



Fuente: US Geological Survey, 1928-1998.

Figura 6-1. Inundaciones históricas en Puerto Rico

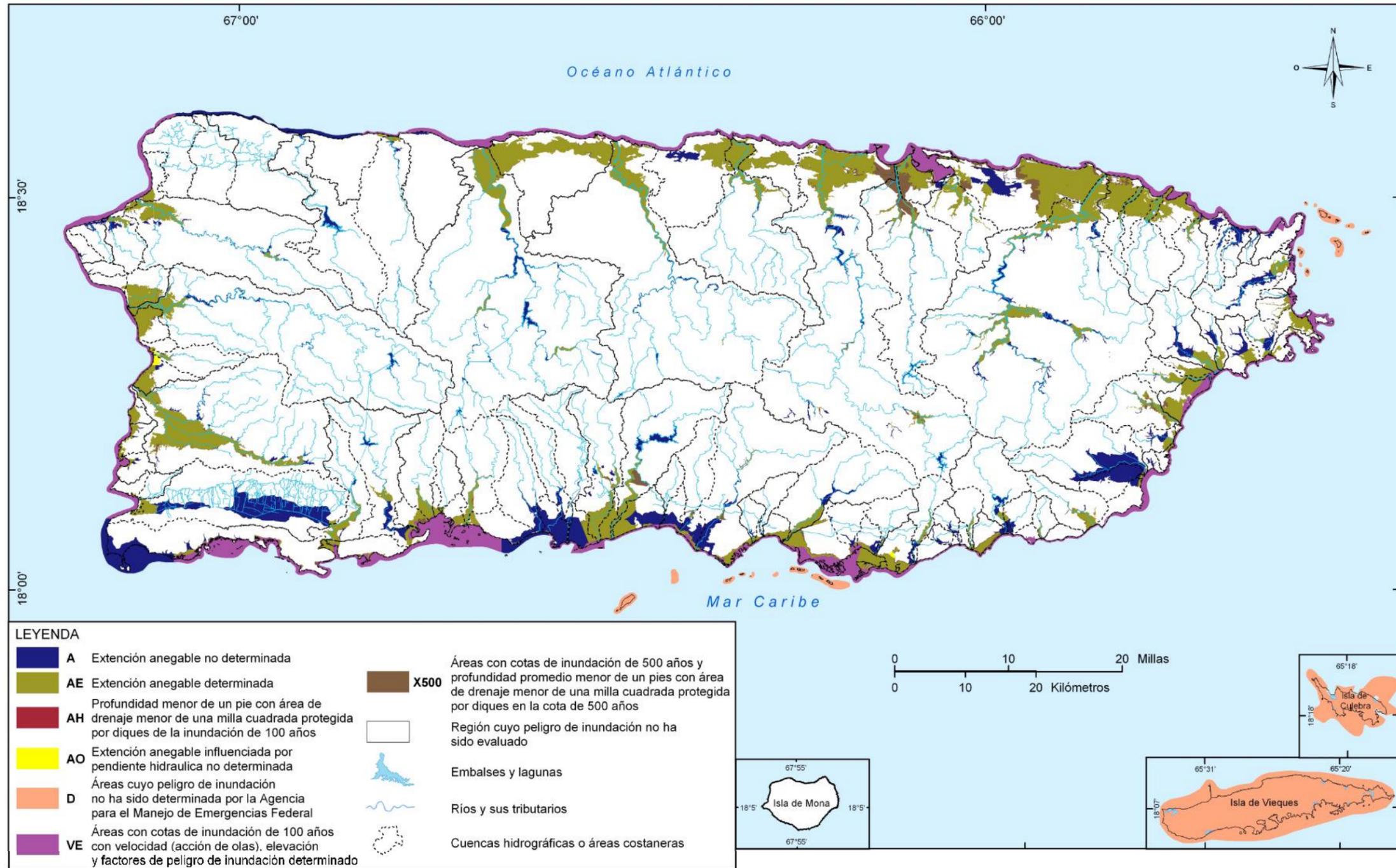


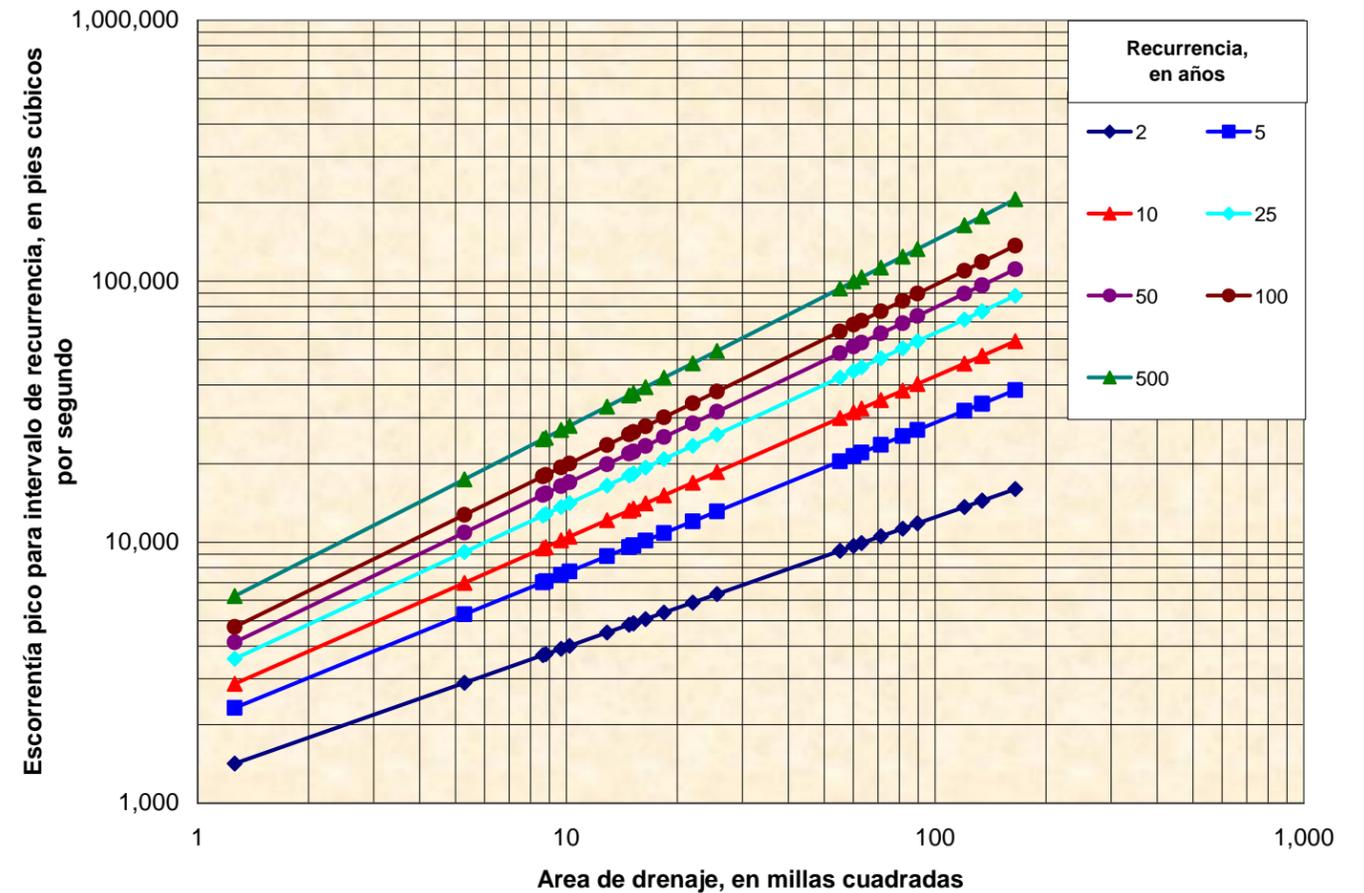
Figura 6-2. Mapas de inundaciones del FEMA)

6.2.1.3 Frecuencia de Flujos

La magnitud y frecuencia del flujo en un punto de un río o quebrada durante una inundación se definen de datos históricos (estaciones de escorrentía operadas por el USGS) o de estudios hidrológicos-hidráulicos (referidos como un "HH") utilizando ecuaciones empíricas derivadas por investigadores previos. Utilizando los datos históricos disponibles del USGS u otra fuente de datos hidrológicos, un análisis estadístico simple permite determinar la probabilidad de que el evento pueda repetirse. Esta probabilidad, definida mediante un intervalo de recurrencia, se expresa en términos de %, o en años. Como norma, los estudios e informes del USGS y FEMA expresan estas probabilidades en años, reflejando la magnitud de las inundaciones correspondientes a intervalos de 2, 10, 25, 50 y 100 años (Figura 6-9). El USGS publicó en el 1999 una serie de ecuaciones matemáticas que permiten estimar la magnitud de las escorrentías tomando en consideración el área de la cuenca y la frecuencia deseada. Estas ecuaciones se resumen en el Apéndice 10.6 y se ilustran gráficamente en la figura 6-9. Para efecto de los mapas de inundación de FEMA y la JP, se define la zona inundada por el evento con un intervalo de recurrencia de 100 años (equivalente a una probabilidad de ocurrir del uno (1) % en un año).

Un análisis estadístico de los datos de flujo o descarga acumulados para algunos de los ríos y quebradas de Puerto Rico sirve para determinar la probabilidad y duración de una descarga. Para que esto sea posible es necesario recopilar información de niveles y descarga en estaciones de aforo cuidadosamente localizadas en los ríos o quebradas de cuencas selectas. Contrario a los datos de escorrentía en condiciones de estiaje o sequía o en condiciones promedio, la probabilidad de que un flujo o escorrentía exceda un pico durante una tormenta es pequeña. Anteriormente se expresó el flujo mínimo como aquel que era igual o excedido el 99 % del tiempo. En este ejemplo la magnitud del flujo es pequeña y representa condiciones de sequía. Ahora cuando un flujo o descarga excede el flujo máximo o pico, la probabilidad se reduce como resultado de una reducción en el rango de flujo. Ahora la probabilidad es menor e implica un flujo o descarga que es igual o excede el flujo máximo el uno (1) % del tiempo.

El propósito primordial en determinar la magnitud y frecuencia de un flujo en un punto específico de un cauce es estimar la probabilidad de que dicho evento pueda ocurrir en un futuro cercano. Esta información de frecuencia y magnitud de flujos se utiliza en el diseño de puentes, represas, carreteras, canales, drenajes pluviales y otra infraestructura en la Isla. La JP utiliza los mapas de inundación de FEMA y los estudios HH para determinar si la ubicación de una obra de infraestructura pública o privada ocurre dentro del valle propenso a inundación, y si alterará la magnitud o frecuencia de las inundaciones en la zona, aumentando los niveles de inundación y afectando a zonas que anteriormente no se inundarían.



Fuente: Modificado del US Geological Survey, 1999.

Figura 6-3. Relación entre el área de drenaje y la descarga pico con recurrencia de 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años obtenidas de regresiones Log-Pearson Tipo III

6.2.2 Inundaciones y Áreas Propensas a Inundación

Las lluvias intensas que periódicamente afectan a Puerto Rico y sus islas adyacentes causan inundaciones relativamente frecuentes y severas. La mayor parte de los valles costaneros en la Isla sufren inundaciones de gran magnitud periódicamente, e inclusive los valles interiores. Estas inundaciones ocurren cuando frentes de frío, vaguadas, tormentas y huracanes inducen lluvias abundantes en períodos cortos en la Región Montañosa Interior de Puerto Rico. En la Isla se han registrado inundaciones severas en el 1899, 1928, 1933, 1960, 1970, 1975, 1985 y más recientemente a causa de los huracanes Hugo (1989), Georges (1998) y Hortense (1996) según ilustrado en la Figura 6-7. 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 propensas a inundación. Los riesgos a daños por inundaciones severas son mayores en los valles de los siguientes ríos debido a los desarrollos urbanos:

1. Río Grande de Loíza en Carolina, Canóvanas y Loíza. En esta parte baja de la cuenca, de mayor tamaño en Puerto Rico (290 mi²), miles de residencias ocupan parte del valle inundable. La cuenca de este río drena dos de las zonas de la Isla donde las lluvias son más intensas (zonas de El Yunque y San Lorenzo). Afortunadamente, la cuenca está formada por dos ramales anchos (los del Río Gurabo aguas arriba de Gurabo y el Río Grande de Loíza aguas arriba de Caguas), con longitudes distintas. En general, el tiempo de concentración de la escorrentía en ambas sub-cuencas (el tiempo que toma el pico de un evento en llegar de un punto a otro) es distinto, lo que efectivamente dispersa el impacto de las inundaciones potenciales. Esto no implica que en algún momento en el futuro la combinación de la intensidad y duración de lluvias severas no resulte en que ambos picos coincidan en el Embalse Loíza (Represa Carraízo) en Trujillo Alto. Durante las inundaciones de 1960, la descarga pico en la Represa Carraízo fue de 182,000 pcs, causando inundaciones severas en el valle costanero. El USGS estimó la frecuencia de esta inundación entre 10-25 años (López y otros, 1979). En este informe, el USGS también estimó que una creciente con frecuencia de 100 años descargaría hasta 300,000 pcs aguas abajo de Carraízo. La magnitud de este pico, que resultaría de coincidir en Carraízo los tiempos de concentración de los dos ramales de la cuenca, podría resultar en una catástrofe de gran magnitud a los residentes de este valle.
2. Río Piedras en la Zona Metropolitana de San Juan. Este río tiene un área de captación de tamaño moderado (26 mi²), y yace en una cuenca donde las lluvias torrenciales no alcanzan las magnitudes que se observan en las cordilleras. Aún así, el cauce es abundante y discurre por las zonas urbanas de Hato Rey y Puerto Nuevo, ocasionando inundaciones severas que afectan a miles de residentes, comercios, industriales y facilidades públicas. Afortunadamente, el US Army Corps of Engineers (USCOE por sus siglas en inglés), desarrolla al presente un proyecto conducente al control de las inundaciones en estas zonas, canalizando el cauce del río aguas abajo de la Estación Experimental. Esto aliviará el efecto de las inundaciones en esta zona.

3. Río de la Plata en Dorado y Toa Baja. La cuenca del Río de la Plata es la tercera en tamaño en la Isla (241 mi²) y contiene el río de mayor longitud (58.5 mi), originándose en la Sierra de Cayey en una zona donde las lluvias intensas pueden alcanzar hasta 24 pulgadas en 24 horas. Aguas abajo de Toa Alta el río forma un valle aluvial, parte del cual ha sido ocupado por las zonas urbanas de Toa Baja y Dorado. El USGS estima que la creciente de 100 años podría alcanzar un pico de hasta 295,000 pcs en la vecindad de Toa Baja. La presencia del Embalse de la Plata sería insignificante ante un pico de esa magnitud, debido a su capacidad limitada de almacenaje para mitigar la inundación. El DRNA y el USCOE han planificado un proyecto para canalizar el río desde Toa Alta hasta la salida al mar, el cual pudiera comenzarse en los próximos dos años. Este proyecto mitigaría el potencial de los daños catastróficos que la inundación de 100 años pudiera causar en este valle.
4. Río Grande de Arecibo en Arecibo. Este río drena la segunda cuenca en tamaño en la Isla (247 mi²) en una zona donde las lluvias también pueden alcanzar 24 pulgadas en 24 horas. Utilizando datos históricos, se estima que el pico de la inundación de 1899 en donde ahora ubica el Embalse Dos Bocas fue de 242,000 pcs. Aunque la inundación de 100 años pudiera generar un pico mayor debido al flujo adicional del Río Tanamá, parte del efecto se reduce en los Embalses de Caonillas y Dos Bocas, que atenúan parcialmente el pico. Aún así, la zona urbana de Arecibo estaría sujeta a efectos más desastrosos que los de inundaciones que periódicamente afectan la ciudad. Durante las inundaciones ocasionada por Hortense en el 1996, el nivel del agua en una zona extensa de la parte este de la ciudad de Arecibo alcanzó hasta 10 pies de profundidad. El DRNA y el USCOE han diseñado y planifican la canalización del río para minimizar los efectos de estas inundaciones.
5. Río Guanajibo en Hormigueros. El Río Guanajibo drena un área de 127 mi² que incluye la zona de lluvias intensas del Monte del Estado en Maricao. Lluvias de hasta 24 pulgadas en 24 horas se han registrado en esta parte de la cuenca, incluyendo durante las inundaciones de 1975 y 1985. Zonas extensas del valle del río en San Germán, Cabo Rojo, Hormigueros y Mayagüez han sido urbanizadas, afectándose por inundaciones frecuentes. El USGS estima que la descarga para una frecuencia de 100 años alcanzaría hasta 265,600 pcs en Hormigueros. En comparación, la descarga de 1975 (frecuencia de 60 años) tuvo un pico de 128,000 pcs. Esto implica que una inundación de 100 años causaría daños mucho más intensos en las zonas urbanas en el valle del río. El DRNA y el USCOE planifican un proyecto para canalizar los segmentos del río aguas abajo de Hormigueros que proveería protección contra la inundación de 100 años.
6. Valles de los ríos de la Región Sur. Esencialmente todos los valles de la Región Sur, incluyendo los ríos Yauco, Guayanilla, Tallaboa, Inabón, Coamo, Salinas, Guamaní y Grande de Patillas, sufren de inundaciones periódicas severas. El desarrollo urbano en estos valles continúa, incrementando el potencial para daños severos cada vez que lluvias intensas resulten en inundaciones significativas. Las zonas más críticas en términos de número de habitantes en el valle inundable incluyen los valles de Guayanilla (Río Guayanilla), Salinas (Río Nigua) y Santa Isabel (Río Coamo), primordialmente debido a que en estos ríos no existen embalses que atenúen los picos de las inundaciones.

7. Valles de los ríos Culebrinas y Añasco: estos valles en la Región Oeste reciben la escorrentía de dos de las cuencas de mayor tamaño en la Isla (Río Culebrinas con 103 mi² y Río Grande de Añasco con 181 mi²). El USGS estima que la inundación de 100 años en el Río Culebrinas en Aguada tendría un pico de 111,000 pcs, mientras que en el Río Grande de Añasco en Añasco excedería 140,000 pcs. Estos dos ríos discurren a través de valles parcialmente urbanizados, aunque los centros urbanos de Añasco y Aguada se encuentran fuera de los valles inundables. Sin embargo, desarrollos urbanos extensos han ocurrido en las zonas inundables de estos valles. El DRNA y el USCOE planifican la canalización del Río Culebrinas para minimizar los daños a la propiedad en este valle.
8. Valles en las Regiones Suroeste y Este. En estas regiones también ocurren inundaciones severas, particularmente en el Valle del Río Humacao, donde el 6 de septiembre de 1960, inundaciones extremas causaron la muerte a 117 personas, con otras 30 desaparecidas y daños por \$7 millones, incluyendo la destrucción de 484 viviendas. Lluvias inducidas por el Huracán Donna resultaron en precipitaciones en la cuenca del Río Humacao de hasta 15 pulgadas en 24 horas, pero intensidades de hasta 6 pulgadas en dos horas. Otros valles afectados por inundaciones frecuentes son los de los ríos Maunabo, Fajardo y Luquillo.
9. Otros valles en la Región Norte: inundaciones frecuentes afectan también zonas urbanas en los valles de los ríos Mameyes (Barrio Palmer y Luquillo), Espíritu Santo (Río Grande), Herrera (Canóvanas y Río Grande) y Cibuco (Vega Baja y Vega Alta).

El desarrollo urbano en los valles propensos a inundación ha obedecido al crecimiento acelerado de la población de Puerto Rico acompañado del desarrollo económico. Estos factores han resultado en la necesidad de desarrollar viviendas de bajo costo, zonas comerciales y áreas o parques industriales. Anteriormente, estos desarrollos no tomaron en cuenta la sensibilidad de las cuencas a cambios que afectan la intensidad y severidad de las inundaciones. Al presente, el desarrollo en zonas propensas a inundación está sujeto a la aprobación y evaluación por la JP. Estas áreas evaluadas deben localizarse fuera de las áreas inundadas con una frecuencia de 100 años tanto en los valles de los ríos como en las costas. La JP y FEMA publican mapas de inundaciones que sirven de guías para reglamentar los desarrollos en áreas propensas a inundarse. Estos mapas se derivan de estudios de inundaciones históricas y la aplicación de modelos hidráulicos e hidrológicos para determinar la magnitud y la elevación del nivel del agua durante una inundación de frecuencia definida.

Aunque las inundaciones severas generalmente tienen efectos desastrosos sobre las áreas urbanas y la infraestructura, la lluvia durante eventos extremos y el agua que descarga por las cuencas durante una inundación son una parte importante del ciclo hidrológico. Las lluvias causadas por disturbios tropicales o frentes de frío en Puerto Rico, y las escorrentías generadas por estos eventos también llevan a cabo funciones hidrológicas y ecológicas importantes, incluyendo:

1. Recarga de los acuíferos. Los acuíferos en la Isla, principalmente los de las regiones Norte y Sur, son explotados a tasas que han resultado en mermas severas en los niveles

freáticos en varios sectores. En el Acuífero Superior (Llano o Freático) de la Región Norte, desde Toa Baja hasta Barceloneta, los niveles del agua se han reducido debido a extracciones excesivas de agua, induciendo intrusión salina. Los eventos extremos de lluvia en las últimas décadas han contribuido a que este efecto adverso sea menos intenso de lo que es al presente. Las lluvias intensas de varios eventos en las últimas dos décadas han recargado directamente e indirectamente (a través del subsuelo en las cuencas y los canales de los ríos, o de sumideros en la Región del Karso) cantidades sustanciales de agua a los acuíferos. Esto ha evitado que los efectos de las extracciones de agua sean más severos en los niveles freáticos y la calidad del agua. Un proceso similar ha ocurrido en los acuíferos de la Región Sur. En la zona de Salinas y Santa Isabel, los acuíferos han sufrido mermas de hasta 30 pies en sus niveles históricos debido al exceso de bombeo para riego y uso público. Recientemente, durante las lluvias causadas por el huracán Hortense, los niveles de agua recuperaron entre 3 y 16 pies en secciones de estos acuíferos.

2. Otro efecto positivo de las inundaciones está relacionado a los humedales y estuarios en los valles costaneros. Los pulsos de grandes cantidades de agua fresca son parte esencial de la ecología de estos sistemas. Las inundaciones desplazan de los humedales costaneros el agua salina que se acumula a veces por décadas, y que afecta la diversidad de la flora y fauna que los habita. Este pulso de agua fresca es parte de la sucesión natural de estos sistemas. Igualmente, los estuarios también deben su estabilidad a largo plazo a estos pulsos de agua, que remueven las sales y proveen nuevos substratos de sedimentos.
3. Las sequías periódicas que afectan la Isla reducen también las reservas de agua en los embalses, que son la fuente principal de agua potable en la Isla. Eventos de lluvia intensos generalmente llenan los embalses a capacidad, impidiendo que se afecte más frecuentemente el servicio de agua potable.

Este resumen breve resalta la magnitud de las zonas urbanas en Puerto Rico sujetas a inundaciones severas. La JP estima que aproximadamente 500,000 personas están expuestas a riesgos por inundaciones en los valles costaneros antes descritos. En algún momento en el futuro, Puerto Rico sufrirá los efectos de un disturbio tropical que genere nuevamente lluvias extraordinarias que pudieran resultar en inundaciones con frecuencias que se aproximen a la de 100 años. El efecto adverso sobre la propiedad y la población en la Isla de un evento de esta naturaleza será de magnitud insospechable.

En Puerto Rico no se han desarrollado obras o proyectos conducentes al aprovechamiento de parte de la escorrentía generada por inundaciones intermedias o severas. Esto se debe a la relativa abundancia del agua hasta el presente, y la falta de recursos adecuados para obras de control de escorrentía urbana y rural. Teóricamente se pueden construir canales que desvíen parte de la escorrentía producida por inundaciones a zonas distantes donde se construyan embalses de bajo nivel en los valles aluviales. Estos embalses pueden servir como fuentes de agua para riego agrícola y abasto público. También se puede aprovechar parte de estas escorrentías para rehabilitar acuíferos o sistemas costaneros como humedales afectados por

cambios en la hidrología de las zonas donde existen. Eventualmente la Isla se enfrentará a la realidad de optimizar al máximo el uso de esta porción del recurso agua.

6.3 Embalses y Lagunas

En Puerto Rico existen 36 embalses principales formados por represas en los tramos de los ríos en la Región Montañosa Interior. Los embalses fueron desarrollados durante dos períodos comenzando en 1913 hasta el más reciente en 1972. El primer período incluyó los embalses desarrollados hasta 1952 por agencias del Gobierno Insular y el Gobierno Federal, incluyendo la Autoridad de las Fuentes Fluviales y el US Bureau of Reclamation, Burec, agencia del Departamento del Interior Federal. El segundo período desde 1952 hasta el 1974 incluye los embalses desarrollados por agencias del ELA con la cooperación de varias agencias federales, incluyendo al Burec y el USCOE. En la Isla no existen lagos naturales, sino los embalses formados por represas construidos en los cauces de los ríos según indicado.

En contraste con los embalses, en Puerto Rico, Vieques y Culebra existen 35 lagunas naturales principales, con un área superficial mayor de 10 cuerdas, y cientos de lagunas y charcas menores. Las lagunas naturales se encuentran en las costas, en zonas bajo la influencia de las mareas y la intrusión salina, por lo que las aguas que contienen son salobres, con concentraciones de sales marinas variables.

6.3.1 Embalses

Los embalses constituyen uno de los recursos de agua más importantes en Puerto Rico. Los 36 embalses principales en la Isla son propiedad del Estado Libre Asociado (ELA) y sus agencias, mientras que el balance son embalses menores privados (Figura 6-10 y Tabla 6-3). Los embalses públicos fueron construidos durante el Siglo 20 para diversos usos, incluyendo riego agrícola, generación hidroeléctrica, agua potable, control de inundaciones y recreación. Aunque en Puerto Rico se utiliza generalmente el término lago para definir los embalses, en la isla no existen lagos naturales, y todos los llamados lagos son embalses artificiales formados por represas donde se almacena parte de la escorrentía de los ríos donde ubican. Existen varias lagunas naturales, principalmente en las costas, conteniendo agua salobre o salina. Aunque los mapas topográficos del USGS identifican cada embalse como un lago, en este documento se utiliza el término embalse.

Tabla 6-1. Tabla de embalses resumida en el Plan Integral.

Embalse	Año en que se construyó	Capacidad original, en acres-pies	Capacidad estimada para el año 2004, en acres-pies	Por ciento pérdida	Vida útil remanente, en años
Caonillas	1948	45,100	33,400	26	160
Carite	1913	11,300	8,560	24	285
Cerrillos	1991	47,900	47,300	1	958
Cidra	1946	5,300	4,580	14	370
Coamo	1914	2,830	*		*
Dos Bocas	1942	30,400	13,200	56	48
El Guineo	1931	1,860	1,520	18	328
Fajardo	2004	4,455	4,455	0	> 2,000 ¹
Garzas	1943	4,700	4,060	14	385
Guajataca	1928	39,300	33,900	14	481
Guayabal	1913	9,580	4,800	51	97
Guayo	1956	15,565	13,100	16	269
La Plata	1974	32,600	27,800	15	171
Loco	1951	1,950	604	69	24
Loíza	1953	21,700	14,700	32	60
Lucchetti	1952	16,500	9,060	45	62
Matrullas	1934	3,010	2,480	18	324
Patillas	1914	14,300 ²	10,600 ²	24 ²	126 ²
Prieto	1955	621	107	83	10
Toa Vaca	1972	55,900	51,700	8	394
Yahuecas	1956	1,430	69.6	95	3

Los embalses son la fuente principal de agua cruda que utiliza la AAA para producir agua potable en la Isla, además de suplir agua para riego principalmente en los valles costaneros de la Región Sur. Los embalses suplen aproximadamente 347 mgd de agua cruda a las plantas de filtración operadas por la AAA, lo que constituye el 58 % del agua potable producida en la Isla. Paralelamente, los embalses proveen aproximadamente 39 mgd de agua para riego agrícola en los valles costaneros de las regiones Sur y Norte. Además, proporcionan agua para generar aproximadamente el 1.9 % de la energía eléctrica que produce la AEE, y proveen control parcial a las inundaciones en varias cuencas. También son fuente de recreación para miles de residentes dedicados a la pesca deportiva y navegación en la zona montañosa. Finalmente, son refugios de aves y vida silvestre acuática, incluyendo peces, camarones y tortugas.

Excepto el nuevo Embalse Fajardo, todos los embalses mayores en Puerto Rico se han construido en la zona montañosa con el propósito de almacenar cantidades relativamente grandes de las escorrentías generadas por la abundante precipitación que ocurre en esta zona. En general, los embalses se han ubicado en cañones profundos con gargantas reducidas donde las represas requieran la menor inversión posible de fondos mientras almacenan la mayor cantidad de escorrentía en el menor espacio superficial. Esta característica de su diseño hace que los embalses sean profundos y sus orillas posean declives empinados. Otra característica de gran importancia es la estabilidad geológica de los lugares donde ubican, para garantizar su seguridad sísmica.

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

Esto ha provocado que se revisen los diseños de las nuevas represas para evitar la acumulación excesiva de sedimentos. Los nuevos embalses Fajardo y Río Blanco incluyen diseños que reducen significativamente los problemas de sedimentación. Estos embalses se desarrollan fuera

del cauce del río que los abastece, en hondonadas naturales donde se construye una represa. Una toma en el río aguas arriba de la ubicación del embalse desvía el agua hacia la represa, la cual fluye por gravedad a través de una tubería soterrada. El diseño de la toma promueve la precipitación de una gran parte de los sedimentos suspendidos en la escorrentía en el río. El agua que fluye hacia los embalses contiene cantidades menores de sedimentos, reduciendo así la tasa de sedimentación y prolongando su vida útil.

Por otro lado, el desarrollo de nuevos embalses es cada día más difícil debido a factores de impacto ambiental así como al número limitado de lugares aptos para nuevas represas. Los embalses ocupan predios extensos de terreno, ya sea en las laderas del cauce del río que los forma, así como en depresiones u hondonadas en lugares donde se pueden construir represas fuera del cauce. Las represas en el cauce de los ríos alteran todos los procesos hidrológicos y biológicos del río que embalsan, afectando la vida acuática y la calidad del agua. Existen pocos lugares en la Isla donde no se han establecido residencias, por lo que los embalses también tienen impactos sociales, ya que usualmente requieren reubicar residentes o actividades agrícolas. En adición a estas consideraciones ambientales, desde el punto de vista geográfico, el número de lugares aptos para el desarrollo de embalses es cada día más limitado. Entre las cuencas principales en la Isla, solamente las de los ríos Grande de Manatí, Grande de Añasco y Culebrinas no cuentan con represas. En la Región Este, donde los ríos son caudalosos debido a la abundancia de lluvia, los límites del Bosque Nacional del Caribe impiden el desarrollo de embalses. En la Región Central existen varios lugares incluyendo las cuencas de los ríos Bauta cerca de Orocovis; Rosario cerca del Rosario al sur de Mayagüez; Guayanés en la Colonia Laura al oeste de Yabucoa; y Valenciano cerca de Juncos, donde existen condiciones hidrológicas y geográficas favorables para el desarrollo de nuevos embalses. Fuera de estos lugares, las únicas alternativas son embalses de capacidad limitada fuera de los cauces de los ríos similares al Embalse Fajardo en construcción. La AAA recibió en el 2003 los permisos para construir el embalse del Río Blanco cerca de Naguabo, fuera del cauce de dicho río con una capacidad de aproximadamente 4,000 acres-pies y un rendimiento seguro de 18 mgd. Se espera que este embalse se complete en el 2008, aumentando los abastos de agua a Humacao, Naguabo, Las Piedras, Vieques y Culebra. Además, la AAA evalúa al momento otros embalses fuera de los cauces de los ríos, incluyendo lugares en Caguas (Quebrada Beatriz), Canóvanas (Barrio Jiménez) y en el Valle de Lajas.

Las características más importantes de veintiuno (21) de los embalses principales, incluyendo el de Fajardo, se resumen en el Apéndice 10.7. Estos embalses, más otros diez (10) embalses menores, representan una capacidad construida de aproximadamente 375,410 acres-pies (excluyendo a Fajardo). Esta capacidad ha sido reducida por la sedimentación a aproximadamente 287,983 acres-pies. La tasa de sedimentación anual entre los diferentes embalses varía desde 4.6 a 277 acres-pies por año. Las tasas más altas ocurren en las cuencas de los ríos en las regiones norte y este de la isla, donde la lluvia es más abundante, las pendientes de las cuencas son más empinadas, y el desarrollo y deforestación son más intensos. Estos datos y otros análisis llevados a cabo por el *USGS* y la OPA reflejan condiciones críticas en términos de sedimentación y calidad de agua en varios de los embalses principales, incluyendo a:

Los embalses de Caonillas y Dos Bocas, en Utuado, suplen hasta 100 mgd de agua al Superacueducto del Norte, el cual sirve agua potable a los municipios desde Arecibo hasta la Zona Metropolitana de San Juan, incluyendo a Caguas. En Dos Bocas, la AEE genera 5,000 Kva de electricidad además de mantener niveles mínimos para navegación y recreación. La AFI y la AAA completan un proyecto para extender el área de servicio del Superacueducto del Norte hasta Gurabo y Juncos, lo que convierte este sistema en el de mayor área de servicio en la Isla. Dos Bocas sufre de sedimentación acelerada, habiendo perdido el 56 % de su capacidad original, lo que impactará su capacidad de suplir toda el agua necesaria para el Superacueducto del Norte. En Caonillas la pérdida de capacidad es relativamente menor (solamente el 26 % de su capacidad original). En Dos Bocas será necesario un dragado de emergencia de ocurrir una creciente significativa en el Río Grande de Arecibo, ya que los niveles de sedimentos cerca de la represa pudieran impedir la descarga de agua hacia la toma del Superacueducto del Norte. En paralelo, será necesario implantar un programa para minimizar la erosión en la cuenca y el flujo de sedimentos al embalse.

El Embalse Loíza (Represa Carraízo), en Trujillo Alto, suple hasta 100 mgd de agua a la planta de filtración Sergio Cuevas en Trujillo Alto, la que sirve la Zona Metropolitana de San Juan, incluyendo a sectores de Trujillo Alto y Carolina. Aunque Loíza fue dragado en el 1997-98 a un costo de \$60 millones, datos preliminares del USGS indican que los sedimentos transportados durante las crecidas ocasionadas por el huracán Georges en el 1998 redujeron en aproximadamente 2,500 acres-pies la capacidad recobrada por el dragado.

El Embalse La Plata, en Toa Alta, suple hasta 70 mgd de agua a la Zona Metropolitana de San Juan, principalmente a sectores de Toa Alta, Toa Baja y Bayamón. Aunque el embalse ha perdido solamente el 15 % de su capacidad original y no es necesario considerar dragarlo en los próximos 20 años, es necesario establecer un plan para reducir la erosión y el transporte de sedimentos en la cuenca.

El Embalse Guajataca, entre Camuy y San Sebastián, es parte del Distrito de Riego de Isabela operado por la AEE, y la fuente principal para suplir agua potable a aproximadamente 150,000 residentes de los municipios de Isabela, Aguadilla, Rincón, Aguada y sectores de Moca. En la zona de Isabela a Aguadilla no existen fuentes alternas de agua, por lo que el embalse es crítico para suplir la demanda residencial y comercial. El embalse suple hasta 20 mgd a los acueductos de Isabela, Ramey y Aguadilla, así como para usos agrícolas. Al presente, aproximadamente la mitad del agua descargada desde el embalse se pierde en los canales de transmisión. La AEE y la AFI llevan a cabo mejoras a estos canales para reducir las pérdidas. Aunque la capacidad actual del embalse es el 86 % de la original, es necesario la protección de esta cuenca para mantener la calidad del agua y prevenir aumentos en la tasa de sedimentación.

Los embalses de Toa Vaca y Guayabal, en la Región Sur-Central, suplen hasta 20 mgd a Ponce, Juana Díaz y Santa Isabel. Guayabal ha perdido el 51 % de su capacidad original debido a la sedimentación. Aunque Toa Vaca, el embalse de mayor capacidad en la Isla ha perdido solamente el 7 % de su capacidad original, su tasa de sedimentación excede la de todos los otros

embalses en la Isla. Aunque no es necesario dragar a Toa Vaca en el futuro inmediato, el dragado potencial de Guayabal proveería abastos de agua adicionales a la Región Sur. La protección de esta cuenca es crítica para la conservación de Toa Vaca.

Los embalses Lucchetti y Loco, parte del Distrito de Riego del Valle de Lajas en la Región Suroeste, reciben aportaciones de agua de los embalses de Yahuecas y Guayo, ubicados en las laderas norte de la Isla. Este sistema es la fuente de agua más importante en la Región Suroeste, supliendo hasta 8 mgd de agua a las plantas de la AAA que sirven a 160,000 residentes en los municipios de Lajas, San Germán, Sabana Grande, Guánica y sectores de Hormigueros. El distrito también suple hasta 12 mgd para riego agrícola en el Valle de Lajas. Además, la AEE genera electricidad en dos plantas hidroeléctricas en el sistema, produciendo un promedio anual de 38,000 Kva. El Embalse Loco ha perdido el 59 % de su capacidad original, pero debido a su tamaño menor, no es una fuente de almacenaje de agua significativa. Lucchetti ha perdido el 45 % de su capacidad (7,440 acres-pies), y aunque no es necesario un dragado inmediato, la importancia del embalse para la región requiere implantar un plan de conservación de la cuenca y un eventual dragado. La AAA lleva a cabo al presente un estudio para determinar la viabilidad de capturar parte del agua que la AEE descarga hacia el mar en el Embalse Loco, y desviarla a un nuevo embalse que se construiría en el Valle de Lajas para usos domésticos y agrícolas.

6.3.2 Lagunas

En Puerto Rico y sus islas adyacentes existen 34 lagunas principales, con un área superficial mayor de 12.5 acres (5 hectáreas), y cientos de lagunas menores, además de charcas en depresiones y sumideros y formadas por diques artificiales (figura 6.8). Las lagunas principales en Puerto Rico son zonas de descarga de aguas subterráneas o superficiales, o cuerpos de agua separados del agua salina de los océanos o mares por tramos de costa o isletas de origen marino. De el total de 34 lagunas principales, 24 se ubican en Puerto Rico (se incluyen como laguna en este total las dos (2) Salinas de Cabo Rojo, con un área combinada de 614 acres), nueve (9) en Vieques y dos (2) en Culebra. Las lagunas en Puerto Rico reúnen características que permiten el desarrollo abundante de flora y fauna acuática. También atrapan sedimentos y contaminantes que de otra forma pudieran llegar al mar mediante escorrentía pluvial. Las lagunas también sirven de viveros para algunas especies de peces y de hábitat para organismos invertebrados y aves acuáticas (López, A., 2002). Un inventario de las lagunas en Puerto Rico se ilustra en la Tabla 6-4.

Las lagunas en la Isla no son una fuente de abasto de agua, por su salinidad y valor ecológico. Las principales lagunas incluyen las del sistema del Estuario de la Bahía de San Juan (Condado, San José, Torrecillas y Piñones); Tortuguero en Vega Baja y Manatí; Joyuda en Cabo Rojo; Aguas Prietas y Grande en Fajardo; Cartagena en Lajas; Humacao en Humacao; y Los Corozos en San Juan-Carolina. El Caño Tiburones (Capítulo 9), entre Manatí y Barceloneta, forma una especie de laguna entre los canales que lo drenan. La salinidad relativamente baja en el Caño

Tiburones y la Laguna Tortuguero permitiría su utilización potencial como fuente para producir agua potable. El agua que descarga la Laguna Tortuguero hacia el mar mediante un canal artificial (8 mgd) es mayormente fresca, con salinidades que no exceden 1,000 mg/L. El efluente promedio del Caño Tiburones de 106 mgd contiene hasta un 40 % de agua fresca proveniente de los acuíferos al norte de dicha área, y de escorrentías superficiales locales. Ambos efluentes salobres tienen el potencial de poder utilizarse como fuentes de agua para alimentar plantas desalinizadoras, preferiblemente utilizando ósmosis inversa (RO). La Figura 6-10 ilustra la localización de los embalses y algunas lagunas principales.

Tabla 6-2. Inventario de lagunas costaneras de Puerto Rico, 2004.

Laguna	Localización	Área (cuerdas)
Atolladero	Cabo Rojo	1.16
El Faro	Cabo Rojo	74.4
Guaniquilla	Cabo Rojo	23.6
Joyuda	Cabo Rojo	356
Rincón	Cabo Rojo	190
Salinas I	Cabo Rojo	247
Salinas II	Cabo Rojo	386
de Piñones	Carolina - Loíza	262
La Torrecilla	Carolina - Loíza	759
Ceiba	Ceiba	95.8
Mata Redonda	Dorado	17.9
Aguas Prietas	Fajardo	132
Grande	Fajardo	124
Guánica	Guánica	1118
San Jacinto	Guánica	25.3
Pozuelo	Guayama	28.8
Carrizales	Hatillo	2.01
Sistemas Lagunas de Humacao *	Humacao	980
Cartagena	Lajas	203
Tortuguero	Manatí - Vega Baja	704
Las Salinas	Ponce	88.6
Mar Negro	Salinas	41.2
Punta Arenas	Salinas	26.4
del Condado	San Juan	77.0
Los Corozos	San Juan - Carolina	250
San José	San Juan - Carolina	1,149
Puerto Nuevo	Vega Baja	16.8
Algodones	Vieques	8.23

Tabla 6-4. Inventario de lagunas costaneras de Puerto Rico, 2004.

Laguna	Localización	Área (cuerdas)
Anones	Vieques	36.6
Arenas	Vieques	36.3
Boca Quebrada	Vieques	53.1
El Pobre	Vieques	54.0
Gato	Vieques	5.41
Icacos	Vieques	12.1
Kiani	Vieques	79.9
La Plata	Vieques	2.86
Matías	Vieques	7.74
Monte Largo	Vieques	25.9
Playa Grande	Vieques	51.5
Puerto Diablo	Vieques	15.1
Yanuel	Vieques	20.5
Cornelio	Culebra	7.09
Dakity	Culebra	0.36
Flamenco	Culebra	71.3
Lobina	Culebra	2.48
Maguey	Culebra	2.32
Playa Brava	Culebra	1.92
Resaca	Culebra	0.14
Zoni	Culebra	19.5
Total de lagunas: 49	Área total:	7,893 cuerdas
* Incluye lagunas Santa Teresa I y II, Mandri I-IV.		
Fuentes: OPA, 2004; Vivaldi y Paniagua Valverde, 1988.		

6.1.3 Estuarios

La palabra estuario se origina del latín, *aestuarium*, que quiere decir un área bajo la influencia de las mareas. Hoy en día la definición más utilizada es un área costanera donde el agua dulce proveniente de la tierra se mezcla con el agua de mar. También se define como una formación costanera parcialmente cerrada donde se encuentran y mezclan agua fresca o interior y marina (Figura 6-11). Para que un estuario se pueda considerar como tal, ha de existir una conexión libre del mar con la fuente de agua fresca, al menos durante parte del año. Se observan en estos lugares dos factores ambientales de gran importancia: las mareas, y la cantidad y ritmo de flujo de agua dulce. En el estuario los nutrientes de la tierra se mezclan con el flujo de las mareas, haciendo de este lugar uno muy fértil y productivo. Los estuarios son dinámicos debido al gran flujo e intercambio entre el ambiente terrestre y el marino. Esta interacción entre dos tipos de

agua trae como consecuencia variaciones en la salinidad del agua en sistemas superficiales y subterráneos.

En Puerto Rico existen estuarios en manglares, salitrales, lagunas, bahías y en las desembocaduras de los ríos. En general, el DRNA clasifica los estuarios en la Isla en cinco (5) clases o tipos (DRNA, 2003), incluyendo:

Bahías abiertas (Ej.: Mayagüez, Arecibo),

Bahía semi-cerrada (Ej.: San Juan, Jobos),

Lagunas costaneras (Ej.: Torrecilla, Joyuda),

Estuarios salinos (Ej.: Parguera, Vieques, Culebra) y

Desembocaduras de ríos (Ej.: Río Grande de Manatí, Río Cibuco, Río Espíritu Santo).

En algunos estuarios se ha encontrado que la mezcla del agua de mar y el agua dulce es homogénea, mientras que en otros sistemas se forman dos capas, la superior de agua dulce y la inferior de agua salada, por ser ésta más densa, separadas por una zona de mezcla denominada la interfase. La mezcla puede ser continua o periódica. En regiones secas, la salinidad del estuario puede ser más alta que la del mar, ya que cuando el agua de mar se evapora, la salinidad aumenta. A este tipo de estuario se le conoce como estuario hipersalino, porque en vez de diluir la salinidad del mar, la aumenta. La bahía de Ceiba y la bahía bioluminiscente de La Parquera son ejemplos de estuarios en Puerto Rico cuya salinidad es superior a la del mar (Lugo y García Martínó, 1996).

Debido a que el agua fresca es menos densa que el agua salada de mar, los estuarios tienden a estar estratificados. Generalmente, una capa de agua fresca flota sobre el agua de mar. En los ríos, el agua salina que penetra tierra adentro se conoce como “la cuña de agua salada”, debido a que penetra por debajo de la capa de agua fresca en forma de una cuña (ver la Sección 6.10.2 sobre intrusión salina en los acuíferos). El agua fresca se mezcla con el agua de mar, formando aguas de salinidad intermedia. Esta mezcla se produce por la acción combinada de la marea, las

olas y la magnitud de las escorrentías. Además de estuarios estratificados, existen estuarios parcialmente mezclados y otros totalmente mezclados. Debido a que las mareas, el oleaje y las escorrentías varían en tiempo y espacio, el estuario es un sistema muy dinámico en lo que respecta a la salinidad de sus aguas. En un punto en el estuario, la salinidad puede ser igual a la del agua de mar, mientras que a poca distancia en otro punto, la mezcla produce una salinidad intermedia, y hasta contener solamente agua fresca. A medida que la salinidad del agua cambia, también cambia su calidad. Cuando merma el caudal de agua fresca que penetra a un estuario, la cuña de agua de mar puede penetrar por el cauce del río varios kilómetros tierra adentro, mezclándose con el agua fresca. Esto ocurre en varios de los ríos principales de la Región Norte de Puerto Rico, incluyendo los ríos Guajataca, Arecibo, Manatí, La Plata, Loíza y Espíritu Santo. Esta cuña de agua salobre emigra nuevamente hacia la boca del río al mar cuando lluvias intensas en la cuenca provocan un aumento en el flujo de agua fresca en los ríos, que desplaza la cuña de agua salobre hacia el mar. Este proceso puede repetirse varias veces en el año, en función de los períodos de lluvia y sequía, además de la influencia de las mareas. En algunos estuarios de la Región Norte de Puerto Rico (Arecibo, Manatí, Espíritu Santo), durante períodos de flujos mínimos, las mareas depositan arena en la boca del río al mar, formando una represa temporera. El agua fresca en cantidades reducidas se acumula detrás de esta barrera, formando una laguna temporera aguas arriba de la boca. En condiciones naturales, esta barrera puede durar días, semanas y meses, sirviendo la laguna de criadero temporero de especies de agua fresca que luego emigran aguas arriba o al mar. Desafortunadamente, la extracción de arena en la boca de los ríos en la Isla altera este equilibrio dinámico entre el río y el mar, afectando la calidad del agua y la vida acuática en los estuarios.

El estuario es el último ecosistema en utilizar el agua dulce antes de que ésta se diluya completamente en el mar. Los estuarios son lugares de desove, y donde se desarrolla la etapa juvenil de especies marinas y especies acuáticas de la montaña, como los camarones de río. Al estuario migran especies de la montaña y el mar: peces, aves, moluscos, crustáceos, anfibios y reptiles. Por ejemplo, el pez olivo que se encuentra en las montañas de Lares y Utuado, en su etapa larval (cetí) emigra desde Arecibo por el río Tanamá hasta llegar allí. También se han observado varias especies de camarones que continuamente migran varios kilómetros desde la montaña al valle por el Río Mameyes para desovar. Luego regresan a la montaña para alimentarse y desarrollarse. La migración de estos camarones ocurre con mayor frecuencia durante la noche (Lugo y García Martínó, 1996).



Fuente: Modificado de Lugo y Martínó, 1996

Figura 6-5. Formación y desplazamiento que caracterizan la cuña de agua de mar en ríos. El perfil ilustrado muestra la posición de la cuña salada la cual varía de acuerdo a la escorrentía (flujo de agua fresca).

Los estuarios poseen tres tipos de productores que realizan el proceso de fotosíntesis: macrofitos (algas, hierbas marinas y hierbas de pantanos), microfitos bénticos (algas y otros tipos de plantas unidas al fondo) y fitoplancton (algas microscópicas). También podemos encontrar comunidades de plantas asociadas al lugar como bosques pantanosos (*Pterocarpus* o "palo de pollo"), pantanos, manglares y plantas flotantes. Los estuarios son importantes para mantener la alta calidad de las aguas costaneras, acomodar las inundaciones, amortiguar las marejadas, y sostener la recreación y el turismo. Algunos de los beneficios de los estuarios son:

Representan áreas que pueden retener grandes volúmenes de agua, protegiéndonos así de posibles inundaciones repentinas,

En ocasiones albergan puertos y canales de navegación, y

Finalmente, algunas actividades antropogénicas que afectan negativamente a los estuarios son: Contaminación de las aguas estuarinas por descargas de efluentes domésticos e industriales, aguas calientes, derrames de petróleo y otros;

La excesiva sedimentación afecta la salud del estuario; y

Estructuras para controlar el movimiento del agua dulce, tales como las presas, las tomas de agua superficial, bombas de drenaje y extracción de agua subterránea y otras, afectan el equilibrio del estuario.

La cuña de agua de mar es un indicador directo de la presión hidrostática en el estuario ejercida por el río sobre el agua de mar. Por lo tanto, también es indicativo del flujo disponible del río y su estado hídrico (flujo máximo, promedio o mínimo). El Río Culebrinas es típico de estos sistemas, debido a la abundancia de flujo la mayor parte del tiempo, lo que impide que la cuña de agua salada avance aguas arriba. Una topografía accidentada también puede influenciar el efecto de la cuña de agua de mar en la desembocadura de un río. Una pendiente pronunciada impedirá el progreso del agua de mar aguas arriba hacia el cauce del río.

Los estuarios en Puerto Rico generalmente están estratificados, exhibiendo las aguas más profundas mayor salinidad. El espesor y extensión de la zona de mezcla de agua fresca y salina es función de las temperaturas relativas del agua en las zonas de agua salina y fresca, la velocidad y cantidad de descarga de agua fresca, y el viento. El tiempo de residencia del agua fresca en la zona de mezcla también afecta su concentración de oxígeno disuelto. Esto se debe a que el agua no está expuesta al aire, fuente del oxígeno. En los estuarios formados en la desembocadura de los ríos, la cuña de agua salada emigra aguas arriba en proporción a la descarga de agua fresca. Durante la época de lluvias en la Isla, la cuña de agua salada se desplaza hacia el mar en las desembocaduras de cauces como el Río Grande de Manatí y el Río Grande de Arecibo. En estos mismos cauces, la cuña avanza hasta una milla tierra adentro cuando los flujos se reducen en la época de estiaje. En el Río Espíritu Santo en Río Grande, la cuña de agua de mar se ha detectado aproximadamente tres (3) millas aguas arriba de la boca al mar (Yoshioka, *USFWS*, 2003).

Uno de los estuarios más importantes en Puerto Rico es el de la Bahía de San Juan. Este estuario fue designado por la *EPA* como parte de la red de "Estuarios Nacionales", para promover su conservación y rehabilitación. Este estuario incluye la Bahía de San Juan y las lagunas Condado, San José, Torrecilla y Piñones. Un segmento de la Laguna San José es designado como la Laguna Los Corozos, aunque está conectada a la primera. El estuario se alimenta de descargas de agua fresca provenientes del Río Piedras y varios caños y quebradas que descargan escorrentía urbana, particularmente el Caño de Martín Peña y la Quebrada Blasina. El estuario incluye ambientes de arrecifes de coral, lagunas superficiales de mar abierto, áreas intermareales rocosas, dunas y playas, planicies arenosas, pantanos y salinas, pantanos salobres, pantanos de agua dulce, mangles, humedales boscosos, y lagunas o estanques de agua dulce. Hidráulicamente es un sistema complejo dominado por el reflujo de agua de mar controlado por las mareas en la zona. Existen diferencias significativas en la salinidad entre los cuerpos de agua que forman el estuario, así como variaciones en tiempo y espacio. Las Lagunas San José y Torrecilla exhiben las concentraciones y variaciones máximas de salinidad debido a múltiples conexiones al mar y descargas de escorrentía urbana de la zona de Carolina. Además, debido a dragados anteriores, bolsillos de agua de mar se mantienen en la Laguna San José en zonas donde las excavaciones impiden la circulación y mezcla del agua. En comparación, la salinidad en la Bahía de San Juan es similar a la que ocurre en el mar abierto. Cerca de la boca

del Caño Martín Peña, la salinidad disminuye respondiendo a descargas de agua fresca del Río Piedras y al flujo del Caño Martín Peña. En este caño, predomina el agua fresca en la superficie del canal, flotando sobre agua salina de mayor densidad (USCOE, 2003).

Otro estuario salino de importancia en la Isla es la Bahía de Jobos en Guayama y Salinas, en la Región Sur. El área es reconocida como la Reserva Nacional de Investigación Estuarina Bahía de Jobos (*Jobos Bay National Estuarine Research Reserve* o *JOBNERR* por sus siglas en inglés, comúnmente referida como Reserva de “Jobaner”) por la *National Oceanic and Atmospheric Administration* (Administración Nacional Atmosférica y Oceánica o *NOAA*). Esta reserva incluye aproximadamente 3,000 acres en la Bahía de Jobos, incluyendo los Cayos Caribe y áreas aledañas a la Central Aguirre. La Bahía de Jobos es ejemplo típico de un estuario en las costas áridas de la región caribeña. Lo caracterizan las lagunas extensas, pequeños islotes poblados de manglares, praderas de yerbas marinas y arrecifes de coral. Es hábitat de muchas especies en peligro de extinción como el manatí y aves como el falcón peregrino, la Mariquita de Puerto Rico y el pelícano pardo. La reserva incluye una zona de humedales donde predominan los mangles, incluyendo un área de aproximadamente 200 cuerdas donde las comunidades de estos árboles se han deteriorado o extinguido. La presunción general es que este deterioro de los mangles en esta reserva se debe a reducciones en el flujo de agua subterránea hacia el estuario debido a extracciones por pozos al norte de la zona (González, 2003). Sin embargo, estudios y análisis llevados a cabo recientemente por Quiñones (2004) establecen que la fuente principal de agua fresca al estuario no es el acuífero, sino la escorrentía causada por eventos de lluvias intensas. El deterioro de la zona de mangles se debe probablemente a un ciclo de lluvia deficiente a largo plazo que afecta la zona, y que puede extenderse por 30 ó más años.

Entre los estuarios ribereños en Puerto Rico, el del Río Grande de Arecibo fue estudiado intensamente como parte del desarrollo del Superacueducto del Norte. Este estuario ubica en una zona de meandros del río, con múltiples bocas al mar, pero generalmente en desuso que forman lagunas alimentadas por agua subterránea. Previo al desarrollo del Embalse Dos Bocas en Utuado, este estuario posiblemente era muy similar al del Río Grande de Manatí al presente. Flujos abundantes generados por la lluvia copiosa en la cuenca que alimenta el río generaban crecientes frecuentes que mantenían el estuario como un sistema generalmente de agua fresca hasta la vecindad de la boca al mar. El embalse alteró el régimen de flujo del río y del estuario, induciendo períodos de flujos mínimos extremos, los que permitieron que la cuña de agua salada avanzara aguas arriba con mucha más frecuencia que previo al desarrollo de la represa. Paralelamente, la reducción en flujo contribuyó al efecto de las mareas en formar una duna más efectiva y permanente en la boca del río al mar. La emigración aguas arriba de varias especies, incluyendo el cetí, se afectó por la represa, reduciendo sus poblaciones con el tiempo al eliminarse el acceso a los hábitats en la parte alta del Río Grande de Arecibo. En los estudios para el Superacueducto del Norte se evaluó y simuló con un modelo matemático el comportamiento del estuario para determinar la cantidad mínima de agua requerida para mantener la calidad del agua y la vida acuática en la parte baja del sistema. Además, se definió la vida acuática existente. Estos estudios proveen una base para el manejo de otros estuarios en la Isla donde existe el potencial de desarrollo de embalses adicionales (figura 6.10).



Fotografía 6-1. Entrada del mar en un río con flujo intermitente en el sureste de Puerto Rico (foto Heriberto Torres, USGS, 2000).

6.7 Humedales

Los humedales son áreas de transición entre sistemas acuáticos y terrestres, jugando un papel importante en la hidrología, particularmente en las zonas costaneras. En general, el área que ocupa un humedal se inunda o está saturada por aguas superficiales y subterráneas durante un periodo de tiempo de suficiente duración y frecuencia que permite sustentar organismos adaptados a condiciones de poco oxígeno y saturación del suelo (USCOE, 1977). Esta definición utiliza dos criterios fundamentales para definir un humedal: suelos saturados con agua que sufren de aireación pobre, y adaptación biótica en respuesta a las condiciones del suelo. Esto implica que el factor fundamental en la ecología de un humedal es el ciclo hidrológico. Los humedales responden a los pulsos hidrológicos de inundaciones y sequías, adaptándose a estos cambios los organismos que habitan el humedal. El período de tiempo que el suelo del humedal está inundado o saturado depende de estos pulsos hidrológicos, lo que a su vez afecta las especies que habitan en el área. Es por estas razones, que en la planificación del uso de los recursos de agua, es indispensable considerar las demandas de agua potencial de los humedales, particularmente aquellos que dependen primordialmente de agua fresca.

Los humedales son fuentes importantes de nutrientes disueltos en el agua que los forma, contribuyendo al bienestar de muchas especies de flora y fauna. El agua en los humedales a

menudo está saturada de nutrientes, clasificándose entre los sistemas naturales más productivos del planeta. Esta alta productividad primaria es de gran importancia a una variedad de especies de peces y crustáceos marinos y terrestres. La productividad biológica de los humedales fluviales los convierte en los más importantes criaderos naturales de peces, incluyendo muchas especies de alto valor comercial. La magnitud y la frecuencia de exportación de materia orgánica (detrito) de los humedales varían de acuerdo con la intensidad y frecuencia de los pulsos de agua. Los humedales conectados a otros cuerpos de agua o al mar (riparios), exportan una cantidad mayor de materia orgánica que los sistemas cerrados donde el agua permanece esencialmente inmóvil (Brown y otros, 1979).

En Puerto Rico existen humedales de gran importancia que ocupan aproximadamente 6,000 cuerdas. La mayor parte ocurren en los valles costaneros, principalmente en el norte y el sur de la Isla donde el terreno es llano y retiene agua de mar durante mareas altas o escorrentía de agua fresca durante inundaciones. Los suelos predominantes en estas áreas se componen de arena, cienos, limos o arcillas y depósitos orgánicos de origen marinos. Muchos de los humedales costaneros de la Isla están asociados a lagunas costaneras o pantanos permanentes, incluyendo las reservas de la Laguna Tortuguero, Laguna San José, Laguna Torrecilla, Laguna de Joyuda y el Caño Tiburones (Figura 6-13).

6.7.1 Sistemas de clasificación de humedales

Los humedales se clasifican utilizando diversos sistemas, basados en factores tan variados como composición florística, localización topográfica, configuración geomorfológica de la cuenca, y parámetros medioambientales tales como hidroperiodos y/o calidad de agua (Brown et al, 1979). Un sistema de clasificación del *National Wetlands Inventory* (Inventario Nacional de Humedales o *NWI*) del *US Fish and Wildlife Service* (Servicio de Pesca y Vida Silvestre de Estados Unidos o *USFWS*) designa el límite tierra adentro de los humedales como 1) la frontera entre terreno con cubierta hidrofítica predominante y el terreno con vegetación mesofítica o xerofítica predominante, 2) la frontera entre el suelo predominantemente hídrico y el suelo predominantemente no-hídrico y 3) en el caso de humedales sin vegetación ni suelo, la frontera entre terreno inundado o saturado durante algún tiempo durante la estación de crecimiento cada año y el terreno que no lo está (Cowardin y Lahore, 1979). A continuación una descripción más detallada de los humedales en Puerto Rico (*USCOE*, 1978):

Acuáticos marinos – Circunvalan a Puerto Rico totalmente y consisten de áreas marinas superficiales y la zona intermareal, excepto donde se encuentran pantanos de mangle. La vegetación en estos lugares consiste de alga marina en bases rocosas o gramas marinas. El límite costanero del acuático marino es aparentemente la elevación de la marea media baja, y el límite marino es el límite del crecimiento de plantas arraigadas (en este caso las gramas marinas) o hasta los límites de la penetración de luz solar en el caso de las comunidades de algas. La

vegetación se ve expuesta sobre la superficie del agua solo durante mareas excepcionalmente bajas. Estas áreas son muy productivas y son importantes para muchas especies de animales, ya que proveen alimentación y cobijo. También son muy importantes en la cadena alimenticia producto del transporte de partículas de roca ricas en material orgánico (detrito) y para el ciclo de nutrientes en la zona somera costera.

Planicies costaneras de agua salada - Incluyen principalmente áreas intermareales no vegetadas o escasamente vegetadas. Incluyen áreas hipersalinas sobre la marea media alta que se inundan durante mareas de tormenta. Algunas planicies costaneras en la Isla están en la forma de leves depresiones, inundadas sólo durante marea alta, donde el agua se evapora dejando el suelo hipersalino; pocas plantas pueden soportar estas condiciones. Las planicies costaneras se encuentran intermitentemente por toda la costa suroeste de Puerto Rico, donde los niveles de precipitación son conducentes a la formación de suelos hipersalinos.

Ciénagas de agua salada - Ciénagas saladas extensas, como las de la costa este de los Estados Unidos, no se han desarrollado en Puerto Rico. En la Isla, la posición de la ciénaga regularmente anegada ha sido ocupada en su mayor parte por bosques de mangle. Las ciénagas anegadas irregularmente ocurren tierras arriba del bosque de mangle, y en su mayor parte son de dos tipos: ciénagas dominadas por el helecho y ciénagas dominadas por las plantas suculentas.

Humedales de agua salina - El humedal de agua salina está representado por los árboles de mangle. La poda, el dragado y los rellenos han destruido la mayor parte de los humedales formados por mangles en Puerto Rico con una reducción en la extensión de los bosques originales de un estimado de 25,000 cuerdas a aproximadamente 4,000 cuerdas al presente (*USCOE*, 2004). Los sistemas de bosques de mangle de Puerto Rico se pueden clasificar como de borde, ribereños, de cuenca, enanos, o de islote de mangle (Lugo y Carreras, 1978). El árbol de mangle ocurre en toda la costa de la Isla pero es más común en las costas norte y sur. En el norte, son mayormente del tipo de cuenca, mientras que los del sur son en su mayoría de borde. Los pantanos de árboles de mangle son extremadamente productivos biológicamente. Las larvas y formas juveniles de camarones, crustáceos marinos, peces y otros animales marinos viven en estos ecosistemas hasta que son lo suficientemente maduras para dirigirse al mar.

Acuático de agua dulce - Este sistema acuático se encuentra inundado todo el tiempo con agua fresca proveniente de descargas de agua subterránea ó de escorrentía.

Llano de agua dulce – Estos sistemas de humedales ocupan una extensión territorial mínima en Puerto Rico. Rodean áreas de niveles de agua fluctuantes, como alrededor de lagunas o adyacentes a riachuelos y ríos. Aunque ocurren en la Isla, no son extensos, aparentemente porque los hábitat de agua fresca generalmente no están sujetos a fluctuaciones importantes en el nivel de agua.

Ciénaga de agua dulce - Las ciénagas de agua dulce en Puerto Rico ocurren primordialmente en las áreas bajas costaneras. Estos sistemas se encuentran frecuentemente adyacentes al hábitat acuáticos de agua dulce; estas ciénagas a menudo son anegadas por periodos largos e invadidas por especies acuáticas. Algunas ciénagas se anegan intermitentemente, y se caracterizan por suelos parcialmente saturados. Frecuentemente bordean campos inundados ocasionalmente. La distinción entre ciénagas y terrenos anegados ocasionalmente es difícil de percibir.

Pantano de agua dulce - Estos sistemas de agua fresca se encuentran en relativamente pocas áreas de Puerto Rico. Las áreas bajas llanas costaneras probablemente formaban en el pasado muchos más pantanos de agua dulce, pero sólo algunos trazos restantes han escapado al quemado, desmonte para la agricultura, cortado para leña o madera y daño de los huracanes. La especie dominante es el *Pterocarpus officinalis* (palo de pollo).

Salitrales costaneros - Incluye definición y especies dominantes en los salitrales costaneros (Cerame Vivas, 2001).

Humedales de la montaña - Frangi (1983) identificó seis humedales en las montañas de Luquillo: 1) el bosque montañoso de *Pterocarpus officinalis* (palo de pollo) ubicado en valles anegados a unos 300 metros de elevación; 2) palmares ribereños de palma de sierra entre elevaciones de 300 y 900 metros; 3) palmares de ladera a elevaciones sobre 600 metros; 4) bosques de palo colorado a elevaciones sobre los 600 metros; 5) bosque enano en los picos de El Yunque, y; 6) las ciénagas de *Sphagnum* y herbáceas, también en los picos o en el área de palo colorado, pero en áreas topográficamente planas.

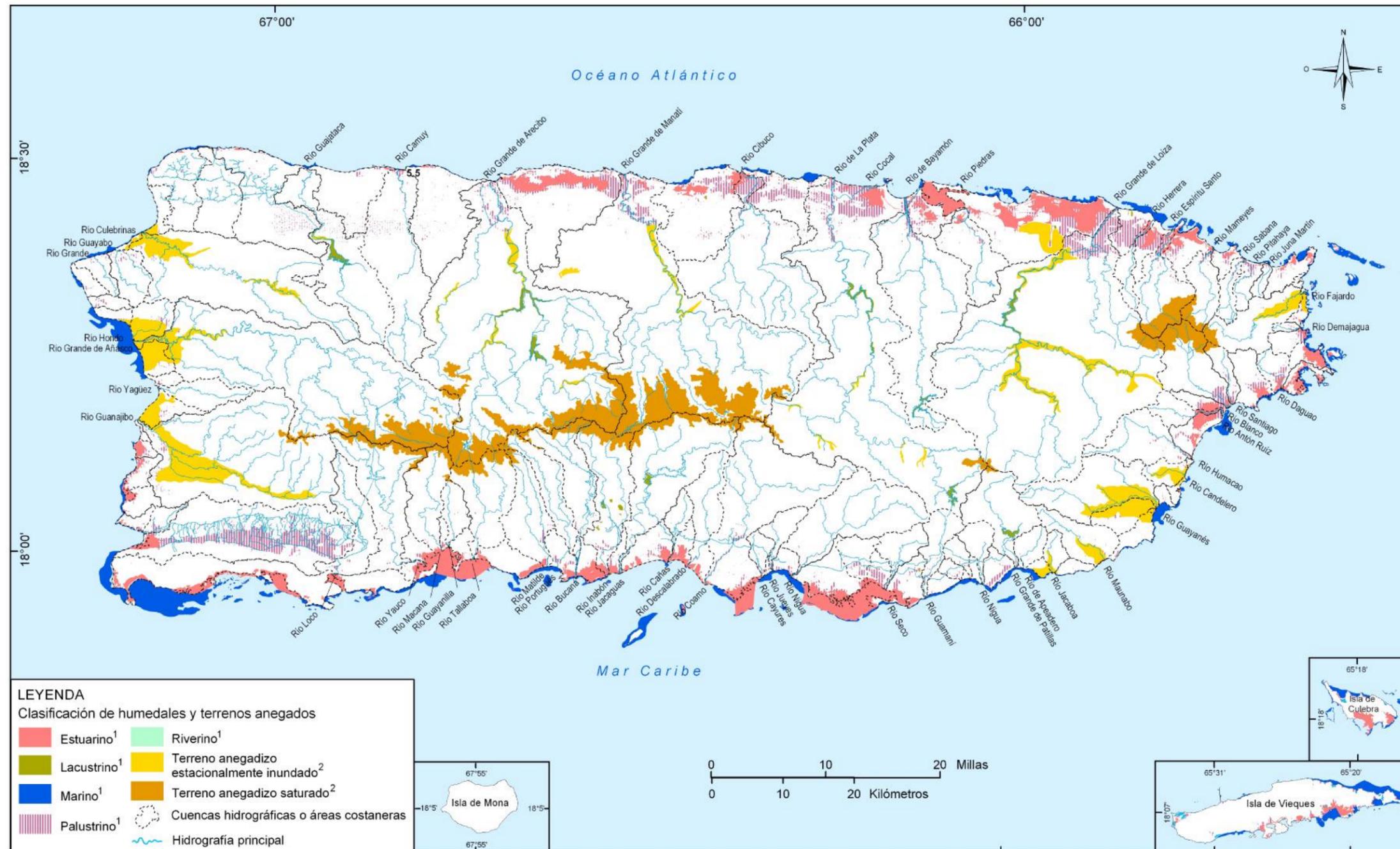
En general, en la Isla solo se reconocen los primeros ocho tipos diferentes de humedales aquí listados (*Preliminary Guide to Wetlands of Puerto Rico, USCOE, 1978*), aunque el *USFS* (Lugo, 1988) incluye otras clasificaciones para áreas en bosques tropicales. La Tabla 6.5 incluye una

lista de los humedales más importantes de Puerto Rico según un censo del DRNA en el año 2000.

Tabla 6-3. Algunos humedales importantes en Puerto Rico (DRNA, 2000).

Humedal	Localización	Área aproximada (cuerdas)
Piñones, Torrecilla, Vacía Talega	Loíza	3,515 ¹
Caño Tiburones	Arecibo	7,642 ²
Ensenada Comezón - Las Picúas	Río Grande	675 ³
Área de la Laguna Tortuguero - Cabo Caribe y Cibuco	Vega Baja - Manatí	573 ⁴
Salitrales de Cabo Rojo	Cabo Rojo	571
Salitrales de Roosevelt Roads	Ceiba	254
Laguna Joyuda	Cabo Rojo	84.5
Bosque de <i>Pterocarpus</i>	Humacao	381
Ciénaga Las Cucharillas	Cataño - Loíza	1,274
1 Área aproximada de manglar.		
2 Área aproximada de marisma de agua fresca del Caño Tiburones.		
3 Área aproximada de manglar en La Picúa.		
4 Área aproximada de marisma de agua fresca en la Laguna Tortuguero.		

Fuente: Departamento de Recursos Naturales y Ambientales, División de Patrimonio Natural, 2000. Categoría de Humedales revisada en 1999.



Fuente: US Corps of Engineers, 1978.

Figura 6-6. Humedales principales de Puerto Rico según el sistema de clasificación de humedales del Cuerpo de Ingenieros Federal.

6.8 Acuíferos y Manantiales

Puerto Rico posee una diversidad de acuíferos a través de su extensión geográfica y constituyen un recurso hídrico de gran valor e importancia (Figura 6.12). En general, la productividad de los acuíferos en la Isla es una función de los materiales que los forman. Estos materiales incluyen rocas calizas sedimentarias de permeabilidad primaria y secundaria variable, pero generalmente alta; depósitos aluviales no-consolidados de alta porosidad y permeabilidad; y rocas de origen volcánico de permeabilidad limitada donde pueden abundar fracturas capaces de almacenar grandes cantidades de agua. Los principales acuíferos en la Isla incluyen aquellos formados por rocas calizas y aluvión de la Provincia de la Costa Norte; los acuíferos aluviales de los valles costaneros de las Provincias de la Costa Sur; los acuíferos aluviales en los valles interiores de Caguas, Cayey y Cidra (Provincia Interior); y los acuíferos menores en los valles ribereños en las Provincias Oeste y Este de la Isla. En la Provincia del Interior en la región montañosa, fracturas en las rocas de origen volcánico y depósitos aluviales en los valles de los ríos, forman acuíferos de menor importancia y productividad que en las otras provincias. En las islas de Vieques y Culebra también ocurren acuíferos aluviales de menor importancia. Los acuíferos más importantes en la Isla se resumen en la Tabla 6-6.

Las siguientes secciones presentan un breve resumen de los acuíferos en cada una de las provincias hidrológicas en Puerto Rico según detallados en la Tabla 6.5. También se presenta una descripción de las características generales de los recursos de agua en cada uno de estos sistemas hidrogeológicos subterráneos, en el orden de importancia.

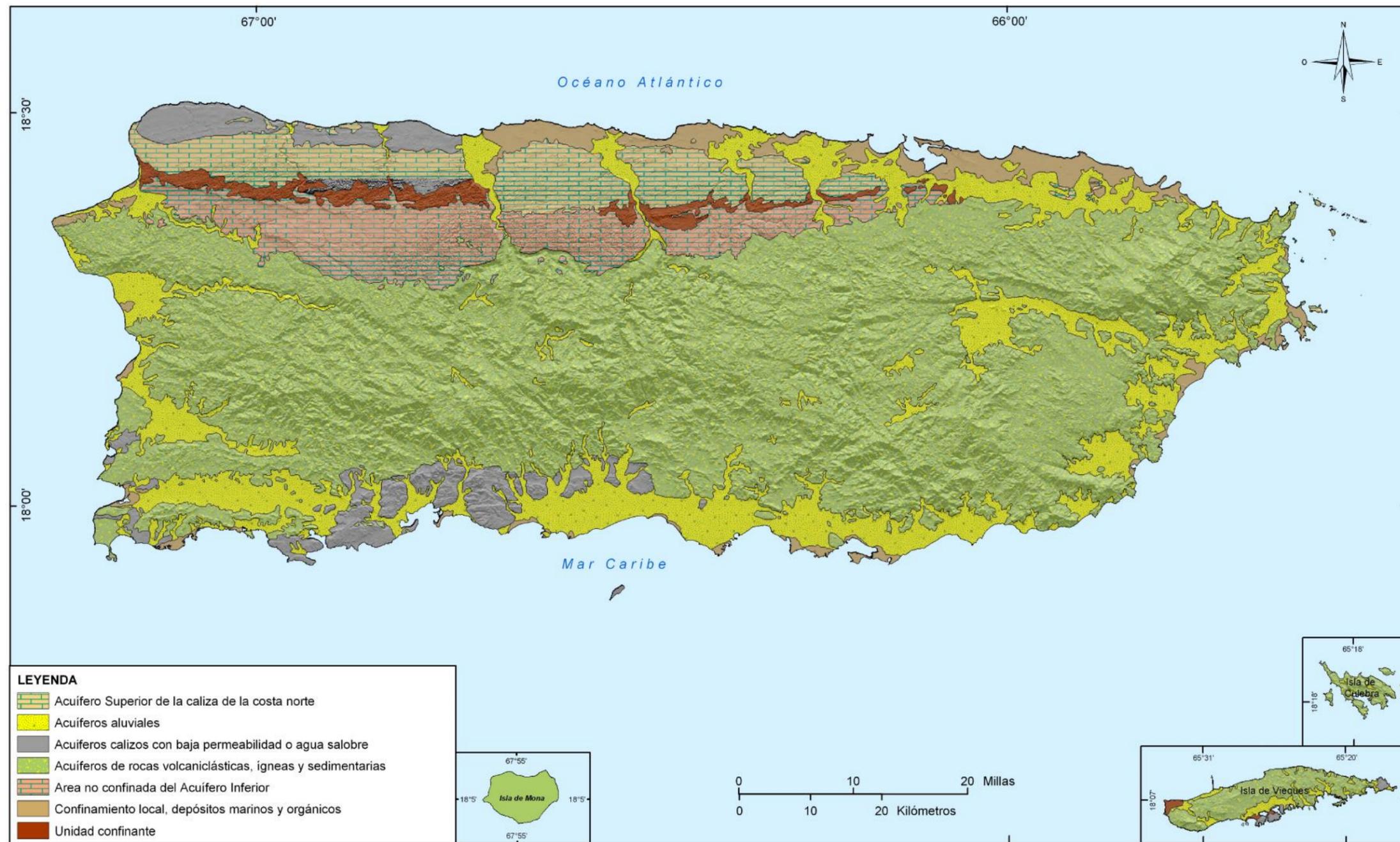
6.6.1 Provincia de la Región Norte

La Provincia del Norte de Puerto Rico se extiende desde Luquillo hasta Aguadilla, ocupando un área de aproximadamente 905 mi². La zona incluye desde la costa hasta la divisoria de la Cordillera Central de la Isla y la Sierra de Luquillo en el este. La Provincia del Norte incluye los acuíferos más importantes en la Isla en un área de la Región del Karso (también referida como la Costa Norte) de 905 mi² que se extiende desde Aguadilla hasta Luquillo. Dos sistemas de acuíferos principales, denominados el Acuífero Superior y el Acuífero Inferior, fueron formados por procesos y depósitos geológicos (Figura 6-14). Estos acuíferos incluyen: 1) un sistema de rocas calizas con niveles altos a moderados de desarrollo de fracturas y canales de solución; 2) un sistema aluvial tipo abanico formado por el transporte de sedimentos de los ríos principales en esta área geográfica. Existen además zonas de sedimentos relativamente impermeables que actúan como capas confinantes de las formaciones de mayor permeabilidad. Los dos sistemas

de acuíferos en la Provincia del Norte son también referidos en la literatura hidrogeológica de Puerto Rico como el Acuífero Llano o Freático (Superior) y el Acuífero Profundo o Artesiano (Inferior). Los acuíferos de la Región del Karso son extremadamente complejos en su estructura y funcionamiento.

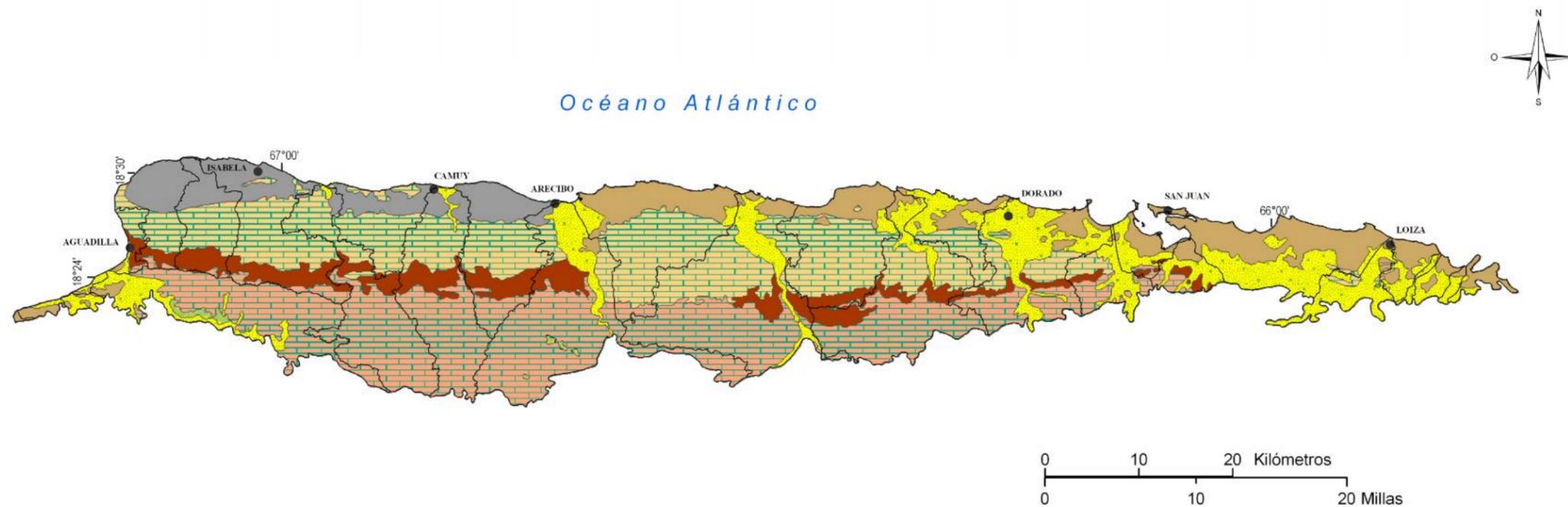
Tabla 6-4. Nomenclatura y sistemas de agua subterránea de Puerto Rico.

Acuíferos Calizos Fracturados	Provincia
Acuífero Superior Costa Norte (incluye acuíferos valles aluviales)	del Norte
Acuífero Inferior Costa Norte (artesiano o confinado)	del Norte
Dolomita Isla de Mona	Isla de Mona
Acuíferos aluviales	
Acuífero aluvial costero Costa Sur – Ponce a Patillas	de la Costa Sur
Acuífero aluvial del valle de Caguas-Juncos	del Interior
Acuífero aluvial del valle de Cayey	del Interior
Acuífero valle aluvial de Río Espíritu Santo a Río Demajagua	de la Costa Este
Acuífero valle aluvial de Yabucoa	de la Costa Este
Acuífero valle aluvial de Humacao-Naguabo	de la Costa Este
Acuífero valle aluvial de Maunabo	de la Costa Este
Acuífero aluvial de Guánica	de la Costa Sur
Acuífero aluvial de Guayanilla	de la Costa Sur
Acuífero aluvial de Tallaboa	de la Costa Sur
Acuífero valle aluvial de Yauco	de la Costa Sur
Acuífero valle de Lajas	No asignada
Acuífero aluvial valle de Río Guanajibo	de la Costa Oeste
Acuífero valle aluvial de Río Yagüez	de la Costa Oeste
Acuífero valle aluvial de Río Grande de Añasco	de la Costa Oeste
Acuífero valle aluvial de Río Culebrinas	de la Costa Oeste
Acuífero aluvial de Esperanza, Vieques, Puerto Rico	Isla de Vieques
Acuífero aluvial de Resolución, Vieques, Puerto Rico	Isla de Vieques
Acuíferos volcánicos fracturados y de roca descompuesta	
Acuíferos Volcánicos Fracturados, Puerto Rico	del Interior
Acuíferos costeros fracturados, Puerto Rico	Varias
Acuíferos costeros fracturados, Vieques, Puerto Rico	Isla de Vieques
Acuíferos costeros fracturados, Culebra, Puerto Rico	Isla de Culebra



Fuente: Departamento de Recursos Naturales y Ambientales, 2004, modificado de *US Geological Survey*, 1998.

Figura 6-7. Mapa hidrogeológico de Puerto Rico, Vieques y Culebra.



LEYENDA

-  Acuífero Superior de la caliza de la costa norte
-  Acuíferos aluviales
-  Acuíferos calizos con baja permeabilidad o agua salobre
-  Acuíferos de rocas volcánicas, ígneas y sedimentarias
-  Área no confinada del Acuífero Inferior
-  Confinamiento local, depósitos marinos y orgánicos
-  Unidad confinante
-  Cuencas hidrográficas o áreas costaneras

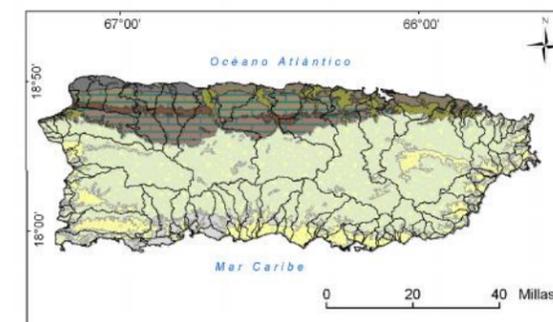


Figura 6-8. Acuíferos de la Región Norte de Puerto Rico. Refiérase a las figuras 6.13 y 6.14 para la información de cortes seccionales.