlos porque están parcialmente protegidos por el suelo y las rocas. Sin embargo, una vez contaminados, los acuíferos son muy difíciles de restaurar.

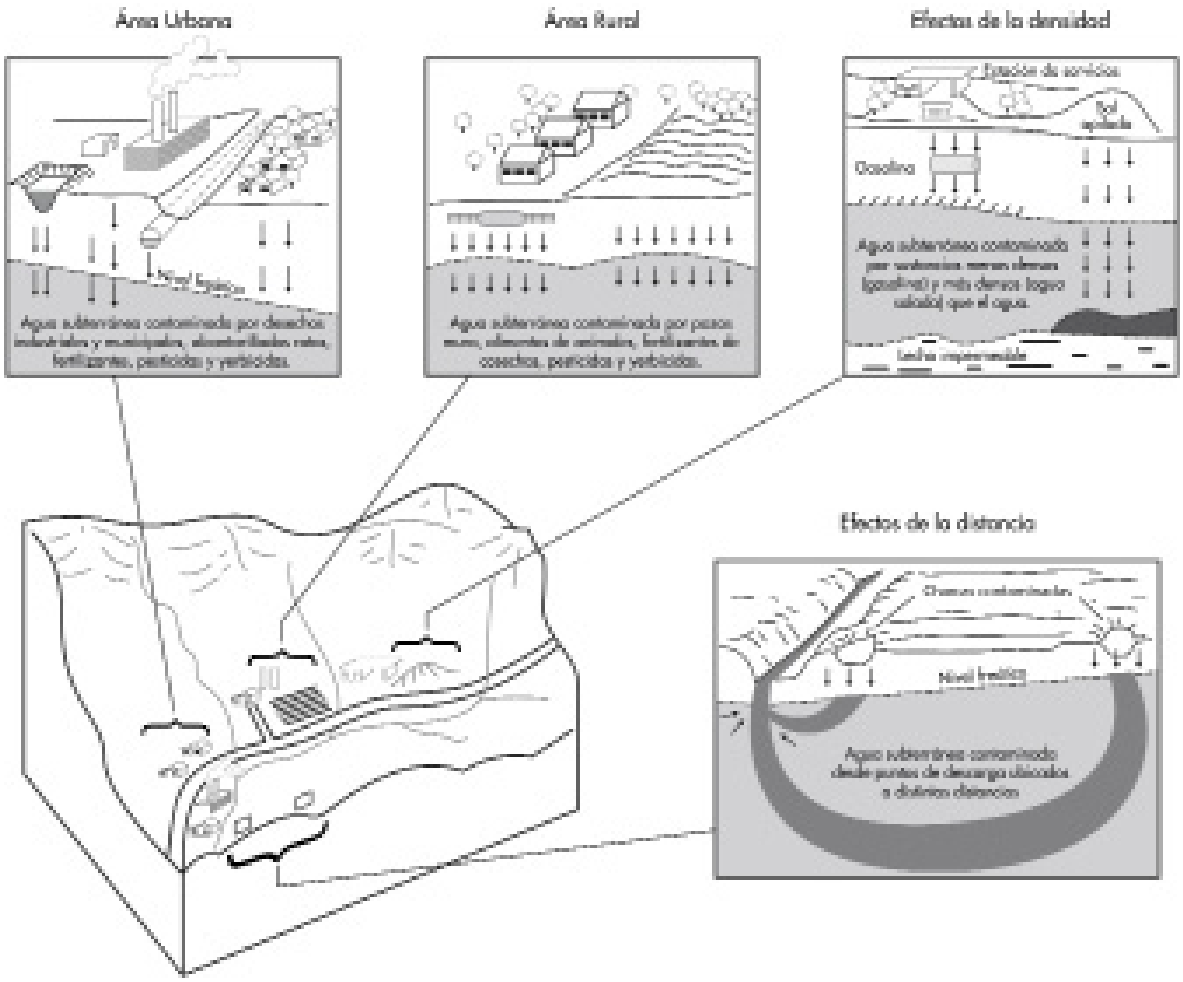
¿Cómo se contaminan los acuíferos? -- El agua en los acuíferos puede contaminarse de varias formas (Fig. 24). La principal fuente de contaminación de los acuíferos en Puerto Rico es la intrusión salina en los valles costaneros de las regiones norte y sur. El exceso de bombeo en los pozos de la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados y agrícolas han causado mermas en los niveles del agua subterránea dulce, induciendo la intrusión salina tierra adentro. En gran parte de los acuíferos desde Dorado hasta Manatí, la cuña de agua salada ha penetrado en los acuíferos cerca de 10 millas (16.09 km) tierra adentro, hasta la vecindad de la Carretera PR 2. En Salinas y Santa Isabel ha

Tabla 1. Usos del agua subterránea que se extrae de los acuíferos de Puerto Rico basado en datos para el 2005. Para convertir los datos de extracción a m^3/s, multiplique por 0.0438126365741.

Uso del agua	Extracción (mgd)
Abastos públicos	108
Riego	33.6
Industria	10.5
Animales	6.4
Doméstico por cuenta propia	2.4
Plantas termoeléctricas	1.56
Minería	2.0
Total	164.5

Fuente: Servicio Geológico de los Estados Unidos de América.

Figura 24. La contaminación de un acuífero puede ocurrir en el campo y la ciudad según se ilustra. Además, debido a la dinámica de los acuíferos, el efecto de la contaminación se puede observar muy lejos del punto de contaminación original.



ocurrido lo mismo debido al exceso de bombeo. Tanto en los acuíferos del norte como los del sur se han cerrado decenas de pozos debido a la contaminación con agua salobre. Otro caso de intrusión salina es el del acuífero de Esperanza en la isla de Vieques. Este acuífero suplía toda la demanda de agua de Vieques (hasta 400,000 gal/d o 17.5 L/d). Debido al exceso de bombeo, la intrusión salina forzó el cierre de todos los pozos y fue necesario construir una tubería desde Naguabo hasta Vieques para proveer agua potable a la Isla.

La segunda fuente importante de contaminación a los acuíferos son las descargas de contaminantes industriales. La inyección de residuos industriales y domésticos directamente a los acuíferos todavía se permite y es quizás la mayor causa de la contaminación química de los acuíferos. Los derrames industriales ocurren periódicamente, contaminando los acuíferos. Descargas industriales en las décadas previas a 1970 afectaron sectores de los acuíferos del norte en Dorado, Vega Baja, Vega Alta, Manatí y Barceloneta. En el sur, zonas de los acuíferos en Guayama, Juana Díaz, Ponce y Peñuelas

están contaminadas con químicos industriales.

Los acuíferos pueden contener naturalmente altas concentraciones de calcio, magnesio, sodio, potasio, cloro y sulfato, lo que los hace inservibles para ciertos usos. Los lixiviados generados en vertederos y en áreas industriales abandonadas también contaminan los acuíferos. Como consecuencia de la contaminación industrial y sanitaria, se han cerrado más de 50 pozos en la Isla.

¿Qué papel juegan los pozos sépticos en la contaminación de las aguas? -- Cerca del 60 por ciento de las casas en la Isla usan pozos sépticos para las descargas sanitarias, así como miles de negocios, ganaderías e industrias domésticas. Se estima que existen en la isla (incluyendo a Vieques y Culebra) entre 550,000 a 600,000 pozos sépticos. Estos pozos en su mayoría son inadecuados para acumular y tratar las aguas sanitarias que reciben. Se estima que descargan aproximadamente 165 millones de galones por día de aguas casi crudas a terrenos, quebradas y ríos cercanos, contaminando las aguas superficiales y subterráneas con bacterias fecales, materia orgánica y los químicos presentes en detergentes y solventes domésticos y comerciales. En varios sitios en la isla, como en Manatí y Salinas, las concentraciones de nitratos en las aguas subterráneas han aumentado debido a las descargas sanitarias de pozos sépticos.

MANANTIALES

¿Qué es un manantial? -- Un manantial es una descarga natural de agua subterránea (Fig. 25).

¿Dónde están los manantiales en Puerto Rico? -- En Puerto Rico existen cientos de manantiales de agua fresca y salina, primordialmente en la región del carso en la provincia de la costa norte, así como en la zona montañosa de la provincia del interior. En la región del carso, 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 carso.

¿Cuál es la magnitud de las descargas de los manantiales? -- Las descargas de los manantiales en Puerto Rico son moderadas (Tabla 2). Hay manantiales perennes y otros intermitentes que responden a las lluvias. La descarga máxima es de 22.4 millones de galones por día (0.98 m^3/s) en el manantial San Pedro en Arecibo. La suma de los promedios de descarga de 16 otros manantiales estudiados por el U.S. Geological Survey, es de 23.5 millones de galones por día (1.03 m^3/s) (Guzmán Ríos 1988). 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* o fuera del sistema de la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados).

¿Cuáles son las características químicas principales de los manantiales en Puerto Rico? -- Los componentes químicos principales de los manantiales en Puerto Rico son: el calcio, el bicarbonato, el sodio, el cloro y el sulfato. Algunas aguas de manantiales reflejan la intrusión salina a los acuíferos. Todos los manantiales estudiados reflejan alguna contaminación con bacterias fecales.

¿Qué usos tienen los manantiales? -- Los manantiales se utilizan como abastos de agua locales en comunidades aisladas, pero son una fuente menor de agua potable. Los manantiales termales de Coamo se utilizan para recreación y debido a la presencia de azufre en concentraciones moderadas se les atribuye

Figura 25. Movimiento del agua en la región del carso de Puerto Rico. Las flechas indican la dirección del flujo de agua, dirección del viento, y reflejo de la radiación solar. Se ilustran los puntos de descarga de los acuíferos donde se forman manantiales por diversas razones.

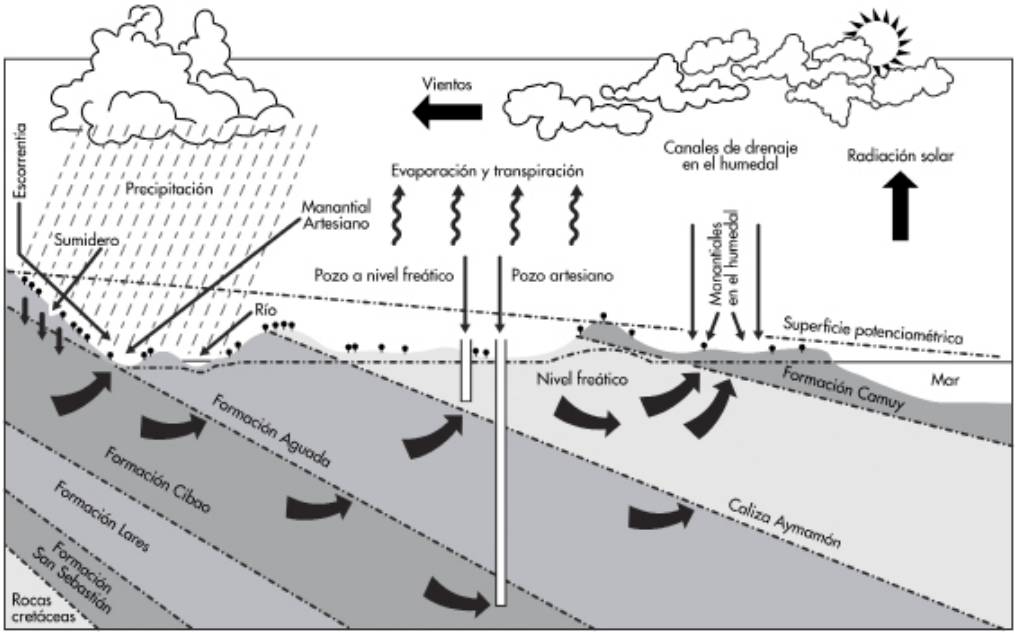


Tabla 2. Rango de flujo de los manantiales principales en Puerto Rico. Para convertir mgd a m^3/s, multiplique por 0.0438126365741.

Manantial	Descarga (mgd)
Ojo de Agua cerca de Aguadilla	0.31 - 1.3
Salto Collazo cerca de San Sebastián	0.19 - 0.28
Zumbadora en los Puertos cerca de Camuy	0.15 - 0.37
Sonadora cerca de Camuy	0.19 - 1.55
Tiburón cerca de Camuy	0.19 - 0.46
San Pedro cerca de Arecibo	2.0 - 22.6
Zanja Fría en Caño Tiburones	4.7 - 45.2
La Cambija en Caño Tiburones	4.8 - 6.4
Ojo de Guillo cerca de Manatí	0.61 - 1.03
Aguas Frías cerca de Ciales	3.4 - 7.1
Represa Sonadora en Ciales	0.10 - 0.35
Ojo de Agua cerca de Morovis	0.12 - 0.14
Ojo de Agua en Vega Baja	0.27 - 6.08
Maguayo ceca de Dorado	0.26 - 1.1
Baños de Coamo cerca de Coamo	0.03 - 0.08
Pozo de la Virgen cerca de Sabana Grande	0 - 0.006

Fuente: Guzmán Ríos 1988.

valor medicinal. Los manantiales termales como los de Coamo, con temperatura promedio de 43 ºC (108 ºF), derivan su calor de regiones profundas bajo la superficie terrestre. En los manantiales de Coamo, se cree que el agua procede de 4,000 a 5,000 pies (1,219 a 1,524 m) de profundidad. Como punto de comparación, los picos más altos de las montañas de Puerto Rico rondean alrededor de 3,280 pies (1,000 m) de altura.

LAGUNAS

¿Qué es una laguna? -- Una laguna es un cuerpo de agua de poca profundidad, generalmente costanera y de agua salobre o salada, aunque también las hay de agua dulce en el interior, en la zona caliza. Las lagunas costaneras son humedales y estuarios.

¿Dónde están las lagunas en Puerto Rico? -- En Puerto Rico e islas limítrofes hay 52 lagunas principales y cientos de lagunas menores. De las principales, 23 ubican en Puerto Rico, 18 en Vieques, 10 en Culebra y 1 en Culebrita (Fig. 26). La mayoría de las lagunas están asociadas con los manglares, como por ejemplo, las lagunas Piñones, La Torrecilla, San José y Joyuda. La laguna Tortuguero es una excepción por ser una laguna costanera de agua dulce que se alimenta de los acuíferos de la región del carso. La laguna Cartagena en la costa sur es otra excepción. En el interior de Puerto Rico hay charcas pequeñas en sumideros sellados. La laguna Guánica, una de las más grandes del país, se secó por el gobierno para establecer desarrollos agrícolas que no perduraron y ahora se está considerando su restauración.

¿Cómo se caracterizan las lagunas de Puerto Rico? -- El área de las lagunas en Puerto Rico fluctúa entre 6 y 57 acres (15 a 140 ac) con profundidades entre 0.8 y 4 metro (1.6 a 13 p) para las lagunas en su estado natural. Muchas lagunas han sido dragadas y la vegetación en sus perímetros se ha eliminado. Como consecuencia, algunas lagunas se han convertido en almacenes de agua con pocas interacciones ecológicas con sus zonas riparias o sus bordes o litorales. La profundidad máxima de los dragados es de 18 metros (59 p).

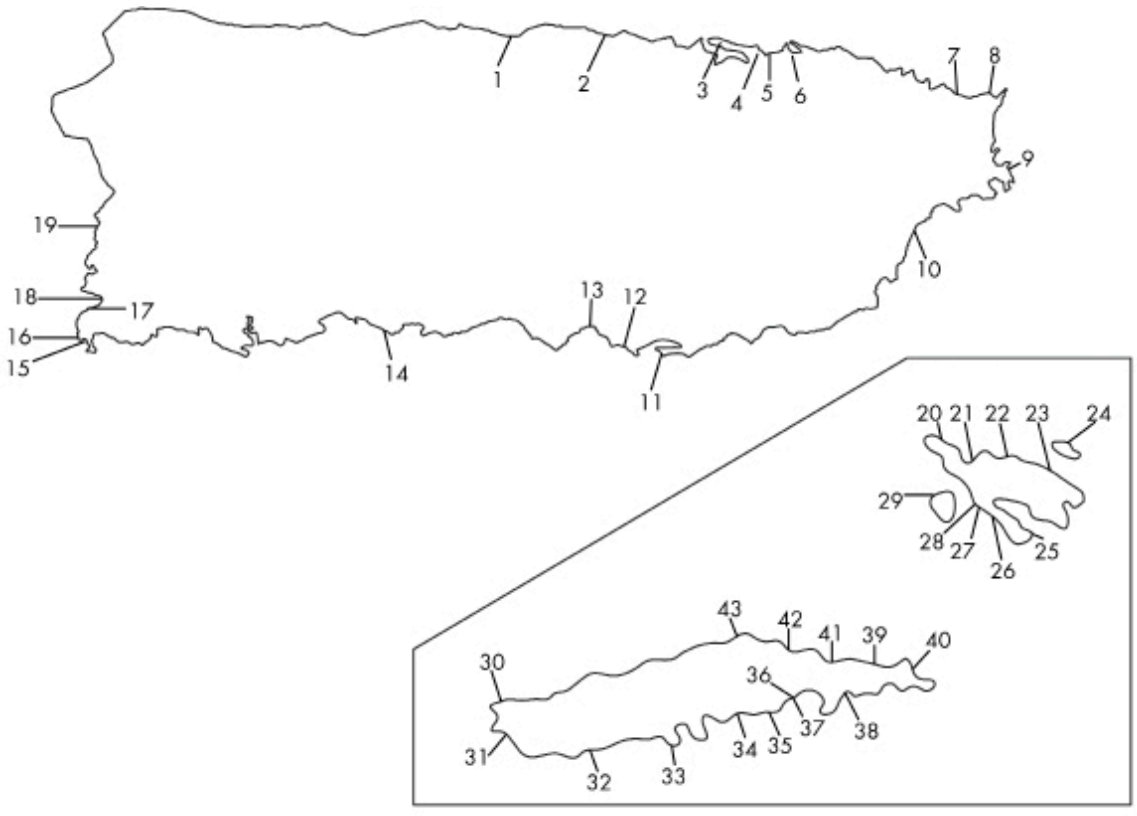
¿Cómo funcionan las lagunas? -- Las lagunas almacenan escorrentía generada por la lluvia. Las lagunas costeras se tornan menos salinas durante la época de lluvia. Por su presencia y almacenaje de agua, las lagunas ayudan a minimizar las inundaciones. Por su actividad biológica, las lagunas tienen una función importante en la purificación del agua. Las lagunas son sistemas altamente productivos desde el punto de vista biológico. Sin embargo, para funcionar adecuadamente, las lagunas requieren mantenerse llanas por dos razones: (1) para asegurar el intercambio rápido de sus aguas y así mantener la alta calidad de sus aguas, y (2) para sostener las comunidades de organismos que viven en sus fondos. Cuando se dragan las lagunas y se aumenta su profundidad, las aguas tienden a estancarse y pierden su calidad. Las comunidades del fondo (comunidades **bénticas**) son destruidas por los dragados. El resultado neto es que las lagunas pierden productividad y biodiversidad. El agua de las lagunas se deteriora aun más al removerse la vegetación de sus riberas ya que la vegetación sirve de filtro y amortiguador a las descargas de escorrentías de otros sectores de la cuenca hidrográfica.

¿Cuál es la importancia de las lagunas? -- Las lagunas son importantes para minimizar las inundaciones y ayudar en la purificación del agua. Las lagunas también son de importancia ecológica para la pesca y la vida silvestre.

HUMEDALES

¿Qué es un humedal? -- Un humedal es un sistema ecológico con suelos saturados de agua. Contiene vegetación adaptada a suelos saturados, es decir, suelos con agua en exceso y poco o ningún oxígeno. Los pantanos, las

Figura 26. Localización de las principales lagunas en Puerto Rico e islas adyacentes (Negrón González 1986). 1. Laguna Torrecillas, 2. Laguna Mata Redonda, 3. Laguna Condado, 4. Laguna San José, 5. Laguna Torrecillas, 6. Laguna Piñones, 7. Laguna Aguas Prietas, 8. Laguna Grande, 9. Laguna Ceiba, 10. Laguna de Humacao, 11. Laguna Pozuelo, 12. Laguna de Mar Negro, 13. Laguna de Punta Arenas, 14. Laguna Salinas, 15. Laguna del Faro, 16. Laguna Salinas (Cabo Rojo), 17. Laguna Boquerón, 18. Laguna Guaniquilla, 19. Laguna Joyuda, 20. Laguna Flamenco, 21. Laguna Resaca, 22. Laguna Playa Brava, 23. Laguna Zoni, 24. Laguna Molino, 25. Laguna Dakity, 26. Laguna Maguey, 27. Laguna Lobina, 28. Laguna Sardinas, 29. Laguna Cordelio, 30. Complejo de Lagunas Kiani, 31. Laguna Boca Quebrada, 32. Laguna Playa Grande, 33. Laguna Sombe, 34. Laguna Tapón, 35. Laguna Chiva, 36. Laguna La Plata, 37. Laguna Yanuel, 38. Laguna Matías, 39. Laguna Icacos, 40. Laguna Anones, 41. Laguna Puerto Diablo, 42. Laguna Monte Largo y 43. Laguna Algodones.



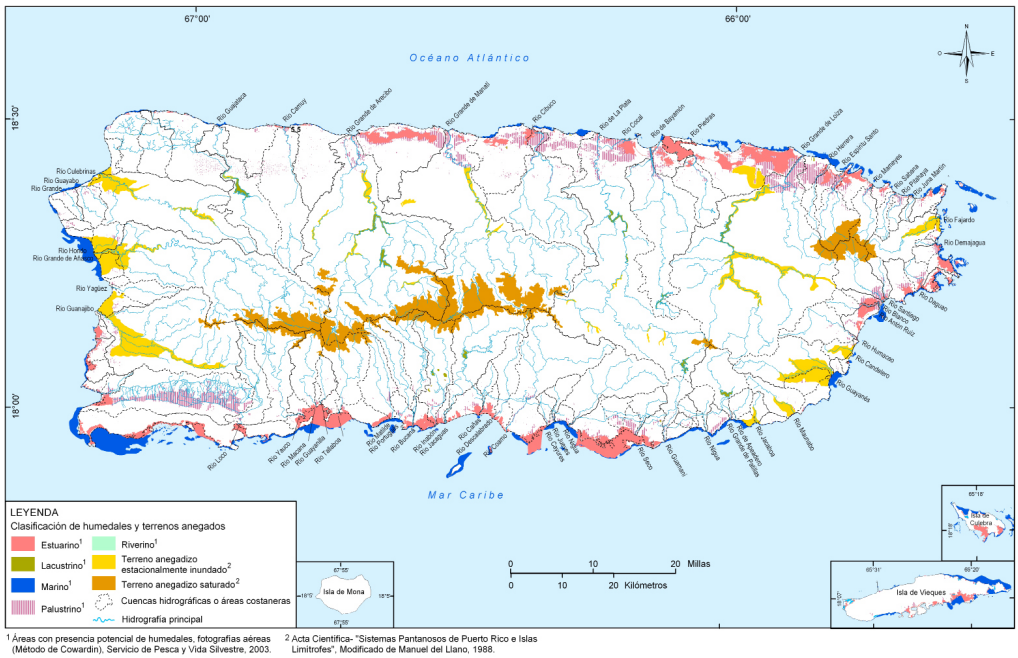
Nota: La ilustración no está a escala.

ciénagas, los bosques inundables, los salitrales, las zonas riparias, los valles aluviales, las lagunas, los estuarios y los manglares son todos humedales.

¿Dónde están los humedales en Puerto Rico? -- Puerto Rico tiene humedales por toda la isla (Fig. 27): en las montañas, en los valles aluviales, en la costa y entre los mogotes (Fig. 28).

¿Cómo funcionan los humedales? -- Los humedales tienen cuencas hidrográficas igual que los ríos, quebradas, embalses y lagunas. El agua de un humedal puede proceder: (1) solamente de la lluvia y las nubes como en el caso en los humedales en las cimas de las montañas en los **bosques nublados**; o (2) de escorrentías como en la mayor parte de los humedales; o (3) de los acuíferos como en muchos de los humedales en la región del carso;

Figura 27. Localización de los humedales, incluso los manglares (marinos en azul), en Puerto Rico (Manual del Llano 1988).



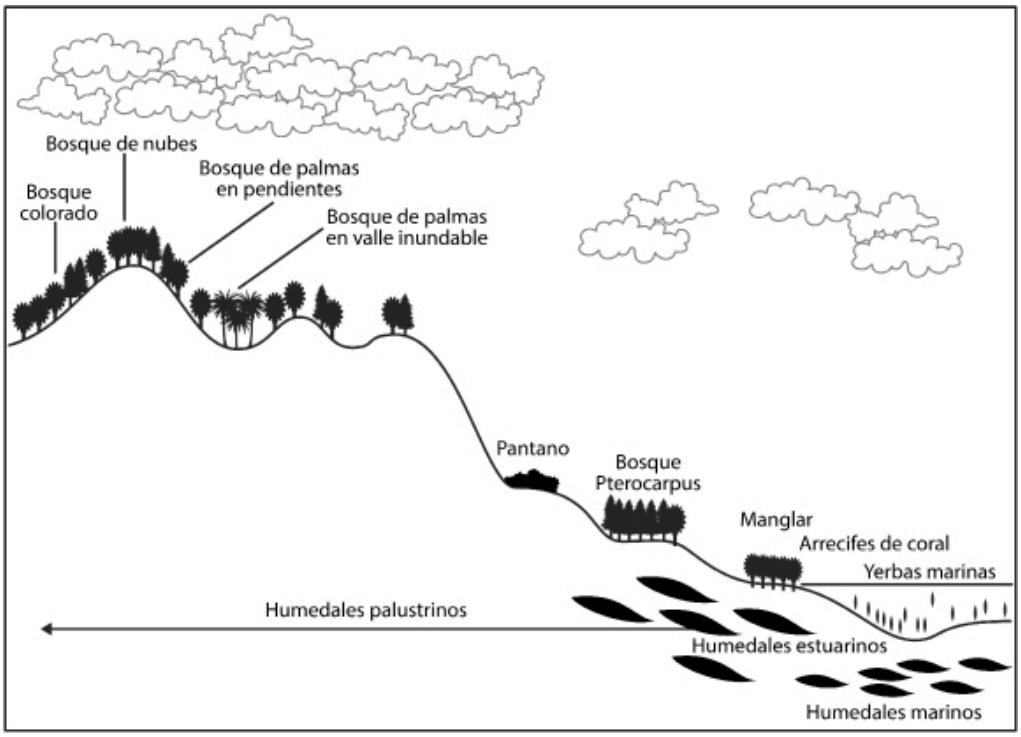


Figura 28. Perfil de Puerto Rico donde se ilustra la distribución elevacional de los humedales (Adams y Hefner 1999). Hay humedales en todas las elevaciones y a lo largo de toda la isla.

o (4) del mar por su proximidad y elevación relativa a este, como en los manglares; o (5) de una combinación de varias de estas fuentes como en algunos casos costaneros.

Los bosques nublados son bosques que interceptan las nubes a elevaciones altas en las montañas y por consecuencia, extraen agua de ellas. Los bosques nublados incluyen varios tipos de vegetación conocidas por una variedad de nombres, como por ejemplo el bosque de musgos, el bosque enano, el bosque elfino, el bosque de palo colorado, los palmares de palma de sierra, y otros. En El Yunque, un rodal de bosque nublado elfino aumenta la disponibilidad del agua aproximadamente por un diez por ciento o 30 pulgadas (762 mm) adicionales a las que caen por la precipitación anual.

Los humedales almacenan agua y la retienen por bastante tiempo, lo cual contribuye a su función de evitar las inundaciones. Los humedales también conservan agua porque la evaporación en un humedal es más lenta que la evaporación en cuerpos de agua sin vegetación. Las plantas tienen la capacidad de regular la tasa de evaporación por sus estomas y por eso conservan agua. Las estomas son poros en las hojas de las plantas por donde se intercambian los gases entre la planta y la atmósfera.

.

Cuando los humedales están llenos de agua, sus suelos pierden oxígeno y se tornan anaeróbicos (sin oxígeno). Como consecuencia, los sedimentos de los humedales almacenan sustancias químicas como los metales pesados, que normalmente serían tóxicos de estar disueltos en agua. Los humedales también incorporan los nutrientes en las aguas a su materia orgánica por medio del proceso de fotosíntesis. Esta materia orgánica luego se almacena en los sedimentos o se exporta a los estuarios, ríos y al mar. Allí la materia orgánica alimenta los organismos acuáticos.

¿Cuál es la importancia hidrológica de los humedales? -- Los humedales almacenan y conservan agua, purifican el agua, almacenan metales pesados tóxicos, evitan inundaciones, producen materia orgánica para los organismos acuáticos y son hábitat y lugares de alta productividad para la vida silvestre y la vegetación.

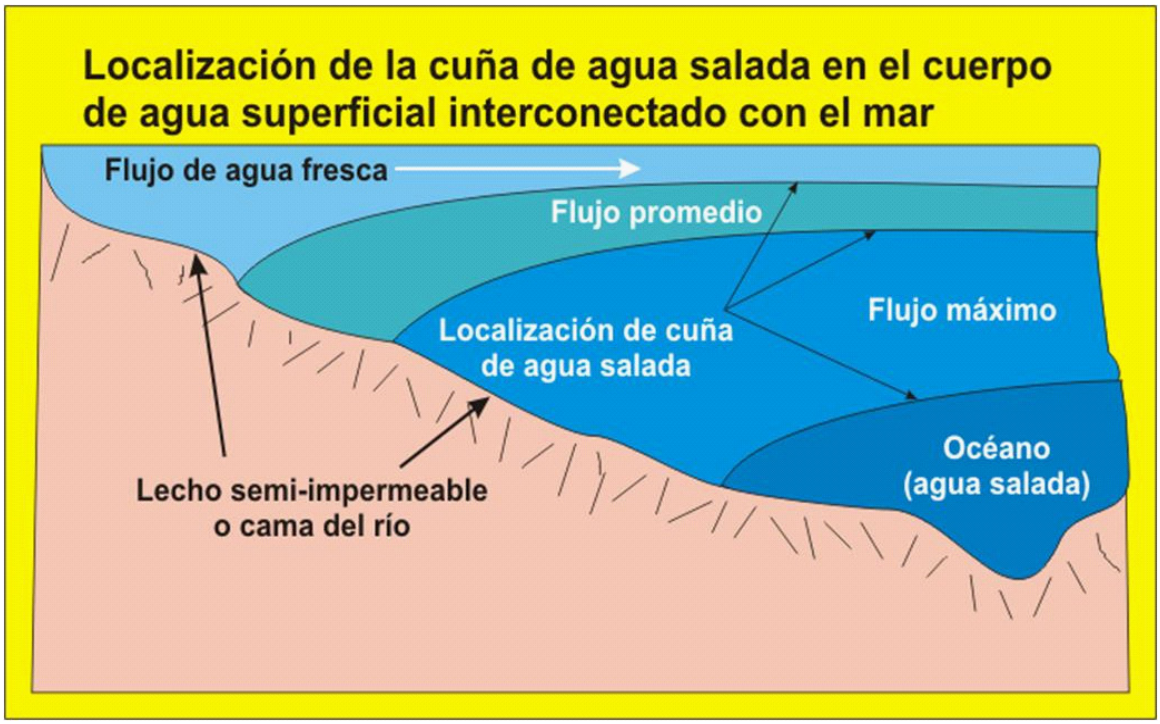
ESTUARIOS

¿Qué es un estuario? -- Un estuario es un cuerpo de agua donde se mezcla el agua dulce con el agua de mar. La mezcla puede ser continua o periódica. En regiones secas, la salinidad del estuario puede ser más alta que la del mar, ya que cuando se evapora el agua de mar, la salinidad aumenta. A ese tipo de estuario se le conoce como un estuario negativo ya que en vez de diluir la salinidad del mar, la concentra. La bahía de Ceiba y la bahía Fosforescente son ejemplos de estuarios en Puerto Rico con salinidad superior a la del mar.

¿Dónde están los estuarios en Puerto Rico? -- En Puerto Rico, hay estuarios en las desembocaduras de todos los ríos, los manglares, los salitrales, las lagunas costeras y las bahías.

¿Cómo se mueve el agua en los estuarios? -- Como el agua dulce es menos densa que el agua de mar, los estuarios tienden a estratificarse, en otras palabras, tienen una capa de agua dulce flotando sobre el agua de mar. En los ríos, el agua salada que entra tierra adentro se conoce como una cuña de agua de mar, ya que entra por debajo de la capa de agua dulce (Fig. 29). Poco a poco, o más rápido si hay turbulencia, el agua dulce se va mezclando con el agua de mar, formando aguas de salinidad intermedia. Esta mezcla ocurre bajo el efecto de las mareas, las olas y la fuerza de las escorrentías. Por lo tanto, además de estuarios estratificados, hay estuarios parcialmente mezclados y totalmente mezclados. Cuando merma el caudal del agua

Figura 29. Esquema de la formación y desplazamiento de la cuña de agua de mar en la boca de los ríos de Puerto Rico. La cuña se retira al mar durante las épocas de alta descarga del río y penetra al río a medida que la descarga disminuye. En las descargas más bajas, el río se torna totalmente salado y no hay descarga de agua dulce al mar.



dulce, la cuña de agua de mar puede penetrar por el cauce del río varios kilómetros tierra adentro. Con las lluvias intensas, los ríos aumentan sus descargas y empujan la cuña de agua salada al mar. Durante sequías, hay menos descarga de agua fresca y la cuña avanza tierra adentro.

¿Cómo se forma la barra de arena en la boca de los ríos y cuál es su importancia para el estuario? -- Las corrientes marinas paralelas a la costa mueven grandes cantidades de arena que se depositan o se remueven de las playas, conforme las condiciones existentes en el lugar. Durante épocas cuando los ríos tienen poca descarga, la arena que se mueve por estas corrientes se deposita en la boca del río y forma un banco de arena que elimina o disminuye el flujo de agua dulce hacia el mar. Como consecuencia, el río casi se aísla del mar y forma un lago donde aumenta la productividad acuática y los organismos estuarinos pueden completar sus ciclos de vida en aguas tranquilas y protegidas de los depredadores del mar.

Durante periodos de sequía la salinidad del estuario aumenta porque el agua de mar penetra por debajo de la barra de arena y no llega suficiente agua dulce para diluir el agua del mar. Cuando regresan las lluvias intensas, aumenta la descarga del río y la fuerza de la corriente rompe la barra de arena y re-establece el contacto físico entre la boca del río y el mar. La salinidad del estuario disminuye y se re-establece el movimiento de organismos entre el mar y el estuario. Los organismos marinos pueden entrar al estuario y los del estuario migran al mar o a las montañas.

¿Cuál es la dinámica en la salinidad y calidad del agua en el estuario? -- Tanto las mareas como el oleaje y las escorrentías varían de un momento y de un lugar a otro, lo que

resulta en que el estuario sea un sistema muy dinámico en cuanto a la salinidad y calidad de sus aguas. En un mismo lugar de un estuario, la salinidad puede ser igual a la del agua de mar y al rato tener una salinidad intermedia o cambiar a agua dulce. A medida que el agua cambia en salinidad, cambia también su calidad.

¿Cuál es la importancia ecológica e hidrológica del estuario? -- El estuario es el último ecosistema en utilizar el agua dulce antes de que esta se diluya completamente en el mar. Los estuarios son lugares donde desovan y crecen las etapas juveniles de las especies marinas y de especies acuáticas de la montaña como los camarones de los ríos. Al estuario migran especies de la montaña y del mar, lo que incluye peces, aves, moluscos, crustáceos, anfibios y reptiles. Por ejemplo, el pez olivo que se encuentra en las montañas de Lares y Utuado proviene del cetí de Arecibo que emigra por el río Tanamá hasta llegar allí. Sin el estuario, el ciclo de vida de docenas de especies no se completaría.

Los estuarios son lugares de alta productividad biológica y la pesca comercial y deportiva depende en gran medida de estos. Los estuarios se consideran entre los ecosistemas más productivos del planeta. Los sedimentos de los estuarios almacenan contaminantes orgánicos y metales pesados. Los nutrientes en las aguas recirculan por los sedimentos y cadenas alimentarias de los estuarios. Los estuarios son importantes para mantener la alta calidad de las aguas costaneras, para acomodar las inundaciones, amortiguar las marejadas y sostener la recreación y el turismo.

MANGLARES

¿Qué es un manglar? -- Un manglar es un bosque inundable (un humedal) de agua salada (un estuario). En Puerto Rico, sólo cuatro especies de árboles forman manglares: mangle rojo, mangle negro, mangle blanco y mangle botón. El árbol de mangle tiene la particularidad de poder crecer donde ningún otro tipo de árbol puede crecer, en suelos con altas concentraciones de sal. Un manglar es también un estuario porque allí se mezcla el agua dulce con el agua de mar.

¿Dónde están los manglares en Puerto Rico? -- Los manglares son costaneros y se encuentran alrededor de la isla (Figs. 28 y 30).

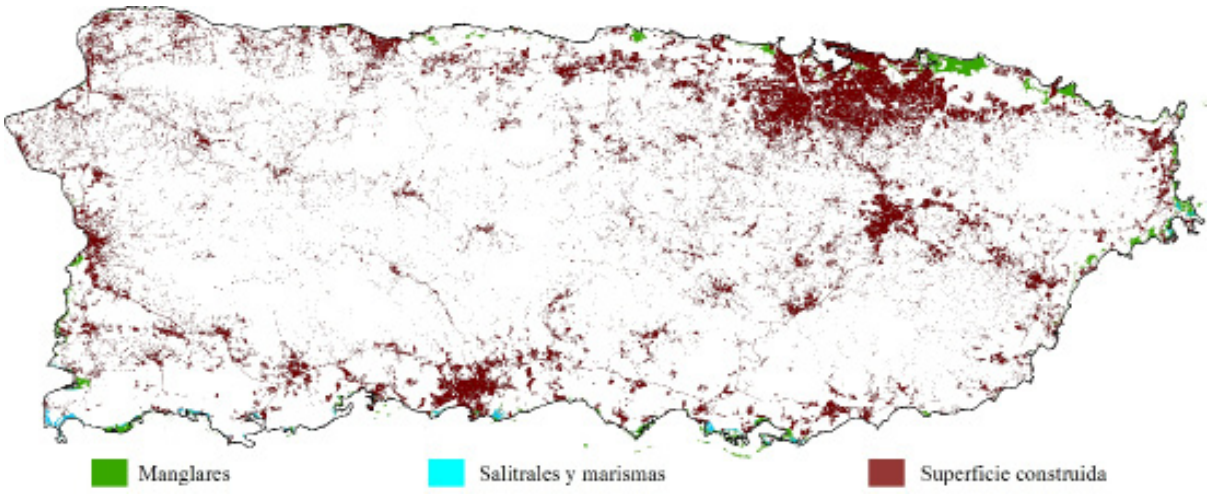


Figura 30. Mapa de los manglares, salitrales y marismas de Puerto Rico (Martinuzzi et al. 2009). El mapa incluye las áreas construidas del país.

Para el 2002, los mangles cubrían 8,323 acres (20,566 ac), aproximadamente 71 por ciento del área de mangle que se estima había cuando Cristobal Colón llegó a Puerto Rico.

¿Cómo funcionan los manglares? -- Los manglares aumentan su productividad en función a la cantidad de agua dulce que reciben. Mientras más agua dulce, mayor es su productividad. A medida que aumenta su productividad, mayor es su capacidad de atrapar nutrientes y purificar el agua. Los manglares también almacenan las aguas de escorrentía y absorben la energía de las marejadas del mar. El agua que sale del manglar a la costa, a los ríos y a otros estuarios sale cargada de material orgánico que sirve de alimento a la fauna del estuario, de la costa y del mar.

¿Cuál es la importancia hidrológica y ecológica del manglar? -- Los manglares amortiguan vientos e inundaciones en la zona costanera, protegen la costa contra marejadas y contribuyen a purificar las aguas costaneras. Además, son ecosistemas de alta productividad orgánica y sostienen la vida silvestre y las especies marinas de la costa, del mar y la montaña. Sobre el 90 por ciento de las especies marinas comerciales dependen del manglar. Como estuario, el manglar es uno de los últimos sistemas costeros en aprovechar las escorrentías de agua dulce para producir materia orgánica antes de que el agua se diluya completamente en el mar.

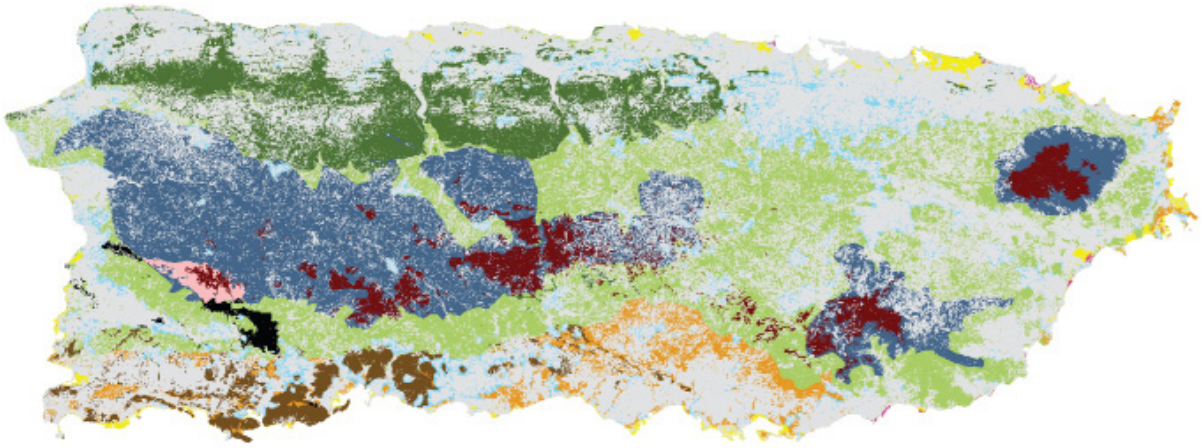
BOSQUES

¿Qué es un bosque? -- Un bosque es un terreno poblado de árboles. La definición es amplia para facilitar la inclusión de los bosques achaparrados de la costa sur al igual que los bosques urbanos.

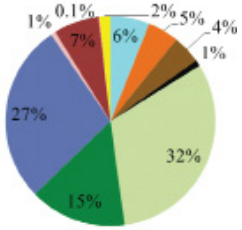
¿Dónde están los bosques en Puerto Rico? -- Puerto Rico tiene bosques por toda su extensión (Fig. 31). Originalmente la Isla estaba casi totalmente cubierta de bosques y al presente hay alrededor de 52 por ciento del área total en bosques. Los bosques urbanos constituyen el seis (6) por ciento de los bosques en Puerto Rico. Sólo el uno (1) por ciento de la Isla mantiene sus bosques originales conocidos como **bosques primarios**. Las áreas más deforestadas son los valles aluviales y las costas donde la agricultura y/o los usos urbanos sustituyeron los bosques. Sin embargo, con el abandono de la agricultura los bosques han retornado a los valles aluviales. Estos nuevos bosques se consideran **bosques noveles** porque están dominados por especies introducidas como el tulipán africano (Lugo y Helmer 2004, Abelleira Martínez y Lugo 2008, Abelleira Martínez et al. 2010). Del área total de bosques en Puerto Rico, aproximadamente el catorce por ciento está bajo la administración del gobierno como bosques públicos. Hay 19 bosques públicos bajo la administración del Departamento de Recursos Naturales y Ambientales, incluso dos bosques urbanos. Estos bosques, al igual que el Bosque Nacional de El Yunque administrado por el gobierno federal, se establecieron para proteger las cuencas hidrográficas y asegurar su preservación, lo que incluye los abastos de agua para el futuro.

¿Cómo funcionan los bosques? -- Los bosques contribuyen a la función de esponja de una cuenca hidrográfica. Su función se puede entender mejor si comparamos lo que ocurre con la lluvia en un bosque con lo que ocurre en un estacionamiento de automóviles y en un campo libre de vegetación, i.e., cómo cambia el hidrograma. En el estacionamiento de automóviles toda la lluvia se convierte en escorrentía superficial que va a parar inmediatamente al cauce del río con todos los contaminantes que estén sobre el pavimento (Fig. 18a). En el campo sin vegetación, parte del agua se infiltra, pero eventualmente el agua de escorrentía supera la infiltrada, con el agravante que, en este caso, el agua arrastra

Figura 31. Mapa y área de los bosques de Puerto Rico (Martinuzzi et al. 2013). Para convertir hectáreas a acres, divida por 0.4047.



Tipo de bosque	Descripción	Hectáreas
Urbano	Bosque en areas urbanas	27,311
Seco/AVS	Bosque seco sobre sustrato aluvial, volcánico o sedimentario	21,592
Seco/C	Bosque seco sobre sustrato calcáreo	19,822
Seco, Húmedo/U	Bosque seco o húmedo sobre sustrato ultramáfico	4,365
Húmedo/AVS	Bosque húmedo sobre sustrato aluvial, volcánico o sedimentario	143,543
Húmedo/C	Bosque húmedo sobre sustrato calcáreo	67,445
Muy húmedo/AVS	Bosque muy húmedo sobre sustrato aluvial, volcánico o sedimentario	125,408
Muy húmedo/U	Bosque muy húmedo sobre sustrato ultramáfico	3,364
Montano alto	Bosque maduro localizado > 600 metros de elevación	31,432
Palma de coco	Plantaciones abandonadas de palma de coco	491
Inundado	Bosques de mangle y *Pterocarpus*	7,946
	Total de bosques	452,718
Areas no forestadas		418,042



grandes cantidades de sedimento al cauce del río.

En el bosque, la tasa de infiltración es alta y la erosión y arrastre de sedimentos es menor. Las raíces de los árboles y la actividad de los animales evitan la compactación del terreno y propician la infiltración del agua, proceso que a la vez remueve muchas impurezas de la misma. La alta densidad de plantas disminuye la velocidad de las aguas de escorrentía superficial. En el bosque hay más intercepción e infiltración de agua y la escorrentía superficial es reducida en su volumen y velocidad de flujo. Por lo tanto, la descarga máxima en el río se reduce y hay menos probabilidades de inundación. Además, el dosel, la hojarasca y la vegetación en el suelo del bosque absorben la energía de las gotas de lluvia que de otra manera impactarían el terreno directamente, causando mucha erosión como ocurre en el campo sin vegetación. Debido a la reducción en la velocidad del agua de escorrentía en el bosque, disminuye la capacidad de esas aguas para transportar sedimentos y por consecuencia, la cantidad de sedimentos que llegan a los cuerpos de agua disminuye en regiones con bosques. Las plantas usan los nutrientes en el agua del suelo para sintetizar materia orgánica que sirve de alimento a los microbios y animales. Por eso, la vegetación también ayuda a purificar el agua. Los bosques evaporan agua y promueven la formación de nubes alterando la temperatura y la humedad sobre las masas de aire que pasan sobre ellos. Por eso se dice que los bosques producen lluvia.

¿Cuál es la importancia hidrológica de los bosques? -- Los bosques conservan agua, promueven la lluvia con la intercepción y evapotranspiración del agua, aumentan la infiltración lo que favorece el flujo base de los ríos, purifican el agua y reducen la erosión y sedimentación. Los bosques evaporan agua, lo cual disminuye la escorrentía, sin embargo, al aumentar la infiltración al subsuelo conservan el agua en la cuenca hidrográfica y evitan su pérdida súbita al mar, lo que resulta en un balance neto positivo. El agua que se evapora continúa su ciclo hidrológico y puede reciclarse en otro lugar.

¿Cómo se afecta el clima por la deforestación y la urbanización? -- La deforestación y la impermeabilización de las zonas urbanas pueden afectar el clima regional. Los bosques también contribuyen humedad a la atmósfera a través de la evapotranspiración y reducen la temperatura del aire absorbiendo calor y evaporando agua. Sin los bosques se reduce el reciclaje de agua a la atmósfera y se pierde la moderación de la temperatura del aire. Igualmente, la impermeabilización de los terrenos por la urbanización altera los patrones de escorrentía (aumenta) y de evaporación (menos) y resulta en superficies que se sobrecalientan. Esto aumenta la temperatura del aire durante el día y la noche a niveles superiores a los observados en zonas boscosas cercanas. Este calentamiento se conoce como el **efecto de isla de calor** (*heat island effect*) porque generalmente las áreas urbanas sobrecalentadas forman "islas de calor" cuando las temperaturas del aire se representan sobre la topografía. La temperatura aumenta en las zonas urbanas debido a que se pierde la cobertura vegetal que absorbe calor para evaporar agua (controlando así la temperatura) y además, como el agua se ha exportado por las altas escorrentías sobre áreas impermeables, no hay posibilidad de evaporar agua para moderar la temperatura. El resultado es que las superficies de la ciudad se sobrecalientan. Otro efecto de la urbanización sobre el clima es que al sobrecalentarse la ciudad, el aire sobre esta es más caliente y requiere más elevación para enfriarse orográficamente al punto de condensación y precipitación. En otras palabras, la formación de las nubes ocurrirá a elevaciones mayores, desplazando las franjas de lluvia hacia mayores elevaciones en la montaña.

EMBALSES

¿Qué es un embalse? -- Un embalse es un lago artificial creado al represar un río. En Puerto Rico no hay lagos naturales. Algunos consideran como lagos naturales las lagunas de agua dulce como la de Tortuguero. Las represas en Puerto Rico han sido construidas por agencias locales – Autoridad de Energía Eléctrica, Departamento de Recursos Naturales y Ambientales y la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados – y federales – Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos de América y el Negociado de Reclamaciones del Departamento de lo Interior de los Estados Unidos de América. Al presente, la Autoridad de Energía Eléctrica, la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados y el Departamento de Recursos Naturales y Ambientales operan y mantienen los embalses existentes.

¿Cuántos embalses existen en Puerto Rico? -- En Puerto Rico existen 36 embalses principales formados por represas en los tramos de los ríos en la región montañosa interior y dos fuera del cauce pluvial (Fig. 32). En adición, la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados evalúa la construcción de los embalses Valenciano (Juncos), Beatriz (Caguas), Quebrada Lajas (Río Grande) y Casey (Añasco).

¿Cuántos tipos de represas existen? -- Existen principalmente dos tipos de represas: represas de tierra y represas de concreto con compuertas. Las represas de tierra se diseñan y se construyen con un aliviadero lateral

Figura 32. Localización de los embalses principales en Puerto Rico (Departamento de Recursos Naturales y Ambientales).



(embalses Río Blanco y Fajardo) o de sifón (Foto 3) para descargar el agua cuando supera el nivel establecido. Este tipo de represa no requiere de la presencia física y continua de un operador. Por el contrario, las represas con compuertas, aunque también con un aliviadero, sí requieren de la presencia física y continua de un operador (Foto 4).

¿Cuál es el historial de la construcción de embalses en Puerto Rico? -- El primer embalse en construirse en Puerto Rico fue el de Comerío, construido en el 1907, aunque existían varias represas pequeñas desde mediados del Siglo 19. La mayoría de los embalses fueron desarrollados durante dos períodos comenzando en 1913 hasta el 1974 y un tercer período más reciente entre el 1991 y 2009. El primer período incluyó los embalses desarrollados hasta 1952 por agencias del Gobierno Insular y el Gobierno Federal, como la Autoridad de Fuentes Fluviales y Negociado de Reclamaciones del Departamento de lo Interior de los Estados Unidos de América. El segundo período desde 1952 hasta el 1974 incluye los embalses desarrollados por agencias del Gobierno de Puerto Rico con la cooperación de varias agencias federales, como el Negociado de Reclamaciones del Departamento de lo Interior y el Cuerpo de Ingenieros. El embalse Cerrillos cerca de Ponce se completó en 1991, mientras que los dos embalses fuera del cauce (Fajardo y Río Blanco) se completaron en el 2004 y 2009, respectivamente.

¿Cuál es la función principal de los embalses? -- Los embalses son la fuente principal de agua cruda que utiliza la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados para producir agua potable en la isla, además de suplir agua para riego principalmente en los valles costaneros de la región sur. Los embalses

Foto 3. Dos perspectivas del sifón en el embalse las Curias en la cuenca del Río Piedras (fotos de Ariel E. Lugo).







Foto 4. Dos vistas de la represa del embalse Carraizo también conocido como el lago o embalse de Loíza. Durante épocas de mucha lluvia se abren las compuertas (en este caso tres compuertas estan abiertas) para evitar desbordes (izquierda). A la derecha las compuertas estan cerradas y sale agua por el aliviadero (fotos de Alberto M. Lázaro de la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados).



suplen aproximadamente 400 millones de galones por día (17.5 m^3/s) de agua cruda a las **plantas de filtración** operadas por la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados, lo que constituye el 68 por ciento del agua potable producida en la isla. Paralelamente, los embalses proveen aproximadamente 39 millones de galones por día (1.71 m^3/s) de agua para riego agrícola en los valles costaneros de las regiones sur y norte. Además, proporcionan agua para generar aproximadamente el 1.9 por ciento de la energía eléctrica que produce la Autoridad de Energía Eléctrica. El sistema hidroeléctrico de Caonillas y Dos Bocas está compuesto por miles de metros de tubería que interconecta los embalses Pellejas, Viví, Jordán y Adjuntas, todos en la zona montañosa, con varias plantas hidroeléctricas. Este sistema, a su vez, descarga a los embalses Caonillas y Dos Bocas. Existen otros sistemas hidroeléctricos en los ríos Blanco, Garzas, Yauco y Toro Negro. Los embalses también proveen control parcial a las inundaciones en varias cuencas y son fuente de recreación para miles de residentes dedicados a la pesca deportiva y navegación en la zona montañosa. Finalmente, los embalses son refugios de aves y vida silvestre acuática, como peces, camarones y tortugas.

¿Cómo ha evolucionado la capacidad de almacenaje de agua en los embalses de Puerto Rico? -- La construcción de los embalses principales en la isla aumentó a medida que las demandas de agua aumentaron, pero también con el desarrollo de los sistemas de riego e hidroeléctricos construidos por la Autoridad de Fuentes Fluviales, agencia predecesora de la Autoridad de Energía Eléctrica. La capacidad total construida desde 1913 al presente es de aproximadamente 375,000 ac-p (462.6 hm^3). En comparación, como se ilustra en la figura 33, la capacidad actual es de aproximadamente 275,000 ac-p (339.2 hm^3). La sedimentación progresiva de los embalses ha resultado en una merma de capacidad del 27 por ciento del total construido. La Tabla 3 contiene datos para los embalses principales de Puerto Rico.

¿Cuál es el reto principal con el manejo de los embalses? -- La sedimentación de los embalses es uno de los problemas más importantes en el manejo de los recursos de agua. El principal efecto de un embalse sobre las aguas del río es la disminución de la velocidad y la retención del agua (Fig. 18 b) lo que hace que allí se deposite todo el material suspendido que proviene de su cuenca hidrográfica (Foto 5). Es por eso que los embalses se llenan de sedimentos, lo que disminuye su capacidad para almacenar agu**a (**Fig. 33, Tabla 3). 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.

¿Qué factores naturales y antropogénicos explican la sedimentación de los embalses? -- 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 vegetal. En comparación, la deforestación y remoción de la corteza terrestre por acción antropogénica aceleran la erosión de los suelos y el transporte de sedimentos hacia los cuerpos de agua y eventualmente a los embalses. Los estudios del U.S. Geological Survey en el bosque de Carite documentan que aún en bosques maduros 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 (Foto 6). Las lluvias ciclónicas que ocurren periódicamente en la isla pueden transportar en un día hasta el

Foto 5. Imagen de la represa de Carraizo tomada por el satélite IKONOS. Noten las aguas cargadas de sedimento. La represa esta en la parte inferior de la imagen. Noten el desparrame urbano alrededor del embalse.

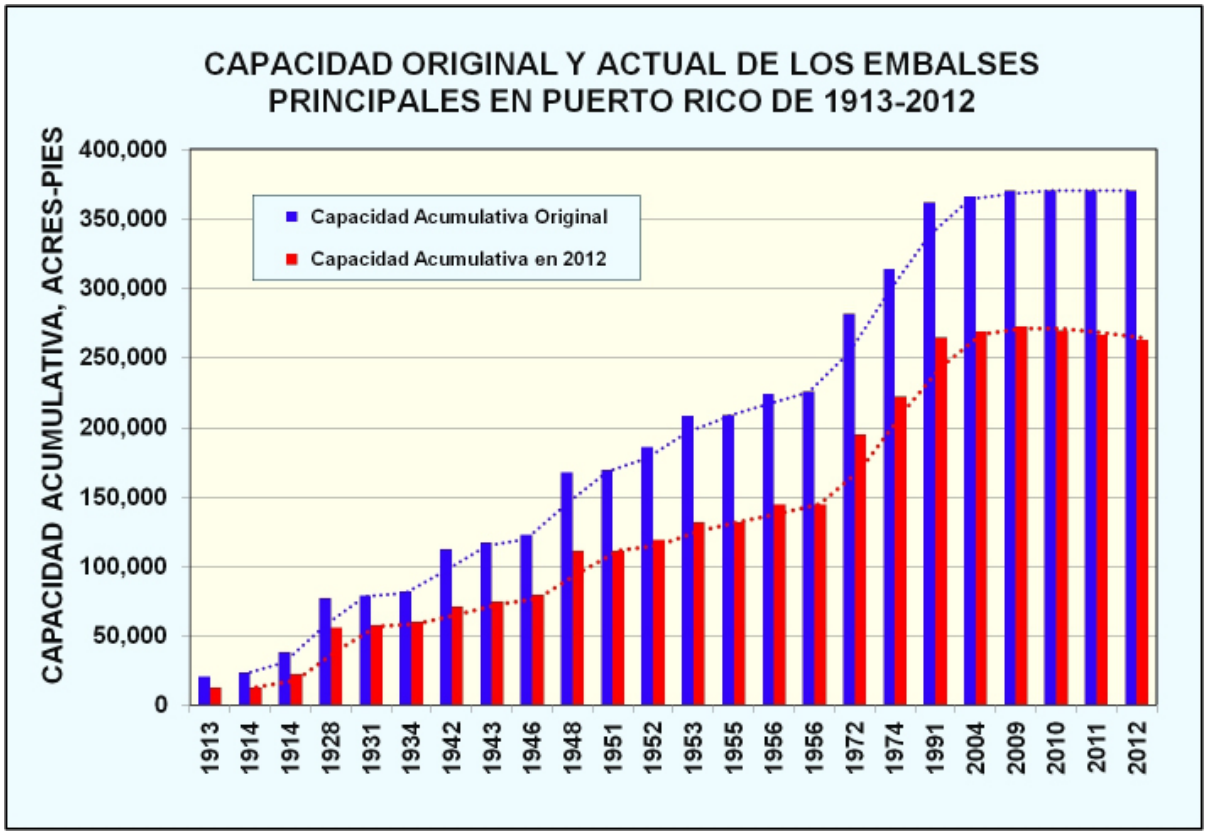


90 por ciento de los sedimentos que descarga anualmente un río en un punto dado.

¿Cuáles son algunos ejemplos de sedimentación de embalses en Puerto Rico? -- Se presentan cuatro ejemplos de sedimentación de embalses documentados en Puerto Rico.

- Las lluvias de aproximadamente 25 pulgadas (635 mm) que ocurrieron los días 21 y 22 de septiembre de 2008 sobre la cuenca del Río Grande de Loíza resultó en la descarga de aproximadamente 1.46 millones de toneladas (1.48 millones de Mg) de sedimentos al embalse Loíza (Fig. 34). 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

Figura 33. Capacidad original (azul) y actual (rojo) de los embalses en Puerto Rico. Para convertir acres-pies a hm^3 multiplique por 0.001233489.



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 aproximadamente $65 millones. Esta pérdida de capacidad debido al evento de dos días equivale a una pérdida de aproximadamente $22 millones. Desafortunadamente, un evento de 25 pulgadas (635 mm) de lluvia en dos días, aunque significativo, no constituye lo máximo esperado para esta región.

- Desde su construcción en el 1942, el embalse de Dos Bocas ha perdido el 63 por ciento de su capacidad original de almacenamiento. Este embalse ha recibido sedimentos a una tasa de alrededor de 311,000 m^3/a (406,788 yd^3/a). Eso equivale a que diariamente se vacíen en el embalse 57 camiones[7] llenos de tierra.
- Los embalses de Loíza y Caonillas pierden anualmente, respectivamente, el 1.8 y 0.25 por ciento de su capacidad de almacenaje de agua. Es posible que en un sólo evento de lluvia un embalse reciba casi todos los sedimentos que recibiría en un año. Esto se debe a la magnitud de las grandes lluvias en Puerto Rico, el comportamiento de los ríos (Fig. 35) y a la vulnerabilidad de las cuencas hidrográ-

[7]Asumiendo una carga por camión de 15 m^3 (19.62 yd^3).

Tabla 3. Sedimentación de los embalses principales de Puerto Rico. Para convertir ac-p a hm^3 y ac-p/a a hm^3/a, multiplique por 0.001233489. Para convertir mgd a m^3/s multiplique por 0.0438126365741.

Embalse Cuenca (Río)	Caonillas Grande de Arecibo	Carite Grande de La Plata	Cerrillo Bucaná	Cidra Bayamón	Dos Bocas Grande de Arecibo	Fajardo Fajardo	Garzas Grande de Arecibo	Guajataca Guajataca	Guayabal Jacaguas	Guayo Grande de Añasco	La Plata Grande de la Plata	Loíza Grande de Loíza	Lucchetii Yauco	Patillas Grande de Patillas	Toa Vaca Jacaguas
Capacidad Original (ac-p)	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
Tasas de Sedimentación (ac-p/a)	209	30	49	12.4	277	1.0	10.6	70.6	49.5	52.0	161	245	143	89.2	131
Capacidad Restante al 2010 (ac-p)	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
Por ciento de Capacidad Restante	71	48	98	85	37	100	85	85	47	82	82	61	50	71	91
Vida Útil Remanente (a)	160	285	958	370	48	2,000	385	481	97	269	171	60	62	126	394
Caudal Annual Promedio de Entrada (ac-p/a)	201,100	31,500	41,500	11,800	325,000	13,500	13,500	84,700	19,600	58,500	235,500	336,500	28,000	50,200	17,500
Rendimiento Seguro en el 2004 (mgd)	70	56	25	6	52	12	10	42	20	12	63	55	13	23	14



Foto 6. Foto aérea del embalse de Carraizo ilustrando la cobertura de plantas acuáticas flotantes acumuladas aguas arriba de la represa. La represa esta en el centro de esta foto provista por Alberto M. Lázaro de la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados.

Figura 34. Evento de descarga de agua (azul) y sedimentos en cuenca del río Grande de Loíza 21 y 22 de septiembre del 2008. Los datos comienzan antes del evento y terminan el 25 de septiembre del 2008. Se presentan datos para los ríos Gurabo y Grande de Loíza. Los datos de descarga de agua están combinados para los dos ríos y los de sedimentos suspendidos en toneladas (SST) se reportan individualmente (negro para el Gurabo y rojo para Grande de Loíza). Para convertir toneladas a Mg, multiplique por 1.016. Para convertir pies cúbicos por segundo a gal/min, multiplique por 448.831.

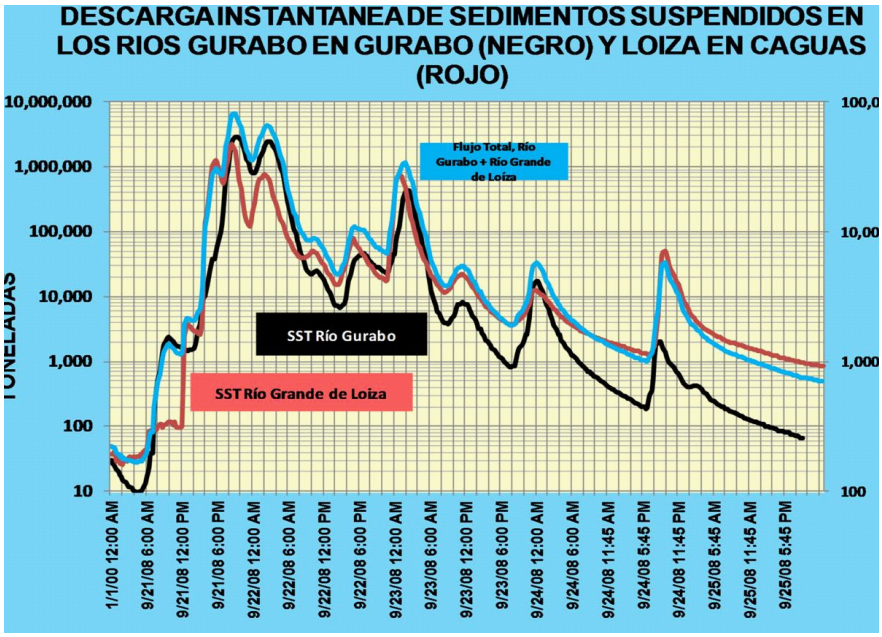
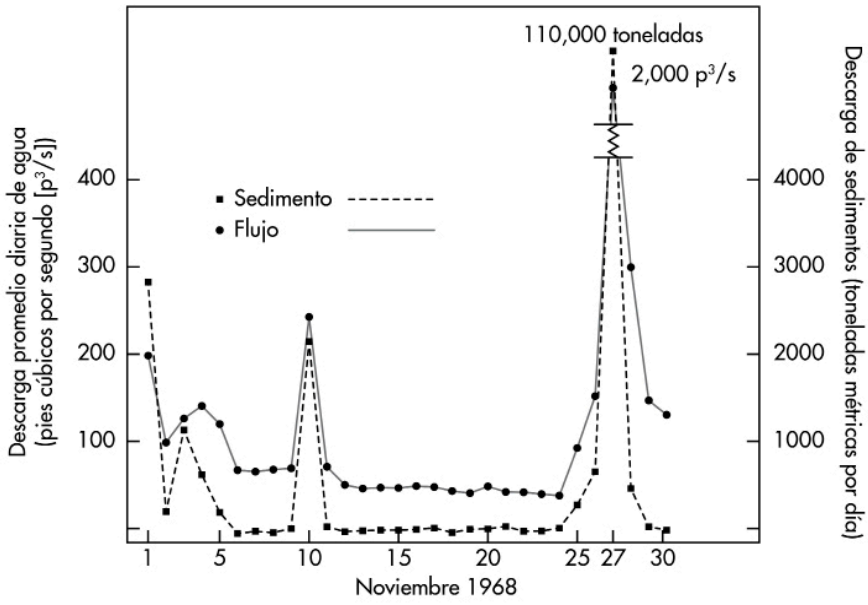


Figura 35. Descarga de agua y sedimentos del río Tanamá durante noviembre del 1974 (Lugo, Quiñones y Weaver 1980). Durante el periodo de varios días en el mes de noviembre, el río descargó el 80 por ciento de la descarga anual de agua y el 90 por ciento de la descarga anual de sedimentos.



ficas ante estos eventos. En el año 1998 se dragó del embalse de Loíza 6 millones de m^3 de sedimentos a un costo de aproximadamente $65 millones. Se estima que para el año 2017 habrá que realizar el próximo dragado para remover 6 millones m^3 adicionales probablemente a un costo mucho mayor.

- El 50 por ciento de las 1,200,000 toneladas (1,219,200 Mg) transportadas por el río Valenciano por 20 años fue durante eventos de pocos días de duración específicamente durante los huracanes Hortensia y Georges. Los sedimentos transportados por el río Valenciano son principalmente de arena por lo que la construcción del embalse Valenciano requerirá de un Plan de Mantenimiento y Dragado.

La tarea de remover sedimentos de los embalses de Puerto Rico, como el de Loíza, es un asunto difícil y costoso, y que requerirá repetirse periódicamente para mantener las capacidades necesarias para satisfacer la demanda de agua.

¿Qué otros problemas tienen los embalses? -- Otros problemas de los embalses incluyen la falta de oxígeno disuelto, calidad de las aguas y susceptibilidad al desborde de las aguas sobre las compuertas.

¿En qué consiste el problema de falta de oxígeno en los embalses? -- Los sedimentos de los embalses, contrario a los de los ríos, están sujetos a condiciones de **anoxia** (falta de oxígeno). Esto se debe a que el agua en los embalses es profunda, contiene mucha materia orgánica, tiene una alta demanda de oxígeno, poca circulación y poca capacidad para acarrear oxígeno. Al tornarse el agua y los sedimentos anóxicos, cambian todas las propiedades químicas de los sedimentos y estos tienden a acumular metales pesados y otros contaminantes de agua. Sin embargo, los análisis de sedimentos en varios de los embalses en la isla no han detectado contaminantes orgánicos en concentraciones que representen un riesgo a la salud.

¿En qué consiste el problema de calidad de aguas en los embalses? -- La calidad del agua en los embalses tiende a deteriorarse por dos razones principales: (1) por condiciones anóxicas debido al flujo de grandes cantidades de materia orgánica que consume el oxígeno disuelto y que junto a la falta de circulación del agua embalsada lleva al desarrollo de condiciones anaeróbicas en las capas profundas del embalse, y (2) las entradas excesivas de contaminantes de distintas fuentes. La Autoridad de Acueductos y Alcantarillados recibe aproximadamente 228.5 millones de galones por día (10.01 m^3/s) de aguas sanitarias que reciben **tratamiento primario**, **secundario** o **terciario**. La mayor parte de estas aguas se descargan directamente al océano (197 mgd o 8.63 m^3/s), mientras que unos 31.3 millones de galones por día (1.37 m^3/s) que reciben tratamiento secundario se descargan a quebradas y ríos a lo largo de la isla (Tabla 4). Estas descargas añaden nutrientes (**eutrofican**) y contaminantes a los embalses. Además, las aguas de escorrentía que se descargan de solares y parcelas bajo construcción, así como de actividades agrícolas (cultivos, ganado y pollerizas) también contribuyen al deterioro de la calidad del agua en los embalses. La situación se empeora cuando no se toman precauciones adecuadas para el control de la erosión de los suelos y la producción de sedimentos y otros contaminantes que llegan a los ríos y quebradas y de allí eventualmente a los embalses.

¿En qué consiste el problema del desborde de las aguas de los embalses? -- Los embalses son susceptibles a que las aguas rebasen sus compuertas como ocurrió en Loíza durante el huracán Hugo. El peligro extremo es que ceda la represa causando un golpe de agua catastrófico

Tabla 4. Caudal y descarga en mgd de aguas sanitarias tratadas por la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados en el año 2010. Para convertir a m^3/s, multiplique por 0.0438126365741.

Tratamiento	Caudal	Descarga	
		Al Océano	A Ríos y Embalses
Primario	161.2	161.2	0
Secundario	51.0	36.0	15.0
Terciario	16.3	0	16.3
Total	228.5	197.2	31.3

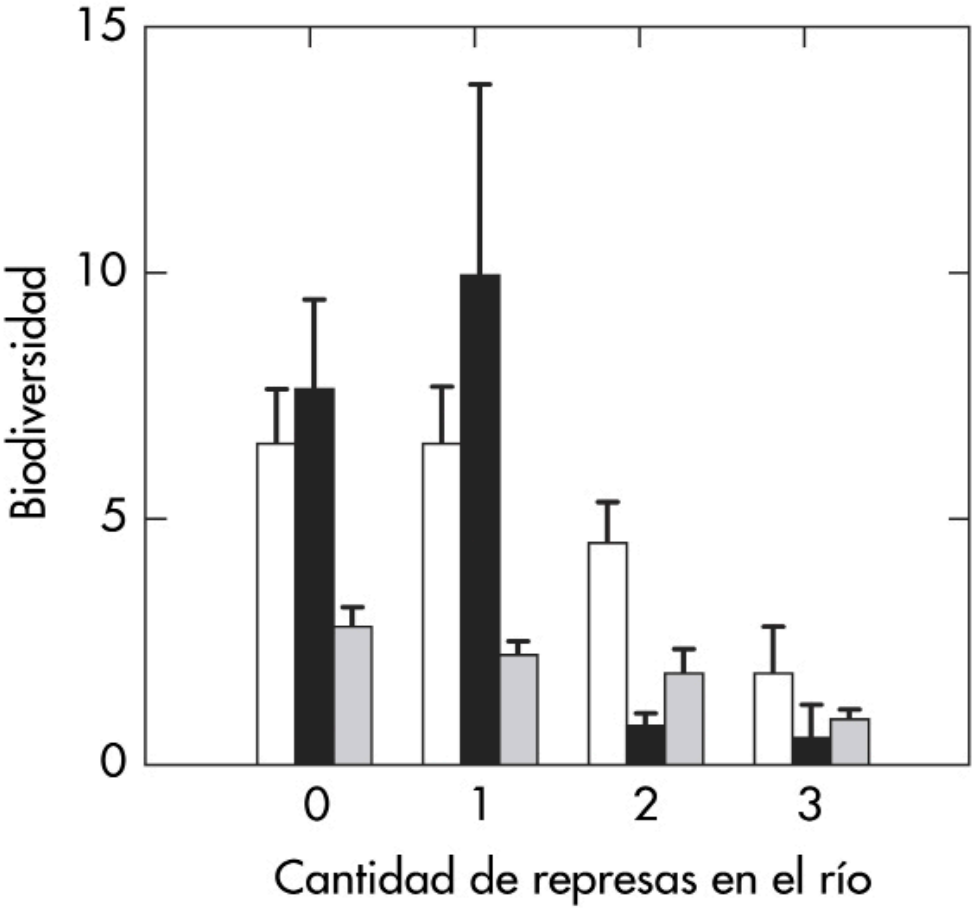
aguas abajo. Sin embargo, esto es altamente improbable (y nunca ha ocurrido en Puerto Rico) debido al diseño de los vertidores de las represas, que permiten descargar con seguridad el exceso de agua que fluye al embalse. El mantenimiento preventivo de la represa, sus compuertas e infraestructura y el manejo del nivel de las aguas dentro del embalse, pueden evitar los desbordes. Sin embargo, el desborde de represas no es frecuente y sí la reducción en el caudal del río aguas abajo a la represa, lo que afecta a la vida acuática que antes sostenía. Además, la geomorfología o forma de los cauces de los ríos se altera por la falta de inundaciones. Por ejemplo, los ríos tienden a formar playas de grava y arena que poco a poco desaparecen porque la grava y arena se quedan en la represa y dejan de alimentar los canales del río. Así se pierden hábitats importantes para la vida acuática y terrestre.

¿Cómo afectan los embalses a la flora y la fauna? -- El embalse cambia las condiciones del ecosistema de río a lago y por lo tanto cambia la flora y fauna. Los embalses tienen menos diversidad de peces, crustáceos y otros organismos acuáticos que los ríos. Los ríos aguas arriba a los embalses se empobrecen de especies relativos a los ríos aguas abajo, ya que la represa interrumpe las migraciones de larvas y juveniles hacia y desde el estuario a la montaña (Fig. 36). Especies introducidas reemplazan las nativas en los embalses, tanto en la flora como en la fauna. El remplazo de peces nativos por la tilapia es un ejemplo de este efecto.

¿Quién administra los embalses en Puerto Rico? -- La administración de los embalses depende de su uso principal e inicial. Por ejemplo, el de Loíza está bajo la administración de la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados, porque su uso principal es el abasto de agua potable. El de Matrullas fue construido para generar energía eléctrica, por lo que es administrado por la Autoridad de Energía Eléctrica. Los embalses originalmente dedicados al riego, como el de Patillas, son administrados también por la Autoridad de Energía Eléctrica. El Departamento de Recursos Naturales y Ambientales administra varios embalses, inclusive los de Toa Vaca y Cerrillos, que se utilizan principalmente para suplir agua potable a la región sur y para control de inundaciones.

¿Cómo se regulan los niveles de agua en los embalses? -- Todo embalse tiene un operador responsable de manejar o velar por los niveles de agua según las prioridades. Cuando la prioridad es el control de inundaciones, como en el de Cerrillos, hay que mantener un volumen bajo para poder detener en el embalse una porción importante de la crecida y así reducir la descarga máxima. Si la prioridad es el abasto de agua, como en Loíza, el operador no puede

Figura 36. Efectos de las represas en la biodiversidad en los ríos de las montañas de Luquillo. Las barras abiertas representan el número de especies y las barras sólidas representan la densidad de organismos. Las barras grises representan los índices de diversidad de especies. El eje vertical contiene los números correspondientes al valor de estos tres parámetros. Los números 0, 1, 2 y 3 en el eje horizontal representan la cantidad de represas en el río (Hemphill y García, manuscrito sin fecha).



permitir que el nivel de agua en el embalse baje demasiado. Sin embargo, operaciones sin previa coordinación entre los usuarios como la ocurrida en el 2003 en el embalse Guajataca, pueden redundar en vaciar los embalses en tiempo de sequía, dejando sin abasto a toda la región oeste. Fallas en la operación de las compuertas como la ocurrida durante el huracán Hugo en el año 1989 en la represa Loíza, averiaron las bombas y otros equipos, y además pusieron en riesgo la misma estructura.

¿Cómo se evitan los problemas de los embalses? -- Durante sequías, debido a la pérdida de capacidad, es necesario reducir la cantidad de agua que se puede extraer para la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados y riego agrícola, así como para generar electricidad. La forma más efectiva de preservar la capacidad de los embalses y mejorar la calidad del agua es mejorar el manejo de los suelos y la vegetación en sus cuencas hidrográficas y reducir las entradas de contaminantes. Los sedimentos que llenan aceleradamente los embalses son el producto de la falta de conservación de los suelos, los que se erosionan por la lluvia y la escorrentía. Por otro lado, estudios llevados a cabo por el U.S. Geological Survey en el

bosque de Carite concluyeron que los suelos aún en los bosques más densos de la isla están sujetos a derrumbes y acarreo de grandes cantidades de sedimentos hacia las quebradas y los ríos durante lluvias extremas como durante huracanes. Estas conclusiones establecen que en Puerto Rico existen tasas naturales elevadas de erosión y transporte de sedimentos aún en cuencas cubiertas de bosques.

¿Cómo se logra reducir la sedimentación y mejorar la calidad del agua en los embalses? -- Fundamentalmente es necesario reducir la velocidad de las aguas cuando fluyen sobre las superficies en la cuenca hidrográfica y maximizar la infiltración antes de que las aguas lleguen a los cuerpos de agua. La vegetación adecuadamente distribuida en la cuenca hidrográfica purifica las aguas de escorrentía. Los usos de terreno en las cuencas hidrográficas deben ser aquellos que reduzcan la producción de sedimentos, nutrientes y contaminantes que llegan al embalse. Los métodos de construcción y de movimiento de terrenos pueden mitigar la producción y transporte de sedimentos. Las **plantas de tratamiento** de aguas sanitarias necesitan proveer tratamiento más avanzado para remover nutrientes y otros contaminantes. Las aguas sanitarias y de escorrentía urbana se pueden reciclar. Las extracciones de grava y arena de los cauces y márgenes de los ríos no son recomendables. Las actividades agrícolas, en particular la ganadería, la crianza de pollos, los chiqueros y las porquerizas, deben guiarse por las más avanzadas técnicas de conservación y control de descargas de aguas contaminadas y de calidad ambiental.

¿Cuál es la ventaja de los embalses fuera del cauce del río? -- 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 y efectos negativos a las especies acuáticas migratorias. 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 agua que fluye hacia los embalses contiene cantidades menores de sedimentos, reduciendo así la tasa de sedimentación y prolongando su vida útil. Desde el punto de vista ecológico, los embalses fuera del cauce del río conservan los ríos al mantenerlos fluyendo libremente. El flujo libre de los ríos mantiene entonces sus funciones ecológicas y geoquímicas, permitiendo el movimiento natural de organismos, agua, sedimentos y elementos químicos.

CALIDAD DEL AGUA

¿Qué es la calidad del agua? -- La calidad del agua es un término genérico que se utiliza para evaluar el grado de pureza química, física y biológica del agua.

¿Por qué es importante la calidad del agua? -- Es importante conocer la calidad del agua para darle el uso adecuado a las aguas disponibles. El agua tiene muchos usos y cada uso tiene un requisito distinto de calidad. Por ejemplo, el uso del agua para la recreación requiere una calidad distinta al uso para consumo humano, el uso industrial o para el riego agrícola. Las agencias de los gobiernos locales y federales establecen límites para los indicadores de calidad de agua de acuerdo al uso del agua. Por ejemplo, el máximo permitido para el arsénico en playas y estuarios es de 150 mg/L pero si el agua es para consumo humano, el límite es de 0.022 mg/L, o sea, casi 7,000 veces menos concentrado. La Junta de Calidad Ambiental reconoce cuatro usos del agua para propósitos de regular su calidad: uso por la vida acuática, contacto por natación, contacto durante recreación pasiva y como fuente de agua potable.

¿Cómo se mide la calidad del agua? -- La calidad del agua se determina por medición directa en el campo y en laboratorios debidamente certificados para llevar a cabo las pruebas necesarias. Bajo ese término se incluyen docenas de parámetros o medidas que se utilizan para evaluar la condición del agua. Por ejemplo: las concentraciones de oxígeno disuelto, sólidos suspendidos, minerales disueltos y metales pesados; la cantidad y tipo de bacterias, la acidez, la temperatura y las poblaciones de organismos. Algunos parámetros de calidad de agua se miden en el campo, como por ejemplo la acidez (pH), la cantidad de bióxido de carbono y el oxígeno disuelto. Además, existen lo que se conoce como bio-indicadores o poblaciones de plantas, animales o microorganismos que viven o mueren según la calidad del agua.

¿Cuáles son algunos indicadores de pobre calidad del agua? -- La pobre calidad del agua depende del uso que se le va a dar. Para consumo humano, algunos indicadores de pobre calidad son: la **turbiedad**, el color, la alta salinidad, o la presencia de metales pesados, bacterias fecales y trihalometanos (compuestos orgánicos potencialmente carcinogénicos). Los crecimientos excesivos de plantas acuáticas introducidas son indicadores de aguas contaminadas y ricas en nutrientes. La mortandad de peces indica cambios rápidos en calidad, lo que incluye pérdida de oxígeno disuelto o presencia de algún contaminante detrimental a estos organismos.

¿Cuál es la calidad del agua en los cuerpos de agua de Puerto Rico? -- La calidad del agua en Puerto Rico no es muy buena. El estudio 305B del 2010 de la Junta de Calidad Ambiental para la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América resume la situación para ríos, lagos y lagunas, estuarios y la costa (Tabla 5). Los ríos, estuarios, embalses y lagunas, son los sistemas que enfrentan problemas mayores de calidad de agua. Las aguas costaneras están en mejores condiciones en parte porque la salinidad del agua de mar mata los patógenos del agua dulce y el volumen del mar diluye los contaminantes.

En otro estudio se encontró que en el 1995, tres embalses (La Plata, Toa Vaca y Loíza) tenían aguas eutróficas, es decir, ricas en nutrientes, particularmente fósforo y nitrógeno. En el 1981 el U.S. Geological Survey encontró serios problemas de intrusión salina y contaminación con coliformes fecales y compuestos orgánicos e inorgánicos en acuíferos de la costa norte y costa sur de Puerto Rico. En el 1985, la misma agencia informó la contaminación de acuíferos con sustancias orgánicas sintéticas y peligrosas a la salud tales como el tricloroetileno y el tetracloroetileno, entre otros.

La situación de hoy contrasta con la del comienzo del siglo 19, cuando San Juan se suplía de tres pozos (el de Aguilar conocido hoy como el Condado, el Tejar en la Puntilla y Miraflores, cerca de la bahía de San Juan) con agua de buena calidad. Los ríos Bayamón y Piedras (Fig. 37), hoy entre los más contaminados de la isla, suplían agua a Hato Rey, Santurce y San Juan, por medio de canales. Según el U.S. Geological Survey, para los años 1973 a 2002, los ríos Piedras (2.87 mg/L), Cibuco (2.05 mg/L), Bayamón (1.97 mg/L), Culebrinas (1.79 mg/L) y Humacao (1.77 mg/L) son los de mayor concentración de nitrógeno total. Los ríos Piedras (0.53 mg/L), Guanajibo (0.37 mg/L), Grande de Loíza (0.35 mg/L), Bayamón (0.33 mg/L) y Humacao (0.30 mg/L) son los de mayor concentración de fósforo total.

¿Cuál es la calidad del agua que sirve la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados? -- Por su tratamiento en las plantas de filtración, el agua que sirve la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados es de buena calidad. Según datos provistos por la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados a las agencias reguladoras, el agua que se sirve cumple en más del 99 por

Tabla 5. Por ciento de los cuerpos de agua que en la década del 1990 cumplían o no cumplían con los estándares de calidad de agua en Puerto Rico.

Uso del agua	Cumple	Cumple pero amenazada	Cumple parcialmente	No cumple
		Ríos		
Vida acuática	13.7	66.9	0.8	18.6
Natación	13.3	65.5	0.1	21.1
Recreación pasiva	38.3	48.7	4.4	8.6
Suministro de agua	24.6	60.8	8.1	6.5
		Embalses y lagunas		
Vida acuática	59.6	0	4.5	35.9
Natación	52.1	0	7.9	40.0
Recreación pasiva	72.4	0	7.4	20.2
Suministro de agua	100	0	0	0
		Estuarios		
Vida acuática	19.2	80.0	0	0.8
Natación	16.7	82.5	0	0.8
Recreación pasiva	30.2	69.0	0	0.8
		Aguas costeras		
Vida acuática	73.7	11.2	2.7	12.5
Natación	82.9	9.7	1.4	6.0
Recreación pasiva	95.7	0	0	4.3

Fuente: Junta de Calidad Ambiental.

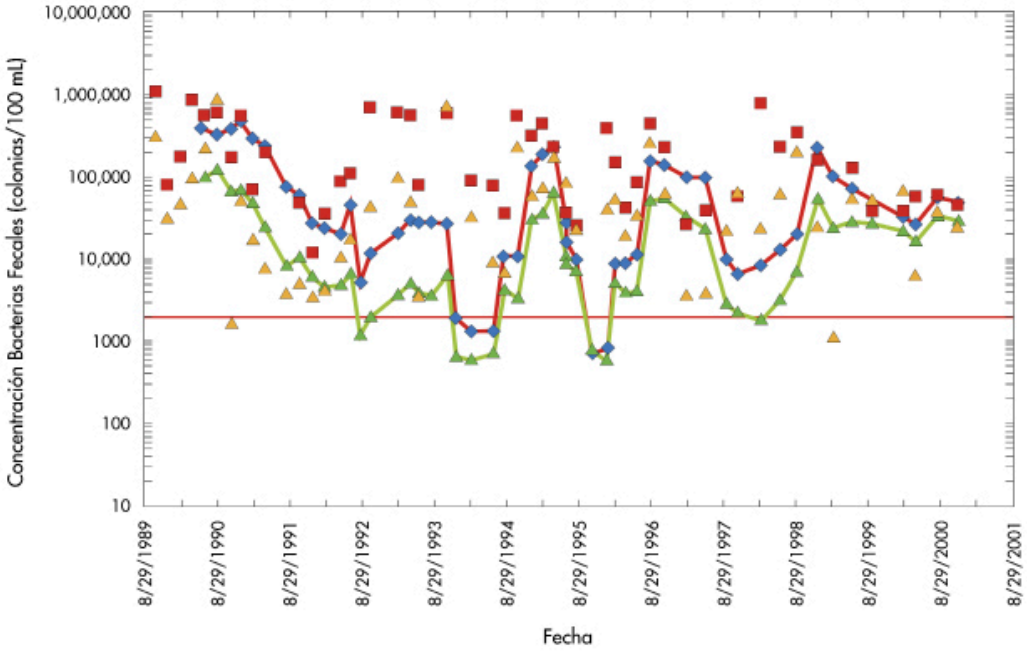


Figura 37. Conteos de dos tipos de bacterias fecales en el río Piedras. Los datos del USGS fueron publicados por Larsen y Webb (2009). La escala del eje vertical es logarítmica. La línea horizontal para aguas clase SD representa el conteo de bacterias fecales sobre el cual las aguas son inaceptables para cualquier uso. Los puntos representan concentraciones medidas y las líneas son promedios corridos geométricos de cinco medidas.

ciento de las ocasiones con los parámetros y requerimientos. La calidad se mide a través de más de 180,000 muestreos anuales en cientos de puntos localizados a lo largo de todo el sistema de distribución en toda la isla. Cada planta de filtración de la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados tiene que cumplir con 14 requerimientos (Fig. 38) para regular todo el proceso de tratamiento desde que el agua es extraída del río, embalse o pozo hasta que es inyectada al sistema de distribución. Más del 80 por ciento del presupuesto operacional de la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados está asignado a atender requerimientos de calidad.

¿Cómo se asegura la calidad de las aguas servidas por la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados? -- Las reglamentaciones del Departamento de Salud y la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América requieren que la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados monitoree y mantenga la calidad del agua en sus sistemas de distribución de acuerdo a las normas locales y federales. El agua servida por la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados requiere de cloro residual en la tubería para garantizar su calidad hasta que es servida por el grifo de los clientes. La adición de cloro desinfectante al agua potable mantiene su calidad desde el punto de vista bacteriológico.

¿Qué factores afectan la calidad del agua servida por la Autoridad de Acueductos Alcantarillados? -- Algunos eventos podrían afectar la calidad del agua en la tubería, por ejemplo roturas y durante la reparación de las mismas. En caso de eventos de mayor turbiedad en el río, hay que aumentar el tiempo de los procesos de tratamiento (retención, sedimentación y contacto de cloro) lo que resulta en una reducción en la producción de la planta (algo común en plantas de filtración de menor tamaño). En estos casos el agua servida por la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados podría ser de alta turbiedad por

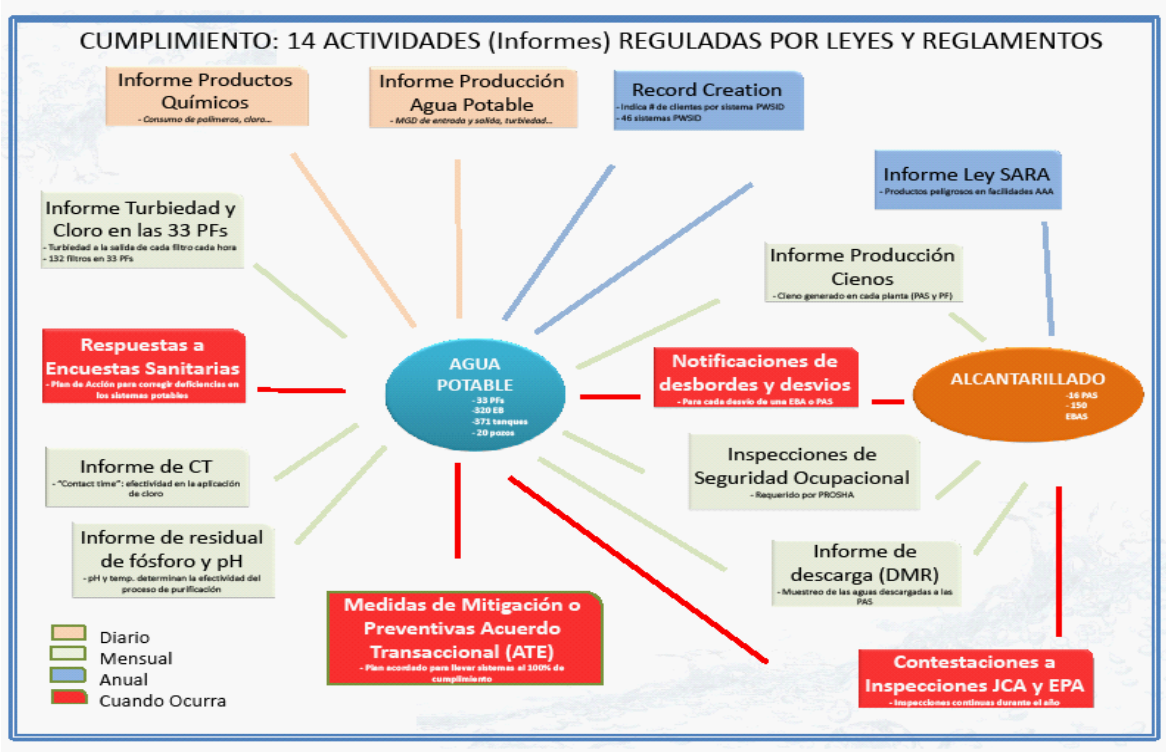


Figura 38. Telaraña de leyes y regulaciones que tiene que cumplir la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados para poder justificar el proceso de filtración de las aguas de Puerto Rico.

lo que se exhorta a que se hierva el agua antes de consumir.

¿Cuáles son algunos retos en el mantenimiento de la calidad de agua servida por la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados? -- Uno de los principales retos que enfrenta la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados en el proceso de purificación del agua es por la presencia de sedimentos en forma de turbiedad, lo que a veces afecta el color y el sabor del agua potable. Por otro lado, los muestreos y análisis del agua servida por la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados en varios municipios, principalmente en la zona metropolitana de San Juan, demuestran que en algunos sistemas las concentraciones de trihalometanos o ácidos haleacéticos se acerca a las concentraciones máximas permitidas por las agencias reguladoras.

¿Cuál es la percepción de algunos sectores de la población sobre la calidad del agua servida por la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados? -- Un por ciento significativo de la población tiene la percepción de que el agua que recibe de la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados es de baja calidad por lo que consume agua embotellada. Eventos en los que el agua sale turbia debido a que contiene altas concentraciones de sedimentos (sólidos disueltos y en suspensión), o a veces tiene olor a materia orgánica o con sabor a cloro contribuyen a una percepción de pobre calidad en el agua. El cloro residual en el agua servida por la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados se puede percibir con el olfato. En ocasiones el agua servida tiene algún grado de turbiedad debido a altas concentraciones de manganeso (Mn) y hierro (Fe). Ambos elementos se consideran parámetros secundarios que no son requeridos ni afectan la potabilidad del agua. Sin embargo, al reaccionar se oxidan y forman precipitados que aumentan la turbiedad del agua servida y afectan su estética (Fig. 39). En otras ocasiones, la turbulencia puede afectar la estética del agua servida por la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados. La mezcla de agua y aire es propiciada por la turbulencia lo que crea miles de burbujas que a su vez crean tonalidades de blanco en el agua por unos segundos luego de servida.

¿Cuáles son las causas de la contaminación del agua? -- Hay muchas. Entre otras: (1) sedimentación y erosión excesiva en las cuencas hidrográficas y en el cauce de ríos debido a la falta de buenas prácticas de manejo, a pobres técnicas de construcción y a la ausencia de regulación de esta industria; (2) las aguas sanitarias que se vierten directamente a los cuerpos de agua; (3) las aguas sanitarias pobremente tratadas primoridalmente de cientos de miles de pozos sépticos inadecuados en toda la isla; (4) las aguas sanitarias que se originan en polleras y porquerizas sin medidas adecuadas de tratamiento; (5) escorrentías de zonas urbanas; (6) la destrucción de los sistemas naturales que normalmente purifican el agua gratuitamente; (7) tanques soterrados con filtraciones; (8) lixiviados que emanan de vertederos pobremente diseñados u operados; y finalmente (9) inyecciones o contaminación industrial al subsuelo, aún algunas de las autorizadas por la Junta de Calidad Ambiental.

¿Por qué son necesarios los bosques, lagunas, estuarios y humedales para mejorar la calidad del agua? -- Los humedales, los bosques, las lagunas y los estuarios, en fin, toda la vegetación y los organismos que allí viven, son sistemas filtradores del agua y del aire. Por sus actividades estos sistemas naturales absorben y almacenan sustancias que normalmente contaminan las aguas. Cuando estos sistemas naturales están presentes, pueden contrarrestar o amortiguar la actividad contaminante del ser humano. Sin embargo, lo que ocurre en Puerto Rico es que estos sistemas se debilitan considerablemente al reducirlos en extensión y sobrecargarlos con cantidades de contaminantes muy superiores a su capacidad amortiguadora.

Tabla 39. Aguas amarillas. Altas concentraciones de hierro (Fe) y manganeso (Mn) causan tonalidades de amarillo en el agua potable servida, cuando se precipitan. La precipitación es el producto de la oxidación. La aplicación de ortofosfato protege las partículas de Fe o Mn y evita se precipiten. La Autoridad de Acueductos y Alcantarillados monitorea las concentraciones de Fe y Mn en el río.



TOMAS DE AGUA

¿Qué es una toma de agua? -- Una toma de agua es una estructura que se ubica en un cuerpo de agua para extraer agua dulce. La toma puede ser un tubo en el cauce de una quebrada o río, o la presa de un embalse.

¿Cómo afectan las tomas de agua a la flora y la fauna? -- Las tomas de agua tienen siete efectos principales sobre la flora y fauna.

(1) En la etapa de construcción es posible que se afecte la vegetación en las márgenes del río o la vegetación terrestre cercana. Esta vegetación es la que regula la calidad del agua del río, la temperatura del agua, la luz que le llega al río y además les provee alimentación a los organismos del río; (2) la toma en sí saca del río a organismos (adultos y juveniles), huevos y larvas de especies acuáticas que flotan en el agua. Esto le causa la muerte a millones de organismos y afecta la reproducción de las especies acuáticas que utilizan el agua como medio de reproducción, transportación o hábitat. Por ejemplo, estudios documentan que entre el 50 y el 90 por ciento de las larvas de los camarones de río mueren en las tomas de agua de los ríos Mameyes[8] y Espíritu Santo en El Yunque; (3) las represas o estructuras que

[8]La toma en el río Mameyes fue desactivada.

se construyen para ubicar las tomas de agua en los ríos y quebradas representan impedimentos para la migración de organismos del estuario a la montaña, como es el caso de varias especies de camarones y el cetí (pez olivo). Por lo tanto, reducen la abundancia y diversidad de las poblaciones que pueden vivir aguas arriba de las tomas; (4) la disminución en el flujo diario y capacidad de dilución del agua debido a la extracción para el consumo humano crea problemas de calidad de agua y de recursos para sostener la vida acuática aguas abajo de las tomas. Básicamente al sacarle agua al río les quitamos parte del medio de vida a los organismos acuáticos a la vez que reducimos la capacidad del medio acuático para mantener su calidad y sostener a los organismos. El efecto es comparable a cuando las personas nos limitan el espacio terrestre y contaminan la atmósfera de que dependemos para vivir y respirar; (5) las tomas pueden secar ríos y quebradas cuando extraen más agua de la que descargan los cuerpos de agua. Como consecuencia, la flora y la fauna acuática perecen al perder el medio acuático que les sostiene. Esto ocurre en varios de los ríos en los valles costaneros de la región sur; (6) el resultado neto de todos los efectos anteriores es que la actividad humana crea nuevas condiciones ambientales a las cuales las especies nativas no están adaptadas y como consecuencia estas nuevas condiciones favorecen las especies introducidas sobre las nativas; y (7) los cambios en las inmediaciones de las tomas de agua y la mortalidad de organismos en los tubos de las tomas, disminuyen la cantidad de organismos, alimento y nutrientes que le llega a los estuarios en la costa.

¿Cómo se mitigan los efectos ecológicos negativos de las tomas de agua? -- Antes de ubicar las tomas de agua es necesario estudiar las diferentes zonas de los ríos para evitar construirlas donde los daños sean más significativos. La ubicación y el diseño apropiado pueden reducir los efectos ecológicos negativos. La construcción y mantenimineto de las tomas deben llevarse a cabo con cuidado para minimizar los efectos ecológicos. Las horas de bombeo pueden ajustarse de suerte que no se bombee agua durante las horas críticas de las migraciones de organismos, larvas y huevos. Las represas se pueden diseñar para que permitan el paso de organismos en ambas direcciones y para limitar la extracción de agua a cantidades que no sequen los ríos y quebradas. Las tomas de agua pueden localizarse a una distancia significativa de las entradas de las aguas sanitarias. También se pueden construir embalses fuera del cauce de los ríos.

SEQUÍAS

¿Cuándo y por qué ocurren sequías en Puerto Rico? -- 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 limitan 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 todo Puerto Rico y el resto del Caribe. Las sequías de 1934 y 1974 son representativas de estas condiciones generales de poca lluvia en Puerto Rico 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, ocasionando que la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados tuviera que racionar el agua potable a los residentes de la zona metropolitana de San Juan desde mayo hasta agosto de 1994. Datos del Servicio Nacional de Meteorología establecen que la sequía más severa conocida fue la de 1964, que se extendió hasta 1967. La lluvia mermó aproximadamente en un 30 por

ciento del promedio anual, lo que representó un déficit de aproximadamente 40 pulgadas (1,016 mm) en dos años. Un evento similar en tiempos modernos sería catastrófico en Puerto Rico 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.

¿Qué efecto tienen las sequías sobre el ambiente y las aguas? -- Las sequías afectan la vegetación y los animales, pero hay pocos estudios sobre esos efectos en Puerto Rico. Durante la sequía del 1994, estudios en los bosques de Guánica y Luquillo no demostraron efectos significativos sobre los árboles, por lo que se cree que la vegetación natural está adaptada a sequías de esa magnitud. Los efectos principales de esa sequía fueron en los ambientes dominados por el ser humano. Por ejemplo:

- la sequía del 1994 afectó la flora y fauna de los embalses y los ríos con tomas de agua de la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados. En los embalses se concentraron los organismos y la contaminación debido a la disminución en el volumen de agua y muchos ríos y quebradas se secaron, resultando en mortalidades masivas;
- en la sequía del 1994 también hubo un aumento en la producción de desperdicios sólidos (15,000 ton [15,240 Mg]) adicionales de plásticos desechables en cuatro meses o el equivalente a una población adicional de 50,000 personas);
- los acuíferos sufren descensos precipitosos en sus niveles de agua y se exponen a la posibilidad de intrusión salina, particularmente en los acuíferos llanos.

¿Qué efecto tienen las sequías sobre la población? -- Las sequías afectan la calidad de vida ya que impactan asuntos personales, de conveniencia y económicos. Las quejas y costos principales son:

- Hacer fila para obtener agua en los oasis de la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados.
- Costo adicional para comprar agua embotellada.
- Recoger agua durante las horas cuando está disponible.
- Hervir, filtrar o destilar agua para poder tomarla.
- Enfermarse con el agua.
- No poder bañarse, ni descargar el inodoro.
- No poder lavar la ropa o fregar los platos.
- Costo de instalar cisternas.
- Costo de visitar restaurantes más frecuentemente.
- Compra y uso de utensilios y materiales desechables que genera más basura y el costo de disponer de ella.
- Costo de comprar agua embotellada en restaurantes.
- No poder lavar el automóvil.
- No poder echarle agua a las plantas o regar la grama.
- Compra de destiladores y filtros.
- Costo de más gasolina para obtener agua, ir a los restaurantes y viajes al supermercado para comprar agua.

Estos costos se estimaron en $100.00 por familia por mes en la década del 1990, que en cuatro meses suman a $110 millones para todas las familas afectadas. Con los costos del presente, esta cantidad debe ser muy superior.

¿Qué efecto tienen las sequías sobre la economía del país? -- El efecto de las sequías sobre la actividad económica es variable y complejo. La sequía del 1994 causó pérdidas de $165 millones a la agricultura lo que representó el 56 por ciento del total de pérdidas, además de las pérdidas en la manufactura, la construcción, la minería, la transportación, el comercio, las finanzas y seguros, los servicios y el gobierno. El turismo es particularmente afectado al

reducirse el número de turistas registrados en hoteles, por las incomodidades que les causa la falta de agua y por los altos costos en que incurren los hoteles para proveerles agua. Por otro lado, los costos de algunos son ganancias para otros. Por ejemplo, hubo un aumento en las ventas de los restaurantes de comida rápida (de 25 por ciento) y los tradicionales (de 15 por ciento) y un aumento en el consumo de agua embotellada (el 63 por ciento de la población de la zona metropolitana de San Juan).

INUNDACIONES

¿Qué es una inundación? -- Una inundación ocurre cuando la cantidad de agua en el río o quebrada excede la capacidad de su cauce para trasportarla. Como consecuencia, el agua sale del cauce del río y entra a su valle inundable causando la inundación.

¿Dónde ocurren las 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 (Fig. 40). Recientemente, los entornos urbanos, particularmente en zonas bajas, han sido afectados por inundaciones.

¿Cuál es la incidencia de inundaciones y sus causas en Puerto Rico? -- La 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 y otras depresiones tropicales que azotan la isla o su vecindad (Quiñones

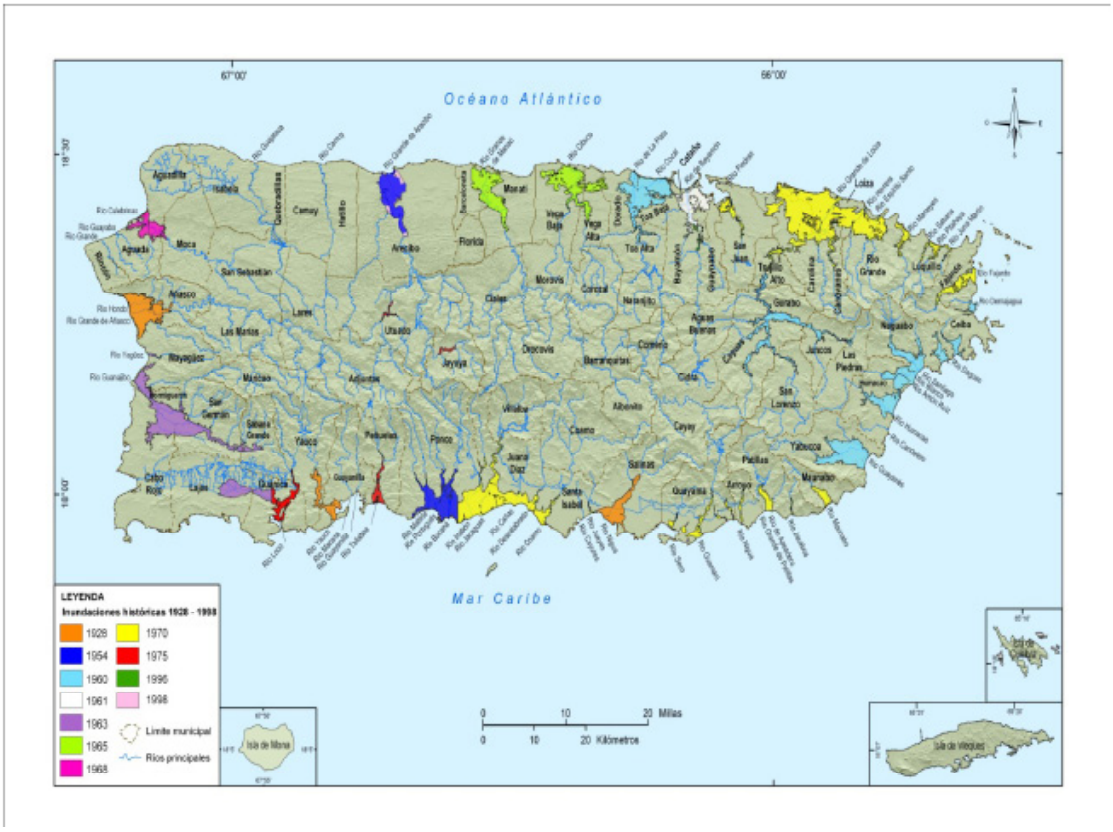


Figura 40. Inundaciones históricas en los valles de Puerto Rico.

1992). Entre 1988 y 1994 la isla ha sido afectada por 17 inundaciones severas (Ginés Ramos 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 del 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 U.S. Geological Survey, de la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias de los Estados Unidos de América (mejor conocida como FEMA, por sus siglas en inglés) y de la Junta de Planificación han definido la frecuencia, magnitud y extensión de las inundaciones en los valles costaneros y algunos valles interiores en Puerto Rico.

¿Cómo se establecen y regulan las zonas inundables? -- El U.S. Geological Survey publica mapas de las inundaciones históricas basados en datos de campo recopilados luego de una inundación. Estos mapas están disponibles en el U.S. Geological Survey y sirven como base para los estudios que lleva a cabo la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias para definir los niveles de las inundaciones en distintos sectores de la isla. La Junta de Planificación adopta estos mapas de Agencia Federal para el Manejo de Emergencias para definir las zonas de inundación en un cauce, y reglamentar la construcción de obras en los valles propensos a inundación. La Agencia Federal para el Manejo de Emergencias y la Junta de Planificación publican mapas de las áreas afectadas por inundaciones con frecuencias de hasta 500 años pero se enfocan más en las de cien años[9]. Estos mapas pueden obtenerse directamente a través de la Internet en la página red de la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias (http://www.fema.gov).

¿Cuál es la importancia natural de las inundaciones? -- Las inundaciones tienen varias funciones naturales: redistribuyen sedimentos de la montaña a los valles aluviales; forman y mantienen los cauces de los ríos y quebradas; transportan grandes cantidades de nutrientes, sedimentos y agua a valles, estuarios, lagunas, humedales y al mar; fertilizan los valles, forman sus suelos y recargan los acuíferos.

¿Qué daños causan las inundaciones? -- Las inundaciones que son favorables desde el punto de vista natural, causan daño cuando se ubican estructuras e infraestructura humana en los valles inundables. En ese caso, las inundaciones pueden causarle daño tanto a las estructuras como a la infraestructura. Si hay personas en estos lugares, también puede haber pérdida de vidas (Tabla 6).

¿Cuál es la situación con respecto a las inundaciones en Puerto Rico? -- Paradójicamente, aunque el gobierno aumenta sus inversiones en el control de inundaciones con medidas estructurales, las pérdidas por inundaciones continúan aumentando (Fig. 41). Esta paradoja no representa una causa-efecto entre el gasto por la construcción de medidas estructurales y los costos por daños de inundaciones. La relación es más complicada. Por ejemplo: (1) no es económicamente viable proteger todas las áreas inundables; (2) a pesar de las medidas que toma el gobierno, las construcciones en zonas inundables sin proteger continúan ocurriendo; y (3) el valor de la propiedad construida en zonas inundables

[9]Peritos locales argumentan que estos mapas no reflejan cambios recientes en las coberturas de terreno de la Isla y por lo tanto subestiman las áreas susceptibles a inundación.

Tabla 6. Muertes y pérdidas asociadas a inundaciones con distintos tiempos de recurrencia. Basado en parte en Colón Dieppa y Torres Sierra 1990.

Año	Evento	Muertes	Pérdidas (millones $)	Tiempo de recurrencia (años)
1899	San Ciriaco	3000	35	
1928	San Felipe II	300	85	100
1932	San Ciprián	300	30	60
1960	Donna	107	7.5	50
1965	Frente de frío	3	11	2-25
1975	Eloiza	34	125	25
1979	David	0	125	2-25
1979	Federico	0	7	2-10
1982	Onda tropical	1	6	2-25
1985	Depresión tropical	170	125	>100
1995	Hortensia	18	600	10-50

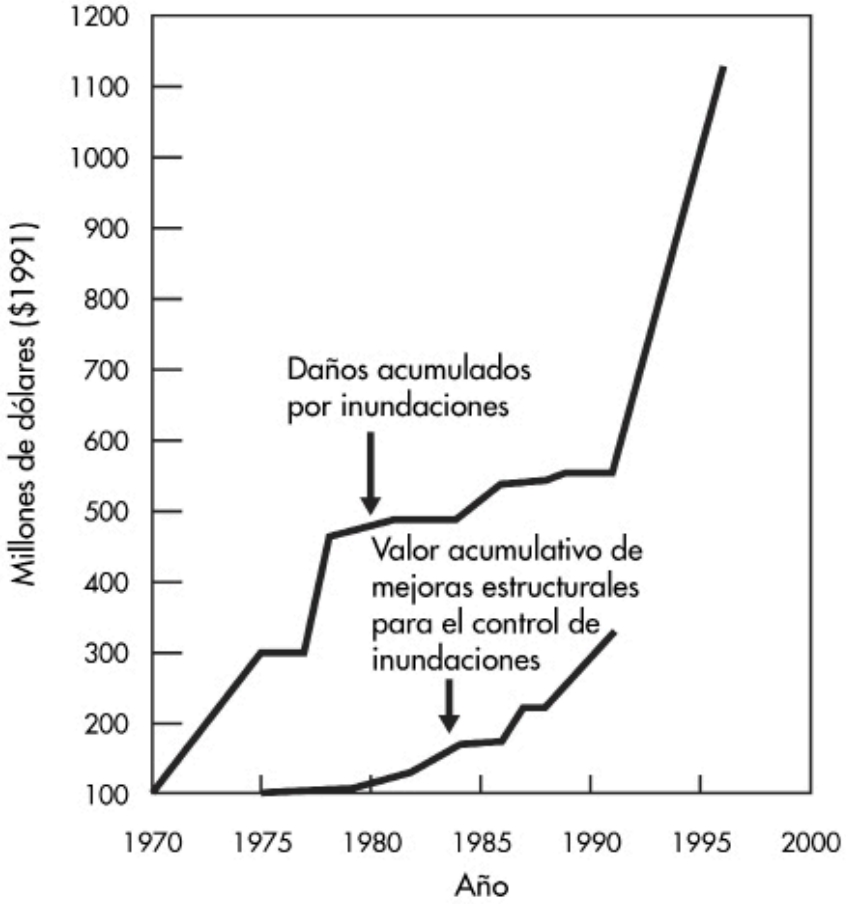


Figura 41. Daños acumulativos causados por inundaciones y el monto de las inversiones para evitarlas en Puerto Rico. El aumento en las inversiones en medidas de control no ha resultado en una disminución en los daños causados por las inundaciones. El huracán Hortensia duplicó las pérdidas entre el 1970 y 1990.

ha aumentado con el tiempo. Claramente los daños por inundaciones serían mayores sin las inversiones hechas para controlarlas.

¿Son inefectivos los proyectos de control de inundaciones? -- No todos, muchos funcionan bien. El aumento en los daños causados por las inundaciones se debe a que las medidas estructurales no son 100 por ciento efectivas y crean un falso sentido de seguridad. Además, se permiten desarrollos en áreas inundables según se discute más adelante, lo que empeora la situación. De acuerdo a un artículo en *El Nuevo Día* del jueves 18 de septiembre del 1997, más de 160,000 familias en Puerto Rico viven en zonas susceptibles a inundación. De ese total, 14,500 familias viven en zonas de alto riesgo de inundación. Señala además el artículo que el 90 por ciento de los desastres naturales están relacionados a inundaciones. El mismo periódico reportó el viernes 1 de junio del 2010, que 415,000 personas vivían en áreas inundables. Reportó tambien que 165,000 estructuras estaban ubicadas en zonas inundables, 100 comunidades en zonas susceptibles a deslizamientos por las lluvias y 61,276 pólizas o seguros de inundación vigentes.

¿Por qué en Puerto Rico cada día hay más inundaciones y se inundan áreas que antes no se inundaban? -- Las inundaciones en Puerto Rico aumentan en su efecto catastrófico por cinco razones principales: (1) el aumento en el valor de la propiedad en áreas inundables causa un aumento en el daño cuando estas se inundan; (2) construcciones en áreas inundables. Esto es particularmente cierto en áreas agrícolas inundables que ahora se convierten a áreas urbanas inundables; (3) construcción de obras de control de inundaciones que no protegen las áreas inundables de eventos de poca frecuencia como la inundación con frecuencia de 50 a 100 años. En algunos ejemplos, como la propuesta canalización del Río Piedras, las obras de canalización por ser impermeables causan inundaciones en áreas que no se inundaban anteriormente. Esto ocurre cuando las aguas de escorrentía no logran acceso rápido al río cuando su flujo se interrumpe por el canal de concreto, por lo tanto inundan áreas adyacentes al canal; (4) aumento en escorrentía debido a cambios en uso de terrenos. Esta última causa es responsable de que las aguas de inundación lleguen más rápido a los sitios bajos y que se acumule más agua, lo que también aumenta el área de inundación, causando que áreas que antes no se inundaran ahora lo hagan; y (5) pobre diseño en el sistema de desagüe de áreas urbanas (sistema pluvial) y la falta crónica de mantenimiento. Comúnmente se observa que las obras de desagüe en zonas urbanas no tienen la capacidad de desaguar los volúmenes de agua que producen las lluvias. Más aún, la falta de mantenimiento a veces invalida obras bien diseñadas, como por ejemplo la colonización dentro del canal de concreto por vegetación terrestre **(Foto 7)**, incluso árboles que en ejemplos extremos forman bosques.

¿Cuáles son los efectos de la deforestación y del desarrollo urbano en las cuencas hidrográficas y cómo se refleja esto en su hidrograma (Fig. 18)*?* -- Con la deforestación se pierde la capacidad de infiltración de los bosques. Como consecuencia, el agua corre sobre la superficie y llega más rápido al cauce de los ríos en vez de infiltrarse al suelo y a los acuíferos. Además, los desarrollos en las cuencas hidrográficas impermeabilizan el suelo y reducen casi totalmente la infiltración. Mientras más cemento o brea, menos infiltración, más escorrentía y más rápido llega el agua al cauce del río. El cauce se llena más rápido y la inundación ocurre más rápido y es más profunda porque hay más agua. Las inundaciones son entonces más catastróficas. Más aún, los desarrollos urbanos destruyen humedales y quebradas y rellenan lagunas lo que elimina las áreas de almacenaje de agua en las cuencas hidrográficas. Como consecuencia, más agua de lluvia llega a los canales de

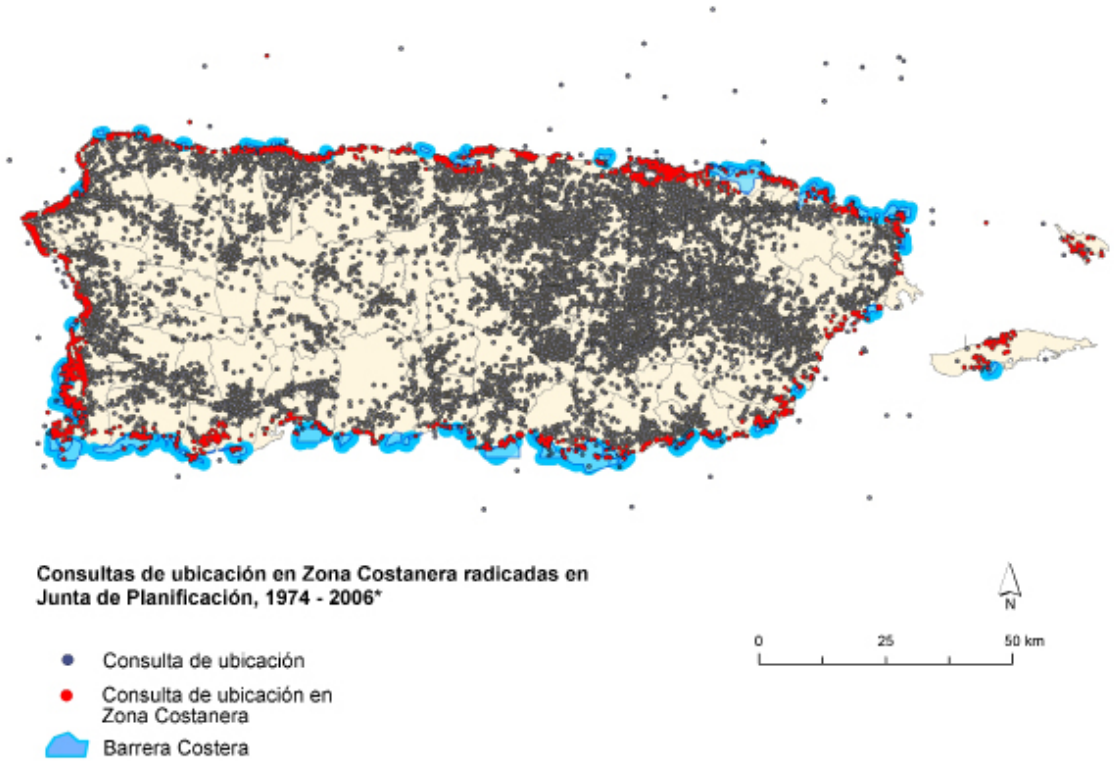
Foto 7. Vegetación terrestre establecida dentro del canal de concreto del río Portugués en Ponce. En el lado izquierdo superior se ve el establecimiento de árboles (Foto de Ariel E. Lugo).



ríos y quebradas y a las zonas inundables y las inundaciones son más profundas y más extensas, para inundar áreas que antes no se inundaban.

¿Cómo se regulan las actividades que afectan las inundaciones en Puerto Rico? -- El Reglamento Número 13 de la Junta de Planificación regula los usos de terrenos en todo Puerto Rico, lo que incluye en áreas inundables. Este reglamento permite desarrollos en áreas inundables si se demuestra mediante estudios hidráulicos que las estructuras a construirse se levantarán sobre las aguas de inundación y que las aguas desplazadas no aumentarán los niveles de inundación más de 30 centímetros (11.8 pulg) sobre el nivel previo y aún tomando en cuenta todos los demás desarrollos existentes y propuestos. Está prohibido construir en los cauces mayores de las inundaciones de los 100 años y se regula estrictamente las construcciones en los valles inundables. Sin embargo, el Reglamento 13 de la Junta de Planificación sufre del defecto de no requerir un análisis riguroso de los efectos cumulativos de desarrollos urbanos en una misma cuenca, lo que resulta en errores potencialmente altos en los estimados de las magnitudes de las crecientes. Se recomienda a los dueños de propiedades en zonas inundables que adquieran seguros de inundación bajo el *National Flood Insurance Act* del Congreso de los Estados Unidos. Además, el Congreso designó ciertas regiones de la costa donde se prohibe el uso de fondos federales para subsidiar desarrollos. Estas regiones son conocidas como *coastal barriers* o **barreras costeras** (Fig. 42). La intención del gobierno de los Estados Unidos es la de no fomentar desarrollos en estas regiones que son propensas a inundaciones y marejadas y así evitar grandes pérdidas económicas, de propiedad y vidas.

Figura 42. Barreras costeras de Puerto Rico y consultas para desarrollos pendientes en la Junta de Planificación. Este mapa lo preparó Olga Ramos del USDA Forest Service basado en datos de las páginas cibernéticas de la Junta de Planificación de Puerto Rico e información cortesía de José Santana de Estudios Técnicos. Los puntos para consultas en el océano Atlántico y Mar Caribe representan información aparentemente incorrecta en el sistema de información de la Junta de Planificación.



¿Cuál es la situación con respecto a seguros contra inundaciones? -- La ley requiere que al obtener una hipoteca para una propiedad localizada en áreas inundables, se obtenga una póliza de seguros. De no hacerlo, los dueños de propiedades se exponen a multas. Al 29 de enero del 1998, en Puerto Rico habían 41,136 pólizas vigentes con cubiertas para daños por inundaciones ascendentes a $9,881,687 anualmente. Del total de pólizas, 25,444 son para propiedades en la zona de más alto riesgo de inundación por ríos y quebradas y 533 pólizas son para propiedades en la zona de más alto riesgo de inundación marítima (por marejadas). El total pagado desde el 1978 a los propietarios por el Programa Nacional de Seguros por Inundación por concepto de reclamaciones ascendió a $63,852,257. Sin embargo, aproximadamente el 88 por ciento de la población que vive en zonas inundables están desprovistas del seguro de inundación. Los lugares que más sufrieron por las inundaciones del huracán Hortensia fueron Barceloneta, Guayama, Fajardo y Punta Santiago. En estos lugares el número de pólizas contra inundaciones era, respectivamente, 388, 174, 123 y 77. Información sobre estos asuntos se puede obtener llamando a 1-800-INUNDADO (466-63236) o a través del sitio web: (http://www.fema.gov).

¿Son efectivos los mecanismos de protección contra inundaciones? -- En la práctica, algunos de los estudios hidrológicos que se hacen para justificar desarrollos en áreas inundables son de poca calidad y se presentan aisladamente proyecto por proyecto con poca atención a los efectos acumulativos de los desarrollos

en las cuencas hidrográficas. Al evaluar los estudios hidrológicos, es necesario entender a cabalidad las premisas de los modelos computadorizados utilizados para evitar que se aprueben proyectos basados en premisas falsas que más tarde causan serios problemas de inundación. Además, hay desarrollos que se llevan a cabo sin los permisos o estudios de rigor. Como se indicara anteriormente, no se toman en cuenta los efectos acumulativos de los proyectos en una cuenca. El resultado es que, a pesar de los reglamentos, se exponen vidas y propiedad a inundaciones y marejadas. En cuanto a las barreras costaneras, hay poco entendimiento en la población de los riesgos y responsabilidades que los desarrollos en esos lugares conllevan. Los resultados del uso de áreas inundables para desarrollos impropios de todo tipo se pueden observar en los valles inundables del país, particularmente en la zona costanera del noreste. Consistentemente la Junta de Planificación considera y aprueba desarrollos en zonas designadas como barreras costeras (Fig. 42).

CANALIZACIONES

¿Qué es una canalización? -- Una canalización es una medida estructural que altera el cauce de un río o quebrada para aumentar su capacidad de recibir y conducir aguas de escorrentía hacia el mar. Esto se logra eliminando las condiciones naturales de los ríos y convirtiéndolos en canales rectos y sin obstáculos (Fig. 43).

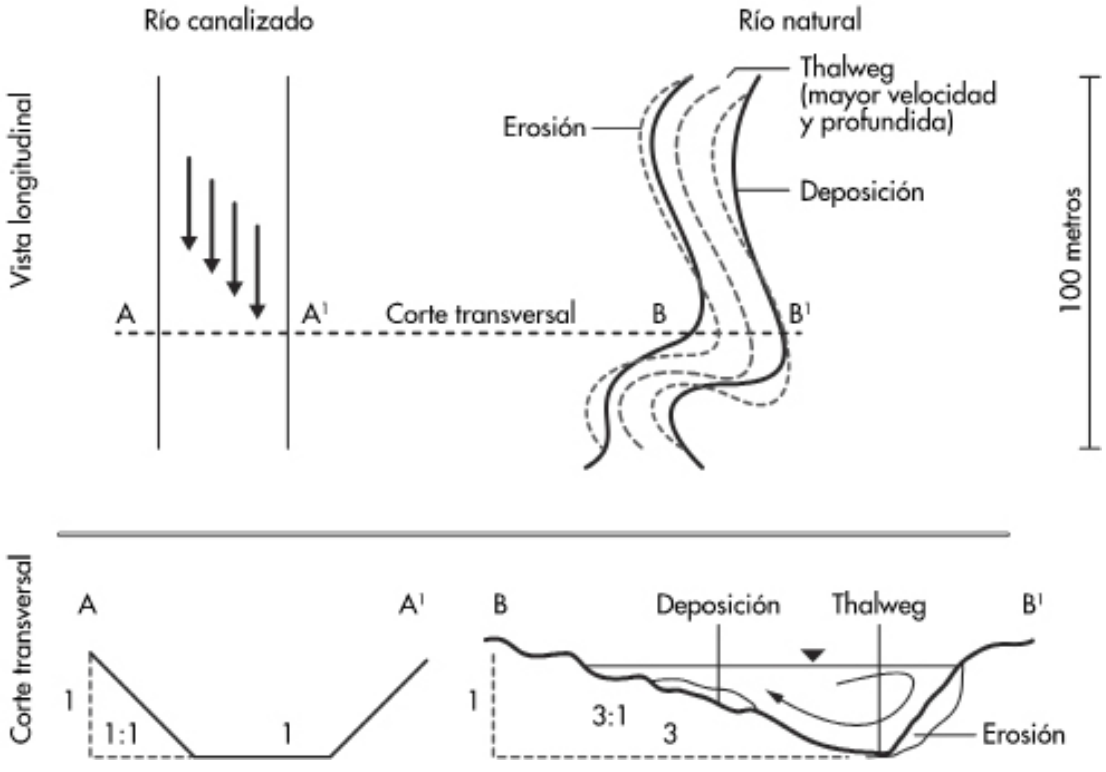


Figura 43. Comparación longitudinal y en corte transversal de un río canalizado con un río en condiciones naturales. Además de los cambios obvios por la eliminación de los meandros, las canalizaciones cambian la pendiente de las orillas del río de pendientes suaves (3:1) en el cauce natural a pendientes muy empinadas (1:1) en los canales artificiales. Los meandros y las variaciones en profundidad del canal natural son responsables de la distribución de la velocidad de las corrientes en el río y de los procesos de erosión y deposición.

¿Por qué se canalizan los ríos y quebradas? -- Las canalizaciones se llevan a cabo principalmente para evitar inundaciones. A veces se canaliza para desviar los ríos y quebradas con el propósito de facilitar desarrollos en áreas inundables. El objetivo de la canalización es sacar el agua hacia el mar lo más rápido posible para evitar la inundación.

¿Cuánto cuestan las canalizaciones? -- La canalización del río Piedras se estimó en el 1984 en $235.5 millones en su etapa de construcción y entre $1 y $2 millones anuales en su etapa de mantenimiento. Estos costos se justificaron en base a los beneficios en las reducciones de las pérdidas por los efectos de las inundaciones que incluían 5,700 familias, 325,000 m^2 de espacio comercial, infraestructura marítima y edificios públicos. Se estimó que el valor de la propiedad era de $3 billones con daños anuales de $20 millones mas $38.8 millones si se consideran condiciones futuras. Cuando se evalúan proyectos de control de inundaciones bajo la reglamentación federal, no se permite estimar como parte de los beneficios del proyecto los aumentos que puedan resultar en el valor de las propiedades dentro del área de efectividad del mismo. Esto evita que se utilicen fondos públicos para beneficiar a los especuladores de terreno.

¿Son realistas los estimados de costo y las justificaciones de canalizaciones? -- No siempre pues generalmente se subestiman los costos y sobreestiman los beneficios. Por ejemplo, la canalización del río Piedras ha estado activa por aproximadamente tres décadas y en el *Caribbean Business* de enero 31 del 2011, el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos anunció que la canalización de las tierras bajas y la quebrada Margarita, la construcción de cinco nuevos puentes, la modificación de ocho puentes y la re-ubicación de 17 puentes costaría $520.3 millones de nueva construcción. Es evidente que el estimado inicial fue muy optimista, particularmente si al estimado en el *Caribbean Business* se le suma la cantidad gastada antes del 2010. Como el proyecto inicialmente incluía la canalización hasta las tierras altas de la cuenca, el costo eventual será obviamente muchas veces mayor a lo que inicialmente se sugirió, como veremos más abajo. Los costos de mantenimiento de canales de ríos pueden ser 10 veces lo estimado para el río Piedras por el Cuerpo de Ingenieros. Además, a nivel local, los proponentes de las canalizaciones utilizan el argumento de aumento en el valor de las propiedades para justificar tales proyectos. Al permitir ese razonamiento, las agencias gubernamentales están subsidiando a los dueños de terrenos y a los contratistas ya que se sesga el análisis de costo-beneficio a que se haga la canalización principalmente pagada con fondos públicos. Más aun, cuando ocurre la inundación se gastan más fondos públicos para auxiliar a las personas afectadas y mientras tanto, los dueños de terreno y contratistas que ya obtuvieron sus ganancias con el desarrollo, no tienen que responder por las consecuencias del mismo.

¿Qué costos ecológicos resultan de las canalizaciones? -- Las canalizaciones afectan los ríos, los estuarios, los humedales, las lagunas, los valles aluviales, las aguas costaneras (lo que incluye los arrecifes de coral y las praderas submarinas) y las montañas. Sobre los ríos los efectos incluyen: la transformación del cauce a un canal recto y de concreto, la eliminación de meandros, la conversión de un sistema que conserva agua y distribuye agua, nutrientes y sedimentos, a uno diseñado para disponer de agua, sedimentos y nutrientes directamente al mar. En ocasiones sólo se canalizan segmentos del río o quebrada, el agua aumenta en velocidad al pasar por estos segmentos y entra con mayor velocidad a los segmentos no canalizados, donde aumenta su capacidad de erosión.

Al convertir el río en un canal conectado directamente al mar, las canalizaciones afectan el estuario porque eliminan las interacciones

con los humedales y las periodicidades de las inundaciones que son vitales para su funcionamiento y el sostén de los organismos vivos. Además, se alteran radicalmente las condiciones hidrológicas y se reduce la cantidad de agua dulce disponible en el estuario. Esto a su vez reduce la productividad, afecta negativamente a todos los organismos vivos, incluso la población de peces y a los pescadores que dependen de ella.

Los efectos sobre los humedales y lagunas incluyen la eliminación de su conexión con los estuarios y ríos o quebradas, secándose y aislándose de otros ecosistemas. Los efectos sobre los valles aluviales incluyen la disminución en la entrada de sedimentos y nutrientes y en los eventos de inundación. Los valles poco a poco pierden su fertilidad y su materia orgánica y progresivamente se secan.

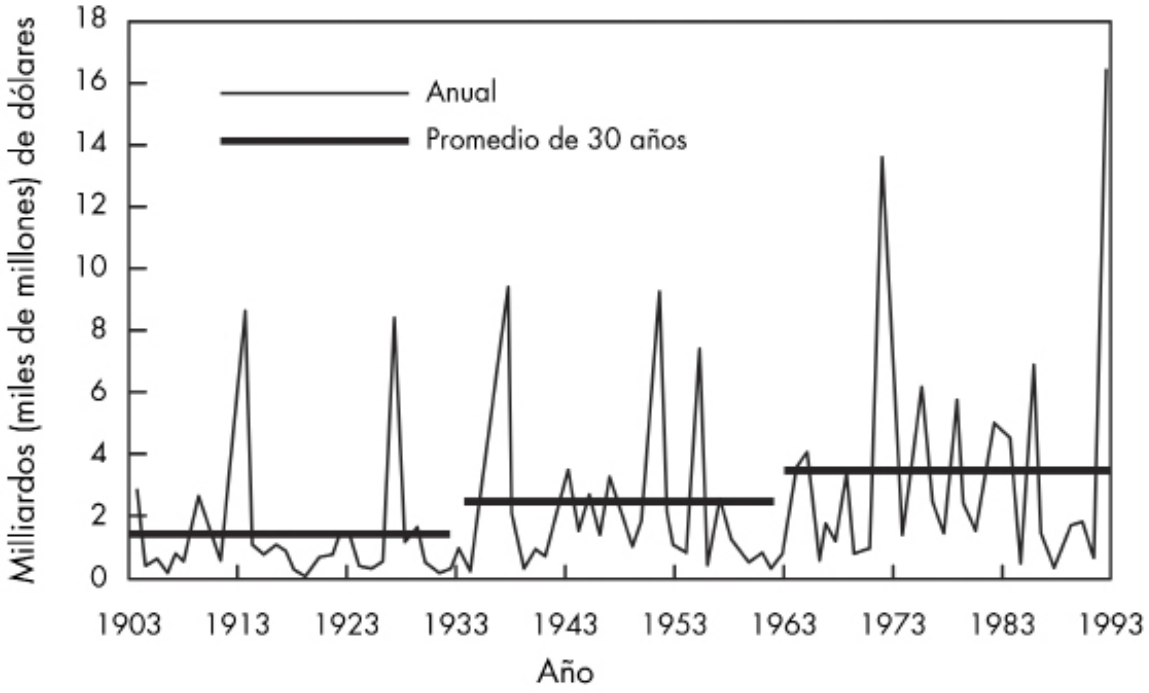
Las aguas costaneras se contaminan y sedimentan pues todos los materiales que el río distribuía por valles, humedales, lagunas y estuarios, ahora se descargan directamente al mar en forma casi instantánea. La disponibilidad de agua dulce disminuye durante el resto del año ya que las canalizaciones tienden a secar el paisaje. Esto se observa en el hidrograma (Fig. 18a) donde el flujo base del río casi desaparece. Mientras menos agua dulce, menos productividad en los ecosistemas. La montaña se afecta ya que los organismos acuáticos que viven en la montaña como adultos pierden los ecosistemas costaneros necesarios para su reproducción y crecimiento. Además las canalizaciones pueden obstaculizar las migraciones aguas arriba.

¿Qué peligros conllevan las canalizaciones? -- Además de la pérdida de agua dulce, la contaminación de las aguas costaneras y las pérdidas o colapso de los sistemas naturales, incluso la pesca y vida silvestre, las canalizaciones crean falsas expectativas de seguridad en la ciudadanía. La protección de áreas inundables depende de la magnitud de la canalización. Mientras más grande la canalización, más protección contra inundaciones conlleva, pero más costoso es el proyecto. Generalmente las canalizaciones de quebradas se llevan a cabo con fondos municipales o estatales y sólo protegen contra inundaciones con frecuencia de 5 a 20 años. Los ríos principales se canalizan con fondos federales para proteger contra inundaciones de 100 años. Las canalizaciones son inefectivas contra inundaciones más grandes que la descarga del diseño. Por ejemplo, una canalización para crecidas que ocurren cada 10 años no protege contra la crecida más grande que ocurre con una frecuencia de cada 20 años.

Al canalizarse el río, los desarrollos en su valle inundable proceden como si esta área ya nunca más se inundará. Sin embargo, aún cuando estas estructuras protejan contra inundaciones con frecuencias de 100 años, no hay garantía de que al continuar con los desarrollos urbanos en la cuenca hidrográfica, estas inundaciones con frecuencia de 100 años se tornen aún más frecuentes y las de 100 años resulten aún más catastróficas. Un ejemplo de lo anterior es lo que ha sucedido recientemente después del huracán Katrina en la cuenca del río Misisipí en los Estados Unidos. Entonces los costos y las pérdidas por inundaciones aumentan. Ese es el peligro más inmediato para las personas.

¿Cuál es la experiencia con las canalizaciones? -- En los Estados Unidos (Fig. 44) al igual que en Puerto Rico, las pérdidas por inundaciones continúan ascendiendo. Además, sabemos que las canalizaciones contribuyen al deterioro de la calidad del agua porque aíslan los sistemas ecológicos naturales del contacto con el agua y se pierde su función de purificación. Eso ocurrió en la Florida con el Lago Okeechobbee y la canalización del río Kissimmee. Por eso, en la Florida se están restaurando meandros en ríos canalizados como el Kissimmee a costos que exceden el

Figura 44. Costo anual a causa de inundaciones (en dólares de 1993) y por décadas en los Estados Unidos de América. Los aumentos continuos en los daños por inundaciones a pesar de grandes inversiones en medidas estructurales, ha promovido la implantación de medidas no estructurales con el propósito de reducir costos a la vez que se protege a las personas y la propiedad.



costo original de la canalización. En Boston y a lo largo del río Misisipí, en vez de canalizar, ahora se compran terrenos y se restauran los humedales para que sean estos los que absorban las inundaciones. En el río Bayamón, la falta de mantenimiento del canal artificial causó que se desbordara durante el huracán Hortensia. Más de 17,000 personas fueron afectadas de acuerdo a *El Nuevo Día* del viernes 31 de octubre del 1997. La solución inmediata fue buscar tres millones de dólares para ampliar la profundidad y el ancho del canal. Por supuesto, esta es una inversión recurrente y de volver a ignorarse, el canal volverá a inundar la ciudad de Bayamón. En el canal del río Portugués en Ponce uno de nosotros (Lugo) observó un bosque, testigo de la falta de mantenimiento del canal de concreto.

¿Cuál es la relación entre las canalizaciones y la disponibilidad del agua? -- Mientras más ríos y quebradas se canalicen, menos agua queda disponible en los valles inundables de las cuencas hidrográficas ya que las canalizaciones minimizan la infiltración y aceleran la descarga de agua dulce al mar, dejando la cuenca hidrográfica con menos agua por más tiempo. Por ejemplo, los humedales riparios se secan más rápido después de lluvias intensas cuando canalizados que bajo condiciones naturales, en otras palabras, se acorta su hidroperiodo. El efecto principal es sobre la vegetación terrestre de la cuenca hidrográfica y los organismos acuáticos ajustados a hidroperiodos más largos.

¿Hay alternativas a las canalizaciones? -- Las alternativas a las canalizaciones son las soluciones no estructurales, es decir, utilizar los conocimientos hidrológicos y ecológicos para promover desarrollos que no requieran canalizaciones que pongan las vidas y propiedades en peligro. Por ejemplo:

- zonificar las áreas inundables para usos compatibles con las inundaciones;
- utilizar técnicas de construcción que no impermeabilicen todo el terreno y permitan la infiltración y el almacenaje de agua en las cuencas hidrográficas;
- conservar los humedales y mantener las áreas forestadas para conservar agua y evitar los altos flujos pico a los canales;
- usar los valles inundables para actividades que sean compatibles con las inundaciones periódicas, como por ejemplo las áreas recreativas, los campos de golf y la acuicultura;
- restaurar la vegetación de las márgenes de los ríos y quebradas para reestablecer sus características naturales a la vez que se proveen las ventajas de la canalización;
- retener las escorrentías urbanas en charcas de detención; y
- la construcción de murallas de protección en lugares estratégicos.

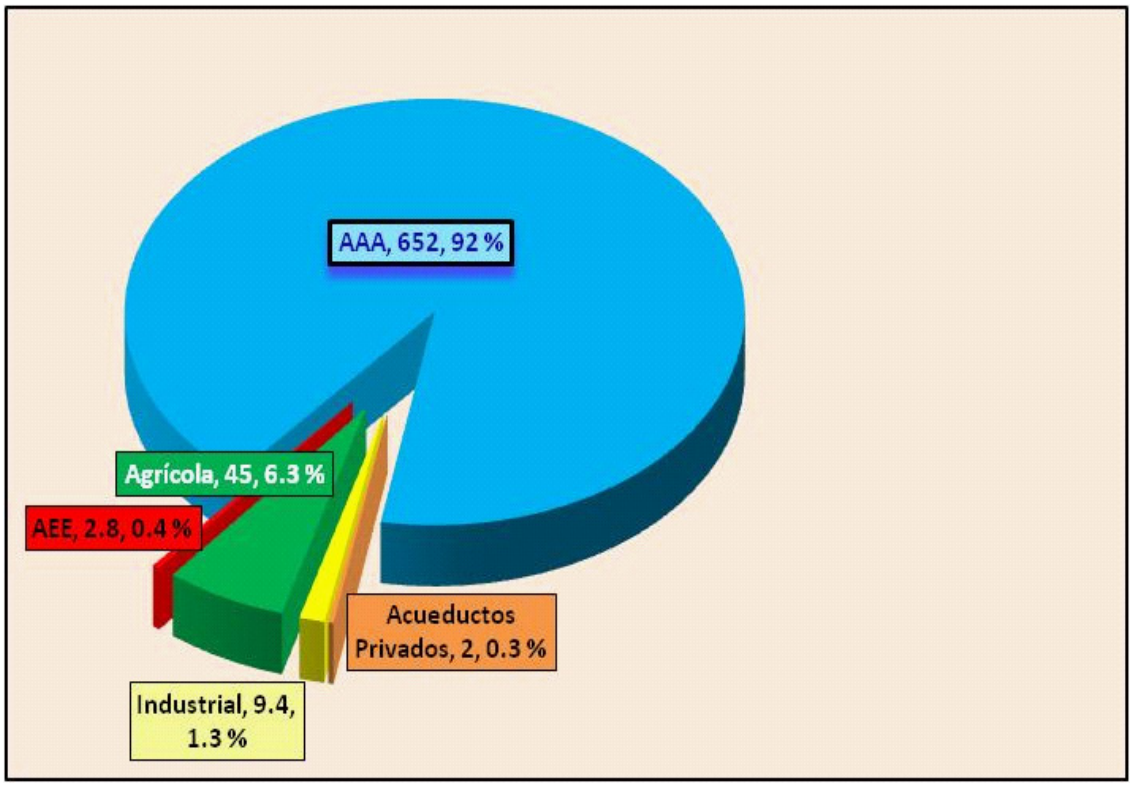
¿Qué hacemos con las medidas estructurales existentes? -- Tenemos tres alternativas entrelazadas entre sí. (1) Hay que demoler algunas estructuras como embalses ya sedimentados o algunas canalizaciones de quebradas y ríos y restaurar los sistemas naturales originales como lo están haciendo con canalizaciones en la Florida, Massachusetts y a lo largo del río Misisipí. La organización *American Rivers* administra programas para restaurar ríos en los Estados Unidos (http://www.americanrivers.org/our-work/restoring-rivers/dams/). El problema es que la falta de mantenimiento de estas estructuras las hace inseguras y costosas para operar. Por otro lado, la pérdida de la flora, fauna y los servicios de los ríos comienza a sentirse y los estadounidenses ahora valoran más los ríos que los embalses; (2) hay que mantener la gran mayoría de las estructuras existentes continua y adecuadamente. En el momento en que se construye cualquier estructura se debe mantener mientras exista. El mantenimiento requiere presupuestos adecuados, peritaje técnico y acción perpetua; y (3) los usos de terrenos y de recursos naturales deben adaptarse a la capacidad de la infraestructura existente y no obligar a que la infraestructura funcione sobrecargada bajo expectativas irrealistas. El crecimiento urbano sin asegurar la existencia de la infraestructura adecuada o de los recursos naturales requeridos, como el abasto adecuado de agua de alta calidad, es equivalente a degradar la calidad de vida de la población existente a la vez que se elimina opciones a las futuras generaciones.

DEMANDA DE AGUA EN PUERTO RICO

¿Quiénes son los usuarios del agua en Puerto Rico? -- Según datos publicados en el Plan Integral de Recursos de Agua de Puerto Rico, la extracción total de agua en Puerto Rico en el 2005 es de 673 millones de galones por día (29.49 m^3/s) para suplido doméstico, industria auto-abastecida y agricultura (Fig. 45). El 22 por ciento de la extracción total de agua es de fuentes subterráneas. De esta extracción total, 526 millones de galones por día (23.05 m^3/s) son extraídos de fuentes superficiales: 68 por ciento de embalses y 32 por ciento de ríos. El consumo doméstico se refiere a los consumos residenciales, comerciales e industriales suplidos por la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados. Las restantes extracciones no son realizadas por la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados. La extracción para industria auto-abastecida y agricultura se estima en 9.5 millones de galones por día (0.42 m^3/s) y 63.8 millones de galones por día (2.80 m^3/s), respectivamente. La Autoridad de Energía Eléctrica utiliza cerca de 3,000 millones de galones por día (131.44 m^3/s) de agua de mar para el proceso de enfriamiento.

A estos usuarios tradicionales hay que añadir los sistemas naturales que incluyen la vegetación, los animales y los ecosistemas.

Figura 45. Distribución de las extracciones de agua en Puerto Rico en el 2005. Para convertir mgd a m^3/s multiplique por 0.0438126365741.

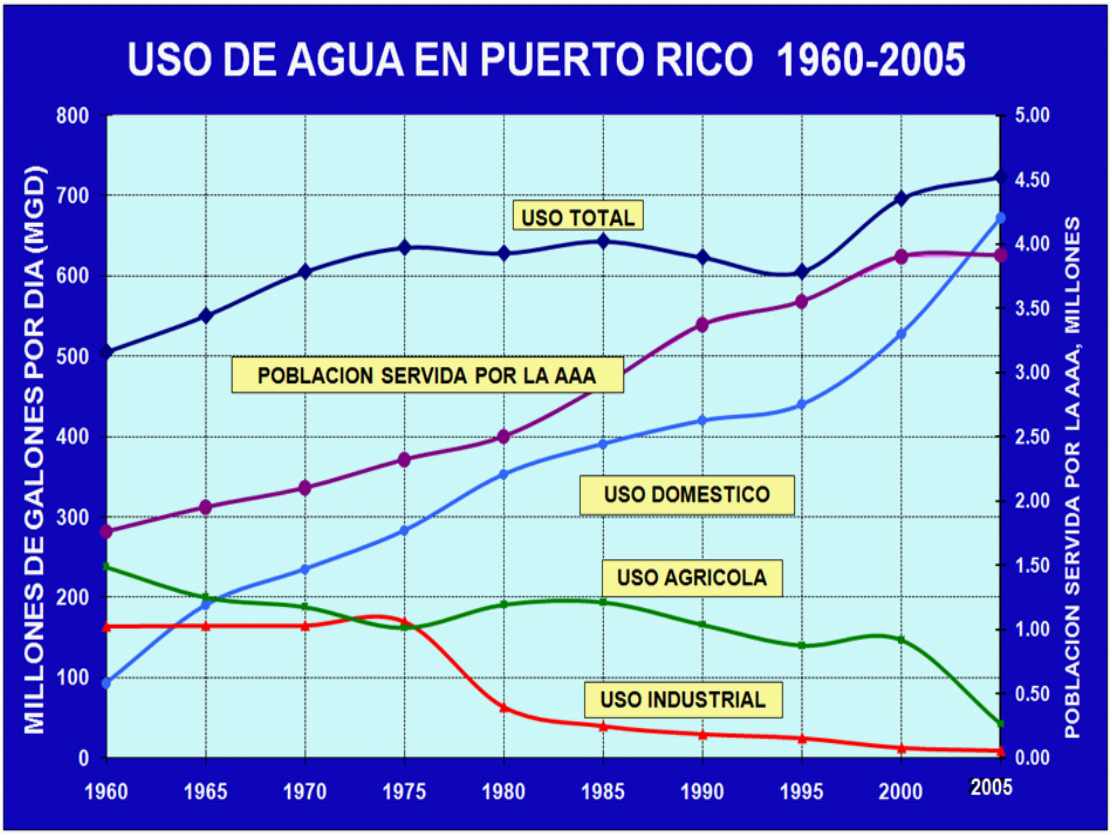


Estos sistemas naturales consumen agua para poder funcionar y proveer sus servicios ecológicos. Por ejemplo, los cauces o lechos de los ríos necesitan agua para mantener el canal y regular su sedimentación o su erosión. Es imperativo reconocer a los ecosistemas como usuarios legítimos de agua, no solamente por razones morales sino porque también estos proveen servicios, productos y valores vitales para la economía y el mantenimiento de la salud y calidad de vida de los puertorriqueños.

¿Cuál ha sido la tendencia histórica en la demanda y uso del agua en Puerto Rico? -- El uso del agua en Puerto Rico ha cambiado dramáticamente desde el siglo pasado al presente debido al abandono de la agricultura y el aumento en el consumo doméstico. Los datos de uso de agua se publican por el U.S. Geological Survey desde 1960 en informes de cada 5 años e incluyen la cantidad de agua que utiliza la Autoridad de Enérgia Eléctrica (aproximadamente 550 mgd o 24.10 m^3/s) para generación hidroeléctrica, la cual no se consume y se devuelve a los ríos y embalses. Los datos de 1960 al 2005 (Fig. 46) permiten concluir lo siguiente:

- La Autoridad de Acueductos y Alcantarillados es el usuario principal de agua en la Isla, extrayendo aproximadamente 660 millones de galones por día (28.92 m^3/s) en el 2005, mientras que las extracciones totales en la isla suman aproximadamente 723 millones de galones por día (31.68 m^3/s). Estas cantidades incluyen aproximadamente 2 millones de galones por día (0.09 m^3/s) extraídos por acueductos comunitarios operados por residentes.
- Desde 1960, el número de habitantes servidos por la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados aumentó de

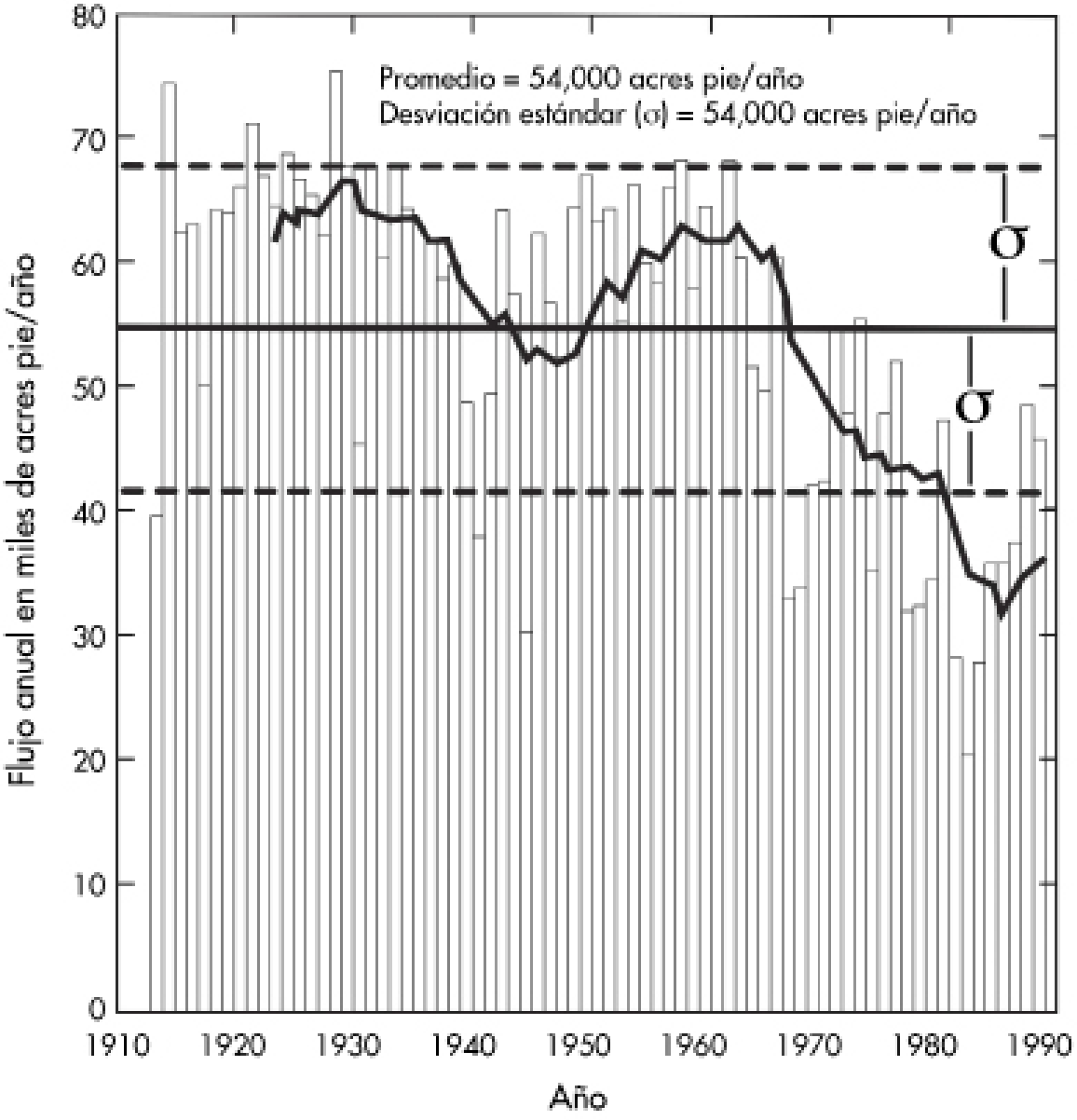
Figura 46. Uso del agua en Puerto Rico entre el 1960 y 2005. Para convertir mgd a m^3/s multiplique por 0.0438126365741.



1.8 millones a aproximadamente 3.9 millones. Este incremento sustancial se refleja en el aumento de extracciones netas en el mismo periodo de tiempo, de 100 millones de galones por día (4.38 m^3/s) en 1960 a los 660 millones de galones por día (28.92 m^3/s) en el 2005.

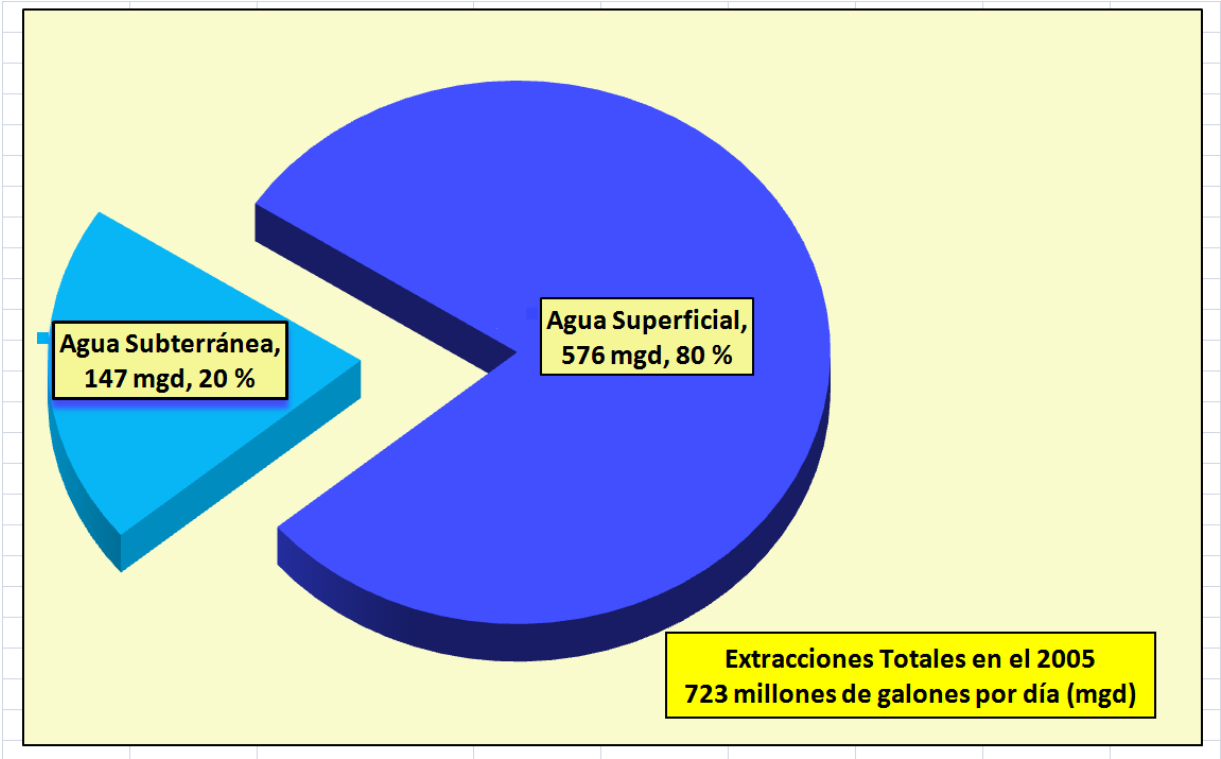
- Los usos agrícolas e industriales en la Isla se han reducido marcadamente debido a los cambios operacionales en ambos sectores.
- El riego agrícola alcanzó aproximadamente 200 millones de galones por día (8.76 m^3/s) en el 1985, cuando la industria azucarera comenzó a desaparecer, y al presente se utilizan solamente 50 millones de galones por día (2.19 m^3/s) en toda la isla para actividades agrícolas. El uso histórico de agua para riego de los canales Patillas y Guamaní ilustran la importancia de la agricultura a principios del siglo 20 y su decadencia después de la década del 60 (Fig. 47).
- Las extracciones para usos industriales se han reducido de un máximo de 175 millones de galones por día (7.67 m^3/s) en 1974 a menos de 15 millones de galones por día (0.66 m^3/s) 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 recicla una gran parte del agua que extrae, esto para minimizar los efectos de los permisos de descargas industriales requeridos por la Junta de Calidad Ambiental y la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos.

Figura 47. Historial del uso de agua de riego en los canales de Patillas y Guamaní. El riego tuvo su máximo uso en la década del 30 y a partir del 1965 se reduce significativamente debido a la merma en la actividad agrícola en Puerto Rico. El agua que ya no utiliza la agricultura está ahora disponible para los usos domésticos, industriales y naturales,es decir, para los humedales y otros sistemas naturales costaneros. La línea negra es el promedio corrido basado en 10 años.



➢ Los datos del US Geological Survey en el 2005 establecían que el agua superficial representaba aproximadamente 576 millones de galones por día o 25.24 m^3/s (el 80 por ciento del total), mientras que las aguas subterráneas suplían aproximadamente 147 millones de galones por día (6.44 m^3/s), equivalente al 20 por ciento del total (Fig. 48). 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 millones de galones por día (0.44 m^3/s) lo que incluye las plantas desalinizadoras de la Autoridad de

Figura 48. Contribución de las aguas superficiales y subterráneas al uso total de agua en Puerto Rico durante el 2005. Para convertir mgd a m^3/s multiplique por 0.0438126365741.



Acueductos y Alcantarillados en Culebra (0.1 mgd o 0.004 m^3/s), la American Energy Systems en Guayama (3 mgd o 0.13 m^3/s) y la Autoridad de Energía Eléctrica en varios lugares (6 mgd o 0.26 m^3/s).

¿Cuánta agua utilizan los animales? -- Para mantener sobre 8 millones de vacas, cerdos, cabros y aves se utilizan 8 millones de galones por día (0.35 m^3/s).

¿Cuántos clientes tiene la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados? -- La Autoridad de Acueductos y Alcantarillados tiene un total de 1,360,398 clientes de los cuales el 92 por ciento son clientes residenciales (Tabla 7), sin embargo solo el 75 por ciento del agua producida es para servir a clientes residenciales. El 7.5 por ciento son clientes comerciales pero este grupo consume el 20 por ciento del agua producida por la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados.

¿Cuánta agua sirve la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados? -- Durante los meses de julio a octubre del año 2011, la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados sirvió y facturó 21,184 millones de galones a clientes residenciales (80.2 millones de m^3), 3,112 millones de galones a clientes comerciales (11.78 millones de m^3) y 1,206 millones de galones a clientes industriales (4.57 millones de m^3). Un aproximado de 31,000 familias en 230 comunidades se sirven 1 millón de galones por día (0.04 m^3/s) de sistemas comunitarios separados al sistema de la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados.

Los datos de agua facturada por la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados entre los años 2004 y 2009 indican (Tabla 8):

- El agua residencial facturada ha disminuido en un 5.4 por ciento.

Tabla 7. Clientes y número de usuarios de agua servida por la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados en el 2010.

Cliente	Conecciones Agua Potable sin Alcantarillado Sanitario	Conecciones Agua Potable y Alcantarillado Sanitario	Conecciones Alcantarillado Sanitario sin Agua Potable	No Asignadas	Con Tarifas Con Tarifas Irespectivo de Servicios	Totales	Agua Servida/Agua Producida (%)
Residencial	499,819	696,417	327	5,806	2,267	1,204,636	75-82
Comercial	20,555	41,822	56	418	87	62,938	20
Gobierno	3,801	7,050	8	48	39	10,946	*
Industrias	231	932	68	6	0	1,237	5
Totales	524,406	746,221	459	6,278	2,393	1,279,757	100

* Incluido en Comercial.

- El agua comercial facturada ha disminuido en un 11.9 por ciento.
- El agua industrial facturada ha disminuido en un 18.9 por ciento.
- El agua de gobierno facturada ha disminuido en un 15.5 por ciento.
- El promedio total de agua factura ha disminuido en un 7.8 por ciento.

¿Cuál es el uso per capita del agua en Puerto Rico en comparación con otros países? -- Los datos en la figura 49 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.

Cada cliente residencial consume 346 gal/d (1,310 L/d). Si asumimos que cada cliente representa cuatro personas, cada persona consumiría 86.5 gal/d (327 L/d). Datos para los municipios del noreste sugieren un consumo per cápita de aproximadamente 50 gal/d (189 L/d). Se estima que 41 por ciento se utiliza para los servicios sanitarios y 37 por ciento para lavar ropa y el aseo personal. Si se divide la población de Puerto Rico entre el uso total de agua en el país, se obtiene el uso per cápita bruto de 170 gal/d (643 L/d). Estimados de uso per capita bruto para los Estados Unidos varían entre 159 a 188 gal/d (602 a 712 L/d). En Cuba, el valor es de 49 galones per cápita (185 L per cápita).

Otro criterio para establecer la situación de los países relativo a su uso del agua se basa en dos datos: (1) el agua disponible en el país en millones de galones per cápita por año; y (2) el por ciento de esa cantidad que se utiliza (Tabla 9). Con estos datos los países se agrupan en cinco categorías: (1) países con pocos problemas de agua; (2) países con problemas generales; (3) países bajo estrés de agua; (4) países con falta crónica de agua, y (5) países en situación desesperada. Si aplicamos

Tabla 8. Metros cúbicos facturados al año por la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados.

Año Fiscal	Residencial	Comercial	Industrial	Gobierno	Total
2004	260.7	47.2	14.3	36.8	359.0
2005	260.4	46.2	12.5	37.0	356.1
2006	268.4	45.9	11.9	37.5	363.7
2007	264.8	43.4	12.0	32.7	352.9
2008	244.6	41.2	12.0	28.9	326.7
2009	246.6	41.6	11.6	31.1	330.9
Promedio	257.6	44.3	12.4	34.0	348.2

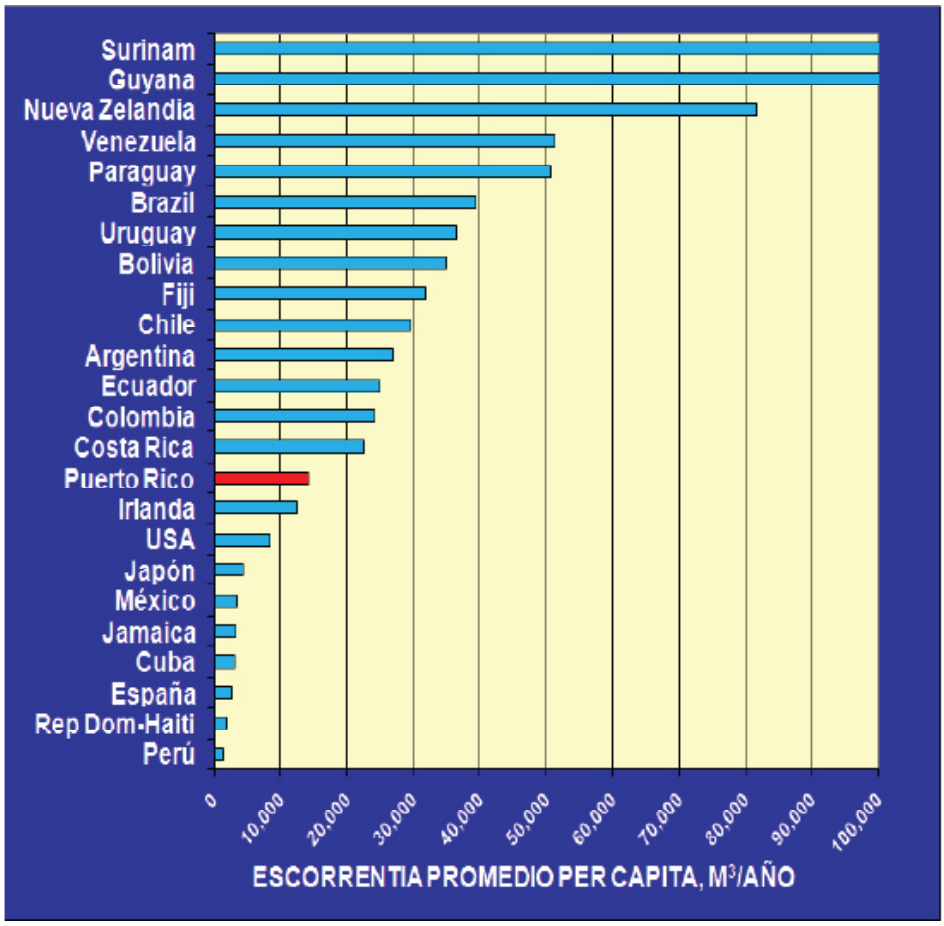


Figura 49. Comparación de la cantidad de escorrentía per cápita en Puerto Rico con islas y otros países en el continente americano, Europa y Asia. La escorrentía es en metros cúbicos por año y para convertirla a gal/día multiplique por 0.723835616.

Tabla 9. Comparación de la situación del agua entre varios países. Para convertir a L/pc/año, multiplique por 133.651.

País	Agua disponible (millones de gal/p^3.año)	Por ciento del agua disponible que se extrae
	Problemas limitados	
Canada	28.93	1
Panamá	16.05	1
Nicaragua	12.35	1
Estados Unidos de América	2.66	19
	Problemas generales	
China	0.67	16
India	0.60	21
Perú	0.49	-
Estrés de agua		
Haití	0.40	-
Puerto Rico	0.39	17.5
Africa del Sur	0.37	18
Polonia	0.34	30
	Escacés crónica de agua	
Kenya	0.16	-
	Situación desesperada	
Tunisia	0.13	53
Israel	0.10	88
Barbados	0.05	51
Libya	0.04	374
Malta	0.02	92
Egipto	0.01	97

Fuente: Los datos son de Clarke (1993) excepto los de Puerto Rico que se derivaron de la siguiente información: una escorrentía superficial de 3,700 mgd (162.11 m^3/s), 300 M gal (1.14 M m^3) de agua subterránea extraible, 550 mgd (24.10 m^3/s) de agua superficial extraída, 150 mgd (6.57 m^3/s) de agua subterránea extraída y 3.7 millones de personas en la población.

estos criterios a la situación de Puerto Rico, la isla cae en la categoría "bajo estrés de agua". Este análisis no enfoca en que en Puerto Rico la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados produce 625 millones de galones por día (27.38 m^3/s) de agua potable y factura 300 (13.14 m^3/s) por lo que no existe un verdadero "stress" de agua en la isla. Lo que existe es la pérdida de más del 50 por ciento del agua que la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados produce.

¿Qué es el agua potable no facturada y la no contabilizada? -- El **agua potable no facturada** se refiere al agua que la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados sirve y que no se traduce en facturación (Fig. 50a). El **agua potable no contabilizada** es agua en el sistema de acueductos que la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados no mide. La diferencia entre el agua no facturada y la no contabilizada es mínima.

¿A qué se debe el agua no facturada? -- La Autoridad de Acueductos y Alcantarillados deja de facturar agua servida por causa de **pérdidas físicas** o por causa de deficiencias en

la actividad comercial (**pérdidas comerciales**) que incluyen el robo del agua. Algunas deficiencias en la actividad comercial son el hurto, el contador que registra por debajo de lo real o la factura que no es emitida. La pérdida física se refiere a las roturas en líneas de distribución o transmisión, el desbordamiento de agua de tanques de la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados o agua utilizada en el proceso de mantenimiento (lavado de filtros).

¿Cuál es el historial de producción, consumo y pérdida de agua potable no facturada en Puerto Rico? -- A partir de la década de los años 80 del siglo pasado, la diferencia entre el agua facturada y el agua producida por la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados comenzó a aumentar (Fig. 50a). Esta tendencia implica que con el tiempo, una fracción menor del agua producida por la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados le llega al consumidor (Fig. 50b). En el año 1996 se inauguró el Acueducto de la Costa Norte (Superacueducto), con un aumento neto de 100 millones de galones por día (4.38 m^3/s) en producción de agua potable. Sin embargo, la facturación de agua por la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados no aumentó. Durante los últimos 30 años, la producción de agua potable ha continuado en ascenso mientras que la facturación se ha mantenido estable. En el año 1980, no se facturaba cerca de 100 millones de galones por día (4.38 m^3/s). En el año 2000 no se facturaba cerca de 250 millones de galones por día (10.95 m^3/s). Para el año 2010 supera los 300 millones de galones por día (13.14 m^3/s).

¿Qué efectos tiene el agua potable no facturada sobre la producción de agua potable? -- Un efecto de la pérdida de agua, es que obliga a la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados a sobrecargar las plantas de filtración de agua ya que tienen que producir más agua de la necesaria para abastecer a los clientes. Por ejemplo, la planta de filtración Sergio Cuevas se diseñó para 60 millones de galones por día (2.63 m^3/s) y la planta de filtración Enrique Ortega (La Plata) se diseñó originalmente para 40 millones de galones por día (1.75 m^3/s) para una capacidad combinada de 100 millones de galones por día (4.38 m^3/s). Al presente estas plantas de filtración están produciendo 85 y 70 millones de galones por día (3.72 y 3.07 m^3/s), respectivamente. Los avances en el tratamiento químico del agua, permite operar las plantas de filtración aún cuando estén sobrecargadas.

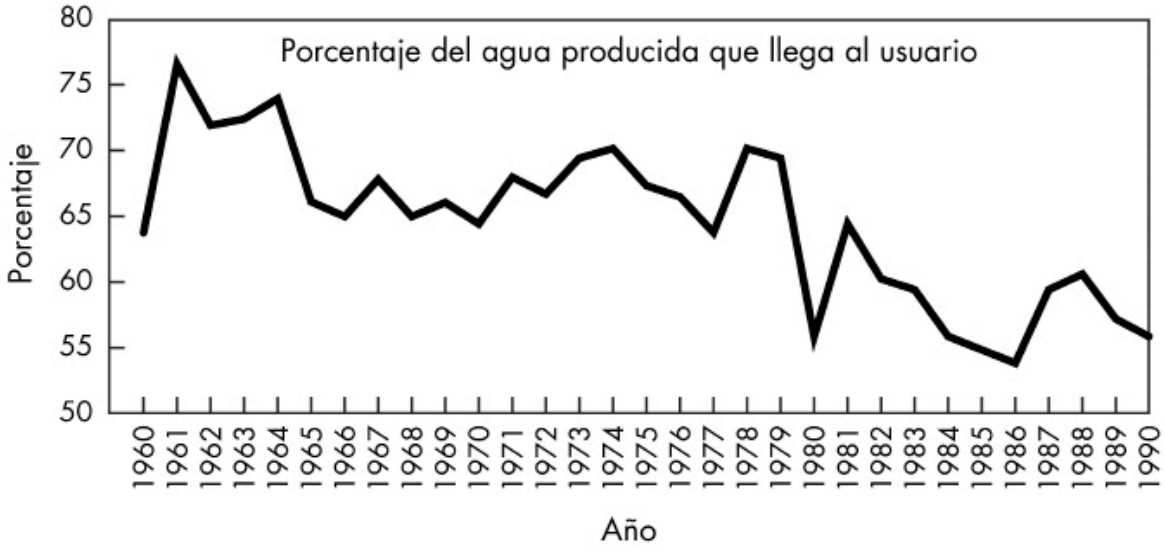
¿Será mayor la pérdida comercial que la pérdida física? -- El estudio más reciente realizado por la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados (año 2012) establece el por ciento de agua potable no facturada en 61.6 por ciento (398 mgd/ 1.51 Mm^3/día). Este estudio distribuye las pérdidas como sigue: 79.2 por ciento (315 mgd / 1.19 Mm^3/día) en pérdidas físicas (filtraciones y roturas de tuberias) y 20.8 por ciento (83 mgd / 0.32 Mm^3/día) en pérdida comercial. De ahí que la responsabilidad de reducir el por ciento de agua potable no facturada es tanto de la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados como de sus clientes.

¿Cómo se atienden las pérdidas comerciales? -- Las pérdidas comerciales se atienden a través del contador de agua. Las pérdidas comerciales se reducen en la medida que aumenta la calidad de la lectura de cada contador y el mantenimiento de los mismos. Se estima que un contador de agua de más de 10 años registra hasta un 7 por ciento menos de lo real. El contador de agua equivale a la caja registradora de la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados. Las actividades de hurto consisten en afectar o dañar la lectura del contador.

¿Cómo se atienden las pérdidas físicas? -- La pérdida física se atiende a través de la optimización de los sistemas de agua potable.

Figura 50. Producción, venta y cobro por el agua en Puerto Rico entre el 1945 y 2010 (arriba). La distancia entre la curva de producción de agua y la curva de entregas (venta de agua), corresponde al agua que se pierde en el sistema de distribución o que no es facturada por la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados y su propio consumo de agua. Cambio en el por ciento del agua purificada que le llega al consumidor en Puerto Rico (abajo). La disminución se debe a que la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados pierde agua en proporción a lo que produce y como consecuencia cada año tiene que purificar más y más agua para servir al mismo número de consumidores. Datos del San Juan Star *Business Outlook*, 13 de junio del 1994.





Optimizar un sistema de agua potable implica distribuir el recurso de la manera más equitativa posible entre todos los clientes y reducir las pérdidas en el proceso. La Autoridad de Acueductos y Alcantarillados atiende sobre 40,000 querellas al año por salideros en toda la isla. Parte importante de la optimización de los sistemas de agua potable es una distribución apropiada de las presiones hidráulicas y la reducción de los desbordamientos de tanques. Cada cliente debe recibir presiones hidráulicas en la entrada a cada hogar cerca de las 30 lb/pulg^2 (psi, por sus siglas en inglés; 21,093 kg/m^2). Un sistema en la que las presiones superan las 30 libras por pulgada cuadrada (21,093 kg/m^2) sugiere oportunidades de optimización y de reducción de pérdidas. Un sistema con presiones hidráulicas controladas presenta menor número de salideros. La reducción en la frecuencia de desbordamiento de tanques puede lograrse a través de un monitoreo remoto de niveles del tanque, que indiquen de manera anticipada el evento (Fig. 51).

¿Cómo ha reaccionado la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados ante el problema con el agua no contabilizada? -- La Autoridad de Acueductos y Alcantarillados ha iniciado un programa agresivo para recobrar el máximo del agua potable 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 futuro e incluirá inversiones cuantiosas en infraestructura diseñada para reducir la cantidad del agua potable no contabilizada. La importancia de implantar un plan agresivo de control de pérdidas en la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados puede apreciarse mejor mediante las curvas de escenarios variados ilustrados en la figura 52a. En esta figura se evalúan escenarios de necesidad de producción de agua potable para distintos niveles de agua potable no contabilizada, variando desde 30 al 45 por ciento (lo que

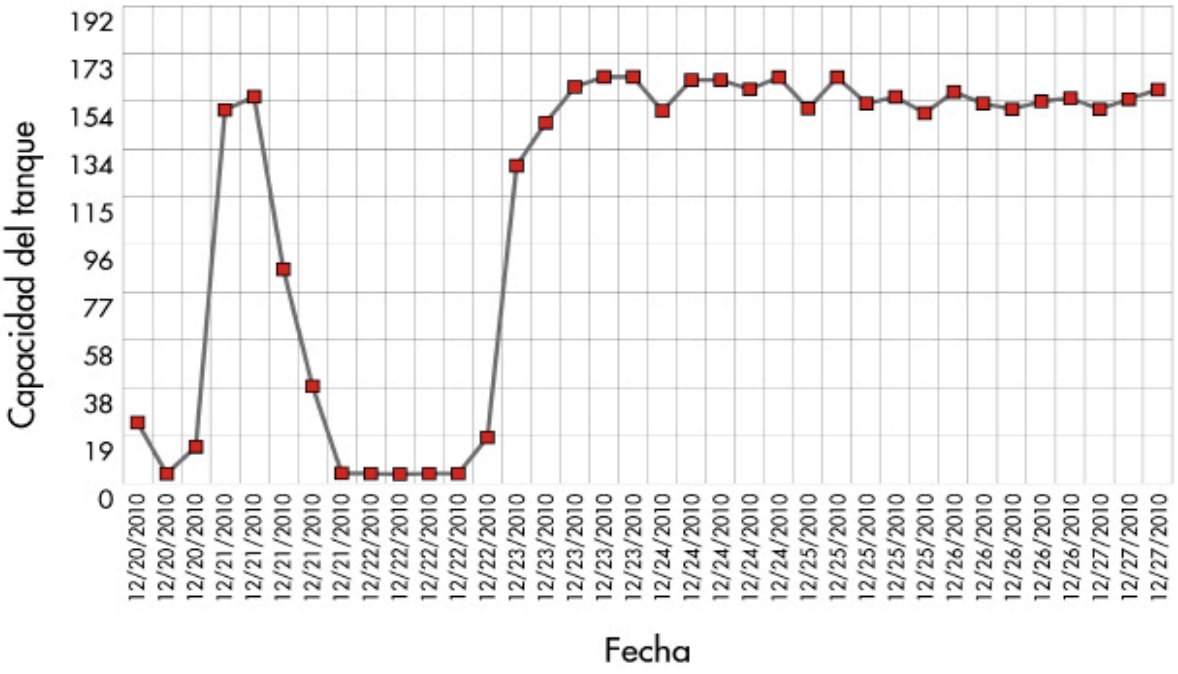


Figura 51. Pulgadas de agua almacenada en un tanque de distribución de la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados por tiempo. Instrumentos remotos permiten la observación remota y continua del comportamiento de los sistemas. Para convertir pulgadas a mm multiplique por 25.4.

es 18 por ciento menor que el agua potable no contabilizada estimada al presente). Una reducción en el agua potable no contabilizada al 35 por ciento de la producción resultaría en una economía de hasta 100 millones de galones por día (4.38 m^3/s), equivalente a toda el agua que produce el Superacueducto. Al reducir el agua potable no contabilizada será menor la necesidad de nueva infraestructura y se reversa la tendencia en la figura 52b donde cada año un menor porcentaje de agua producida le llega al usuario.

¿Cuántos contadores de agua maneja la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados? -- La Autoridad de Acueductos y Alcantarillados maneja 1.25 millones de contadores de agua.

¿Cómo han variado los cobros de la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados a sus clientes? -- Desde que comenzó a regir la primera tarifa de la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados en 1946, la misma ha sido revisada en diez ocasiones. El mayor periodo sin revisar las tarifas en la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados es el transcurrido desde el año 1986 al año 2005. Desde el 1970 (año aproximado en el que comienzan a regir nuevas reglas y requerimientos ambientales) al 1986, la tarifa se revisó en seis ocasiones. Desde el año 1970 a los 1986 (16 años), la tarifa aumentó en un 224 por ciento, un promedio de aumento de 14 por ciento por año. El mayor aumento tarifario aplicado de una vez fue en el año 2005-2006 (200 por ciento de aumento), lo para reflejar la acumulación de 19 años anteriores sin revisión tarifaria (Tabla 10).

¿En qué consiste la tarifa vigente de la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados? -- La tarifa residencial por consumo de agua y servicio de alcantarillado vigente en la

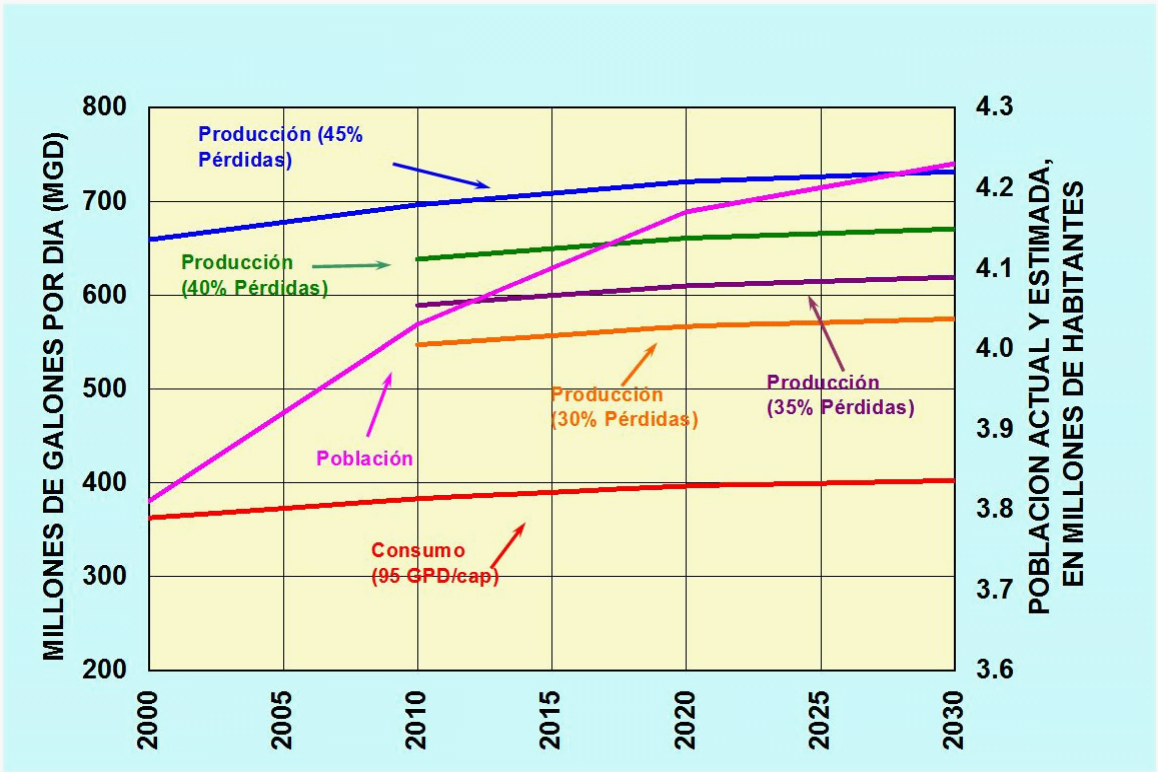


Figura 52. Escenarios proyectados hacia el futuro para estimar la producción de agua necesaria por la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados basado en población, consumo per capita y por ciento de pérdida de agua en el sistema.

Tabla 10. Aumentos históricos en las tarifas de agua potable de la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados.

Fecha	Aumento en por ciento
Julio 1949	30.0
Julio 1953	40.0
Junio 1962	25.0
Junio 1970	43.0
Junio 1975	27.0
Mayo 1978	19.0
Abril 1981	51.6
Febrero 1982	37.8
Febrero 1986	44.8
2005- 2006	200

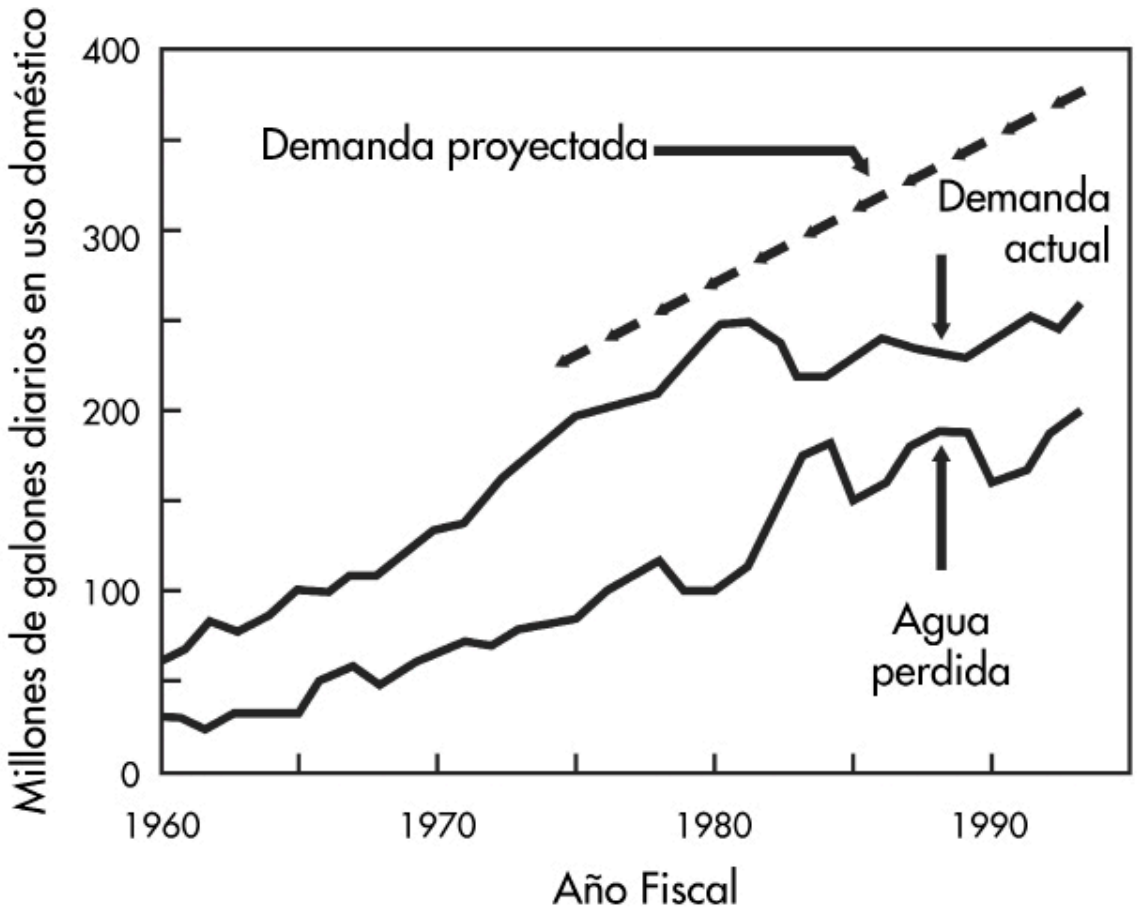
Autoridad de Acueductos y Alcantarillados incluye dos elementos: un cargo base fijo de $19.71 mensuales por el servicio y consumo de hasta 10 m^3 (2,640 gal); y un cargo progresivo a base de tres bloques de consumo, donde el costo por cada m^3 (264 gal) es $2.67 entre 11 y 15 m^3 (2,904 y 3,960 gal); $2.93 entre 16 y 35 m^3 (4,224 y 9,240 gal); y $3.20 por cada m^3 (264 gal) en exceso de 35 m^3 (9,240 gal). Por ejemplo, una residencia con servicio de agua y alcantarillado que consume cero agua en un mes paga el mínimo de $19.70. Si consume 20 m^3 (5,280 gal) paga el mínimo de $19.71 por los primeros 10 m^3 (2,640 gal), más $10.00 por los 5 m^3 (1,320 gal) entre 11 y 15 m^3 (2,904 y 3,960 gal) sobre la base de 10 m^3, más $14.65 por los 5 m^3 (1,320 gal) entre 16 y 20 m^3 (4,224 y 5,280 gal), para un total ese mes de $44.36 (19.71 + 10.00 + 14.65). Si la residencia utiliza un pozo séptico (casi la mitad de las casas en Puerto Rico) no paga alcantarillado sanitario y la tarifa base por el consumo de 10 m^3 (2,640 gal) es de $10.60 mensuales. El cliente que consume 20 m^3 (5,280 gal) sin servicio de alcantarillado pagaría el costo base de $10.60 por los primeros 10 m^3 (2,640 gal); más $5.50 por los 5 m^3 (1,320 gal) de 11 y 15 (5 x 1.10); más $8.00 por los 5 m^3 (1,320 gal) de 16 y 20 m^3 (4,224 y 5,80 gal) (5 x 1.60), para un total de $24.10.

Este sistema fue diseñado para incentivar la conservación del agua y penalizar el consumo excesivo. Las tarifas vigentes varían también con el diámetro del tubo de conexión para tomar en cuenta sistemas de viviendas múltiples con un solo contador (condominios). Existen tarifas diferentes para los clientes comerciales, agencias de gobierno e industrias, también dependiendo del diámetro del tubo de conexión y aumentando en proporción al consumo en los mismos bloques que la tarifa residencial. Estas tarifas son más altas que las residenciales.

¿Cómo se proyecta el uso y demanda de agua? -- La demanda de agua se estima en función a la población, el uso per capita de esa población y el tipo de uso que se proyecta para el agua. En Puerto Rico la demanda de agua se ha sobrestimado consistentemente desde la década del 70 (Fig. 53). Esto resulta en que los planes de desarrollo de infraestructura sobrestimen las necesidades del país.

¿Por qué algunas regiones de Puerto Rico demandan más agua que otras? -- Las causas

Figura 53. Estimados de la demanda de agua por las agencias del gobierno en comparación a la demanda real y la pérdida del agua en Puerto Rico (Morris 1994).



son: (1) el cambio en estilo de vida y en el tipo de actividad económica; (2) las ineficiencias del sistema de distribución (se pierde más agua); (3) la construcción acelerada de hoteles que consumen más agua que los usos residenciales y aumentan la población de la isla por un millón de turistas anualmente; y (4) la extención de las viviendas a nuevas áreas sin infraestructura adecuada para servirlas.

¿Cómo se proyecta la disponibilidad del agua en Puerto Rico? -- Para conocer la disponibilidad del agua se requiere conocimiento de cual es la descarga actual e histórica de los ríos. Los datos actuales se obtienen de las estaciones de medir flujo que opera el U.S. Geological Survey. Para el análisis estos datos se representan en curvas de frecuencia de duración de flujo para los ríos (Fig. 19). Se utilizan además cálculos del balance de agua en los acuíferos. Con esta información se estima la cantidad de agua disponible. Como ya señaláramos, los estimados de población, el consumo per capita y la naturaleza de los usos proyectados permiten estimar la demanda. Al comparar la demanda con la disponibilidad de agua, podemos conocer el balance de agua en un periodo dado y para un área en particular. Proyecciones de esta naturaleza han demostrado que en Puerto Rico hay agua en abundancia para el futuro previsible. Con los abastos disponibles podemos satisfacer los usos del ser humano y los de los sistemas naturales.

MANEJO DEL AGUA EN PUERTO RICO

¿De quién es la responsabilidad legal del uso, conservación y manejo del agua en Puerto Rico? -- La responsabilidad legal del uso, conservación y manejo del agua en Puerto Rico es exclusivamente del Departamento de Recursos Naturales y Ambientales según establecido en la Ley de Aguas. Los tribunales han reconocido el derecho del Gobierno de los Estados Unidos para controlar el uso del agua en sus propiedades tales como el Bosque Nacional de El Yunque.

¿Bajo qué leyes y reglamentos se rige el manejo del agua en Puerto Rico? -- La Ley 136 del 1976, Ley para la conservación, el desarrollo y uso de los recursos de agua de Puerto Rico (Ley de Aguas) es la ley principal. Además, hay otras leyes y reglamentos que afectan la conservación del agua:

- Ley 5 del 1977, Ley para proteger la pureza de las aguas potables de Puerto Rico, la cual aplica al sistema de suministro de agua.
- Ley 97 del 1945, Ley para proteger las vertientes de agua. Bajo esta ley se adquirieron muchos de los bosques públicos, se protegen las cuencas hidrográficas y se clasifican los usos de las tierras agrícolas.
- Ley 6 del 1968, Ley de prevención de inundaciones y de conservación de playas y ríos. Esta ley controla la extracción de arena en las playas y ríos y conserva los manglares.
- Ley 111 del 1985, Ley para la protección y conservación de cuevas, cavernas o sumideros de Puerto Rico. Esta ley protege a las cuevas y sumideros de la isla.
- Ley Núm. 416 de 22 de septiembre de 2004, Ley de Política Pública Ambiental, la cual establece la política ambiental de la Isla y requiere la preparación de declaraciones de impacto ambiental para ciertos proyectos de desarrollo.

Los reglamentos más importantes para la conservación del agua son:

- Reglamento para el aprovechamiento, uso, conservación y administración de las aguas de Puerto Rico (Departamento de Recursos Naturales y Ambientales).
- Reglamento para el control de la contaminación atmosférica (Junta de Calidad Ambiental).
- Reglamento para el control de inyección subterránea (Junta de Calidad Ambiental).
- Reglamento de Planificación (Junta de Planificación).
- Reglamento de zonificación (Junta de Planificación).
- Reglamento de zonificación de la zona costanera y de accesos a las playas y costas de Puerto Rico (Junta de Planificación).
- Reglamento sobre servidumbres de paso de alcantarillado y desagüe pluvial (Junta de Planificación).
- Reglamento de zonificación especial para las zonas no urbanas de los municipios circundantes al Bosque Nacional del Caribe (en el presente es el Bosque Nacional de El Yunque) (Junta de Planificación).

Finalmente, varias leyes federales vigentes en Puerto Rico afectan la conservación de las aguas:

- Ley federal de agua limpia del 1972.
- Ley federal de agua potable segura del 1974.
- Ley federal de control de inundaciones del 1970.
- Ley federal de cuencas y control de inundaciones del 1954.
- Ley federal para proteger las vertientes de agua del 1945.

¿Cuáles son las responsabilidades del Departamento de Recursos Naturales y Ambientales bajo la ley de aguas de Puerto Rico? -- El Departamento de Recursos Naturales y Ambientales tiene el deber ministerial de:

- Desarrollar un plan integral para el uso, conservación, desarrollo y clasificación de las aguas.

- Adoptar las reglamentaciones que estime necesarias para el uso de todas las aguas.
- Establecer áreas donde los recursos de agua se consideran críticos, y adoptar normas para su protección, conservación y uso.
- Administrar sistemas de permisos y **franquicias** para el uso de las aguas así como para el hincado de pozos, lo que incluye el cobro de derechos por el uso del agua y promulgar criterios de uso óptimo así como prioridades de consumo.
- Recomendar a la Junta de Planificación normas y reglamentos para el uso de terrenos que pueden afectar el agua.
- Llevar a cabo investigaciones para definir los recursos de agua del país y sus usos.
- Mantener un Centro de Información Hidrológica a la disposición de otras agencias y de personas particulares.
- Identificar maneras de proteger, conservar y utilizar eficazmente los acuíferos, lo que incluye reglamentar el hincado de pozos y mantener un registro de pozos.
- Realizar inventarios y mantener registros de los recursos de agua, pozos, derechos de uso, permisos y franquicias. Estos registros serán de carácter público.
- Nombrar un Comité de Recursos de Agua compuesto por representantes de otras agencias e instrumentalidades de gobierno y la comunidad para asesorarle en la preparación del plan integral antes descrito, así como proveer ayuda en cualquier otra función asignada al Departamento por ley.
- Emitir órdenes de cese y desista por violaciones a la ley, así como imponer multas administrativas de hasta $50,000.
- Asesorar al gobernador sobre las situaciones de emergencia respecto al uso del agua y las medidas para enfrentar la situación.

¿Qué agencias intervienen con el agua en Puerto Rico? -- Un total de 26 agencias, 14 insulares y 12 federales tienen ingerencia en la protección y uso del agua en Puerto Rico. Estas son:

Agencias Insulares:

1. Oficina Gerencia de Permisos (OGP).
2. Autoridad de Acueductos y Alcantarillados (AAA).
3. Autoridad de Carreteras (AC).
4. Autoridad de Energía Eléctrica (AEE).
5. Autoridad de los Puertos (AP).
6. Autoridades y Agencias Municipales (AAM).
7. Departamento de Agricultura (DA).
8. Departamento de Recursos Naturales y Ambientales (DRNA).
9. Departamento de Salud (DS).
10. Departamento de Transportación y Obras Públicas (DTOP).
11. Instituto de Recursos de Agua, Universidad de Puerto Rico, Recinto Universitario de Mayagüez (IRA/UPR).
12. Junta de Calidad Ambiental (JCA).
13. Junta de Planificación de Puerto Rico (JP).
14. Comisión de Servicio Público (CSP).

Agencias Federales:

1. Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA).
2. Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América (EPA).
3. Agencia Federal para el Manejo de Emergencias de los Estados Unidos de América (FEMA).
4. Agencia Federal para el Desarrollo Rural (RDA).
5. Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos de América (USACE).
6. Departamento de Transportación de los Estados Unidos de América (DOT).
7. Negociado de Reclamación del Departamento del Interior de los Estados Unidos de América (USBR).

8. Servicio de Conservación de Recursos Naturales de los Estados Unidos de América (NRCS).
9. Servicio de Guardacostas de los Estados Unidos de América (USCG).
10. Servicio de Pesca y Vida Silvestre de los Estados Unidos de América (USFWS).
11. Servicio Forestal del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América (USDA FS).
12. Servicio Geológico de los Estados Unidos de América (USGS).

¿Cómo se coordina la actividad de todas estas agencias? -- No hay esfuerzos efectivos de coordinación. La Ley de Aguas requiere que el Secretario del Departamento de Recursos Naturales y Ambientales nombre un Comité de Recursos de Agua que lo asesore respecto a la coordinación del manejo del agua en la Isla. El Plan de Aguas, adoptado en el 2008 por el Departamento de Recursos Naturales y Ambientales, es el mecanismo idóneo para dirigir el uso del agua, pero el plan existente no es adecuado para la situación presente y la mayor parte de sus elementos no se han implementado. El Comité de Recursos de Agua no está en funciones.

PURIFICACIÓN DEL AGUA

¿Dónde y cuándo se construyeron los primeros acueductos en Puerto Rico? -- Los primeros acueductos en Puerto Rico se construyeron en Maunabo y Mayagüez en el 1887. En San Juan, el primer acueducto fue una represa y planta de filtración construido en el 1890 en el río Piedras, con tanques de almacenamiento en el barrio Venezuela y tubos que conducían el agua por gravedad a Hato Rey, Santurce y San Juan.

¿Qué métodos hay para purificar el agua? -- El agua se purifica por medio de procesos de decantación para eliminar sedimentos, **filtración** y tratamiento químico (Fig. 54). El tratamiento químico incluye el uso del cloro para eliminar bacterias. La desalinización se utiliza en casos extremos cuando el agua contiene sal. Este es un proceso muy costoso y técnicamente complicado. Algunos sistemas naturales proveen agua de calidad para el consumo humano sin costo alguno.

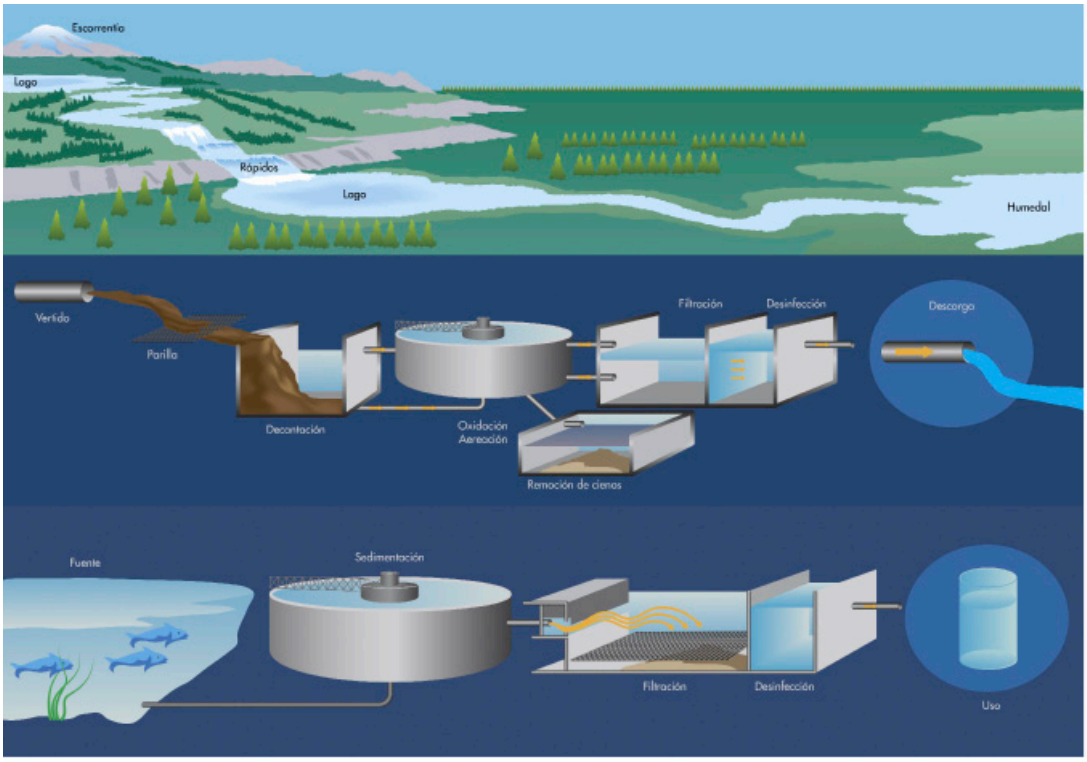
¿Cómo se purifica el agua que llega hasta nuestras casas y negocios? -- El proceso de purificación conlleva seis pasos: **extracción**, **aereación** y **coagulación**, **sedimentación**, filtración, **desinfección**, y **lodos** o **cienos.**

¿En qué consiste la extracción de agua? -- El agua a potabilizar es extraída por la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados de tres tipos de abastos: ríos, embalses y acuíferos. La extracción ocurre de dos maneras: por gravedad o por bombeo. Cuando la planta de filtración se encuentra a una elevación menor a la elevación de la toma de agua en el río o embalse correspondiente, entonces la extracción ocurre por gravedad. Por el contrario, cuando la planta de filtración se encuentra a una elevación mayor a la de la toma de agua, entonces la extracción ocurre por bombeo.

El primer proceso de tratamiento ocurre en la misma toma. Se instalan parrillas para retener objetos y material de mayor tamaño, tales como ramas, hojas y basura. El agua extraída de ríos o embalses tiene que recibir un tratamiento mayor al agua extraída de acuíferos. Las tomas de agua de ríos tienden a variar más con el tiempo en calidad y cantidad. En tiempos de lluvia, la turbiedad, el nivel de agua y la velocidad del agua en los ríos aumentan. En cambio, en los embalses las condiciones son relativamente estables, independientemente de los eventos de lluvia (Fig. 55).

¿Qué es la turbiedad y cómo varía? -- La turbiedad se mide con unidades de **Nephelometric Turbidity Units** (NTU), que se refieren a la cantidad de luz que queda reflejada en las

Figura 54. Componentes y procesos de una planta de filtración, en comparación con los procesos de una planta sanitaria y los procesos naturales de escorrentía. Diagrama de una planta de filtración.



partículas suspendidas en el agua muestreada. A mayor concentración de partículas suspendidas, mayor reflexión de luz y mayor los NTUs. El agua extraída de embalses ronda los 8 a 10 NTU, mientras que el agua extraída de ríos puede variar entre 8 y miles de NTU. La reglamentación de agua potable requiere que el agua potable servida no sobrepase los 0.3 NTU. Para efectos de referencia, las partículas suspendidas se hacen visibles al ojo humano cuando alcanza los 10 NTU. Las aguas de un río del noreste de Puerto Rico, luego de un evento de lluvia mayor, pueden sobrepasar los 2,000 NTU.

¿Qué es un coagulante? -- Un **coagulante** se define como una sustancia que estabiliza la materia suspendida en el agua transformándola a forma coloidal. Los coagulantes son típicamente sales de aluminio o de hierro. La mayor efectividad del coagulante ocurre en aguas entre 5 y 7 de pH.

*¿En que consiste la aeración, coagulación y **floculación**?* -- Una vez el agua del río o embalse es llevada a la planta de filtración, pasa por el proceso de aeración que consiste en añadir oxígeno al agua y reducir concentraciones de metano, entre otras. Luego se inicia el contacto con un coagulante para promover la coagulación de partículas suspendidas para formar coágulos coloidales que pueden ser invisibles al ojo humano. Los coloides se pueden agrandar por el proceso de floculación que envuelve la mezcla de agua para promover la interacción entre partículas coloidales y así formar flóculos más grandes que puedan sedimentarse (Fig. 56). El agua de río o embalse se mezcla, en ocasiones con el uso de batidores, con el coagulante aplicado. Luego del proceso de mezcla, el agua entra al **sedimentador** donde el agua pierde energía y velocidad.

¿En qué consiste la sedimentación? -- El sedimentador es un estanque que permite

Figura 55. Cambio temporal en la turbiedad del agua dependiendo de su origen de río o embalse en el Río Blanco. Los valores a la derecha reflejan la influencia del embalse.

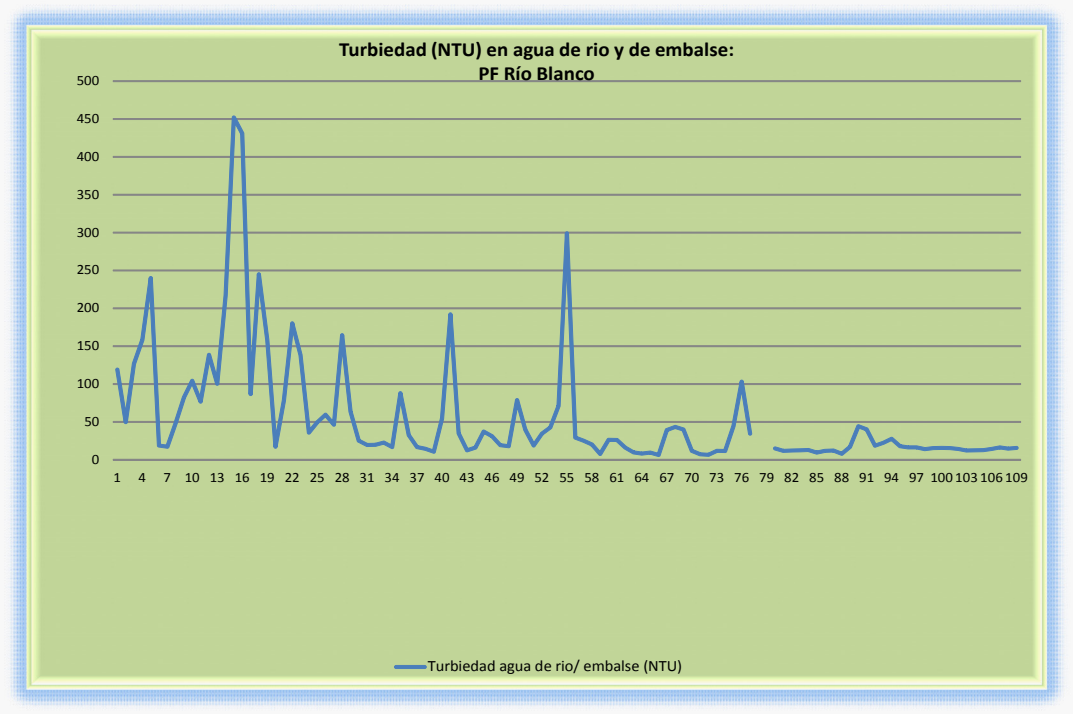
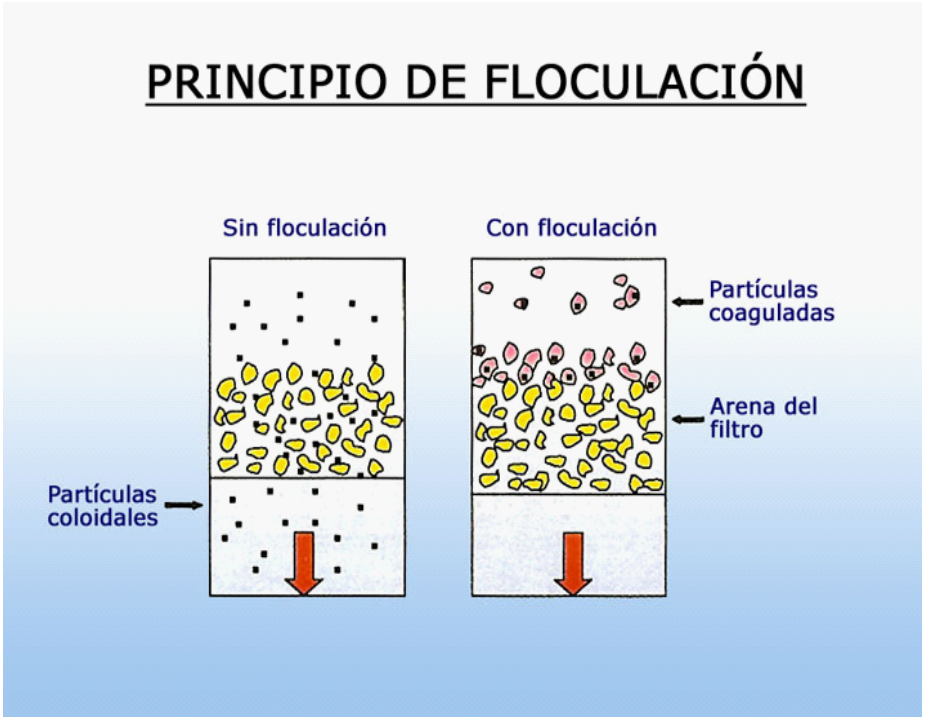


Figura 56. Diagrama del proceso de floculación según ocurre en las plantas de filtración.



que el agua pierda movimiento para que los coágulos o flóculos con mayor densidad que el agua se asienten en el fondo del mismo. El movimiento del agua a lo largo del sedimentador puede variar entre 0.5 y 2 gal/min.p^2 (20.4 y 81.5 L/min.m^2). El sedimentador está diseñado y construido para garantizar el tiempo de asentamiento y las velocidades mínimas para que ocurra la sedimentación necesaria. El asentamiento o depósito de sedimentos tiende a ser mayor en la Zona de Sedimentación, para que el agua que llegue a la Zona de Efluente (a la entrada al filtro) sea de la mayor calidad posible. El agua en la Zona de Efluente no debe sobrepasar los 3 a 5 NTU (Foto 8).

¿En qué consiste la filtración? -- El proceso de filtración tiene como objetivo la remoción de las partículas de menor tamaño, de hasta 2 micrones. La filtración tradicional consiste en el movimiento del agua, regido por la fuerza de gravedad a través de capas de arena, piedra y antracita (Fig. 57). Toda partícula con tamaño mayor a los espacios de aire en las capas de arena, piedra y antracita queda atrapada.

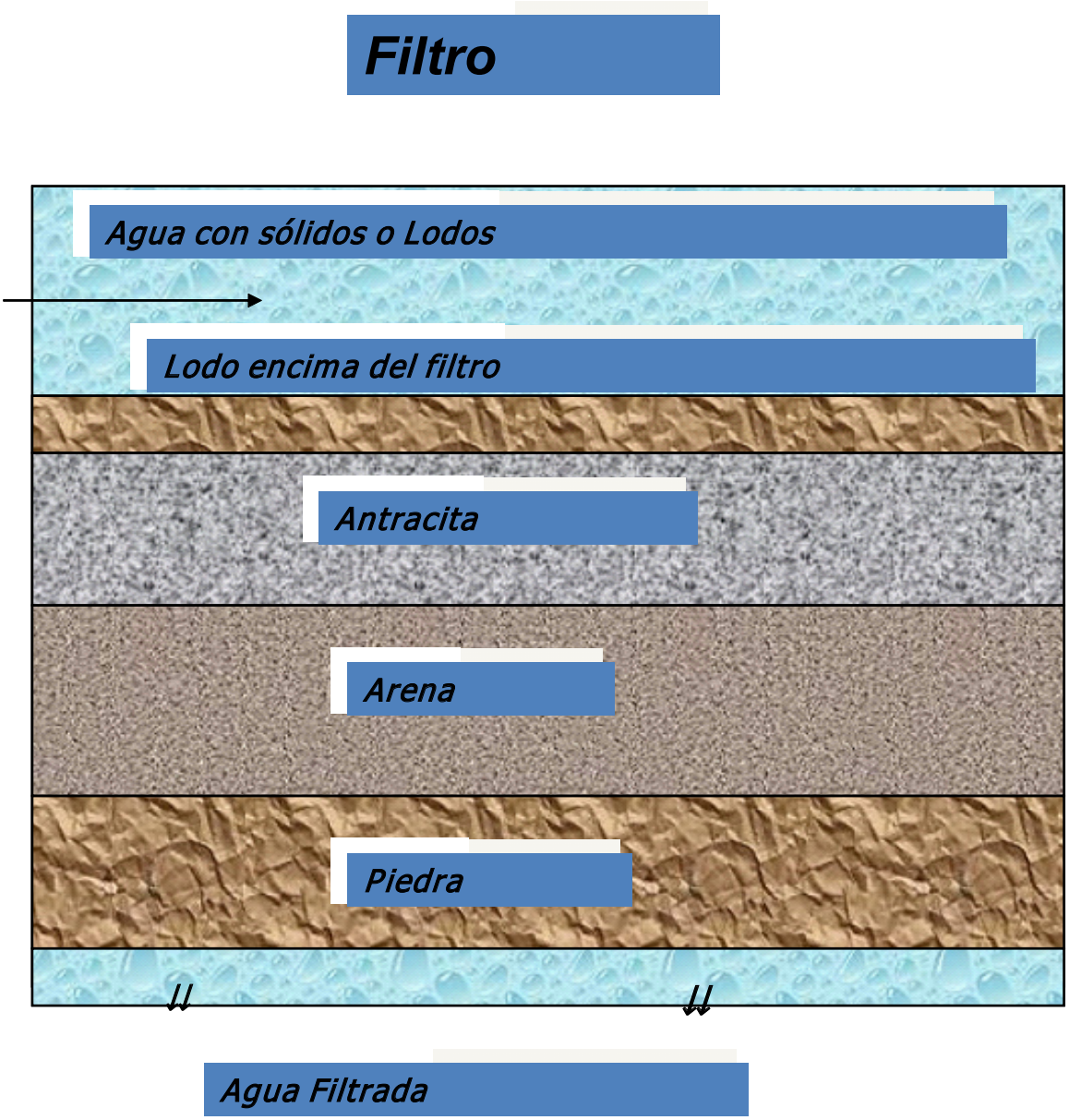
¿Cómo se lavan los filtros? -- El lavado de los filtros consiste en la aplicación de corrientes de aire en dirección contraria al movimiento del agua. De esta manera se separan las partículas adheridas a la arena, piedra y antracita y son removidas.

¿Con qué frecuencia se lavan los filtros? -- Cada filtro y cada sedimentador de cada planta de filtración requiere de lavados frecuentes. En promedio, un filtro puede lavarse cada 24 horas. Los sedimentadores se lavan en promedio cada mes (agua de río) o cada 4 meses (agua de embalse). El agua utilizada para lavar filtros y sedimentadores se le conoce como agua de lavado, y contiene altas concentraciones del sedimento proveniente del río o embalse y que fue removido a través del proceso de coagulación y filtración.



Foto 8. Un sedimentador de la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados (Foto de Andrés García Martinó).

Figura 57. Capas de material filtrante en un filtro típico. El diámetro de las partículas aumenta en las capas posteriores.



¿Cómo se disponen los líquidos de las plantas de filtración? -- Cada una de las plantas de filtración de la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados requiere de un permiso National Pollution Discharge Elimination System para cumplir con el desecho de las impurezas en estado líquido.

¿Cuantos filtros hay en una planta de filtración? -- La planta de filtración de Fajardo tiene 8 filtros, cada uno con la capacidad de procesar hasta 12 millones de galones por día (0.53 m^3/s). La planta de filtración de Loíza (Sergio Cuevas) consiste de 24 filtros con la capacidad de producir 85 millones de galones por día (3.72 m^3/s).

¿En qué consiste la desinfección del agua? -- El proceso de desinfección consiste en la aplicación de algún agente o desinfectante para

eliminar los organismos patógenos. Los tipos de desinfectantes utilizados son el cloro, el bromo, el ozono y la luz ultravioleta. El desinfectante más común es el cloro. El cloro es 2.5 veces más pesado que el aire, es menos costoso y destruye las membranas de las bacterias y patógenos. Se requiere un tiempo de contacto de al menos 30 minutos entre el cloro y los componentes del agua para lograr la desinfección necesaria. La concentración de cloro se expresa mayormente en mg/L. La reglamentación del Departamento de Salud requiere una concentración mínima de 0.2 mg/L de cloro residual en las partes más lejanas del sistema. El mejor y mayor efecto del cloro ocurre en aguas con las siguientes características: pH 6 a 8, NTU < 5 y ausencia de material orgánico ya que la reacción con material orgánico puede formar compuestos carcinógenos tales como los trihalometanos.

¿Qué cantidad de químicos consume la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados? -- El consumo de químicos de la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados es principalmente en los coagulantes y en los desinfectantes (cloro). La Autoridad de Acueductos y Alcantarillados consume aproximadamente 50 millones de libras (22.7 millones de kg) de coagulantes para producir unos 620 millones de galones por día (27.16 m^3/s) de agua potable.

¿Cómo afecta la fuente del agua extraída al uso de químicos? -- En la medida en que la extracción de agua sea más de embalses y menos de ríos, la concentración de sedimentos en el agua cruda será menor y como resultado, el consumo de coagulantes también se reducirá.

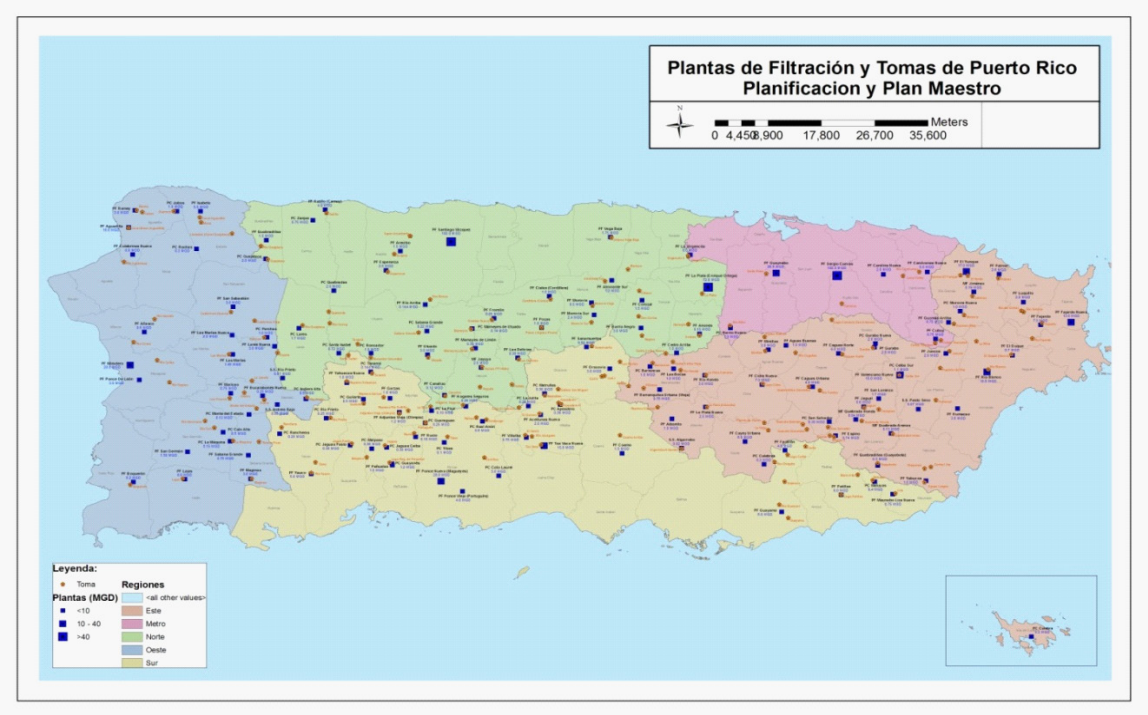
¿Qué alternativas existen a los químicos? -- Se experimenta constantemente con concentraciones y tipos de coagulantes, buscando alternativas más efectivas que optimicen el proceso de coagulación y reduzcan los costos. Alternativas tales como luz ultravioleta y oxidantes mixtos son aplicadas en la producción de agua potable en la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados de manera limitada. Algunas desventajas de la desinfección ultravioleta son: consume mucha energía, no deja residual desinfectante en el sistema para combatir posibles contaminantes del agua en las tuberias y requiere el mantenimiento de las lámparas que emiten la luz. Algunas ventajas son: más efectivo que el cloro en matar microorganismos tales como el *Cryptosporidiumn*, no representan riesgo a las comunidades vecinas y no hay productos secundarios cancerígenos.

¿Qué son los lodos y cienos? -- Lodos y cienos son términos sinónimos y en esta *Cartilla* vamos a utilizar cienos. Los cienos son impurezas en estado sólido removidas del agua a través del proceso de filtración y requieren de un tratamiento particular, también regulado extensamente por leyes y reglamentos. Las impurezas en estado sólido se convierten en cieno que pasa por un proceso de secado y es luego transportado a vertederos alrededor de toda la Isla. El cieno removido de las plantas de filtración es básicamente materia orgánica presente en el agua de río (vegetación), que por su baja concentración orgánica, es de menor valor calorífico y de menor potencial para producir energía o para utilizar como fertilizante, en comparación con el cieno proveniente de las plantas de aguas sanitarias.

¿Qué cantidad de cienos se producen anualmente en las plantas de filtración? -- En las plantas de filtración de la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados se producen 42,000 mega gramos o 41,339 toneladas (peso seco) de cieno al año.

¿Cuáles son y dónde están localizadas las plantas de filtración de la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados? -- Las plantas de filtración están localizadas a lo largo de toda la costa y de las cordilleras de Puerto Rico (Fig. 58). La Autoridad de Acueductos y Alcantarillados opera 127 plantas de filtración

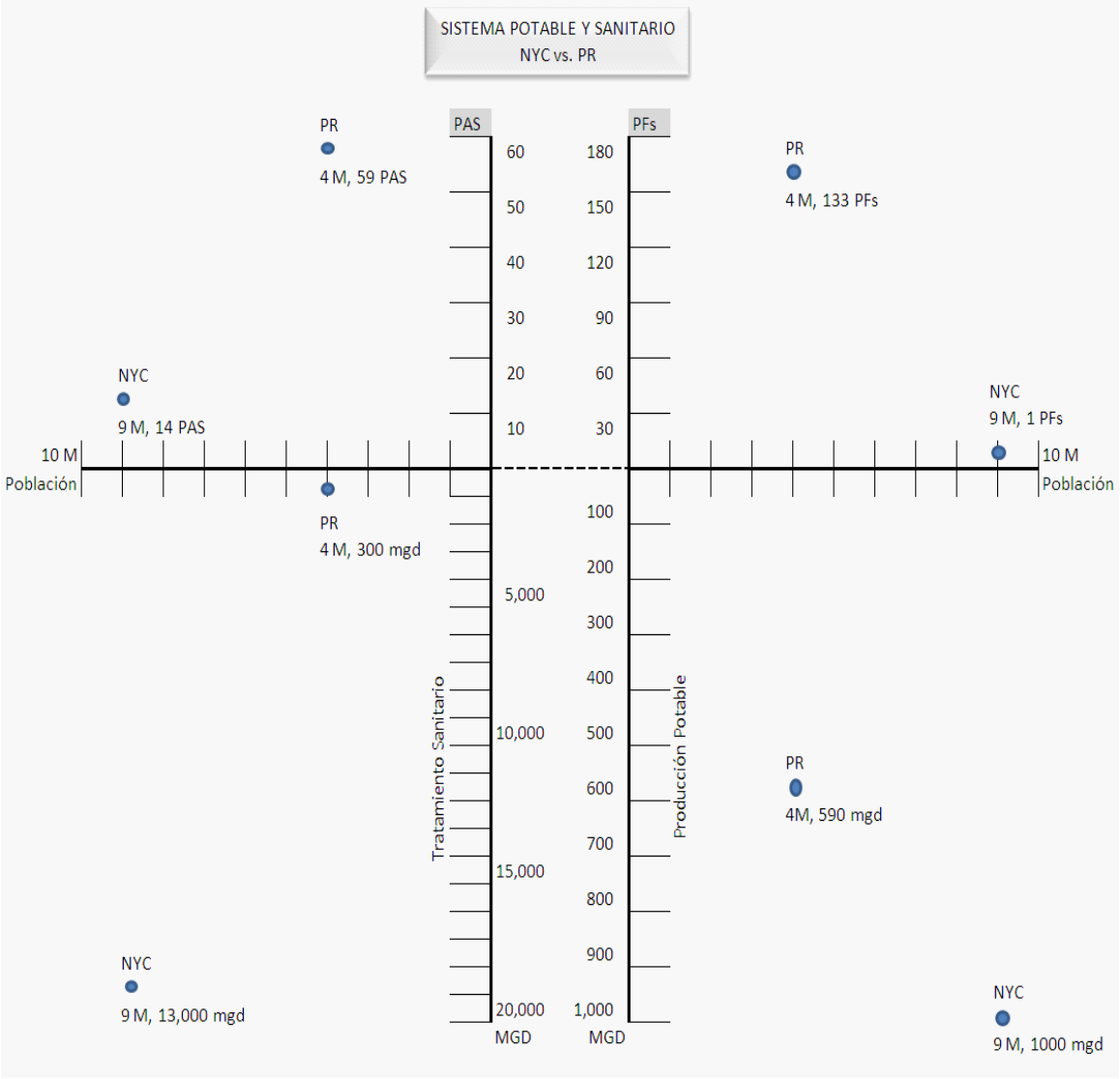
Figura 58. Localización de las plantas de filtración en Puerto Rico.



para producir cerca de 640 millones de galones por día (28.03 m^3/s), 24 horas al día, siete días a la semana para 3.8 millones de habitantes residenciales, comerciales e industriales.

¿Cómo comparamos con la ciudad de Nueva York? -- La Ciudad de Nueva York sirve un billón gal/d (43.81 m^3/s) de agua potable a 9 millones de habitantes con una planta de filtración mientras que Puerto Rico sirve la mitad del agua a 3.8 millones de personas con 127 PFs (Fig. 59). La ciudad de Nueva York asegura la calidad de sus aguas protegiendo las montañas al norte del estado (*Catskill Mountains*) y los lagos y ríos que allí ocurren desde las cuales obtienen las aguas para consumo humano, en otras palabras, dependen del servicio ecológico de los bosques de las montañas para asegurar la calidad de sus aguas. Nueva York procesa 1,460 millones de galones por día (63.95 m^3/s) de aguas sanitarias con 14 plantas de aguas sanitarias, mientras que Puerto Rico procesa 253 millones de galones por día (11.08 m^3/s) con 53 plantas de aguas sanitarias. En gran parte esta diferencia en la cantidad de planta de filtración en Puerto Rico comparado con Nueva York se debe a la geografía de la Isla y la distribución de la población. La planta de filtración de Nueva York se nutre de agua en las montañas y llega por gravedad a la ciudad. Sería imposible y altamente costoso suplir agua potable a todo Puerto Rico desde no una, sino la mitad de las plantas de filtración existentes, debido a los cambios de elevación en el terreno y la dispersión de las ciudades, pueblos y barrios. Llevar agua potable a las montañas requiere bombeos extremos que consumen cantidades enormes de electricidad. El ejemplo principal de este dilema es el sistema del Superacueducto de la Costa Norte, donde 100 millones de galones por día (4.38 m^3/s) se bombean desde cerca de Arecibo a la planta de filtración Santiago Vázquez en el barrio Miraflores de Barceloneta (251 pies [76.51 m] de bombeo), desde donde el agua se distribuye a lo largo de la región norte hasta San Juan. El

Figura 59. Contraste de sistemas de agua potable de la Ciudad de Nueva York (NY) y Puerto Rico (PR). El eje horizontal muestra la población servida. El eje vertical muestra el número de plantas de filtración, plantas sanitarias, producción de agua potable y volumen de aguas sanitarias tratadas.



costo de este bombeo excedió $12 millones en el 2010.

¿Cómo varian las plantas de filtración en su capacidad de producción de agua? -- Las plantas de filtración varían en capacidad de producción desde los 300,000 gal/d (0.01 m^3/s) hasta los 100 millones de galones por día (4.38 m^3/s). Las plantas de filtración de mayor tamaño sirven a la zona metropolitana de San Juan (planta de filtración Santiago Vázquez (Superacueducto), Sergio Cuevas (Loíza), Enrique Ortega (La Plata) y Los Filtros (Guaynabo)).

Las otras plantas de filtración de mayor tamaño sirven a concentraciones mayores de población en la zona de Mayagüez (planta de filtración Miradero), la zona de Ponce (planta de filtración Ponce Nueva y Toa Vaca) y la zona de Humacao (planta de filtración Río Blanco).

Capacidad de algunas plantas de filtración y el embalse del cual se suplen de agua.

planta de filtración	**millones de galones por día**	**metros cúbicos por segundo**
Santiago Vázquez-Dos Bocas (laguna de retención)	100	4.38
Sergio Cuevas-Loíza	85	3.72
Enrique Ortega-La Plata	75	3.29
Toa Vaca	15	0.66
Río Blanco	13	0.57
Fajardo	12	0.53
Farallón	7	0.31
Cidra	5	0.22
Guajataca	2	0.09

¿De dónde procede el agua que se trata en las plantas de filtración? -- Algunas de las plantas de filtración reciben el agua cruda extraída de ríos, a otras les llega agua extraída de embalses. El 18 por ciento del agua que discurre por los ríos y embalses es extraída por la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados para producir agua potable. La mayor extracción de agua cruda por la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados es de los ríos que descargan en la costa norte (433 mgd o 18.97 m^3/s), principalmente del Río Grande de Loíza (114 mgd o 4.99 m^3/s), Río Grande de Arecibo (112 mgd o 4.91 m^3/s), Río Grande de La Plata (109 mgd o 4.78 m^3/s), río Cibuco (19 mgd o 0.83 m^3/s) y Río Grande de Manatí (7 mgd o 0.31 m^3/s) (Fig. 60). El 55 por ciento del agua a potabilizar es extraída de los ríos Grande de Loíza, Grande de Arecibo y Grande de La Plata (Tabla 11). Le sigue la extracción de los ríos de la costa oeste y sur con cerca de 75 millones de galones por día 3.29 m^3/s cada uno (Río Grande de Añasco con 33 millones de galones por día o 1.46 m^3/s). La menor extracción de agua cruda por la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados es de los ríos que descargan en la costa este (30 mgd o 1.31 m^3/s; Río Fajardo- 13 mgd o 0.57 m^3/s).

¿Cuáles variables se consideran para localizar y construir una planta de filtración? -- La complejidad en la operación de una planta de filtración tiene una relación directa con la localización geográfica de la misma y su toma correspondiente. Al momento de evaluar la localización de una planta de filtración y la toma hay que considerar por lo menos cinco variables: turbiedad del agua, geología del lugar, calidad del agua aguas arriba de la potencial toma de agua, aguas sanitarias y el consumo energético y elevación sobre el nivel del mar.

¿Cómo se considera la turbiedad del agua para localizar y construir una planta de filtración? -- Una toma localizada en un río de alta energía va a producir aguas de alta turbiedad durante eventos de lluvia. La complejidad y los gastos en la operación de una planta aumentan de manera proporcional al aumento en la variabilidad en la turbiedad de entrada. El mayor riesgo de incumplimiento con la calidad del agua servida es precisamente en los instantes en que hay que aumentar o reducir de manera abrupta las dosis de coagulantes, en función del aumento o reducción en la turbiedad en el agua. Por otro lado, una entrada de agua con turbiedad constante (poca variabilidad) permite una operación más estable y de menor riesgo.

Figura 60. Extracción de agua por tres regiones hidrográficas de Puerto Rico. Para convertir acres-pies por año a hectómetros cúbicos por año multiplique por 0.001233489.

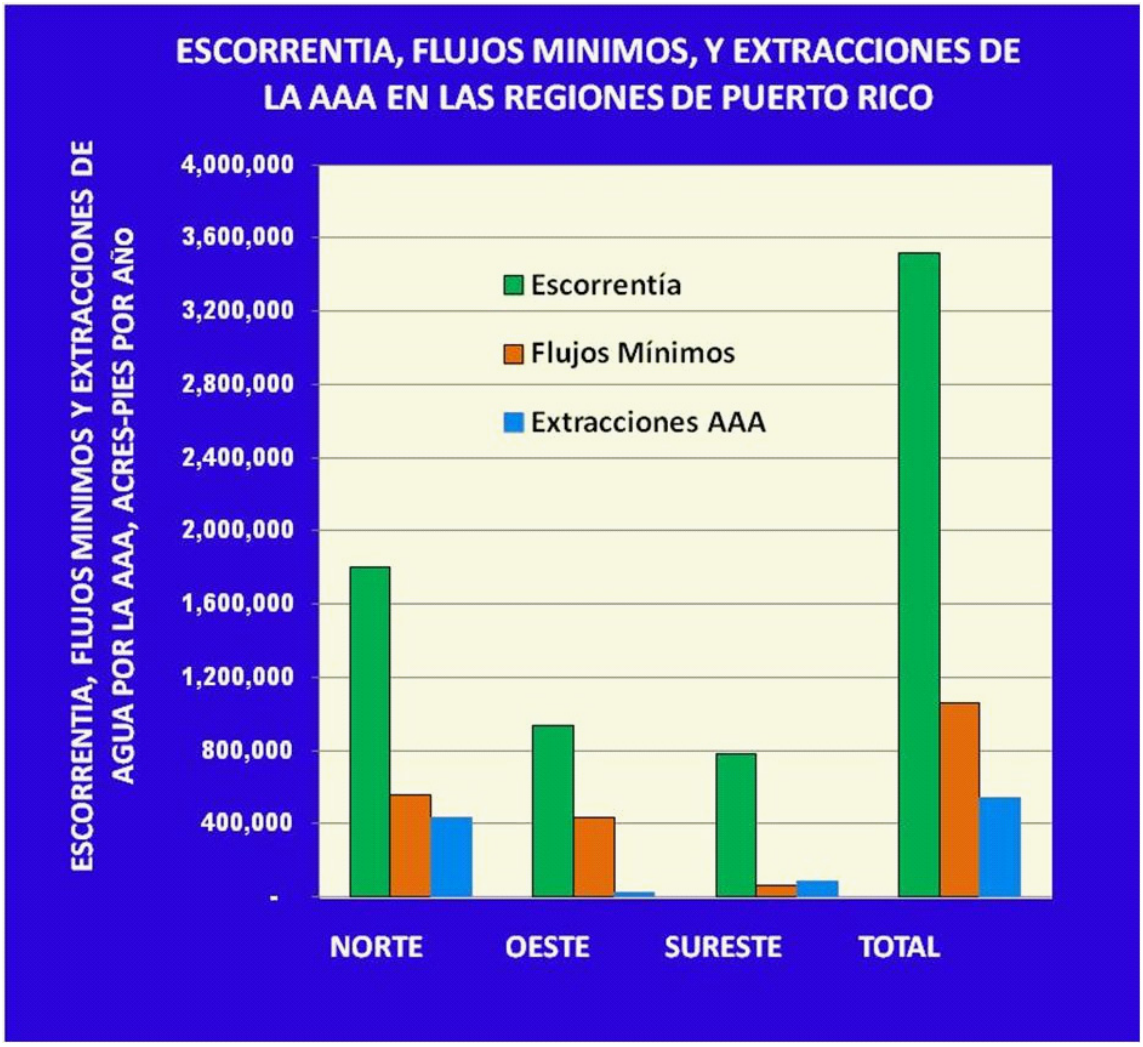


Tabla 11. Número de tomas, extracción de agua y descarga promedio ($Q_{promedio}$) de varios ríos en Puerto Rico. Para convertir mgd a m^3/s, multiplique por 0.0438126365741.

Río	Número de tomas	Extracción (mgd)	$Q_{promedio}$ (mgd)
Grande de Loíza	12	114.9	211
Grande de Arecibo	10	111.8	311
Grande de La Plata	8	109.1	188
Bayamón	4	40.8	83
Guajataca y Canales de Riego del Noroeste	7	43.8	63
Grande de Añasco	13	32.5	278
Espíritu Santo	4	19.2	109
Cibuco	12	18.6	79

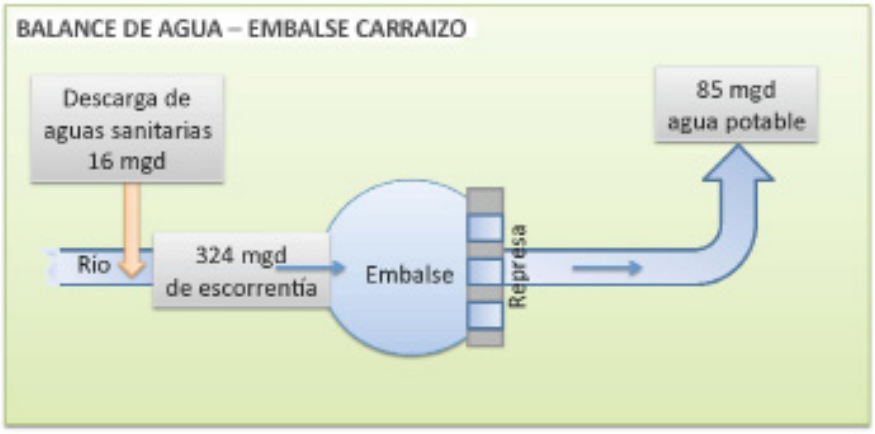
Una toma localizada en un embalse va a traer aguas con menos turbiedad. La figura 55 presenta la variabilidad en turbiedad en la entrada a la planta de filtración Río Blanco, un río de alta energía al sur de El Yunque, antes (agua de río) y después (agua de embalse) de la inauguración del embalse de Río Blanco. Mientras se extraía agua del río Blanco, la turbiedad variaba entre 10 Nephelometric Turbidity Units (flujo base) y 500 NTU (evento de lluvia). Incluso ha alcanzado 3,000 NTU. Una vez comienza la extracción de agua del embalse, la turbiedad se sostiene en los 10 NTU. El aumento de la turbiedad del agua requiere de una mayor aplicación y un mayor consumo de polímeros. La aplicación de polímeros en la planta de filtración río Blanco con agua del río variaba entre las 4,000 y las 6,000 libras (1,814 y 3,628 kg) al mes. La aplicación de polímeros en la misma Planta, con agua de embalse, es cerca de 2,000 libras (907 kg) al mes.

¿Cómo se considera la geología para localizar y construir una planta de filtración? -- La formación rocosa y el suelo predominante afecta directamente la calidad del agua que se extrae. Un suelo predominantemente arcilloso va a producir aguas con mayor turbiedad. Un suelo predominantemente arenoso va a producir aguas con mayor concentración de arena. La planta de filtración cerro Gordo en San Lorenzo está localizada sobre el Batolito de San Lorenzo, una formación plutónica con alto contenido de arena. A diferencia de la arcilla, las partículas de arena son de mayor diámetro y densidad, lo que facilita su remoción con menor consumo de polímeros. Sin embargo, su dureza afecta la operación de los sistemas y los procesos en la planta. Altos contenidos de arena en el río dañan los componentes mecánicos de las bombas. Por ejemplo, en la toma de la planta de filtración cerro Gordo se pueden gastar hasta $100,000 por año en reparación de bombas y motores. Además los altos contenidos de arena requieren dragados frecuentes en el río (hasta 18 dragados al año) y limpiezas continúas de los sedimentadores en la planta de filtración (hasta 12 limpiezas por sedimentador al año).

¿Cómo se considera la calidad del agua aguas arriba de la potencial toma de agua para localizar y construir una planta de filtración? -- El sistema de agua potable que se suple de la planta de filtración de Gurabo presenta problemas recurrentes de **aguas amarillas**. Los altos contenidos de manganeso y hierro en el agua de río pueden oxidarse y al hacerlo se precipitan en forma de partículas que crean turbiedad en el agua servida. Sin embargo, las altas concentraciones de manganeso y hierro no afectan la potabilidad del agua aunque afectan su estética ya que colorean el agua, i.e., forman agua amarilla. El problema de aguas amarillas se mitiga con la aplicación de ortofosfatos, lo que representa un gasto adicional en la operación de la planta (Fig. 39). En general, a mayor presencia de contaminantes en el cuerpo de agua, mayor es el esfuerzo requerido para potabilizarla.

¿Cómo se consideran las aguas sanitarias para localizar y construir una planta de filtración? -- La calidad del agua de río puede verse afectada por descargas de sistemas sanitarios de la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados o de sistemas domésticos. El embalse de Loíza suple 85 millones de galones por día (3.72 m^3/s) de agua a la planta de filtración de Sergio Cuevas para servir a gran parte de la zona metropolitana de San Juan. El Río Grande de Loíza descarga al embalse de Loíza cerca de 16 millones de galones por día (0.70 m^3/s) de aguas sanitarias previamente tratadas en las planta de aguas sanitarias de Caguas, San Lorenzo, Aguas Buenas y Borinquen (Fig. 61). El volumen descargado a los ríos desde estas plantas sanitarias es importante para las plantas de filtración aguas abajo. Lo importante es que sean descargas que cumplan con la calidad requerida. Se puede afirmar que en Puerto Rico, aunque no de manera planificada, estamos

Figura 61. Balance de aguas sanitarias del río a la represa de Carraízo. Para convertir millones de galones por día (mgd) a metros cúbicos por segundo, multiplique por 0.0438126365741.



adelantados en la reutilización de aguas sanitarias para producir agua potable.

¿Cómo se considera el consumo energético y elevación sobre el nivel del mar para localizar y construir una planta de filtración? -- El diseño ideal de un sistema de agua potable no requiere bombeo. En el diseño ideal, el embalse o río se localiza a una elevación mayor a la toma, la toma a una mayor elevación de la planta y la planta a una mayor elevación de los habitantes a ser servidos (Fig. 62). Cada estación de bombas de agua potable representa un gasto energético y de mantenimiento. La elevación de la localidad es determinante en el costo total del proyecto. Una planta de filtración localizada a pocos metros sobre el nivel del mar requerirá de una mayor inversión en la distribución del agua potabilizada a los clientes en elevaciones mayores. Sin embargo,

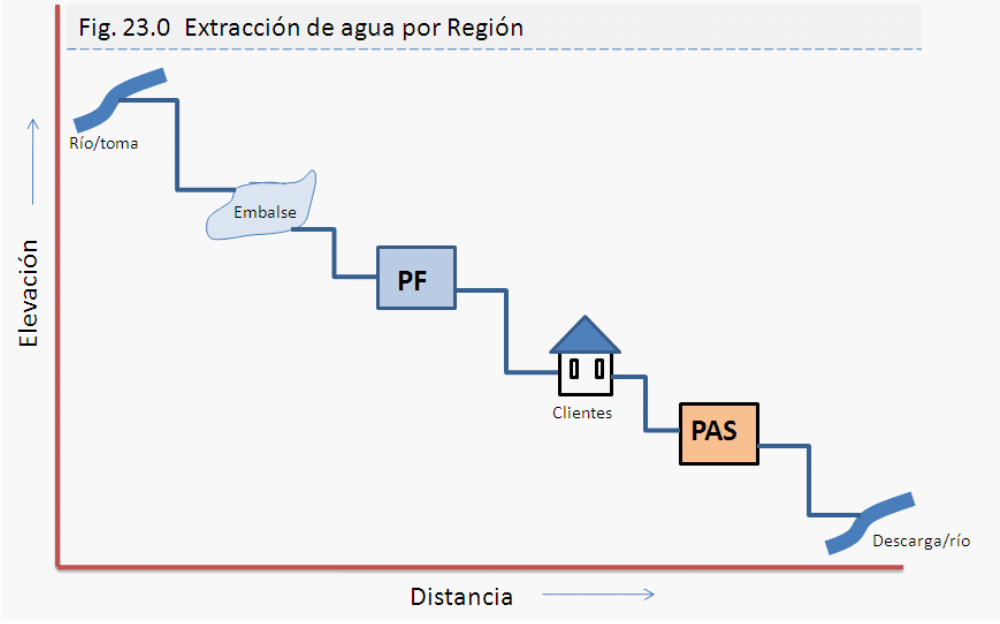


Figura 62. Perfil ideal de elevaciones para la localización de plantas de filtración y tratamiento de aguas respecto a los clientes que se sirven de la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados.

es en las elevaciones menores que se encuentra el mayor caudal en los ríos y por ende el mayor rendimiento para satisfacer las demandas. Las plantas de filtración de mayor producción en Puerto Rico están localizadas cerca de la costa a baja elevación, donde el caudal de los ríos es mayor. La topografía y la hidrografía de Puerto Rico junto a la distribución poblacional prevaleciente evitan que se pueda diseñar y construir el sistema perfecto. El sistema de Fajardo y Ceiba cuenta con una planta de filtración que produce 12 millones de galones por día (0.53 m^3/s), 14 estaciones de bombeo y un embalse construido fuera del cauce del río. El consumo energético en la planta y las estaciones de bombeo suma 663,561 kWh (Fig. 63).

¿A qué elevación estan ubicadas las plantas de filtración en Puerto Rico? -- El 10 por ciento de las plantas de filtración de la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados están localizadas por debajo de los 200 pies (61 m) sobre el nivel del mar, las que representan el 11 por ciento de la producción total de agua potable en Puerto Rico (73 mgd o 3.18 m^3/s) (Fig. 64). Sobre los 1,200 pies (366 m) sobre el nivel del mar, se produce el 7 por ciento del agua potable (46 mgd o 2.03 m^3/s). El 83 por ciento del agua potable se produce en las plantas de filtración localizadas entre 0 y 600 p (0 y 183 m) sobre el nivel del mar. Las plantas de filtración localizadas a mayor elevación son: Matrullas 2,890 pies (881 m) sobre el nivel del mar (Orocovis) y Culebras 2,727 pies (831 m) sobre el nivel del mar (Cayey).

¿Cómo compara el proceso de desalinación con el proceso normal de purificación de agua? -- El proceso para purificar agua dulce consta de 7 pasos y el de purificación de agua de mar consta de 18 pasos según el siguiente esquema, donde los pasos adicionales en la desalinación están subrayados: (1) toma de agua; (2) trampa de arena; (3) filtración; (4) aeración; (5) corrección de la acidez con ácido sulfúrico o hipoclorito de sodio; (6) aplicación de químicos

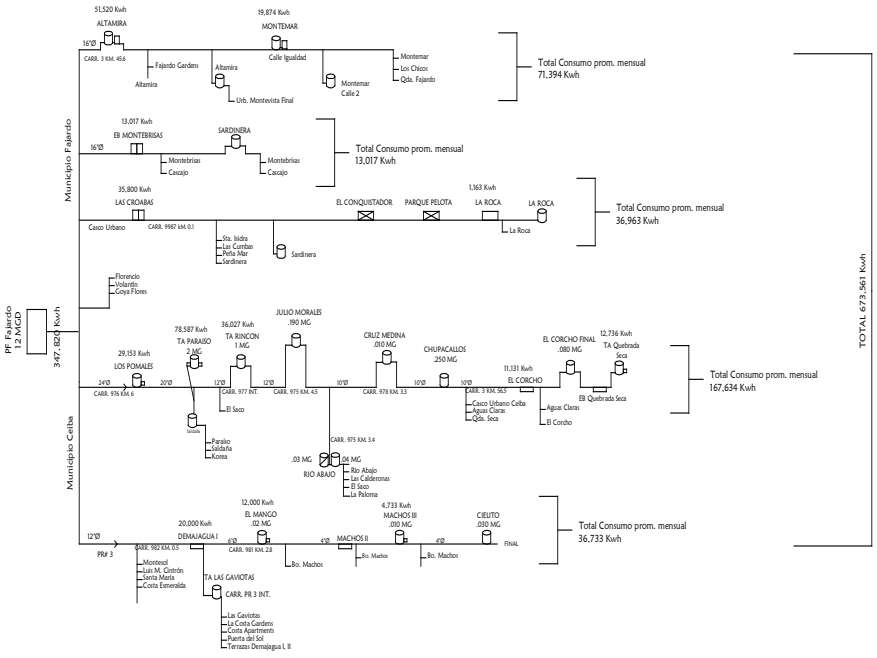
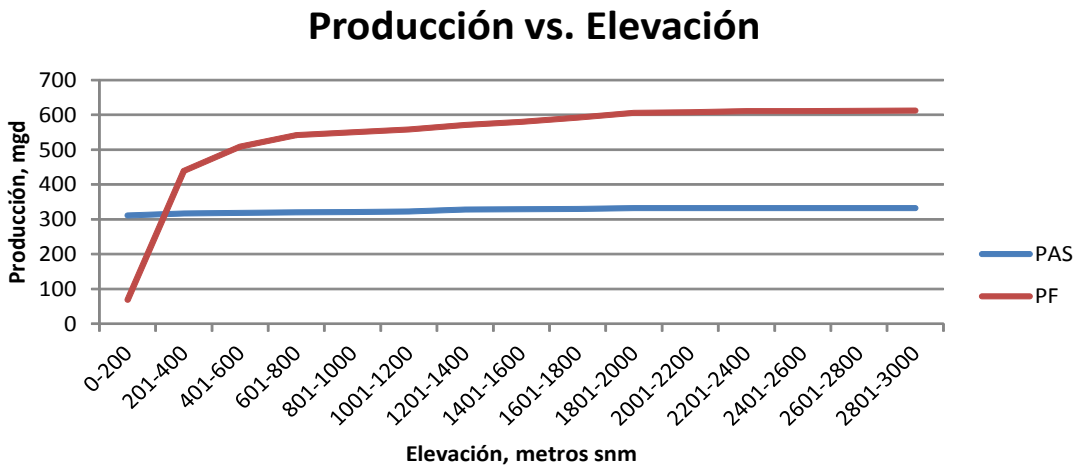


Figura 63. Sistema de distribución de agua para Fajardo/Ceiba. El sistema es representativo de la complejidad de cientos de otros sistemas similares de la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados. Este sistema tiene 13 estaciones de bombeo y un consumo total de 673,561 kWh de energía para producir 13 mgd (0.57 m^3/s).

Figura 64. Producción y tratamiento de aguas comparado con la elevación donde ubican las plantas en Puerto Rico.



como cloro, cal y alúmina; (7) mezclado y floculación; (8) corrección de acidez; (9) control de precipitados; (10) declorinación; (11) filtración triple; (12) filtración; (13) bombeo a alta presión; (14) osmosis reversible; (15) desalinación; (16) remineralización; (17) desinfección; y (18) distribución.

¿Cuáles son las ventajas y las desventajas de la desalinación? --

Ventajas	Desventajas
* Es un alivio para las fuentes de agua dulce * Disminuirá la necesidad de construir represas * Un abasto de agua ilimitado	* Es muy cara * Conlleva un mayor consumo de energía * Requiere más mantenimiento * La tecnología para procesar alto volumen no está disponible * Los efectos ambientales a largo plazo son desconocidos

VENTA DE AGUA

¿Quién vende agua en Puerto Rico? -- En Puerto Rico por ley, el agua es un bien de dominio público no patrimonial y nadie puede cobrar por ella. El Departamento de Recursos Naturales y Ambientales está facultado para otorgar y cobrar por los permisos y las franquicias[10] de agua. Sin embargo, por ley, el Departamento de Recursos Naturales y Ambientales no puede cobrarle a la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados ni a la Autoridad de Energía Eléctrica por los permisos y las franquicias de agua. La Autoridad de Acueductos y Alcantarillados es la agencia de gobierno autorizada para procesar y distribuir agua y solo cobra por el costo de esos servicios. El procesamiento incluye la purificación al igual que el tratamiento de aguas sanitarias. La Comisión de Servicio Público tiene la facultad en ley de regular y otorgar permisos especiales

[10]Una franquicia de agua es una libertad y exención que se le concede a una persona para aprovechar una cantidad específica de agua.

para la venta de agua a entidades privadas, por ejemplo a Coco Beach Utilities en Río Grande. Hay también distribución de agua de parte de acueductos rurales y privados. Las industrias, los agricultores y el gobierno se nutren principalmente de aguas de los acuíferos. El Departamento de Recursos Naturales y Ambientales cobra por las franquicias de agua para el uso de aguas subterráneas. Los comerciantes distribuyen y venden agua embotellada a la ciudadanía en general. Los embotelladores locales pagan franquicias de extracción al Departamento de Recursos Naturales y Ambientales. El Departamento de Recursos Naturales y Ambientales podría incrementar el uso de sus facultades de cobro por el derecho de usar el agua para promover la conservación de este recurso.

¿Cómo se añade valor económico al agua? -- Una parte importante del valor asignado al recurso se relaciona al costo asociado a su tratamiento y procesamiento para hacerlo disponible. En Puerto Rico, por sus abundantes lluvias, ríos y embalses a veces se pierde de perspectiva el valor que representa un galón de agua potable servido por el grifo de cada hogar. ¿Qué se requiere para llevar el agua hasta el grifo? ¿Cuánta fue la inversión necesaria para llevar el agua cruda desde el río hasta la planta? ¿Cuánto es el costo de tratamiento, purificación y distribución? En la medida en que el agua va subiendo la escalera de gastos hasta llegar al cliente (Fig. 65), va aumentando en valor económico. Cada gota de agua potable servida tiene que pasar a través de hasta cinco escalones de costos. Estos son: (1) El embalse o la toma de río; (2) bombeo de aguas crudas hacia la planta de filtración; (3) el proceso de tratamiento en la planta; (4) el bombeo del agua potable; y (5) la transmisión y distribución del agua potable. Cada escalón puede inyectar el menos uno de cuatro tipos de gastos: inversión de capital (C), operación y mantenimiento (O&M), electricidad (kWh) y químicos (Q) (Fig. 65). Todas estas acciones consumen

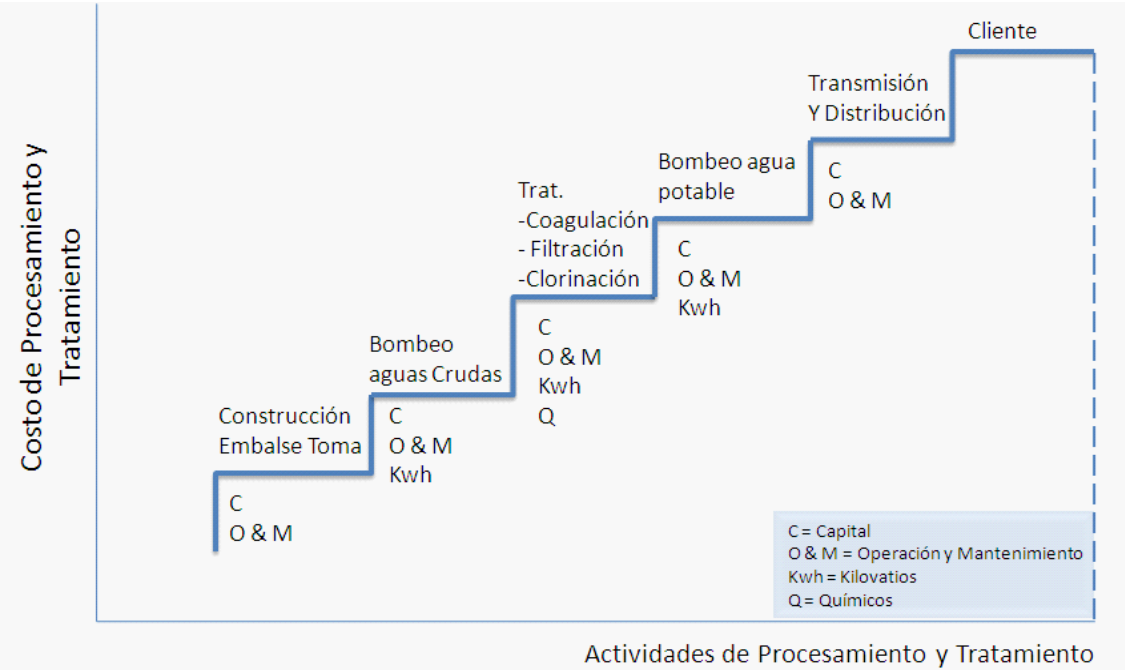


Figura 65. Las actividades que representan un costo por el tratamiento y procesamiento del agua potable y que añaden valor al agua entregada al grifo de cada hogar. Por ejemplo: el tratamiento del agua representa un costo añadido de capital (C), operación y mantenimiento (O&M), energía (kWh) y químicos (Qui).

energía, tiempo y dinero que le añaden valor económico al agua procesada en comparación al agua cruda en la toma de la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados.

¿Cuál es el precio del agua? -- En Puerto Rico, la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados cobra $10.60 por los primeros 2,640 galones (9,992 L) servidos, lo que equivale a un costo de 0.40 centavos por galón o 0.11 centavos por litro. En adelante, el costo por cada 1,000 galones (3,785 L) va de forma incremental desde $4.16 hasta un máximo de $8.18 (0.42 centavos por galón hasta 0.82 centavos por galón o 0.11 centavos por litro hasta 0.22 centavos por litro). El agua desalinizada del mar en las Islas Vírgenes cuesta $14.00 por 1,000 galones (3,785 L) [1.4 centavos por galón o 0.4 centavos por litro] si no se entrega, y entre $35.00 y $45.00 por 1,000 galones (3,785 L) [3.5 y 4.5 centavos por galón o 0.9 y 1.2 centavos por litro] dependiendo de donde se entrega. En los Estados Unidos, el costo promedio por galón de agua potable servida es de 0.30 centavos (0.08 centavos por litro). En las ciudades de Concord y San José, California el costo de agua servida es de 0.80 centavos por galón (0.21 centavos por litro) y 0.60 centavos por galón (0.16 centavos por litro) respectivamente. Esto equivale a $8.00 y $6.00 por los primeros mil galones de agua servida ($8.00 y $6.00/3,785 L), respectivamente. Estos costos reflejan el costo de recoger, purificar y distribuir el agua pero no incluyen los costos de conservación y manejo ni el valor intrínsico del agua.

AGUAS SANITARIAS

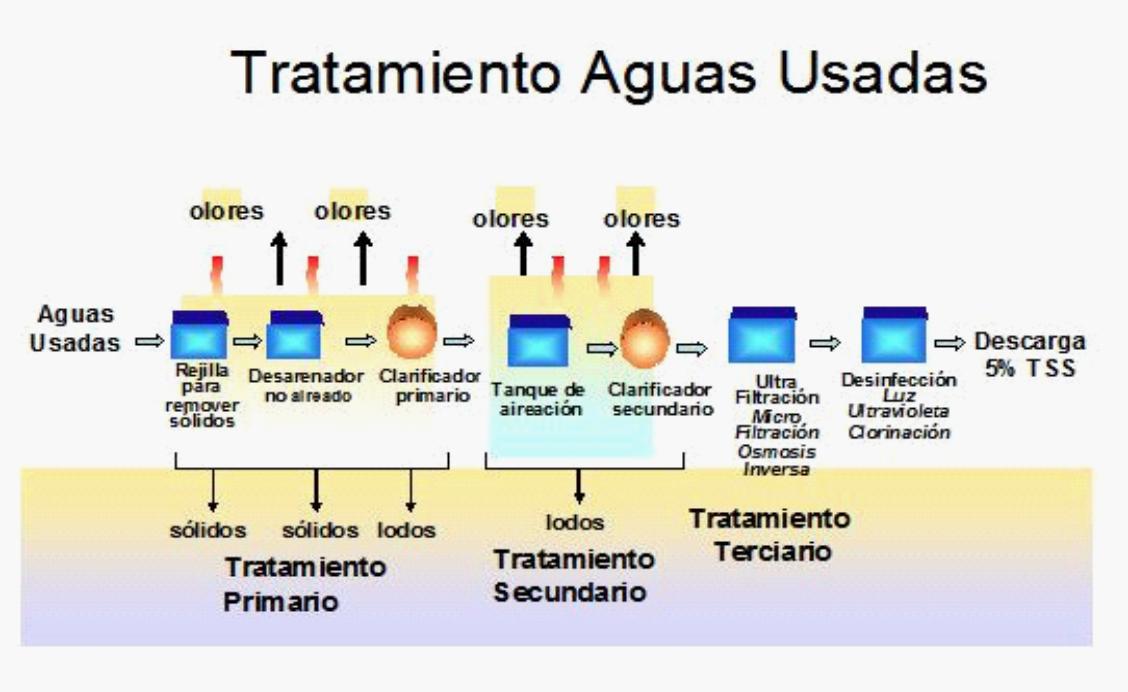
¿Qué son aguas usadas? -- Aguas usadas, también conocidas como aguas sanitarias o aguas servidas, son aguas que han sido utilizadas por el ser humano y como consecuencia contienen contaminantes, lo que las hace no aptas para ciertos usos como el consumo y contacto con la piel humana. Algunos utilizan incorrectamente el término *aguas negras*, cuando se refieren a las aguas usadas o sanitarias. Una porción de las aguas usadas por la industria no se consideran aguas sanitarias. Esta *Cartilla* utiliza el término aguas sanitarias.

¿Qué se hace con las aguas sanitarias? -- Las aguas sanitarias se pueden vertir a los cuerpos de agua, donde los contaminan, o se pueden tratar por medio de tres niveles de tratamiento conocidos como tratamiento primario, tratamiento secundario y tratamiento terciario (Fig. 66).

¿Qué es el tratamiento primario? -- El tratamiento primario consiste en sedimentar los sólidos (escombros y orgánicos) y otras partículas en las aguas sanitarias. Esto se lleva a cabo usualmente en grandes tanques de sedimentación o en pozos sépticos. Este tratamiento remueve el 80 por ciento de los sólidos suspendidos en el agua y el 35 por ciento de la **demanda biológica de oxígeno** (BOD, por sus siglas en inglés). El BOD mide la cantidad de oxígeno necesaria para sostener las bacterias que transforman la materia orgánica en las aguas a bióxido de carbono y agua. Normalmente, las aguas sanitarias tienen enormes BODs y como consecuencia, consumen todo el oxígeno disuelto de las aguas donde se descargan, es decir, ríos, represas, lagunas, estuarios, quebradas entre otros. El resultado es la mortandad de la vida acuática. Aproximadamente el 71 por ciento del caudal de aguas sanitarias en Puerto Rico recibe tratamiento primario.

¿Qué es el tratamiento secundario? -- El tratamiento secundario, bien manejado, remueve hasta el 95 por ciento de la demanda biológica de oxígeno y del total de sólidos suspendidos en las aguas sanitarias. El objetivo es mejorar la calidad de las aguas sanitarias relativo al tratamiento primario. El tratamiento secundario depende de la actividad biológica y por eso se le provee aereación a las

Figure 66. Tratamientos de aguas sanitarias (usadas): primario, secundario y terciario.



aguas para añadirle oxígeno y permitirle a las bacterias crecer y consumir la materia orgánica en las aguas sanitarias. Mientras más oxígeno se añade y más tiempo se le permite al agua estar en contacto con las bacterias, más materia orgánica será consumida en el proceso. Al final del tratamiento secundario se le añade cloro al agua para matar los patógenos en las aguas sanitarias. El resultado de la actividad de bacterias es agua con poca materia orgánica, pero muchos nutrientes tales como fósforo y nitrógeno. Estas aguas normalmente se vierten a cuerpos de agua dulce o al mar, donde su alto contenido de nutrientes estimula el crecimiento de algas y plantas acuáticas. Aproximadamente 22 por ciento del caudal de aguas sanitarias en Puerto Rico recibe tratamiento secundario.

¿Qué es el tratamiento terciario? -- El tratamiento terciario es una continuación de los dos anteriores y remueve el 99 por ciento de los contaminantes en las aguas sanitarias. Además de pasar el agua por los procesos ya descritos de tratamiento primario y secundario, se utilizan procesos de coagulación con sulfato de alúmina (Al_2SO_4) para remover la mayor parte del fósforo presente. El nitrógeno se remueve por procesos bioquímicos conocidos como procesos de nitrificación y denitrificación. Aproximadamente 7 por ciento del caudal de aguas sanitarias en Puerto Rico recibe tratamiento terciario.

¿Cuál es el resultado y costo del tratamiento terciario de aguas sanitarias? -- Las aguas sanitarias se convierten en agua casi potable, aunque la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos no permite su uso directo para consumo. Con cada nivel de tratamiento el costo se multiplica. Los tratamientos secundarios y terciarios se llevan a cabo en plantas de tratamiento especialmente diseñadas y operadas para estas funciones, a un alto costo. El costo neto de purificar el agua al nivel terciario en el presente es alto, lo que inhibe el reuso del agua de manera directa. Por eso, el reciclaje de aguas sanitarias por humedales, dunas de arena, cocales y bosques es una alternativa natural y menos costosa. Sin embargo, esto se tiene que hacer en forma tal que no exceda la capacidad de reciclaje de estos ecosistemas.

¿Qué cantidad de aguas sanitarias se procesan y dónde en Puerto Rico? -- Durante el año 2011, se procesaron aproximadamente 253 millones de galones por día (11.08 m^3/s, o el 40 por ciento del agua que produce la de Acueductos y Alcantarillados), muy similar al agua que factura la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados (Tablas 4 y 12). El 58 por ciento de las aguas sanitarias, es decir, unos 170 millones de galones por día (7.45 m^3/s), fueron tratados en seis plantas regionales de tratamiento primario localizadas en Puerto Nuevo, Carolina, Bayamón, Arecibo, Aguadilla y Ponce. Los restantes 83 millones de galones por día (3.63 m^3/s) se trataron en las restantes plantas de aguas sanitarias. Se estima que hay 700,000 conexiones a estas plantas. Una proporción desconocida del agua que vende la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados se convierte en aguas sanitarias que no reciben tratamiento y simplemente se vierten al ambiente donde contaminan ríos o pozos sépticos. En Puerto Rico hay aproximadamente entre 550,000 y 600,000 pozos sépticos, la mayoría en los pueblos de la montaña.

Del promedio de 1,350,500 millones de galones (5,112 millones de m^3) que discurren por los ríos cada año hacia las costas de Puerto Rico, sólo 30,295 millones de galones (114.75 millones de m^3) son de aguas sanitarias previamente tratadas y vertidas a ríos en planta de aguas sanitarias de la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados (2 por ciento). El restante de las aguas sanitarias tratadas son vertidas directamente al mar (170 mgd o 7.45 m^3/s). La mayor descarga de aguas sanitarias tratadas por la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados es en ríos que drenan hacia la costa norte (47 mgd o 2.06 m^3/s), seguido por la costa oeste (8 mgd o 0.35 m^3/s), la costa este (11 mgd o 0.48 m^3/s) y la costa sur (3 mgd o 0.13 m^3/s). Los ríos que reciben el mayor volumen de aguas sanitarias tratadas por la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados son: Río Grande de Loíza (18 mgd o 0.79 m^3/s), Río Grande de La Plata (12 mgd o 0.53 m^3/s), río Fajardo (11 mgd o 0.48 m^3/s), río Cibuco (6 mgd o 0.26 m^3/s) y el río Guanajibo (5 mgd o 0.22 m^3/s).

¿Quién opera y dónde las plantas de aguas sanitarias? -- La Autoridad de Acueductos y Alcantarillados opera casi todas las plantas de aguas sanitarias en Puerto Rico (Fig. 67). Algunas industrias y unas pocas comunidades operan planta de aguas sanitarias de menor tamaño. El 58 por ciento de las plantas de aguas sanitarias están localizadas a menos de 200 pies (61 m) sobre el nivel del mar y reciben el 94 por ciento de las aguas sanitarias por tratar. El 8 por ciento de las planta de aguas sanitarias están localizadas sobre los 1,200 pies (366 m) sobre el nivel del mar. Las plantas de aguas sanitarias a mayor elevación: Aibonito-

Tabla 12. Generación de aguas sanitarias por región de la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados. Para convertir mgd a m^3/s multiplique por 0.0438126365741.

Región	Generación (mgd)
Este	29.6
Metro	128.0
Norte	26.2
Sur	26.7
Oeste	18.0
Total	228.5

Figura 67. Localización de las plantas sanitarias de tratamiento secundario (plantas de menor tamaño) y las plantas de tratamiento terciario (PAS Caguas).



1,950 pies (594 m) sobre el nivel del mar; Barranquitas- 1,900 pies (579 m) sobre el nivel del mar (Fig. 64).

¿Qué variables se consideran para localizar y construir una planta de aguas sanitarias? -- Se toman en consideración cuatro elementos principales: (1) elevación sobre el nivel del mar; (2) proximidad a un cuerpo de agua; (3) el volumen de dilución en el cuerpo de agua receptor; y (4) el valor ecológico o hidrológico del cuerpo de agua receptor.

¿Cómo se considera la elevación sobre el nivel del mar y la proximidad a un cuerpo de agua para localizar y construir una planta de aguas sanitarias? -- La localización ideal es en elevaciones por debajo de la de los clientes. El objetivo es reducir al máximo la necesidad de bombeo del agua sanitaria hacia la planta de aguas sanitarias y por ende consumo energético (Fig. 63). El diseño ideal considera la menor distancia posible entre la planta de aguas sanitarias y el punto de descarga al río. A mayores metros lineales de tubería, mayor es el riesgo de pérdidas físicas.

¿Cómo se considera el volumen de dilución en el cuerpo de agua receptor para localizar y construir una planta de aguas sanitarias? -- Las aguas tratadas deben ser vertidas a un cuerpo de agua (cuerpo de agua receptor). Cada descarga de una planta de aguas sanitarias requiere del cumplimiento con el permiso National Pollution Discharge Elimination System para múltiples parámetros. Por ejemplo, el National Pollution Discharge Elimination System de la descarga de la planta de aguas sanitarias Regional de Caguas regula 42 parámetros, entre ellos oxígeno disuelto, sólidos disueltos, coliformes, algunos metales y volumen de descarga. El flujo de agua en el río provee un efecto adicional de tratamiento a través de la dilución. Es importante

evaluar el flujo promedio en el río comparado a la descarga promedio que se planifica. Mientras mayor la descarga de aguas tratadas, mayor debe ser el flujo promedio en el río. La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos especifica la carga máxima de materia orgánica y de nutrientes que una planta de aguas sanitarias puede descargar al cuerpo receptor como parte del permiso National Pollution Discharge Elimination System. Cuando la planta de aguas sanitarias excede esta carga, la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados se expone a multas cuantiosas de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos.

¿Cómo se considera el valor ecológico o hidrológico del cuerpo de agua receptor para localizar y construir una planta de aguas sanitarias? -- Hay cuerpos de agua que tienen más valor ecológico o hidrológico que otros por lo que requieren de una mayor protección. Por ejemplo, el río Mameyes con un alto valor ecológico lleva las aguas de El Yunque hacia la costa norte, entre los municipios de Luquillo y Río Grande. Es el único río de mayor tamaño en Puerto Rico que discurre desde un bosque pluvial hasta la costa sin la existencia de presas o algunas otras barreras físicas construidas por el ser humano. El río Mameyes es escenario de migración de especies acuáticas desde el mar hasta la montaña y sirve de hábitat para decenas de especies de aves, anfibios y reptiles.

El Río Grande Loíza lleva sus aguas al embalse de Loíza (Fig. 61) que es la fuente principal de abasto de agua potable para la zona metropolitana de San Juan. El reconocimiento del valor hidrológico del Río Grande Loíza ha llevado a la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados a realizar cuantiosas inversiones en dos frentes: (1) proveer tratamiento terciario en la planta regional sanitaria en Caguas; y (2) eliminar las plantas de aguas sanitarias de menor tamaño localizadas en la cuenca del Río Grande de Loíza, aguas arriba del embalse de Loíza y concentrar el movimiento de las aguas sanitarias hacia la planta regional en el municipio de Caguas.

¿Qué problemas causan las aguas sanitarias? -- Las aguas sanitarias tratadas a nivel primario o secundario representan un riesgo a la salud humana y contaminan los cuerpos de agua por el proceso conocido como **eutroficación**, o sea, el aumento en los nutrientes del agua en los sistemas naturales. Como resultado de la eutroficación pueden ocurrir mortandades de peces, disminución en la biodiversidad e invasiones de plantas acuáticas introducidas. Cuando las estaciones de televisión presentan tomas de los embalses de Puerto Rico se notan los extensos crecimientos de plantas acuáticas flotando en las aguas detrás de la represa. Estos son jacintos de agua, una planta introducida indicadora de aguas eutroficadas.

Los costos para purificar el agua de los embalses de Puerto Rico aumentan debido a la contaminación de los abastos de agua con aguas sanitarias. Esto ocurre a pesar de las altas inversiones en infraestructura de parte de la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados y del gobierno federal. La inversión anual para los sistemas de tratamiento de aguas sanitarias y las plantas de filtración de agua potable fluctuó aproximadamente entre $80 y $140 millones entre el 1981 y el 1992.

Para diluir los contaminantes en las aguas sanitarias se requiere agua limpia. El tratamiento de aguas sanitarias por este método de dilución consume agua que podría utilizarse para consumo humano y por lo tanto, el manejo de las aguas sanitarias reduce los abastos de agua disponible para la población. El tratamiento de aguas sanitarias en plantas regionales con tuberías que descargan las aguas al mar es otro desperdicio de agua dulce que se justifica por el alto costo del tratamiento terciario y la ausencia de infraestructura para reciclar el agua.

¿Qué alternativas hay para el manejo de las aguas sanitarias? -- Una parte de las aguas sanitarias se podría reciclar para aumentar los

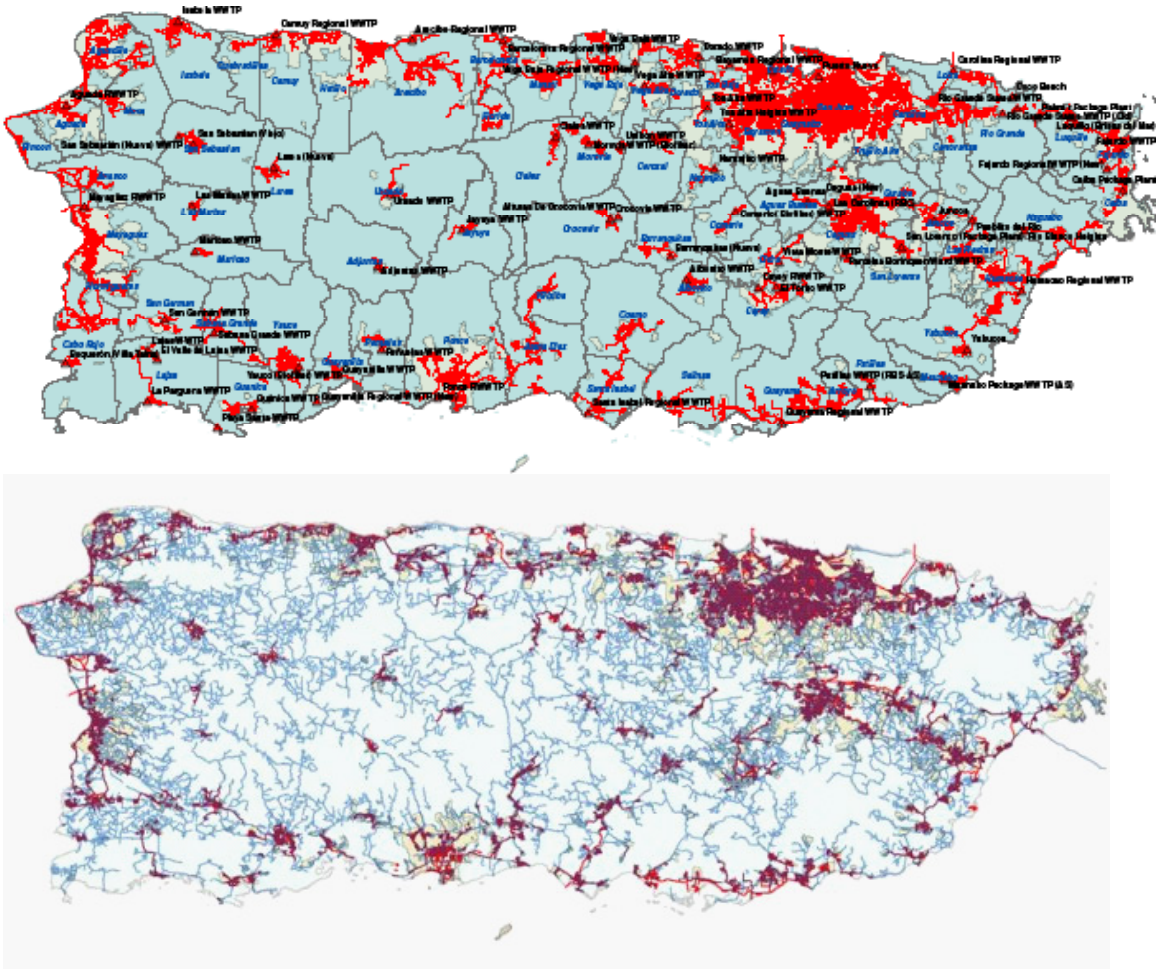
abastos de agua sin necesidad de construir más infraestructura para extraer agua de pozos, ríos o quebradas. Las aguas sanitarias tratadas en plantas de tratamiento secundarias tienen alto contenido de nutrientes y por eso son ideales para su reciclaje en campos agrícolas, campos de golf, humedales, pastizales, dunas de arena, cocales y bosques. Al ser recicladas, estas aguas fertilizan estos sistemas, le proveen agua e infiltran el terreno llegando eventualmente a ríos, quebradas y acuíferos de donde se pueden extraer para ser utilizadas nuevamente. Holanda y los estados de Florida y California en los Estados Unidos utilizan estas técnicas para ahorrar dinero en plantas de tratamiento terciario, evitar los efectos de la eutroficación y aumentar los abastos de agua. Las cantidades de aguas recicladas en Japón, Israel y los Estados Unidos son de 115, 32 y 96 billones de galones (0.44, 0.12 y 0.36 billones m^3) anuales respectivamente.

¿Y en Puerto Rico, hay posibilidades para reciclar? -- En Puerto Rico existen oportunidades reales y prácticas para el reciclar las aguas sanitarias. Por ejemplo, la recarga de los acuíferos, uso en las plantas de la Autoridad de Energía Eléctrica para sustituir las extracciones de agua subterráneas y el uso directo en embalses y cosechas de las aguas tratadas a nivel terciario. Sin embargo, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos no permite otro uso directo en cultivos que no sea yerbas para ganado, y ninguno en comestibles, excepto aguas tericarias bajo un programa de guías de reciclaje que Puerto Rico no ha adoptado. Tampoco permite el uso directo para recargar acuiferos o fuentes de agua potable hasta que no se adopten las guías y normas correspondientes.

¿Qué dilema a largo plazo nos plantean los pozos sépticos? -- El dilema es si conectamos o no a todos los usuarios al sistema de aguas sanitarias de la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados. La gran mayoría de los aproximados 550,000 a 600,000 pozos sépticos en Puerto Rico, son de diseño individual y fueron reglamentados por la Junta de Calidad Ambiental quien sólo reglamenta pozos comerciales, industriales y los comunales que sirven más de 20 residencias. Comenzando en el 2012, la Oficina de Gerencia de Permisos estableció normas parciales para el diseño, construcción e inspección de nuevos pozos sépticos residenciales. Sin embargo, estas reglamentaciones no incluyen los pozos existentes. Si el 90 por ciento de las aguas sanitarias que llegan a los pozos sépticos residenciales se infiltran, la descarga de esos pozos sería 165 millones de galones por día (7.23 m^3/s). Estas aguas son parcialmente tratadas por el suelo y la sedimentación en el pozo y su cantidad es equivalente al 74 por ciento de las aguas sanitarias procesadas por la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados (Tablas 4 y 12). Esto constituye un reciclaje de aguas por medio de la infiltración y el suelo. El grado de purificación depende del tipo de suelo y el tiempo que pasen las aguas subterráneamente antes de entrar en contacto con cuerpos de aguas superficiales o subterráneas.

Para tener una mejor idea del dilema de conexión o no al sistema de la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados de tal número de pozos sépticos, compare el sistema de tuberías de distribución de agua potable que le sirve al 98 por ciento de la población en Puerto Rico (Fig. 68 en azul) con el de tuberías de colección y transporte de aguas sanitarias (en rojo). Las zonas rurales con la topografía más escarpada generalmente no tienen infraestructura para coleccionar aguas sanitarias. Es obvio que conectar a toda la población al sistema de aguas sanitarias costará enormes cantidades de dinero en la construcción de nueva infraestructura y operación del sistema de bombeo y tratamiento de las aguas sanitarias. La alternativa de mejorar el manejo de los pozos sépticos cobra viabilidad y justificación ante el dilema. Más aún, desde el punto de vista hidrológico y ecológico, es posible que la infiltración de agua por áreas extensas del país sea más beneficiosa

Figura 68. Líneas o tuberías para la distribución de agua potable (en azul abajo) y para la colección y transporte de aguas sanitarias (en rojo arriba) en Puerto Rico. La figura de abajo también ilustra las tuberías de aguas saninatarias en rojo.



que su concentración en puntos específicos que incluyen su vertido al mar.

AGUAS DE ESCORRENTÍA

¿Qué es la escorrentía? -- La escorrentía es la lluvia que corre en una capa fina sobre la superficie del terreno formando eventualmente las quebradas y los ríos. Estas aguas transportan partículas o sustancias sobre las superficies por las cuales se mueven. En las áreas naturales, la escorrentía carga nutrientes y sedimentos. En las montañas las escorrentías altas pueden mover rocas de varias toneladas de peso.

¿Cuál es el significado de las aguas de escorrentía urbana? -- Sobre pavimentos y carreteras, la escorrentía carga lo que allí se encuentre: basura, aceites, chatarra, contaminantes, animales muertos, en fin, cualquier cosa que la fuerza de la escorrentía pueda cargar. En la ciudad, las escorrentías extremas pueden arrastrar vehículos, camiones y hasta casas.

¿Cuál es la calidad del agua de las escorrentías? -- Las aguas de escorrentía de ciudades son de baja calidad y su composición química se asemeja al de las aguas sanitarias. La calidad de las aguas de escorrentía de pueblos y ciudades reflejan las condiciones de basura y contaminantes en sus calles y carreteras. Normalmente las aguas de escorrentía van directamente a ríos, quebradas,

lagunas, humedales, estuarios y embalses, lo que causa contaminación de esos cuerpos de agua. En las zonas rurales la escorrentía acarrea fertilizantes, plaguicidas, materia orgánica y otros contaminantes.

¿Cuál es la situación en la zona metropolitana de San Juan con sus aguas de escorrentía? -- En la zona metropolitana de San Juan se generan altos volúmenes de aguas de escorrentía que se vierten directamente a cuerpos de agua naturales tales como ríos, quebradas, la bahía de San Juan y lagunas como la de Corozo o San José, entre otros. Casi el 25 por ciento de San Juan está ubicado bajo el nivel del mar y por lo tanto el Departamento de Recursos Naturales y Ambientales tiene que bombear las aguas de escorrentía continuamente a los cuerpos de agua. Aún cuando no llueve bombean las infiltraciones de agua salada debajo de la ciudad. Periódicamente los sistemas de aguas sanitarias se desbordan sobre las calles y esas aguas se bombean como aguas de escorrentía a los cuerpos de agua.

¿Cómo se manejan las escorrentías para evitar la contaminación y las inundaciones? -- Se debe maximizar la infiltración en áreas pobladas para evitar la contaminación de los cuerpos de agua superficiales. Los suelos actúan como filtros y purifican las aguas de escorrentía que se infiltran. La descarga de aguas de escorrentía a cuerpos de agua naturales y a embalses debe minimizarse por medio del uso de lagunas de retención donde se almacenen temporalmente las aguas de escorrentía. Así, se minimizan las descargas pico, las inundaciones y hay una oportunidad de remover los contaminantes de estas aguas antes de que lleguen a los cuerpos de agua naturales o a los embalses de agua potable. El Reglamento Número 3 de la Junta de Planificación requiere la construcción de lagunas de retención con estos propósitos. Deben diseñarse zonas verdes o zonas de amortiguamento que sirvan de receptores de las aguas de escorrentía antes de que estas lleguen a los ríos y quebradas. Además, el mantener las calles y cunetas limpias evita que los desperdicios lleguen a los cuerpos de agua.

DESPERDICIO DEL AGUA

¿Cómo se desperdicia el agua dulce en Puerto Rico? -- Hay muchas formas para desperdiciar el agua, pero las principales son:

- El agua que pierde la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados en su sistema de distribución. El agua potable no facturada por la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados es el mayor desperdicio de agua en el país pues representa el 61.6 por ciento de toda el agua que se purifica en las plantas de filtración. Esto equivale a unos 398 millones de galones por día (17.43 m^3/s) en pérdida física o pérdida comercial. Si el agua potable no facturada se redujera a lo aceptable para utilidades en América y Europa (a un 25 por ciento en vez de un 61.6 por ciento), la tendría un abasto adicional de 200 millones de galones por día (8.76 m^3/s) en agua real y/o en facturación adicional.
- El agua que se descarga por las plantas de tratamiento regionales de la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados directamente al mar. Una sección de la Ley Federal de Agua Limpia y las reglamentaciones de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, permite a la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados operar seis plantas de tratamiento regionales que procesan las aguas sanitarias de municipios en las regiones norte, oeste y sur, lo que incluye las áreas urbanas de San Juan, Arecibo, Aguadilla y Ponce. Luego de aplicarle un tratamiento primario, el agua de cinco de las plantas se vierte directamente al mar. Solamente el agua de la planta de tratamiento Guayama

(hasta 3 mgd [0.13 m^3/s]) es reusada en la planta de generar electricidad American Energy Systems en Guayama. Esto es una pérdida de agua dulce, pues estas aguas podrían reciclarse y reutilizarse.

- El agua que desperdician las canalizaciones de los ríos y quebradas diseñadas para que cuando llueve mucho el agua fluya rápida y directamente al mar. Esto reduce la infiltración y como consecuencia, cuando no llueve las cuencas hidrográficas tienen menos agua almacenada y los cauces de ríos y quebradas pueden secarse cuando más se necesita el agua.
- El agua que desperdiciamos todos con el uso indebido de las mangueras y al no seguir hábitos de conservación. Por ejemplo, una pérdida de agua en un grifo equivalente a tres gotas por segundo representa un desperdicio de 12,000 litros (3,170 gal) de agua al año.

VALOR Y CONSERVACIÓN DEL AGUA

¿Cuál es el valor del agua en Puerto Rico? -- El agua posee un gran valor intrínseco. En los países o regiones donde carece el recurso, el valor asignado es mayor que en países donde abunda el mismo. La abundancia o escasez del recurso cambia la perspectiva de la evaluación. Como todo recurso natural, al agua se le asigna un precio basado en el costo de procesarla y llevarla a su lugar de consumo. Pero el precio no es idéntico al valor. El agua sostiene toda la vida en el planeta. El valor del agua es por lo tanto incalculable pues sin agua no hay vida.

¿Qué se debe hacer para conservar el agua en Puerto Rico? -- La conservación del agua requiere un esfuerzo coordinado de todos los sectores de la sociedad. El Departamento de Recursos Naturales y Ambientales es responsable de la planificación y manejo del recurso y de la coordinación de las docenas de agencias que afectan al recurso actuando independientemente. El uso adecuado de la tierra y el manejo de los recursos naturales son mecanismos claves en la conservación del agua.

La conservación se puede incentivar por medio del precio del agua y la educación masiva. Agencias como la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados usan el agua gratuitamente y no tienen ningún incentivo para conservarla ya que no hay penalidad por el desperdicio. Estados como California y países como España, Holanda e Israel han logrado enormes beneficios al aumentar sus abastos de agua por medio de programas de conservación, es decir, medidas no estructurales. Un grifo puede ser igualmente efectivo arrojando 11 L/min (2.91 gal/min) o 0.5 L/min (0.13 gal/min); una ducha es igualmente efectiva arrojando 20 L/min (5.28 gal/min) o 10 L/min (2.64 gal/min); un inodoro funciona igual con 20 litro (5.28 gal) por uso o 6 litro (1.59 gal) por uso. El 35 por ciento del consumo de agua potable en un hogar promedio es para actividades externas (lavado de vehículos, otros tipos de lavados, irrigación), seguido por un 23 por ciento en bañera y ducha, 20 por ciento para operar los inodoros, 13 por ciento para lavar ropa, 7 por ciento para cocinar y tomar y 3 por ciento para la limpieza interior. En el lavado de un vehículo se consume cerca de 50 galones (189 L) de agua, cada tanda de lavado de ropa consume entre 35 y 50 galones (134 y 189 L). Apenas el 7 por ciento del consumo doméstico requiere agua potable (cocinar e ingerir). Para el restante 93 por ciento del consumo no se requiere que el agua servida cumpla totalmente con los requerimientos de purificación y desinfección. ¿Cuántos costos podrían ahorrarse de tener que cumplir totalmente con los requerimientos de purificación y desinfección para sólo el 7 por ciento del agua servida (para agua de consumo)? ¿Habría que construir un sistema paralelo de transmisión y distribución para llevar el agua no potable a los clientes?

En el mercado hay varios aditamentos disponibles para reducir el consumo de agua en grifos, duchas e inodoros (Fig. 69). Con la instalación de un aditamento de ducha se puede reducir el consumo promedio de un baño de 26 a 9 galones (98 a 34 L). En adición, existen varias alternativas disponibles para recoger agua de lluvia y utilizarla para actividades de lavado**.** Las soluciones y procedimientos que seleccionemos en el futuro deciden si se conserva o se despilfarra el agua.



Figura 69. Aditamentos que ayudan en la conservación del agua disminuyendo el consumo.

OPINIÓN: LA CONSERVACIÓN PAGA

El agua es un recurso natural no patrimonial que toca todos los aspectos de la vida y economía puertorriqueña. Solo las leyes naturales regulan el comportamiento del agua y estas no contienen excepciones. Los datos presentados en esta *Cartilla* demuestran una y otra vez que el manejo sustentable del agua requiere un enfoque de conservación integrado apoyado en los servicios gratuitos de los recursos naturales. Las consecuencias económicas del mal uso del agua son demasiado contundentes para ignorarlas. La falta de atención a la conservación de los recursos naturales le puede costar mucho dinero e inconveniencias a Puerto Rico. Por lo tanto, la conservación está aliada al desarrollo económico. La conservación paga, ya que ahorra costos a largo plazo y provee seguridad ante las fluctuaciones de la naturaleza. Además, en esta *Cartilla* se han identificado varias vulnerabilidades relacionadas al agua en nuestra sociedad y que por medio de la conservación podríamos minimizar. Por ejemplo, vulnerabilidades a sequías, inundaciones, contaminación del agua, dependencia del petróleo para operar sistemas de bombeo vitales para las áreas urbanas, entre otras. Para mitigar estas vulnerabilidades:

- Fomentar la conservación de agua, tierra, energía y dinero en el país.
- Es necesario cumplir con todas las disposiciones de la Ley de Aguas y profesionalizar y despolitizar el manejo del agua en Puerto Rico.
- La colección de datos hidrológicos y ecológicos debe aumentarse y mantenerse a largo plazo para que tengamos la información necesaria para planificar, notar cambios importantes en el clima o las condiciones hidro-geográficas del país y para evaluar los efectos humanos sobre los cuerpos de agua de Puerto Rico.
- El desarrollo e implementación de un plan integral para el manejo de las aguas cuenca por cuenca, las tierras y la generación de energía para Puerto Rico es esencial para coordinar el desarrollo de la Isla y lograr las metas de sustentabilidad. El desarrollo del plan requiere una participación amplia de la ciudadanía y de todos los sectores de la economía.

AGRADECIMIENTOS

Primera Edición: Este trabajo se llevó a cabo en cooperación con la Universidad de Puerto Rico. Agradecemos la ayuda de Ivelisse Ruiz, Olga Ramos, Carlos Estrada y Julie Hernández del Instituto Internacional de Dasonomía Tropical y las sugerencias al manuscrito de Silvia Amaris Franco, Greg Morris, Ferdinand Quiñones, Fred Scatena, Juan Torres, Beverly Yoshioka y Frank Wadsworth.

Segunda Edición: Este trabajo se llevó a cabo en colaboración con la Universidad de Puerto Rico. Mildred Alayón ayudó en la edición final del manuscrito. Olga Ramos, Sebastián Martinuzzi, Maya Quiñones, Jorge Paniagua y Awilda López Alverio ayudaron con los mapas y figuras. Fred N. Scatena revisó y mejoró el manuscrito.

BIBLIOGRAFÍA[11]

Abelleira Martínez, O., y A. E. Lugo. 2008. Post sugar cane succession in moist alluvial sites in Puerto Rico. Páginas 73-92 *en* R. W. Myster, editor. Post-agricultural succession in the Neotropics. Springer, New York.

Abelleira Martínez, O. J., M. A. Rodríguez, I. Rosario, N. Soto, A. López, y A. E. Lugo. 2010. Structure and species composition of novel forests dominated by an introduced species in northcentral Puerto Rico. New Forests **39**:1-18.

[11]No todos los trabajos que aparecen en esta bibliografía se citan en este escrito, pero se incluyen ya que la información que proveen es consistente con el escrito y ofrece la oportunidad de profundizar en el tópico. Recomendamos la siguiente página cibernética para obtener información sobre el agua en Puerto Rico: http://recursosaguapuertorico.com.

Adams, D. B., y J. M. Hefner. 1999. Puerto Rico wetlands. Páginas 333-338 *en* National Water Summary-wetland resources. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2425.

Autoridad de Acueductos y Alcantarillados. El agua potable de Puerto Rico. Oficina de Comunicaciones Corporativas de la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados, Programa de Educación. 31 p.

Autoridad de Acueductos y Alcantarillados. 1995. North coast superaqueduct. Draft Environmental Impact Statement. 180 p.

Bonnin, G. M., D. Martin, B. Lin, T. Parzybok, M. Yekta, y D. Riley. 2006. Precipitation-frequency atlas of the United States. NOAA Atlas 14, Volume 3, Version 2.0, NOAA, National Weather Service, Silver Spring, Maryland.

Brokaw, N., T. A. Crowl, A. E. Lugo, W. H. McDowell, F. N. Scatena, R. B. Waide, y M. R. Willig, editors. 2012. A Caribbean forest tapestry: the multidimensional nature of disturbance and response. Oxford University Press, New York, NY.

Cherry, G. S., y J. Ramos. 1995. Water wells on Isla de Vieques, Puerto Rico. U.S. Geological Survey Open File Report 95-368. U.S. Geological Survey, San Juan, PR. 34 p.

Clarke, R. 1993. Water: the international crisis. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts. 193 p.

Colón, E. 1984. Mitigation of flooding problems in the Río Puerto Nuevo in San Juan Metropolitan Area. Water Resources in Puerto Rico and the U.S. Virgin Islands **4**:1 y 6.

Colón, J. A. 1987. Algunos aspectos de la climatología de Puerto Rico. Acta Científica 1:55-63.

Colón Dieppa, E., y H. Torres Sierra. 1990. Puerto Rico floods and droughts. National Water Summary 1988-89. U.S. Geological Survey Water Supply Paper 2375 p. 475-482.

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

Daley, C., E. H. Helmer, y M. Quiñones. 2003. Mapping the climate of Puerto Rico, Vieques and Culebra. International Journal of Climatology **23**:1359-1381.

Departamento de Recursos Naturales. 1974. The 1973 water resources assessment for Puerto Rico. Departamento de Recursos Naturales, San Juan, PR. 160 p.

Díaz, P. L., Z. Aquino, C. Figueroa Álamo, R. J. Vachier, y A. V. Sánchez. 1996. Water resources data: Puerto Rico and the U.S. Virgin Islands, water year 1995. U.S. Geological Survey Water Data Report PR-95-1. 535 p.

Díaz, P., y J. Quintero. 1993. Pérdidas de agua en los sistemas fluviales. Revista de la Universidad Politécnica de Puerto Rico 3(**2**):13-64.

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

Emanuelli, I. R. 1980. Ausente el manejo de escorrentía en Puerto Rico. Sexto simposio de los recursos naturales, p. 111-114. Departamento de Recursos Naturales, San Juan, PR.

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

Fundación Puertorriqueña de Conservación. 1996. Compendio de leyes y directorio de organizaciones ambientales de Puerto Rico. Calle O'Neill, Hato Rey, PR.

Ginés Ramos, O. 1999. Estimation of magnitude and frequency of floods for strteams in Puerto Rico: new empirical models. USGS WRI-99-4142, U.S. Geological Survey, San Juan, PR.

Gómez Gómez, F. 1997. Hurricane Hortense impact on ground water in Puerto Rico. U.S. Geological Survey Fact Sheet FS-012-97. 2 p.

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

Guzmán Ríos, S., y F. Quiñones Márquez. 1984. Ground-water quality at selected sites throughout

Puerto Rico, September 1982-July 1983. U.S. Geological Survey Open File Data Report 84-058. U.S. Geological Survey, San Juan, PR.

Guzmán Ríos, S., y F. Quiñones Márquez. 1985. Reconnaissance of trace-organic compounds in ground water throughout Puerto Rico, October 1983. U.S. Geological Survey Open File Data Report 84-810. U.S. Geological Survey, San Juan, PR.

Heartsill Scalley, T., F. N. Scatena, C. Estrada, W. H. McDowell, y A. E. Lugo. 2007. Disturbance and long-term patterns of rainfall and throughfall nutrient fluxes in a subtropical wet forest in Puerto Rico. Journal of Hydrology **333**:472-485.

Hemphill, N., y E. R. García, [sin fecha]. Effects of dams on montane stream ecosystems, communities and populations in Puerto Rico. Manuscrito. Servicio Forestal del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América. Bosque Nacional del Caribe, Palmer, PR.

Joglar, R. L., editor. 2005. Biodiversidad de Puerto Rico. Vertebrados terrestres y ecosistemas. Editorial del Instituto de Cultura Puertorriqueña, San Juan, PR.

Junta de Calidad Ambiental. 1997. Goals and progress of statewide water quality management planning, Puerto Rico 1994-1995. 180 p.

Larsen, M. C. 1997. Tropical geomorphology and geomorphic work: a study of geomorphic processes and sediment and water budgets in montane humid-tropical forested and developed watersheds, Puerto Rico. Tésis doctoral. Universidad de Colorado, Fort Collins, Colorado.

Larsen, M. C., y R. M. T. Webb. 2009. Potential effects of runoff, fluvial sediment, and nutrient discharges on the coral reefs of Puerto Rico. Journal of Coastal Research **25**:189-208.

Leitner, G. F. 1997. U.S. from history to tangible results. D & R Desalination & Water Reuse Quarterly 7(**3**):2.

Leitner, G. F., y F. L. Murney. 1997. U.S. Desalination & membrane softening potable water costs. D & R Desalination & Water Reuse Quarterly 7(**2**):44-51.

Linsley, R. K., M. A. Kohler, y J. L. H. Paulhus. 1982. Hydrology for engineers. McGraw Hill Book Co. New York. 508 p.

Little, E. L., R. O. Woodbury, y F. H. Wadsworth. 1988. Árboles de Puerto Rico y las Islas Vírgenes. Segundo volúmen. USDA Forest Service Agriculture Handbook 449-S. Washington, DC. 1177 p.

Llano, M del. 1988. Inventario de terrenos anegadizos y hábitats de aguas profundas de Puerto Rico. Acta Científica **2**:contraportada.

Lugo, A. E. 1986. Water and the ecosystems of the Luquillo Experimental Forest. USDA Forest Service, Southern Forest Experiment Station General Technical Report SO-63. New Orleans LA. 17 p.

Lugo, A. E. 2005. Los bosques. Páginas 395-548 *en* R. L. Joglar, editor. Biodiversidad de Puerto Rico. Vertebrados terrestres y ecosistemas. Editorial del Instituto de Cultura Puertorriqueña, San Juan, PR.

Lugo, A. E., A. Ramos Álvarez, A. Mercado, D. L. L. Feliciano, G. Cintrón, L. Márquez-D'Acunti, R. Chaparro, J. Fernández-Porto, S. J. Peisch, y J. Rivera Santana. 2004. Cartilla de la zona marítimo-terrestre. Acta Científica **18**:1-148.

Lugo, A. E., y E. Helmer. 2004. Emerging forests on abandoned land: Puerto Rico's new forests. Forest Ecology and Management **190**:145-161.

Lugo, A. E., F. Quiñones Márquez, y P. L. Weaver. 1980. La erosión y sedimentación en Puerto Rico. Caribbean Journal of Science **16**:143-165.

Lugo, A. E., L. Miranda Castro, A. Vale, T. d. M. López, E. Hernández Prieto, A. García Martinó, A. R. Puente Rolón, A. G. Tossas, D. A. McFarlane, T. Miller, A. Rodríguez, J. Lundberg, J. Thomlinson, J. Colón, J. H. Schellekens, O. Ramos, y E. Helmer. 2001. Puerto Rican karst - A vital resource. USDA Forest Service, General Technical Report WO-65, Washington, DC.

Martinuzzi, S., A. E. Lugo, T. J. Brandeis, y E. H. Helmer. 2012. Geographic distribution and level of novelty of Puerto Rican forests. *En* R. J. Hobbs, E. S. Higgs, y C. Hall, editores. Novel Ecosystems: intervening in the new ecological world order? Wiley, Oxford.

Martinuzzi, S., W. A. Gould, A. E. Lugo, y E. Medina. 2009. Conversion and recovery of Puerto Rican mangroves: 200 years of change. Forest Ecology and Management **257**:75-84.

Molina Rivera, W. L. 1996. Puerto Rico water supply program: public supply water use and wastewater disposal during 1990. U.S. Geological Survey Fact sheet FS-098-96. U.S. Geological Survey, San Juan, PR. 3 p.

Molina Rivera, W. L. 1997. Ground-water use from the principal aquifers in Puerto Rico during calendar year 1990. U.S. Geological Survey Fact Sheet FS-188-96. U.S. Geological Survey, San Juan, PR. 3 p.

Molina Rivera, W., y T. Dopazo. 1995. Estimated water use in Puerto Rico, 1986-1987. U.S. Geological Survey Open File Report 95-358. U.S. Geological Survey, San Juan, PR. 31 p.

Monroe, W. H. 1976. The karst landforms of Puerto Rico. Geological Survey Professional Paper 899. U.S. Printing Office, Washington DC. 69 p + mapas.

Morris, G. L. 1986. Controlling reservoir sedimentation: the billion dollar opportunity. Puerto Rico Water Pollution Control Association Anuario 1986:33-37.

Morris, G. L. 1994. Ten concepts on water supply and drought in Puerto Rico. Dimensión, segundo trimestre, p. 7-14.

Morris, G. L., y J. Fan. 1998. Reservoir sedimentation handbook. McGraw Hill, New York.

Morris, G. L., y J. H. Krishna. 1991. Hurricane Hugo and its effects on water supplies in the U.S. Virgin islands and Puerto Rico. Water Resources Research Center, Caribbean Research Institute, University of the Virgin Islands, St. Thomas, VI.

Nathanson, J. A. 1986. Basic environmental technology. Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey. 479 p.

Negrón González, L. 1986. Lagunas de Puerto Rico. Compendio Enciclopédico de los Recursos Naturales de Puerto Rico, volúmen 9. 248 p.

Negrón, L., y G. Cintrón. 1980. Descripción de los componentes físicos, químicos y bióticos de seis estuarios ribereños de la costa norte de Puerto Rico. Sexto simposio de los recursos naturales, p. 55-83. Departamento de Recursos Naturales, San Juan, PR.

Pérez Blair, F. 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. U.S. Geological Survey, San Juan, PR. 25 p + mapas.

Pérez Blair, F., y R. A. Carrasquillo Nieves. 1996. Discharge and water quality of streams in the alluvial valleys in northeastern Puerto Rico, March 1994, Río Espíritu Santo to Río Demajagua area. U.S. Geological Survey Open File Report 95-538. U.S. Geological Survey, San Juan, PR.

Quiñones Aponte, V., F. Gómez Gómez, y R. A. Renken. 1996. 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. U.S. Geological Survey, San Juan, PR. 37 p.

Quiñones, F. 1995. Infraestructura de Puerto Rico. Problemas de abasto y manejo de los recursos de agua de Puerto Rico. Manuscrito sin publicar. 150 páginas + apéndices y figuras.

Quiñones Márquez, F. 1980. Limnology of Lago Loíza, Puerto Rico. U.S. Geological Survey Water Resources Investigations 79-97. U.S. Geological Survey, San Juan, PR. 114 p.

Quiñones, F. 1992. Resumen histórico de los temporales en Puerto Rico, Acta Científica 6(**1-3**):165-170.

Quiñones, F., y J. Alicea Ortíz. 1985. Agua subterránea en Puerto Rico. U.S. Geological Survey Open File Report 85-642. U.S. Geological Survey, San Juan, PR. 6 p.

Quiñones Márquez, F., y S. Guzmán Ríos. 1986. Determinación de caudal y técnicas de muestreo en agua superficial. U.S. Geological Survey WRIR 85-89. U.S. Geological Survey, San Juan, PR. 68 p.

Ramos Ginés, O. 1997. Water balance and quantification of total phosphorus and total nitrogen loads entering and leaving the Lago de Cidra, central Puerto Rico. U.S. Geological Survey Water Resources Investigations Report 96-4222. U.S. Geological Survey, San Juan, PR. 28 p.

Reeburgh, W. S. 1997. Figures summarizing the global cycles of biogeochemically important elements. Bulletin of the Ecological Society of America **78**:260-267.

Rodríguez, J. M. 1996. Characterization of stormwater discharges at the San Isidro Industrial Park,

Canóvanas, Puerto Rico. U.S. Geological Survey Open File Report 96-348. U.S. Geological Survey, San Juan, PR. 17 p.

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

Santiago Rivera, L. 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. U.S. Geological Survey, San Juan, PR. 46 p.

Santiago Rivera, L., y V. Quiñones Aponte. 1995. Hydrology of Laguna Joyuda, Puerto Rico. U.S. Geological Survey Water Resources Investigations Report 93-4135. U.S. Geological Survey, San Juan, PR. 26 p.

Serill, M. S. 1997. Wells running dry. TIME Special issue. November:16-21.

Tilly, L. J. 1983. A review of the trophic state classification of Puerto Rican lakes. Páginas 49-56h *en* Décimo simposio de recursos naturales. Departamento de Recursos Naturales, San Juan, PR.

Torres Díaz, A. 1980. Problemática de los embalses artificales en Puerto Rico. Quinto simposio de los recursos naturales p. 87-102. Departamento de Recursos Naturales, San Juan, PR.

Torres Sierra, H. 1996. Storm-tide elevations caused by Hurricane Hugo on the U.S. Virgin Islands and Puerto Rico, September 18, 1989. U.S. Geological Survey Open File Report 92-87. U.S. Geological Survey, San Juan, PR. 47 p + mapas.

Torres Sierra, H. 1997. Hurricane Hortense impact on surface water in Puerto Rico. U.S. Geological Survey Fact Sheet FS-014-97. U.S. Geological Survey, San Juan, PR. 4 p.

Troester, J. W., y R. T. Richards. 1996. Geochemical properties and saline-water intrusion in the Valle de Yabucoa alluvial aquifer, southeastern Puerto Rico. U.S. Geological Survey Water Resources Investigations Report 96-4188. U.S. Geological Survey, San Juan, PR. 39 p.

Veve, T. D., y B. E. Taggart, editores. 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. U.S. Geological Survey, San Juan, PR.151 p.

Water Resources Research Institute. 1974. Puerto Rico's water resources problems and research needs. Mayaguez, PR. 29 p.

World Resources Institute. 1994. The 1994 environmental almanac. Houghton Mifflin Co., New York. 704 p.

Zack, A., T. Rodríguez Alonso, y A. Román Mas. 1987. Puerto Rico ground water quality. National Water Summary 1986. U.S. Geological Survey Water Supply Paper 2325:437-442.

Apéndice 1. Unidades utilizadas en la Cartilla y factores de conversión. Algunas unidades no se convirtieron a otras o se convirtieron con otros factores representados en este cuadro y por eso no se provee un factor de conversión.

Unidades	Abreviación	Multiplicar por	Resultado
	Métricas		
milímetro	mm	0.03937	pulg
centímetro	cm	0.3937	pulg
metro	m	3.281	p
metro	m	1.094	y
metros por segundo	m/s	3.281	p/s
metro cúbico	m^3	264.2	gal
metro cúbico	m^3	1.308	yd^3
metro cúbico por segundo	m^3/s	22.8244652273	mgd
metro cúbico por segundo	m^3/s	35.31	p^3/s
metro cúbico por año	m^3/a	0.723835616	gal/d
kilómetro	km	0.6214	mi
kilómetro cuadrado	km^2	0.3861	mi^2
hectarea	ha	2.471	ac
litro	L	0.2642	gal
litros por minuto	L/min		
litros por día	L/d		
litros por minuto por centímetro cuadrado	$L/min.cm^2$		
litros por centímetro cuadrado por año	$L/cm^2.año$		
mega gramos	Mg	2,205	lb
microgramos por litro	µg/L		
miligramos por litro	mg/L		
gramos por centímetro cúbico	g/cm^3		
kilogramos	kg		
kilogramos por centímetro cuadrado	kg/cm^2		
kilovatios-hora	k Wh		
grados Centígrados	^oC	(^oC x 9/5) + 32	^oF
	Inglesas		
pulgadas	pulg	2.54	cm
pulgadas	pulg	25.4	mm
pies	p	0.3048	m
pies por segundo	p/s	30.48	cm^3/s
pies cúbicos	p^3	0.02832	m^3
pies cúbicos por segundo	p^3/s	448.831	gal/min
milla	mi	1.609	km
milla cuadrada	mi^2	2.590	km^2
acres	ac	0.4047	ha
acres-pies	ac-p	0.001233489	hm^3
acres-pies por año	ac-p/a	0.001233489	hm^3/a
galones	gal	3.785	L

Apéndice 1. Continuación.

Unidades	Abreviación	Multiplicar por	Resultado
galones	gal	3.785×10^{-3}	m^3
galones por segundo	gal/s		
galones por minuto	gal/min	0.06308	L/s
galones por día	gal/d	4.3806×10^{-5}	L/s
millones de galones por día	mgd	0.0438126365741	m^3/s
galones por minuto por pie cuadrado	gal/min.p^2	40.741	L/min.m^2
galones por pie cúbico por año	gal/p^3.a	133.651	L/m^3.a
yardas cúbicas por año	y^3/a		
onzas	oz		
libras	lb	0.4536	kg
libras por pulgada cuadrada	psi	703.1	kg/m^2
toneladas	ton	1.016	Mg
grados Farenheit	^oF		

Apéndice 2. Abreviaturas y siglas (en orden alfabético) utilizados en la Cartilla. No incluyen abreviaciones de unidades (incluidas en el cuadro 1), de elementos químicos o las abreviaciones de las agencias que sólo ocurren bajo la pregunta ¿Qué agencias intervienen con el agua en Puerto Rico? Algunas siglas se presentan en inglés.

Abreviación	Significado
AAA	Autoridad de Energía Eléctrica
AC	Autoridad de Carreteras
AEE	Autoridad de Energía Eléctrica
AES	American Energy Systems
AFF	Autoridad de Fuentes Fluviales
ANC	Agua potable no contabilizada
ANF	Agua potable no facturada
BUREC	Negociado de Reclamaciones del Departamento de lo Interior de los Estados Unidos de América
BOD	Demanda biológica de oxígeno
COE	Cuerpo de Ingenieros del Ejercito de los Estados Unidos de América
CSP	Comisión de Servicio Público
DRNA	Departamento de Recursos Naturales y Ambientales
DS	Departamento de Salud
EPA	Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América
FEMA	Agencia de Manejo de Emergencias de los Estados Unidos de América
JCA	Junta de Calidad Ambiental
JP	Junta de Planificación
NOAA	Administración Nacional Oceánica y Atmosférica
NPDES	National pollution discharge elimination system
NTU	Nephelometric turbidity units
NWS	Servicio Nacional de Metereología
PAS	Planta de aguas sanitarias
PF	Planta de filtración
PRASA	Puerto Rico Aqueduct and Sewer Authority
PT	Planta de tratamiento
SNM	Sobre el nivel del mar
USGS	Servicio Geológico de los Estados Unidos de América

ÍNDICE

acuíferos: 5; 18; 19; 20; 35-42; Fig. 25; 44; 45; 46; 66; 72; 74; 76; 96; 98; 99; 113; 119; **aluviale**s: 36; 37; **áreas de recarga**: 5; 18; 37; 38; 74; 119; **confinados**: 35; Figura 20; Figura 39; **contaminación**: 40; 41; 42; 66; Figura 24; **costaneros**: 37; Figura 23; **importancia de**: 40; **manto freático**: 42; **menores**: 36; **no confinados**: 35; 36; 37; Figura 20; Figura 23.

aereación: 99; 114.

Agencia Federal para el Manejo de Emergencias de los Estados Unidos (FEMA – Federal Emergency Management Agency): 74; 78; 98.

Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA – Environmental Protection Agency): 66; 68; 85; 98; 115; 118; 119; 121.

agricultura: 50; 72; 83; 84; 85; Figura 47; **agrícola(s)**: 5; 39; 40; 44; 56; 62; 64; 65; 76; 85; 97; 119; Figura 47.

agua:

agencias que intervienen: 98.
almacenaje: 18; 20; **en acuíferos**: 5; 19; Figura 22; **en cuencas hidrográficas**: 76; 82; **en embalses**: 56; 58; **en lagunas**: 44; **en suelos**: 15; 20.
calidad de: Recuadro 1; 21; 22; 32; 37; 44; 48; 49; 65-69; **en los embalses**: 62; 64.
ciclo natural: 5.
conservación de: 4; 5; 32; 65; 95; 97; 98; 113; 115; 122-123; 124; Figura 69.
contadores de: 94.
contaminación de/contaminadas: 22; 28; 66; 69; 71; 72; 81; 104; 109; 114; 115; 116; 118; 120; 121; 124; **en acuíferos**: 37; 40; 41; 42; Figura 24; **embalses**: 62; 65; **estuarios**: 49; **manantiales**: 42; **pozos sépticos**: 42.
cruda: 42; 56; 104; 107; 113; 114.
demanda de: 40; 41; 56; 62; 83-96; 111; 114.
de mar: 28; 37; 47; 48; 49; 66; 83; 111; Figura 23; Figura 29.
desperdicio de: 118; 121-122.
dulce: 18; 37; 40; 44; 47; 48; 49; 50; 52; 66; 70; 81; 82; 111; 112; 115; 118; 121; 122; Figura 23; Figura 29.
extracción de: 5; 33; 36; 65; 71; 83; 84; Figura 45; 85; 86; 97; 99; 104; 107; 109; 119; Figura 22; Figura 60; Tabla 1.
facturada: 87-88; 90; 91; 121; Figura 50.
leyes federales para la protección: 97.
manejo de: 56; 63; 97-99; 118; 119; 124.
potable: 5; 12; 22; 41; 42; 53; 56; 63; 65; 68; 69; 90; 91; 93; 94; 97; 100; 104; 105; 107; 109; 110; 111; 113; 114; 115; 118; 119; 121; 122; Figura 1.5; Figura 56; Figura 59; Figura 68; Tabla 7; Tabla 10; **no facturada**: 90; 91; 121; **no contabilizada**: 90; 93; 94.
precio: 114; 122.
procesada; 114.
purificación de: 44; 69; 81; 99-112; 112; 113; 120; 122.

reglamentos para la protección: 97.
salada/salobre: 6; 37; 40; 44; 47; 48; 49; 121; Figura 23.
subterránea: 5; 6; 18; 24; 35; 40; 42; 83; 86; 113; 119; Figura 20; Figura 23; Figura 48; Tabla 1; Tabla 9.
superficial: 22; 32; 42; 50; 51; 83; 86; 119; 121; Figura 48; Tabla 9.
tarifa: 94; 95; Tabla 7; Tabla 10.
toma de: 70; 99; 107; 109; 111; 114.
tratamiento de: 65; 66; 68; 69; 91; 99; 104; 113; 121; Figura 62; Figura 64; Figura 65.
valor de: 122-123.
vapor de: 5; 8.
volumen: 6; 32; 51; 63; 72; 76; 109; 121; Figura 59.

aguas:
amarillas: 109; Tabla 39.
costaneras: 49; 50; 66; 80; 81.
de escorrentía: 120; 121.
sanitarias: 5; 42; 62; 65; 69; 71; 104; 105; 107; 109; 110; 112; 114-120; 120; 121; Figura 59; Figura 61; Figura 68; Tabla 4; Tabla 12; **servidas**: 114; **usadas**: 5; 224; Figura 66.
tratamiento de aguas sanitarias: 62; 112; 114; 118; Figura 66; Tabla 4; **tratamiento primario**: 114; 116; 121; **tratamiento secundario**: 114-115; 119; Figura 67; **tratamiento terciario**: 115; 118; Figura 67.

American Rivers, **organización**: 83

anoxia: 62.

Atlántico, oscilación: 15.

Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA): 15; 18; 98; 131.

Agencia de los Estados Unidos para la Protección del Ambiente (EPA): 68; 85; 98; 115; 118; 119; 121; 131; 166.

Autoridad de Fuentes Fluviales: 32; 53; 56.

Autoridad de Acueductos y Alcantarillados: 5; 40; 42; 52; 53; 56; 62; 63; 64; 66; 68; 69; 71; 72; 83; 84; 87; 90; 91; 93; 94; 95; 98 99; Foto 8; 103; 104; 107; 109; 111; 112; 114; 116; 118; 119; 121; 122; Figura 38; Figura 50; Figura 51; Figura 52; Figura 62; Figura 63; Foto 8; Tabla 4; Tabla 7; Tabla 8; Tabla 9; Tabla 10; Tabla 12.

Autoridad de Energía Eléctrica: 52; 56; 63; 83; 84; 87; 98; 112; 119.

barreras costeras: 77; Figura 42; 79.

bio-indicadores: 66.

bosques: 37; 45; 50; 52; Figura 31; 56; 65; 69; 72; 76; 97; 105; 115; 119; **noveles**: 50; **nublados**: 45; 47; **primarios**: 50.

canal, canalización: 24; 25; 28; 63; 66; 74; 76; 79-83; 122; Figura 10; Figura 43; Figura 47; Foto 7.

***Caribbean Business**:* 80.

Caribe: 8; 15; 71; Figura 42.

carso (karso), región de: 22; 35; 36; 37; 42; 44; 45; Figura 10; Figura 25.

ciclo hidrológico (ciclo del agua): 4; 5; 8; 28; 52; Figura 1.

clima: 6; 8; Recuadro 1; 14; 15; 20; 52; 71; 124.

coagulación, coagulante: 99; 100; 102; 104; 107; 115.

Comisión de Servicio Público: 98; 112.

condensación: 5; 8; 15; 52.

Congreso de los Estados Unidos: 77.

conservación de agua: 4; 5; 32; 65; 95; 97; 98; 113; 115; 122-123; Figura 69; 124; **de suelos**: 22; 64; 65.

cuencas hidrográficas: 8; 18-22; 33; 36; 28; 33; 45; 50; 58; 64; 65; 69; 76; 79; 82; 83; 97; 122; Figura 8; Recuadro 1.

deforestación: 52; 56; 76.

demanda biológica de oxígeno: 114.

Departamento de Recursos Naturales y Ambientales: 5; 12; 40; 50; 52; 63; 97; 98; 99; 112; 113; 121; 122.

desalinización: 86; 99.

descargas: 5; 15; 19; 31; 32; 33; 41; 42; 44; 48; 62; 65; 121; Figura 9; Figura 14; Figura 29; **industriales**: 41; 85; 109; **sanitarias**: 42; 109.

desinfección: 99; 103; 104; 112; 122.

desprendimiento(s), derrumbes: 15; 56; 65.

dominio público no patrimonial: 4; 112.

dunas: 37; Figura 23; 115; 119.

El Niño: 15.

***El Nuevo Día**:* 76; 82.

El Yunque: 8; 47; 50; 70; 97; 109; 118, Foto 2; Recuadro 1.

embalse(s): 5; 8; 18; 21; 22; 32; 45; 52-65; 66; 68; 70; 71; 72; 83; 84; 99; 100; 102; 104; 107; 109; 110; 111; 113; 118; 119; 121; Figura 8; Figura 18; Figura 32; Figura 33; Figura 55; Foto 1; Fotos 3-6; Tabla 3; Tabla 4; Tabla 5.

energía: 20; 50; 51; 100; 104; 107; 109; 112; 114; 124; Figura 63; Figura 65; **de la escorrentía**: 20; **eléctrica**: 56; 63; **fósil (química)**: 5; **solar**: 5.

erosión: 20; 21; 36; 51; 52; 56; 62; 64; 65; 69; 80; 84; Figura 43.

escorrentía(s): 5; Recuadro 1; 18; 19; 20; 21; 31; 32; 44; 45; 47; 48; 50; 51; 52; 62; 64; 65; 69; 76; 79; 83; 121; Figura 16; Figura 17; Figura 49; Figura 54; Tabla 9.

estomas: 5; 47.

estuario(s): 18; 28; 44; 45; 47; 47-49; 50; 63; 65; 66; Tabla 5; 69; 71; 80; 81; 114; 118; 119.

eutroficación, eutroficar: 62; 66; 118; 119.

evaporación: 5; 8; 18; 19; 20; 30; 40; 47; 51; 52.

fauna: 50; 63; 70; 71; 72; 83.

floculación: 100; 112; Figura 56.

flora: 63; 70; 71; 72; 83.

franquicias: 98; 112; 113.

frentes: 8; 15; 73; 118.

geología: 19; 32; 107; 109.

hidrograma: 32; 50; 76; 81; Figura 18.

humedales: 18; 20; 42; 44; 44-47; 69; 74; 76; 80; 81; 82; 83; 115; 119; 121; Figura 27; Figura 28; Figura 47.

huracán (huracanes): 8; 14; 15; 65; 73; **Georges:** 62; **Hortensia**: 33; 62; 78; 82; **Hugo**: 62; 64; **Katrina**: 81; Figura 41.

infiltración: 5; 19; 20; 24; 37; 51; 52; 65; 76; 82; 83; 119; 121; 122.

intercepción: 5; 51; 52.

intrusión salina: 37; 40; 41; 42; 66; 72.

inundación: 8; 15; 33; 44; 47; 49 50; 51; 56; 63; 73-79; 80; 81; 82; 83; 97; 121; 124; Figura 40; Figura 41; Figura 44; Tabla 6.

Junta de Calidad Ambiental: 65; 66; 69; 85; 97; 98; 119.

Junta de Planificación: 74; 77; Figura 42; 79; 97; 98; 121.

lagunas: 18; 37; 42; 44; 45; 47; 52; 66; 69; 74; 76; 80; 81; 114; 121; Figura 26; Tabla 5.

Ley de Aguas de 1976: 5; 97; 99; 124.

lixiviación, lixiviar: 20; 37; 42; 69.

lluvia(s): 6; 8; 15; 18; 27; 42; 48; 56; 57; 58; 65; 76; 82; 113; **distribución estacional de**: 14; **frecuencia de recurrencia**: 15; Figura 7; **frontales**: 8; 14; **normal**: 12; Figura 4; Figura 6; **orográficas**: 8; **promedio anual**: Figura 4; **variación en**: 15; 31.

lodos: 99; 104; Figura 57.

manglares: 44; 45; 47; 49-50; 97; Figura 27; Figura 30.

manantial(es): 5; 18; 37; 42-44; Figura 25; Tabla 2; **termales**: 42; 44.

meandros: 20; 28; 80; 81; Figura 15; Figura 43.

montañas: 8; 14; 28; 36; 44; 45; 47; 48; 49; 80; 105; 121; Figura 36.

Negociado de Reclamaciones del Departamento de lo Interior de los Estados Unidos: 52; 53; 98.

Nephelometric Turbidity Units (NTU): 99; 109.

ondas tropicales: 14; 17; 74.

orográfico, efecto: 8.

pantano: 18; 44.

pérdidas: 72; 74; 77; 80; 81; 90; 91; 93; 117; Figura 41; Tabla 6.

Plan Integral de Recursos de Agua: 33; 83.

plantas: 7; 15; 20; 47; 51; 66; 72; Foto 6.

plantas:

desalinizadoras: 86; **de filtración**: 56; 66; 68; 91; 99; 100; 102; 103; 104; 105; 106; 107; 109; 110; 111; 113; 118; 121; Figura 54; Figura 56; Figura 58; Figura 59; Figura 62; **hidroeléctricas**: 56; **termoeléctricas**: 40; **de tratamiento**: 65; 115; 119; 121; **sanitarias**: 104; 105; 109; 116; 117; 118; Figura 54; Figura 59; Figura 67. **pozo(s)**: 18; 35; 37; 40; 41; 42; 66; 68; 98; 119; Figura 22; Tabla 2; **artesianos**: 35; Figura 20; **sépticos**: 42; 69; 95; 114; 116; 119.

precipitación: 5; 6; 14; 15; 47; 52; Figura 6; Tabla 39.

presión artesiana: 35.

quebradas: 5; 18; 19; 20; 21; 22-34; 36; 37; 42; 45; 56; 62; 65; 71; 72; 74; 76; 77; 78; 80; 81; 82; 83; 114; 119; 120; 121; 122; Figura 10; Figura 12; Figura 13.

represas: 22; 52; 53; 56; 65; 70; 71; 112; 114; Figura 36; **desborde de, rebasar**: 62; 63; Foto 4.

ríos: 5; 6; 18; 22-35; 37; 48; 50; 51; 52; 56; 57; 62; 63; 65; 68; 70; 71; 73; 76; 79; 80; 81; 99; 100; 102; 104; 107; 109; 110; 111; 113; 117; 118; Recuadro 1; Figura 9; Figura 11; Figura 12; Figura 13; Figura 15; Figura 18; Figura 19; Figura 22; Figura 29; Figura 35; Figura 36; Figura 39; Figura 43; Figura 55; Figura 61; Tabla 3; Tabla 11; **curva de duración de flujo**: 32; Figura 19; **descarga de**: 30; 31; 32; Figura 12; **flujo base**: 27; 32; 52; 81; 109; Figura 14; **flujo de**: 32; **flujo en alta**: 27; **flujos mínimos**: 20; **frecuencia de flujo**: 32; 33; **golpe de**: 28; **velocidad de la corriente**: 32.

roca, rocas, rocosa: 25; 35; 40; 120; Figura 9; **caliza**: 20; 24; 35; 36; 37; 42; **desgaste de**: 20; **formación**: 37; 42; 109; **porosidad de**: 35.

salinización, desalinización: 86; 99; Figura 23.

sedimentos (sedimentación): 15; 20; 21; 22; 28; 47; 49; 51; 52; 56; 57; 58; 62; 64; 65; 68; 69; 74; 80; 81; 83; 84; 99; 100; 102; 104; 109; 114; 119; 120; Figura 9; Figura 34; Figura 35; Tabla 3; Foto 5; Foto 8.

sequía(s): 14; 15; 20; 31; 48; 64; 71-73; 124; Recuadro 1; Figura 6.

Servicio Geológico de los Estados Unidos (US Geological Survey): 99; Figura 10; Figura 21.

Servicio Nacional de Meteorología: 9; 12; 71; Figura 7.

sotavento: 12.

Strahler, sistema de: 24; Figura 12.

Superacueducto (Acueducto de la Costa Norte): 91; 94; 105; 106.

sustancias químicas: 20; 37; 47.

temperatura: 5; 6; 8; 15; 44; 51; 52; 66; 70; Recuadro 1.

topografía: 8; 18; 20; 32; 52; 111; 119.

tormentas: 8; 14; 15; 73; 74.

transpiración: 5; 6; 52.
turbiedad: 66; 68; 69; 99; 107; 109; Figura 55.

turismo: 49; 72.

uso(s) de terreno: 30; 32; 65; 76; 77; 83; 98.

vaguadas: 8; 14; 15; 73.

valles aluviales: 24; 36; 37; 45; 50; 74; 80; 81; Foto 7.

vegetación: 6; 22; 32; 44; 47; 50; 51; 64; 65; 69; 70; 72; 76; 82; 83; 104; Foto 7. *Ver también* "plantas"

vertedero(s): 42; 69; 104.

vientos: 5; 6; 8; Figura 3; 15; 50; **alisios**: 6; 8; 12.

zona metropolitana de San Juan: 69; 71; 72; 73; 74; 106; 109; 118; 121.

Acta Científica

ASOCIACIÓN DE MAESTROS DE CIENCIA DE PUERTO RICO

ACTA CIENTÍFICA is the multidisciplinary journal of the Puerto Rico Science Teachers Association. **ACTA** publishes research papers in any scientific field, i.e. physics, chemistry, biochemistry, botany, zoology, ecology, biomedics, medicine, behavioral psychology, or mathematics. An *article* describes a complete definite study, *Notes* describe a complete project, are shorter, and usually refer to original findings or important modifications of previously described techniques. *Essays* discuss general scientific problems but are not based on original experimental results. *Reviews* discuss the most recent literature on a given subject.

Manuscripts should be sent by email to the Editor at alugo@fs.fed.us, who will submit them for review to a referee in the field of science involved. Acceptance of papers will be based on their scientific content and presentation of material according to **ACTA's** editorial norms. Manuscripts can be presented in English or Spanish. Papers submitted for publication should be concise and appropriate in style and use of abbreviations. Submission of a manuscript implies it has not been published nor is being considered for publication by any other journal. In order to ensure due consideration to each manuscript, authors are advised to consult the following:

INSTRUCTIONS TO AUTHORS

- Manuscripts should be accompanied by a summary in Spanish and an abstract in English, all text should be double-spaced including the literature cited. The title should be informative and short, generally no longer than 12 words; a shorter title (no more than 40 letters) in the paper's original language should be included for use as a running head. Use of keywords to describe the article is recommended. Figures and tables should not be embedded in the text but should be presented as separate files.

- Literature cited should be in the style used in the journal *Ecology*. For the proper sequence and punctuation see examples below. Do not abbreviate journal titles. Examples of how to cite authors in the text based on the list below: Foster 2007; Clark and Tilman 2010; Pardo et al. 2011.

  Journal citation:
  Clark, C. M., and D. Tilman. 2010. Recovery of plant diversity following N cessation: effects of recruitment, litter, and elevated N cycling. Ecology 91:3620–3630.

  Book:
  Sokal, R. R., and F. J. Rohlf. 1995. Biometry: the principle and practice of statistics in biological research. Third edition. W.H. Freeman and Co., New York, New York, USA.

  Book Chapter:
  Hartshorn, G. S., and B. E. Hammel. 1994. Vegetation types and floristic patterns. Pages 73–89 in L. A. McDade, K. S. Bawa, H. A. Hespenheide, and G. S. Hartshorn, editors. La Selva: ecology and natural history of a neotropical rain forest. University of Chicago Press, Chicago, Illinois, USA.

  Government Report:
  Pardo, L. H., M. J. Robin-Abbott, and C. T. Driscoll. 2011. Assessment of Nitrogen deposition effects and empirical critical loads of Nitrogen for ecoregions of the United States. General Technical Report NRS-80. USDA Forest Service, Northern Research Station, South Burlington, Vermont, USA.

  Dissertation:
  Foster, S. E. 2007. The co-occurrence and interactions of large invertebrate predators in relation to the Bythotrephes invasion. Dissertation. University of Toronto at Mississauga, Mississauga, Ontario, Canada.

  Webpage:
  Keeland, B. D., and P. J. Young. 2004. Construction and installation of dendrometer bands for periodic tree-growth measurements. U.S. Geological Survey, National Wetlands Research Center, Lafayette, Louisiana, USA. http://www.nwrc.usgs.gov/Dendrometer/index.htm

  Software:
  SAS Institute. 2009. JMP version 8.0. SAS Institute, Cary, North Carolina, USA.

- Headings:
  ACTA uses primary, secondary and if needed, tertiary headings. See below.
    - Primary headings should be all capital letters, 12 point bold type, centered, e.g. **METHOD**
    - Secondary heading should be upper and lower case, 12 point bold type, centered, e.g. **Description of Study Areas**
    - Tertiary heading should be upper and lower case, 12 point bold type, left justified, e.g. **Mata de Plátano Biological Reserve**

- Figures should have at least 300 dpi resolution.

- Tables should be typed double-spaced, presented on separate pages, numbered consecutively, have a short title, and be precise. Do not repeat the same material in figures and tables.

- Assemble the parts of the manuscript in this order: title page, abstract, text, acknowledgements, literature cited, appendices, tables, figure legends, and figures. Number all pages.

- We recommend authors accompany the manuscript text with a list of all appendices, figures, photos, tables, etc.

- Authors should use the metric system for their measurement. Consult the International System of Units (SI) as a guide in the conversion of measurements. When preparing text and figures, note in particular that SI requires: (1) the use of the terms "mass" or "force" rather than "weight"; (2) when one unit appears in a denominator, use the solidus (e.g. g/m^2); for two or more units in a denominator, use one solidus and a period (e.g. $g/m^2.d$); (3) use the capital "L" as the symbol for litre.

- **ACTA** provides authors with a .pdf of the final version of their article free of cost.

The Editor is responsible for unsigned comments and editorials. The Science Teachers Association of Puerto Rico does not necessarily agree with any opinions expressed in **ACTA** nor do these opinions represent those of any individual member. Readers are cordially invited to make comments by sending letters to the Editor. This journal serves no commercial interest and does not provide economic benefit to its editors.



Tabla de Contenido

Introducción	4
Ciclo Natural del Agua	5
Abundancia y Distribución Natural del Agua	6
Cuencas Hidrográficas	18
Ríos y Quebradas	22
Acuíferos	35
Manantiales	42
Lagunas	44
Humedales	44
Estuarios	47
Manglares	49
Bosques	50
Embalses	52
Calidad del Agua	65
Tomas de Agua	70
Sequías	71
Inundaciones	73
Canalizaciones	79
Demanda de Agua en Puerto Rico	83
Manejo del Agua en Puerto Rico	97
Purificación del Agua	99
Venta del Agua	112
Aguas Sanitarias	114
Aguas de Escorrentía	120
Desperdicio del Agua	121
Valor y Conservación del Agua	122
Opinión: La Conservación Paga	124
Agradecimientos	124
Bibliografía	124
Apéndices	129
Indice	132