

TABLA DE CONTENIDO

6.1	Introducción	1
6.2	Pérdida de sitios para embalses nuevos	1
6.2.1	Situación actual	1
6.2.2	Estrategia	2
6.3	Manejo de la sedimentación en embalses	3
6.3.1	Disponibilidad de datos.....	3
6.3.2	Importancia de los embalses existentes	3
6.3.3	Características de la sedimentación	4
6.3.4	Alternativas para el manejo de la sedimentación	7
6.3.5	Control de la erosión	7
6.3.6	Control de la sedimentación por el manejo hidráulico	10
6.3.7	Manejo de la sedimentación al proveer un volumen mayor.....	12
6.3.8	Manejo de la sedimentación por el dragado de embalses.....	12
6.3.9	Estrategias para manejo de sedimentación en embalses	14
6.4	Sostenibilidad de aguas subterráneas	15
6.4.1	Fuentes de datos.....	15
6.4.2	Explotación del acuífero	17
6.4.3	Contaminación química y orgánica del agua subterránea	22
6.4.4	Áreas de recarga	25
6.4.5	Estrategias para mantener la recarga a los acuíferos	27
6.5	Sostenibilidad de ecosistemas acuáticos	28
6.5.1	Fuentes de datos.....	28
6.5.2	Flujos ambientales.....	29
6.5.3	Sostener rutas migratorias.....	31
6.5.4	Sobrepesca y especies exóticas	35
6.5.5	Estrategias.....	36
6.6	Manejo sostenible de los cauces de los ríos	38
6.6.1	Inestabilidad de riberas.....	38
6.6.2	Limpieza de cauces naturales	40
6.6.3	Estrategias	41
6.7	Contaminación de las aguas superficiales	42
6.7.1	Fuentes de datos.....	42
6.7.2	Calidad de las aguas	42
6.7.3	Estrategias.....	50

6.8	Uso y aprovechamiento eficiente del recurso	51
6.8.1	Alto nivel de agua no-contabilizada en el sistema de la AAA	51
6.8.2	Conservación de agua por los consumidores residenciales	55
6.8.3	Pérdidas en los canales de riego.....	56
6.8.4	Estrategias recomendadas	60
6.9	Manejo de sequía	61
6.9.1	Criterio para iniciar racionamiento	61
6.9.2	Manejo conjunto de fuentes de agua.....	61
6.9.3	Estrategias de manejo	62
6.10	Fuentes de agua no-convencionales.....	63
6.10.1	Reutilización de las aguas sanitarias	63
6.10.2	Desalinación de aguas salinas y salobres	65
6.10.3	Cisternas para recoger agua de lluvia.....	68
6.10.4	Aprovechamiento de aguas contaminadas	69
6.10.5	Estrategias para fuentes no-convencionales	69
6.11	Abasto confiable	69
6.12	Solución de conflictos de usos existentes y potenciales	73
6.13	Uso del terreno	75
6.13.1	Estrategia.....	79
6.14	Riesgos de inundaciones	81

CAPÍTULO 6

DIAGNÓSTICO DE LOS PRINCIPALES FACTORES QUE AFECTAN EL RECURSO

6.1 Introducción

En esta sección se analizan los problemas principales que afectan los recursos de agua en Puerto Rico y cuya solución se considera prioritaria. Cada uno de ellos tiene identificados las estrategias de acción recomendadas. En el Capítulo 7 se presentan políticas públicas y objetivos para cada uno de los problemas identificados. El proceso de identificación de problemas se fundamenta en el ámbito descrito en el Capítulo 2. Puerto Rico se encuentra en el punto en que los sistemas de extracción están afectando adversamente al recurso y a todos los usuarios importantes. Esta situación requiere un mayor esfuerzo de manejo mediante el desarrollo de estrategias de planificación junto a su implantación efectiva.

6.2 Pérdida de sitios para embalses nuevos

6.2.1 Situación actual

El patrón de uso de los terrenos en Puerto Rico, aún en áreas tradicionalmente rurales, está ocupando los lugares adecuados para la construcción de embalses. Se anticipa la necesidad de embalses nuevos en el futuro para atender el aumento en demanda del recurso y también para reemplazar la pérdida de fuentes de agua debido a causas tales como la sedimentación de los embalses existentes y la contaminación de las aguas subterráneas.

La Ilustración 6.1 presenta el área del lago CE-1 propuesto sobre el Río Grande de Manatí en el año 1977 (Black & Veatch, 1977). En el 2002 habían 141 familias viviendo ya en el área del embalse propuesto, y terrenos adicionales en vías de desarrollo.

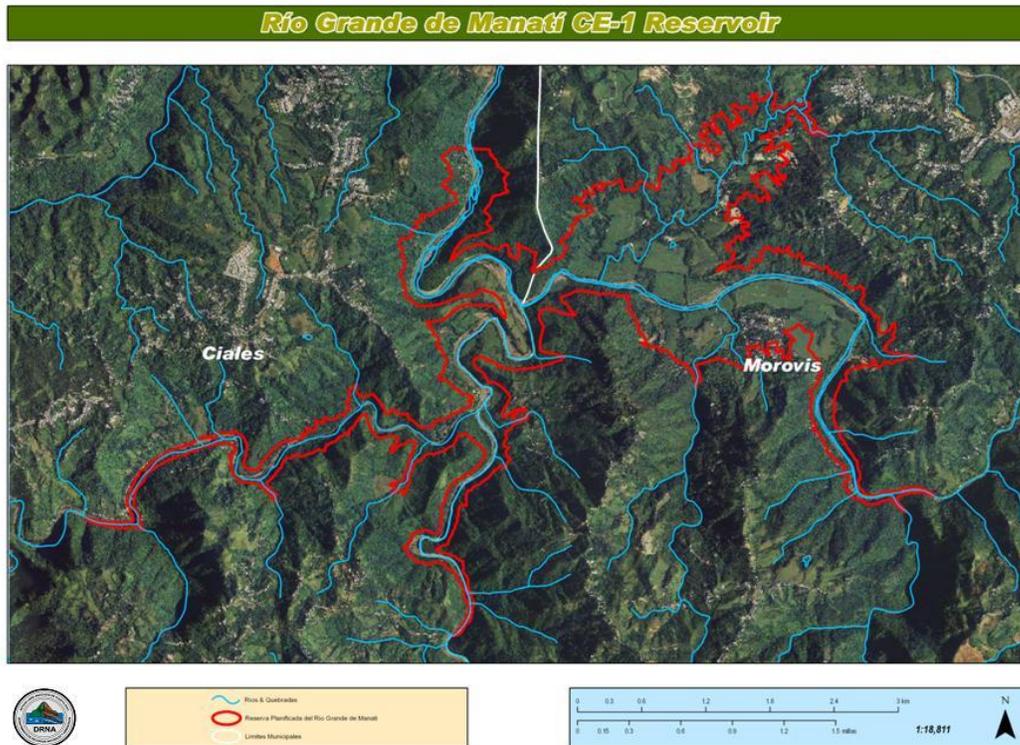


Ilustración 6.1 Foto de 2004 de área propuesta para embalse en el 1977

Luego de un análisis realizado por AFI (Gregory Morris Engineering, 2005) de los mejores lugares disponibles para la construcción de embalses en todo Puerto Rico, se han identificado un número limitado de lugares adecuados para la construcción de embalses nuevos. Hay que proveerle protección para evitar la pérdida de estos sitios únicos como resultado de la construcción de viviendas e infraestructura.

6.2.2 Estrategia

Designar o calificar los terrenos óptimos para la construcción de embalses como áreas de no desarrollo urbano para garantizar su disponibilidad futura.

6.3 Manejo de la sedimentación en embalses

6.3.1 Disponibilidad de datos

Los programas de acopio de datos del USGS, apoyados con fondos del Gobierno Estatal proveen información abundante y confiable sobre la tasa de sedimentación en los embalses y sobre el comportamiento de los ríos en Puerto Rico con respecto a su aporte de sedimento. El rastreo de datos debe continuar en ciertas estaciones, incluyendo la estación del Río Tanamá que ahora cuenta con datos de la concentración y aporte de sedimentación desde el año 1968 y es la estación de sedimentos con el periodo de colección de datos de mayor duración en el Caribe. Otras estaciones importantes que miden tasa de sedimentación incluyen aquellas asociadas con embalses propuestos y ciertos embalses existentes¹.

6.3.2 Importancia de los embalses existentes



Los embalses son la fuente principal de agua en Puerto Rico. Durante el 2004 los embalses aportaron 370 mgd de agua cruda a las plantas de filtración operadas por la AAA y más de 32 mgd para propósitos agrícolas a través de los sistemas de riego operados por la AEE. En conjunto, su producción representó el 55 por ciento del agua dulce extraída en la Isla.

La disminución en la capacidad de los embalses a consecuencia de la sedimentación reduce gradualmente su rendimiento seguro. La Ilustración 3.4 (véase Capítulo 3) representa la relación de rendimiento seguro y volumen de almacenaje para el Embalse La Plata en Toa Alta. El patrón de la curva para el Embalse La Plata es típico de los embalses en Puerto Rico.

¹ Estos datos están disponibles en el portal de Internet del USGS (<http://nwis.waterdata.usgs.gov/pr/nwis>).

6.3.3 Características de la sedimentación

La combinación de suelos empinados, lluvias intensas y la utilización extensa de terrenos hacen que las tasas de erosión y sedimentación sean muy altas en Puerto Rico en comparación con la mayoría de las áreas del mundo. Los ríos transportan los sedimentos erosionados hacia los embalses donde son atrapados. Todos los embalses de la Isla están perdiendo su capacidad de almacenaje debido al proceso de sedimentación, pero existe mucha variación en las tasas de sedimentación de un embalse a otro.

La Ilustración 6.2 presenta un estimado de la capacidad de almacenaje remanente de las principales represas del País. Un ejemplo de un embalse totalmente sedimentado es el Embalse Coamo, cuya sedimentación continúa aún después de haber perdido toda su capacidad y ahora acumula sedimentos por encima del nivel de su vertedero hidráulico (véase Ilustración 6.3).

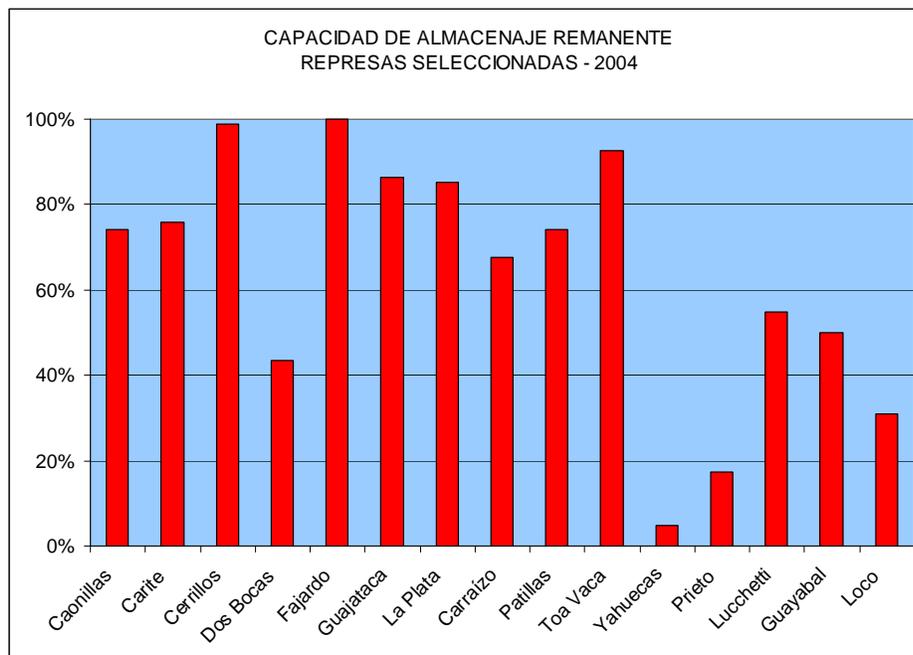


Ilustración 6.2 Gráfica de capacidad de almacenaje remanente. Carraízo fue dragado en el año 1997



Ilustración 6.3 Embalse Coamo, vista desde la PR-52

Entre los embalses más avanzados en el proceso de sedimentación se encuentran los de Carraízo (dragado en 1997) y Dos Bocas, principales fuentes de abasto del Área Metropolitana; el embalse de riego de Guayabal; y cuatro de los integrantes del Sistema de Riego del Valle de Lajas: Loco, Luchetti, Prieto y Yahuecas. El embalse hidroeléctrico en el Río Blanco, ubicado en el Bosque Nacional El Yunque, se llenó totalmente de sedimentos generados por un deslizamiento a consecuencia de las lluvias asociadas al paso de los huracanes David y Federico en el año 1979. Los sedimentos de los embalses Yahuecas, Prieto y Río Blanco fueron removidos alrededor del año 1982, mediante un trabajo apoyado con fondos de FEMA, reestableciendo la capacidad de almacenaje de éstos.

La erosión y generación de sedimentos es un proceso natural y depende de factores tales como la intensidad de la precipitación, la resistencia de los suelos y la pendiente o grado de inclinación del terreno. La erosión se acelera por las actividades del ser humano como la remoción de la capa vegetal y el movimiento de los terrenos.

La mayor parte de los sedimentos son erosionados y transportados hacia los embalses por eventos extremos de lluvia como son las vaguadas y huracanes. Se presenta como un ejemplo la Ilustración 6.4, la cual demuestra el transporte acumulativo de sedimentos durante 8 años por el Río Valenciano, según el muestreo de la estación de aforo del USGS. Sólomente 5 días contribuyeron el 50% del aporte de la totalidad de los sedimentos durante el periodo de los 8 años señalados en la gráfica. Durante este mismo periodo, los 2,855 días de menor aporte (7.8 de los 8.0 años) contribuyeron solamente el 10% de la carga total de sedimentos. Esto demuestra que el control de la sedimentación depende necesariamente del manejo exitoso de los eventos de las crecidas mayores.

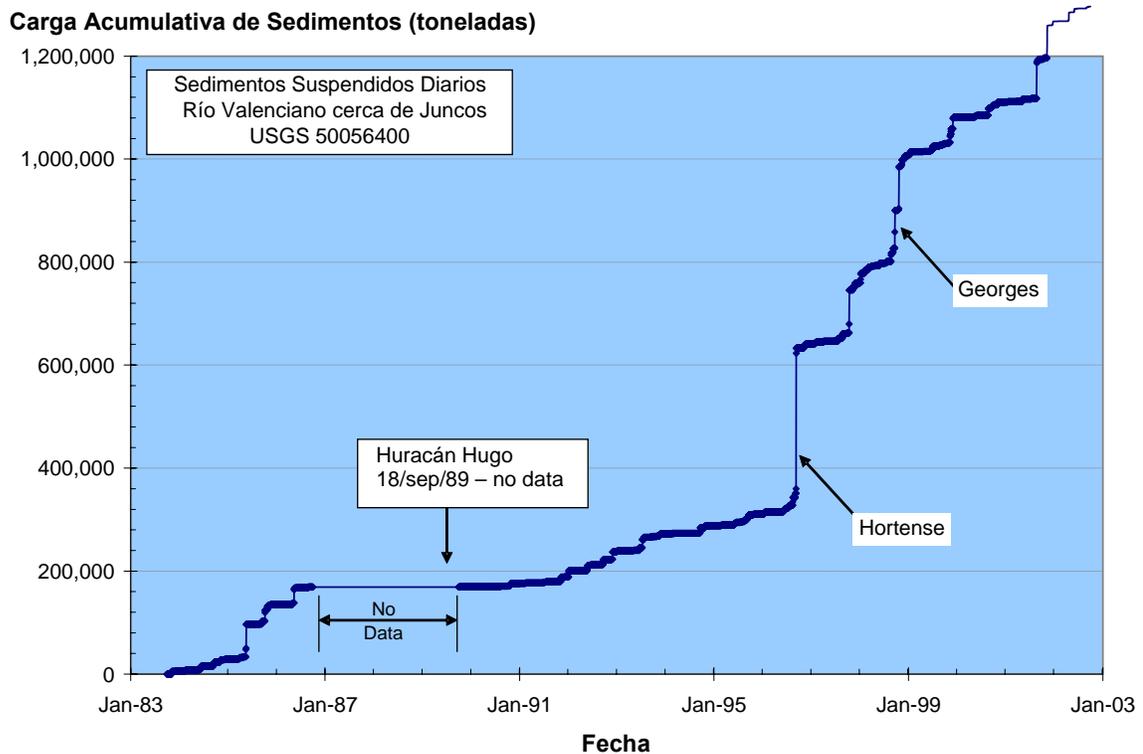
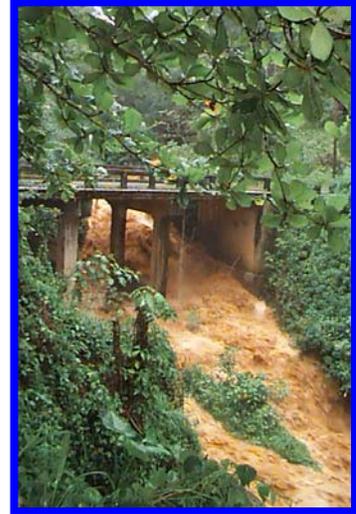


Ilustración 6.4 Gráfica de aporte diario de sedimentos por el Río Valenciano durante ocho años señalando la importancia de los eventos de lluvia extraordinaria. Fuente de datos: USGS

6.3.4 Alternativas para el manejo de la sedimentación

Hay muchas limitaciones para la construcción de embalses futuros en términos de la disponibilidad de terrenos y el costo de su desarrollo, razón por lo cual es esencial establecer técnicas que permitan mantener operacionales los principales embalses del País. Se pueden considerar cuatro estrategias básicas para el manejo de sedimentos: (1) reducción en el aporte de sedimentos mediante el control de la erosión, (2) manejo hidráulico de los embalses para minimizar la entrada o depósito de sedimentos, (3) aumentar el volumen del embalse y (4) remoción de los sedimentos mediante dragado².



6.3.5 Control de la erosión

El control de la erosión no solamente es una estrategia para reducir las tasas de sedimentación en los embalses, sino también para obtener la producción máxima sostenible del suelo, reducir las pérdidas de nutrientes de los suelos agrícolas y evitar la contaminación de los cuerpos de agua dulce y las aguas y ecosistemas costeros. Una cubierta vegetal buena es la mejor manera de reducir la erosión, pero eventos de lluvias extraordinarios generan deslizamientos y altas tasas de erosión aún en áreas de bosques. En general, las prácticas de conservación y manejo de suelos prevalecientes en la Isla son deficientes tanto en su diseño como en su implantación, particularmente en el sector de la construcción. En las áreas de producción de cultivos agrícolas en laderas y en lugares de construcción, las medidas de control de erosión no resisten los eventos de lluvia extremos, cuando típicamente fallan métodos como verjas de geotextil (“silt fence”) y pacas de heno. La técnica más útil y confiable de control es una charca de sedimentación con un vertedero construido para resistir el flujo asociado con una lluvia extrema.

² En Morris y Fan (1998) se presentan en mayor detalle los procesos de sedimentación y las opciones para su manejo.

Las medidas de control de erosión pueden reducir el aporte de sedimentos, a consecuencia de los eventos “normales” pero para las lluvias extremas no son tan efectivas como el manejo hidráulico para evitar la sedimentación de los embalses. No hay indicaciones claras de que la reforestación u otras técnicas de control de erosión pueden ser efectivas en reducir el aporte de sedimentos a nivel de una cuenca entera. Un ejemplo de esto es el caso de la cuenca aguas arriba del embalse Dos Bocas. A pesar de que la mayoría de las actividades agrícolas cesaron y las fincas abandonadas se reforestaron por procesos naturales, desde su construcción en el 1942 hasta el 2005, la tasa de acumulación de sedimentos en el Embalse Dos Bocas no ha disminuido (Soler-López, 2007). Sin embargo, las medidas de manejo de erosión en las cuencas pueden ser muy importantes para mejorar la calidad del agua y reducir el aporte de sedimentos en eventos comunes o de menor severidad, particularmente en terrenos perturbados por actividades de construcción.

La Ilustración 6.5 presenta el resultado de un esfuerzo realizado entre el DRNA y la Oficina del Plan de Uso de Terrenos de la Junta de Planificación donde se identifican las zonas de mayor importancia hídrica. El análisis realizado integra aspectos sobre intensidad de precipitación, pendientes de terrenos, tipos de suelo, zonas de recarga de acuíferos y uso de terreno para desarrollar un índice a través del cual se identifican áreas geográficas prioritarias que se recomienda se protejan.

En las áreas identificadas aguas arriba de embalses las acciones deben enfocarse en las actividades de control del uso de terrenos para maximizar la cobertura vegetal y asegurar la estricta implantación de medidas para el control de erosión y sedimentación en los sitios donde hay movimiento de tierra. Los programas de control de erosión y sedimentación administrados por la JCA y la EPA son claves para el control de la erosión en lugares de construcción. El control del uso de terrenos en los suelos clasificados de mayor riesgo o aguas arriba de los embalses es una tarea que compete a la JP y los municipios. En estas zonas, las construcciones que se aprueben deberán cumplir con criterios y condiciones particulares.

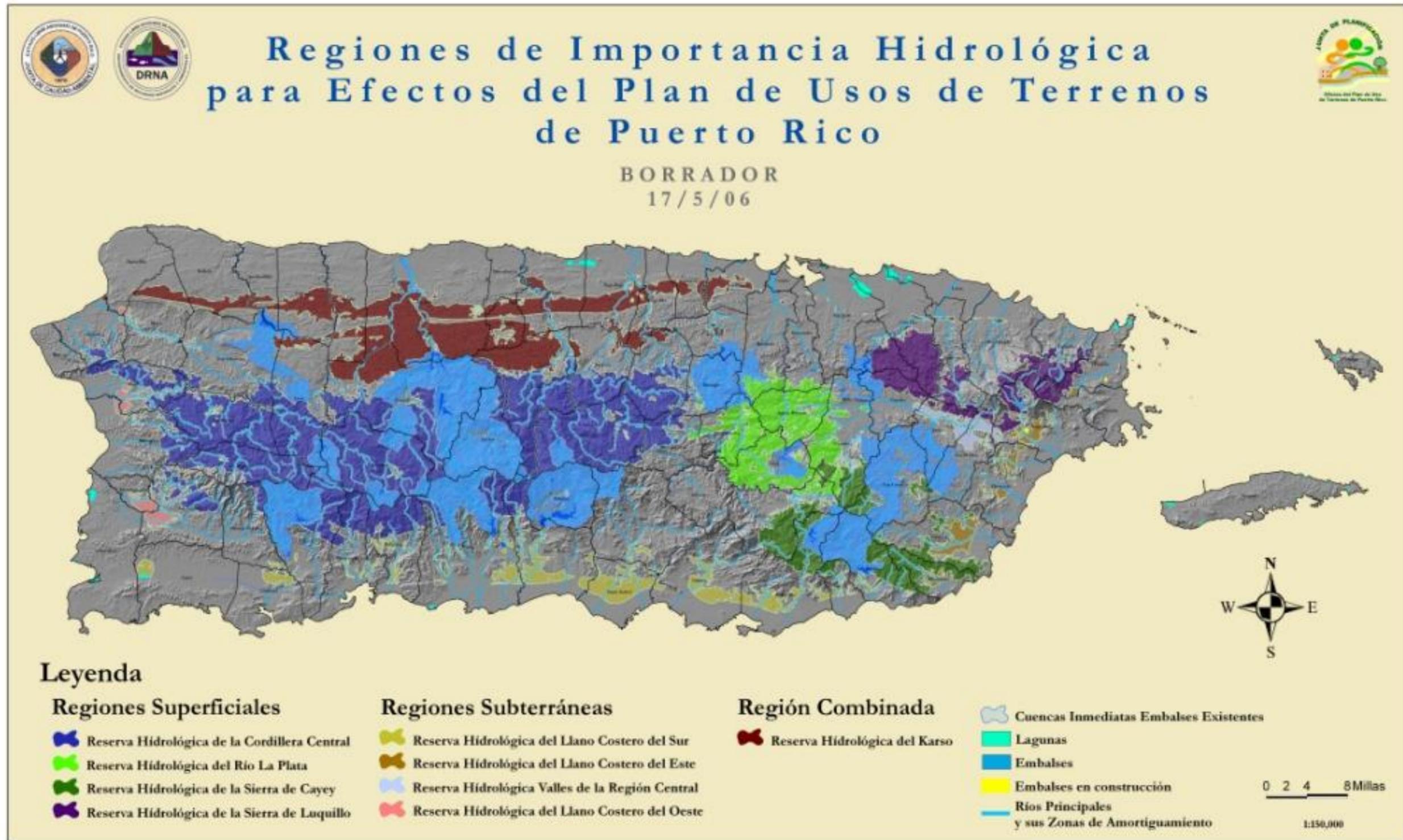


Ilustración 6.5 Reservas hídricas de Puerto Rico

6.3.6 Control de la sedimentación por el manejo hidráulico

El manejo hidráulico de los flujos de crecidas es una estrategia que puede ser altamente efectiva en la reducción de la tasa de sedimentación de embalses. Esta estrategia es importante no solamente por su eficiencia técnica, sino porque también puede lograr muy buenos resultados sin depender de cambios en el uso de terrenos o buscar sitios para la disposición de sedimentos removidos por el dragado.

La estrategia de control hidráulico en Puerto Rico se enfoca en dos alternativas. La primera es la de construir los embalses nuevos fuera del cauce para minimizar la entrada de sedimentos hacia los embalses. El embalse fuera de cauce se llena mediante una línea de aducción desde el río. La



Ilustración 6.6 presenta la diferencia entre un embalse dentro del cauce y uno fuera de cauce. En el caso de una crecida extraordinaria tanto el flujo de la crecida como su carga de sedimentos, sigue aguas abajo a lo largo del río y no entra al embalse. Las simulaciones llevadas a cabo por Morris (1997) para el diseño de los embalses de Río Fajardo y Río Blanco indican que las aguas de las crecidas grandes no son necesarias para sostener el rendimiento seguro del embalse y que esta estrategia puede reducir en más del 90 por ciento la entrada de sedimentos en comparación con un embalse convencional en el mismo río. Los embalses nuevos en el Río Fajardo y en el Río Blanco y el embalse propuesto en la Quebrada Beatriz en Caguas son embalses fuera de los cauces abastecidos por gravedad. Este diseño fue desarrollado en Puerto Rico para las condiciones particulares de la Isla.

La segunda estrategia hidráulica es manejar las compuertas de una represa convencional para que las aguas de crecidas con su carga de sólidos en suspensión pasen a través del embalse con la mayor velocidad posible para así minimizar el depósito de sedimentos. Diferente a las técnicas de control de erosión

que tienden a perder efectividad según aumenta la magnitud del evento climatológico, la eficiencia del control hidráulico aumenta de acuerdo a la magnitud del evento.

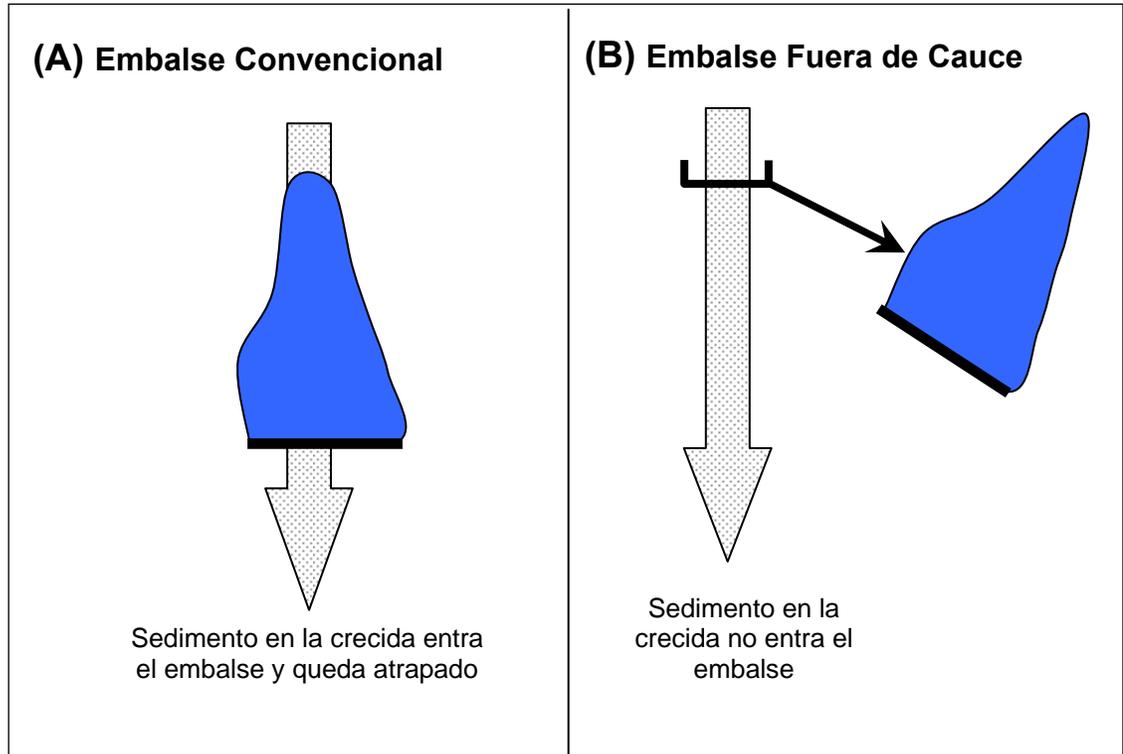


Ilustración 6.6 Diferencia conceptual entre: (A) embalse convencional y (B) embalse fuera de cauce. El embalse fuera de cauce se alimenta por una toma en el río y tubería de aducción, cuya capacidad hidráulica es típicamente menos del 1% del flujo de la crecida, lo cual evita que una fracción significativa del sedimento de la crecida entre al embalse. En contraste, todo el sedimento entra al embalse convencional y más del 90% del sedimento queda atrapado en éste.

Podría ser útil el propuesto embalse en el Río Valenciano, actualmente en diseño pero aún sin analizar esta opción. Las crecidas grandes que aportan la mayor parte de los sedimentos traen volúmenes de agua mucho mayor que la capacidad del embalse. Por ejemplo, la descarga del huracán Hortense fue suficiente para llenar el Embalse Carraízo 17 veces en un sólo día. Dado el volumen excesivo de agua que traen los eventos grandes, en vez de mantener el embalse a un nivel alto durante las crecidas grandes como es la práctica actual (lo que maximiza la tasa de sedimentación), se podría pasar esta agua a través del embalse a una velocidad de flujo mayor mediante la operación óptima de las compuertas. La generación de velocidades altas a lo largo del embalse minimiza la tasa de sedimentación. Esta

estrategia es viable en el Embalse Carraízo cuyas compuertas existentes, con una profundidad de 10 metros (33 pies), controlan casi la totalidad del volumen de almacenaje.

Aunque se implanten medidas hidráulicas para el control de la sedimentación en los embalses, aún habrá una acumulación y el dragado será requerido eventualmente. Sin embargo, si se reduce sustancialmente la frecuencia y volumen de dragado, el manejo hidráulico habrá logrado su propósito de manera efectiva. Por ejemplo, en el caso de los dos embalses fuera del cauce de Río Fajardo y Río Blanco (Naguabo), no se anticipa un dragado durante los próximos 200 años y el volumen de dragado será muy reducido en comparación al dragado ya ejecutado en Carraízo, el cual se tendrá que repetir cada 20 años para mantener su capacidad.

6.3.7 Manejo de la sedimentación al proveer un volumen mayor

Aumentar el volumen de un embalse tiene el objetivo de proveer más espacio para los sedimentos de manera que se alargue el periodo que tomaría en perder su capacidad útil. Esta estrategia es, esencialmente, una que pospone el problema de la sedimentación para una generación futura. Esta estrategia generalmente no es práctica en Puerto Rico debido a que las limitaciones de terreno restringen el tamaño de los embalses, y el rendimiento de sedimentos de muchas cuencas es tan alto que aún embalses grandes podrían llenarse de sedimentos. Sin embargo, en el caso de Dos Bocas, la instalación de compuertas para subir el nivel normal del embalse es una alternativa. Este incremento en volumen aumenta su capacidad y pospone la pérdida de capacidad producto de la sedimentación. El Embalse Dos Bocas fue diseñado y construido para esa eventualidad.

6.3.8 Manejo de la sedimentación por el dragado de embalses

Frecuentemente se habla del dragado como la solución al problema de la sedimentación de los embalses. En el 1998 se llevó a cabo el dragado del Embalse Carraízo removiendo 6 Mm³ de sedimento a un costo de unos \$60 millones. Esto equivale a un costo unitario de \$12,300/AP (\$10/m³). A una tasa de inflación de

costos de construcción de 5 por ciento al año, esto equivale a aproximadamente \$18,500/AP (\$15/m³) en el 2006. A la tasa de sedimentación actual (275 acre-pie/año) va a ser necesario dragar el Embalse Carraízo cada 20 años (véase Ilustración 6.7). La Tabla 6.1 presenta el cálculo del costo anual de la remoción para mantener la capacidad actual de los embalses cuya condición se considera más crítica. Las limitaciones de dragado no se limitan al costo, sino también al problema de disposición de los sedimentos. Por ejemplo, para mantener la capacidad del Embalse Carraízo será necesario repetir el dragado llevado a cabo en el 1997, cada 20 años. Esto implica la disposición de 30 Mm³ de sedimentos dragados durante el siglo 21, un volumen mayor que la capacidad original del embalse (26.8 Mm³ en 1953). En ausencia de identificar sitios adecuados para la disposición de sedimentos, no se puede considerar el dragado como una medida sostenible para mantener la capacidad de los embalses.

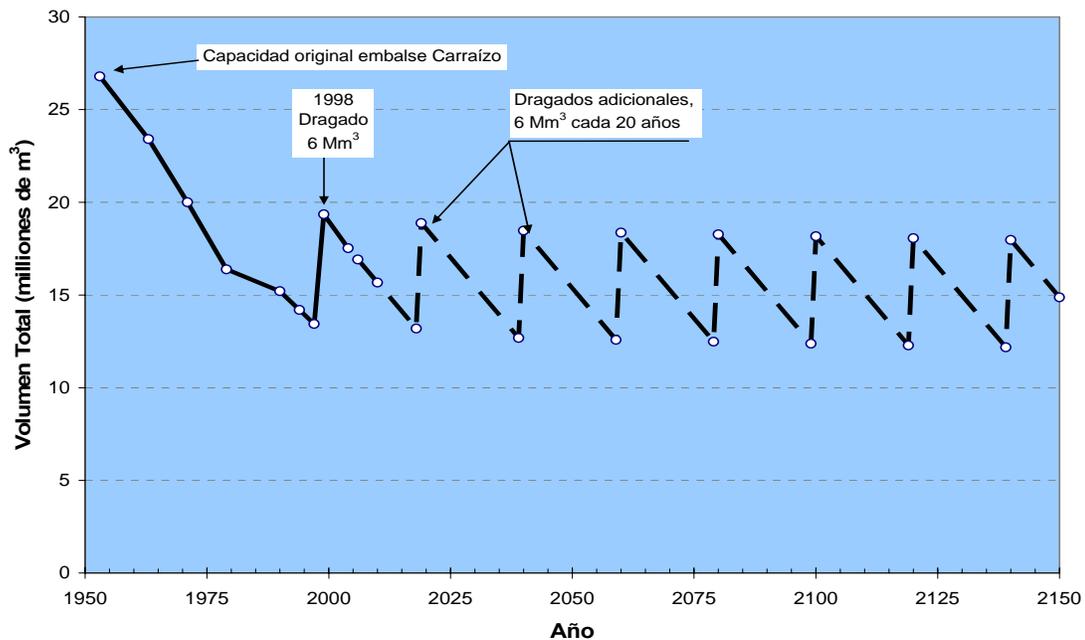


Ilustración 6.7 Historial de la pérdida de capacidad del Embalse Carraízo y la necesidad de dragado para mantener capacidad bajo su operación actual. Al presente, no hay sitios designados que tengan la capacidad para recibir, por lo menos, el volumen que generará el próximo dragado programado para cerca del año 2020.

Un ejemplo de las limitaciones que tiene el dragado se presenta en el caso del Embalse Dos Bocas. Construido en 1942, este embalse ya ha perdido el 56 por

ciento de su capacidad y el único sitio apto para la disposición de sus sedimentos es mar afuera. La disposición en el área del Carso o en el Caño Tiburones no es una alternativa ambientalmente aceptable y los terrenos aguas abajo de la represa en el valle del Río Grande de Arecibo están zonificados como cauce mayor (área inundable donde no se permite el depósito de relleno) o ya están ocupados por usos urbanos.

Tabla 6.1 Costo anual de remoción de sedimento con un costo de dragado de \$15/m³

Embalse	Tasa de Sedimentación		Costo Anual de Dragado (\$M)
	AP/año	M ³ /año	
Carraízo	256	0.316	4.7
La Plata	162	0.20	3.0
Caonillas	208	0.257	3.9
Loco	25	0.031	0.5
Dos Bocas	276	0.340	5.1
Lucchetti	146	0.180	2.7
Toa Vaca	<u>131</u>	<u>0.162</u>	<u>2.4</u>
Total	1,204	1.486	22.3

6.3.9 Estrategias para manejo de sedimentación en embalses

Las siguientes actividades son recomendables para mantener los embalses como fuentes sostenibles del recurso agua.

- Diseñar embalses nuevos fuera del cauce o con estructuras que puedan proveer una media vida mayor de 250 años.
- Iniciar investigaciones sobre la manera de minimizar las tasas de sedimentación en los embalses principales, con énfasis particular en obras de manejo hidráulico.
- Implantar medidas de control de erosión.
- Identificar estrategias para el manejo de la sedimentación a largo plazo, incluyendo la identificación de sitios para disponer del volumen de sedimentos estimados para cualquier obra de dragado anticipada.

6.4 Sostenibilidad de aguas subterráneas

Los acuíferos representan la fuente de agua más económica en Puerto Rico, ya que pueden producir agua de calidad potable en las mismas áreas de demanda con simplemente hincar un pozo y activar una bomba. Sin embargo, los recursos subterráneos no se están explotando de una manera sostenible, lo que resulta en problemas debido a la intrusión salina y la contaminación de sus zonas de recarga según se describe en esta sección.

6.4.1 Fuentes de datos

El nivel de conocimiento de las condiciones en los acuíferos y los usos del agua subterránea depende de la cantidad y calidad de los datos, y éstos tienen limitaciones importantes.

Datos de niveles potenciométricos. Los niveles en los acuíferos pueden subir significativamente en años con mucha lluvia y recarga y bajar en años secos o con mucho bombeo. Un ejemplo de las variaciones en los niveles del acuífero en el área de Santa Isabel se presenta en la Ilustración 6.8. Se requiere de datos tomados regularmente durante muchos años para poder interpretar correctamente las condiciones hidrológicas de un acuífero. A pesar de que el USGS cuenta con datos de rastreo de 2,400 pozos, la gran mayoría es de periodos de récord muy cortos o los datos publicados son insuficientes para hacer una interpretación confiable. Mientras existen un número de estaciones superficiales con datos diarios continuos de más de 40 años, datos similares no están disponibles sobre los pozos para el análisis de los acuíferos.

Datos de calidad del agua. Gran parte de los datos de calidad de agua subterránea se toman solamente en pozos de la red de agua potable. Una vez un pozo queda contaminado y se elimina de la red, ya no se informa la calidad del agua. Como consecuencia, el acopio de datos de calidad se enfoca en los sectores de los acuíferos aún con agua de buena calidad, lo cual no necesariamente refleja

la condición del acuífero en su totalidad, y por ende la magnitud del problema de contaminación.

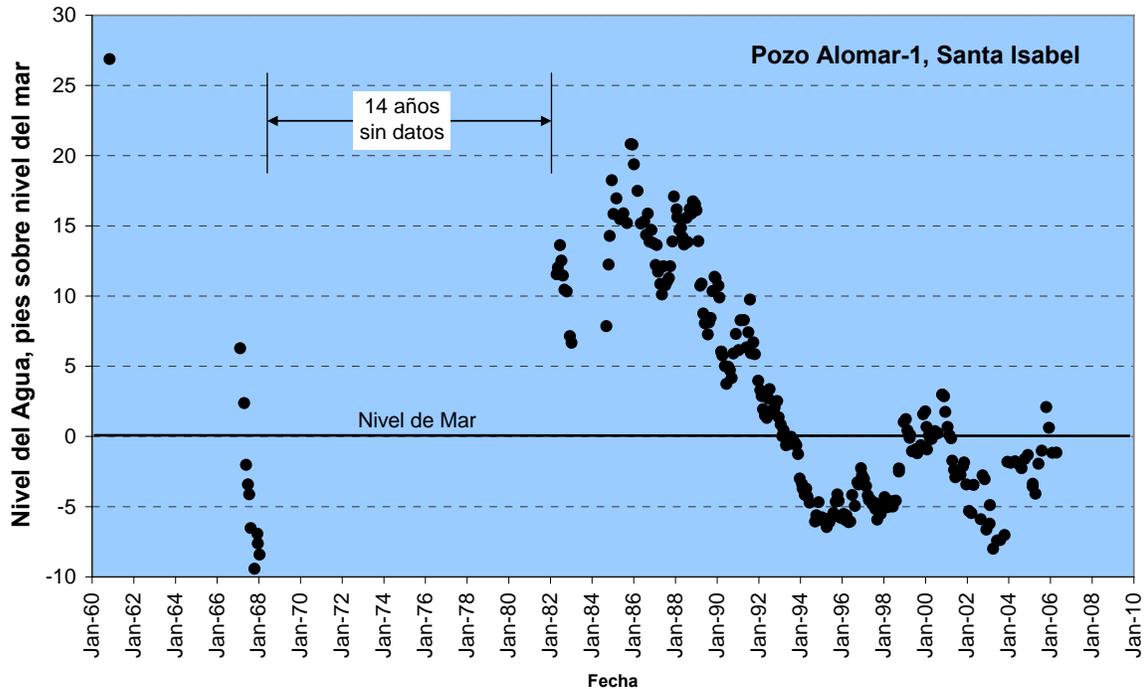


Ilustración 6.8 Niveles en el acuífero de Santa Isabel

Tasa de extracción. Información sobre la tasa de extracción por pozos es, en general, muy deficiente. El único sector con buena calidad de datos y que rinde informes de producción puntualmente es el sector industrial, lo cual representa una fracción menor de la extracción total. Los sectores de mayor importancia son los pozos de la AAA y los pozos de riego. En ausencia de datos de cambios en la tasa de extracción, no es posible interpretar, de forma confiable, las razones para las variaciones en los niveles de agua observados dentro de los acuíferos.

Estrategias para mejorar la disponibilidad de datos. Para maximizar la tasa de extracción sostenible de los acuíferos, las acciones deben enfocarse en las siguientes estrategias referentes a la recopilación y disponibilidad de datos hidrológicos del agua subterránea. Se debe establecer una red de pozos de rastreo permanente y a largo plazo. La red debe consistir de pozos de observación del

nivel freático, combinado con pozos para observar las variaciones en la localización del frente de agua salina dentro de los acuíferos costeros. Además, debe incluir el acopio de datos de calidad como parte de la red permanente. Los datos de extracción de los pozos de la AAA deben ser informados mensualmente, con datos confiables y con una demora de no más de 60 días.

6.4.2 Explotación del acuífero

Intrusión salina. En Puerto Rico los acuíferos más productivos están ubicados en la costa. El agua dulce en el acuífero fluye desde las zonas de recarga en dirección hacia la costa, hasta los sitios donde se descarga por el fondo de los ríos, por manantiales y por filtración a través del



fondo del mar. En la cercanía de la costa las formaciones permeables que constituyen los acuíferos contienen tanto agua salada como agua dulce. Como el agua dulce es menos densa que el agua salada, ésta “flota” encima del agua salada, produciendo la condición que se muestra en la Ilustración 6.9A. El agua dulce ocupa la parte superior del acuífero y el agua salada se encuentra a una profundidad mayor. Esta condición es natural en acuíferos costeros en todo el mundo. La localización de la interfase entre el agua dulce y el agua salobre depende del flujo del agua dulce y la conductividad hidráulica de la formación.

La explotación del acuífero reduce el flujo de agua dulce hacia el mar y ocasiona que la interfase entre agua salina y agua dulce avance tierra adentro y hacia niveles superiores en el acuífero. Este avance del agua salada puede entrar a pozos activos y así inutilizar partes del acuífero debido a la contaminación con sal, según se ejemplifica en la Ilustración 6.9B. Una concentración de solamente un por ciento de agua salada, mezclada con el agua dulce en un acuífero, es suficiente para sobrepasar el límite de 500 mg/l de sólidos totales disueltos permitido en el agua potable.

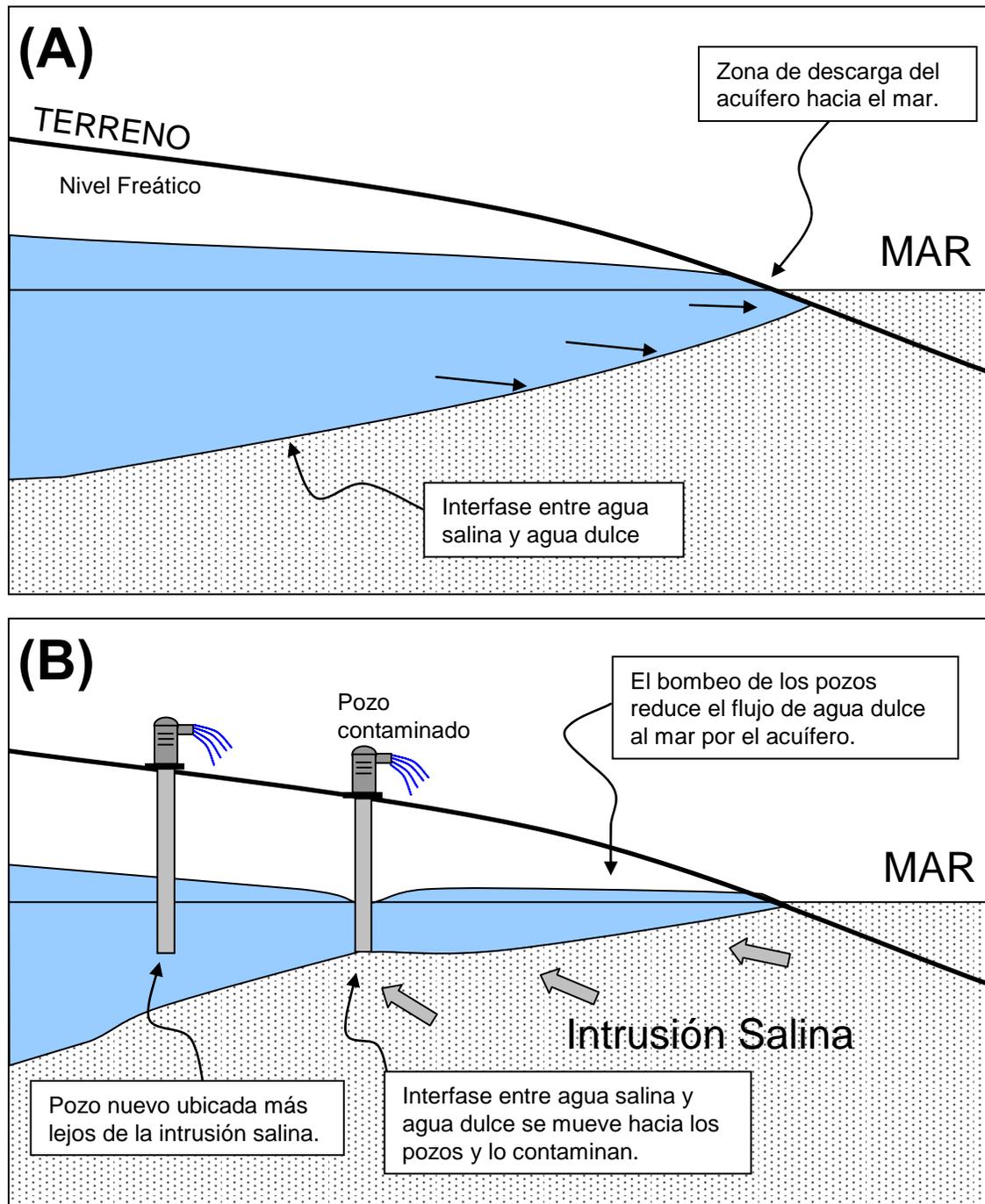


Ilustración 6.9 A & B. Proceso de contaminación de un pozo en un acuífero costero debido a la intrusión salina: (A) condición natural: nótese que la presencia de agua salada en la parte inferior de un acuífero costero es una condición natural. (B) Condición de bombeo en exceso: se observa cómo el avance de la interfase de la intrusión de agua salina contamina un pozo operacional.

Históricamente los acuíferos en la Costa Sur han recibido mucha recarga del agua entregada por los embalses Guayabal, Carite y Patillas, mediante la infiltración a través de los canales en tierra y la práctica de riego por surcos. El desvío del agua de los embalses de uso agrícola hacia uso doméstico, la creciente utilización de pozos para usos domésticos en vez del riego y las prácticas actuales de riego (que son más eficientes y por ende, reducen la recarga del acuífero), han reducido la recarga sustancialmente. El resultado ha sido una reducción en el nivel freático y un problema creciente de intrusión salina, particularmente en la Costa Sur entre Salinas y Juana Díaz. Esta zona crítica se identifica en la Ilustración 6.10 y ha obligado al DRNA a establecer restricciones al desarrollo de pozos adicionales.

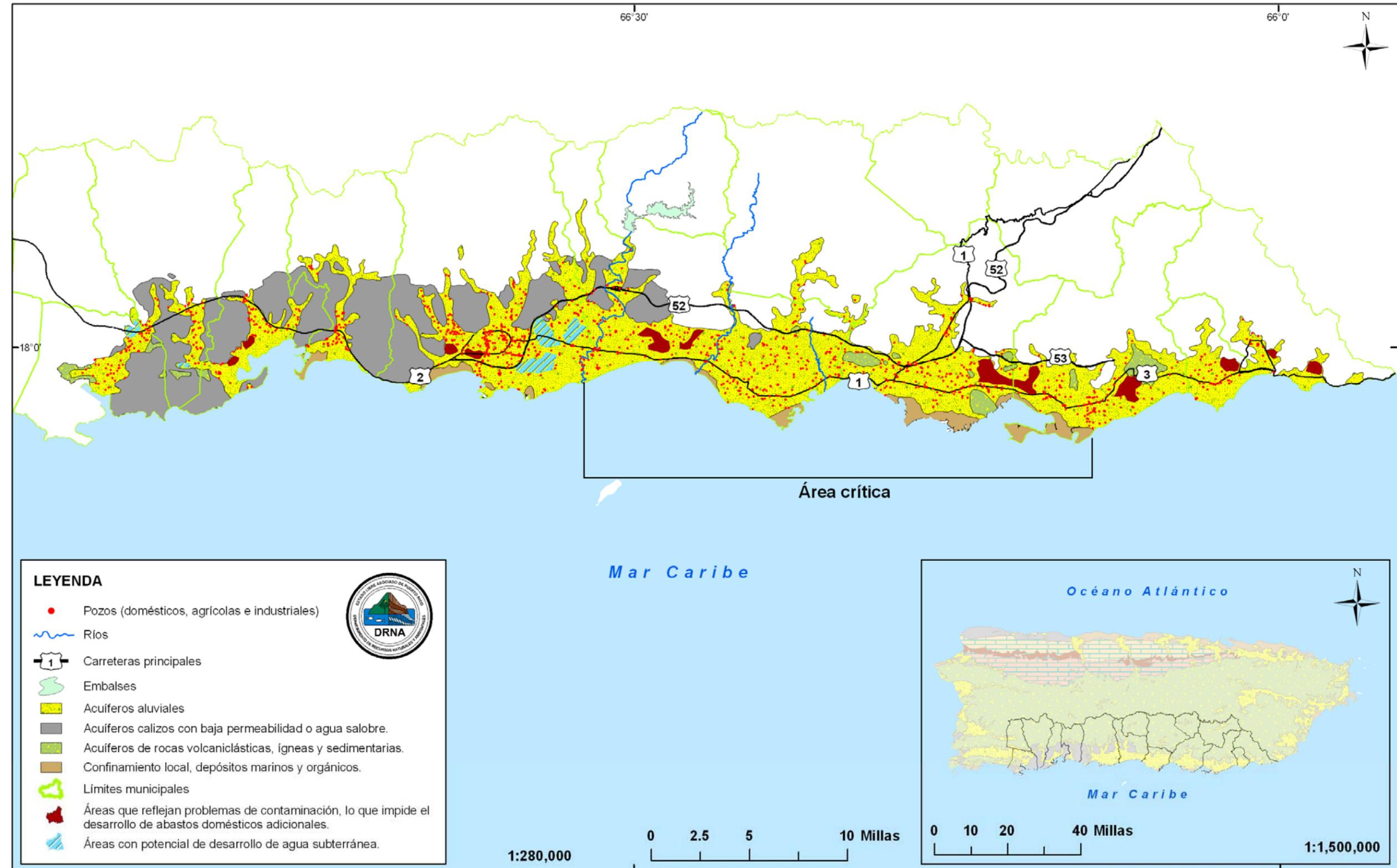
Exceso de bombeo. La extracción de agua subterránea de los acuíferos de la Costa Norte también ha provocado disminuciones significativas en los niveles del manto freático tanto en el acuífero superior como el acuífero inferior. Coto Sur en Manatí y Cruce Dávila en Barceloneta son dos sectores donde los niveles de bombeo en los acuíferos han



descendido considerablemente en relación a la posición de la superficie potenciométrica, al compararse con los niveles antes del desarrollo extensivo de pozos en la región. El campo de pozos de la AAA en el área de Campanilla fue cerrado a consecuencia de la entrada de sales durante la sequía del 1967-68.

En la zona del Cruce Dávila en Barceloneta, un área de bombeo industrial concentrado, el acuífero artesiano (el acuífero inferior) ha experimentado reducciones significativas en los niveles potenciométricos (véase Ilustración 6.11). Pozos que antes fluían naturalmente con la presión artesiana ahora requieren de bombeo. Esta condición se atribuye en parte a la respuesta natural de la extracción de agua de esa formación, y en parte a la pérdida de agua desde el acuífero inferior hacia el acuífero superior mediante filtraciones por pozos abandonados o por pozos con camisillas rotas.

Ilustración 6.10 Áreas críticas de la intrusión salina en la Costa Sur



Fuente: Modificado del Servicio Geológico Federal, 2000

Estrategias. Algún grado de intrusión salina es una consecuencia inevitable del proceso de desarrollar un acuífero costero. Sin embargo, existen herramientas de manejo que pueden maximizar el rendimiento en este ambiente hidrológico, y de minimizar la extensión y las consecuencias de la intrusión.

Las siguientes estrategias son esenciales para optimizar la extracción de agua desde acuíferos costeros.

- **Construcción y operación de pozos**: La intrusión salina afecta a los pozos operacionales según la secuencia mostrada en la Ilustración 6.9. En general, afecta inicialmente a los pozos de mayor profundidad, más cercanos a la costa y de mayor caudal. También, a mayor caudal del pozo, mayor el efecto de succión localizado (“upconing”), que induce la entrada del agua salina hacia el pozo. Para maximizar la extracción de agua dulce en esta situación se requiere que se utilicen pozos localizados más alejados de la costa, de menor profundidad y se sustituyan los pozos grandes por dos o más pozos de menor caudal, mejorando así la distribución de la extracción dentro del acuífero.
- **Información de Rastreo**: La intrusión salina típicamente surge como un problema durante una sequía, cuando la recarga está muy reducida y la utilización de los pozos aumenta para compensar la falta de agua de fuentes superficiales. Se detecta la intrusión cuando agua con niveles altos de sólidos disueltos empieza a salir por los pozos en producción. Para evitar esta situación se requiere mejor información referente a la localización de la interfase salina dentro del acuífero. La misma se obtiene mediante pozos de rastreo (sin bombeo) que penetren hacia la zona salina para registrar continuamente su comportamiento. Se debe tener también, información referente a la lluvia y otras fuentes de recarga y la tasa de bombeo por los pozos.

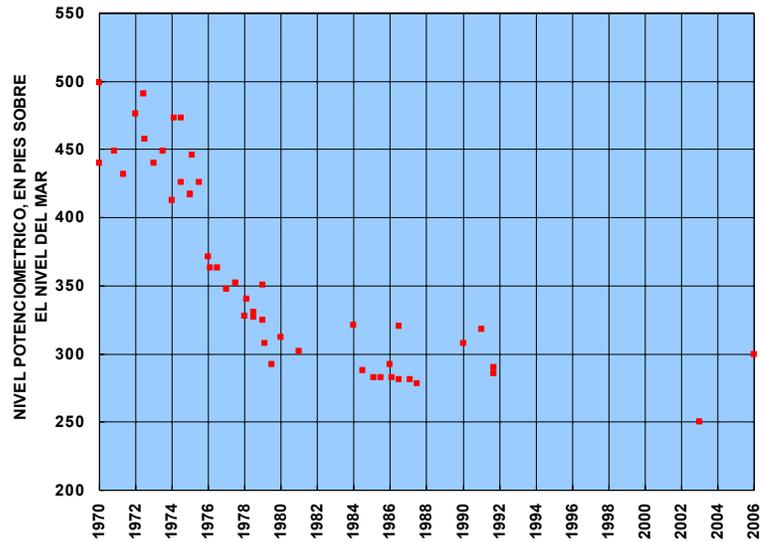


Ilustración 6.11 Gráfica de niveles potenciométricos en el acuífero artesiano, Cruce Dávila

- **Modelación y Diseño**: El diseño de sistemas de bombeo para maximizar la extracción de agua dulce de un acuífero costero requiere datos sobre el comportamiento del sistema, modelos adecuados para guiar tanto el diseño como sus parámetros operacionales y datos de rastreo continuo para indicar cualquier ajuste que se pueda requerir.

6.4.3 Contaminación química y orgánica del agua subterránea

El agua subterránea se nutre principalmente de la recarga que provee la lluvia que cae sobre el terreno y se filtra hacia el acuífero o entra por sumideros en áreas cársticas. Cualquier área donde las aguas superficiales puedan infiltrarse hacia un acuífero se puede clasificar como un “área de recarga”. Los contaminantes que pueden entrar a los acuíferos por sus áreas de recarga incluyen los derivados del petróleo, lixiviados de rellenos sanitarios, efluentes de pozos sépticos, ciertos fertilizantes y derrames de plaguicidas. El escape o derrame de contaminantes sobre los terrenos en áreas de recarga ha afectado la calidad del agua en algunos

acuíferos a tal magnitud que ha requerido el cierre de pozos de la AAA. Algunos de estos casos están siendo manejados en el programa de Superfondo de la EPA cuando se trata de puntos precisos de contaminación.

Los acuíferos también se afectan por fuentes dispersas de contaminación, como es el caso del acuífero en el área de Manatí que ha sido contaminado con nitratos provenientes de la aplicación de abonos a las siembras de piña, más la contribución por pozos sépticos. El acuífero de la Costa Norte es particularmente susceptible a la contaminación debido a que los sumideros y cavidades en la caliza presentan conductos que pueden transportar aguas superficiales y sus contaminantes directamente hacia el acuífero, incluyendo material particulado como son los sedimentos y las bacterias, pues éstas normalmente son removidas cuando el agua de recarga pasa a través de una capa de suelo filtrante.

Contaminación con nitratos. El nitrógeno en su forma elemental es el componente más abundante que se encuentra en la atmósfera. Sin embargo, en la forma de nitrato (NO_3) disuelto en el agua es un contaminante que en concentraciones altas puede ser letal en infantes. A tales efectos la EPA ha establecido un límite de 10 mg/l de nitrato en el agua potable. El nitrato es un contaminante poco reactivo y soluble en agua, el cual no se remueve mediante el proceso de filtración por el suelo. Su concentración en el acuífero puede aumentar durante décadas debido a la recurrencia de actividades que continúen introduciendo nitrato al área de recarga del acuífero.

Las fuentes principales de nitrato son los abonos agrícolas, el estiércol concentrado y el efluente de los pozos sépticos. Los acuíferos que presentan un problema mayor de contaminación con nitratos, o que potencialmente podrían tenerlo, son aquellos ubicados en áreas caracterizadas por altos niveles de aplicación de nitrógeno al suelo y por una buena conectividad hidráulica entre las zonas de aplicación de la sustancia y el acuífero.

En muchos lugares de la zona cárstica las aguas de escorrentía superficial de las fincas están dirigidas hacia sumideros, los cuales descargan directamente hacia los

acuíferos utilizados como fuente de agua potable. Varios pozos en el área de Manatí han sido clausurados a raíz de niveles altos de nitratos producto del abono aplicado a las fincas de piña en la zona (Conde-Costas y Gómez-Gómez, 1999).

La contaminación por nitratos ha ocurrido también en la Costa Sur. Muestras de agua subterránea tomadas por el DRNA en los años 1997 y 2000 presentan concentraciones de nitrato que fluctúan entre 0.68 y 19.3 mg/l en el abanico aluvial del Río Nigua de Salinas y entre 1.74 y 112 mg/l en las colinas al Norte de la Llanura Costera del Sur. Este problema fue examinado en mayor detalle por el USGS (Rodríguez, 2006) y el rastreo del área continúa. En este caso la fuente de nitrato está asociada con el estiércol generado por granjas de aves.

Contaminación por pozos filtrantes. El 49 por ciento de las residencias en Puerto Rico no están conectadas al sistema de alcantarillados de la AAA. Éstas dependen de pozos sépticos, pozos muros, letrinas o hacen descarga directa sin tratamiento alguno. El sistema de tratamiento individual más eficiente es el pozo séptico, el cual provee tratamiento en dos etapas: (1) un tanque para colectar los sólidos por el proceso de sedimentación, y (2) un lecho de suelo biológicamente activo por donde percola el líquido que sale del tanque. El suelo actúa como un filtro y también como un proceso de tratamiento biológico. Sin embargo, muchas de las descargas no son de pozos sépticos sino de otros sistemas que proveen un nivel de tratamiento inferior. En la zona de recarga de los acuíferos del Carso las aguas semi-tratadas pueden infiltrarse directamente hacia el acuífero sin haber pasado por la etapa de tratamiento en el suelo.

Contaminación por sumideros. Las aguas pluviales también pueden ser fuente de contaminación de aguas subterráneas. En muchos lugares de la zona cárstica no hay cuerpos de agua superficiales hacia donde se puedan dirigir las aguas pluviales. Éstas se envían hacia sumideros, los cuales descargan directamente hacia los acuíferos que también se utilizan como fuente para el agua potable. Además, los sumideros reciben aguas de escorrentía de áreas agrícolas. La magnitud de los problemas mencionados y sus consecuencias a largo plazo en la

calidad de las aguas de los acuíferos no se conocen a cabalidad, como tampoco se tiene una política clara para atender los mismos.

Contaminación química. Diversas actividades económicas han contribuido a la contaminación de las aguas subterráneas por sustancias químicas incluyendo: industrias de alta tecnología, centros de servicio automotriz, vertederos municipales, hospitales, centros agropecuarios y vaquerías. La contaminación del acuífero típicamente resulta de accidentes, derrames y filtraciones de tanques de almacenaje; la falta de controles adecuados en el manejo de químicos industriales o agrícolas; y el manejo inadecuado de los vertederos de desperdicios sólidos.

Puerto Rico posee siete (7) lugares activos identificados e incluidos en la lista de lugares más contaminados de la EPA (Lista de Prioridad Nacional del Superfondo, NPL, por sus siglas en inglés). Esta lista incluye los siguientes lugares:

- Antiguo vertedero municipal de Juncos
- Fibers Public Supply Wells en Guayama
- UpJohn Manufacturing en Barceloneta
- Antiguo vertedero municipal en Vega Baja
- Scorpio Recycling en Toa Baja
- Central Termoeléctrica de la Autoridad de Energía Eléctrica en Cataño
- Pozos de abasto de agua en Vega Alta

Existen tres (3) sitios adicionales en vías de ser eliminados de la lista del Superfondo ya que se finalizó su limpieza. Éstos son: el vertedero municipal de Barceloneta, General Electric Wiring Devices en Juana Díaz y V & M Albaladejo en Vega Baja. La JCA ha sometido ante la consideración de la EPA una solicitud para incluir en la NPL dos lugares adicionales: el vertedero municipal de Bayamón y el Almacén de Plaguicidas en Manatí.

6.4.4 Áreas de recarga

Los acuíferos se alimentan de varias fuentes, algunas naturales y otras productos de la manipulación de las aguas por la sociedad (véase Tabla 6.2). Las actividades

de desarrollo que impermeabilizan los terrenos en la zona de recarga típicamente reducen la recarga. Sin embargo, la impermeabilización de terrenos en áreas de la Costa Norte que drenan hacia sumideros puede aumentar la recarga a través del sumidero, aunque la calidad del agua que se infiltra no sea la deseable.

Tabla 6.2 Fuentes de principales recarga de los acuíferos

Fuente de Recarga	Acuífero Costa Norte	Acuífero Costa Sur
Infiltración de lluvia	√	√
Infiltración de los ríos	√	√
Pozos sépticos y tuberías rotas	√	√
Infiltración por sistemas de riego		√
Descarga esorrentía superficial a sumideros	√	

Por otro lado, las fuentes de recarga en la Costa Sur se presentan en la Ilustración 6.12. En la Costa Sur ha habido un largo historial de recarga artificial a través de los sistemas de riego, a pesar de que éste no fue el propósito del sistema. En la Costa Sur el agua de los embalses Guayabal, Patillas y Carite es llevada por canales en tierra hacia los campos agrícolas con sistemas de riego por surco. Se estima que a consecuencia de las filtraciones de los canales y surcos aproximadamente hasta el 30 por ciento del agua de los embalses recargaba el acuífero. Sin embargo, esta fuente de recarga se ha reducido sustancialmente ya que el agua de los embalses se ha desviado hacia usos domésticos y las técnicas de riego han mejorado su eficiencia (DRNA, 2004).



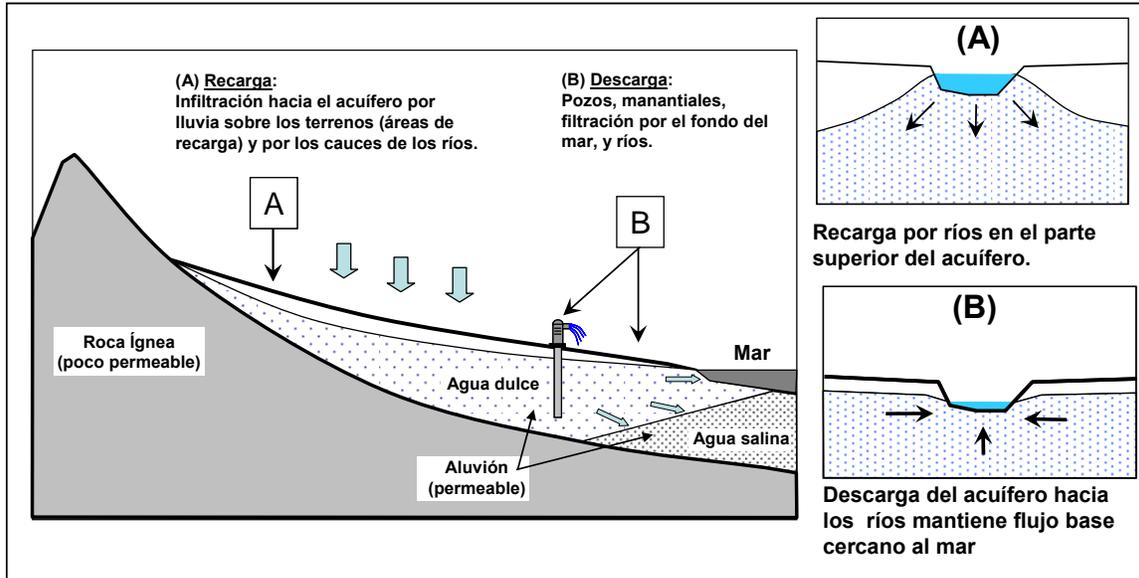


Ilustración 6.12 Patrones de recarga y descarga en la Costa Sur

6.4.5 Estrategias para mantener la recarga a los acuíferos

El aumento y mantenimiento de la recarga hacia el acuífero de la Costa Sur se puede llevar a cabo mediante estrategias de recarga artificial. Una manera es por el bombeo en las áreas cercanas a los ríos, lo cual reduce el nivel freático e induce la recarga del acuífero por el fondo del río. Este mecanismo es particularmente importante en la Costa Sur, donde hay una buena conexión entre el río y el acuífero. Este proceso también ha ocurrido en ríos de la Costa Norte y valles del interior de la Isla. Aunque el desarrollo del agua subterránea se vislumbra como un mecanismo de extracción de agua con poco impacto ambiental, se pueden producir impactos importantes si como resultado se secan los ríos. La implantación de esta estrategia requiere de un análisis cuidadoso ya que pudiera provocar serios impactos ambientales en los ecosistemas que dependen de las aguas del río si éste se secura.

Otra estrategia consiste en la utilización del efluente de plantas de tratamiento de aguas residuales, la cual fue analizada por el USGS en el área de Ft. Allen y se puede considerar viable en otros lugares (Ej. Santa Isabel). La tercera estrategia que se considera puede ser viable es el desvío de agua de los ríos, pero solamente

bajo condiciones de flujo moderados ya que los sedimentos finos (particularmente las arcillas) que transportan las crecidas pueden reducir sustancialmente la permeabilidad en las áreas de recarga.

En las calizas de la Costa Norte, la fuente principal de la recarga son los sumideros y la infiltración a través del suelo. La utilización de charcas de sedimentación es una estrategia recomendada para proteger sumideros y pozos tragantes en áreas sujetas al movimiento de terreno.

El área de los mogotes al sur de la carretera PR-2 es el núcleo de la recarga en la Costa Norte. Esta zona debe estar orientada hacia la preservación de áreas verdes, particularmente en áreas donde también tiene otros beneficios como la protección de la diversidad biológica y potencial de uso ecoturístico.

6.5 Sostenibilidad de ecosistemas acuáticos

6.5.1 Fuentes de datos

Hay una variedad de factores que inciden sobre la supervivencia de las especies nativas y la integridad y diversidad biológica de los ecosistemas acuáticos en Puerto Rico. Entre dichos factores destacan el nivel de flujo (mínimo y alto), la calidad del agua incluyendo niveles mínimos de oxígeno, el mantenimiento de las rutas migratorias tanto en dirección aguas arriba como aguas abajo, el mantenimiento de la configuración morfológica del cauce incluyendo charcas, tramos llanos y una zona de ribera que ofrezca protección a los predadores, y la predación por especies exóticas.

Scatena y Johnson (2001) han presentado información sobre la relación entre el flujo mínimo y la disponibilidad de hábitat para el camarón en las cabeceras de los ríos. Sin embargo, no existen estudios para determinar la relación entre flujos mínimos y condiciones de hábitat para los tramos de pendiente menor cercanos a la costa y en los estuarios.

Existe información general sobre los niveles de oxígeno requeridos para varias especies y las estaciones de calidad del USGS presentan datos tanto de flujo como de concentración de oxígeno y otros parámetros. En relación a las rutas migratorias, se conoce que la interrupción de las migraciones elimina las especies nativas, pero las técnicas para asegurar que se mantengan las rutas migratorias no están bien desarrolladas. Referente a los demás factores que influyen la supervivencia de las especies nativas, las condiciones geomórficas en los cauces y la predación y competencia por especies exóticas no cuentan con documentación en la Isla. En resumen, a pesar de que Puerto Rico cuenta con una buena base de información referente al caudal y calidad del agua superficial, no existe información referente a la relación entre los parámetros físicos y la cantidad y calidad del hábitat necesario para sostener a los ecosistemas acuáticos y las especies nativas.

Otra limitación es la inexistencia de un inventario ecológico detallado que documente la biota en los tramos de los ríos poco impactados por los procesos de desarrollo y con mayor prioridad de protección. Este inventario también debe identificar los impedimentos a las rutas migratorias y las opciones (si alguna) para su eliminación. De esta manera se facilitarían la aplicación de normas más estrictas para proyectos, así como las acciones de restauración en los tramos de los ríos identificados como áreas a ser protegidas.

6.5.2 Flujos ambientales

El agua es el factor ambiental más importante para mantener el hábitat y las rutas migratorias, sostener la capacidad de los ríos para degradar la descarga de desperdicios líquidos y mantener la circulación en los estuarios. Sin embargo, durante periodos secos hay muchos embalses y tomas de agua que extraen la totalidad del flujo, dejando seco el río aguas abajo.

A pesar de la importancia singular del agua sobre la salud de los ecosistemas acuáticos, este tema apenas ha sido discutido en Puerto Rico. El principal estudio sobre este tema (Scatena y Johnson, 2001) fue llevado a cabo en la cabecera del Río Mameyes y el Río Espíritu Santo. Ambos cuerpos de agua son parte del

sistema del Bosque Nacional El Yunque, el cual sufre unas 30 tomas de agua potable. Dicho estudio examinó la relación entre caudal mínimo, hábitat y población utilizando varias especies de camarones como indicador ecológico. Los hallazgos principales del estudio fueron los siguientes:

- El hábitat disponible se reduce rápidamente con caudales menores que los flujos en el rango de Q_{96} hasta Q_{99} .
- El flujo de Q_{99} es necesario para mantener la cantidad mínima de hábitat utilizable.
- El porcentaje del tiempo que el hábitat utilizable está en su valor mínimo aumenta rápidamente una vez la tasa de extracción excede del Q_{98} .

Los hallazgos del estudio de Scatena y Johnson establecen que el mantenimiento de un flujo de Q_{99} es el valor mínimo que puede sostener las condiciones de hábitat en los ríos. Es necesario que se lleven a cabo estudios en otros cuerpos de agua y se incluyan otros organismos (peces) ya que el estudio citado utilizó solamente una especie.

En Puerto Rico no existen normas que establezcan los caudales ambientales que se deben mantener en ríos y quebradas. Las solicitudes para la construcción de tomas nuevas se analizan caso por caso y las agencias reguladoras han permitido como flujo ambiental mínimo la mitad del Q_{99} . A pesar del daño ambiental que esto implica y en vista de la necesidad de la extracción, esta práctica sólo puede ser aceptable en los ríos que ya han sufrido impactos ambientales mayores. Por ejemplo, la cuenca aguas arriba del Embalse Carraízo ya no cuenta con especies nativas migratorias debido a la presencia de la barrera creada por el embalse. Sin embargo, hay ríos que todavía no han sido embalsados y aún mantienen su integridad ambiental, rutas migratorias intactas y especies nativas. Debido a que caudales menores al Q_{99} reducen sustancialmente la viabilidad ecológica, es fundamental establecer como norma el requerimiento de un flujo equivalente o mayor al Q_{99} para las tomas en los tramos de los ríos que aún presentan

condiciones ambientales buenas. Es posible que estudios futuros indiquen que flujos aún mayores son importantes en otros cuerpos de agua y para otras especies además de los camarones.

También es necesario tomar en cuenta que el flujo mínimo no es el único requerimiento para mantener la integridad ecológica, que además es importante el flujo alto para renovar el cauce del río. Los flujos altos son responsables de mantener el tamaño y configuración del cauce libre de la vegetación, socavan las charcas, y mediante la movilización del lecho limpian las piedras de los sedimentos finos. Esta función es importante para mantener en su estado natural la estructura física del substrato en el lecho del río, hábitat esencial para animales en la base de la cadena alimentaría.

6.5.3 Sostener rutas migratorias

Según explicado en el Capítulo 3, todas las especies de peces y camarones nativos de Puerto Rico migran entre el mar y las zonas en los ríos donde se encuentran. Los peces requieren aguas relativamente profundas y migran a lo largo de los cuerpos de agua durante periodos de flujo elevado cuando los tramos llanos están sumergidos, mientras especies como los camarones, con menos capacidad nadadora, migran cuando el flujo es menor. Las migraciones tienen componentes tanto en la dirección aguas arriba como en dirección aguas abajo, cada cual con patrones y requisitos ambientales distintos. Para mantener las rutas migratorias se requiere conocer los patrones de migración y los métodos disponibles para garantizar que las intervenciones en los ríos mantengan (no interrumpan) las migraciones en ambas direcciones en cualquier época del año.

Una barrera permanente que obstaculiza la ruta migratoria, como es un embalse, elimina las especies nativas en toda la cuenca aguas arriba. Para las especies nativas, mantener las rutas de la migración es aún de mayor importancia que mantener los flujos mínimos aguas abajo de las tomas de agua. La ausencia de flujo durante una sequía extrema puede cortar una ruta migratoria y hasta eliminar por completo la población de especies en varios tramos del río, pero en años con

flujo normal las migraciones pueden ocurrir y las poblaciones pueden restablecerse. Sin embargo, la existencia de una barrera migratoria permanente, elimina la oportunidad de restablecimiento de las poblaciones, aún en años de abundancia de agua.

La Tabla 6.3 ilustra, en términos muy generales, las clases de obras que pueden impactar las rutas migratorias, la magnitud potencial del impacto y el potencial de minimizar los impactos adversos si se optimiza el diseño para sostener los patrones de migración. El único tipo de obra con impactos grandes y pocas opciones para su mitigación son los embalses. Las demás estructuras y actividades en los ríos generalmente pueden reducir o mitigar su impacto. Algunas actividades, como son la descarga de efluentes y la extracción de agregados, influyen tanto la morfología del cauce como en la calidad del agua.

Las rutas migratorias pueden ser obstaculizadas parcialmente o totalmente por una variedad de factores, los cuales se describen a continuación:

- **Flujo mínimo:** Al secar el río se elimina la ruta migratoria.

- **Barreras físicas:** Las represas constituyen barreras físicas a la migración. Si la pared es baja, hasta aproximadamente 10 pies de altura, pueden existir opciones tales como escaleras de peces que pueden mantener migraciones. El diseño de las escaleras de peces se tiene que ajustar a



las especies particulares, ya que una especie como el dajao tiene requisitos diferentes a los de una anguila. Los camarones pueden subir barreras aún mayores, siempre y cuando la superficie se mantenga húmeda.

Tabla 6.3 Impactos potenciales de actividades en cauces de los ríos sobre rutas migratorias y su potencial de mitigar los impactos

Obra o Actividad	Magnitud Potencial del Impacto	Potencial para Minimizar Impacto Optimizando el Diseño y Operación
Represa y Embalse	Muy Grande	Muy Poco
Toma de agua	Grande	Bueno
Canalización	Grande	Bueno
Descarga de efluentes	Grande	Bueno
Extracción arena y grava	Moderado	Moderado
Puente	Muy Poco	Moderado

- **Morfología del cauce:** La eliminación de un cauce natural para crear un cauce canalizado elimina la configuración de las charcas y llanos. La peor condición se produce por una canalización en concreto donde, aún en caudales mínimos, el río fluye con una velocidad rápida sobre un lecho uniforme de concreto produciendo velocidades altas sin sitios para la fauna resguardarse o descansar. La creación de embalses de gran extensión y profundidad mediante la construcción de represas o excavaciones en los cauces, también puede representar una barrera a consecuencia de la predación por las especies exóticas que pueden establecerse en el lugar.

Las actividades de extracción de arena, grava y piedra del fondo de los ríos también alteran y remueven el substrato natural y elimina los tramos llanos, de los cuales dependen los ecosistemas acuáticos nativos. La acumulación de sedimentos en el cauce debido a actividades que aportan sedimentos también representa un cambio en la morfología que elimina las condiciones naturales y por ende, representa una barrera a la migración.

- **Las especies exóticas:** Las especies exóticas pueden competir con las nativas por alimentos y ocupación de los nichos ecológicos y además pueden convertirse en predadores. Debido a que en Puerto Rico no hay lagos naturales, sus especies nativas están adaptadas a los ríos. Al construir los embalses se introdujeron especies exóticas para ocupar este ambiente, los cuales compiten con las nativas.

- **Los sistemas de extracción:** Las estaciones de bombeo extraen agua del río y traen consigo los organismos con poca capacidad nadadora, como son las larvas y camarones pequeños. La migración aguas abajo de las larvas ocurre principalmente en horas de la noche, con picos después de la puesta del sol y antes del amanecer. El apagar las bombas por varias horas, correspondiente a las horas de la migración máxima, es una técnica muy efectiva para reducir este impacto. En el caso de las migraciones aguas arriba, los camarones migran a lo largo de los márgenes de los ríos donde la corriente es más lenta y ofrece mayor protección de los predadores. Desafortunadamente, las tomas de agua típicamente llevan a cabo la extracción mediante una rejilla que puede succionar los organismos que se encuentren migrando por el lado del río donde está colocada la toma. Por tal razón, los sistemas de extracción de agua se deben colocar de forma tal que no succionen a los organismos migrando por las orillas de los cauces.
- **Degradación de la calidad.** La degradación de la calidad del agua que tiene elimina las especies nativas en un tramo de un río representa una barrera migratoria. La degradación puede ocurrir a consecuencia de descargas líquidas y también por la sedimentación.

Cualquiera de los factores anteriores puede reducir parcial o totalmente la migración. El impacto acumulativo de varias obstrucciones parciales también puede tener el efecto de eliminar la migración por completo. Por ende, es importante considerar los impactos acumulativos de las actividades en los cauces y no tomar cada factor como si fuera un evento aislado.

La Tabla 6.4 presenta barreras que pueden representar varias actividades y obras en los cauces de los ríos. Existe gran diferencia entre un sitio y otro debido a las características diferentes de cada río y de cada intervención en particular. La magnitud de los impactos en cada caso corresponde a condiciones típicas de Puerto Rico y no son representativas de las obras que incorporan las mejores alternativas de diseño y operación para minimizar su impacto. Las actividades

durante la construcción que afectan los cauces representan barreras temporales y su importancia es menos significativa que los impactos a largo plazo de las obras permanentes.

Tabla 6.4 Magnitud relativa de diferentes obras por clase de impacto ^{a/}

Clase de Impacto	Actividad u Obra en el Cauce del Río				
	Embalse	Toma	Canalización	Descarga Efluentes	Extracción Arena y Grava
Flujo mínimo	3	2	0	0 ^{b/}	0
Barrera física	3	2	1	0	0
Morfología del cauce	3	1	3	0	2 ^{d/}
Apoyar especies exóticas	3	1	1	2 ^{d/}	1
Atrapar larvas y juveniles	0	3	0	0	1
Degradación de la calidad	1	0	0	3	2 ^{e/}

^{a/} Impactos: 3 = Grande, 2 = Moderado, 1 = Poco, 0 = Ninguno.

^{b/} Aumenta el flujo mínimo.

^{c/} Por adición de nutrientes.

^{d/} Degradación por excavación en el fondo y por remoción del substrato natural.

^{e/} Generación de sedimentos durante la extracción.

6.5.4 Sobrepesca y especies exóticas

Según descrito en el Capítulo 3, la sobrepesca en los ríos y quebradas ha disminuido las poblaciones de fauna migratoria. Peces como el dajao, la anguila, el olivo, el morón y la guavina son objeto de la pesca artesanal y recreativa. Las larvas del olivo (cetí) son utilizadas para preparar platos típicos. Igualmente, las cinco especies principales de camarones son pescadas regularmente. El cangrejo buruquena y el caracol burgao también son objeto de la pesca recreativa para fines de consumo. La buruquena es capturada con trampas en horas de la noche mientras que el caracol burgao (*Neritina*), el cual alcanza hasta una pulgada de diámetro, es pescado a mano debajo de las piedras del fondo de los ríos y quebradas. La pesca artesanal y deportiva se realiza con redes, varas, nasas y a mano. También ocurre la pesca ilegal con químicos (cloro y diversos venenos), la cual ha tomado auge durante los últimos años.

Las especies exóticas, también descritas en el Capítulo 3, representan un peligro creciente y permanente para las especies nativas. Hay pocas experiencias con relación al manejo de las especies invasoras en los ríos y estuarios. El DRNA ha impedido la introducción de algunas especies de peces en los embalses, basado en experiencias en otras partes del mundo y en el conocimiento de su biología, pero existen amenazas que no han sido controladas efectivamente.

El efecto de las especies exóticas establecidas en los ríos y estuarios de Puerto Rico no ha sido evaluado formalmente. Sin embargo, se conoce de una gran variedad de organismos exóticos introducidos intencional o accidentalmente a las aguas de Puerto Rico, incluyendo especies conocidas por tener impactos adversos. La almeja asiática ya se encuentra establecida en tres ríos y su dispersión podría ser detrimental para las almejas nativas como ha ocurrido en otras partes del mundo. El caracol manzana se encuentra establecido en algunos humedales y podría afectar negativamente a las especies nativas, ya que es un consumidor voraz. El langostino australiano “red claw” se ha reportado en varios ríos y quebradas de Puerto Rico, además de los embalses Carraízo, La Plata y Carite, y el Valle de Lajas. En otras partes del mundo su liberación imprudente ha causado la desaparición de los camarones nativos debido a la transmisión de enfermedades y a la modificación del hábitat, ya que cava galerías y erosiona los bancos de los ríos y quebradas. La fauna estuarina nativa está amenazada por los mismos factores descritos arriba, pero ha sido poco estudiada.

6.5.5 Estrategias

Las siguientes estrategias son importantes para preservar y mejorar los ecosistemas acuáticos, enfocando de forma prioritaria en los ecosistemas y especies nativas.

1. **Establecer prioridades:** Es importante mantener o mejorar las condiciones ambientales en los ríos donde aún existen ecosistemas y especies nativas. La identificación de áreas para acciones y protección prioritarias se debe iniciar con un inventario de los ríos de Puerto Rico, para identificar los tramos con las

mejores condiciones ecológicas actuales o con el mejor potencial para su protección y restauración. Además, se deben identificar las barreras a la migración y las opciones, si alguna, para su modificación o eliminación.

2. **Investigaciones:** No se han definido cuáles son las condiciones mínimas necesarias para mantener ecosistemas nativos viables. No se conoce bien la relación entre las configuraciones y operaciones de las obras y las consecuencias en los ecosistemas acuáticos de agua dulce. Las investigaciones relacionadas a los ecosistemas acuáticos deben ser enfocadas hacia la posibilidad de definir estas relaciones para proveer información de utilidad para el manejo del recurso, de manera que apoye la salud de los ecosistemas.

3. **Guías:** Se deben preparar guías para el diseño y evaluación de obras y acciones en los ríos dirigidas a establecer medidas que sean prácticas para la preservación y restauración de los ecosistemas y especies nativas. Las guías deben formar la base para diseñar y analizar obras en los ríos. Sin embargo, dada la variabilidad de las condiciones fluviales y la diversidad de opciones que pueden existir en cada lugar, no deben considerarse como si fueran normas sino guías técnicas para la orientación, tanto a diseñadores y operadores como al personal responsable de implantar la reglamentación. El propósito es establecer, de forma clara, los impactos potenciales que pueden ocurrir (los cuales son desconocidos para la gran mayoría de los ingenieros que actualmente diseñan obras), establecer los objetivos que tiene el País desde el punto de vista ambiental, y definir diferentes estrategias de diseño y operación que puedan minimizar los impactos ambientales. Las guías podrían incorporar, como referencia, material ya preparado fuera de Puerto Rico con el objetivo de dirigir a los profesionales que diseñan y operan las obras hacia un mejor entendimiento de la relación de sus acciones con el ambiente.

4. **Control de Especies Exóticas:** Se necesita un control más adecuado de la importación e introducción de fauna y flora acuática, así como la actualización de la lista de especies prohibidas. Se debe considerar que cualquier especie viva introducida en la Isla eventualmente escapará a los cuerpos de aguas. Este esfuerzo debe enfocarse con prioridad en las especies consideradas como amenazantes y aún sin poblaciones establecidas en los ríos de Puerto Rico.

6.6 Manejo sostenible de los cauces de los ríos

6.6.1 Inestabilidad de riberas



Las intervenciones en los ríos han provocado múltiples consecuencias en sus cauces. El patrón típico es el atrincheramiento o degradación del fondo del cauce, bajando su nivel a consecuencia de dos acciones principales. La primera acción de degradación del cauce es la extracción de agregados, una actividad llevada a cabo a

gran escala desde los años 1950 y aún activa en algunos ríos. Las cuencas en Puerto Rico suplen grandes cantidades de sedimento en suspensión, pero generan una cantidad muy limitada del sedimento grueso que compone el material en el fondo de los cauces. Dado esta situación y la larga historia de extracción de los agregados de ríos, la extracción ha sido el mayor causante del atrincheramiento de los cauces de los ríos.

La segunda causa está relacionada con el aumento de la fuerza hidráulica a consecuencia de una combinación de cambios en la cuenca hidrográfica, incluyendo particularmente la urbanización y las obras de encauzamiento y canalización. Al aumentar la energía hidráulica en el cauce, aumenta también su capacidad de transporte de sedimento y la tasa de erosión del fondo y de las riberas. Una vez iniciado el proceso de erosión, la tendencia natural es que éste se

acelera. El atrincheramiento del cauce produce un flujo más profundo durante crecidas, aumentando las fuerzas hidráulicas e incrementando las fuerzas que socavan el fondo y las riberas del río. Las consecuencias más dramáticas son las estructuras de vivienda que se desploman a consecuencia de la erosión progresiva de las riberas (véase Ilustración 6.13).



Ilustración 6.13 Deslizamiento de residencias a consecuencia de la erosión de la ribera del Río Turabo, Caguas

Hasta la fecha las soluciones para este problema han sido las canalizaciones u obras de protección de riberas por métodos tradicionales, frecuentemente utilizando gaviones, enrocado (“rip rap”) o protección con hormigón. Desafortunadamente, estas medidas generalmente no son sostenibles. Los gaviones en particular, siempre fallan por lo que son totalmente inadecuados para uso en el ambiente fluvial. Peor aún, muchas veces fallan dentro de un periodo de pocos años. Las soluciones tradicionales también tienen el efecto de cambiar la morfología de los cauces y las riberas al eliminar hábitats, incluyendo la secuencia de charcas y llanos en los cauces de los ríos.

Existen alternativas ambientalmente más favorables que las técnicas tradicionalmente utilizadas en Puerto Rico, los cuales mantienen las pozas profundas en los cauces y también promueven un ambiente más natural en la ribera. Un ejemplo de este tipo de alternativa es implantar estrategias de control de erosión de los bancos de ríos, fundamentadas en la utilización de estructuras de piedras que dirijan el flujo fuera del banco y permitan la formación de pozas en lugares que no interfieran con la estabilidad del banco (Ilustración 6.14).

6.6.2 Limpieza de cauces naturales

La acumulación de material vegetativo en los puentes hace necesario su limpieza. Sin embargo, otra clase de obra que se lleva a cabo en Puerto Rico con frecuencia es la limpieza de los cauces naturales. Estas intervenciones son esencialmente mini-canalizaciones que no cuentan con estudios y no producen beneficios a largo plazo ya que su efecto práctico es reducir la estabilidad del cauce.



La limpieza produce un tramo de cauce artificialmente ancho donde se acumulan los sedimentos durante las crecidas subsiguientes. El efecto es, esencialmente, la creación de una trampa de sedimentos que provoca la necesidad de limpiezas repetidas. Las excavaciones repetidas de los sedimentos reducen su transporte del

fondo hacia aguas abajo y promueve la erosión del río aguas abajo del tramo intervenido por la limpieza. Algunos trabajos de esta índole también enderezan los meandros, lo cual aumenta la pendiente hidráulica y apoya el proceso de erosión del fondo del río aguas arriba. El material removido por la limpieza típicamente se deposita al lado de las riberas, lo que reduce la capacidad hidráulica de la planicie inundable. Además, la limpieza elimina la secuencia natural de charcas y llanos en

el río, dejando un fondo plano. También remueve el material grueso natural del lecho del río, eliminando así el hábitat acuático natural.

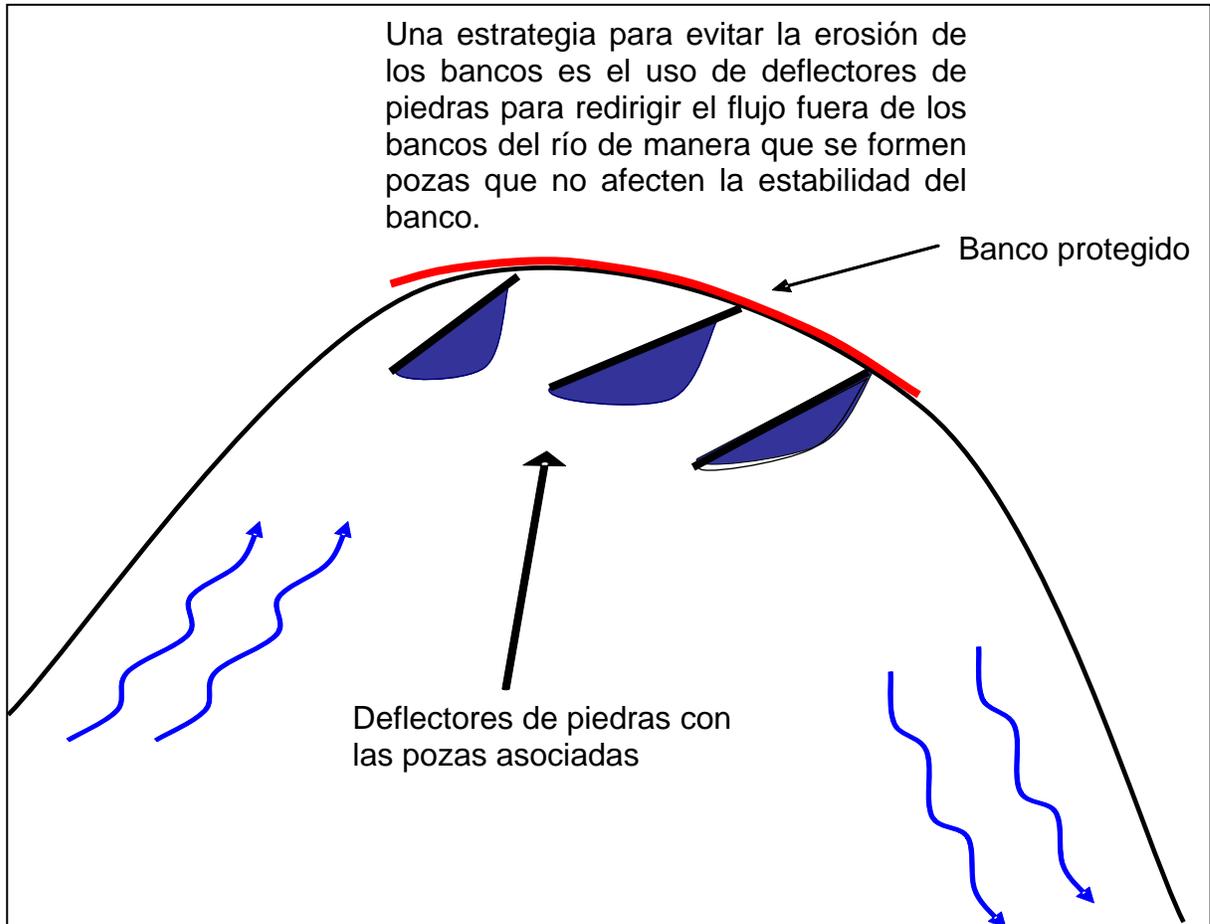


Ilustración 6.14 Ejemplo de una obra de control de erosión sostenible

6.6.3 Estrategias

Se recomienda una revisión integral de las técnicas de canalización y control de erosión fluvial utilizada en Puerto Rico con las técnicas recomendadas en otras partes del mundo para identificar las más sostenibles en términos de su durabilidad y que a la vez reduzcan el daño ambiental en el cauce de los ríos. La información disponible indica que la utilización de gaviones se debe prohibir por completo en el ambiente fluvial y que las obras de limpieza se deben limitar solamente a las áreas inmediatamente adyacentes a estructuras como canalizaciones formales, puentes o tomas de agua. De hecho, la Ley 49 de 4 de enero de 2003, según enmendada,

establece que las limpiezas en los ríos deben limitarse a remover aquellos materiales exógenos del cuerpo de agua que no son producto de procesos geológicos y que obstruyen el libre fluir de las aguas (ej. basura, chatarra, escombros, etc.). La conservación de cauces se define en esta ley como obras en los cauces de los ríos dirigidas a restaurar los bancos que estén erodados y reducir o eliminar el proceso de erosión. Se establece, además, que las obras de limpieza y conservación no podrán alterar la geometría ni el área seccional del cuerpo de agua o interferir con el ciclo de transporte natural de sedimentos hacia la costa.

6.7 Contaminación de las aguas superficiales

6.7.1 Fuentes de datos

En Puerto Rico existe un récord de datos de calidad de las aguas superficiales mediante el programa de rastreo que se lleva a cabo principalmente por la JCA y el USGS, más los datos y estudios especiales realizados por otras entidades incluyendo al DRNA. Los datos del USGS están disponibles en su página de Internet (www.pr.water.usgs.gov). Los datos recopilados por las demás agencias y por estudios especiales, en su mayoría, no están disponibles fácilmente.

6.7.2 Calidad de las aguas

Los datos disponibles demuestran una pobre calidad de aguas superficiales en muchos de los cuerpos de agua del País. Estudios realizados por la JCA (Informes 303(d) y 305(b)) y los datos de rastreo del USGS establecen que los problemas principales de calidad de las aguas superficiales en la Isla son la presencia de bacterias de origen fecal, nutrientes y



sedimentos suspendidos. Las concentraciones de estos contaminantes en la mayoría de los puntos de muestreo exceden los estándares locales y federales para contacto humano. No obstante, a pesar de que las aguas superficiales pueden estar contaminadas con bacterias y nutrientes, esto no impide que, con el debido tratamiento, estas aguas puedan ser utilizadas como fuente de agua potable. De hecho, la mayoría de las aguas cumplen con los requisitos de la JCA y la EPA para fuentes de producción de agua potable.



Las concentraciones de nutrientes en la red de estaciones operadas por el USGS se presentan en la Tabla 6.5, mientras que las concentraciones de bacterias de origen fecal medidas en la red de estaciones operadas por el USGS se resumen en la Ilustración 6.15. Solamente en zonas aisladas en las montañas o en terrenos de reservas forestales protegidas, la calidad de las aguas superficiales no está afectada por niveles altos de estos contaminantes. Durante períodos de escorrentías intensas (época de lluvias), las concentraciones de bacterias y nutrientes

pueden disminuir por dilución, pero se incrementa dramáticamente la concentración de sedimentos suspendidos a consecuencia de la erosión y los deslizamientos.

En cuanto a la contaminación con metales tóxicos, se observan infracciones a los límites de parámetros de fenoles, mercurio, arsénico, plomo, cobre y manganeso, en varias partes de la Isla. Estas infracciones son el resultado de descargas de refinerías e industrias de alimentos, químicas, tabacaleras y metales entre otras.

Tabla 6.5 Concentraciones promedio de nitrógeno total y fósforo total en los ríos principales de Puerto Rico, 1973-2002

Ríos	Nitrógeno Total (mg/l)	Fósforo Total (mg/l)
Guajataca	1.44	0.02
Grande de Arecibo	0.93	0.05
Grande de Manatí	1.34	0.16
Cibuco	2.05	0.24
La Plata	0.98	0.15
Bayamón	1.97	0.33
Río Piedras	2.87	0.53
Grande de Loíza	1.17	0.35
Espíritu Santo	0.29	0.05
Fajardo	1.28	0.14
Humacao	1.77	0.30
Guayanés	0.82	0.11
Grande de Patillas	0.40	0.03
Cerrillos	0.76	0.07
Loco	1.10	0.19
Guanajibo	1.67	0.37
Grande de Añasco	1.24	0.10
Culebrinas	1.79	0.22

Fuente: U.S. Geological Survey

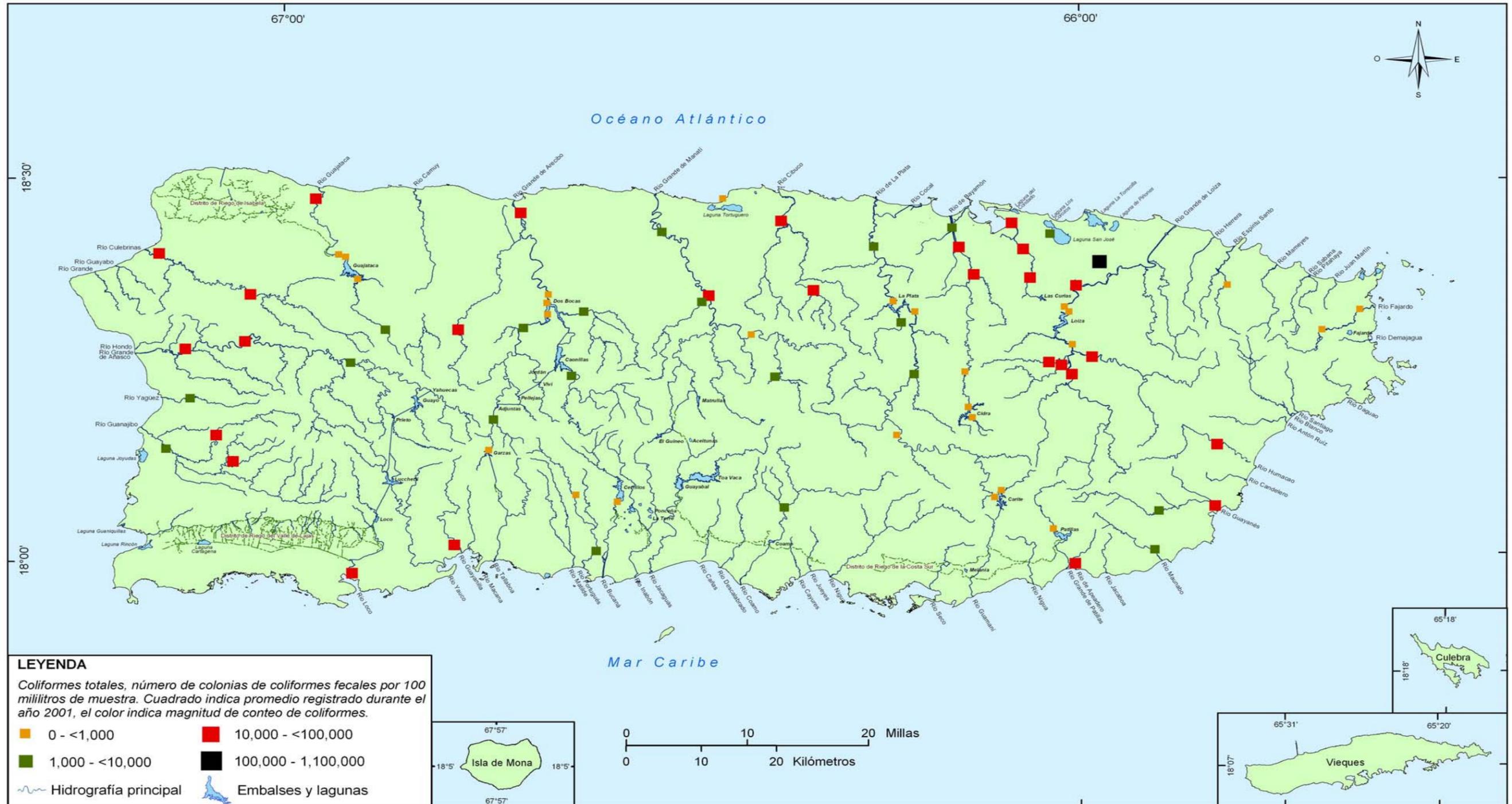


Ilustración 6.15 Concentración de bacterias de origen fecal en ríos, embalses y lagunas en Puerto Rico para el año 2002

6.7.2.1 Fuentes de contaminación dispersas

Los contaminantes de fuentes dispersas son aquellos con múltiples puntos de origen y descarga, como es, por ejemplo, la generación de sedimentos por la erosión de los terrenos y los coliformes fecales del ganado que entran a los ríos y quebradas en diferentes puntos. Las limitaciones de cobertura del servicio de alcantarillado sanitario de la AAA, la falta de controles sobre los métodos autónomos de disposición (pozos sépticos) y las actividades agrícolas son factores que provocan la contaminación de las aguas superficiales por fuentes dispersas.

En Puerto Rico, un 49 por ciento de las viviendas y un número indeterminado de comercios no están conectados al sistema de alcantarillado sanitario de la AAA por lo que recurren a soluciones autónomas para la disposición de sus aguas residuales. Un sistema autónomo a base de un pozo séptico, cuyo diseño y campo de percolación son adecuados, debe proveer un nivel de tratamiento satisfactorio. Sin embargo, en Puerto Rico es común la utilización de pozos filtrantes inadecuados en comunidades rurales y las conexiones ilegales a sistemas pluviales. Por tal razón, muchos de los sistemas autónomos son fuentes de contaminación (Plan Maestro AAA, 2003). Aún en áreas con servicio sanitario existen problemas a causa de descargas de aguas negras directamente hacia los ríos. Estos incluyen los sistemas de disposición combinados (pluvial y sanitario en un sólo tubo), infiltración de aguas pluviales que hacen desbordar las aguas sanitarias, tubería sanitaria rota y desbordes por fallas en las estaciones de bombeo.

Las fuentes de contaminación asociadas con las actividades agrícolas incluyen aquellas donde hay concentraciones de animales como son granjas y lecherías. Por ejemplo, una lechería con 200 vacas puede producir una cantidad de desperdicio orgánico (BOD₅) equivalente a una comunidad de 2,000 personas. Existen sistemas de control para los desperdicios de los animales, pero la combinación de fallas en los sistemas de control y la utilización de los ríos por las vacas puede resultar en cargas elevadas de nutrientes y bacterias en los cuerpos

de agua. Las cuencas más afectadas por la contaminación de origen pecuario son las de Guajataca, Grande de Loíza y La Plata.

6.7.2.2 Contaminación por fuentes puntuales

Las fuentes puntuales son aquellas fuentes que descargan a un cuerpo de agua en un punto en particular, como es la tubería de descarga de una planta de tratamiento. Los puntos de descarga se pueden clasificar en tres grupos:

- a) Instalaciones costeras que descargan sus efluentes por medio de tuberías submarinas directamente al mar. En este caso, el impacto de la contaminación se restringe al ambiente marino.
- b) Instalaciones cercanas que descargan en un cuerpo de agua a pocos kilómetros de la costa. En estos casos, además del ambiente marino, se afectan las aguas superficiales, las costas, las playas y los estuarios.
- c) Instalaciones que descargan a cuerpos de aguas en el interior de la Isla. Estas instalaciones frecuentemente descargan aguas arriba de tomas y embalses utilizados para el agua potable. Por ejemplo, la planta de tratamiento regional en Caguas descarga aguas arriba del Embalse Carraízo, una de las fuentes de abasto para San Juan.

La descarga doméstica e industrial conectada a la red de colectores es tratada por la AAA. Los niveles de tratamiento de las aguas usadas se pueden clasificar en tres niveles: (1) Tratamiento primario, consiste en la remoción del material que se sedimenta y el material flotante; (2) Tratamiento secundario, consiste en remover la mayor parte de la materia orgánica disuelta que actúa como fuente de alimentación para microorganismos y (3) Tratamiento terciario, remueve otros contaminantes, particularmente los nutrientes. La red de plantas de tratamiento de aguas usadas que opera la AAA en la Isla se presenta en la Ilustración 6.16 que, además, incluye el nivel de tratamiento de cada planta los cuales se describen en la Ilustración 6.17.

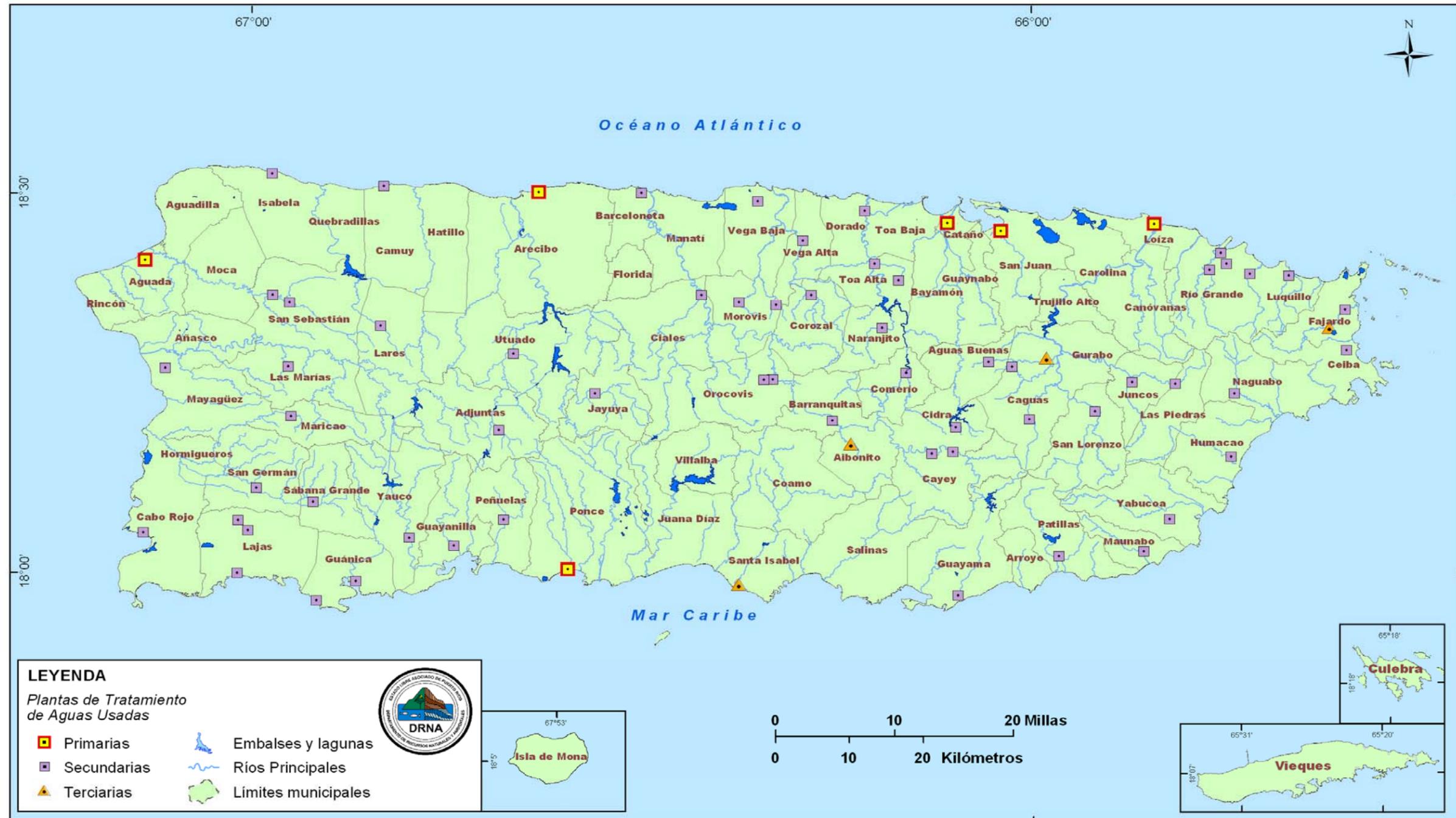
Los volúmenes de cada nivel de tratamiento para toda la Isla se resumen en la Tabla 6.6 donde también se ilustra la disposición final del efluente. Estos datos revelan que aproximadamente el 67 por ciento (149 mgd) de las aguas sanitarias generadas en las plantas de la AAA durante el año 2003 recibió solamente tratamiento primario; 28 por ciento (63 mgd) recibió tratamiento secundario y el 5 por ciento (11 mgd) recibió tratamiento terciario. La mayor parte del volumen de aguas usadas es generado en las ciudades costeras y la disposición hacia el mar puede representar una alternativa menos costosa para la AAA. Las descargas al océano de efluentes tratados a nivel primario se llevan a cabo mediante dispensas bajo la Sección 301 (h) a la Ley Federal de Agua Limpia (Clean Water Act of 1970, CWA). La EPA permite estas descargas sujetas a revisiones periódicas y rastreo frecuente que demuestre que las aguas descargadas por las plantas primarias no tienen un efecto adverso significativo sobre el medioambiente marino.

Tabla 6.6 Generación y disposición de aguas usadas en Puerto Rico durante el 2003 en mgd (AAA, 2003)

Nivel de Tratamiento	Descarga Total	Descarga al Mar	Descarga a Ríos
Primario	149	149	0
Secundario	63	36	27
Terciario	11	0	11
Totales	223	185	38

Las industrias que descargan a la red municipal no están directamente sujetas a un permiso del Sistema Nacional de Eliminación de Descargas Contaminantes (Permiso NPDES, por sus siglas en inglés), pero sí están obligadas a lograr un nivel de pretratamiento que es reglamentado y supervisado por la AAA y aprobado por la EPA. El propósito del pretratamiento es asegurar que los efluentes descargados al sistema de alcantarillado público sean de una calidad que se puedan tratar en las instalaciones municipales. A una industria en particular se le puede exigir límites tan bajos como sea necesario para preservar la calidad de los efluentes de las plantas municipales y así evitar que elementos dañinos interfieran con el proceso de tratamiento.

Ilustración 6.16: Mapa red de plantas de tratamiento de aguas usadas en Puerto Rico



Fuente: Autoridad de Acueductos y Alcantarillados, 2003

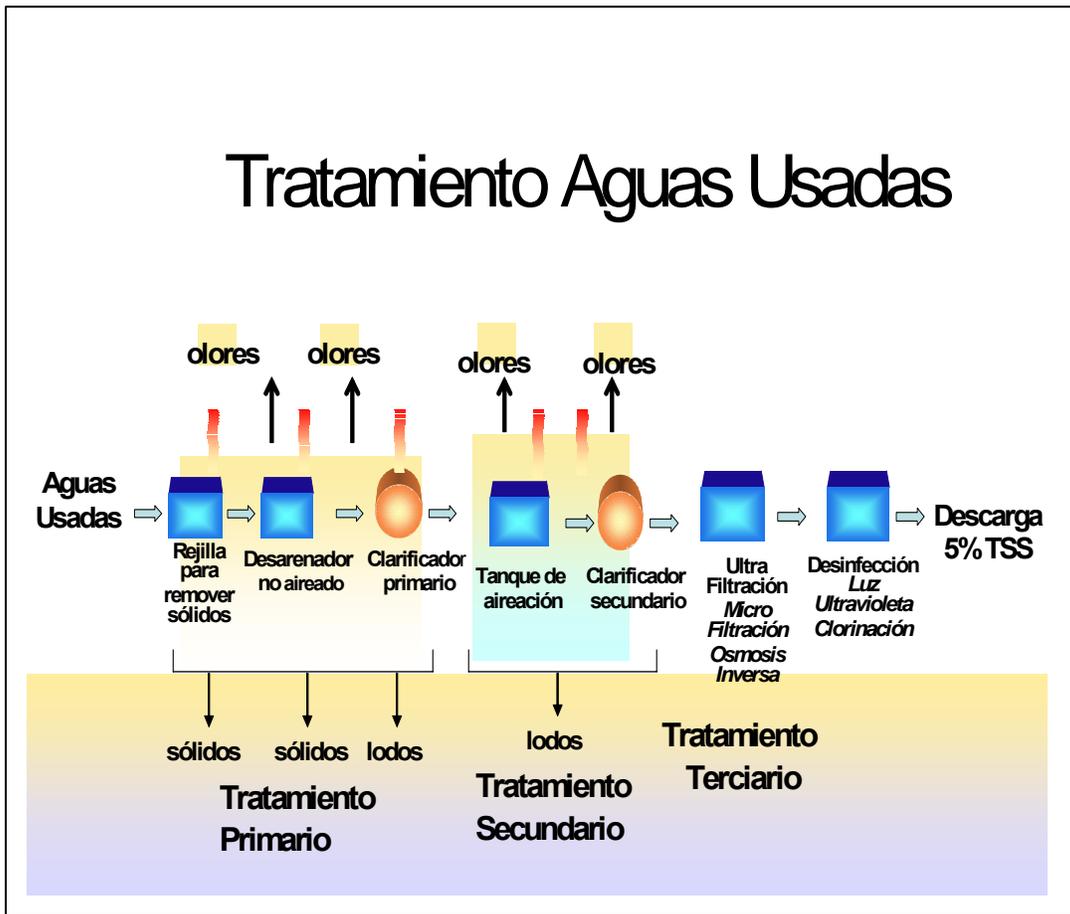


Ilustración 6.17 Tipos de tratamientos de aguas usadas

6.7.3 Estrategias

El control de la calidad de las aguas es responsabilidad principal de la JCA junto con la EPA. Para apoyar este esfuerzo dentro del contexto del Plan Integral de Recursos de Agua, se deben priorizar las actividades de control de calidad tanto de fuentes puntuales como dispersas en las cuencas identificadas como críticas desde el punto de vista del suministro del agua potable y también de la preservación de los ecosistemas acuáticos y especies nativas.



6.8 Uso y aprovechamiento eficiente del recurso

6.8.1 Alto nivel de agua no-contabilizada en el sistema de la AAA

La solución tradicional que se ha seguido en Puerto Rico para atender situaciones de deficiencias en el abasto de agua potable, ha sido aumentar la disponibilidad del recurso mediante la construcción de obras nuevas que aumenten la producción. No obstante, la posibilidad de continuar con este enfoque es cada día más difícil porque ya se han desarrollado los recursos de menor costo y las limitaciones técnicas, económicas y ambientales al desarrollo de fuentes nuevas están en ascenso. Además, muchas de las fuentes previamente desarrolladas no han sido manejadas de manera sostenible y confrontan problemas que están reduciendo su capacidad de producción. Los problemas principales son la sedimentación de embalses importantes y la reducción en la disponibilidad del agua subterránea debido a la contaminación proveniente de sus áreas de recarga o por la intrusión salina. Ante esta situación es importante aprovechar de manera eficiente los abastos ya desarrollados.

El agua no-contabilizada representa la diferencia entre el volumen informado como producción en las plantas de filtración y los pozos, y el volumen cuya entrega se contabiliza mediante los metros de los consumidores o por consumo estimado. En un sistema con manejo adecuado, el agua no-contabilizada no debe exceder aproximadamente el 15 por ciento de la producción. En contraste, en el año 2004 el volumen del agua no-contabilizada en el sistema de distribución de la AAA ascendió al 56 por ciento (329 mgd) de la producción total. Aún más alarmante es que la tendencia en las pérdidas ha ido en aumento según se presenta en la Ilustración 6-18 y la Ilustración 4-4. De acuerdo a datos suministrados por la AAA, desde el año 1981 al 2004, el volumen de agua entregada a los consumidores aumentó en sólo 12 mgd, mientras la producción aumentó en 221 mgd (véase la Ilustración 4.4 del Capítulo 4). La inversión en proyectos nuevos para el abasto de agua es cuantiosa. Sin embargo, los datos indican que esta inversión y el aumento resultante en

producción no se traducen en un aumento en la venta de agua por la AAA. Esto se considera un patrón de manejo de agua no sostenible.

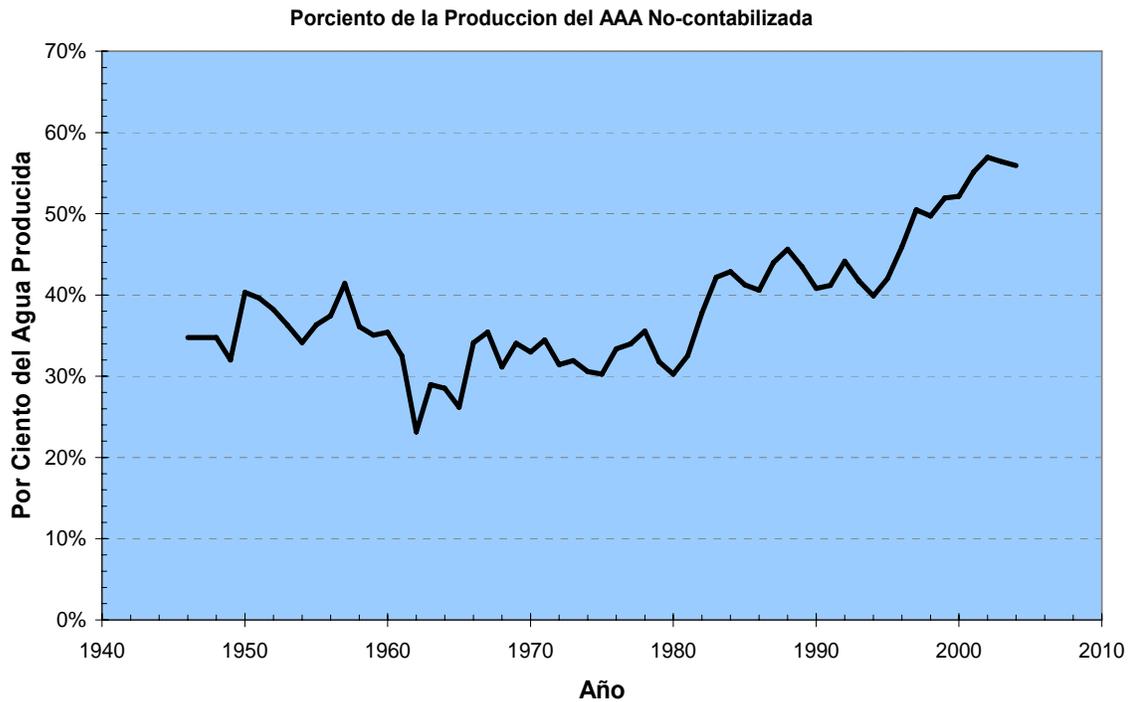


Ilustración 6.18 Producción del agua no-contabilizada en el sistema de la AAA

Entre los diversos elementos que contribuyen al aumento del agua no-contabilizada se encuentran los siguientes:

1. **Agua entregada pero no-contabilizada:** Hay varias condiciones bajo las cuales la AAA puede entregar agua a los consumidores sin contabilizar las mismas. Éstas incluyen: metros averiados que reflejan lectura menores a la servida; conexiones desconocidas y sin metros; y el hurto del agua. La Ilustración 6.19 muestra un “*pillo de agua*” instalado en una acometida residencial.



Ilustración 6.19 Muestra de un “pillo de agua” instalado

Otro problema relacionado al agua no-contabilizada es la subestimación del consumo. La AAA cuenta con muchos contadores instalados hace más de diez años, por lo que están propensos a errores de medición. Esta situación ha sido reconocida por la AAA y se ha implantado un programa de sustitución de contadores de consumo con la meta de instalar 100,000 contadores nuevos por año. La AAA también está en el proceso de verificar el número de metros instalados contra el número de posibles consumidores para minimizar el problema del consumo desconocido o ilegal.

2. **Sobre-estimación de la producción:** La sobre-estimación de la producción al igual que la sub-estimación del consumo produce el mismo resultado, un volumen mayor de agua no-contabilizada. Muchas plantas de filtración tienen metros con problemas conocidos de medición, incluyendo plantas sin metros. La AAA inició en el año 2006 un programa agresivo para re-calibrar o instalar metros nuevos en todas las plantas de filtración con un itinerario de

dos años. Sin embargo, el cotejo y reparación o re-emplazo de los metros de los pozos aún no está en el programa.

3. **Pérdidas físicas:** Las filtraciones de los tubos de transmisión y distribución, y el desborde de los tanques, son pérdidas físicas del agua. Las causas para la rotura de tuberías y la consecuente filtración incluyen exceso de presión en las líneas, prácticas de construcción inadecuadas, tuberías deterioradas, golpes de ariete, mantenimiento inadecuado, válvulas inoperantes en tanques y la falta de un enfoque de ingeniería en el análisis del problema de las pérdidas físicas.

En la actualidad se sabe que los elementos mencionados están presentes y contribuyen al problema, pero no se sabe cuál es la magnitud de cada uno. El problema del agua no-contabilizada no se puede solucionar sin saber dónde y por qué existen tantas pérdidas. Para dirigir un esfuerzo efectivo para reducir la cantidad de agua no-contabilizada a niveles aceptables, es necesario poder contestar las siguientes preguntas básicas:

- ¿Qué porcentaje del agua no-contabilizada se debe a errores en los metros de producción?
- ¿Qué porcentaje del agua no-contabilizada se debe a errores en los metros de los consumidores o al hurto del agua?
- ¿Qué porcentaje del agua no-contabilizada son filtraciones en la red de distribución? y ¿Dónde y por qué ocurren las filtraciones?

A la vez que se identifican situaciones que contribuyen al problema hay que determinar cuáles son los patrones que se repiten y cuáles serán los métodos más costo-eficientes para corregirlos.

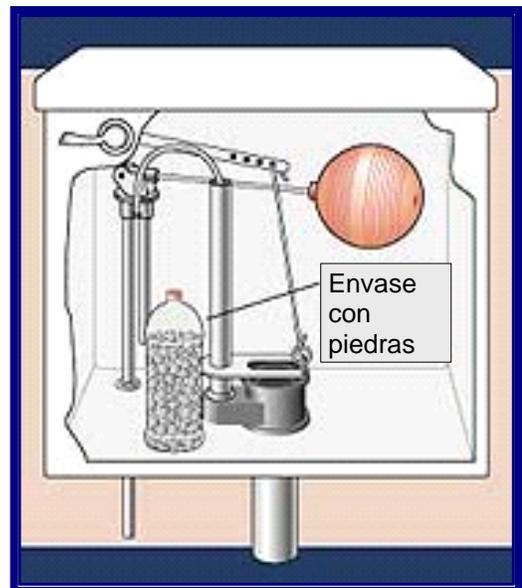
Los esfuerzos realizados por la AAA hasta el presente han estado dirigidos a resolver el asunto de las pérdidas mediante el reemplazo o arreglo de las tuberías que reportan filtraciones o averías. Sin embargo, esta alternativa no ha logrado

reducir las pérdidas. La estrategia a implantar para atender este problema requiere un enfoque que vaya más allá de reparar las filtraciones que puedan ser detectadas. El enfoque debe ser uno dirigido a prevenir las filtraciones y no solamente a reparar las mismas. Para prevenir las filtraciones es necesario visualizar el problema como uno de ingeniería que requiere determinar las causas de las roturas frecuentes e implantar las acciones necesarias para prevenir su repetición futura.

6.8.2 Conservación de agua por los consumidores residenciales

El análisis económico sugiere que el mecanismo más adecuado para promover la utilización eficiente del recurso es aumentar el precio, ya que un precio alto ofrece un incentivo directo al consumidor para buscar economías en su uso. De acuerdo a dicho análisis, los dos aumentos recientes en el precio del agua impuestos por la AAA ofrecen incentivos importantes para la conservación del agua.

Tomado de University of Illinois Extension, College of Agricultural, Consumer and Environmental Sciences



La mayor utilización del agua dentro de la casa es en el baño (el inodoro, lavamanos y la ducha). En este caso existen opciones para reducir sustancialmente la utilización del agua, sin que el consumidor sufra inconvenientes. La ley federal establece como requisito la instalación de inodoros de bajo consumo de agua, con un máximo de 1.6 galones (6 litros) por uso. Por otro lado, las duchas de flujo reducido desde 0.5 gpm hasta 1.5 gpm están disponibles en el comercio local.

Los hábitos del uso de agua también influyen en la conservación del recurso. Una ducha abierta consume aproximadamente 1.5 galones por minuto por lo que no cerrarla mientras se afeita representa un desperdicio de 5 galones. Los usos del

agua fuera de la casa no son sustanciales en Puerto Rico. Sin embargo, este uso también puede mejorar su eficiencia cuando se equipa la manguera con un pistero que queda cerrado a menos que se apriete, para evitar que la manguera pierda agua por sí sola cuando no esté en uso.

6.8.3 Pérdidas en los canales de riego

En Puerto Rico operan tres sistemas de riego administrados por la AEE que, además de dotar de agua a las actividades agrícolas, son de gran importancia para el abasto doméstico (véase Ilustración 6.20).

Distrito de Riego de Isabela

El Distrito de Riego de Isabela, en la Región Noroeste, se alimenta del Embalse Guajataca y distribuye sus aguas a través de los canales de derivación de Isabela, Moca y Aguadilla. La tasa de entregas al canal se ha informado en más de 44 mgd. Un total de seis plantas de filtración de agua potable, con una producción combinada de 26 mgd, se alimentan del Embalse Guajataca. Sin embargo, no existe una buena contabilización del volumen de agua utilizada por los demás usuarios del sistema, principalmente agricultores e industrias. Tampoco existe información actualizada relacionada a las pérdidas por el canal de hormigón luego de las reparaciones efectuadas durante el año 2006 en los tramos del canal más cercano al embalse.

Como resultado, este sistema presenta un problema de información incompleta respecto a su balance de agua y la posibilidad de maximizar la utilización del rendimiento seguro del embalse, el cual no tiene problemas significativos de sedimentación. El canal de riego pasa por encima de las formaciones de caliza y las filtraciones entran al sistema de agua subterránea, donde no hay pozos. Es decir, las pérdidas por filtración de los canales en este sistema de riego representan pérdidas netas, no recuperadas en otro punto. Esto hace prioritario el control de pérdidas en este sistema de riego.

Distrito de Riego del Valle de Lajas

El Distrito de Riego del Valle de Lajas, en la región Suroeste, satisface las necesidades de producción de energía hidroeléctrica así como el abasto de agua para usos agrícolas y domésticos a través de un complejo que integra las aguas provenientes de los embalses Yahuecas, Guayo, Prieto, Lucchetti y Loco. Del mismo se alimentan cinco plantas de filtración de agua potable, con una capacidad de diseño combinada de 8.4 mgd. Durante el año 2003, los agricultores del área utilizaron un total de 15.7 mgd para riego.

Los canales de distribución del Distrito de Riego del Valle de Lajas están revestidos en hormigón y son objeto de un mantenimiento adecuado (véase Ilustración 6.21). Al presente, el rendimiento seguro del sistema se estima en 38 mgd^c. Al ajustar el mismo por un estimado de 10 por ciento de pérdidas en los canales, se obtiene una disponibilidad neta de 34.2 mgd. Las pérdidas no se consideran un problema mayor en este sistema (CSA, 2005).



Ilustración 6.21 Punto de inicio del canal de distribución del Distrito de Riego del Valle de Lajas

^c CSA, 2005, “Viabilidad de Aumentar el abasto de agua para usos domésticos y agrícolas en el Valle de Lajas”, Informe a la AAA, San Juan.

Distrito de Riego de la Costa Sur

El Distrito de Riego de la Costa Sur se divide en las secciones Este y Oeste. El área de Patillas, Arroyo, Guayama y Salinas opera la sección Este, mientras que en la zona de Juana Díaz y Santa Isabel opera la Sección Oeste. Las fuentes principales de abasto de la Sección Este son los embalses Carite y Patillas. Las plantas de filtración Farallón, Guamaní y Guayama se alimentan de las aguas del embalse Carite en Cayey, y la planta Patillas, del embalse del mismo nombre. La capacidad combinada de estas plantas asciende a 14.1 mgd. Los agricultores suscritos a este Sistema de Riego utilizaron 3.7 mgd de agua para la irrigación de sus fincas.

La Sección Oeste se suple del Embalse Guayabal en Juana Díaz, el cual a su vez se alimenta a través de túneles que cruzan la Cordillera Central, provenientes de los embalses Guineo y Matrullas. El mismo es utilizado exclusivamente para propósitos agrícolas, ya que el Embalse Toa Vaca, aguas arriba de Guayabal, provee agua para uso doméstico. En el año 2003 dicho sistema de riego registró entregas a los agricultores ascendentes a 10.9 mgd.

La Sección Este del Distrito de Riego de la Costa Sur también presenta un sistema de canales eficiente con niveles de pérdidas de alrededor de un 10 por ciento. Por su parte, la Sección Oeste refleja pérdidas en los canales del orden de un 20 por ciento del agua. No obstante, las pérdidas en los canales de riego de la Región Sur forman parte del balance hidrológico de los acuíferos del área. Una reducción en el nivel de pérdidas, al reparar los canales, tendrá el efecto de disminuir la recarga de los acuíferos impactando adversamente los niveles freáticos y la calidad del agua de pozos que operan en la actualidad. Debido a que el agua que se filtra de los canales es recuperada por los pozos de la zona, las pérdidas por infiltración en este sistema de riego no representan una pérdida neta de agua.



6.8.4 Estrategias recomendadas

1. Para generar la información necesaria para conocer la contribución de cada componente al problema del agua no-contabilizada de la AAA y la costo-efectividad de diferentes estrategias para el control de las pérdidas físicas, se recomienda un programa piloto en el cual se realicen auditorías detalladas en cinco sectores representativos del sistema de la AAA. En cada caso se debe medir el agua que entra al área, el consumo real y determinar las pérdidas. El subsiguiente paso será identificar y eliminar las filtraciones de manera permanente y, a base de esta experiencia, elaborar estrategias costo-efectivas para atender el problema a nivel Isla.
2. Como modo de apoyo al consumidor en la conservación de agua, se recomienda la distribución de información escrita (talonario de cobro, cuñas radiales, prensa escrita, Internet, etc.) sobre los ahorros, tanto en agua como en dinero, que pueden lograrse con distintas estrategias de conservación, incluyendo la sustitución de equipos de plomería convencionales por equipo conservador de agua. Este esfuerzo debe concentrarse principalmente en duchas, inodoros y grifos. Experimentos llevados a cabo en Puerto Rico indican que con sólo cambiar el inodoro y la ducha se reduce el consumo de agua dentro de la casa en un 25 por ciento.

De ocurrir una sequía, con el racionamiento del, agua se debe hacer disponible también los “kits” de plomería eficiente. Éstos contienen materiales tales como cabezal de ducha, aireador de grifos, un dispositivo para la reducción de flujos en el inodoro y tabletas de detección de fugas.

3. En el Sistema de Riego de Isabela se recomienda una auditoría de los usos del agua para determinar con cuánta agua adicional pueden contar los usuarios, incluyendo la creciente utilización por las plantas de filtración de la AAA.

6.9 Manejo de sequía

La mayoría de las regiones del País presentan situaciones de déficit en la disponibilidad de agua bajo condiciones de sequía. Ante esta situación es necesario racionalizar la operación de los sistemas de abasto de los embalses de forma que se haga el mejor uso posible de los recursos disponibles.

6.9.1 Criterio para iniciar racionamiento

Los niveles en los embalses experimentan reducciones durante la época de estiaje, y los niveles se recuperan con la llegada de las lluvias sin tener que reducir la tasa de extracción de agua. Sin embargo, en los años en que si ocurre una sequía fuerte es necesario establecer un racionamiento y reducir el caudal que se extrae de los embalses, para evitar que el embalse se seque.

Iniciar un racionamiento de agua muy temprano impone una incomodidad y gastos innecesarios a la comunidad. Por el contrario, al iniciar el racionamiento muy tarde se gasta la reserva que se necesitará luego, lo que puede provocar un racionamiento mucho más severo.

Al presente, no existe un criterio sobre la base de un análisis hidrológico para determinar cuándo se debe iniciar el proceso de racionamiento. La preparación y utilización de criterios para determinar el inicio y severidad de un racionamiento es un componente esencial en la optimización de la utilización del recurso.

6.9.2 Manejo conjunto de fuentes de agua

Los eventos de sequía no ocurren de forma simultánea en todas las cuencas hidrográficas del País. Los sistemas de abasto de agua interconectados se alimentan de fuentes ubicadas en diferentes cuencas y su operación permite obtener un rendimiento sostenible mayor que la suma del rendimiento seguro de sus componentes.

En Puerto Rico existen varias instancias de sistemas interconectados. El mayor de éstos es el que integra las regiones Norte, Metropolitana y Este a través del Superacueducto de la Costa Norte. La integración del sistema de producción de agua representa una estrategia útil para minimizar el impacto de las sequías, ya que el déficit de una sequía local se puede suplir mediante la transferencia de una región no afectada.

A través de la operación conjunta de las fuentes de aguas superficiales y subterráneas de una región, se puede maximizar el rendimiento de las mismas aprovechando el volumen de almacenaje dentro de los acuíferos de la misma manera que se aprovecha el volumen de agua almacenada dentro de los embalses. Durante periodos de precipitación normal se debe dar preferencia a la producción de agua proveniente de fuentes superficiales y disminuir la extracción de agua subterránea lo que maximiza el volumen de almacenaje en los acuíferos. En los periodos de sequía, se puede aumentar la extracción de agua subterránea, mientras que la producción de las aguas superficiales está limitada.

La preparación de modelos de optimización del sistema hidrológico permite determinar el aumento potencial en el rendimiento del sistema que se obtiene mediante la aplicación de tasas variables de extracción de pozos, embalses y ríos. Este análisis es de mayor relevancia en la Costa Norte donde existen varios embalses, un acuífero grande y tubería de interconexión (Superacueducto).

6.9.3 Estrategias de manejo

1. Se recomienda llevar a cabo un análisis hidrológico para proveer guías técnicas para determinar cuándo se debe iniciar el racionamiento y por cuánto se deben reducir las entregas de agua a nivel Isla.
2. Se recomienda un estudio de la utilización conjunta de los recursos de agua de la Costa Norte, enfocando en maximizar el rendimiento del sistema compuesto tanto de fuentes superficiales como subterráneas.

6.10 Fuentes de agua no-convencionales

En Puerto Rico existen varias alternativas de fuentes de abasto no-convencionales. Ante las limitaciones que confrontan las fuentes que sostienen la disponibilidad actual, algunas de estas alternativas pueden representar estrategias útiles para Puerto Rico.

6.10.1 Reutilización de las aguas sanitarias

Las aguas usadas tienen el potencial de servir como una fuente de abasto suplementaria de agua para diversos usos en Puerto Rico. En la Isla se generan aproximadamente 300 mgd de aguas usadas, principalmente aguas sanitarias producidas en las plantas de tratamiento que opera la AAA (véase Tabla 6.6). Aunque el sector industrial genera aproximadamente 77 mgd de aguas usadas (JCA, 2003), la mayor parte son reutilizadas y las descargas al medioambiente son muy reducidas. En comparación, la AAA genera un promedio de 223 mgd de aguas sanitarias, de las cuales sólo se reutiliza el efluente directo de la Planta de Tratamiento de Guayama (hasta 4 mgd) para enfriamiento industrial. Indirectamente se reutilizan hasta 35 mgd de las aguas tratadas por la AAA para suplir abasto público, principalmente en las cuencas del Río Grande de Loíza, el Río La Plata y el Río Grande de Arecibo. Descargas de las plantas de tratamiento operadas por la AAA en varios municipios en estas cuencas alimentan los embalses de Carraízo, La Plata y Caonillas-Dos Bocas, las cuales a su vez suplen plantas de filtración de agua potable.

Existe una variedad de oportunidades para la reutilización de agua, particularmente para riego. Actualmente se están reutilizando aguas tratadas al nivel secundario para el riego de varios campos de golf en la Isla. Sin embargo, el volumen mayor de las aguas tratadas proviene de plantas de aguas costeras que solamente proveen un nivel de tratamiento primario antes de descargar mar afuera y no están próximas a áreas de riego. La recarga de acuíferos es otra alternativa que se puede considerar como una opción de reutilización, particularmente en la Costa Sur.

La descarga hacia cuerpos de agua afluentes a los embalses es la técnica de reutilización que más se practica en Puerto Rico actualmente y que tiene mayor potencial para el futuro. Como se mencionó anteriormente, los embalses Carraízo y La Plata reciben aguas tratadas de las comunidades aguas arriba que descargan en los ríos tributarios de éstos. El embalse de Fajardo ha sido diseñado para aceptar el efluente de la planta de tratamiento regional para así aumentar su rendimiento seguro de su diseño original de 12 mgd hasta 18 mgd incluyendo el agua reutilizada. Uno de los aspectos más interesantes de enviar el agua hacia los embalses es que no siempre se requiere un proceso de reciclaje continuo para lograr un aumento significativo en su rendimiento seguro. En el caso de Fajardo la reutilización es necesaria sólo cuando el nivel del lago empieza a bajar, una situación que no ocurre todos los años. De esta manera se puede aumentar el rendimiento seguro con un mínimo de dependencia en agua reutilizada. Además, en Fajardo se recomendó que las aguas tratadas sean pasadas a través de un humedal artificial para tratamiento adicional antes de ser reciclada hacia el embalse.

La utilización de aguas sanitarias tratadas como posible fuente de abasto para consumo humano merece mayor estudio debido a la posibilidad de efectos adversos sobre la salud pública. Los sistemas de tratamiento de aguas sanitarias ayudan a reducir los sólidos suspendidos, a desinfectar, y en algunos casos como las plantas de tratamiento terciario, a reducir la concentración de fosfatos y nitratos en los efluentes. Los sistemas de filtración de aguas crudas proveen para la reducción de sedimentos suspendidos y la desinfección. Sin embargo, ninguno de estos sistemas provee para la eliminación efectiva de compuestos sintéticos relacionados al uso de medicamentos, tales como esteroides, anticonceptivos, antidepresivos y antibióticos. Algunos de estos compuestos tienen la capacidad de inducir efectos hormonales, provocando cambios neurológicos y fisiológicos en seres vivientes. Aunque al presente se desconoce el efecto sobre la salud pública por utilizar aguas sanitarias tratadas como fuente de abasto para consumo humano, un número creciente de estudios apuntan hacia impactos en la salud de especies de vida silvestre, particularmente sobre las acuáticas. Hasta tanto esta relación no sea debidamente investigada y descartada, es prudente ser preventivos y evitar exponer

a riesgo innecesario la salud de los abonados servidos por el reciclaje de aguas usadas.

6.10.2 Desalinización de aguas salinas y salobres

Las aguas de mar tienen una salinidad (concentración de sólidos disueltos totales) de aproximadamente 34,000 miligramos por litro (mg/l), mientras las aguas salobres se definen como las que contienen entre 1,000 y 10,000 mg/l de sólidos disueltos totales. La EPA y el Departamento de Salud recomiendan que la concentración de sólidos disueltos totales en el agua potable no exceda 500 mg/l. Puerto Rico cuenta con abastos ilimitados de aguas salinas en el océano. Además, en las zonas costaneras de las Regiones Norte y Sur de la Isla existen áreas con aguas salobres con potencial para alimentar plantas desalinizadoras. La tecnología de Osmosis Invertida (RO, "reverse osmosis" en inglés), es el proceso desalinizador más económico disponible, si opera en conjunto con una planta termoeléctrica, como se utiliza en las Islas Vírgenes.

Las membranas de osmosis invertida consisten de poros tan pequeños que permiten pasar el agua pero no las sales contenidas en la misma, aplicando una presión de aproximadamente 600 libras por pulgada cuadrada en el caso de agua del mar. En términos generales, la eficiencia de los sistemas de desalinización mejora mientras menor es la salinidad del agua. El rendimiento del agua potable en relación al agua de salmuera que regresa al mar es del orden de 30 por ciento al tratar agua del mar. Dicho rendimiento puede aumentar hasta cerca de 60 por ciento al utilizar agua con una concentración menor de 10,000 mg/l de sólidos disueltos en lugar de agua de mar (AWWA, 2003), lo que representa una reducción en costo.

Las membranas son altamente sensibles a taparse de forma irreversible con cualquier contaminante en el agua, incluyendo los sedimentos más finos y moléculas orgánicas. Por ende, las plantas de osmosis invertida típicamente requieren de sistemas de filtración con múltiples etapas como pre-tratamiento y aún las plantas más modernas sufren de este problema. Por ejemplo, la planta de

osmosis invertida de 25 mgd construida en Tampa, Florida, empezó operación intermitente en 2003, pero su sistema de pre-tratamiento no fue adecuado para manejar la calidad de las aguas y fue necesario cerrar la planta luego de producir un volumen de agua equivalente a unos 200 días de operación. En Puerto Rico, la planta desalinizadora de Culebra, un sistema de osmosis invertida de 0.1 mgd de capacidad, también sufrió problemas severos relacionados a su sistema de pre-tratamiento.

Varios lugares con potencial para el desarrollo de plantas desalinizadoras utilizando agua salobre que se han identificado incluyen el Caño Tiburones, la Laguna Tortuguero, los acuíferos costaneros en la Región Norte en Campanillas y Dorado y los acuíferos aluviales de la Costa Sur en las áreas de Coamo-Santa Isabel y Salinas-Guayama.

El agua salobre en el Caño Tiburones y de la Laguna Tortuguero contiene concentraciones altas de materia orgánica, incluyendo material orgánico disuelto cuya remoción es muy difícil, por lo que se podrían anticipar problemas potencialmente severos en relación al pre-



tratamiento. Este problema del material orgánico no existe al utilizar agua salobre de los acuíferos, pero la concentración de la salinidad en la zona de extracción no quedará inalterada una vez se someta el acuífero a un bombeo continuo. Se anticipa un aumento gradual en la salinidad de la zona de bombeo, reduciendo progresivamente el rendimiento del sistema desalinizador.

Los factores principales que limitan el potencial de implantar la desalinización en Puerto Rico se resumen a continuación:

1. El costo de la desalinización de agua es mucho mayor que el producir agua potable de fuentes superficiales y subterráneas. En el año 2003, el USGS estimó que el costo promedio de desalinizar agua utilizando RO era de aproximadamente \$3 por cada 1,000 galones, sin incluir el costo de depreciación del equipo. En comparación, el costo de producción de agua del Superacueducto de la Costa Norte es de menos de \$0.75 por cada 1,000 galones^d.
2. Se requiere una presión superior a las 600 libras por pulgada cuadrada para la operación de una planta de osmosis invertida, por lo que las plantas desalinizadoras consumen energía en grandes cantidades y el costo de desalinización de agua aumenta en proporción directa con el costo de la energía. Dado el historial de incremento en el costo real de la energía, se puede anticipar que el costo de la desalinización aumentará con el tiempo.
3. La vida útil de las plantas desalinizadoras es mucho menor que la de cualquier fuente convencional, superficial o subterránea. El agua salina o salobre es corrosiva, por lo que afecta con más rapidez todos los componentes de una planta desalinizadora. Las plantas desalinizadoras requieren una operación cuidadosa, mantenimiento constante, el reemplazo de las membranas y rehabilitaciones generales para extender su vida útil más de 20 años. El costo de la inversión capital inicial más los costos de operación y mantenimiento incrementan sustancialmente el costo de la desalinización.
4. Otros inconvenientes de la tecnología incluyen la disposición de la salmuera de una planta desalinizadora, la necesidad de postratamiento para estabilizar el agua desalinizada que es corrosiva y la necesidad de mejorar sistemas de transmisión para poder bombear el agua desde el nivel del mar hasta las áreas de servicio.

Al presente, la opción de la utilización de agua superficial y subterránea, en combinación con la utilización eficiente del agua disponible, representa una

^d Esta comparación de costo se realizó anterior a las alzas en el precio del petróleo en 2005.

alternativa adecuada para suplir las necesidades anticipadas para las próximas décadas. Ante este panorama, no se vislumbra la necesidad de recurrir a procesos de desalinización en Puerto Rico en un futuro previsible.

6.10.3 Cisternas para recoger agua de lluvia

La utilización de cisternas para recoger la lluvia de los techos ha sido recomendada como una alternativa a considerar en las áreas húmedas de Puerto Rico, particularmente en las zonas rurales. Estos sistemas han sido utilizados por siglos en islas secas como son las Islas Vírgenes.

Los dos impedimentos principales a la utilización de agua de cisternas de lluvia son el costo y la calidad del agua. Para proveer un sistema de abasto confiable, se requiere de cisternas grandes con varios miles de galones por casa, para proveer el volumen necesario para suplir agua durante periodos sin lluvias. Esto representa una inversión grande, sin incluir el costo del sistema de bombeo y los problemas de mantenimiento que representan.

En las cisternas que se suplen de escorrentía del techo no existen mecanismos de control de polvo u otro material que cae en el techo, o el acceso al techo de animales que pueden incluir pájaros y ratones. Por ende, la calidad de la escorrentía del techo no está garantizada. La desinfección se llevará a cabo casa por casa de forma individual, sin un procedimiento adecuado que asegure que se cumple con los criterios de calidad para agua potable al nivel de toda la comunidad.

Ante los impedimentos que representan los costos altos y la falta de control de calidad, no se recomienda la construcción de cisternas de lluvia como una alternativa de abasto de agua potable en sustitución de un sistema público. No debe existir ningún impedimento para que estos sistemas sean utilizados individualmente, como es costumbre en áreas rurales de Culebra. Sin embargo, no se recomienda que el Estado lo apoye como una alternativa a sistemas centralizados de agua potable.

La mejor alternativa, la cual ha sido implantada a gran escala, es la de ubicar en los techos tanques cerrados, cuyo volumen representa pocos días de uso, suplidos y llenados por agua de la AAA o sistemas independientes. De esta manera el tanque se llena con agua cuya calidad está sujeta a pruebas de calidad y el agua se puede servir a la casa por gravedad.

6.10.4 Aprovechamiento de aguas contaminadas

En Puerto Rico existen varias zonas acuíferas contaminadas por químicos. Muchas de éstas se encuentran en el proceso de limpieza y tienen potencial para ser aprovechadas nuevamente en el futuro. Al presente, existen técnicas probadas de tratamiento para aguas contaminadas con químicos volátiles mediante mecanismos de aereación, que permitirían que las mismas pudieran ser utilizadas para fines domésticos. Ante las limitaciones en la disponibilidad de abastos que confrontan las Zonas Norte y Caguas-Gurabo, la viabilidad de esta opción debe ser evaluada en todos sus méritos.

6.10.5 Estrategias para fuentes no-convencionales

Entre las alternativas para el aprovechamiento de fuentes de agua no-convencionales con el potencial mayor para aprovechamiento se encuentra la reutilización del agua tratada. Existen oportunidades para que esta agua se reutilice mediante: (1) sistemas de riego, (2) sistemas de recarga a los acuíferos y (3) reciclaje directamente hacia los embalses. Para sistemas de riego se requiere un nivel de tratamiento secundario y, en el caso de recarga con potencial para eventual utilización como agua potable, se debe utilizar como mínimo un nivel de tratamiento terciario avanzado.

6.11 Abasto confiable

En el Capítulo 5 de este Plan se realizó un análisis de la disponibilidad del recurso para cada una de las regiones del País. Del análisis se desprende que en la actualidad Puerto Rico enfrenta un déficit de disponibilidad de agua bajo condiciones de sequía de alrededor de 100 mgd (véase Ilustración 6.22).

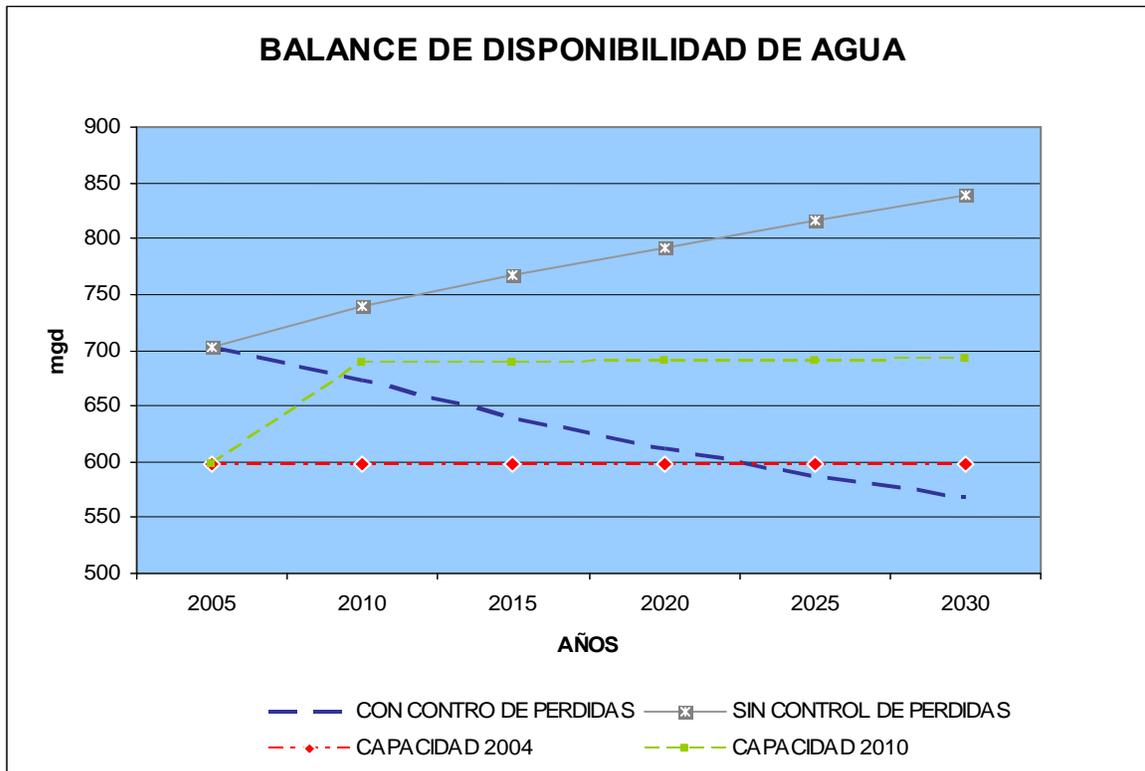


Ilustración 6.22 Balance de disponibilidad de agua

Por otra parte, existen situaciones que ocurren a nivel local donde algunas comunidades, principalmente en sectores de elevación alta o en zonas retiradas de los centros de abasto regional, experimentan deficiencias de abasto del recurso aún en situaciones de precipitación normal. Como se puede observar en la Ilustración 4.3, se han identificado 141 sectores que experimentan problemas de abasto significativo.

La interrupción del servicio de agua potable resulta en disloques sociales y pérdidas de productividad económica que deben ser evitados. Es imprescindible que la AAA provea un servicio con un nivel de confianza que corresponda a los estándares de la industria a nivel internacional. Para el sector doméstico, se ha utilizado un nivel de servicio normal el 99 por ciento del tiempo, con un abasto igual a 75% del caudal normal durante períodos de racionamiento, como base para el diseño de los sistemas de abasto.

Por otra parte, es necesario asegurar la disponibilidad de agua para cubrir las necesidades actuales y futuras del sector agrícola. Se debe reservar abastos suficientes para satisfacer la demanda latente para irrigación de los terrenos con alto potencial agrícola del Valle de Lajas, los Valles del Sur y otros sectores del País.

El Plan de Mejoras Capitales de la AAA, en el área de acueductos, incluye una serie de proyectos para atender las necesidades de abasto de agua potable de los diversos sectores socioeconómicos del País. Entre éstos se considera la construcción de los embalses que se presentan en la Tabla 6.8. Los embalses nuevos, excepto el Valenciano, han sido diseñados como estructuras fuera del cauce para evitar los problemas de sedimentación.

Además, se proponen obras que aprovechan gran parte del margen de rendimiento seguro disponible en los embalses Patillas, Carite, Cidra, Guajataca, Toa Vaca, Cerrillos y el conjunto de embalses que integran el Sistema de Riego del Valle de Lajas. En términos de nuevas tomas directas del río, la más significativa es la que alimentará la planta de filtración nueva de 10 mgd en el Río Culebrinas. Además, se proponen una serie de ampliaciones y sustituciones de plantas de filtración que, en términos generales, aumentan la producción de agua potable, aunque no así la disponibilidad del recurso en épocas de sequía, ya que su capacidad de diseño supera el rendimiento seguro de la fuente. Otras obras propuestas, de carácter no tradicional, son la optimización de la operación para maximizar la producción de agua.

Tabla 6.8 Embalses propuestos por la AAA, 2007

Embalse	Rendimiento Seguro	Estatus
Embalse Qda. Las Lajas, Río Grande	20 mgd	En estudio
Embalse Beatriz, Caguas	14 mgd	En estudio
Embalse Río Blanco, Naguabo	18 mgd	En construcción
Embalse Valenciano, Juncos	14 mgd	En estudio ^e
Embalse Fajardo, Fajardo	12 mgd	Operacional
Embalse Casey, Añasco	55 mgd	En estudio

^e Rendimiento para volumen útil de 11 Mm³.

El Programa de Mejoras Capitales a mediano plazo (AAA, 2003) en el área de acueductos (véase Ilustración 6-22), aumenta la disponibilidad de agua potable en aproximadamente 100 mgd. La implantación conjunta de este programa y el programa de reducción de pérdidas de un uno por ciento (1%) anual, permitirá superar el déficit en disponibilidad del recurso para el año 2010. No obstante, de no lograrse implantar el programa de reducción de pérdidas, la capacidad del sistema de abasto tendría que aumentar en aproximadamente 250 mgd para poder cubrir las necesidades de producción a largo plazo. Este escenario plantea costos económicos extraordinarios e impactos significativos sobre el medio ambiente, lo que incrementa aún más su costo.

El proceso de planificación de recursos de agua es uno de naturaleza continua. El Plan Integral de Recursos de Aguas es un documento que identifica problemas, y propone estrategias y proyectos para atenderlos con el nivel de información disponible en el momento en que se prepara. Ante el grado de incertidumbre existente respecto al índice del agua no-contabilizada, el Capítulo 8 recomienda proyectos específicos para cuantificar sus componentes y elaborar estrategias costo efectivas para minimizar el mismo. Los resultados de estos estudios proveerán información adicional que permitirá realizar un ejercicio de planificación superior al que se incluye en el presente documento del Plan. En esta dirección, proponemos que el Plan sea revisado una vez se cuente con información precisa sobre la naturaleza y magnitud del problema de las pérdidas en las redes de distribución de la AAA. Se entiende que este proceso debe ocurrir en un período de cuatro años.

El DRNA aprobará sólo aquellas obras de aumento de abasto que cumplan con los criterios de sostenibilidad previamente mencionados para cubrir déficits actuales. Las obras que se habrán de considerar son sólo aquellas que, a pesar de un programa de reducción en el agua no-contabilizada, se demostró que son necesarias en el Capítulo 5 de este Plan. Obras que aumenten la capacidad sobre cantidad deberán ser ajustadas para cumplir con dichos criterios. Además, la AAA deberá presentar el programa de reducción en necesidades de producción del

programa integrado de conservación para el área de distribución donde se propone la obra. Es importante señalar que estas expresiones no constituyen un endoso a ninguna obra en particular. Cada propuesta de la AAA deberá cumplir con el proceso de solicitud de endoso del DRNA y la eventual solicitud de permiso de construcción y franquicia que corresponde en ley. Los posibles impactos ambientales de cada propuesta deberán ser detallados en los documentos requeridos por las agencias reguladoras con inherencia.

6.12 Solución de conflictos de usos existentes y potenciales



Al presente, el conflicto principal en Puerto Rico respecto al uso de los recursos de agua está entre las necesidades ambientales y el abasto doméstico. No obstante, también existen o pueden existir conflictos de uso entre varios usuarios, siendo el principal el conflicto entre el

uso agrícola y el doméstico. La disponibilidad del agua tanto para los usos ambientales como los usos del riego agrícola, ha disminuido por la creciente extracción para suplir sistemas de abasto doméstico. El sector de producción hidroeléctrico también se afecta, ya que casi todos los embalses que suplen a los sistemas de riego también incluyen un componente hidroeléctrico.



La disminución de uso de agua para propósitos agrícolas ha generado un margen de disponibilidad que ha sido aprovechado para propósitos domésticos. Al presente, el agua disponible es suficiente para satisfacer las demandas de ambos sectores. No obstante, de haber un aumento en la actividad agrícola que aproveche

el potencial de las tierras disponibles, se puede desarrollar un conflicto entre usuarios que compiten por el mismo recurso. Las áreas que pueden presentar conflictos de uso en el futuro son las asociadas a los distritos de riego del Sur y del Valle de Lajas.

El Sistema de Riego del Suroeste consiste de cinco embalses interconectados para generación hidroeléctrica y que suplen agua para riego al Valle de Lajas y varias plantas de filtración. Existe también la posibilidad de construir un embalse pequeño adicional fuera de cauce aguas abajo del Embalse Loco. En años con abundancia de lluvia hay desbordes sustanciales en el Embalse Loco, pero en años de sequía hay un déficit de agua.

En este sistema se requiere una simulación hidrológica para la optimización del sistema para identificar las alternativas de manejo que pueden maximizar su rendimiento seguro, a la vez que se maximiza el rendimiento hidroeléctrico. También se requiere un análisis del impacto de sedimentación sobre este sistema. Un estudio preliminar de optimización con este objetivo está actualmente en progreso como parte de los trabajos de la AAA para aumentar el abasto de agua en el Municipio de Yauco.

Otro componente esencial es la utilización eficiente del agua suministrada por el sistema, tanto en el sector municipal como en el sector agrícola. La eficiencia del riego es particularmente importante en el sector agrícola del Valle de Lajas, ya que las aguas perdidas por ineficiencia en las prácticas de riego se pierden del sistema hidrológico de agua aprovechable. Esto es muy distinto a las demás áreas de la Costa Sur, donde las aguas de riego aplicadas en exceso recargan un acuífero con agua de buena calidad y apta para el riego. El acuífero del Valle de Lajas no contiene agua con calidad adecuada para el riego.

En la Costa Sur el sector municipal ha aumentado progresivamente el uso del agua de los sistemas de riego y también ha incrementado su extracción de agua subterránea. En esta zona la mejor opción es buscar la forma de aumentar la recarga hacia los acuíferos y destinar las aguas tratadas a usos terrestres en vez de

descargar al mar. Esto podría incluir el riego con aguas tratadas o la utilización de aguas tratadas para la recarga del acuífero.

6.13 Uso del terreno

Resulta incuestionable la relación que existe entre las actividades que se efectúan sobre el territorio y su impacto sobre el recurso agua, su calidad y disponibilidad. Algunas actividades sobre el territorio tienen un impacto mayor en la calidad y disponibilidad del agua. La deforestación para dar paso a construcciones urbanas o a la infraestructura que ésta requiere, tiene consecuencias directas en la erosión de los suelos y en los procesos de sedimentación de los cuerpos de agua y embalses. Ello afecta igualmente la calidad del recurso y abona al deterioro de las condiciones necesarias para el sostenimiento de la biodiversidad asociada. También, tiene consecuencia en los costos en que se tiene que incurrir para procesar el agua para el consumo humano. En cuanto a la extensión de la mancha urbana, ésta tiene implicaciones muy perjudiciales pues se impermeabilizan las áreas de recarga de los cuerpos de agua subterránea. Como se puede



observar en la Ilustración 6.23, construcciones residenciales extensas ocurren en corredores paralelos a las costas Norte, Sur y Oeste y en los valles interiores de la Isla. Muchos de estos terrenos constituyen áreas de recarga de los principales acuíferos del País.

Este patrón de crecimiento intensivo en el uso de terrenos ha impactado una cantidad significativa de zonas geográficas asociadas a las áreas de recarga de los principales acuíferos del País.

Distribución de la Expansión Urbana en Puerto Rico

(según datos del Censo de E.U. del 2000)



Ilustración 6.23 Expansión urbana

Las consultas de ubicación radicadas en la Junta de Planificación muestran la tendencia del *desparrame urbano*, dominando las actividades urbanas sobre el territorio y amenazando principalmente las cuencas del Río Grande Loíza, Río La Plata, Río Piedras-Río Puerto Nuevo, Río Guaynabo-Río Bayamón, Río Cibuco, Río Grande de Manatí, Río Grande de Arecibo y Río Guanajibo (véase Ilustración 6.24). Por otro lado, actividades económicas como la agrícola, aunque haya reducido su escala en las últimas décadas, sigue siendo importante por su repercusión en los cuerpos de agua. La agricultura está relacionada a la erosión del suelo debido a las técnicas de siembra, el manejo de la crianza de animales y en el uso de productos químicos cuyos impactos pueden contaminar los cuerpos de agua. No obstante, son las actividades urbanas, particularmente el fenómeno del desparrame urbano las que representan el reto mayor para planificar e implantar las políticas adecuadas de uso del territorio en función del recurso agua. El desparrame urbano trae consigo la dependencia del automóvil privado como principal medio de transporte, ejerciendo presión para la ampliación de la red vial extendiendo así las áreas construidas hacia fuera de los bordes urbanos. Los más de dos millones de automóviles circulando por las carreteras del País tienen un fuerte impacto en la contaminación del suelo que luego gana acceso a los cuerpos de agua.

Los tipos de apropiación y usos de los recursos naturales originan una modificación del ciclo hidrológico que afecta la disponibilidad del recurso en cantidad, calidad y oportunidad. La cuenca hidrológica constituye el ámbito ideal para lograr una mejor integración del manejo del conjunto de los recursos naturales, en general, y del recurso agua, en particular. Además ofrece una delimitación específica, una conexión por el curso de las aguas que permite rastrear su calidad en diferentes áreas y permite hacer aplicaciones en diferentes escalas al pasar de cuencas mayores a principales y hasta subcuencas. Esta dimensión de poder subir y bajar de escala en una cuenca nos permite analizar estrategias de manejo puntuales (a nivel de subcuenca) con relación a su beneficio en la escala más alta del paisaje o su cuenca mayor.

Distribución de Consultas de Ubicación por Cuencas Hidrográficas* (1994 - 2004)

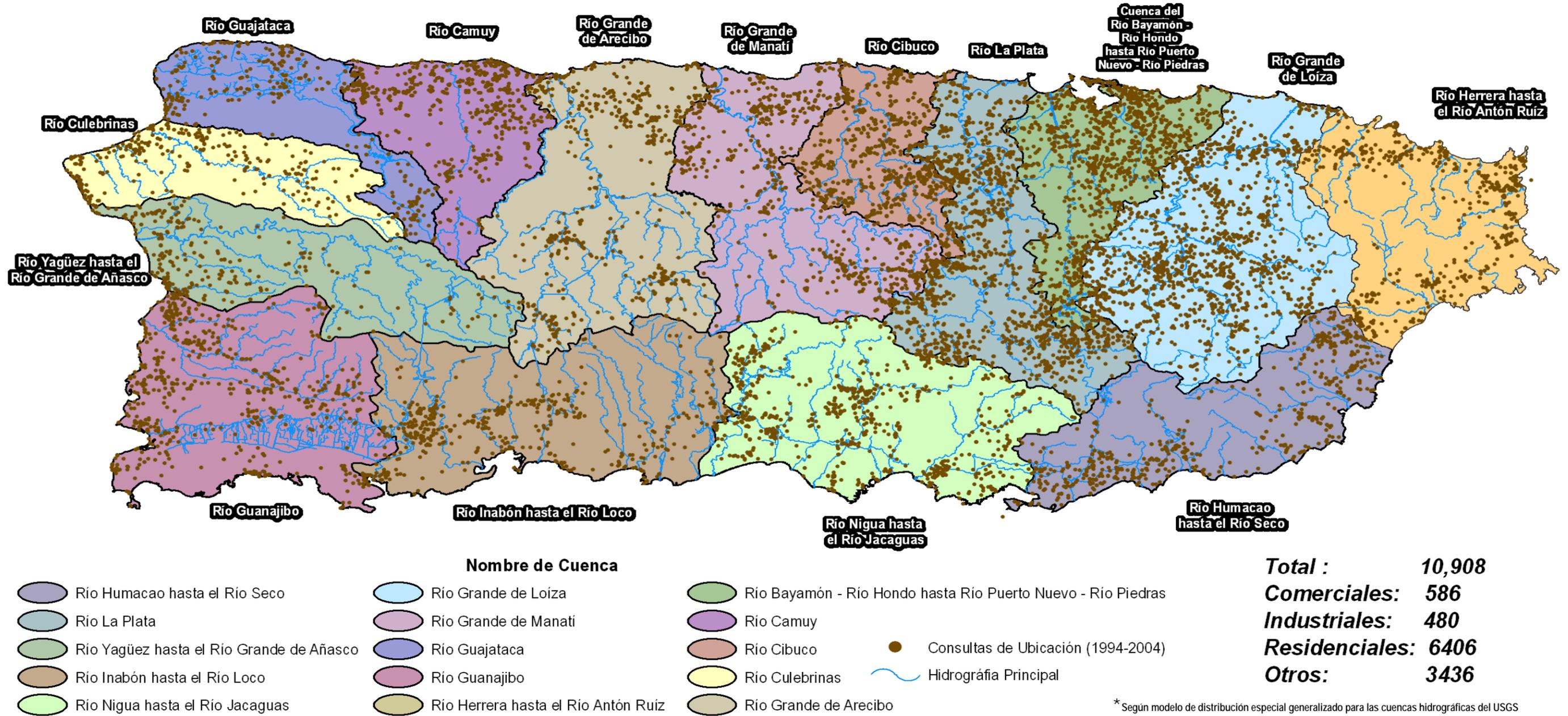


Ilustración 6.24 Consultas de ubicación al 2004 por cuenca

Un aspecto particular del enfoque de cuencas es que permite analizar las relaciones e interdependencia entre los sistemas biofísicos y socioeconómicos. Este enfoque permite identificar de manera particular las áreas y elementos críticos, vitales o esenciales tanto para los procesos naturales como para los procesos productivos de la sociedad. A través del proceso de planificación en la cuenca se pueden identificar los conflictos que surgen por la competencia entre los usos del terreno y la demanda que se impone en los recursos de cada cuenca, subcuenca o espacio dentro de éstas.

Históricamente, si no se garantiza el balance entre los procesos de desarrollo socioeconómico con los procesos naturales que ocurren en los ecosistemas dentro de una cuenca, se generan conflictos que derivan en problemas de gobernabilidad. La meta de la gestión o manejo integral del recurso de agua, preferiblemente, a través del manejo integral de las cuencas, debe ser garantizar que los procesos de desarrollo sean ambiental y ecológicamente sustentables. Este paradigma debe guiar los procesos de toma de decisiones a nivel de las agencias del gobierno central, los gobiernos municipales y la comunidad regulada, y ser internalizado en los diferentes sectores de la sociedad.

6.13.1 Estrategia

Para proteger las áreas de importancia hídrica (véase Ilustración 6.25), la Junta de Planificación habrá de clasificarla como suelo protegido. Ello debe lograrse en la elaboración del Plan de Uso de Terrenos (PUT) y en la preparación de los planes territoriales de los municipios. Igualmente, es de gran importancia fomentar la implantación de políticas urbanas que prioricen en la densificación y desalienten construcciones urbanas de baja densidad y el desparrame urbano.

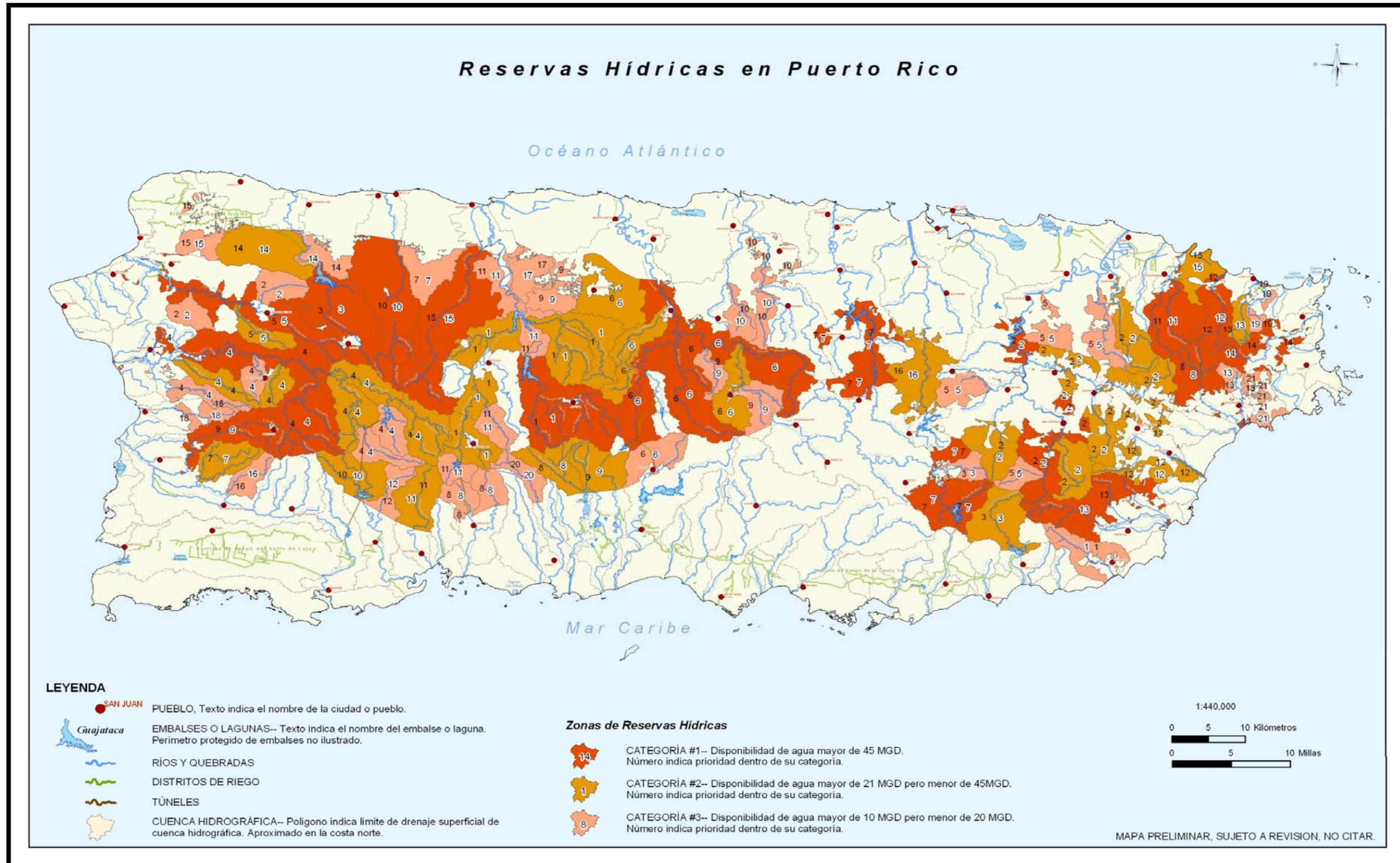
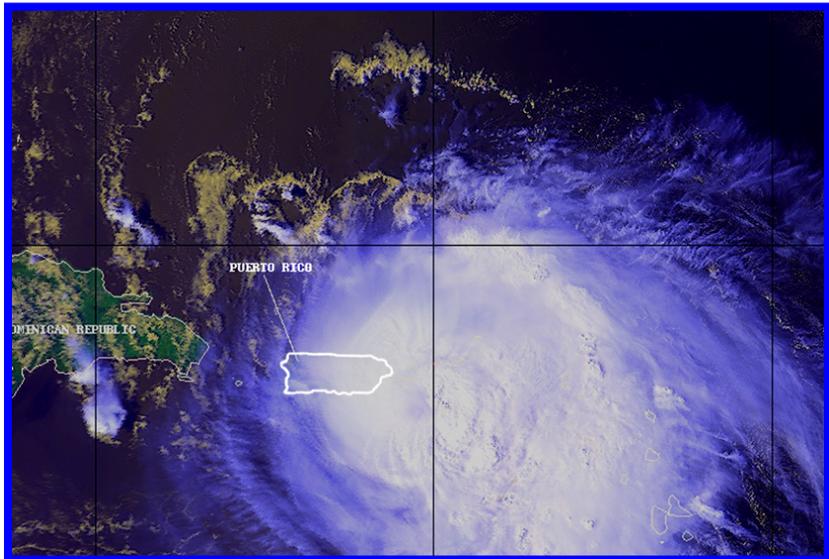


Ilustración 6.25 Mapa área importancia hídricas

Se adopta un enfoque ecosistémico con el fin de alcanzar el desarrollo ambiental y ecológicamente sostenible del territorio, del agua y de los recursos vivos a través de la promoción de la conservación y el uso sostenible de los recursos naturales de una manera equitativa. El elemento principal de esta estrategia es satisfacer las necesidades de las comunidades naturales y de los ecosistemas, al igual que los de la población, por cuenca hidrográfica.

6.14 Riesgos de inundaciones

El Plan Integral de Recursos de Agua no se orienta a resolver los problemas de las inundaciones. Sin embargo, las obras de control de inundación pueden tener un impacto grande sobre el curso de los ríos y los



ecosistemas acuáticos. Por ende, cualquier esfuerzo para proteger los ecosistemas acuáticos y manejar el recurso de forma integrada debe tomar en consideración las limitaciones impuestas por los problemas de inundaciones.

El desbordamiento de los ríos es un fenómeno natural y necesario para la formación de los valles aluviales. La Junta de Planificación (2005) estima que en la Isla existen cerca de 300,000 cuerdas (455 mi²) de terreno sujeto a inundaciones, de los cuales más de 200,000 cuerdas están ubicadas en la zona costanera.

Las inundaciones dejan de ser un fenómeno natural, esencial para el mantenimiento de los ecosistemas, y se convierten en problemas sociales y económicos, tan pronto la actividad humana se desplaza y ocupa las zonas inundables. Debido a la escasez de terrenos llanos en Puerto Rico, y la alta probabilidad de que un terreno

llano en Puerto Rico también sea inundable, muchas actividades económicas y de infraestructura urbana han sido ubicadas en dicha zona. La Junta de Planificación (2005) estima que 160,000 familias residen en áreas sujetas a las inundaciones.

En Puerto Rico se han registrado inundaciones severas en los años 1899, 1928, 1933, 1960, 1970, 1975, 1985 y más recientemente a causa de los huracanes Hugo (1989), Hortense (1996) y Georges (1998), según se observa en la Ilustración 6.25. Estos eventos han causado daños graves a la propiedad privada y pública, así como a la agricultura e infraestructura, además de causar pérdidas de vidas. Los efectos adversos de las inundaciones más recientes han sido mayores debido al desparrame urbano en los valles costaneros y del interior, donde residencias, negocios e industrias se ubican en zonas inundables.

Los problemas de inundaciones en Puerto Rico se pueden atribuir a las siguientes clases de situaciones.

- **Problemas históricos.** Hay zonas urbanas tradicionales que fueron construidas en áreas con alto riesgo de inundaciones por razones históricas (Ponce y Toa Baja, por ejemplo), o construcciones anteriores a la disponibilidad de técnicas de ingeniería y reglamentación adecuada (el sector Puerto Nuevo en San Juan, por ejemplo).
- **Errores técnicos.** El Reglamento Núm. 13 (Reglamento de planificación sobre áreas especiales de riesgo a inundación) de la Junta de Planificación y los mapas de áreas susceptibles a inundación entraron en vigor en el 1974. No obstante, hay urbanizaciones nuevas que experimentan problemas de inundación, a pesar de que aparentemente cumplen con las normas y las reglamentaciones. Sin embargo, ocurren errores en establecer los niveles de inundación o de construcción, y también de analizar áreas no-clasificadas por FEMA, igual que errores de diseño. Este problema no es frecuente, pero aún persiste.



Ilustración 6.26 Inundaciones históricas ocurridas en Puerto Rico desde 1928 al 1998

Aumento en las crecidas por el desarrollo. Varias facetas del desarrollo afectan la hidrología y así contribuyen a aumentar la magnitud de las inundaciones. La impermeabilización de los suelos aumenta el volumen de escorrentía superficial, mientras los sistemas de drenaje pluvial y canalizaciones aceleran la velocidad del flujo. Ambos factores aumentan el caudal de las inundaciones. Hasta las obras de canalización construidas para reducir las inundaciones en un área pueden aumentar la inundación aguas abajo al tener un flujo más rápido. Sin embargo, los embalses tienen el efecto de reducir levemente los caudales máximos de las inundaciones aguas abajo, aún cuando se construyeron para el abasto de agua potable.

Las condiciones hidráulicas en los ríos y sus planicies inundables también han sido alteradas por los procesos de desarrollo. La construcción de infraestructura urbana sobre las planicies inundables conlleva la colocación de relleno o la construcción de diques. Esto elimina el espacio que antes estaba disponible para almacenar parte del agua de las crecidas y produce un aumento en el nivel de las crecidas.



Construcciones fuera de ley. Se debe anticipar que la reglamentación existente provoca que los problemas de inundación disminuyan con el tiempo, en vez de aumentar. Sin embargo, Puerto Rico confronta un problema muy serio con respecto a las construcciones fuera de ley. La parte más preocupante de esta situación es que el gobierno estatal y el municipal apoyan en ocasiones construcciones ilegales, proveyendo servicios de luz y agua, pavimentando las calles y llevando a cabo mejoras en zonas altamente inundables en violación directa a las leyes y reglamentaciones vigentes. Esto ocurre aún en comunidades donde no existe ninguna posibilidad de eliminar el riesgo de las inundaciones.

Aunque el problema de las inundaciones es uno que afecta mayormente a las familias de recursos económicos limitados, y la condición de inundabilidad es un componente significativo que contribuye a su pobreza, la incidencia de este problema en sectores económicos de mayor ingreso ha aumentado. Las reglamentaciones para evitar la construcción en áreas inundables fueron aprobadas debido a los daños económicos y sociales asociados con las inundaciones, y particularmente con la inundación de hogares. Es muy difícil lograr que una familia mejore su situación económica cuando está sujeta a las pérdidas asociadas a las inundaciones frecuentes. Apoyar la construcción y mejoras de viviendas en las áreas inundables no conduce al desarrollo económico de cualquier sector económico.

Las estrategias para el control de las inundaciones se pueden clasificar en dos grupos grandes. Las “medidas estructurales” incluyen obras como canalizaciones, relleno, diques y embalses. Las “medidas no-estructurales” son los esfuerzos para evitar las construcciones en áreas inundables mediante el control del uso del terreno (el Reglamento Núm. 13 de la JP, por ejemplo), y fomentar la relocalización de familias de las áreas con alto riesgo de inundación. Las medidas estructurales, particularmente las canalizaciones, son aquellas que conllevan los impactos ambientales principales a los ríos y demás cuerpos de agua.

Las limitaciones en las medidas estructurales ha llevado al Gobierno Federal a enfocar progresivamente sus esfuerzos de control de inundaciones hacia las medidas no-estructurales. Las medidas estructurales son costosas de mantener y requieren mantenimiento a perpetuidad. Además, muchas veces no se mantienen y si fallan pueden resultar en daños cuantiosos y catastróficos. Las fallas espectaculares de medidas estructurales a lo largo del Río Mississippi durante la crecida de 1993 y la inundación de New Orleans luego del huracán Katrina en el año 2005, son ejemplos de las consecuencias a las que están expuestas las poblaciones al fallar las medidas estructurales.

A pesar de la magnitud del problema de las inundaciones, en Puerto Rico no existe un consenso sobre la manera de enfrentar el problema, particularmente en relación a las comunidades de recursos económicos limitados ubicados en zonas inundables. Además, se siguen construyendo obras de control de inundación y de protección de riberas que son ambientalmente muy dañinas y no son sostenibles.

Se recomienda la elaboración de una estrategia integrada para el control de las inundaciones que se dirija a medidas no-estructurales, medidas sostenibles y que asignen prioridad a la protección de los ecosistemas acuáticos.