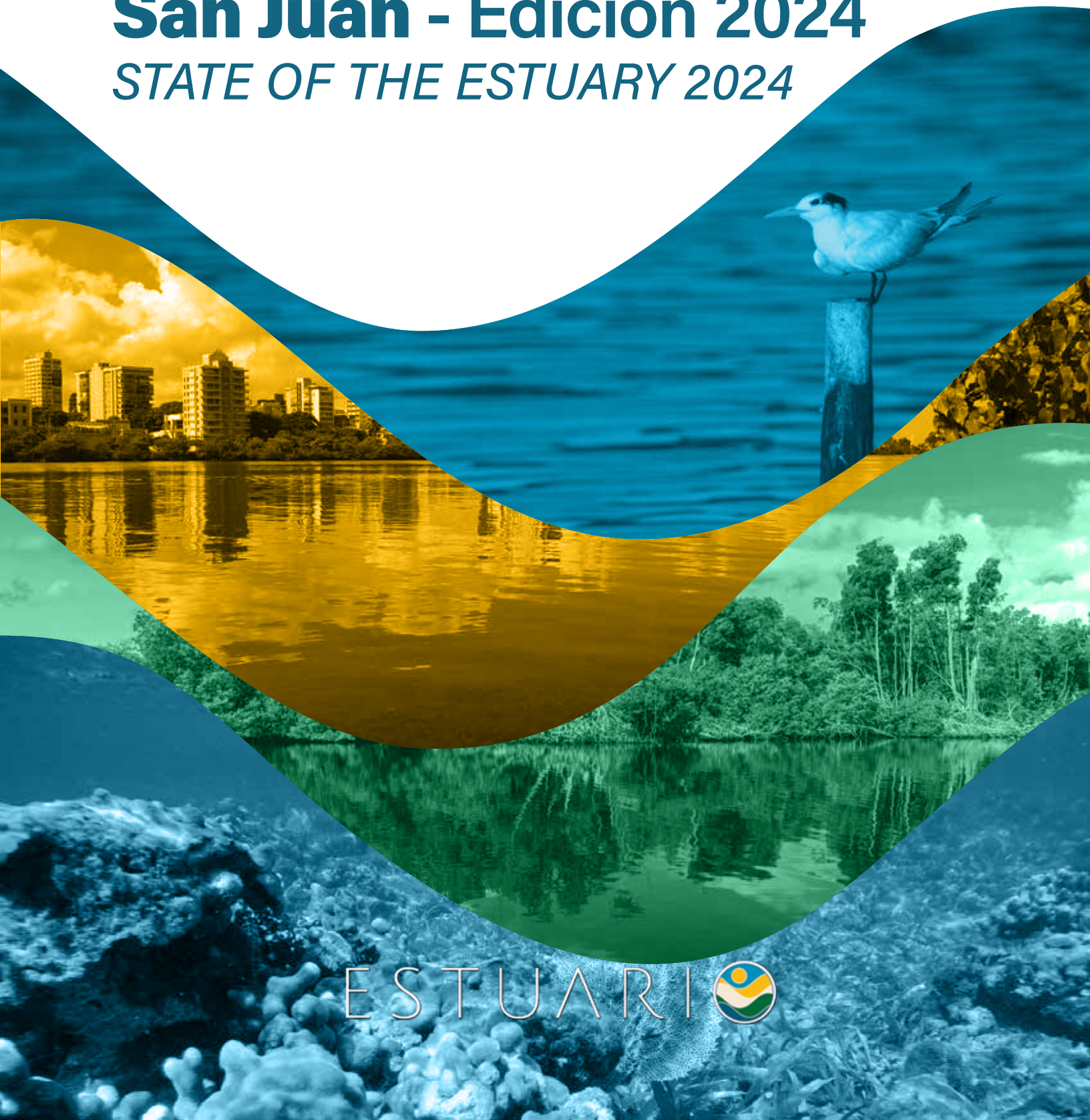
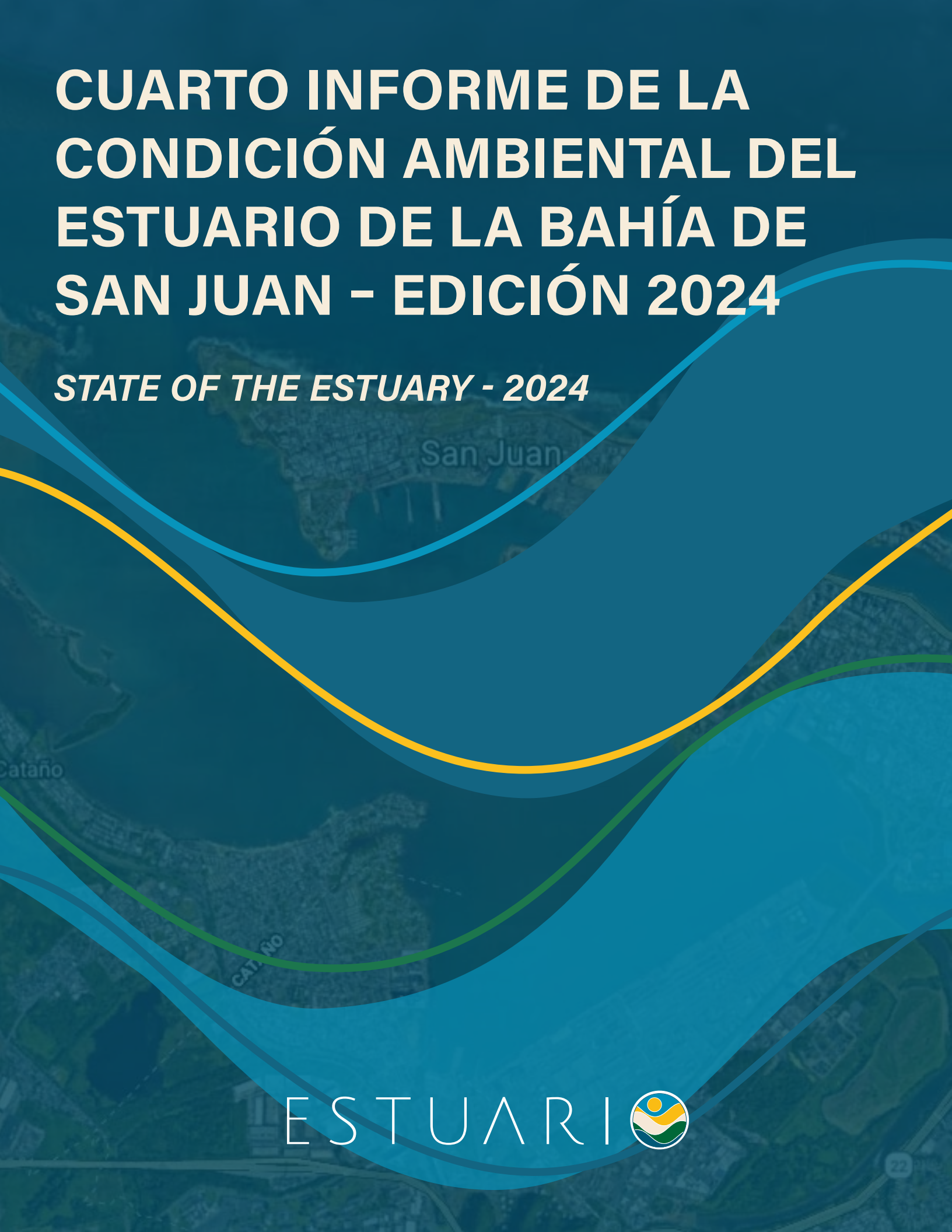
Cuarto informe de la condición ambiental del Estuario de la Bahía de San Juan - Edición 2024

STATE OF THE ESTUARY 2024



CUARTO INFORME DE LA CONDICIÓN AMBIENTAL DEL ESTUARIO DE LA BAHÍA DE SAN JUAN – EDICIÓN 2024

STATE OF THE ESTUARY - 2024



ESTUARIO

Derechos reservados

Esta publicación es posible gracias al auspicio de la Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés) de Estados Unidos bajo el acuerdo 4T-96213322-3 con la Corporación para la Conservación del Estuario de la Bahía de San Juan. La información ofrecida en este documento no necesariamente representa la posición oficial de la EPA. Todas las partes de esta publicación podrán reproducirse libremente, excepto para fines comerciales, con el debido crédito a sus autores.

Este documento será citado como: **Cuarto Informe de la Condición Ambiental del Estuario de la Bahía de San Juan (2024). Estuario de la Bahía de San Juan. San Juan, Puerto Rico.**

Coordinador editorial:
Jorge F. Bauzá-Ortega
Edición y corrección:
Sandra I. Villerrael Hernández
Diseño y maquetación:
Catalina García García

https://estuario.org

Tabla de Contenido

I. Resumen ejecutivo

Cuarto informe de la condición ambiental del Estuario de la Bahía de San Juan (2024) 6

Nuestro trasfondo 7

Sostenibilidad 8

Desafíos y oportunidades 9

El empoderamiento y la participación ciudadana 9

Condición ambiental del estuario: Peldaño hacia la resiliencia y la sostenibilidad 10

II. El Estuario de la Bahía de San Juan 15

Cuerpos de agua

› Bahía de San Juan 18

› Caño Martín Peña 19

› Río Piedras 20

› Canal San Antonio 21

› Laguna del Condado 22

› Canal La Malaria 23

› Península La Esperanza 24

› Laguna La Torrecilla 25

› Canal Blasina 26

› Canal Suárez 27

› Lagunas San José y Los Corozos 28

› Quebrada San Antón 29

› Lago Las Curías 30

› Laguna de Piñones 31

› Quebrada Juan Méndez 32

III. Parámetros contaminantes en agua, sedimentos y vida acuática 35

Monitoreo de indicadores de calidad del agua: Los parámetros fisicoquímicos 36

Contaminantes emergentes de preocupación en aguas del Estuario de la Bahía de San Juan 48

Desarrollo de una plataforma predictiva de afloramiento (brotes) de algas peligrosas para la laguna San José 54

El frágil ecosistema de la bahía de San Juan: una década de contaminación 58

› Los peces cuentan una historia 59

› ¿Qué cambió entre 2011 y 2022? 60

› El impacto de la urbanización 60

› ¿Por qué deberíamos preocuparnos? 61

› El camino por seguir 61

Monitoreo de indicadores de calidad del agua: Proyecto de monitoreo bacteriológico y notificación pública 64

Aguas no aptas para el uso recreativo: conoce los microorganismos implicados 70

IV. Observación de recursos vivientes como indicadores ambientales 78

Los recursos vivientes y el Índice Ambiental del Estuario 80

› Los indicadores 81

› El análisis 86

Censos de aves en la cuenca hidrográfica del Estuario de la Bahía de San Juan (2017-2024) 88

› La cuenca estuarina, ecosistemas llenos de vida 88

› Ciencia ciudadana y censos de aves participativos 89

› Censos de aves en el Estuario de la Bahía de San Juan 91

El impacto de los metales pesados en el Estuario de la Bahía de San Juan 100

Índice de calidad de la cuenca del Estuario de la Bahía de San Juan: metodología, componentes, indicadores y métricas 104

V. Cuenca hidrográfica, modelaje y resiliencia costera 110

Elementos a considerar en la hoja de ruta para la planificación del manejo integrado de la infraestructura hídrica con enfoque en la resiliencia: el caso de la quebrada Juan Méndez 112

› ¿Dónde se ubica la quebrada Juan Méndez y qué problemas enfrenta? 113

› ¿Qué es una canalización? 117

› Principales problemas 118

› ¿Por qué utilizar un enfoque integral centrado en la resiliencia de la infraestructura? 120

¿Hacia dónde nos dirigimos con esta iniciativa? 121

Tabla de Contenido

Características geomorfológicas de la costa del Estuario de la Bahía de San Juan. 124

› Tipos de costas encontradas en la zona del Estuario de la Bahía de San Juan 124

› Cambios en el ancho de las playas en la costa del Estuario de la Bahía de San Juan 126

› Carreteras estatales expuestas a erosión e inundación costera en el área del Estuario de la Bahía de San Juan. 129

Modelado de nutrientes y sedimentos en la cuenca del Estuario de la Bahía de San Juan. 132

› Descripción del área de estudio. 132

› Metodología 133

› Resultados 149

› Conclusiones 161

Reviviendo nuestras costas: Estrategias para la conservación y restauración de la resiliencia en el Estuario de la Bahía de San Juan. 162

VI. Ciencia ciudadana, participación y gobernanza hacia la resiliencia socioecológica 171

Red Intermunicipal de Manejo Integrado de Recursos y Residuos: hacia un modelo de gobernanza colaborativa para una gestión sostenible. 172

Científicos somos todos: El rol de ESTUARIO en la diseminación, aplicación y accesibilidad de conocimientos científicos 180

Los programas de concienciación ambiental y su importancia en la conservación del Caño Martín Peña y el entorno natural urbano en el Distrito de Planificación Especial del Caño Martín Peña. 184

› Sobre el Proyecto ENLACE del Caño Martín Peña. 184

› Sobre los programas de concienciación ambiental en el Distrito. 186

La importancia de la participación activa de la comunidad en la preservación de la Reserva 192

La creación de habitáculos en los espacios sumergidos del estuario 196

› Habitáculos sumergidos. 196

› Ubicación estratégica 198

› Respuesta ecológica 199

Tejiendo redes de esperanza desde la justicia del agua: reflexiones sobre la Red Comunitaria de Agua en el Estuario de la Bahía de San Juan. 204

› Una ventana a la problemática de las aguas del estuario 204

› Situando la Red como espacio de acción colectiva. 206

› Surgimiento y evolución de la Red Comunitaria de Agua 208

› ¿Desde qué perspectiva teórico-metodológica se construye colectivamente la Red?. 210

› Educación popular ambiental como proceso organizativo y formativo. 211

› Estrategia organizativa y persistencia de la Red 212

› Cohesión y colaboración: avances en la Red 213

› Desafíos y aprendizajes en la construcción de la Red Comunitaria de Agua 216

Hacia el Informe sobre la condición ambiental del Estuario de la Bahía de San Juan 2029: La necesidad de la revisión del Plan del Estuario. 218

› Calidad de agua y sedimentos 221

› Hábitat, peces y vida silvestre. 224

› Desechos acuáticos. 225

› Infraestructura verde 226

› Educación y participación ciudadana. 227

› Necesidad de revisión del Plan del Estuario 230

Referencias 233

Colaboradores 241

RESUMEN EJECUTIVO



RESUMEN EJECUTIVO

Cuarto informe de la condición ambiental del Estuario de la Bahía de San Juan (2024)

Un documento para la toma de decisiones

Brenda Torres Barreto
Directora Ejecutiva
ESTUARIO

En nuestros 30 años de existencia como parte del Programa Nacional de Estuarios en Puerto Rico, ESTUARIO ha liderado un esfuerzo para conocer con métodos científicos la condición del Estuario de la Bahía de San Juan (el estuario). Los datos recopilados con la colaboración de cientos de voluntarios han permitido identificar la raíz del problema de muchos de los casos encontrados. A su vez, esto nos ha permitido ser decisivos a la hora de corregir muchas de las causas de contaminación de los ecosistemas de la cuenca hidrográfica y restaurar su salud por medio de la calidad del agua. Este documento **Cuarto informe de la condición ambiental del Estuario de la Bahía de San Juan (2024)** contiene información actualizada sobre el estado de este ecosistema de importancia nacional, en las postrimerías de 2024.

Nuestra entidad, como consorcio, se sostiene sobre la base de la colaboración. Este informe es fruto de ese principio. Aquí presentamos los resultados de ese esfuerzo conjunto, donde se unen conocimientos, experiencias y compromiso con nuestras comunidades y con nuestros recursos naturales, reconociendo su interdependencia. Los coautores representan la rica diversidad que caracteriza a nuestra base de colaboradores, aportando datos, análisis y recomendaciones sobre las acciones que realizamos para restaurar la salud del estuario. El propósito de este informe es guiar la toma de decisiones con miras a asegurar la sostenibilidad en la región metropolitana de San Juan y un ecosistema estuarino saludable.

Investigadores y científicos profesionales comparten aquí los hallazgos de evaluaciones sobre el estado actual de la cuenca estuarina y su biodiversidad. Se identifican factores que afectan la calidad del agua y la estabilidad de los ecosistemas de la cuenca hidrográfica urbanizada, que se extiende por ocho municipios —Loíza, Carolina, Trujillo Alto, San Juan, Guaynabo, Cataño, Bayamón y Toa Baja.



Puente Teodoro Moscoso sobre la laguna San José.

Este informe aborda también las iniciativas de educación que promueven el desarrollo de una conciencia y conocimiento de los ciudadanos que interactúan, utilizan y conviven con los ecosistemas del estuario.

Nuestro trasfondo

Una clave del éxito de nuestra entidad ha sido la consistencia. Somos una organización sin fines de lucro que da continuidad a su agenda de trabajo fundamentada en estudios científicos. Nuestra agenda de restaurar y conservar el estuario se reafirma ante los cambios de administraciones. Educamos a los líderes de gobierno con el deber ministerial de tomar decisiones responsables. Ofrecemos el Plan del Estuario como pieza informativa para que el proceso de desarrollo de sus respectivas políticas públicas contemple acciones que puedan movernos hacia una región donde fluya el agua limpia.

Los esfuerzos de ESTUARIO incluyen el monitoreo de la calidad del agua, la reforestación en las costas, educación al ciudadano y el desarrollo de capacidad técnica. A este esfuerzo se unen las agencias del gobierno central, con los ocho municipios de la región metropolitana de San Juan, la comunidad científica y comunidades del área a través de un acuerdo colaborativo. Estos esfuerzos nos permiten, a su vez, elaborar planes regionales que sean implementados con un apoyo intersectorial informado.

A través del monitoreo sistemático de la calidad del agua hemos logrado proponer inversiones de mejoras capitales en lo que respecta a la infraestructura sanitaria y al alcantarillado de la región. Hemos apoyado proyectos de gran envergadura, como el dragado del Caño Martín Peña y el manejo correcto de los sistemas sépticos.

En específico, el monitoreo sistemático que identifica la fuente de descargas sanitarias hacia cuerpos de agua en la región metropolitana de San Juan nos apoyó en lograr levantar bandera y obtener fondos por parte del gobierno federal para comenzar la revitalización de la quebrada Juan Méndez. ESTUARIO trabaja con el Cuerpo de Ingenieros en este esfuerzo, así como con la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados (AAA), para reparar paredes colapsadas de la canalización que data de la década de 1950 y detener el flujo de aguas sanitarias sin tratar a través de esta quebrada. Este proyecto y todas las iniciativas de ESTUARIO se hacen en estrecha coordinación con las comunidades y líderes intersectoriales con el interés de apoyar nuestra gesta.

Así como este esfuerzo, ESTUARIO fue la entidad que promovió la creación de la Reserva Estuarina de

la Laguna del Condado, la Reserva de la Ciénaga Las Cucharillas, y lidera el esfuerzo de desarrollo del primer Plan Multijurisdiccional de Manejo de Riesgos en la región metropolitana de San Juan.

Nuestros proyectos hacia el futuro se concentran en lograr detener la creciente vulnerabilidad socioecológica de la región ante los impactos asociados a eventos atmosféricos severos y decisiones incorrectas con respecto al uso del suelo. Para el próximo año, planificamos ampliar los esfuerzos de monitoreo, agregando más de 35,000 puntos de datos sobre la calidad del agua que hemos recopilado a lo largo de los años, integrando datos de otras organizaciones y mejorando nuestra tecnología para garantizar resultados más completos y precisos.

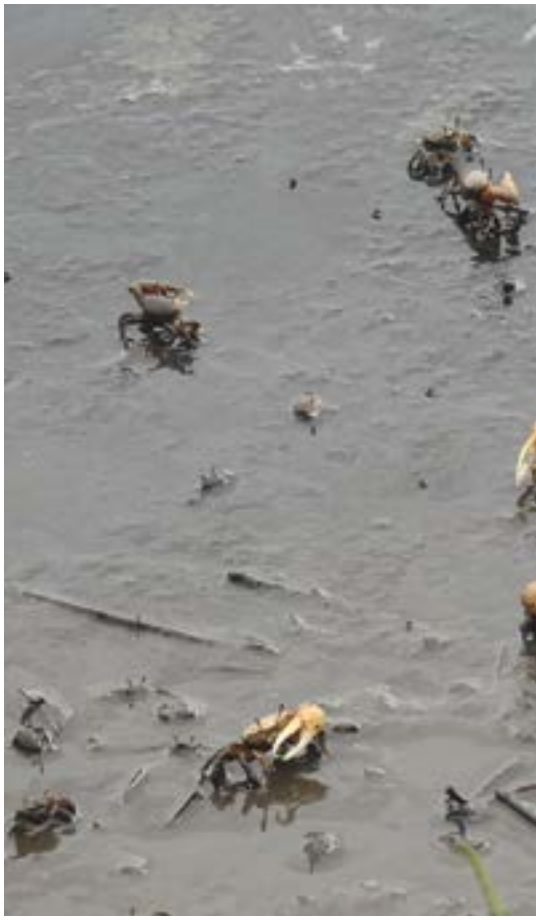
Sostenibilidad

En ESTUARIO promovemos la sostenibilidad; en específico, a través del fortalecimiento de la resiliencia de sus ecosistemas. La resiliencia se refiere a las capacidades de adaptación y recuperación, cualidades inherentes a los ecosistemas naturales. Por su parte, la sostenibilidad implica respetar y aprender de los procesos naturales para garantizar que las generaciones futuras puedan disfrutar de una cuenca estuarina saludable, que les permita vivir, trabajar y recrearse en contacto con ella. En este contexto, es indispensable innovar en los modelos, enfoques colaborativos y de gobernanza, así como en la formulación de políticas públicas, para generar soluciones a los desafíos urbanos, sociales y económicos, tanto presentes como futuros.

Desde su fundación, ESTUARIO ha estudiado los recursos vivos que habitan la cuenca estuarina y dependen de la calidad del agua, utilizándolos como indicadores de la resiliencia del sistema.

En este informe, veremos cómo la aplicación de esos principios, por ejemplo, a través de nuevas tecnologías y un enfoque inclusivo y multisectorial, enriquece el trabajo que realizamos. La estructura del informe consta de 20 artículos, divididos en cuatro secciones: (III) Parámetros contaminantes en el agua, los sedimentos y la vida acuática; (IV) Observación de los recursos vivos como indicadores ambientales; (V) Cuenca hidrográfica, modelado y resiliencia costera; y (VI) Ciencia ciudadana, participación y gobernanza hacia la resiliencia socioecológica.

Desde su fundación, ESTUARIO ha estudiado los recursos vivos que habitan la cuenca estuarina y dependen de la calidad del agua, utilizándolos como indicadores de la resiliencia del sistema. El monitoreo de peces, hierbas marinas, corales y otros organismos del fondo acuático (macroinvertebrados bénticos: larvas, moluscos y camarones) contribuye a medir la salud ecológica, tanto en el presente como a lo largo del tiempo. Asimismo, los censos de aves proporcionan información sobre el progreso y la efectividad de las acciones restaurativas que llevamos a cabo de manera sistemática. Gracias a los siete años de censos participativos en el estuario, hemos identificado hasta el 72 % de las especies de aves reportadas en Puerto Rico en el sistema del estuario.









Desafíos y oportunidades

En las siguientes páginas, se explora cómo las actividades humanas —como el dragado y la impermeabilización de suelos para la construcción— afectan la calidad del agua y la salud del ecosistema. Las descargas domésticas e industriales son fuentes clave de contaminación. En el estuario desembocan desde desechos tóxicos hasta aguas residuales, debido a la falta de una infraestructura hídrica adecuada.

A través de nuestros esfuerzos consistentes de monitoreo de la calidad del agua, hemos evidenciado estos desafíos. En tres décadas de trabajo, nuestros monitoreos han identificado 429 instancias de descargas sanitarias en toda la cuenca, a través de 185 estaciones de diagnóstico. La Autoridad de Acueductos y Alcantarillados ha logrado atender 151 de estos casos. Sin embargo, persisten al menos 120 casos urgentes, cada uno de los cuales representa una amenaza para la salud de nuestro estuario y las comunidades que dependen de él. Estos desafíos requieren una acción inmediata y su apoyo continuo es crucial para garantizar que podamos abordarlos de frente. Tenemos la oportunidad de hacerlo a través de la designación de fondos para atender estos casos.

La tradición colaborativa que guía a ESTUARIO ha generado beneficios significativos, como las recomendaciones puntuales de la academia y de organizaciones sin fines de lucro. Por ejemplo, el Centro para la Conservación del Paisaje y su investigador principal, Edgardo González, han proporcionado una metodología y un conjunto de indicadores para desarrollar un índice de cuencas hidrográficas, integrando datos de los componentes físicos, ambientales y sociales. De la misma forma, el modelado de nutrientes y sedimentos realizado en el estuario ayuda a comprender las consecuencias de los usos del suelo en la cuenca.

Por otra parte, las playas son un importante motor económico para Puerto Rico. Este recurso enfrenta amenazas crecientes, como el aumento del nivel del mar y la erosión costera. Gracias a estudios realizados sobre la costa estuarina conocemos los efectos del huracán María (2017) en el litoral. Esto permite validar las recomendaciones que presentamos más adelante y sobre las cuales se abunda en los artículos *Características geomorfológicas de la costa del Estuario de la Bahía de San Juan* y *Reviviendo nuestras costas: Estrategias para la conservación y restauración de la resiliencia en el Estuario de la Bahía de San Juan*.

El empoderamiento y la participación ciudadana

Estos esfuerzos y datos serían imposibles de lograr sin la activa participación de la comunidad y los voluntarios. Afortunadamente, la cuenca hidrográfica cuenta con un caudal de ciudadanos dispuestos a aportar sus conocimientos y su valioso tiempo para la protección y restauración de los recursos naturales.

Las iniciativas dirigidas al desarrollo de conciencia ambiental en las comunidades del Caño Martín Peña trazan rutas claras de educación y acción coordinada para promover la sostenibilidad. De



Afortunadamente, el estuario cuenta con ciudadanos comprometidos que participan activamente en las actividades que organizamos para proteger la cuenca hidrográfica. En la foto, el equipo de ESTUARIO junto a los voluntarios que asistieron a la celebración del primer 5K estuarino, en el Jardín Botánico de Río Piedras.

igual forma, los vecinos de la Laguna del Condado, algunos de ellos agrupados como "Amigos de la Laguna", juegan un papel crucial en la vigilancia, defensa y conservación de esa reserva estuarina.

En ESTUARIO tenemos una consigna que enmarca todos nuestros proyectos: *Científicos somos todos.* Durante los últimos 30 años, nuestras acciones de restauración han contado con la participación de voluntarios, quienes reciben formación sobre el ecosistema y las estrategias restaurativas. Desde 2020, hemos llegado a casi 5,000 personas a través de la Certificación de Ciudadanos Científicos. También, hemos facilitado la creación de dos redes de trabajo: la Red Comunitaria de Agua y la Red Intermunicipal para el Manejo Integrado de Recursos y Residuos. La primera agrupa a vecinos y organizaciones en torno a los cuerpos de agua de la cuenca. Se trata de una iniciativa de investigación-acción, educación y participación ciudadana centrada en una variedad de asuntos y problemáticas relacionadas con la situación de la condición del agua en el estuario. Por su parte, la Red Intermunicipal reúne a empleados municipales y estatales en una alianza estratégica para la gestión integrada y sostenible de los residuos generados en la región metropolitana de San Juan.

Al ampliar las iniciativas de ciencia ciudadana, nos aseguramos de que las decisiones basadas en la ciencia impulsen futuros esfuerzos de restauración. Los voluntarios son vitales también para nuestro proyecto de resiliencia costera, ya que nos ayudan a restaurar más de 33 acres de humedales, manglares y lechos de hierbas marinas y a sembrar más de 28,600 plantas costeras. Estos son hábitats vitales que mejoran la calidad del agua, protegen la biodiversidad y actúan como amortiguadores naturales contra las tormentas. Al mejorar nuestro medioambiente, procuramos también la resiliencia de nuestras comunidades.

Condición ambiental del estuario: Peldaño hacia la resiliencia y la sostenibilidad

Con este informe, procuramos proporcionar una visión clara de los desafíos y oportunidades del Estuario de la Bahía de San Juan, con el objetivo de guiar la toma de decisiones.

Los 20 artículos que presentamos a continuación ofrecen una visión panorámica sobre el estado del estuario, en la que destacan los siguientes hallazgos y recomendaciones principales.

Hallazgos principales

- Las secciones III y IV —*Parámetros contaminantes en el agua, los sedimentos y la vida acuática y Observación de los recursos vivos como indicadores ambientales*— muestran que hemos logrado mejoras en muchas áreas del sistema, que se manifiestan en la abundancia



Los voluntarios son vitales también para nuestro proyecto de resiliencia costera, ya que nos ayudan a restaurar más de 33 acres de humedales, manglares y lechos de hierbas marinas y a sembrar más de 28,600 plantas costeras. Arriba, jóvenes de ASEZ STAR que participaron en la recolección de semillas y propagación de plántulas.

de especies observadas por los participantes en los censos de aves y el monitoreo de la calidad del agua. Los resultados presentados en este informe confirman que el estuario es un sistema dinámico, capaz de regenerarse cuando se le da la oportunidad, según se indica en el artículo *Monitoreo de indicadores de calidad del agua: Los parámetros fisicoquímicos*.

- No obstante, aún el estuario enfrenta altos niveles de contaminación por metales pesados y descargas de aguas residuales, que representan un riesgo a la salud humana. Estos contaminantes contribuyen al desequilibrio ecológico del sistema y favorecen el crecimiento excesivo de algas, lo que puede tener efectos nocivos para la salud humana. Conocemos más al respecto en el artículo *Aguas no aptas para el uso recreativo: conoce los microorganismos implicados*. El desarrollo de una plataforma predictiva para estos brotes de algas peligrosas en la laguna San José será clave en los esfuerzos para proteger este recurso central, reconocido como una de las mejores áreas de pesca recreativa del sábalo a nivel mundial, de acuerdo con el escrito *Desarrollo de una plataforma predictiva de afloramiento (brotes) de algas peligrosas para la laguna San José*.
- Además, en el artículo *Contaminantes de preocupación emergentes en aguas del Estuario de la Bahía de San Juan* se examina la presencia y distribución de contaminantes emergentes que representan riesgos potenciales para la salud pública y el ecosistema. Detectar y corregir las fuentes de estos contaminantes es esencial para mitigar esos riesgos.
- Estos nuevos contaminantes se suman a otros cuya presencia en el estuario ha persistido durante al menos una década, según se elabora en el artículo *El frágil ecosistema de la Bahía de San Juan: una década de contaminación*. El escrito aborda los resultados de dos investigaciones realizadas en un período de once años, que muestran mejoras en el ecosistema, pero también revelan indicios preocupantes de un aumento de la contaminación, especialmente de metales pesados, como cobre, cromo, mercurio y níquel, así como de productos químicos industriales en ciertas áreas críticas.
- Un factor importante de contaminación es el deterioro de la infraestructura pluvial y sanitaria existente, que responde a un contexto histórico, social y económico muy distinto al actual, en esta tercera década del siglo XXI. Parte del problema de las descargas de aguas residuales o sanitarias se relaciona también con la falta de infraestructura adecuada en comunidades vulnerables, como las que bordean el Caño Martín Peña. Acelerar la mejora de esta infraestructura es un paso crucial para lograr la misión de ESTUARIO de restaurar sus cuerpos de agua.



- Las secciones V y VI —*Cuenca hidrográfica, modelaje y resiliencia costera y Ciencia ciudadana, participación y gobernanza hacia la resiliencia socioecológica*— presentan resultados de la colaboración multisectorial para analizar nuestras costas y sus ecosistemas. Estas redes de trabajo están creando soluciones nuevas a los desafíos mediante otros modelos de organización y toma de decisiones. Las soluciones se fortalecen y tienen mayor potencial de perdurar con la integración de entidades de base comunitaria y vecinos de las comunidades aledañas a la cuenca hidrográfica para gestionar una cultura del agua desde una perspectiva socioecológica.

Recomendaciones principales

- Las conclusiones en torno a los cambios en las costas estuarinas confirman la necesidad de ordenar el territorio de forma responsable, particularmente ante la alta frecuencia de eventos atmosféricos severos que vulneran el entorno.
- De lo expuesto en los artículos, deben revisarse los instrumentos de planificación y definir protocolos de manejo costero basados en datos científicos recientes. Como bien se plantea en el informe, es fundamental continuar desarrollando tecnologías de restauración ecológica y soluciones basadas en la naturaleza para asegurar y dar seguimiento a la recuperación de nuestros ecosistemas. Mientras más y mejores datos tengamos, mayor es nuestra capacidad de guiar un proceso que apoye a los ecosistemas costeros, como los corales, las praderas de hierbas marinas y los manglares, y con ello, las numerosas actividades sociales y económicas asociadas.
- Además, es indispensable democratizar los procesos decisionales para garantizar que las políticas dirigidas a la sostenibilidad sean consistentes a través del tiempo. Subrayamos la importancia de la colaboración entre el gobierno, la ciudadanía, el sector privado y las organizaciones sin fines de lucro para garantizar un futuro saludable, próspero y sostenible. Integrar a la ciudadanía en la búsqueda y seguimiento de las soluciones, mediante una gobernanza participativa y esfuerzos educativos de ciencia ciudadana ha probado ser una fórmula exitosa para ESTUARIO, replicable en el resto del país.

Finalmente, es igualmente necesario prestar atención a la valiosa información generada por la comunidad científica, tanto en Puerto Rico como en el Caribe y a nivel internacional.

Aspiramos a que este informe estimule a los tomadores de decisiones para acoger estas y otras recomendaciones detalladas en el conjunto de artículos. Confío en que también inspire a más personas a unirse a nuestras iniciativas, con el fin de mejorar la calidad del agua y, con ello, la salud de nuestros preciados recursos estuarinos.



La declaración de la Laguna del Condado (en la foto) como Reserva Natural Estuarina se hizo posible gracias a los esfuerzos de ESTUARIO.



EL ESTUARIO DE LA BAHÍA DE SAN JUAN

El Estuario de la Bahía de San Juan



Figura 1. Cuerpos de agua del Estuario de la Bahía de San Juan.

Un estuario es un área costera donde el agua dulce que fluye de los ríos, quebradas y escorrentías pluviales se mezcla con el agua salada proveniente del océano. El sistema del Estuario de la Bahía de San Juan (en adelante, el estuario) incluye la Bahía de San Juan, la Laguna del Condado y las lagunas San José, Los Corozos, La Torrecilla y la de Piñones, así como los canales que interconectan estos cuerpos de agua, es decir, el San Antonio, el Suárez y el Caño Martín Peña.

El agua dulce entra en el sistema desde las quebradas y ríos de la cuenca hidrográfica, incluyendo el sistema río Piedras/río Puerto Nuevo, las quebradas Juan Méndez, San Antón, el canal Blasina y el canal La Malaria. El agua salada entra del océano Atlántico por la Boca del Morro, El Boquerón en la Laguna del Condado y Boca de Cangrejos (ver Mapa 1).

El sistema del estuario es altamente diverso pues alberga más de 160 especies de aves, 308 especies de plantas, 87 especies de peces y 20 especies de anfibios y reptiles. Entre estos, se encuentran 16 especies consideradas raras y únicas en Puerto Rico. El estuario contiene 28 tipos distintos de ecosistemas (Tabla 1).

Tabla 1: Ecosistemas y comunidades ecológicas que forman parte del Estuario de la Bahía de San Juan

Tipo de sistema	Descripción
Terrestre	Bosques en tierras altas de especies mixtas
	Bosques kársticos
	Bosques ribereños de especies mixtas
	Matorrales
	Matorrales de playa
	Dunas de arena
	Pastizales inundados
	Cayos kársticos
De agua dulce	Canales y arroyos
	Ríos y arroyos
	Marismas
Estuarino	Manglares en márgenes
	Manglares de cuenca
	Manglares de islas bañadas
	Manglares ribereños
	Canales
	Lagunas
	Planctónico
	Bentónico
	Llano fangoso
	Salinas
Marino	Canales de salida de la bahía de San Juan y Boca de Cangrejos
	Planctónico
	Bentónico
	Playas rocosas
	Playas arenosas
	Litoral
	Pastos marinos
	Arrecifes de coral

Por otro lado, la calidad del agua y sedimentos del estuario está íntimamente relacionada con las características naturales del sistema estuarino y el impacto humano que recibe, como el dragado y relleno, el desarrollo de áreas naturales y las descargas domésticas e industriales.

CUERPOS DE AGUA

Bahía de San Juan

La Bahía de San Juan es el componente más conocido del estuario. Los primeros colonizadores la describieron como uno de los más esplendorosos puertos del Nuevo Mundo. Comprende aproximadamente 6.5 millas (10.5 km) de costas sumamente urbanizadas y se conecta con el océano Atlántico a través de la Boca del Morro. Actualmente, por sus aguas transitan más del 80 % de los productos que llegan a la Isla y sobre un millón de pasajeros en cruceros.

Durante la década de 1940, el área sumergida entre la Isla de Cabras y el islote El Cañuelo se rellenó para construir instalaciones militares y una carretera elevada. Esto redujo significativamente la circulación y el intercambio de agua entre la bahía y el océano Atlántico. La calidad del agua de la bahía de San Juan comenzó a mejorar significativamente en la década de 1980, a partir de la reubicación de las descargas de aguas tratadas que recibía directamente. Estas aguas previamente tratadas se descargan ahora en el océano, fuera de la bahía de San Juan, a través de un emisario marino. Hoy día, la entrada principal de agua dulce a la bahía es el sistema río Piedras/río Puerto Nuevo.



Caño Martín Peña

El Caño Martín Peña mide aproximadamente 3.75 millas (6 km) de largo y conecta la Bahía de San Juan, al oeste, con la laguna San José, al este. Durante muchos años, este cuerpo de agua ha recibido un fuerte impacto debido al intenso desarrollo residencial en su cuenca y por la falta de una infraestructura adecuada para el manejo de las aguas sanitarias y los residuos sólidos domésticos.

Hace unos años, se dragó la mitad oeste del caño para utilizarla como canal de navegación y transporte público entre el área de Hato Rey y la isleta de San Juan. Este segmento está bordeado por manglares y en sus márgenes se ubica el Parque Lineal Enrique Martí Coll. Sin embargo, su segmento oriental —conducente a la laguna San José— se encuentra gravemente obstruido, exhibiendo una transición de cuerpo de agua abierto a pantano, que responde principalmente al crecimiento de maleza acuática y a la acumulación de sedimentos y desechos acuáticos.

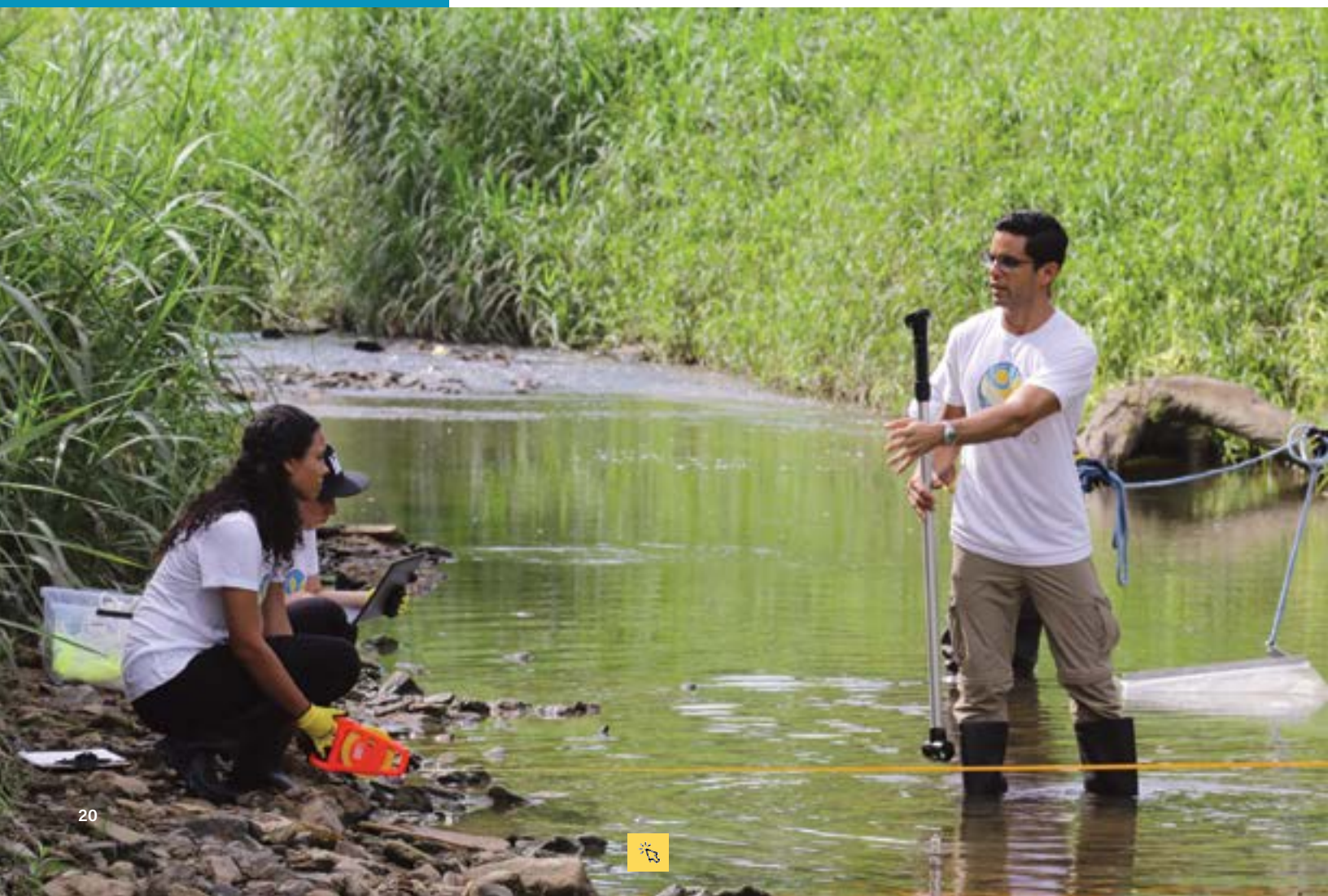


Río Piedras

El río Piedras representa la fuente principal de agua dulce de la Bahía de San Juan. Su recorrido comienza en el barrio Caimito, en San Juan, a una altura de entre 426 y 590 pies (130-180 metros). Su longitud aproximada es de 9.9 millas (16 km) y su cuenca hidrográfica capta aguas de escorrentía alrededor de unas 24 millas cuadradas (62 km2).

El Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos dragó la porción baja del río Puerto Nuevo como parte de un proyecto iniciado en 1994 para el control de inundaciones. No obstante, dicho proyecto pretende canalizar con hormigón 9.5 millas (15 km) del río, construir un canal de tierra de 1.7 millas (2.7 km) y crear dos cuencas o áreas de captación. Se espera que estas modificaciones alteren significativamente la hidrología, las tasas de sedimentación y las descargas de contaminantes, tanto en el río Puerto Nuevo como en su punto de encuentro con la Bahía de San Juan.

El río Piedras alberga una rica diversidad ecológica. Se han identificado 12 especies de peces y nueve de crustáceos, entre ellas, camarones y cangrejos. El estudiante Omar Pérez Reyes (Lugo et al., 2011) identificó una especie de camarón (Palaemon pandaliformis) y una rara esponja de agua dulce (Spongilla alba) nunca antes reportados.



Canal San Antonio

El canal San Antonio conecta con la Bahía de San Juan al oeste y con la Laguna del Condado al este. Este canal se extiende por 1.2 millas (2 km) en las que se sitúan numerosas instalaciones portuarias y marinas recreativas.

Las actividades de dragado y relleno en este canal aumentaron a principios del siglo XX y se intensificaron para la década de 1950. Estas actividades transformaron el cuerpo de agua de un canal estrecho, bordeado de manglares y con meandros naturales, a un canal profundo y directo, bordeado principalmente por estructuras y muros de contención. No obstante, en su fondo aún encontramos hierbas marinas que sirven de hábitat para múltiples especies. Igualmente, en sus aguas se observan mamíferos marinos como el manatí antillano y los delfines.





Laguna del Condado

La Laguna del Condado cubre un área de aproximadamente 0.42 km2 en la región noreste del estuario. Se conecta con el océano Atlántico en el área conocida como El Boquerón, al este del fuerte de San Gerónimo, y con la bahía de San Juan por el oeste, a través del canal San Antonio.

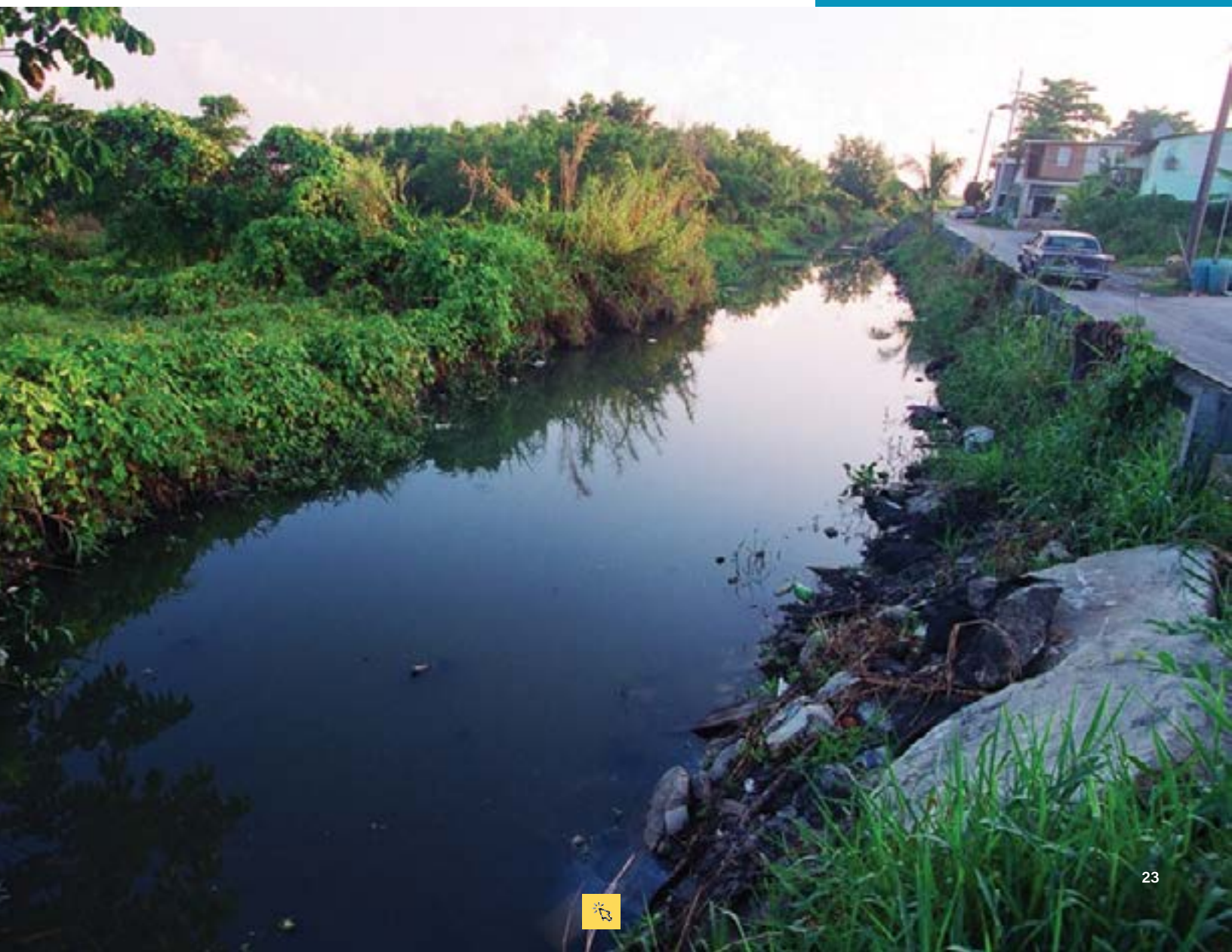
Esta laguna, parcialmente rodeada de hoteles y condominios residenciales en su costa norte, tiene una playa arenosa de uso recreativo, ubicada también en el norte, y franjas de mangle en el noreste y sureste. Según registros oficiales, la Laguna del Condado fue el primer cuerpo de agua afectado y alterado por los humanos en todo el sistema estuarino. No obstante, hoy contiene la más alta diversidad de especies acuáticas del sistema, sustentando además actividades recreativas y económicas de importancia. Por esta razón, en el año 2013 se le designó como Reserva Natural, mediante la Ley Núm. 112-2013.



Canal La Malaria

El canal La Malaria se construyó en la década de 1930 por el Ejército de Estados Unidos para drenar la ciénaga Las Cucharillas y controlar la propagación del mosquito que transmite la malaria. Este mosquito —del género Anopheles— encuentra condiciones ideales de reproducción en los humedales. De ahí que a esta enfermedad se le llama también paludismo, del latín palus, que significa precisamente ciénaga. Por eso, una de las estrategias principales para lograr el objetivo era drenar los humedales. Además, con el canal se pretendía rescatar los terrenos de la ciénaga y construir el fuerte militar Buchanan.

Hoy, la calidad de sus aguas se ve afectada por descargas de aguas sanitarias sin tratar provenientes, por ejemplo, de los desbordamientos de pozos sépticos domésticos. El Departamento de Recursos Naturales y Ambientales opera una casa de bombas en este canal para controlar los niveles de agua en la ciénaga y evitar inundaciones en las comunidades aledañas, como Juana Matos, en Cataño.

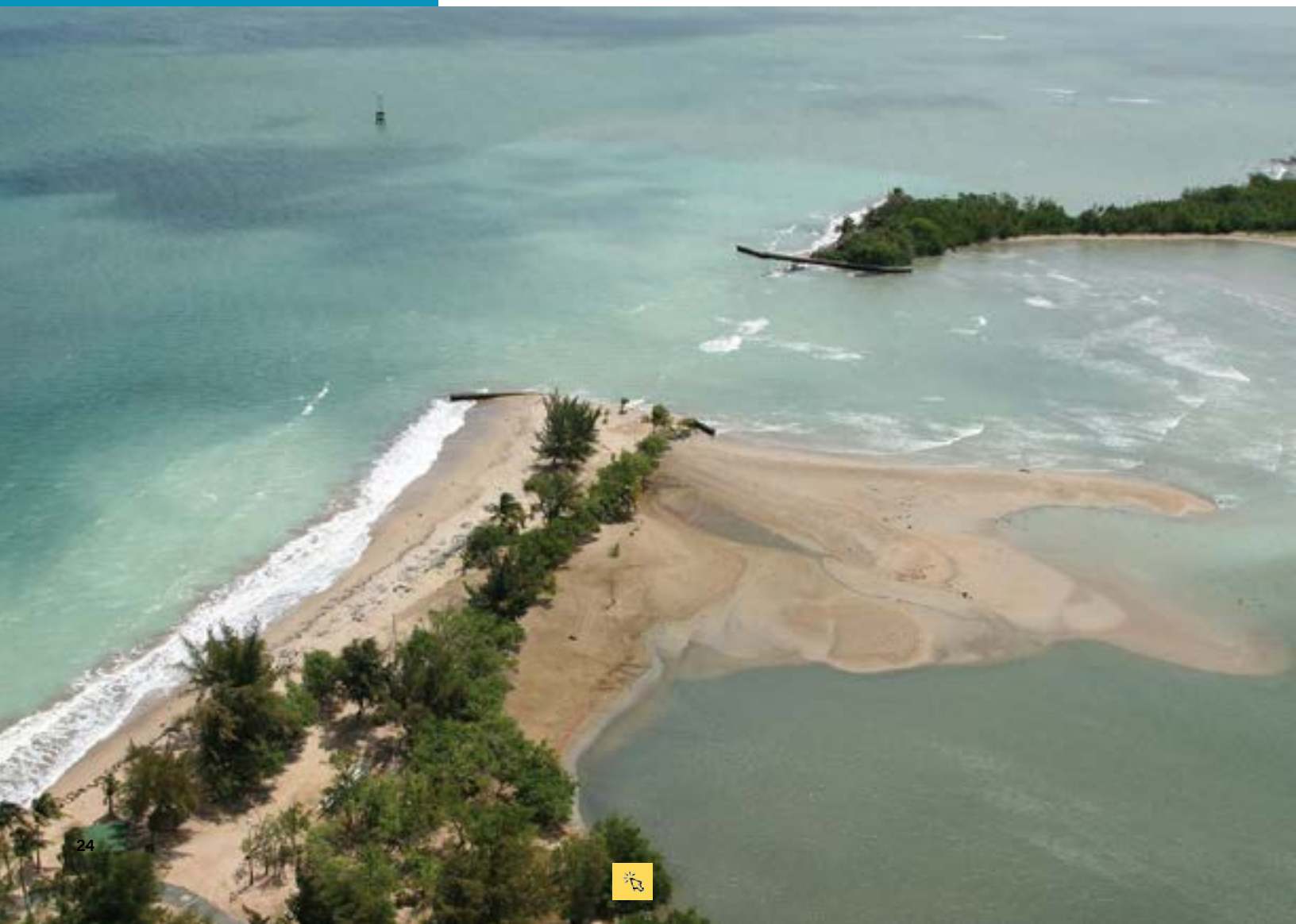


Península La Esperanza

Este punto de monitoreo se encuentra en la salida de las aguas del canal La Malaria, después de la estación de bombas de la urbanización Bay View, en Cataño.

La península La Esperanza se construyó con material obtenido del dragado de los canales de navegación de la bahía de San Juan en la década de 1960. Su objetivo era proteger el litoral de Bay View de la acción y erosión de las olas. No obstante, las fuerzas del litoral —como el oleaje, el viento y las corrientes— unieron las dos islas artificiales construidas inicialmente, formando lo que hoy conocemos como la península La Esperanza.

Esta península tiende a migrar, acercándose a la línea de costa de Cataño y formando una especie de gancho que afecta la circulación del agua dentro de la ensenada llana. Dicho fenómeno afecta la calidad del agua, pues evita la buena circulación, secuestrando así contaminantes y sedimentos provenientes del canal La Malaria.



Laguna La Torrecilla

La laguna La Torrecilla recibe agua del océano Atlántico a través de una estrecha salida en Boca de Cangrejos y está mayormente rodeada de manglares. Es el tercer cuerpo de agua de mayor extensión en todo el sistema estuarino, con una superficie de 2.5 km. Está localizada en una planicie de inundación importante y posee casi todos los tipos de humedales que se encuentran en Puerto Rico. Junto con el Bosque de Piñones, la laguna La Torrecilla alberga el bosque de manglar más grande de la Isla.





Canal Blasina

La quebrada Blasina se convierte en el canal Blasina al norte de la carretera PR-3. El canal Blasina es un cuerpo de agua dulce que se extiende por unos 6 km desde la carretera PR-3 hasta su punto de descarga en la laguna La Torrecilla, al sur. Su área de captación es de aproximadamente 22 km2 y recoge aguas de escorrentías del casco urbano de Carolina.

Este cuerpo de agua está canalizado en algunos segmentos, excepto en los márgenes poblados por manglar que conducen hacia la laguna La Torrecilla. El canal recibe la influencia de las mareas hasta el puente de la avenida Monserrate. Este sistema enfrenta problemas de contaminación debido a las descargas de aguas residuales de las plantas de tratamiento de Carolina y Vistamar, que combinadas suman alrededor de 20,000 m^3/día.





Canal Suárez

El canal Suárez se extiende a lo largo de 2.4 millas (3.9 km). Conecta la laguna San José con la laguna La Torrecilla y está poblado en su mayoría por manglares y humedales herbáceos adyacentes.

Hasta el siglo XIX, a este cuerpo de agua se le conocía como el canal de la Pasa. Entre los años 1820 y 1830 se dragó con equipo rudimentario para permitir el intercambio comercial y la venta de productos agrícolas entre el valle aluvial del Río Grande de Loíza y la isleta de San Juan.

Las dimensiones actuales del canal Suárez son producto de las actividades de dragado realizadas entre 1962 y 1967. Hoy en día, como resultado del cierre parcial del Caño Martín Peña, este canal es el medio principal de intercambio y renovación del agua de las lagunas San José y Los Corozos.

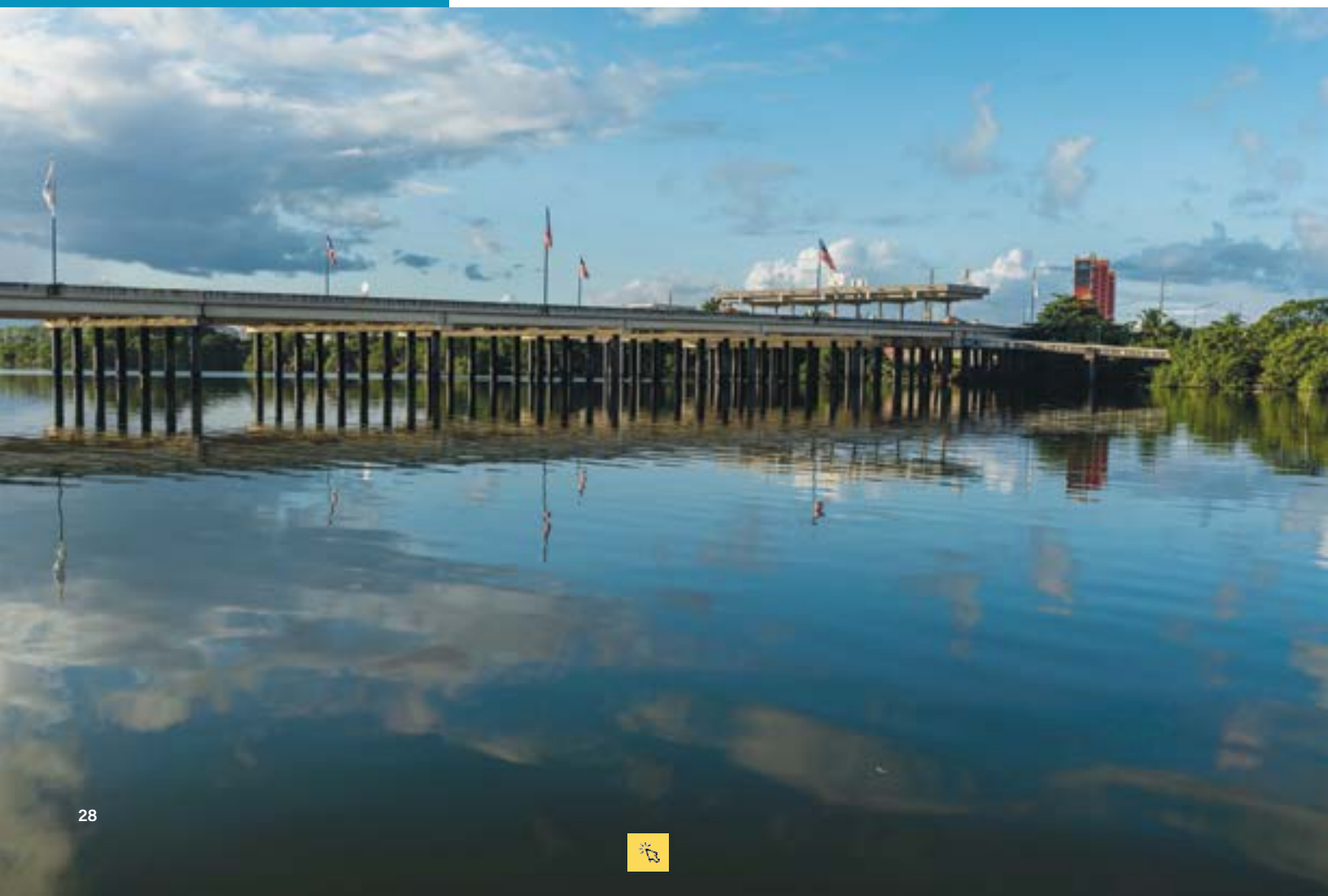




Lagunas San José y Los Corozos

Las lagunas San José y Los Corozos están en el centro del sistema estuarino y ocupan aproximadamente 1,129 acres (475 ha). Al no tener una salida directa al océano Atlántico, estas lagunas son las menos influenciadas por las mareas. Además, en el segmento este —hacia el Caño Martín Peña— el intercambio de agua está seriamente limitado por la acumulación de basura, la sedimentación y el crecimiento de maleza acuática.

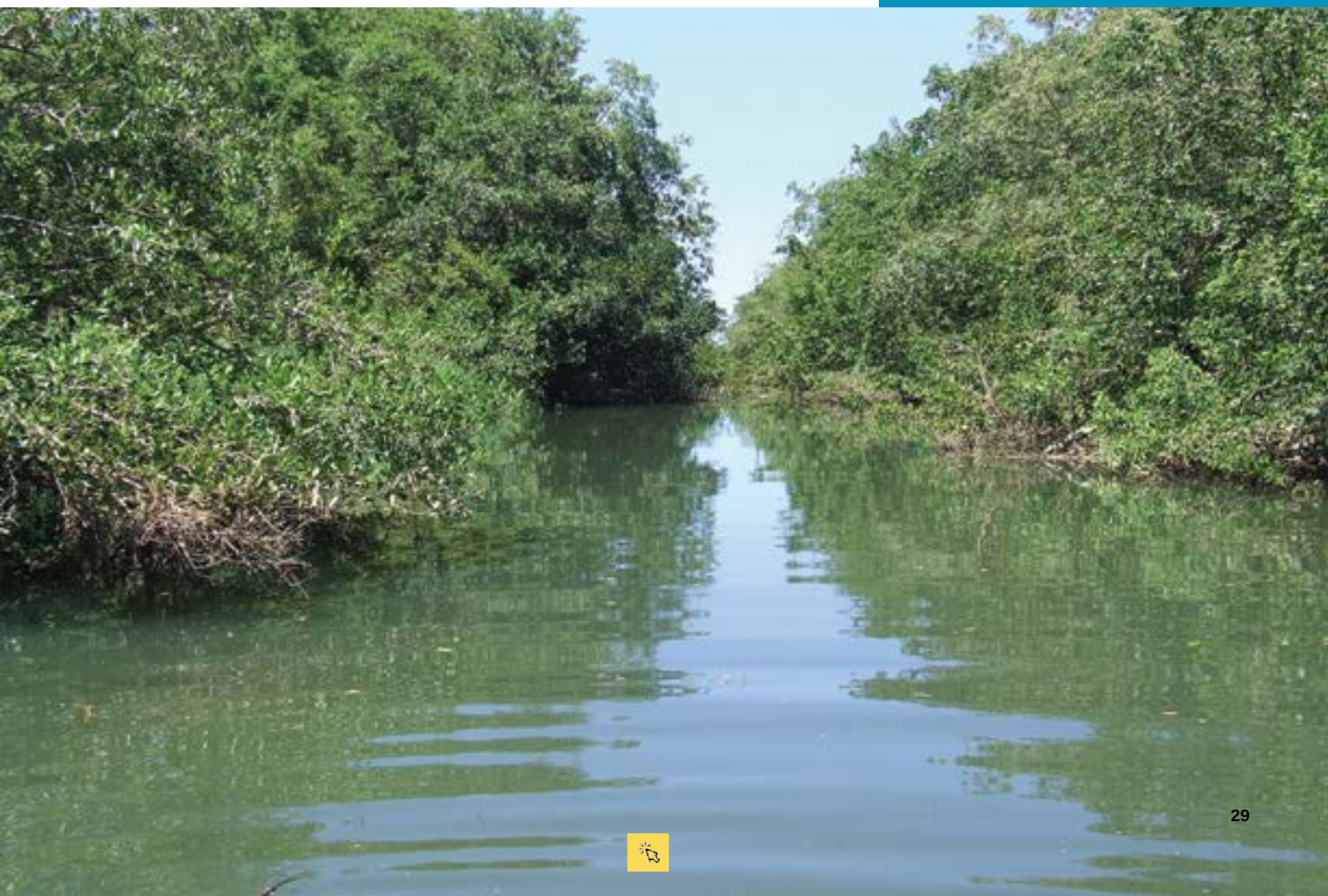
La laguna Los Corozos se encuentra hacia el noroeste y recibe descargas directas de la estación de bombas de la avenida Baldorioty de Castro. Por su parte, la laguna San José es uno de los mejores destinos para la pesca recreativa en Puerto Rico, ya que en sus aguas se practica la modalidad de captura y liberación del sábalo (*Megalops atlanticus*), una especie de gran valor deportivo por la intensa pelea y el alto reto que ofrece al pescador. Las lagunas San José y Los Corozos intercambian sus aguas con el océano Atlántico a través del canal Suárez.



Quebrada San Antón

La quebrada San Antón es uno de los cuerpos de agua que desembocan en la laguna San José. Comienza en Trujillo Alto y capta las aguas de escorrentía de los municipios de San Juan y Carolina. Parte de la quebrada San Antón está canalizada hasta el área que conecta con la porción sureste de la laguna San José, bordeada por manglares. La calidad del agua de la quebrada se encuentra comprometida por eventos periódicos de descargas con altos niveles de sedimentos. Es común observar peces, aves como la gallareta común y tortugas de agua dulce.

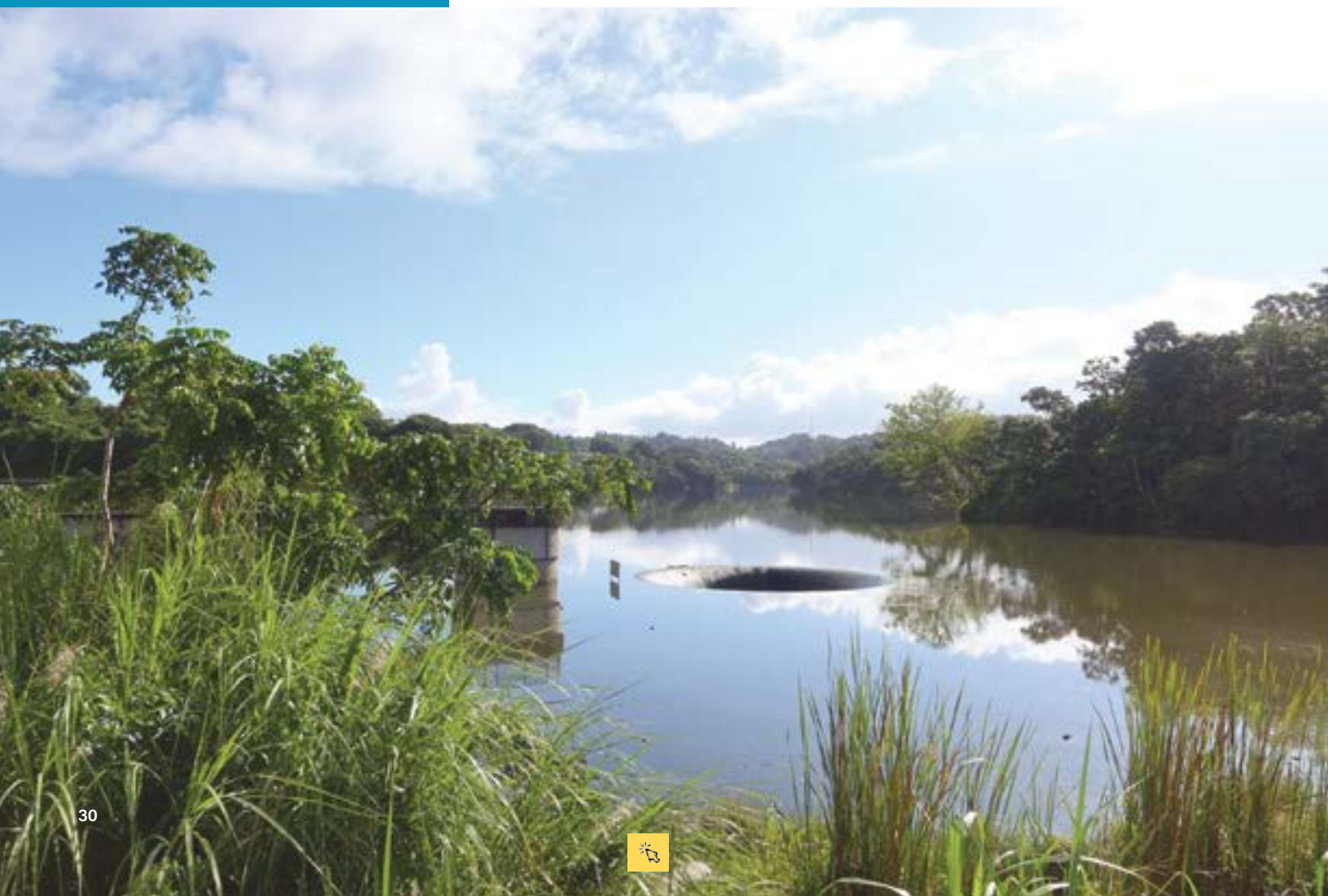
La quebrada San Antón es uno de los dos afluentes principales que fluyen directamente hacia la laguna San José, la más grande del sistema de lagunas de San Juan. Junto con la quebrada Juan Méndez (San Juan), drena un área combinada de aproximadamente 22 km^2. La quebrada San Antón proporciona una cantidad significativa de escorrentía urbana a la laguna, especialmente durante períodos de lluvia intensa.



Lago Las Curías

El aljibe Las Curías está ubicado entre las montañas de la capital de Puerto Rico, en Cupey Alto. Es el único lago artificial construido en San Juan para la Segunda Guerra Mundial, entre los años 1943 y 1946, por la Administración de Obras Federales y el Ejército de Estados Unidos. El propósito fue suplir agua potable a la zona metropolitana a través del antiguo acueducto de Río Piedras. No obstante, culminó sus operaciones 34 años después de construido, en el 1980, debido al cierre del viejo acueducto.

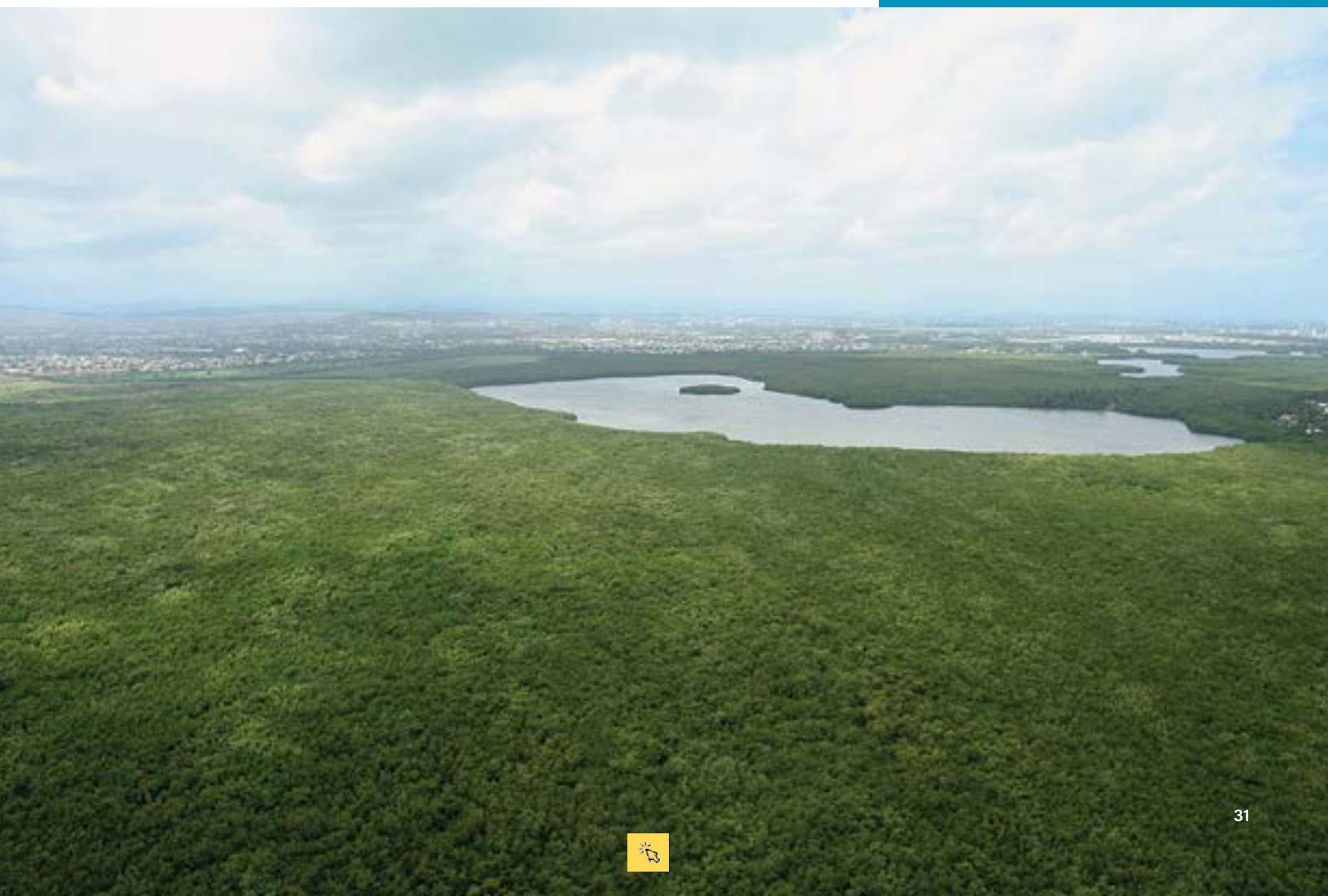
Aunque no provee agua potable desde entonces, sí ofrece unos encantos ecológicos y recreativos de primer orden y únicos en la zona metropolitana. Lo primero que se observa en el lago Las Curías es la llamada "trompeta" o "cono", agujero en cemento que sirve para controlar el nivel del agua. Sus aguas llegan al río Piedras y desembocan eventualmente en la Bahía de San Juan, convirtiendo el lago en parte integral de la cuenca hidrográfica del estuario.



Laguna de Piñones

La laguna de Piñones se encuentra dentro del Bosque Estatal de Piñones, donde conecta al oeste con la laguna La Torrecilla mediante un canal estrecho conocido como el canal de Piñones. Se le considera como una depresión entre los manglares del bosque de Piñones, que recibe escorrentía pluvial dispersa más influjo de aguas subterráneas.

Es una laguna llana, cuya profundidad oscila entre los 2 y 3 pies y ocupa un área aproximada de 223 acres. Cuando ocurren inundaciones mayores en el Río Grande de Loíza, las aguas desbordadas de su cauce inundan sectores del bosque de Piñones y fluyen eventualmente hasta la laguna. En la laguna de Piñones se puede observar un tipo de bioluminiscencia en algunas temporadas del año. La laguna de Piñones y la laguna La Torrecilla son hogar de al menos 38 especies de peces.



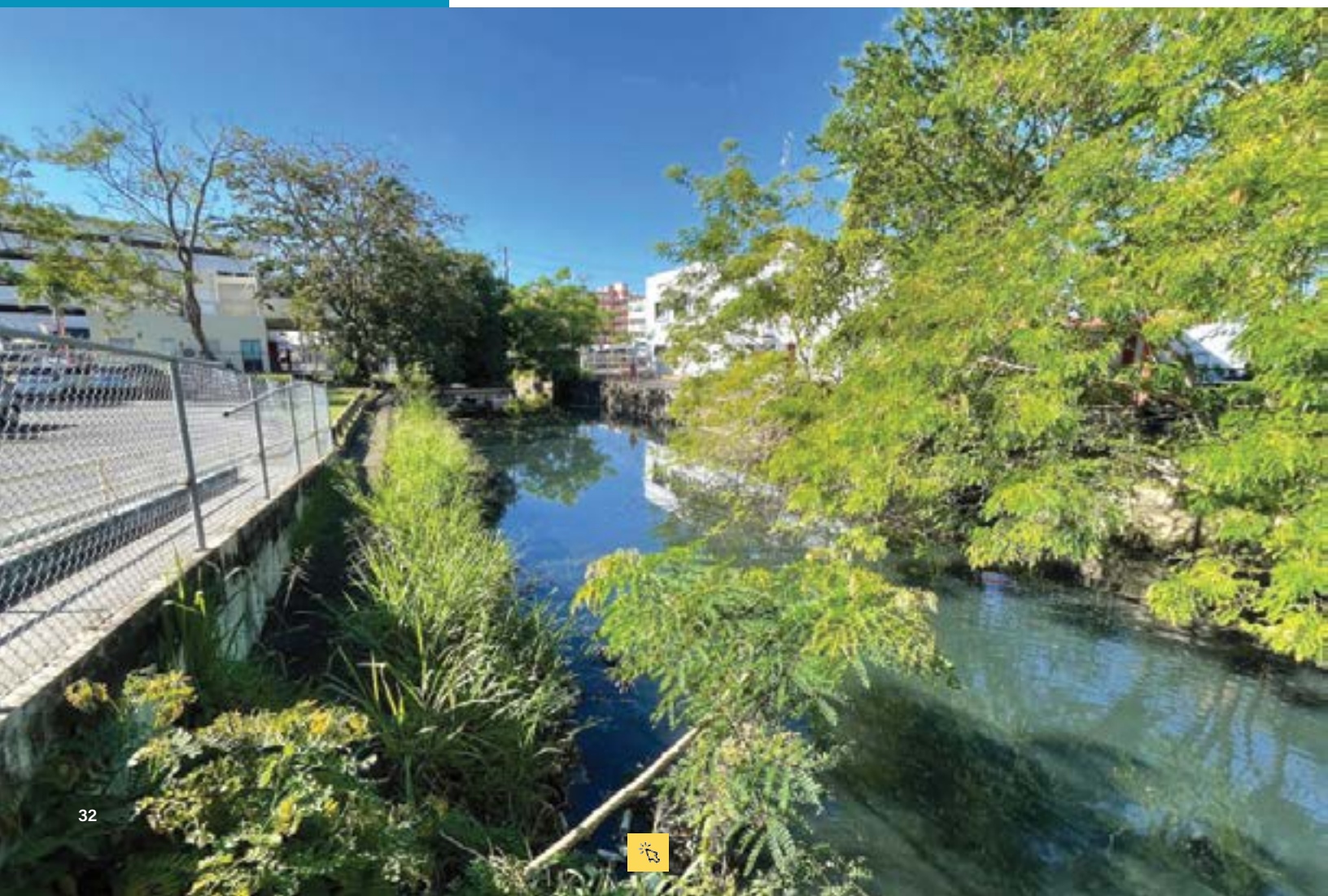
Quebrada Juan Méndez

La quebrada Juan Méndez nace en el Bosque Estatal Nuevo Milenio, en San Juan, y transcurre a través de comunidades como Capetillo, Villa Capri, Dos Pinos, Manuel A. Pérez, Truman, Israel y Cantera, hasta descargar en la laguna San José.

Más del 90 % de la superficie de su cuenca hidrográfica (de 8.2 km2) está altamente urbanizada e impermeabilizada. Pocas partes de la quebrada permanecen en su estado natural y abierto, pues se modificó y canalizó su cauce para el control de inundaciones en la zona. Antes desembocaba en el Caño Martín Peña, ahora lo hace en la laguna San José. Este cuerpo de agua recibe descargas de aguas pluviales y descargas de aguas sanitarias sin tratar.

Durante el período que abarca el presente informe (2019 al 2024), ESTUARIO:

- Mejoró, restauró y ayudó a conservar 136 acres de terreno.
- Sembró 30,763 plantas costeras y árboles de humedal.
- Dispersó más de 41,000 semillas de distintas especies.





Garza real (*Ardea alba*)



Manatí antillano (*Trichechus manatus manatus*)



Coral cerebro (*Diploria clivosa*)

Yaboa real (*Nycticorax nycticorax*)





PARÁMETROS CONTAMINANTES EN AGUA, SEDIMENTOS Y VIDA ACUÁTICA

Monitoreo de indicadores de calidad del agua: Los parámetros fisicoquímicos



Figura 1. Mapa de la cuenca hidrográfica y los cuerpos de agua bajo el Monitoreo de la Calidad del Agua por Voluntarios. Los puntos corresponden a las estaciones visitadas con una frecuencia mensual para medir los indicadores de la calidad del agua descritos en el texto.

Jorge F. Bauzá-Ortega
Director Científico, ESTUARIO
Rebecca Rivera
Coordinadora de Monitoreo de Calidad del Agua, ESTUARIO

El monitoreo de los indicadores de la calidad del agua es muy similar a cuando vamos a realizarnos un chequeo de salud rutinario con nuestro médico de cabecera. Lo primero que hace nuestro médico es referirnos a un laboratorio clínico para hacernos unas pruebas o medir unos parámetros en particular. Con base en los resultados, el médico determina nuestra condición de salud y hace recomendaciones. El monitoreo de los indicadores de la calidad del agua funciona de manera similar, pero sin necesidad de un médico. Muchas veces observamos cuer-

pos de agua que no aparentan tener problemas. No es sino hasta que medimos unos parámetros, que nos damos cuenta de la presencia de contaminantes. Los estuarios son cuerpos vivos y, como tales, hay que monitorearlos. Por tal razón, a partir del 2008, ESTUARIO desarrolló una iniciativa para llevar a cabo el monitoreo de la calidad del agua con voluntarios.

El esfuerzo Monitoreo de Calidad de Agua por Voluntarios busca determinar la calidad del agua en el Estuario de la Bahía de San Juan (el estuario). El proyecto consiste en estudios de campo periódicos para medir y tomar muestras del agua en 26 puntos o estaciones (**Figura 1**) en el sistema estuarino, incluyendo cuerpos de agua dulce en la cuenca hidrográfica. Estas estaciones están distribuidas en 17 cuerpos de agua, que incluyen ríos, quebradas, canales y lagunas. A estas muestras se les realiza una serie de análisis que nos indican si los cuerpos de agua están funcionando de manera óptima o si, por el contrario, existen problemas que los afectan. En este escrito se muestran los resultados mensuales obtenidos entre el 2019 y el 2023 (5 años). A tal efecto, se analizaron 10,600 datos recopilados.

Al monitorear estos parámetros, determinamos si las acciones de restauración comprendidas en el Plan del Estuario (CCMP, por sus siglas en inglés) están siendo efectivas o si, por el contrario, hay que diseñar nuevas medidas y estrategias de restauración. En específico, este esfuerzo tiene los siguientes objetivos principales:

- Determinar la condición actual del estuario y cómo esta cambia con el tiempo.
- Identificar y corregir las fuentes de contaminación.
- Levantar bandera roja en caso de que se observe algún contaminante y de esta forma notificar a las agencias correspondientes.
- Generar una base de datos para estudios y publicaciones.
- Educar y adiestrar a voluntarios en las técnicas de monitoreo ambiental.

Método

Se utilizó un sensor de calidad del agua multiparamétrico (XYLEM/YSI EOS 1) para cuantificar con una frecuencia mensual la temperatura, la concentración de oxígeno disuelto, los niveles de turbidez, el pH, y la salinidad. Además, se recogieron muestras del agua para cuantificar mediante análisis de laboratorio la concentración de aceites y grasas, nitritos, nitratos y fósforo total. También se determinó la transparencia del agua mediante la lectura de la profundidad del disco Secchi. Todos los muestreos se realizaron durante horas de la mañana.

Análisis

Para cada cuerpo de agua se promediaron los datos y se compararon con el *valor objetivo*. El valor objetivo o valor meta es el número con el cual se comparan los datos promediados para determinar si el cuerpo de agua se encuentra saludable o afectado. Por ejemplo, las medidas de oxígeno disuelto deben ser igual o mayor que el valor objetivo de 4 mg/L para determinar que la muestra



de agua cumple con los niveles aceptables de oxígeno disuelto. En el caso de los niveles de turbidez, los resultados deben estar por debajo del valor objetivo de 10 unidades nefelométricas (NTU) para cumplir con los requisitos de un cuerpo de agua saludable.

Los resultados se presentan en forma de una tabla que contiene el valor mínimo, el valor máximo y el promedio para cada parámetro analizado para cada cuerpo de agua (17). Aquellos cuerpos de agua que contengan una bandera al lado del valor promedio en las tablas significan que no lograron el objetivo de calidad del agua. De esta forma identificamos aquellos parámetros y cuerpos de agua que no cumplen con los criterios de calidad del agua. Los rangos en todos los indicadores de calidad del agua analizados confirman que el Estuario de la Bahía de San Juan es un sistema muy dinámico.

Tipo de sistema	Valor mínimo	Valor máximo	Promedio
Bahía de San Juan	24.4	32.7	28.6
Caño Martín Peña	25.9	31.2	28.8
Río Piedras (Puerto Nuevo)	25.5	32.3	29.2
Canal San Antonio	25.6	31.8	28.3
Laguna del Condado	25.1	32.2	28.2
Canal La Malaria	23.6	33.6	28.8
Península La Esperanza	23.8	33.6	28.4
Laguna La Torrecilla	24.5	33.0	28.8
Canal Blasina	24.6	31.4	28.3
Canal Suárez	25.3	32.0	28.8
Laguna San José	25.5	33.1	28.8
Quebrada San Antón	21.2	32.0	28.2
Laguna Los Corozos	25.5	33.2	28.9
Río Piedras	23.0	32.0	26.3
Aljibe Las Curías	23.7	31.0	27.6
Laguna de Piñones	24.5	35.5	30.1
Quebrada Juan Méndez	23.2	30.5	27.2

Tabla 1. Valor mínimo, valor máximo y promedio de los datos de temperatura (oC) para cada cuerpo de agua monitoreado de 2019 a 2023.

Temperatura

La temperatura juega un papel importante en los cuerpos de agua, particularmente en la relación que existe entre la temperatura y la concentración de oxígeno disuelto. Por ejemplo, cuando la temperatura aumenta, la solubilidad del oxígeno disminuye escapando a la atmósfera. Este fenómeno es más crítico en las aguas naturalmente cálidas de los trópicos, pues aumentos en temperaturas pueden reducir el oxígeno al punto de provocar mortandad masiva de peces.

Dicho fenómeno se ha observado en algunos cuerpos de agua durante los meses más cálidos del verano. Los sistemas de enfriamiento utilizados en las plantas generatrices de energía eléctrica (i.e, termoeléctricas) descargan aguas calientes que pueden afectar de forma directa e indirecta a los organismos y comunidades marinas.

La Tabla 1 presenta las temperaturas observadas en el sistema del estuario. Los datos demuestran temperaturas típicas de cuerpos de agua internos en zonas tropicales. Los valores se consideran normales para estos sistemas acuáticos.

Oxígeno

El oxígeno disuelto es uno de los indicadores de mayor importancia para determinar el estado de salud de un cuerpo de agua. El oxígeno se produce en el agua como resultado de los procesos de fotosíntesis. Dicho proceso lo realizan durante el día los microorganismos (fitoplancton), las algas y las plantas acuáticas que utilizan la luz solar para su crecimiento y producen este vital gas. Por otro lado, el oxígeno se consume durante los procesos de respiración que llevan a cabo todos los organismos vivos, incluyendo las bacterias. De esta forma, tenemos producción de oxígeno por fotosíntesis y consumo por respiración. Durante las horas de luz predomina la producción de oxígeno por fotosíntesis y durante las horas de oscuridad en la noche prevalece el consumo por respiración, por lo que la concentración de oxígeno en un cuerpo de agua cambia naturalmente. Otro proceso que puede aumentar o disminuir la concentración del oxígeno disuelto en el agua es el intercambio de oxígeno que ocurre entre la atmósfera y la superficie de los cuerpos de agua.

La concentración del oxígeno disuelto en el agua disminuye por contaminantes que llegan a través de descargas sanitarias domésticas, descargas industriales y escorrentía pluvial. Cuando el oxígeno disuelto desaparece, se dice que el sistema está anóxico. La mortandad de peces y otros organismos acuáticos en este escenario no solamente depende de las concentraciones bajas de oxígeno, sino también del tiempo que dichas condiciones se mantienen en el sistema.

Debemos tener presente que los organismos que viven en ecosistemas acuáticos tropicales son más susceptibles a estos cambios, pues viven en condiciones cerca de los límites de tolerancia para temperatura y oxígeno disuelto. La Tabla 2 exhibe los valores de oxígeno disuelto observados en el sistema del estuario.

Oxígeno disuelto (mg/L)	Valor mínimo	Valor máximo	Promedio
Bahía de San Juan	5.1	8.4	6.1
Caño Martín Peña	0.1	8.0	2.9
Río Piedras (Puerto Nuevo)	2.5	13.1	6.7
Canal San Antonio	3.4	8.7	6.2
Laguna del Condado	3.9	8.9	6.1
Canal La Malaria	0.1	5.3	2.0
Península La Esperanza	0.5	7.8	4.4
Laguna La Torrecilla	0.6	11.7	4.7
Canal Blasina	0.1	6.4	1.1
Canal Suárez	0.1	9.3	3.4
Laguna San José	0.5	11.2	8.1
Quebrada San Antón	0.2	10.8	5.7
Laguna Los Corozos	1.0	12.6	7.7
Río Piedras	0.2	9.3	6.9
Aljibe Las Curías	0.3	10.2	4.1
Laguna de Piñones	0.4	10.9	4.4
Quebrada Juan Méndez	1.7	8.1	5.0

Tabla 2. Valor mínimo, valor máximo y promedio de los datos de oxígeno disuelto (mg/L) para cada cuerpo de agua monitoreado de 2019 a 2023. Los cuerpos de agua que no cumplieron con el valor objetivo se identifican con una bandera al lado del valor promedio.

Los cuerpos de agua que no cumplieron con el valor objetivo de 4 mg/L fueron el Caño Martín Peña (valor promedio de 2.9 mg/L), el canal La Malaria (valor promedio de 2.0 mg/L), el canal Blasina (valor promedio de 1.1 mg/L) y el canal Suárez (valor promedio de 3.4 mg/L). No obstante, el 76 % de los cuerpos de agua monitoreados (17) cumplen con los niveles de oxigenación adecuada.



Las especies marinas, como la hierba de tortuga (*Thalassia testudinum*), se benefician más de la luz solar cuanto menos turbia está el agua.

Turbidez

Las medidas de turbidez nos dicen qué tan clara o transparente se encuentra la columna de agua. Cuanto más clara o menos turbia, mayor será la penetración de la luz solar, beneficiando a las comunidades marinas. La turbidez aumenta en el agua por la presencia de partículas suspendidas como las arcillas, organismos microscópicos como el plancton marino y fragmentos de materia orgánica.

La turbidez aumenta particularmente por eutrofización, precipitación (escorrentía) y la resuspensión de sedimentos ocasionados por las tormentas, el oleaje y el tráfico marítimo. Además, puede aumentar durante las actividades de dragado y rellenos, por descargas domésticas, descargas industriales y deforestación en la cuenca hidrográfica.

La presencia de niveles altos de turbidez altera no solamente el proceso de fotosíntesis, sino que limita la capacidad de los peces de obtener el oxígeno del agua, pues afecta las agallas que funcionan como pulmones durante el intercambio de gases. Como consecuencia, disminuye la resistencia a enfermedades, reduce la tasa de crecimiento e interviene con el desarrollo de larvas y juveniles. Asimismo, los sedimentos ocasionan daño por abrasión a los tejidos de los corales, las esponjas marinas y otros organismos que habitan en el fondo marino.

Por otro lado, los sólidos suspendidos actúan como acarreadores de compuestos tóxicos, como pesticidas y metales pesados. Hasta se puede observar un aumento en la temperatura en cuerpos de agua muy turbios, pues los sólidos suspendidos absorben la radiación solar y emiten a su vez calor.

La turbidez está dada en unidades nefelométricas (NTU), donde una unidad de cero representa agua destilada. Determinamos un valor de 10 NTU como valor objetivo para los cuerpos de agua del estuario. En otras palabras, para que un cuerpo de agua se considere saludable para este parámetro, sus niveles de turbidez no deben exceder este valor.

Los cuerpos que excedieron los 10 NTU fueron el canal La Malaria (14.5 NTU), laguna San José (12.1 NTU), quebrada San Antón (11 NTU), laguna Los Corozos (12.4 NTU) y la laguna de Piñones (17.4) (Tabla 3) Por otro lado, hay que entender que estos son cuerpos naturalmente orgánicos con fondos arcillosos, por lo que los niveles

de turbidez podrían estar naturalmente altos sin afectar la dinámica ecológica del ecosistema. El 71 % de los cuerpos de agua monitoreados (17) cumplen con niveles de turbidez aceptables.

pH

El pH es un parámetro que mide la concentración de iones de hidrógeno (H+) en solución. Nos dice qué tan ácido o alcalino (básico) está el cuerpo de agua. Los valores van en una escala de 0.0 hasta 14.0, donde 7.0 se considera un medio neutral, menos de 7.0 un medio ácido y más de 7.0 un medio básico o alcalino. Los niveles extremos de pH (por ejemplo, de menos de 6.0 o mayor de 9) se consideran dañinos a la flora y fauna acuática. Estos valores extremos de pH pueden observarse por la presencia de contaminantes en el agua, niveles muy bajos de oxígeno, descomposición de la materia orgánica y descargas domésticas e industriales. Cabe señalar que los procesos naturales como la fotosíntesis y la respiración ejercen cambios diarios en el pH, donde este aumenta durante el día y disminuye durante la noche. Al igual que las lecturas de oxígeno, durante los análisis hay que tomar en cuenta dicho ciclo natural, por lo que se recomienda realizar las observaciones a la misma hora del día siempre. Los datos de pH están en los rangos típicos dentro de la dinámica de cuerpos de agua internos en zonas tropicales. La Tabla 4 presenta los valores en pH observados en el sistema del estuario.

Turbidez (NTU)	Valor mínimo	Valor máximo	Promedio
Bahía de San Juan	0.0	33.6	1.8
Caño Martín Peña	0.2	23.8	5.1
Río Piedras (Puerto Nuevo)	0.0	38.2	3.4
Canal San Antonio	0.0	27.2	1.2
Laguna del Condado	0.0	35.2	2.4
Canal La Malaria	0.7	32.9	14.5
Península La Esperanza	0.5	37.0	6.5
Laguna La Torrecilla	0.1	26.2	4.2
Canal Blasina	0.8	28.8	5.4
Canal Suárez	0.0	30.1	8.8
Laguna San José	0.5	39.1	12.1
Quebrada San Antón	0.5	36.0	11.0
Laguna Los Corozos	1.4	30.8	12.4
Río Piedras	0.1	38.4	5.7
Aljibe Las Curías	0.2	31.2	4.1
Laguna de Piñones	1.8	37.3	17.4
Quebrada Juan Méndez	0.1	40.0	5.9

Tabla 3. Valor mínimo, valor máximo y promedio de los niveles de turbidez (NTU) para cada cuerpo de agua monitoreado de 2019 a 2023. Los cuerpos de agua que no cumplieron con el valor objetivo se identifican con una bandera al lado del valor promedio.

pH	Valor mínimo	Valor máximo	Promedio
Bahía de San Juan	7.3	8.3	8.0
Caño Martín Peña	7.0	8.2	7.5
Río Piedras (Puerto Nuevo)	7.2	8.5	7.9
Canal San Antonio	7.3	8.4	7.9
Laguna del Condado	7.1	8.7	7.9
Canal La Malaria	6.8	11.4	7.6
Península La Esperanza	7.0	7.9	7.5
Laguna La Torrecilla	7.0	8.5	7.7
Canal Blasina	6.9	8.2	7.2
Canal Suárez	7.1	13.2	7.9
Laguna San José	7.5	9.3	8.5
Quebrada San Antón	7.1	9.1	8.1
Laguna Los Corozos	7.0	9.4	8.5
Río Piedras	7.0	8.4	7.7
Aljibe Las Curías	6.9	9.0	7.6
Laguna de Piñones	7.0	8.7	7.7
Quebrada Juan Méndez	6.9	8.2	7.5

Tabla 4. Valor mínimo, valor máximo y promedio del pH para cada cuerpo de agua monitoreado de 2019 a 2023.

Salinidad (ppt)	Valor mínimo	Valor máximo	Promedio
Bahía de San Juan	0.3	45.7	34.0
Caño Martín Peña	0.2	37.2	23.3
Río Piedras (Puerto Nuevo)	3.5	36.0	27.6
Canal San Antonio	0.3	37.6	33.2
Laguna del Condado	14.4	52.1	34.7
Canal La Malaria	0.2	37.6	2.5
Península La Esperanza	0.3	33.9	16.9
Laguna La Torrecilla	2.3	37.7	26.1
Canal Blasina	0.2	30.5	10.7
Canal Suárez	5.0	37.1	16.3
Laguna San José	2.8	35.9	10.9
Quebrada San Antón	0.1	19.5	8.1
Laguna Los Corozos	3.5	30.2	10.3
Río Piedras	0.0	3.1	0.2
Aljibe Las Curías	0.1	0.2	0.1
Laguna de Piñones	8.1	35.8	24.3
Quebrada Juan Méndez	0.0	0.8	0.2

Tabla 5. Valor mínimo, valor máximo y promedio de la salinidad (ppt) para cada cuerpo de agua monitoreado de 2019 a 2023.

Salinidad

La salinidad es una medida de la cantidad de sales disuelta en el agua. Generalmente, se define en partes por mil (ppt). El agua destilada tiene un valor de 0 ppt, mientras que los océanos tienen valores de 35 ppt. Los estuarios son, por su naturaleza, áreas dinámicas y de cambios constantes en la salinidad. Por ejemplo, en eventos de mucha precipitación, la salinidad disminuye por dilución en la superficie, pues al ser menos densa, el agua dulce flota sobre el agua salada creando estratificación.

Por el contrario, cuando hay mucho oleaje por viento, la columna de agua se mezcla y las salinidades son intermedias. Los cambios en la marea traen también cambios en la salinidad. Por ejemplo, cuando hay marea alta, la salinidad en la superficie se asemeja a la salinidad típica del mar debido a que entra agua salada al estuario. En términos ecológicos, estos cambios en la salinidad juegan un papel importante en la distribución de las especies acuáticas.

Un aspecto fisicoquímico importante en los estuarios es la floculación y precipitación de partículas orgánicas que traen los ríos y quebradas. Este proceso consiste en la agregación de estas partículas en granos cuando entran en la zona salada del estuario. La Tabla 5 presenta las salinidades observadas en el sistema estuarino. Los datos de salinidad representan muy bien los valores típicos de los cuerpos de agua monitoreados y de sistemas estuarinos. Por ejemplo, es de esperar salinidades bajas y similares en el aljibe Las Curías (0.1 ppt) y el río Piedras (0.2 ppt), al ser estos cuerpos de agua dulce conectados. Por el contrario, observamos que, por su conectividad directa con el océano Atlántico, la Bahía de San Juan (34.0 ppt) y Laguna del Condado (34.7 ppt) presentan salinidades eurihalinas, es decir, típicas de ambientes oceánicos. La salinidad de los otros cuerpos de agua es de valores intermedios con relación a los valores antes mencionados, típico de sistemas propiamente estuarinos.

Transparencia del agua

La transparencia del agua nos dice qué tan turbia y clara puede estar la columna de agua. Una manera de estimarla es determinando la profundidad del disco Secchi. El disco Secchi consiste en un disco de unos 20 cm de diámetro con bandas de color negro y blanco amarrado a una cuerda

calibrada. El método consiste en bajar el disco Secchi hasta que este se deje de observar. A esta profundidad se le conoce como la profundidad Secchi. Una de las particularidades de esta técnica es que la lectura integra los niveles de turbidez a través de toda la columna de agua. Este es uno de los instrumentos más sencillos y utilizados en los muestreos de calidad del agua.

Determinamos como valor objetivo para este parámetro una profundidad Secchi de un (1) metro. En otras palabras, aspiramos a que los cuerpos de agua del estuario presenten profundidades Secchi de más de un metro. Para algunos cuerpos de agua, como el canal La Malaria, la península La Esperanza, el río Piedras, la laguna de Piñones y la quebrada Juan Méndez, no contamos con un valor para la profundidad del disco Secchi. Sucede que estas estaciones son muy poco profundas, de menos de un metro de profundidad, por lo tanto el método Secchi no aplica. El resto de los cuerpos de agua exhiben profundidades Secchi variables, siendo la Bahía de San Juan (2.8 metros), el canal San Antonio (3.8 metros) y la Laguna del Condado (3.9 metros) los cuerpos de agua estuarinos con mayor transparencia (Tabla 6).

Profundidad disco Sechi (metros)	Valor mínimo	Valor máximo	Promedio
Bahía de San Juan	0.6	8.5	2.8
Caño Martín Peña	0.2	1.8	1.2
Río Piedras (Puerto Nuevo)	0.4	4.0	1.5
Canal San Antonio	0.4	6.8	3.8
Laguna del Condado	0.0	7.2	3.9
Canal La Malaria	NA	NA	NA
Península La Esperanza	NA	NA	NA
Laguna La Torrecilla	0.2	5.7	1.3
Canal Blasina	0.2	2.3	0.9
Canal Suárez	0.1	3.8	0.8
Laguna San José	0.2	24.2	0.8
Quebrada San Antón	0.1	1.8	0.7
Laguna Los Corozos	0.3	5.2	0.6
Río Piedras	NA	NA	NA
Aljibe Las Curías	NA	NA	NA
Laguna de Piñones	NA	NA	NA
Quebrada Juan Méndez	NA	NA	NA

NA = dato no disponible

Tabla 6. Valor mínimo, valor máximo y promedio de la profundidad Secchi (metros) para cada cuerpo de agua monitoreado de 2019 a 2023. Los cuerpos de agua que no cumplieron con el valor objetivo se identifican con una bandera al lado del valor promedio.

Aceites y grasas

Los aceites y las grasas son compuestos orgánicos que indican la presencia de combustible fósil, grasa vegetal y animal (utilizada para cocinar y freír), jabones, detergentes, aceite de motor y otros. Estos compuestos llegan a nuestros cuerpos de agua cuando desechamos aceite de cocinar y el aceite usado de los automóviles directamente en las alcantarillas. También llegan por las aguas de escorrentía provenientes del lavado de superficies como estacionamientos, de las avenidas, aceras, carreteras y otros. Se estima que la cantidad de aceite que llega al océano por estas fuentes es mayor que la ocasionada por los derrames de petróleo cuando los cargueros encallan.

Otras fuentes de contaminación por aceites y grasas son los pequeños derrames intencionales o accidentales en marinas, puertos y estaciones de gasolina o talleres de mecánica, al igual que en los restaurantes con trampas de grasa defectuosas. Los desbordamientos de las aguas sanitarias a través de los registros del sistema de alcantarillado sanitario se deben en ocasiones a oclusiones producto de la solidificación de los aceites y grasas de cocinar.

Aceites y grasas (mg/L)	Valor mínimo	Valor máximo	Promedio
Bahía de San Juan	BDL	2.2	1.6
Caño Martín Peña	BDL	2.0	1.6
Río Piedras (Puerto Nuevo)	1.4	5.2	2.5
Canal San Antonio	BDL	5.9	2.3
Laguna del Condado	BDL	2.1	1.7
Canal La Malaria	BDL	3.1	2.1
Península La Esperanza	BDL	7.7	1.9
Laguna La Torrecilla	BDL	3.7	1.8
Canal Blasina	BDL	21.1	2.5
Canal Suárez	1.4	3.3	1.6
Laguna San José	1.4	3.6	2.1
Quebrada San Antón	BDL	2.7	1.7
Laguna Los Corozos	BDL	2.4	1.7
Río Piedras	BDL	4.6	1.7
Aljibe Las Curías	BDL	2.4	1.7
Laguna de Piñones	BDL	5.4	2.4
Quebrada Juan Méndez	BDL	2.8	1.7

BDL = Bajo el límite de detección del método de análisis.

Tabla 7. Valor mínimo, valor máximo y promedio de la concentración de aceites y grasas (mg/L) para cada cuerpo de agua monitoreado de 2019 a 2023. Los cuerpos de agua que no cumplieron con el valor objetivo se identifican con una bandera al lado del valor promedio.

De ahí la importancia del manejo y disposición adecuada de estos aceites y grasas usados. Por otro lado, las embarcaciones con motores fuera de borda del tipo de dos ciclos constituyen también una fuente de aceites en las lagunas y bahías donde navegan.

Los aceites y las grasas pueden llegar a niveles tóxicos para la flora y fauna acuática, pueden reducir la concentración del oxígeno disuelto en el agua al evitar el intercambio de este importante gas entre la superficie y la atmósfera, y reducen el valor estético del cuerpo de agua. En otras palabras, cuanto más altos los resultados, mayor es la presencia de materia orgánica en el cuerpo de agua y peor se encuentra el cuerpo de agua severamente contaminado, a base de este parámetro.

Aunque no existe un estándar para la concentración de aceites y grasas, determinamos como objetivo que la concentración promedio en los cuerpos de agua del estuario no debe exceder un (1) mg/L. Como se observa en la Tabla 7, todos los cuerpos de agua promedian valores sobre el valor objetivo, por tanto, no cumplieron con el objetivo.

Nutrientes

El nitrógeno y el fósforo son nutrientes utilizados por las plantas acuáticas, las algas y el fitoplancton para su crecimiento. Sin embargo, cuando los encontramos en exceso en los ambientes acuáticos traen como consecuencia un deterioro en la calidad de las aguas. El exceso de estos fertiliza las aguas, estimulando el crecimiento desmesurado de microorganismos, algas y plantas acuáticas. Una vez estos organismos mueren y se descomponen, se reduce el oxígeno disuelto disponible para la respiración. Además, aumentan las tasas de sedimentación y se liberan compuestos tóxicos. Este proceso se conoce como eutrofización cultural o antrópica.

Los nutrientes se originan naturalmente por los procesos geológicos, la descomposición de la materia orgánica por bacterias o la deposición atmosférica. No obstante, la preocupación mayor son las fuentes derivadas de la actividad humana (fuentes antrópicas), como por ejemplo, las descargas de aguas sanitarias sin tratar, pozos sépticos sin mantenimiento, desbordamientos, fertilizantes, detergentes (fósforo) y las aguas grises producto de la actividad agrícola.

El nitrógeno se encuentra en el agua en varias formas químicas como amonio (NH4+), nitrito (NO2-), nitrato (NO3-) y en su forma orgánica (moléculas más complejas). El nitrógeno total mide el conjunto de todas estas formas químicas en una muestra de agua. El fósforo es un nutriente que se encuentra mayormente como fosfato (PO4-).

Las concentraciones de nitritos y nitratos se presentan en la Tabla 8. Para los nitratos y nitritos se estableció un valor objetivo de 0.5 mg/L. Los valores con BDL (*Below Detection Limit*) significan resultados bajo los límites de detección del método. El canal Suárez fue el cuerpo de agua con los valores promedio de nitratos y nitritos más altos (1.60 mg/L), seguido por la quebrada Juan Méndez (1.15 mg/L) y el río Piedras (0.89 mg/L). Los demás cuerpos de agua del estuario obtuvieron valores promedio de nitratos y nitritos por debajo del objetivo establecido. Por lo tanto, el 82 % de los cuerpos de agua estuarinos cumplieron con los valores aceptables para nitritos y nitratos.

Nitritos + Nitratos (mg/L)	Valor mínimo	Valor máximo	Promedio
Bahía de San Juan	BDL	0.09	0.04
Caño Martín Peña	0.02	0.07	0.04
Río Puerto Nuevo	0.03	0.94	0.28
Canal San Antonio	BDL	0.44	0.08
Laguna del Condado	BDL	0.18	0.04
Canal La Malaria	BDL	0.45	0.12
Península La Esperanza	BDL	0.70	0.15
Laguna La Torrecilla	BDL	0.43	0.08
Canal Blasina	BDL	0.88	0.27
Canal Suárez	1.40	3.30	1.60 ⚑
Laguna San José	0.02	0.12	0.04
Quebrada San Antón	BDL	0.76	0.35
Laguna Los Corozos	BDL	0.14	0.04
Río Piedras	BDL	1.60	0.89 ⚑
Aljibe Las Curías	BDL	0.28	0.05
Laguna de Piñones	BDL	0.15	0.07
Quebrada Juan Méndez	BDL	1.94	1.15 ⚑

BDL = Bajo el límite de detección del método de análisis.

Tabla 8. Valor mínimo, valor máximo y promedio de la concentración de nitritos y nitratos (mg/L) para cada cuerpo de agua monitoreado de 2019 a 2023. Los cuerpos de agua que no cumplieron con el valor objetivo se identifican con una bandera al lado del valor promedio.



La reducción en los niveles de fósforo total detectados podrían ser resultado de la implementación de la Ley de Control de Fosfatos en Detergentes, que entró en vigor en enero de 2010.

Parámetro fósforo total (mg/L)	Valor mínimo	Valor máximo	Promedio
Bahía de San Juan	BDL	BDL	BDL
Caño Martín Peña	BDL	BDL	BDL
Río Piedras (Puerto Nuevo)	BDL	0.06	0.06
Canal San Antonio	BDL	BDL	BDL
Laguna del Condado	BDL	BDL	BDL
Canal La Malaria	BDL	0.63	0.32
Península La Esperanza	BDL	0.19	0.09
Laguna La Torrecilla	BDL	0.24	0.16
Canal Blasina	BDL	0.11	0.07
Canal Suárez	BDL	BDL	BDL
Laguna San José	BDL	0.04	0.02
Quebrada San Antón	BDL	0.11	0.08
Laguna Los Corozos	BDL	0.11	0.11
Río Piedras	BDL	0.40	0.13
Aljibe Las Curías	BDL	0.06	0.03
Laguna de Piñones	BDL	0.27	0.27
Quebrada Juan Méndez	BDL	0.54	0.30

BDL = Bajo el límite de detección del método de análisis.

Todos los cuerpos de agua estuarinos obtuvieron valores promedio de fósforo total por debajo del valor objetivo de 0.5 mg/L (Tabla 9). En algunos casos, hasta niveles no detectables (BDL). A partir del 1 de enero de 2010 entró en vigor la Ley Núm. 38 de 14 de julio de 2009, conocida como la Ley de Control de Fosfatos en Detergentes. Es muy posible que los valores observados respondan a la implementación de esa ley, pues la misma limita el contenido de fosfatos en los detergentes de ropa. Según el artículo 4 del estatuto: "Excepto, según se dispone en el inciso (c) de este Artículo y en el Artículo 5, una persona no podrá usar, vender, manufacturar, importar o distribuir para uso o venta dentro de Puerto Rico, ningún detergente de ropa que contenga más que una "Cantidad Traza", según definida en esta Ley". Cantidad traza se define como: "Cualquier entidad de fósforo que es incidental en la manufactura o que se añade para estabilizar el detergente de ropa, la cual no excede un 0.5 % de peso de fósforo, expresado como fósforo elemental o que es descrito por las frases "no contiene fosfatos" o "no contiene fósforo" en la etiqueta o empaque del producto".



Designed by Freepik



Islote Guachinanga en la Laguna San José.

Contaminantes emergentes de preocupación en aguas del Estuario de la Bahía de San Juan



Raíces sumergidas del mangle rojo (Rhizophora mangle).

Imar Mansilla Rivera
Carlos J. Rodríguez Sierra
Departamento de Salud Ambiental, Escuela Graduada de Salud Pública, Recinto de Ciencias Médicas - Universidad de Puerto Rico

Los contaminantes emergentes de preocupación (CPE) son sustancias químicas que tienen el potencial de causar efectos adversos en la salud humana y de los ecosistemas (Kumar et al., 2022). Al momento no existe regulación para muchos de estos contaminantes, por lo que no se monitorean con frecuencia. Aunque estas sustancias no son nuevas, es recientemente cuando se han comenzado a cuantificar en el agua, aún a concentraciones muy bajas, gracias a los avances que ha habido en las técnicas analíticas (Ramírez-Malule et al., 2020).

Entre los CPE se encuentran un sinnúmero de sustancias que tienen varias aplicaciones. Algunas de ellas son: fármacos (ej. antibióticos, antidepresivos, analgésicos) y productos farmacéuticos de cuidado y de higiene personal, conocidos como PPCP por sus siglas en inglés (ej. cosméticos, protectores solares, repelentes de insectos); drogas ilícitas (ej. psicoestimulantes); edulcorantes artificiales (ej. sucralosa); aditivos de materiales (ej. surfactantes, retardantes de llamas, ingredientes plásticos); hormonas naturales y sintéticas (ej. estradiol, etinilestradiol); y pesticidas (ej. atrazina) (Pastorino and Ginebreda, 2021; Khan et al., 2022; Kumar et al., 2022). También incluyen productos de degradación de estas sustancias (ej. benzoilecgonina, metabolito de la cocaína).

Dado el amplio uso de los CPE y la ausencia de métodos para la remoción eficiente de estos contaminantes en las plantas de tratamiento convencionales

de aguas residuales, los CPE pueden llegar a los sistemas acuáticos por diversas fuentes (Figura 1). Por ejemplo, la disposición inadecuada de los productos que contienen CPE propicia que lleguen a los vertederos y que eventualmente percolen al agua subterránea con los lixiviados que se generan. También las descargas de las plantas de tratamiento de agua pueden contribuir a que estos contaminantes lleguen a los cuerpos de agua superficial y al agua subterránea. Otra forma en que los CPE pueden llegar al ambiente y afectar la calidad del agua es a través de las escorrentías de las zonas urbanas o agrícolas (Figura 1).

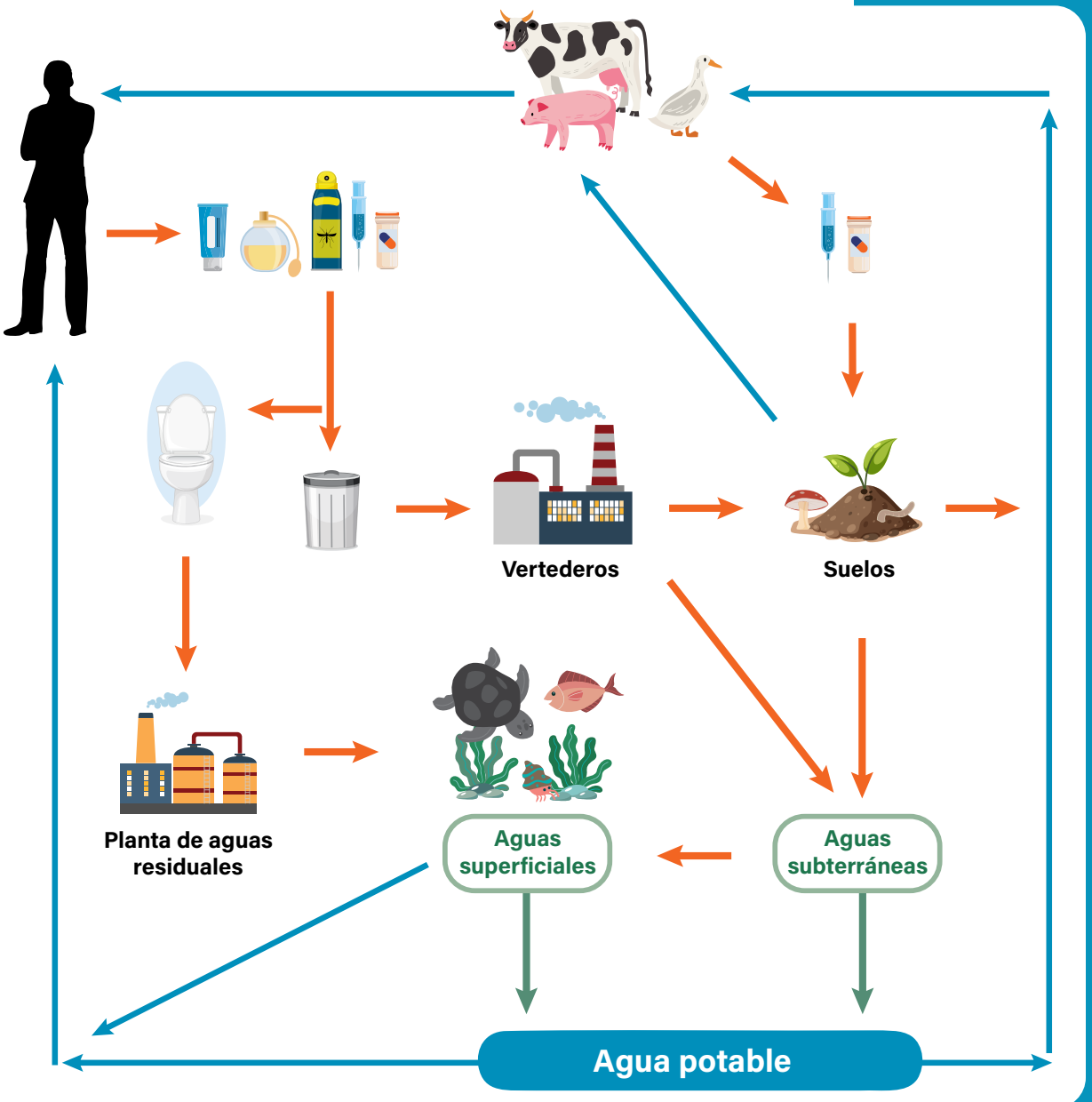


Figura 1. Fuentes, transporte y paradero de los CPE en el ambiente y posibles vías de exposición. Los CPE excretados a través de la orina y heces fecales o desechados directamente en el inodoro (o lavamanos) llegan a las plantas convencionales de tratamiento de aguas residuales. Estas plantas no los remueven eficientemente, resultando en la contaminación de los cuerpos de agua. Los lixiviados o el agua de escorrentías de fuentes terrestres (ej. vertederos) pueden resultar también en la contaminación de los suelos y cuerpos de agua. Los animales y las plantas pueden bioacumular CPE, representando entonces una vía de exposición humana a estos contaminantes mediante el consumo de alimentos o del agua potable. Modificada. Publicada con permiso del autor (Oliver Rodríguez, 2021).

Son varios los efectos adversos a la salud de organismos que se han asociado a la exposición de los CPE. Entre ellos se encuentran trastornos reproductivos y del desarrollo, efectos en el sistema nervioso, disrupción al sistema endocrino y cáncer (Kumar et al., 2022; Impellitteri et al., 2023). Además, algunos CPE pueden bioacumularse en animales acuáticos comestibles (ej. peces), representando un riesgo para la salud humana y la de otros organismos depredadores como el pelícano pardo (Deere et al., 2020). Otro efecto importante de los CPE en el ambiente es que pudieran resultar en el desarrollo de bacterias resistentes a los antibióticos, debido a la exposición continua a estos fármacos en el agua (Lofrano et al., 2021).

Dada la amplia distribución de los CPE en los ecosistemas acuáticos y sus posibles efectos adversos a la salud, estos contaminantes han generado una creciente preocupación e interés entre la comunidad científica. Por tal razón, recientemente se llevó a cabo un estudio en aguas del Estuario de la Bahía de San Juan para determinar la presencia y distribución de estos contaminantes, en particular, PPCP, hormonas y sucralosa.

Para este estudio se implementó un método sencillo que permite monitorear los niveles de CPE utilizando un muestreador pasivo conocido como el Muestreador Integrador de Productos Químicos Orgánicos Polares (POCIS, por sus siglas en inglés) (Figura 2). Este método no necesita una fuente de energía para tomar la muestra y no requiere mantenimiento ni supervisión (Alvarez et al., 2004). El POCIS está configurado para recolectar los CPE disueltos en el agua, representando la fracción disponible para acumularse en los organismos acuáticos (Alvarez et al., 2004). El método proporciona la concentración media ponderada en el tiempo (TWA, por sus siglas en inglés) de los CPE en el agua (Alvarez et al., 2004). A diferencia de tomar una muestra puntual del agua (en un momento y lugar determinado), el muestreador pasivo POCIS se coloca en el campo por un periodo largo de tiempo (por ejemplo, 30 días) y tiene la ventaja de que puede recoger contaminantes que llegan al agua por eventos esporádicos, como podrían ser las escorrentías de aguas residuales no tratadas al desbordarse el sistema de alcantarillado sanitario (Alvarez et al., 2004).

Para medir los niveles de CPE en el agua del estuario, se esco-



Figura 2. Colocación de envase de metal con rejilla con tres discos del muestreador pasivo POCIS. Cada disco de POCIS contiene el sorbente Oasis™ Balance Hidrofílico-Lipofílico (HLB, por sus siglas en inglés) que permite capturar eficientemente los PPCP, hormonas y sucralosa (Alvarez et al., 2004).

gieron cinco estaciones distribuidas en diferentes cuerpos de agua del sistema: el río Piedras, la Laguna del Condado, el Caño Martín Peña, canal Suárez y el canal Blasina (Figura 3).

En cada estación se colocaron tres discos de POCIS dentro de un envase de metal con rejilla (Figura 2) y se dejaron sumergidos en el agua por 30 días, entre junio y julio del 2022. La Figura 4 muestra cómo se colocaron los POCIS en el estuario. Una vez transcurridos los 30 días, los POCIS se removieron y se enviaron a un laboratorio comercial para el análisis químico de los CPE.

El análisis químico se hizo para 137 sustancias químicas diferentes que componen los CPE y se detectaron 64 (47 %) de ellas: 51 del grupo de los PPCP, 12 hormonas y sucralosa. Estas 64 sustancias químicas se dividieron en 22 grupos distintos a partir de su uso (Figura 5). La frecuencia de detección de estos 22 grupos varió de 20 % a 100 % (Figura 5).



Figura 3. Estaciones de monitoreo de CPE usando muestreadores POCIS en cuerpos de agua del estuario: río Piedras, Laguna del Condado, Caño Martín Peña, canal Suárez y canal Blasina.

Una frecuencia de detección de 100 % significa que ese grupo en particular se detectó en las cinco estaciones de muestreo. Los 13 grupos de sustancias químicas que obtuvieron una frecuencia de detección de 100 % pertenecen mayormente a los fármacos y son los siguientes: antidepresivos (fluoxetina, amitriptilina y sertralina), un antihistamínico (difenhidramina), un anticonvulsivo (carbamazepina), un antifúngico (miconazol), un antihelmíntico

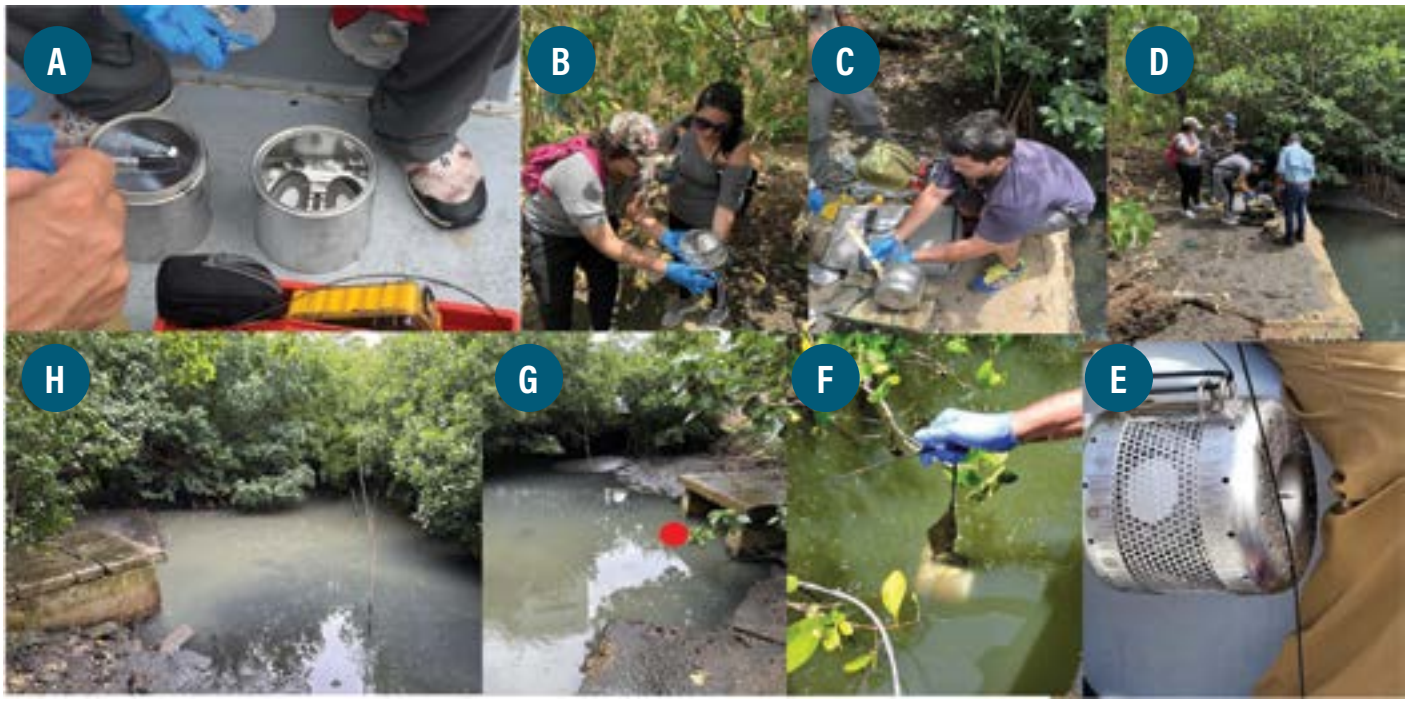


Figura 4. Despliegue de los muestreadores pasivos POCIS. En la foto A los tres discos POCIS se remueven de una lata de metal que vino sellada. En las fotos B, C y D se colocan los tres discos POCIS dentro del envase de metal con rejilla. La foto E muestra el ensamblaje del envase de metal con rejilla con los tres discos POCIS antes de sumergirlo en el agua (foto F). Las fotos B, C, D, G y H muestran la estación de la Laguna del Condado con el punto rojo indicando el lugar aproximado en donde se sumergió el envase de metal con rejilla que contenía los POCIS.

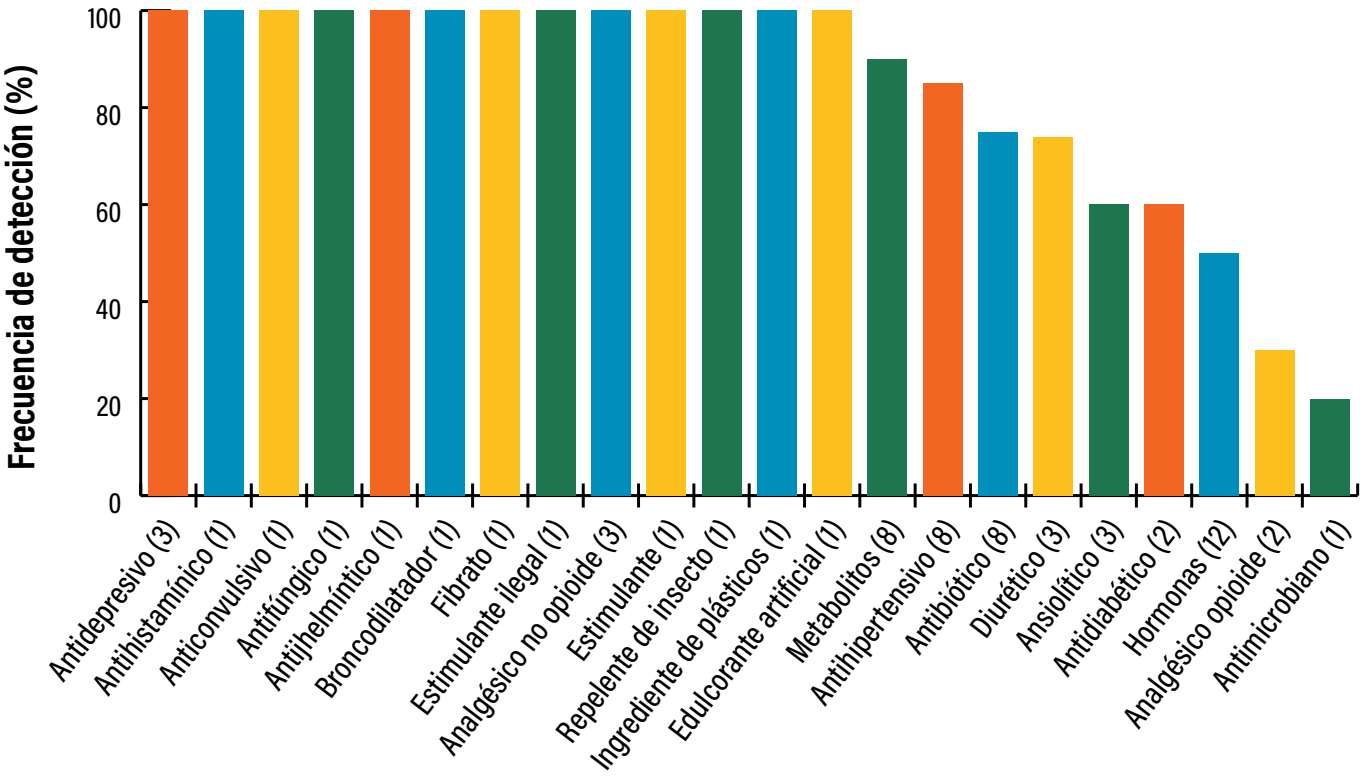


Figura 5. Frecuencia de detección de CPE en el estuario categorizada en 22 grupos a partir de sus usos. Los números en paréntesis representan la cantidad de sustancias químicas en cada grupo.

(tiabendazol), un broncodilatador (teofilina), un fibrato (gemfibrozil), un estimulante ilícito (cocaína), analgésicos no opioides (acetaminofén, ibuprofeno y naproxeno), un estimulante (cafeína), un repelente de insectos (N,N-dietiltoluamida —DEET, por sus siglas en inglés), un ingrediente de plásticos (bisfenol A) y un edulcorante artificial (sucralosa).

Otro hallazgo importante fue que se encontraron diferencias entre las cinco estaciones, tanto en la distribución como en los niveles de CPE. Por ejemplo, del total de los CPE detectados (n = 64), la mayor proporción se encontró en la Laguna del Condado (86 %, equivalente a 55 CPE); la menor fue en el río Piedras (69 %) (Figura 6).

Además, en la Laguna del Condado, los niveles de varias sustancias —como la cocaína y su metabolito benzoilecgonina— fueron mayores (aproximadamente de 16 a 70 veces y 2 a 8 veces, respectivamente) que en las demás estaciones (Figura 7).

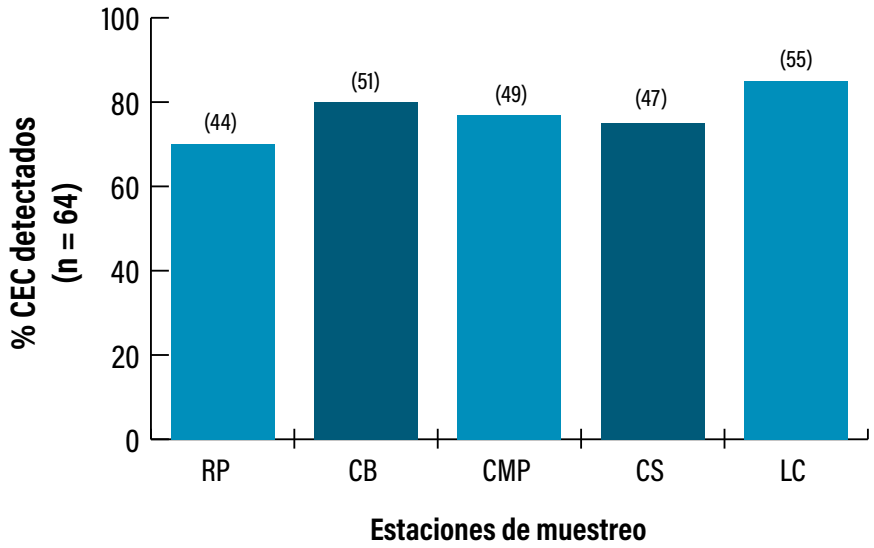


Figura 6. Porcentaje (%) de CPE detectado con respecto al total (n=64) en cada estación de muestreo: río Piedras (RP), canal Blasina (CB), Caño Martín Peña (CMP), canal Suárez (CS) y Laguna del Condado (LC). Los números en paréntesis representan la cantidad de CPE detectados.

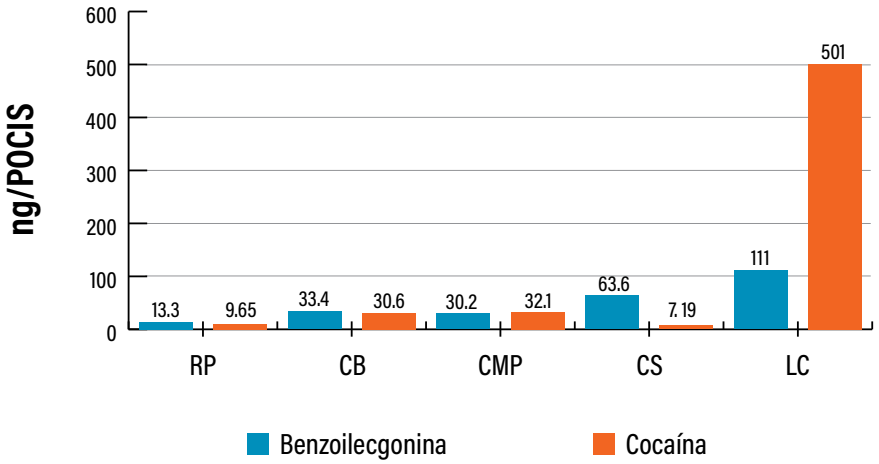


Figura 7. Niveles de cocaína y su metabolito benzoilecgonina en las estaciones de río Piedras (RP), canal Blasina (CB), Caño Martín Peña (CMP), canal Suárez (CS) y Laguna del Condado (LC). La unidad nanogramo (ng)/POCIS consiste en la combinación del extracto de los tres discos POCIS analizados por cada estación de monitoreo.

En conclusión, estos resultados preliminares revelaron que los muestreadores POCIS fueron una herramienta útil para detectar en aguas del estuario una gran variedad de CPE con diversos usos y mecanismos de acción. La detección de esta mezcla de 64 CPE representa un riesgo potencial al ecosistema del estuario, particularmente por la presencia de disruptores endocrinos como las hormonas. La presencia de sucralosa, un indicador común de la contaminación de los cuerpos de agua por aguas residuales (Ng et al., 2021; Sultana and Metcalfe, 2022) sugiere que estas son una fuente de entrada de los CPE al ecosistema.

Dado los potenciales riesgos que estos contaminantes representan para la salud humana y del ecosistema, es esencial reducir o eliminar su entrada al ambiente y, en particular, al estuario. Para esto es necesario desarrollar estrategias en varios niveles. Los consumidores debemos disponer de estos productos de forma adecuada. Esto debería venir apoyado por estrategias de promoción, educación y políticas públicas. Además, se deben establecer mejores tecnologías de tratamiento de las aguas residuales para que sean más eficientes en la remoción de los CPE. Es indispensable también una optimización del sistema de alcantarillado pluvial y sanitario para evitar las descargas directas y reducir las escorrentías que llegan al estuario. Finalmente, establecer un programa de monitoreo e investigación de los CPE en el estuario sería crucial para apoyar las estrategias mencionadas y reducir el potencial riesgo que estas sustancias pudieran representar para el ambiente y el ser humano.



La mayor concentración de CPE se encontró en la estación de muestreo de la Laguna del Condado.

ESTUARIO

Desarrollo de una plataforma predictiva de afloramiento (brotes) de algas peligrosas para la laguna San José



La laguna San José recibe descargas sanitarias, directas o indirectas, debido a la falta de infraestructura sanitaria en áreas cercanas y a fisuras internas en el sistema de distribución de aguas servidas. Esto favorece el desarrollo de brotes de algas.

Gustavo A. Martínez, Ph. D
Estación Experimental Agrícola, Colegio de Ciencias Agrícolas, Recinto Universitario de Mayagüez
Carlos J. Santos Flores, Ph. D.
Departamento de Biología, Facultad de Artes y Ciencias, Recinto Universitario de Mayagüez

La laguna San José es el primer ecosistema estuarino que encuentran los turistas al visitar a Puerto Rico. La laguna es reconocida a nivel mundial como una de las mejores zonas para la pesca recreativa del sábalo (*Megalops atlanticus*), y representa un recurso valioso para la industria del turismo de la zona local. Sin embargo, históricamente la laguna San José ha sido gravemente impactada por niveles excesivos de descargas sanitarias de las comunidades circundantes. El alto nivel de contaminación provocado por estas descargas ha generado desde hace décadas condiciones eutróficas en la laguna. La eutroficación es una condición que resulta en incrementos desmedidos en las tasas de productividad primaria de los ecosistemas acuáticos y generalmente está asociada a concentraciones de nutrientes (i.e., nitrógeno y fósforo) excesivas. En términos generales, la eutroficación provoca un desequilibro en la integridad ecológica de los sistemas acuáticos favoreciendo un crecimiento excesivo de la biomasa algal, particularmente de especies de algas potencialmente nocivas a la salud humana. Algunas de estas especies liberan toxinas reconocidas por su impacto neurológico (neurotoxinas), al hígado (hepatoxinas), el riñón y el sistema gastrointestinal. La eutroficación puede además causar anoxia (i.e. falta de oxígeno disuelto en el agua), provocando eventos masivos de mortandad de peces.

En el 1975 y 1976, Ellis y Gómez-Gómez, y posteriormente Webb and Gómez-Gómez (1998), describieron a las lagunas San José y La Torrecilla como sistemas altamente contaminados caracterizados por eventos masivos de afloramiento de algas y recurrentes eventos de mortandad de peces. Esa condición se relacionó con niveles extremos de nitrógeno, fósforo y carbono orgánico, característicos de un sistema hipertrófico. Inversiones significativas en la infraestructura sanitaria de la cuenca en la década

de 1980 redujeron significativamente las descargas sanitarias en la quebrada Blasina (tributario de las lagunas La Torrecilla y San José) y en la laguna San José y, por consiguiente, se redujeron significativamente las concentraciones de nitrógeno y fósforo en esa laguna (Figura 1). A pesar de estas mejoras significativas, hoy en día la laguna continúa recibiendo descargas sanitarias de forma directa o indirecta debido a la falta de infraestructura sanitaria en algunas zonas circundantes a este ecosistema o a fisuras internas en el sistema de distribución de las aguas servidas. Así las cosas, aunque la recurrencia de eventos extremos de brotes de algas y de mortandad de peces se ha reducido significativamente, todavía los niveles nutricionales de la laguna alcanzan ocasionalmente niveles que provocan estos eventos.

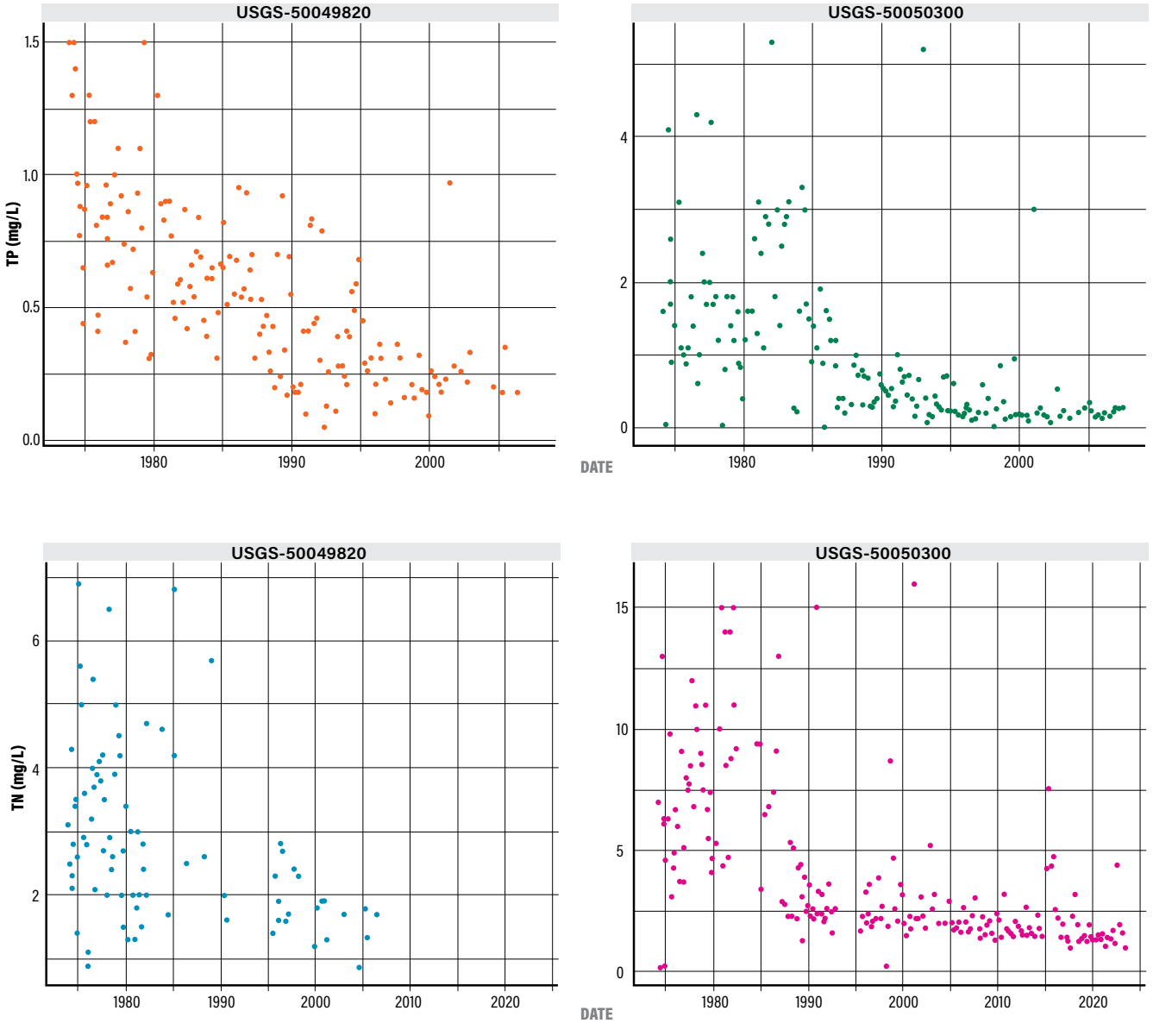


Figura 1. Concentraciones de fósforo total (cuadro superior) y nitrógeno total (cuadro inferior) en la laguna San José (USGS 50049820), y en la quebrada Blasina, @PR-3, Carolina (USGS 50050300) (las figuras tienen diferentes escalas). Las reducciones significativas en la concentración de nutrientes en la quebrada Blasina están asociadas al cierre de varias plantas de aguas servidas (PAS) en la cuenca. Esa reducción se refleja en la laguna San José.

El más reciente brote masivo de algas en la laguna San José ocurrió en el verano del 2020 (Figuras 2). Esa situación culminó en un evento de mortandad de peces que fue reseñado ampliamente en la prensa (Kevin Alicea Torres, El Nuevo Día, 16 agosto, 2020). Coincidentemente nuestro grupo de investigación se encontraba realizando trabajos de monitoreo de aguas en la cuenca que drena hacia la laguna y pudo detectar el brote de algas desde sus inicios en mayo del 2020.

En previsión de lo que eventualmente desencadenaría ese suceso, se realizaron gestiones con Estuario para llevar a cabo un muestreo de la laguna a finales de junio 2020. Las muestras se analizaron para contenido de nutrientes y se evaluaron taxonómicamente para caracterizar la composición de la comunidad planctónica durante el brote. Los resultados reflejaron que, durante el brote de algas, la comunidad planctónica estaba dominada esencialmente por *Microcystis wesenbergii* (Figura 3). De igual forma, el brote se relacionó con concentraciones de fósforo y nitrógeno total extremas. Además de provocar eventualmente una mortandad de peces significativa, las cianobacterias (algas azul verdosas del género *Microcystis*) liberan compuestos que resultan tóxicos para otros organismos. De igual forma, existen otras especies de estas algas que liberan cianotoxinas (término que se atribuye a compuestos potencialmente tóxicos liberados por las cianobacterias) que representan una amenaza a la integridad ecológica de los ecosistemas acuáticos y la salud de los usuarios de esos ecosistemas. Ejemplos de cianotoxinas son la microcistina y nodularin, ambas reconocidas como hepatoxinas. Entre los géneros de algas que producen microcistina se encuentran *Anabaena*, *Planktothrix* y *Microcystis*. De otra parte, los géneros *Cylindrospermopsis*, *Anabaena*/*Dolichospermum* (Figura 3) y *Aphanizomenon* producen cilindrospermopsina, toxina reconocida por su impacto al hígado y los riñones. Todos los géneros de algas mencionados anteriormente han sido documentados en números dominantes en la laguna San José en algún momento (Figura 4).



Figura 2. Muestreo de la laguna San José durante el evento de afloramiento de algas en el 2020 (cuadros superiores), y en julio del 2024 (cuadros inferiores).

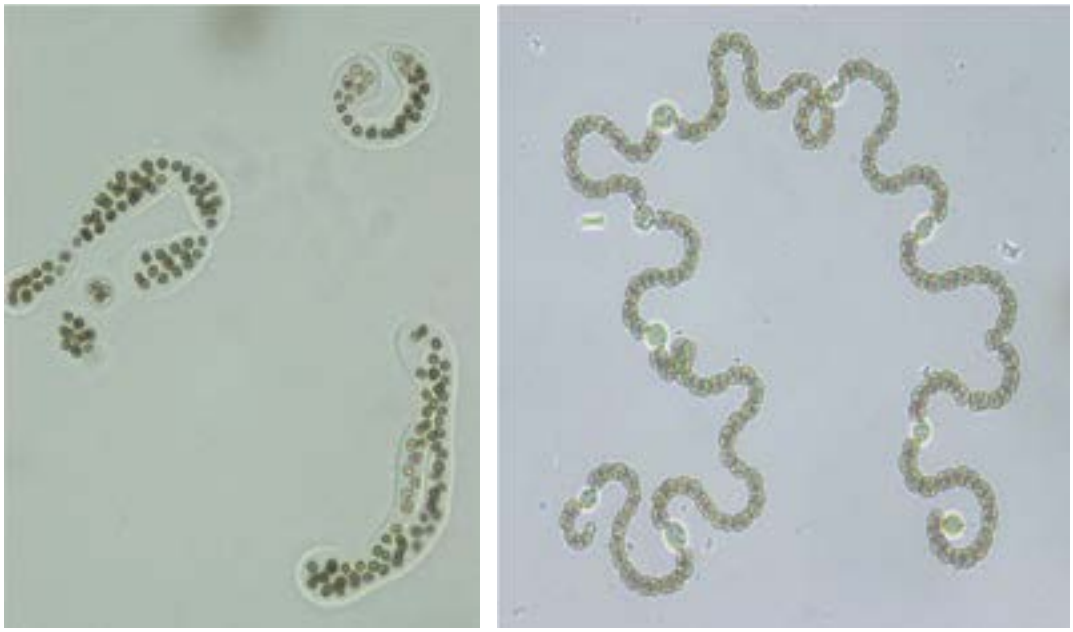
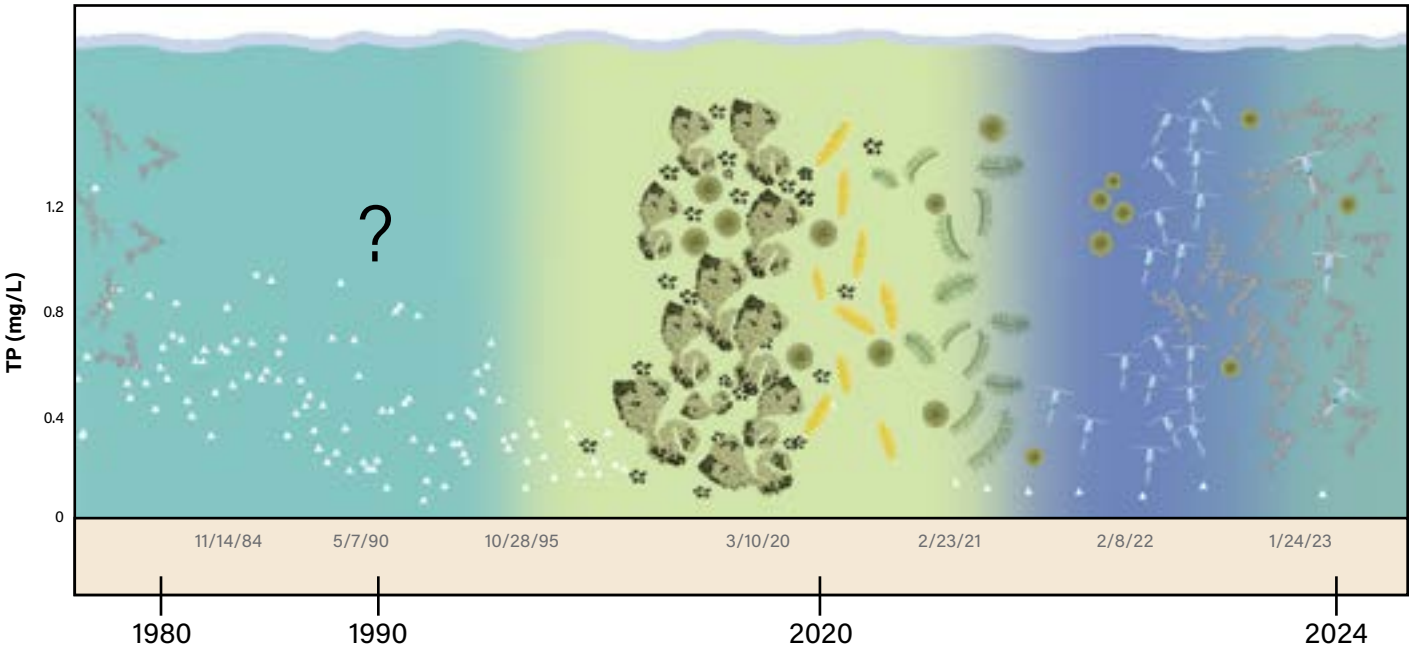


Figura 3. Dos de las cianobacterias dominantes durante los brotes o afloramientos en la laguna San José. A la izquierda, *Microcystis wesenbergii*, la cual dominó durante parte del 2020. A la derecha, un ejemplar de *Dolichospemum* (antes *Anabaena*), género del cual hay un complejo de especies que han dominado el fitoplancton en otras ocasiones, incluyendo el 2024.



LEYENDA PARA LAS ESPECIES

A. Colonias de la cianobacteria *Microcystis wesenbergii*

B. Diatomeas centrales (aguas dulces/ salobres/marinas)

C. Especies de la cianobacteria *Dolichospermum*

D. Copépodos calanoides (zooplancton)

E. Diatomeas marinas/salobres (ej. *Chaetoceros*)

F. Diatomeas de agua dulce

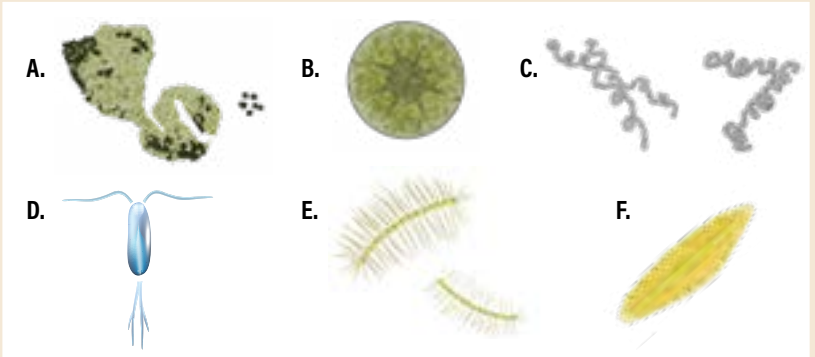


Figura 4. Línea de tiempo mostrando la dominancia de ciertas especies en el plancton de la laguna San José (las especies no están a escala). No existe información sobre la condición taxonómica de la laguna desde mediados de la década de 1990 hasta el 2010. Los triángulos corresponden a concentraciones de fósforo total (mg/L) en la laguna. Los datos del 1979 al 1995 provienen de USGS (50049820); los datos de fechas recientes son producto del programa de investigación del Dr. Gustavo Martínez.

El frágil ecosistema de la bahía de San Juan: una década de contaminación



Figura 1. La cuenca del Estuario de la Bahía de San Juan. (Mazurek, 2019)

Kelitsha E. Mulero Cruz
Universidad de Puerto Rico, Recinto de Río Piedras, Departamento de Ciencias Ambientales

El sistema del Estuario de la Bahía de San Juan (en adelante, el estuario) es uno de los entornos más importantes y únicos en Puerto Rico. Es hogar de una variedad de vida silvestre, y los habitantes locales utilizan sus aguas para la pesca, la recreación y como un recurso natural vital. Sin embargo, a lo largo de los años, este ecosistema ha enfrentado desafíos crecientes debido a la contaminación, el desarrollo urbano y los desechos industriales.

Durante más de una década, los científicos han estado monitoreando de cerca la salud de este estuario (Figura 1). En el 2011, se realizó un estudio para evaluar los niveles de contaminantes en el agua y en los peces que habitan en ella. Once años después, en el 2022, los investigadores regresaron al estuario para ver cómo habían cambiado las cosas. Sus hallazgos revelan una historia mixta: algunas mejoras, pero también señales alarmantes de un aumento de la contaminación en áreas clave.

El estuario cubre una gran área en el noreste de San Juan, compuesta de nueve cuerpos de agua. Algunos de los cuerpos de agua clave incluyen la Bahía de San Juan, la Laguna del Condado, el Caño Martín Peña, la laguna San José, el río Piedras (estación Puerto Nuevo) y la laguna La Torrecilla (Otero y Meléndez, 2011). Este sistema interconectado sustenta peces, cangrejos y otras especies de vida silvestre, pero también está muy cerca de áreas densamente pobladas. Como resultado, se ha vuelto vulnerable a la contaminación por vertidos ilegales de aguas residuales, el desarrollo de terrenos y por desechos. (Otero y Meléndez, 2011).

La importancia del estuario se reconoció oficialmente en 1993, cuando el Gobierno de Puerto Rico lo designó como el único estuario tropical de importancia nacional en Estados Unidos (Del estuario, 2022b). Desde entonces, ESTUARIO ha trabajado para monitorear y restaurar la salud de este valioso ecosistema. Sin embargo, la actividad humana sigue desafiando estos esfuerzos.

Los peces cuentan una historia

Una de las mejores maneras de entender la salud de un estuario es estudiando los peces que viven allí. En este caso, los investigadores se centraron en el pez mojarra (Figura 2), una especie común que se encuentra en todo el estuario. La mojarra es un pez importante para el ecosistema y las comunidades locales, ya que a menudo se captura para consumo.



Figura 2. Pez mojarra (*Diapterus plumieri*).

En ambos estudios, realizados en 2011 y en 2022, los científicos analizaron el tejido de los peces mojarra para medir los niveles de sustancias nocivas, incluyendo:

- Metales pesados, como zinc, plomo, arsénico y níquel.
- PCB (bifenilos policlorados), un grupo de productos químicos industriales que pueden persistir en el medioambiente durante décadas.
- Pesticidas como el DDT, que, aunque está prohibido en muchos países, puede permanecer en el entorno durante años.

Estos contaminantes pueden acumularse en el tejido de los peces, lo que significa que las personas que los consumen podrían estar en ries-

go de toxicidad. Por eso es tan importante monitorear los niveles de estas sustancias en los cuerpos de agua.

¿Qué cambió entre 2011 y 2022?

Los estudios encontraron algunas tendencias interesantes al comparar los niveles de contaminantes en el tejido de los peces durante el periodo de 11 años:

- Metales pesados: Los niveles de metales pesados, particularmente zinc y plomo, aumentaron significativamente entre 2011 y 2022. Los niveles de zinc aumentaron en más de 23 mg/kg en algunas áreas, y las concentraciones de plomo mostraron también un aumento sustancial. Estos metales pueden ser dañinos tanto para los peces como para los humanos, con el potencial de causar problemas de salud si se consumen en grandes cantidades.
- PCB: La concentración de PCB mostró también un incremento preocupante. En el 2022, los niveles de PCB fueron casi 2.5 veces más altos que en el 2011. Los PCB son especialmente peligrosos porque se acumulan en los tejidos grasos y están relacionados con varios problemas de salud, incluido el cáncer.
- Pesticidas: En una nota más positiva, los niveles de ciertos pesticidas, como DDT, DDE y DDD, disminuyeron entre los dos estudios. De hecho, los niveles de DDT se redujeron significativamente, de 0.0082 µg/kg en 2011 a solo 0.0011 µg/kg en 2022. Esto sugiere que los esfuerzos para reducir el uso de pesticidas están dando resultados, al menos en esta área.

El impacto de la urbanización

La salud del estuario varía según su ubicación. Algunas áreas están más afectadas por la actividad humana que otras, y esto se refleja en los niveles de contaminación. Las lagunas San José y La Torrecilla, ubicadas cerca de centros urbanos, mostraron los mayores aumentos en la contaminación por metales pesados. Por ejemplo, las concentraciones de zinc en la laguna La Torrecilla aumentaron en 32.6 mg/kg durante los últimos 11 años.

El Cano Martín Peña mostró aumentos menores en la concentración de contaminates en comparación con los otros cuerpos de agua estudiados. Sin embargo, los contaminantes seguían presentes, lo que demuestra que incluso las áreas menos urbanizadas no están inmunes a la contaminación.

En resumen, en la laguna San José (Figura 3), los niveles de zinc aumentaron en 23.1 mg/kg y las concentraciones de PCB se incre-

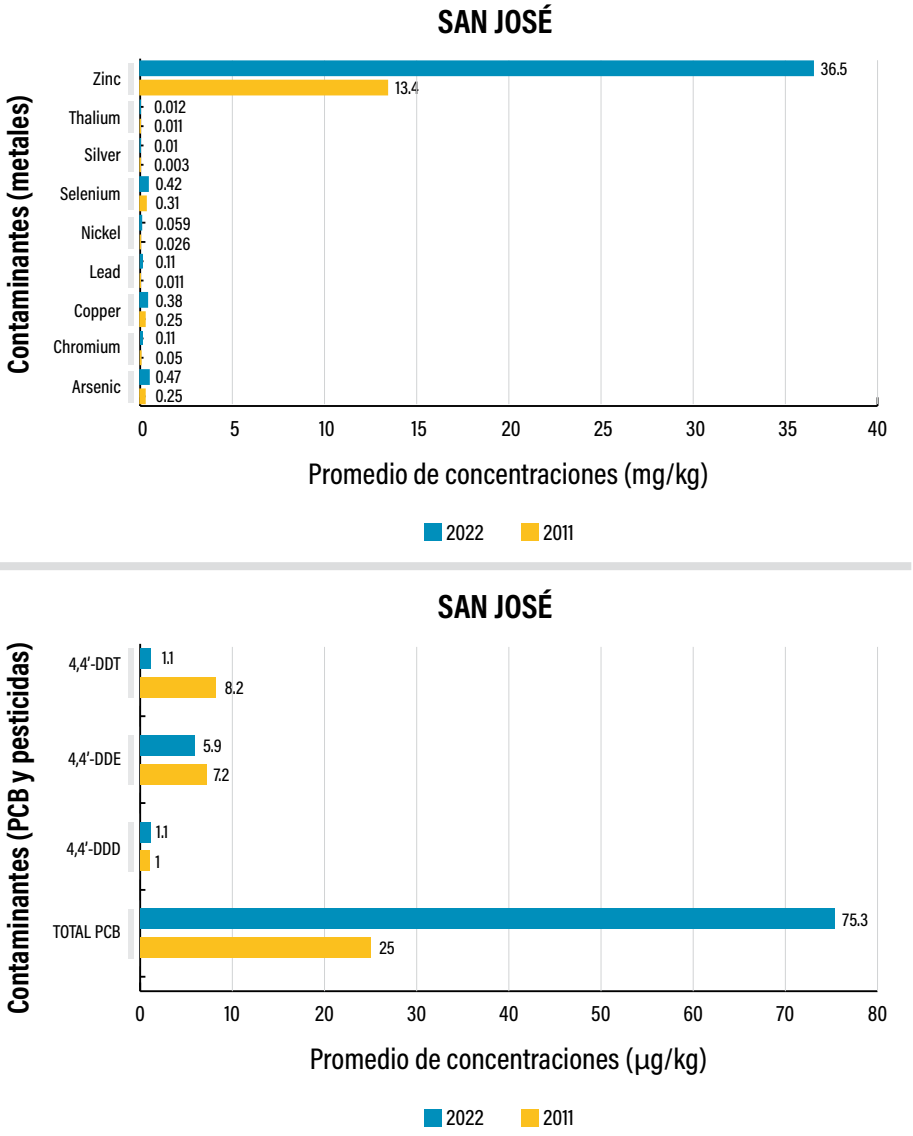


Figura 3. Comparación de las concentraciones de contaminantes entre los años 2011 y 2022 para la laguna San José.

mentaron en 50.3 µg/kg. En la laguna La Torrecilla (Figura 4), hubo un aumento significativo en el zinc (subió 32.6 mg/kg), mientras que los niveles de arsénico disminuyeron. Asimismo, en el Caño Martín Peña (Figura 5), el zinc aumentó en 25.2 mg/kg, pero los pesticidas como el 4,4′ DDE y el 4,4′ DDT disminuyeron ligeramente. Las siguientes figuras ofrecen una instantánea de cómo los contaminantes han cambiado con el tiempo en estas áreas.

¿Por qué deberíamos preocuparnos?

Esta investigación tiene importantes implicaciones tanto para el medioambiente como para la salud pública. Los peces como la mojarra son una fuente clave de alimento para muchas personas que viven alrededor del estuario. El aumento de los niveles de contaminantes en estos peces podría tener graves consecuencias sobre quienes los consumen.

Por ejemplo, los PCB y los metales pesados pueden acumularse en el cuerpo con el tiempo, lo que genera riesgos para la salud a largo plazo, especialmente en niños y embarazadas. Aunque la disminución de los niveles de pesticidas es una señal positiva, las crecientes concentraciones de metales pesados y PCB son motivo de preocupación.

El camino por seguir

Los resultados del estudio del 2022 sugieren que se necesita hacer más para proteger el estuario y a las personas que dependen de él. La contaminación por escorrentía urbana, aguas residuales sin tratar y actividades industriales continúa

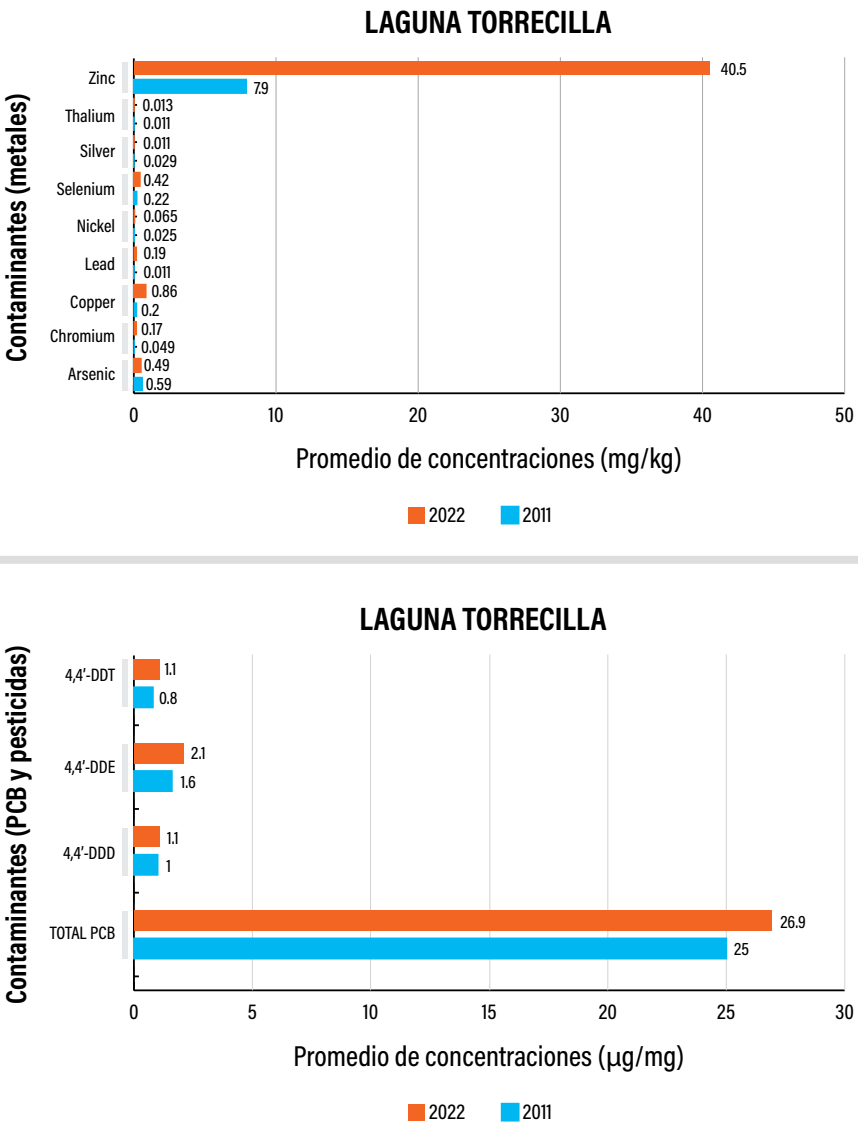
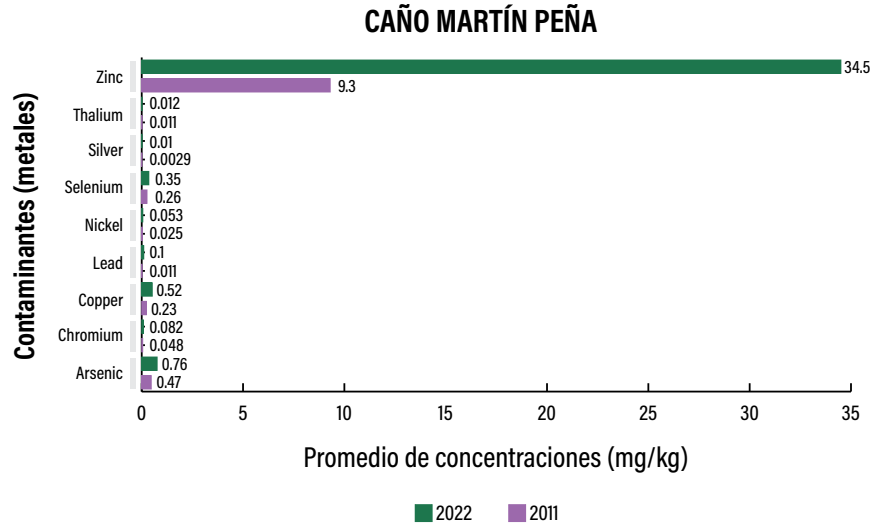


Figura 4. Comparación de las concentraciones de contaminantes entre los años 2011 y 2022 para la laguna La Torrecilla.



Una ciudadana científica de ESTUARIO analiza una muestra de la calidad del agua.



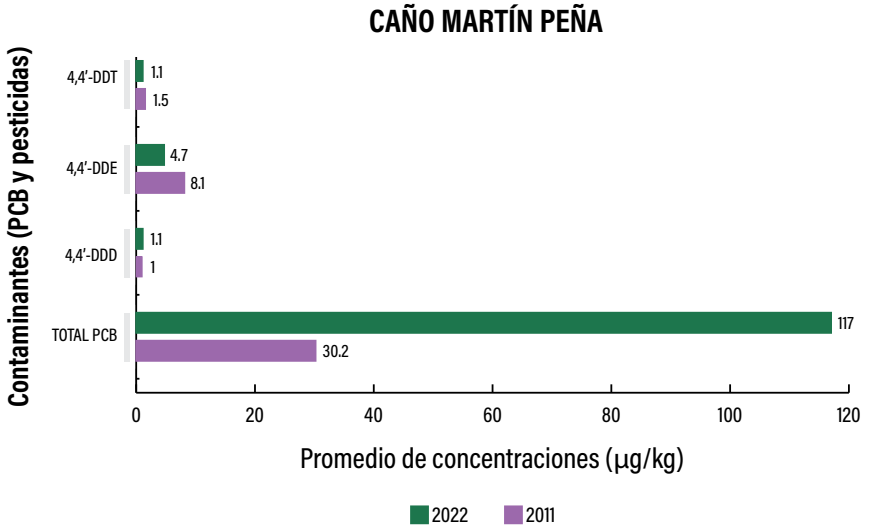


Figura 5. Comparación de las concentraciones de contaminantes entre los años 2011 y 2022 para el Caño Martín Peña.



El Caño Martín Peña mostró un aumento menor en los contaminates medidos en este estudio en comparación con los otros cuerpos de agua.

amenazando la salud del ecosistema. Los estudios futuros deberían centrarse en monitorear otros factores, como la contaminación de sedimentos, que pueden proporcionar pistas adicionales sobre cómo se están moviendo los contaminantes en el medioambiente.

También es crucial considerar pasos éticos y prácticos para abordar la contaminación. La participación y la educación de la comunidad jugarán un papel clave en la protección de este valioso recurso natural. Los responsables políticos deben tomar en serio los hallazgos de esta investigación, utilizándolos para implementar protecciones ambientales más fuertes.

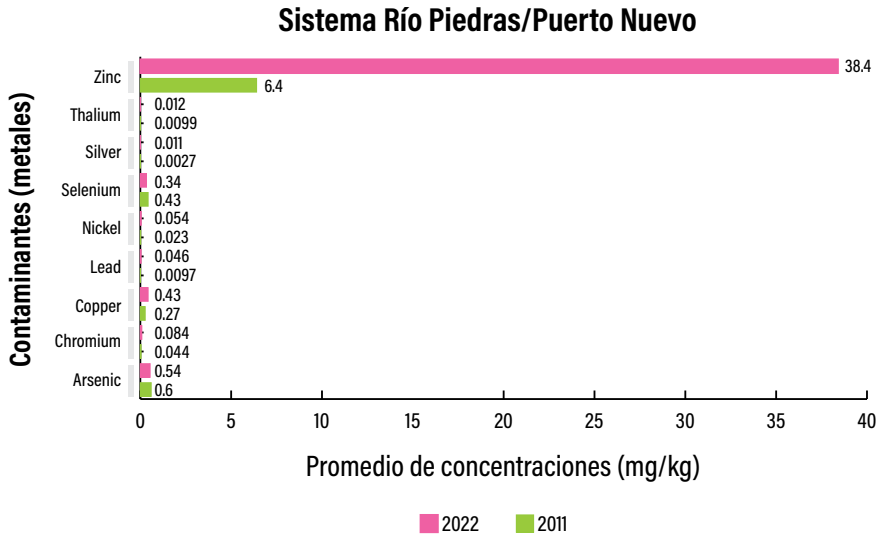
Conclusión

El Estuario de la Bahía de San Juan es un ecosistema vital que ha brindado sustento tanto a la vida silvestre como a los humanos durante generaciones. Sin embargo, los resultados de los estudios realizados en 2011 y en 2022 muestran que este ecosistema está bajo una presión creciente debido a las actividades humanas. Si bien se ha avanzado en la reducción de la contaminación por pesticidas, otros contaminantes como los metales pesados y los PCB están en aumento, poniendo en riesgo tanto al medioambiente como a la salud pública.

Es el momento de actuar. Continuar monitoreando el estuario, reduciendo la contaminación en su origen y trabajando juntos como comunidad garantizará que este recurso preciado esté protegido para las futuras generaciones.



Los resultados del estudio del 2022 sugieren que se necesita hacer más para proteger el estuario. En la foto, vista aérea de la Boca del Morro, donde la Bahía de San Juan se conecta con el océano Atlántico.



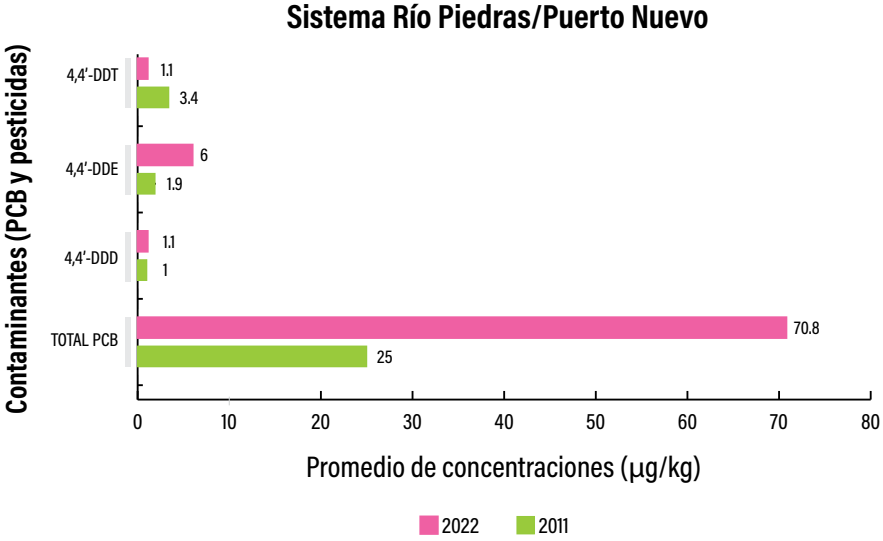


Figura 6. Comparación de las concentraciones de contaminantes entre los años 2011 y 2022 para el sistema Río Piedras (Estación Puerto Nuevo).

Monitoreo de indicadores de calidad del agua: Proyecto de monitoreo bacteriológico y notificación pública



Figura 1. Los voluntarios certificados como ciudadanos científicos son componente clave del proyecto de monitoreo bacteriológico.

Jorge F. Bauzá-Ortega
Director Científico, ESTUARIO
Rebecca Rivera
Coordinadora de Monitoreo de Calidad del Agua, ESTUARIO

Semanalmente, personal de ESTUARIO con voluntarios certificados colectan muestras del agua estuarina para determinar la presencia del grupo de bacterias fecales de nombre enterococos (nombre científico, *Enterococcus*). A base de los resultados, se generan notificaciones públicas con el fin de promover el uso recreativo saludable del ecosistema y ayudar a proteger la salud pública. La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos recomienda el uso de los *Enterococcus sp*. como indicador de calidad del agua en los ecosistemas marinos. Este grupo de bacterias se encuentra naturalmente en el intestino humano. No obstante, su presencia en los cuerpos de agua es indicador de aguas sanitarias sin tratar, con potencial de contener patógenos que podrían poner en riesgo la salud humana.

Las muestras tomadas se preparan y procesan mediante el método IDEXX's QuantiTray. Este método consiste en incubar la muestra de agua en un medio nutritivo selectivo. Después de 24 horas de incubación a 41oC, se cuentan las colonias positivas a enterococos y el resultado se presenta en la cantidad de colonias (CFU) presentes en 100 mililitros de muestra (Figura 1). Para determinar la calidad del agua comparamos estos resultados con el estándar de calidad del agua conocido como el *Beach Action Value* de 70 CFU/100 mililitros. Las muestras deben presentar valores por debajo del 70 CFU/100m para considerarse que el agua es apta para bañistas y para el contacto directo con las personas.

El esfuerzo de monitoreo y notificaciones públicas comenzó en el 2014, en el área de la Reserva Natural Estuarina de la Laguna del Condado (Reserva). Luego del paso del huracán María, se extendió a todo el litoral norte de la cuenca hidrográfica del Estuario de la Bahía de San Juan. Desde entonces, voluntarios dirigidos por un coordinador de ESTUARIO recolectan y analizan muestras de agua semanalmente para evaluar la presencia de bacterias fecales en cinco estaciones de alto uso recreativo en la Reserva (Figura 2). Las estaciones se ubican frente al parque Jaime



Figura 2. Las cinco estaciones de monitoreo de enterococos en la Reserva Natural Estuarina Laguna del Condado.

Benítez, la playita de la Baldorioty, playa del Condado, el parque San Gerónimo y la calle Aguadilla.

Tras el paso del huracán María en septiembre de 2017, ampliamos nuestros esfuerzos incorporando seis estaciones de monitoreo localizadas en playas del litoral norte de la cuenca hidrográfica del estuario (Figura 3). La acción se tomó a raíz de la emergencia sanitaria ocasionada por el colapso de la infraestructura sanitaria y pluvial luego del evento atmosférico. Las estaciones de playa se ubican frente a las calles Nairn, Serra y Cervantes, en Ocean Park; en Vacía Talega, la playa de Pine Grove y el balneario El Escambrón (Figura 3).



Figura 3. Las imágenes muestran las siete estaciones de monitoreo de enterococos localizadas en playas del litoral norte de la cuenca hidrográfica del Estuario de la Bahía de San Juan.



Figura 4. Publicación del sistema de aviso de resultados de los monitoreos de enterococos. Las estaciones que no cumplen con el *Beach Action Value* (70 CFU en 100 mililitros) se identifican con una bandera roja para indicar que el agua no es apta para contacto directo con las personas. Las que cumplen y son aptas para bañistas se identifican con una bandera verde. Para la Reserva Natural Estuarina Laguna del Condado se calcula la media geométrica de todas las estaciones y este valor se compara con el *Beach Action Value*.

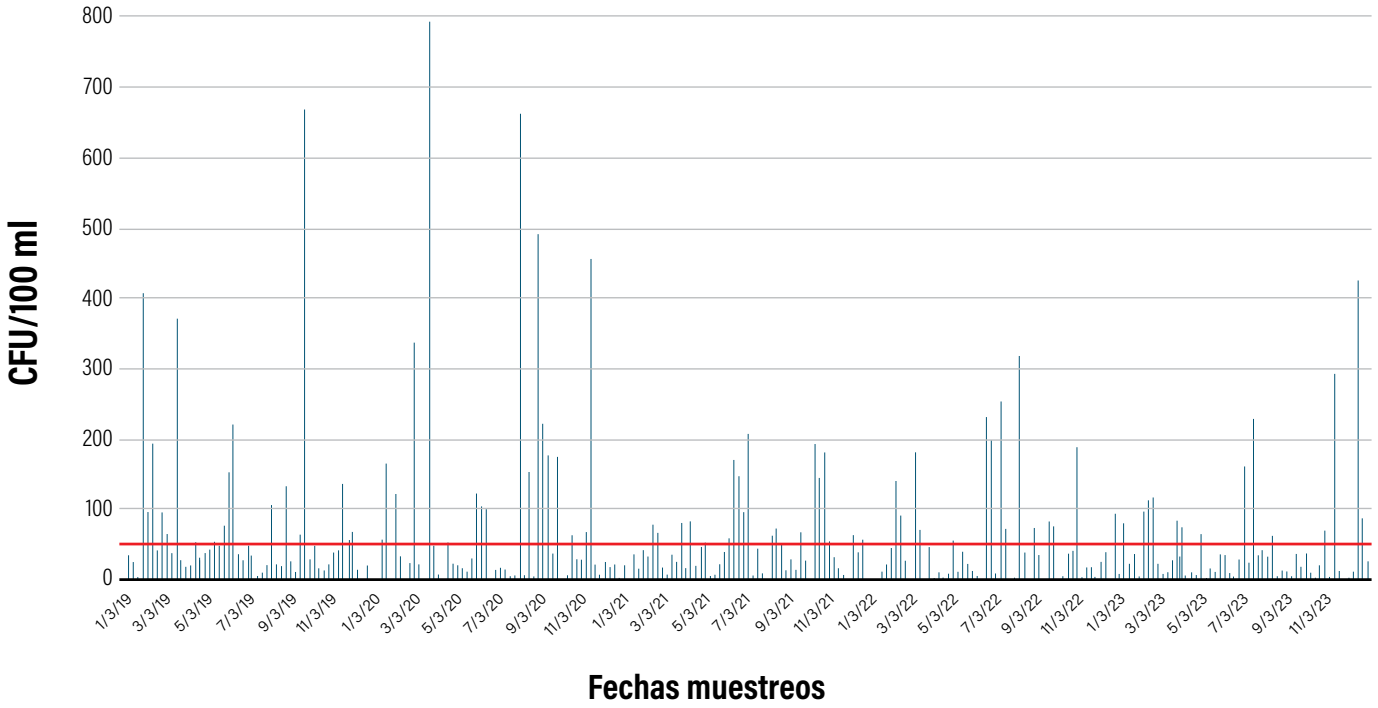


Figura 5. Conteos de enterococos (media geométrica) en la Reserva Natural Estuarina Laguna del Condado (250 eventos de muestreos). La línea horizontal en color rojo representa el Action Beach Value de 70 CFU/100 mililitros. Para este periodo de muestreo (2019-2023), el 70 % del tiempo la Laguna del Condado cumplió con este estándar y estuvo apta para bañistas.

Los resultados del análisis de las muestras se informan al público a través de las redes sociales de ESTUARIO, el portal web (estuario.org) y mediante un sistema de banderas que se izan en las inmediaciones de la Reserva (Figura 4). Cuando el cuerpo de agua excede el *Beach Action Value* se presenta una bandera de color rojo en la estación de medición. Cuando sí cumplen (resultados por debajo del *Beach Action Value*) se coloca una bandera de color verde. Para la Reserva se calcula la media geométrica de todas las estaciones y esta se compara con el *Beach Action Value*.

La Figura 5 presenta la media geométrica de los conteos de enterococos para el total de eventos (250 en total) en la Reserva. La línea horizontal en color rojo representa el *Beach Action Value* de 70 CFU/100 mililitros Para este periodo de muestreo (2019-2023), el 70 % del tiempo la Reserva cumplió con este estándar y estuvo apta para bañistas.



La Playita del Condado es una de las playas del litoral norte que se monitorea como parte del proyecto de monitoreo bacteriológico.



La Tabla 1 exhibe la frecuencia de cumplimiento por estación en la Laguna del Condado. La que menos cumplió con el *Beach Action Value* para el periodo de observación fue la Estación Calle Aguadilla (20 %) y, por el contrario, la que más cumplió fue la de la playa del Condado (95 %). Definitivamente, hay que explorar qué ocurre en la calle Aguadilla para determinar la fuente de estos enterococos, pues de existir descargas de aguas sanitarias, estas pasan desapercibidas a simple vista. Es decir, no son descargas sanitarias de aguas superficiales, por lo que existe la posibilidad de que fluyan a través de las aguas subterráneas.

Estación Laguna del Condado	Cantidad de eventos en cumplimiento de un total de 250	Porcentaje del tiempo en cumplimiento
Parque Jaime Benítez	168	67
Playita de la Baldorioty	194	78
Playa del Condado	238	95
Parque San Gerónimo	157	63
Calle Aguadilla	49	20

Tabla 1. Estaciones de muestreo en la Laguna del Condado y frecuencia de eventos en cumplimiento con el *Beach Action Value*, entre 2019 y 2023.

Estación	Cantidad de eventos en cumplimiento de un total 252	Porcentaje del tiempo en cumplimiento
Calle Nairn	198	79
Calle Serra	235	94
Calle Cervantes	54	22
Ocean Park	247	99
Pine Grove	244	98
Vacía Talega	235	94
Balneario El Escambrón	228	91

Tabla 2. Estaciones de muestreo en las playas del litoral norte del estuario y frecuencia de eventos en cumplimiento con el *Beach Action Value*, entre 2019 y 2023.

Con relación a las playas, observamos que solo la ubicada cerca de la calle Cervantes es la que menos cumple con el *Beach Action Value* (cumplió con este valor apenas 22 % del tiempo) dentro del periodo de estudio. En este punto ocurren consistentemente descargas de aguas sanitarias a través de una cuneta que forma parte del sistema de alcantarillado pluvial.

Estas observaciones nos permiten identificar los lugares con mayores problemas de contaminación para enfocar los esfuerzos y eliminar las fuentes de aguas sanitarias sin tratar.

Los voluntarios certificados como ciudadanos científicos colectan muestras del agua para determinar la presencia de enterococos.



ESTUARIO

Aguas no aptas para el uso recreativo: conoce los microorganismos implicados



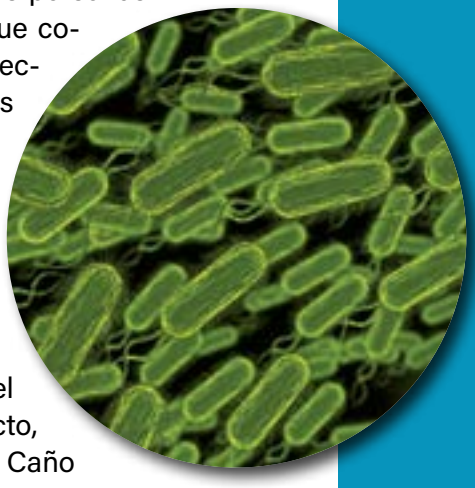
El Caño Martín Peña es escenario de un proyecto colaborativo para determinar la presencia de la bacteria E. coli en el cuerpo de agua, en alianza con estudiantes de la comunidad y la Universidad del Sagrado Corazón, entre otras entidades.

Noemí Soto Nieves
Ph.D., Catedrática Auxiliar
Escuela de Salud y Ciencias, Universidad del Sagrado Corazón

Los microorganismos están por todos lados, son parte de nuestro ambiente, los respiramos, los tocamos y convivimos con ellos. La noción de que son perjudiciales no es necesariamente cierta. Es todo lo contrario, nos permiten digerir alimentos, nos protegen de enfermedades y son esenciales para la vida en este planeta. Entonces, ¿cuándo la presencia de un microorganismo debe preocuparnos? ¿Cuáles son las cantidades aceptables que deben estar en el ambiente? En este escrito se discuten los microorganismos que se utilizan como indicadores de contaminación en los cuerpos de agua. Nos enfocaremos en las aguas del Estuario de la Bahía de San Juan (el estuario).

En Estados Unidos y Puerto Rico, la Agencia de Protección Ambiental (EPA, por las siglas en inglés) se encarga de proteger el medioambiente, los recursos naturales y la salud de los seres humanos. Una de sus funciones es prevenir y controlar la contaminación del agua mediante el desarrollo de estándares de calidad del agua. El estándar más común es determinar la presencia de heces fecales en el agua mediante la cuantificación de bacterias coliformes. Escherichia coli (E. coli) es el coliforme más común y, en condiciones normales, no es patogénica. Sin embargo, algunas especies podrían causar diarreas o infecciones en el tracto urinario en personas inmunocomprometidas. Dado que el E. coli no es exclusivo de las heces fecales, nuevos ensayos cuantifican la cantidad de enterococos.

Estas bacterias viven en los tractos gastrointestinales de los animales de sangre caliente y pueden representar una fuente más confiable de contaminación en las corrientes y ríos por heces fecales. La presencia de enterococos sugiere que podría haber presencia de microorganismos patógenos, virus y protozoarios. Estos microorganismos patógenos podrían causar enfermedades a nadadores u otras personas que usan las aguas para fines recreativos, o que comen pescados o mariscos crudos. Algunos efectos potenciales son enfermedades de la piel, los ojos, oídos o el sistema respiratorio.



La Universidad del Sagrado Corazón (USC) realiza desde su fundación vinculaciones comunitarias e investigaciones que apoyan la justicia ambiental y social de las comunidades aledañas. En el año 2000, la Profa. Mayra Rolón inició el Proyecto de Vinculación Comunitaria del curso de Microbiología. Como parte del proyecto, los estudiantes visitan las comunidades del Caño Martín Peña para dialogar con los vecinos y tomar muestras de agua para cuantificar e identificar coliformes fecales mediante experimentos en el laboratorio.

En la Figura 1 se muestran los datos de los niveles de coliformes fecales desde el año 2000 a 2020 de muestras de agua tomadas en el Caño Martín Peña, cerca de la calle Brasil o del sector Las Monjas. La cantidad de coliformes fecales se calculó utilizando el método de dilución en serie y vertido en placas. En la figura, el eje de X presenta los años, mientras en el eje de Y se presenta el valor logarítmico de unidades de coliformes fecales (CFU, por sus siglas en inglés) por cada 100 mL de agua.

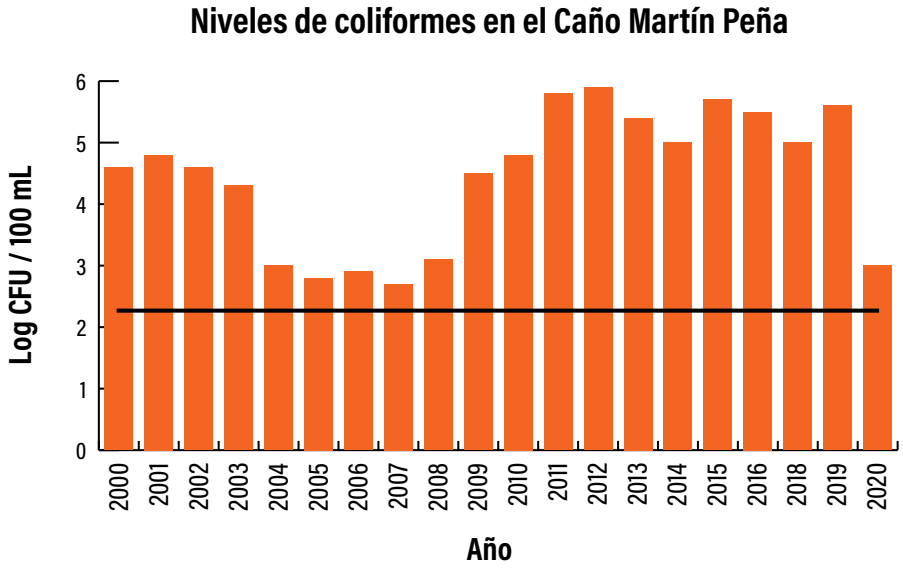


Figura 1. Niveles de coliformes fecales en el Caño Martín Peña. Muestras de agua del Caño tomadas en la calle Brasil o en el área de Las Monjas desde el año 2000 a 2020. Los datos son representativos de las muestras tomadas por los estudiantes una vez al año (no se tomaron datos del 2017 debido al huracán María). La línea horizontal denota el valor máximo (estándar) establecido por la EPA.



Figura 2. Estaciones de muestreo de agua. En el mapa se presentan 16 estaciones en el Estuario de la Bahía de San Juan. Las estaciones de color azul se toman de forma terrestre, mientras las de color rojo se toman desde un bote. Las muestras de los puntos LP1 y LT1 y CS2 se toman de ambas formas. Las abreviaturas de los puntos de muestreo son las siglas de los nombres de los cuerpos de agua. (Mapa: https://estuario.info/)

La línea horizontal representa el valor logarítmico de referencia establecido por la EPA como el nivel máximo de coliformes fecales que puede tener el agua para su uso recreacional (200 CFU/100 mL). Los resultados muestran que la cantidad de coliformes fecales excede las cantidades máximas establecidas por la EPA desde el año 2000 hasta 2020. Parte de los resultados se compartieron con las comunidades del Caño y se presentaron en 2012 en el documental Agua Mala.

Bajo mi supervisión se ha continuado el trabajo comunitario del curso de Microbiología desde el año 2000, mediante acuerdos colaborativos con el Proyecto ENLACE, la EPA y un memorando de entendimiento (MOU, por las siglas en inglés) con los Laboratorios de Investigación Ambiental del Departamento de Recursos Naturales y Ambientales de Puerto Rico (LIAPR). Esto ha permitido utilizar las instalaciones del LIAPR y adquirir préstamos de equipos que permitan incorporar ensayos aprobados por la EPA, como el Enterolert y Colilert, para contabilizar los enterococos y coliformes fecales.

Desde 2021 a 2023, los resultados obtenidos (datos no incluidos) muestran cantidades de enterococos y coliformes fecales en el agua del Caño Martín Peña que exceden los niveles establecidos por la EPA. Los acuerdos mencionados han hecho posible que del proyecto de trabajo comunitario surja un nuevo enfoque de investigación, que permite incorporar más estaciones de muestreo y tomar muestras con mayor frecuencia.

Las estaciones de muestreo actuales en los cuerpos de agua del Estuario de la Bahía de San Juan se seleccionaron estratégicamente por mis colaboradores del *Office of Research and Development* (ORD) de la EPA. En la Figura 2 se muestran las 16 estaciones de muestreo. Si miramos la figura de izquierda a derecha, comenzamos con tres puntos de muestreo en la Bahía de San Juan (BSJ), cuatro estaciones en el Caño Martín Peña (CMP), tres estaciones en la laguna San José (LSJ), una estación en la laguna Los Corozos (LLC), dos en el canal Suárez (CS), dos en la laguna La Torrecilla (LT) y una en la laguna de Piñones (LP).

La metodología consiste en tomar muestras de agua una vez al mes mediante transportación marítima y dos veces al mes por la vía terrestre. La Figura 3 pretende enmarcar el trabajo colaborativo realizado durante la investigación de campo (a – d), asistencia de residentes del Caño (d) y de los trabajos en los laboratorios de la USC (e) y del LIAPR (f). Los parámetros fisicoquímicos se toman durante el muestreo, utilizando equipos como el YSI. Estos tienen sensores para medir el oxígeno disuelto, la temperatura y conductividad, entre otros (datos no incluidos en este escrito). Las muestras de agua se procesan en el laboratorio para determinar la cantidad de E. coli, coliformes fecales y enterococos utilizando el sistema de "IDEXX quanti-tray".

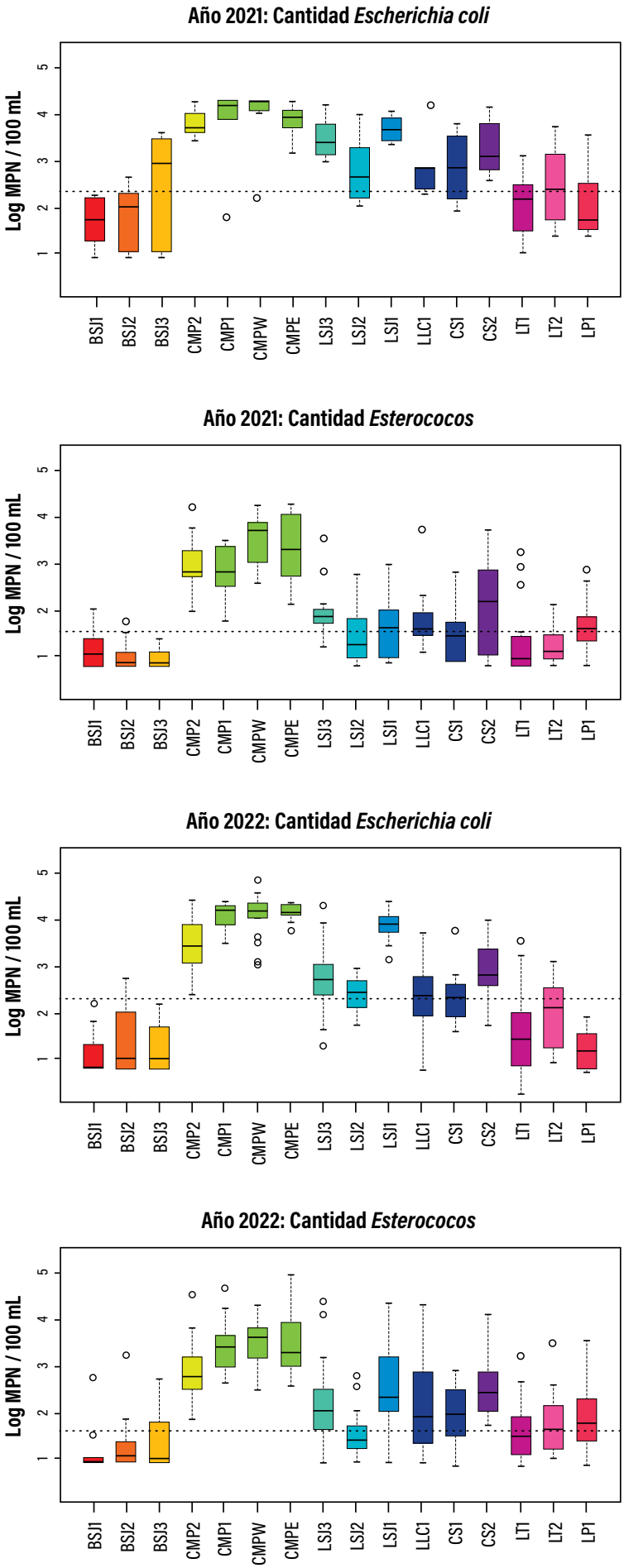
Este ensayo calcula el número más probable (MPN, siglas en inglés) sobre 100 mL de agua. El ensayo utiliza medios selectivos y diferenciales para promover el crecimiento de un microorganismo e inhibir el crecimiento de otros, lo que permite obtener resultados precisos. La incubación se realiza a 41 °C por 24 horas para el ensayo de enterococos y 44.5 °C para E. coli y coliformes fecales. Luego se contabilizan las fosas positivas y se calcula la cantidad de bacterias utilizando los valores provistos por el suplidor del ensayo.

En la Figura 4 se muestran diagramas de caja con los resultados obtenidos para 2021 y 2022 en los ensayos de laboratorio utilizados para determinar la cantidad de E. coli y enterococos. En el eje de la X se identifican las 16 estaciones especificadas en la Figura 2, mientras el eje de la Y muestra el valor logarítmico del MPN por cada 100 mL. La línea entrecortada que cruza la gráfica indica el valor estándar establecido por la EPA, 35 CFU/100mL para enterococos y 200 CFU/100 mL para *E. coli*. Los diagramas de caja proveen mucha información, pero para propósitos de esta discusión nos enfocaremos en la mediana, que corresponde a la línea negra que está dentro de la caja. Todas aquellas estaciones cuya mediana esté por encima de la línea horizontal indica que la mayoría de las muestras de agua tomadas en esa estación excedieron la cantidad de enterococos o de E. coli establecida por la EPA al momento en que se tomó la muestra.

En el caso de E. coli, para 2021, solo cuatro estaciones (BSJ1, BSJ2, LT1 y LP1) estuvieron dentro de los parámetros establecidos



Figura 3. Muestra representativa de los trabajos realizados en el campo (a-d) y en los laboratorios (e-f) del LIAPR y de la USC.



por la EPA, mientras para 2022 se repiten las mismas estaciones y se añaden dos, BSJ3 y LT2. En el caso de enterococos, los patrones son similares: siete estaciones estuvieron dentro de los estándares en 2021 (BSJ1, BSJ2, BSJ3, LSJ2, CS1, LT1 y LT2), mientras, en 2022, el comportamiento fue similar, a excepción de CS1 y LT2, que excedieron los estándares.

Estos datos son preocupantes dado que más de la mitad de las estaciones exceden los parámetros máximos de *E. coli* y enterococos establecidos por la EPA del agua apta para su uso recreacional. Además, particularmente en las estaciones del Caño Martín Peña (CMP2, CMP1, CMPW y CMPE), las gráficas muestran valores que exceden sustancialmente los estándares de la EPA.

Los trabajos han continuado durante los años 2023 y 2024, pero este análisis se concentrará en cinco estaciones terrestres: CMP2, CMPE, CMPW, LSJ3 y CS2. En la Figura 5 se muestran diagramas de caja con los resultados de *E. coli*, enterococos y coliformes fecales para los años 2023 y 2024. Los nombres de las estaciones están representados en el eje de X y la cantidad de E. coli, enterococos y coliformes fecales se muestran en el eje de la Y. Prácticamente se repite lo observado en 2021 y 2022, donde la cantidad excede los estándares establecidos por la EPA. Si comparamos las medianas por estación entre 2023 y 2024, no hay una diferencia marcada, a excepción de la estación CMP2 que aparentemente tuvo una disminución en las cantidades de enterococos.

Figura 4. Cantidades de *E. coli* y enterococos en el 2021 y 2022. Los resultados de las muestras tomadas en el 2021 y el 2022 se graficaron en un diagrama de caja. En el eje de la Y está el valor logarítmico del número más probable (MPN) / 100 mL, mientras en el eje de la X se especifican las estaciones. La cantidad de muestras anuales en los ensayos del 2021 fue entre 8 a 16, mientras en el 2022 fue entre 11 a 25. (Datos no publicados de la USC y la EPA).

El análisis e interpretación de estos resultados genera más preguntas que respuestas. Por ejemplo: los trabajos que se han realizado en el Caño Martín Peña previo al dragado y durante la primera fase del dragado, ¿han contribuido a disminuir la cantidad de enterococos y coliformes fecales en el Caño? ¿Cuáles son los siguientes pasos? ¿Cómo usted como residente aledaño a los cuerpos de agua del Estuario de la Bahía de San Juan puede aportar soluciones? La realidad es que no existen respuestas sencillas para situaciones complejas. Las bacterias enterococos, al igual que los coliformes fecales, pueden proceder de plantas de tratamiento de aguas residuales, de pozos sépticos con escapes, descargas ilícitas, animales domésticos y vida salvaje, entre otras.

La interpretación de estos resultados requiere un análisis más específico, extrapolando los resultados a eventos que hayan ocurrido en esas áreas. Por ejemplo, un evento de lluvia podría alterar los resultados, dado que las escorrentías podrían estar trayendo agua contaminada o excrementos al cuerpo de agua. Los colegas de la EPA están realizando ensayos de *Microbial Source Tracking* (MST) que permitirán identificar la fuente de heces fecales en el agua. Además, estudian los nutrientes en el agua que podrían afectar de forma directa a los microorganismos que viven en el agua. Asimismo, datos preliminares muestran fluctuaciones en los niveles de oxígeno en el agua sin fluctuaciones de temperatura que lo justifiquen. Esto sugiere la presencia de otros microorganismos en el agua que están sin identificar.

No podemos perder de perspectiva que los microorganismos están por todas partes y que los indicadores estudiados sugieren que el agua podría tener agentes patogénicos perjudiciales para nuestra salud. En el agua podríamos tener la presencia de virus o quistes de *Giardia intestinalis* y oocitos de *Cryptosporidium*, que causan enfermedades gastrointestinales,

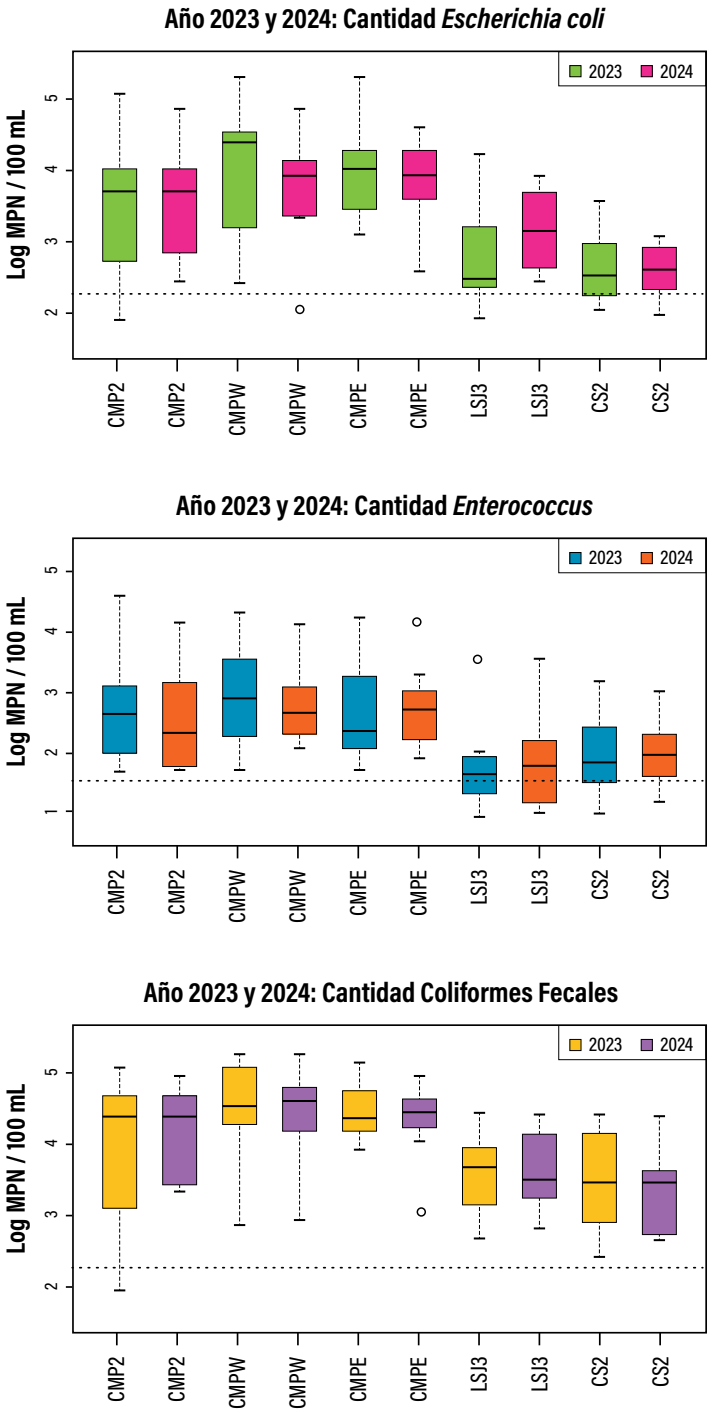


Figura 5. Cantidades de *E. coli*, enterococos y coliformes fecales en los años 2023 y 2024. Esencialmente, el mismo tipo de gráfica descrita en la Figura 4, pero para el 2023 y el 2024. La cantidad de muestras anuales en los ensayos del 2023 fue entre 10 a 14, mientras en el 2024 están documentados mensualmente hasta el mes de septiembre. (Datos no publicados de la USC y la EPA).

o de otros microorganismos que puedan causar infecciones de la piel y de los oídos a nadadores.

Las cantidades exorbitantes de *E. coli*, enterococos y heces fecales en el agua de varias zonas en el estuario, particularmente del Caño, nos sugieren lo que ya es conocido: que tenemos descargas ilícitas de aguas residuales. Entonces, ¿el dragado reducirá la cantidad de enterococos y *E. coli* en las aguas? El dragado es solo una fase del proyecto de restauración del Caño, así que es pieza clave, pero por sí solo no resolverá el problema. Es necesaria la conexión de las aguas residuales de las residencias al sistema de alcantarillado y la recolecta de aguas pluviales para mitigar el problema. Por otro lado, debe existir un compromiso ciudadano de velar y conservar los cuerpos de agua.

Los esfuerzos de las comunidades aledañas a los cuerpos de agua del estuario y otras entidades, como el Proyecto ENLACE y ESTUARIO, han sido y seguirán siendo una pieza clave para la concienciación ciudadana y creación de planes estratégicos que contribuyan a la restauración del ecosistema.

Esta investigación y otras publicadas indican la necesidad de dicha restauración y la continuidad de los proyectos de investigación. La USC y sus colaboradores (EPA y LIAPR) están comprometidos con la protección de las comunidades vulnerables y la



continuidad de los trabajos aquí presentados. En este preámbulo histórico de la restauración del Caño Martín Peña, es vital que las investigaciones y las vinculaciones comunitarias continúen. Es la manera más eficaz de cerciorarse de que se protegen a nuestros vecinos más vulnerables.

Queda mucho por hacer y cada granito de arena que se aporte nos acercará más a la meta.









El Caño Martín Peña es un importante sistema de agua urbano que atraviesa parte del área metropolitana de San Juan, por lo que está expuesto a presiones derivadas de la actividad humana que contribuyen a su contaminación.



OBSERVACIÓN DE RECURSOS VIVIENTES COMO INDICADORES AMBIENTALES

Los recursos vivientes y el Índice Ambiental del Estuario



Figura 1. Estaciones de monitoreo de peces en la Reserva Natural Estuarina Laguna del Condado y en la playa El Escambrón.

Daritzel Cintrón Nieves
Coordinadora, Estudios de Campo e Indicadores Ambientales, ESTUARIO
Jorge Bauzá-Ortega
Director Científico, ESTUARIO

Los recursos vivientes son todos los organismos vivos que se encuentren presentes en un ambiente en particular. Esto incluye aves, peces, plantas, insectos y microrganismos, entre otros. Estudiar las poblaciones de estos organismos en términos de su abundancia (cantidad total) y riqueza (diversidad) nos permite conocer su estado y el de su hábitat. Es decir, una riqueza alta de especies indica que el medioambiente donde se encuentran les provee todos elementos que necesitan para existir. Un ecosistema saludable promueve una gran diversidad de especies. Asimismo, la abundancia y riqueza de una especie se puede utilizar como indicador de la condición ambiental. ESTUARIO monitorea y estudia los recursos vivientes desde los inicios del programa.

ESTUARIO comenzó a monitorear ciertas especies con el objetivo de establecer un programa de indicadores ambientales. Los indicadores ambientales seleccionados son especies y comunidades acuáticas, es decir, que viven sumergidas y que dependen directamente de la calidad del agua. Son los peces, las hierbas marinas, los corales y macroinvertebrados bentónico. Durante el monitoreo de los indicadores ambientales se recopilan datos de la calidad del agua. El objetivo es lograr calcular un índice, llamado el Índice Ambiental del Estuario, que integra la riqueza de peces, macroinvertebrados bentónico, el porcentaje de cobertura de hierbas marinas con los datos de la calidad del agua.

Numéricamente, el Índice Ambiental del Estuario es un número que va de 0 a 1, donde 0 es un resultado pobre y el 1 es el máximo en salud ecológica a base de los indicadores ambientales monitoreados. El propósito del Índice Ambiental del Estuario es que nos sirva como herramienta para describir la condición actual y los cambios de las condiciones ecológicas a través del tiempo. A su vez, que nos sirva como herramienta de educación y comunicación en una forma fácil de entender (de 0 a 1). Finalmente, el Índice Ambiental del Estuario nos ayuda a evaluar si los esfuerzos de restauración y mejoramiento ambiental, según se describen en las acciones del Plan del Estuario[1], han sido efectivos o si, por el contrario, hay que modificarlos.



Peces conocidos como cirujanos o médicos (*Acanthurus bahianus*) observados en la Reserva Natural Estuarina Laguna del Condado.

Los indicadores

Los monitoreos de peces se realizaron en tres puntos de la Reserva Natural Estuarina Laguna del Condado (La Reserva) y en un punto en la playa El Escambrón (Figura 1). La Reserva se caracteriza por tener una alta riqueza de especies. Se han documentado sobre 150 especies de peces, aunque no todas se observaron durante el periodo de estudio (2023). Los monitoreos consistieron en contar la cantidad de especies en tres transectos lineales frente a la playa del Condado y la playa El Escambrón (Tabla 1 a la Tabla 4).

1 Plan Integral de Manejo y Conservación del Estuario de la Bahía de San Juan, también conocido por sus siglas en inglés CCMP.



Figura 2. Zona de monitoreo de hierbas marinas en la Reserva Natural Estuarina Laguna del Condado.



Figura 3. Monitoreo de hierbas marinas para calcular el porcentaje de cobertura utilizando una cuadrícula de un metro cuadrado.

El monitoreo de hierbas marinas en la Reserva Natural Estuarina Laguna del Condado (Figura 2) consistió en calcular el porcentaje de cobertura, principalmente de la hierba de tortuga (*Thalassia testudinum*), la hierba de manatí (Syringodium filiforme) y la hierba paleta de remo (*Halophila decipiens*), dentro de un cuadrado de un metro por un metro. Para estos efectos se establecieron tres transectos lineales de 20 metros de longitud en la Reserva. Cada transecto contiene cinco cuadrados de un metro por un metro colocados a intervalos de cinco metros (cinco por transecto, Figura 3). Los porcentajes de coberturas de las hierbas marinas y otros sustratos bentónico se ilustran en la Figura 4.

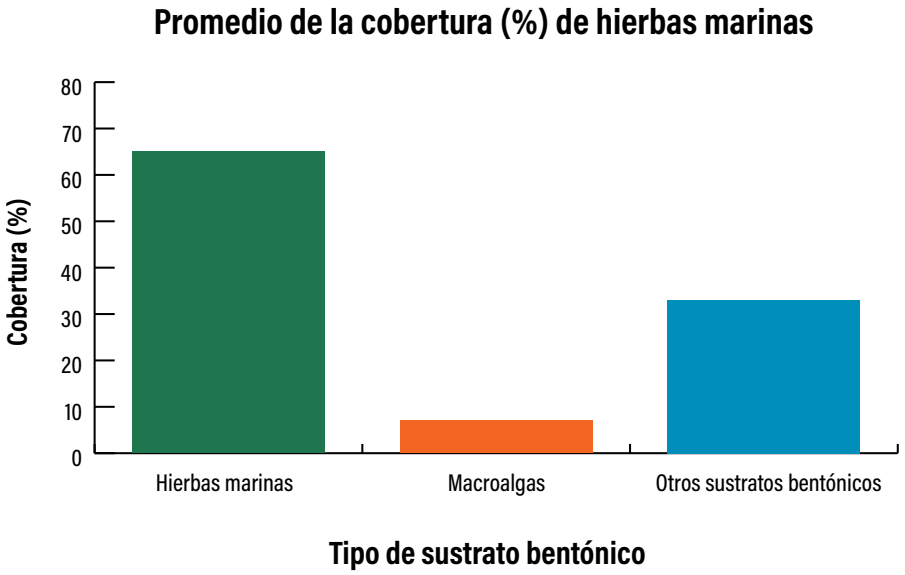


Figura 4. Porcentaje de cobertura de hierbas marinas y otros sustratos bentónicos en la Reserva Natural Estuarina Laguna del Condado.

Los macroinvertebrados bentónico son criaturas muy pequeñas que habitan en los fondos de cuerpos de agua dulce, pero que se pueden identificar visualmente sin necesidad de un microscopio. Existe una gama amplia de criaturas que se pueden clasificar como macroinvertebrados. Lo que las une como grupo es su tamaño pequeño y que viven en el lecho acuático (Figura 5).

Los cuerpos de agua dulce con buena calidad de agua y sedimentos se caracterizan por tener una alta biodiversidad de especies de macroinvertebrados. A estas especies se les considera excelentes indicadores ambientales, pues son sensibles a los cambios físicos y químicos en su hábitat. Además, no pueden escapar fácilmente de la contaminación, como pueden hacerlo algunos peces. Son fáciles de recolectar y el equipo utilizado es simple y económico. El río Piedras tiene una rica diversidad de macroinvertebrados bentónico (Figura 6).

Figura 5. Macroinvertebrados bentónicos encontrados en el río Piedras.









Figura 6. Ubicación geográfica y estación de estudios de campo en el río Piedras (RP) para determinar la diversidad de macroinvertebrados bentónicos.

Grupos	Nombre común/científico	Número de individuos	Rango (cm)
1	Damisela oscura (*Stegastes adustus*)	20	2.5 - 12.5 cm
2	Sargento (*Abudefduf saxatilis*)	11	2.5 - 7.5 cm
3	Mariposa cuatro ojos (*Chaetodon capistratus*)	3	5-7.5 cm
4	Damisela (*Stegastes leucostictus*)	1	5-7.5 cm
5	Pargo amarillo (*Lutjanus apodus*)	1	17.5-20 cm
6	Blue Tang (*Acanthurus coeruleus*)	1	2.5-5 cm
7	Condenado (*Haemulon flaveolineatum*)	20	5-10 cm
8	Ronco amarillo (*Haemulon sciurus*)	15	5-10 cm
9	Agujón (*Albennes hians*)	1	25-30 cm
10	Balajú (*Hemiramphus brasiliensis*)	1	22.5-25 cm
11	Lábrido (*Halichoeres bivittatus*)	2	15-17.5 cm
12	Cabezón azul (*Thalassoma bifasciatum*)	27	5-12.5 cm

Tabla 1. Riqueza de peces y cantidad de individuos por especie en la estación CL 1, en la Reserva Natural Estuarina Laguna del Condado.

Grupos	Nombre común/científico	Número de individuos	Rango (cm)
1	Damisela oscura (*Stegastes adustus*)	6	7.5-10 cm
2	Sargento (*Abudefduf saxatilis*)	33	2.5-10cm
3	Damisela (*Abudefduf taurus*)	1	12.5-15cm
4	Pargo amarillo (*Lutjanus apodus*)	10	7.5-22.5 cm
5	Barracuda (*Sphyraena barracuda*)	1	25-30 cm
6	Condenado (*Haemulon flaveolineatum*)	8	7.5-20 cm
7	Pargo prieto (*Lutjanus griseus*)	2	17.5-20 cm
8	Ronco amarillo (*Haemulon sciurus*)	2	12.5-17.5 cm
9	Mojarra (*Gerres cinereus*)	1	12.5-15cm
10	Pez león (*Pterois volitans*)	1	15-17.5 cm
11	Pez ángel (*Pomacanthus paru*)	3	15-20 cm
12	Chopa (*Kyphosus sectatrix*)	31	10-25 cm
13	Isabelita (*Holacanthus ciliaris*)	1	15-17.5 cm
14	Morena (*Gymnothorax funebris*)	1	+90 cm
15	Lábrido (*Halichoeres bivittatus*)	9	7.5-12.5 cm
16	Médico (*Acanthurus bahianus*)	11	12.5-17.5 cm

Tabla 2. Riqueza de peces y cantidad de individuos por especie en la estación CL 2, en la Reserva Natural Estuarina Laguna del Condado.

Grupos	Nombre común/científico	Número de individuos	Rango (cm)
1	Damisela (*Stegastes planiforns*)	3	5-7.5 cm
2	Damisela oscura (*Stegastes adustus*)	2	5-7.5 cm
3	Sargento (*Abudefduf saxatilis*)	17	5-10 cm
4	Pargo amarillo (*Lutjanus apodus*)	9	5-20 cm
5	Barracuda (*Sphyraena barracuda*)	3	5-35 cm
6	Condenado (*Haemulon flaveolineatum*)	54	5-10 cm
7	Canario (*Anisotremus virginicus*)	4	7.5-12.5 cm
8	Pargo prieto (*Lutjanus griseus*)	2	15-20 cm
9	Cojinúa (*Carangoides ruber*)	3	12.5-15 cm
10	Ronco amarillo (*Haemulon sciurus*)	2	17.5-20cm
11	Cabezón (*Atherinomorus stipess*)	100	2.5-5 cm
12	Mojarra (*Gerres cinereus*)	5	5-7.5 cm
13	Pez león (*Pterois volitans*)	1	12.5-15 cm
14	Guanábano (*Diodon hystrix*)	1	15-17cm
15	Pez ángel (*Pomacanthus paru*)	4	10-15 cm
16	Chopa (*Kyphosus sectatrix*)	2	15-17.5 cm

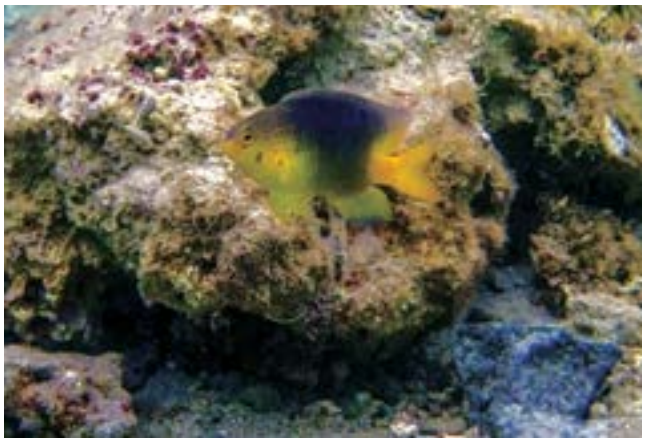
Tabla 3. Riqueza de peces y cantidad de individuos por especie en la estación CL 3, en la Reserva Natural Estuarina Laguna del Condado.

Grupos	Nombre común/científico	Número de individuos	Rango (cm)
1	Blue Tang (Acanthurus coeruleus)	8	2.5-17.5 cm
2	Sargento (Abudefduf saxatilis)	5	5-7.5 cm
3	Mariposa cuatro ojos (Chaetodon capistratus)	2	2.5-5 cm
4	Damisela colirrubia (Microspathodon chrysurus)	1	2.5-5 cm
5	Condenado (Haemulon flaveolineatum)	50	5-7.5 cm
6	Pargo amarillo (Lutjanus apodus)	1	7.5-10 cm
7	Cabezón azul (Thalassoma bifasciatum)	2	7.5-10 cm
8	Escorpión (Scorpaena plumieri)	1	12.5-15 cm
9	Pez ángel (Pomacanthus paru)	1	2.5-5 cm

Tabla 4. Riqueza de peces y cantidad de individuos por especie en la estación (PLO) en la playa El Escambrón.

Los datos de oxígeno disuelto se midieron en las mismas estaciones (Tabla 7) y al mismo tiempo que se realizaban las observaciones de los indicadores ambientales antes descritos. Para las lecturas del oxígeno disuelto se utilizó un sensor multiparamétrico modelo YSI EXO1.

Cabe señalar que la recolección de los datos estuvo a cargo de ciudadanos científicos previamente capacitados y certificados bajo el programa de Certificación de Ciudadanos Científicos (CCC) de ESTUARIO (ver el artículo Científicos somos todos: El rol de ESTUARIO en la diseminación, aplicación y accesibilidad de conocimientos científicos, en el capítulo VI, pág. 184). Los datos fueron recopilados durante el mes de septiembre de 2023.



Damisela (*Stegastes planiforns*) observada en la playa El Escambrón.

El análisis

El primer paso es obtener los datos de campo para cada uno de los indicadores, según descrito. Luego, los datos se procesan utilizando una técnica de normalización mediante la cual las observaciones de campo se transforman en una escala numérica que va de 0 a 1 (Ecuación 1). Por ejemplo, los datos de riqueza de especies de peces no se pueden comparar directamente con los datos sobre la concentración de oxígeno disuelto, pues todas estas observaciones tienen unidades de medida distintas. La normalización permite unificar las observaciones en un número a la misma escala y sin unidad, pero que refleja la condición del indicador ambiental. El rango después de la normalización va de 0 a 1, donde 0 es pobre condición ambiental y a medida que el número se acerca a 1 es mucho mejor. La Tabla 5, Tabla 6, Tabla 7 y Tabla 8 muestran los valores normalizados para los indicadores ambientales seleccionados en el cálculo del Índice Ambiental del Estuario.

Ecuación 1: Fórmula para normalización de datos:

$$X' = (X - X_{min}) \div (X_{max} - X_{min})$$

Donde X′ es el valor normalizado
X = El dato recopilado
X_{min} = Valor mínimo de la serie
X_{max} = Valor máximo de la serie



Al *blue tang* (*Acanthurus coeruleus*) se le conoce también como navajón azul. Esta especie que habita en aguas estuarinas es de color amarillo durante su etapa juvenil.

Estaciones	Riqueza	Norma
CL1	12	0.42
CL2	16	1.0
CL3	16	1.0
PLO	9	0.0
Promedio		0.60

Table 5. Los datos (Riqueza) y valores normalizados (Norma) para las observaciones de peces en la Reserva Natural Estuarina Laguna del Condado (Estaciones CL1, CL2 y CL3) y playa El Escambrón (PLO).

Transectos	Cobertura Hierbas Marinas (%)	Norma
1	61	0
2	71	1
3	61	0
Promedio		0.33

Table 6. Los datos (Cobertura) y valores normalizados (Norma) para las observaciones de hierbas marinas en la Reserva Natural Estuarina Laguna del Condado.

Estación	Ecosistema	Oxígeno disuelto mg/L	Norma
CL1 (Peces)	Marino	7.15	1.01
CL1 (Hierbas)	Marino	7.15	1.01
CL2	Estuarino	7.30	1.11
CL3	Estuarino	6.33	0.49
PLO	Marino	5.55	0.00
RP	Acuático	6.34	0.50
Promedio			0.69

Tabla 7. Concentración (mg/L) de oxígeno disuelto y datos normalizados de las diferentes estaciones del estudio. CL1, CL2 y CL3 en la Reserva Natural Estuarina Laguna del Condado, PLO en playa El Escambrón y RP en el río Piedras.

La Tabla 8 muestra la riqueza de especies y datos normalizados del censo de macroinvertebrados en el río Piedras, donde los marcadores amarillos indican «Tolerante a la contaminación», mientras que los rojos indican «Sensible a la contaminación».

Finalmente, estos valores normalizados se promedian y se obtiene el Índice Ecológico del Estuario (Ecuación 2 y Tabla 9).

Ecuación 2: El Índice Ambiental del Estuario se calcula de la siguiente forma:

$$IAE = \frac{(NP + NHM + NOD + NMB)}{Z}$$

Índice Ambiental del Estuario (IAE) es igual a la suma del promedio normalizado peces (NP), promedio normalizado hierbas marinas (NHM), promedio normalizado de oxígeno disuelto (NOD) y promedio normalizado macroinvertebrados bentónico (NMB) dividido entre el total de indicadores ambientales Z (Tabla 9).

El Índice Ambiental del Estuario calculado con las observaciones antes descritas para el periodo de estudios (2023) es de 0.47. Actualmente ESTUARIO realiza viajes de campo cada tres meses para obtener los datos según mencionado y continuar calculando el Índice Ambiental del Estuario. El objetivo es compararlos y analizar los cambios a través del tiempo. Un aspecto importante para considerar es que los índices tienden a estandarizar los datos de campo y de esta forma reducen o, más bien, eliminan la variabilidad inherente y existente en estos sistemas y en sus poblaciones ecológicas. Al eliminar esta variabilidad se corre el riesgo de perder información valiosa e importante para entender la dinámica real y compleja de los ecosistemas.

Orden	Riqueza	Norma
Decapoda	1	0
Mollusca	3	0.15
Hydrachnidia	6	0.38
Oligochaeta	1	0
Ephemeroptera	14	1
Odonata	2	0.07
Diptera	2	0.07
Coleoptera	4	0.23
Promedio		0.24

Tabla 8. Riqueza de especies y datos normalizados del censo de macroinvertebrados en el río Piedras.

Indicador	Valor promedio normalizado
Riqueza de peces (NP)	0.60
Cobertura de hierbas marinas (NHM)	0.33
Oxígeno disuelto (NOD)	0.69
Macroinvertebrados bentónico (NMB)	0.24
Índice Ambiental del Estuario	0.47

Tabla 9. Valores normalizados por indicador utilizado para calcular el Índice Ambiental del Estuario.



El ronco condenado (*Haemulon flaveolineatum*), conocido también como roncador francés, es otra de las especies observadas en las aguas estuarinas.

Censos de aves en la cuenca hidrográfica del Estuario de la Bahía de San Juan (2017-2024)



La cuenca del Estuario de la Bahía de San Juan alberga una gran diversidad de aves residentes y migratorias, desde las montañas hasta la costa. Entre ellas destaca la gallareta de pico rojo (*Gallinula galata*), también conocida como gallareta común —la especie en la foto—, que anida en estos ecosistemas.

Coral Avilés Santiago
Eliezer Nieves Rodríguez
Educador ambiental, geógrafo y profesor de la Universidad de Puerto Rico

Las aves son un componente esencial de los ecosistemas porque desempeñan funciones indispensables para su mantenimiento y regeneración, como por ejemplo la dispersión y depredación de las semillas, la polinización de muchas especies de plantas (incluyendo especies de importancia económica), la regulación de las poblaciones de insectos y roedores (algunos de los cuales son plagas potenciales) y también en el reciclaje de materia orgánica y carroña que ayudan a evitar la propagación de enfermedades. (Ruiz-Gutiérrez, V., et al, 2020)

La cuenca estuarina, ecosistemas llenos de vida

Un estuario es un ecosistema costero donde el agua dulce de los ríos, las quebradas y la escorrentía pluvial que discurre por la ciudad se encuentra con el agua salada del océano. Es ahí donde se genera una mezcla única de aguas saladas y dulces que crea hábitats diversos y productivos. Una cuenca hidrográfica es una región geográfica delimitada por montañas, colinas y otras elevaciones, en la que toda el agua de lluvia, ríos, arroyos y corrientes fluye hacia un único punto de salida, como un río principal, una laguna costera o el océano. En otras palabras, es el área de tierra que captura el agua de lluvia y drena el agua superficial hacia un mismo cuerpo de agua.

La cuenca del Estuario de la Bahía de San Juan se extiende por ocho municipios: Bayamón, Carolina, Cataño, Guaynabo, Loíza, San Juan, Toa Baja y Trujillo Alto. Alrededor del 24 % de la cuenca está cubierta por árboles (Brandeis et al. 2014). Esos parches de vegetación en nuestra cuenca urbana (bosques urbanos, parques, corredores ecológicos, entre

otros) ofrecen hábitat a una gran diversidad de aves residentes y migratorias, desde la parte alta de las montañas hasta la costa. El resto de la cuenca está urbanizada, siendo esta una región con gran parte de su superficie pavimentada o construida.

Debido a la posición geográfica de Puerto Rico, la avifauna de la Isla proviene de las Antillas Mayores y Menores, y de América del Norte (Castro-Prieto, 2021). Y debido a la condición insular de Puerto Rico, al igual que otras islas de las Antillas, estas muestran un alto grado de endemismo de aves en comparación con áreas o regiones continentales. Según datos reportados en la plataforma de ciencia ciudadana eBird (herramienta de libre acceso, creada y administrada por el Laboratorio de Ornitología de la Universidad de Cornell), en la cuenca se ha reportado el 72 % de las especies de aves documentadas en Puerto Rico (279 de 387 especies). Esto demuestra la gran diversidad de aves que utilizan estos espacios urbanos, mientras se resalta la importancia de protegerlos y restaurarlos para conservar estas especies.



Ciencia ciudadana y censos de aves participativos

La ciencia ciudadana es una herramienta que produce conocimientos científicos mediante modelos de colaboración entre el público en general y científicos profesionales para aplicarlos a la restauración de los espacios naturales. La importancia de los programas de ciudadanos científicos está en la participación de miembros de la comunidad, maestros, estudiantes, familias y otros ciudadanos para recopilar una gran cantidad de información cuantitativa y cualitativa que le será útil a las organizaciones de conservación, que de otra manera no podrían recolectarla por sí solas. También es una oportunidad de adiestrar y motivar a los estudiantes para ver las posibilidades de, en un futuro, dedicarse al campo de la conservación o manejo de la biodiversidad (Nieves Rodríguez, 2018).





Para incorporar esta herramienta en el trabajo de restauración de la cuenca, ESTUARIO creó la Certificación de Ciudadanos Científicos (CCC) en 2017. Esta iniciativa busca capacitar a voluntarios para que se integren a las actividades de monitoreo y sean parte del proceso de recolección y análisis de datos sobre el estuario. La certificación consiste en cuatro módulos, incluyendo el de Censos de Aves Participativos, mediante el cual se han certificado 79 personas tras tomar dos talleres y participar en dos censos de aves participativos.

Los censos de aves participativos son actividades en donde las personas se unen a los científicos de ESTUARIO para contar y monitorear las aves en distintos ecosistemas de la cuenca. Estas personas pueden ser de una diversidad de audiencias, incluyendo estudiantes, maestros, vo-



El guaraguao colirrojo (*Buteo jamaicensis*) es un ave rapaz nativa de Puerto Rico que suele verse sobrevolando áreas boscosas y urbanizaciones.



La tijereta (*Fregata magnificens*, a la izquierda) es un ave residente en las costas de Puerto Rico, son famosas por robar comida a otras aves incluyendo el pelicano pardo (*Pelecanus occidentalis*, a la derecha de la imagen).



La yaboa común (*Nyctanassa violacea*) es una especie de garza nativa de hábitos nocturnos que habita cuerpos de agua incluyendo el manglar.

luntarios y ciudadanos científicos que se interesan en la observación de aves como una actividad educativa, científica o recreativa. Los censos son de gran importancia por varias razones. Las más importantes son:

1. Contribución desde la ciencia ciudadana: Los censos participativos permiten que las personas, sin ser científicos profesionales, contribuyan a la documentación, investigación y conservación de las aves. Los datos recopilados se suben a la plataforma eBird. Estas observaciones y datos entrados en eBird ayudan a los investigadores a entender mejor las dinámicas poblacionales, los patrones migratorios y los cambios en el comportamiento de las aves.
2. Monitoreo a largo plazo: Esta actividad proporciona datos consistentes a largo plazo





La gallareta común (*Gallinula galeata*, a la izquierda) y la garza azul (*Egretta caerulea*, a la derecha) son aves acuáticas comunes en los humedales, lagunas, embalses y ríos costeros de Puerto Rico.

y de manera sistemática sobre las poblaciones de aves, lo que permite identificar los cambios significativos en su abundancia, detectabilidad y otros en el tiempo y espacio. Estos datos se comparten también con los manejadores de las áreas naturales protegidas para que así tengan información actualizada que les pueda ayudar en la toma de decisiones de manejo de estas áreas.

3. Educación ambiental y comunitaria: Participar en los censos ayuda a que los estudiantes, educadores y las comunidades vecinas se familiaricen con las aves locales y sus ecosistemas. Esto aumenta su conocimiento sobre la biodiversidad, a la vez que genera una mayor conciencia y empoderamiento sobre la necesidad de conservar esos hábitats y crear proyectos de monitoreo comunitario o integrarse a las actividades educativas.

Censos de aves en el Estuario de la Bahía de San Juan

Las aves son excelentes bioindicadores porque su presencia o ausencia y abundancia puede reflejar la salud de los ecosistemas en los que viven o frecuentan. Muchas especies de aves son sensibles a cambios específicos en el ambiente, como la calidad del agua, la disponibilidad de alimentos y la integridad del hábitat. Por ejemplo, la disminución de especies de aves insectívoras puede indicar un problema con la población de insectos, posiblemente causado por el uso excesivo de pesticidas o la pérdida de hábitat. Al monitorear aves, se pueden detectar cambios en los ecosistemas antes de que los problemas se vuelvan irreversibles, lo que permite intervenciones más tempranas y un manejo más efectivo.

Los censos de aves son fundamentales para la conservación de los ecosistemas porque propor-



La garza ganadera (*Bubulcus ibis*) anida con frecuencia en los árboles de manglar.

cionan datos precisos sobre la distribución y las tendencias poblacionales de las especies. Estos datos son esenciales para identificar áreas críticas que necesitan protección o restauración. Por ejemplo, si un censo revela una disminución en las aves de un humedal, esto podría indicar la necesidad de implementar medidas de conservación, como la protección de zonas de reproducción o la restauración de áreas degradadas. Además, las aves son clave en muchas funciones ecológicas, como la polinización, la dispersión de semillas y el control de plagas, lo que las hace vitales para la salud y la funcionalidad de los ecosistemas.



ESTUARIO realiza censos de aves desde sus inicios, pero desde 2017, luego del huracán María, se comenzó una sistematización de esta actividad científica y se aumentaron los lugares de censos. Esto nos dio la oportunidad de tener una muestra más significativa de los diversos ecosistemas de la cuenca. Nuestros censos se enfocan en tres grandes proyectos con metodologías diferentes para monitorear diversos ecosistemas en la cuenca a través del año y documentar la presencia y abundancia de especies de aves residentes y migratorias.



Ciudadanos científicos realizando el conteo e identificación de aves.

a. Censo de Aves Navideño (*Christmas Bird Count* —CBC)

El *Christmas Bird Count* o Censo de Aves Navideño —creado por la National Audubon Society— es una tradición de más de un siglo, que se ha convertido en uno de los programas de monitoreo de aves más antiguos y grandes del mundo. Este evento anual comenzó en 1900 como una alternativa ética a la tradición de caza en invierno. El censo se lleva a cabo entre el 14 de diciembre y el 5 de enero, cuando reúne a miles de voluntarios a nivel mundial, tanto aficionados como expertos en aves, que se organizan en grupos para contar todas las aves que ven o escuchan en las áreas designadas.

En Puerto Rico existen cuatro áreas designadas o círculos de conteo de 24 kilómetros de diámetro; uno de ellos cubre el área de la cuenca del Estuario de la Bahía de San Juan. El esfuerzo se coordina a nivel local por un observador principal y los datos recolectados —como la cantidad de individuos por especie y la ubicación de las observaciones— se envían a la National Audubon Society. Allí se añaden a la base de datos y se analizan para identificar las tendencias a largo plazo en las poblaciones de aves. Realizar el Censo de Aves Navideño de manera consistente contribuye a la compresión y conservación



de las poblaciones de aves en los distintos ecosistemas de la cuenca del estuario a través de:

- **Monitoreo a largo plazo:** Este censo ha proporcionado datos continuos durante 125 años, lo que permite a los científicos estudiar las tendencias a largo plazo en las poblaciones de aves y detectar cambios que podrían estar relacionados con factores ambientales como eventos naturales extremos, la pérdida de hábitat y la urbanización.
- **Conservación y política pública:** La información obtenida de los censos de aves navideños se utiliza para guiar estrategias de conservación y políticas públicas. Los datos han sido cruciales en la identificación de especies en disminución y en la priorización de áreas para la conservación.
- **Participación comunitaria:** El censo de aves navideño promueve también la participación ciudadana, involucrando a personas de todas las edades y niveles de experiencia en la recolección de datos en eBird. Esta participación ayuda a crear conciencia sobre la importancia de la conservación de las aves y sus hábitats.

En 2017, ESTUARIO creó el Censo de Aves Navideño Gamaliel Pagán Hernández, dedicando así estos censos participativos a Gamaliel, un gran amigo del estuario, ambientalista, scout, abogado, músico y pajarero. Todos los años, aprovechando las fechas del CBC desde el 14 de diciembre al 5 de enero, se coordinan censos de aves en hasta 26 áreas naturales a través de la cuenca hidrográfica del Estuario de la Bahía de San Juan integrando la participación ciudadana (Figura 1).

Figura 1. Las 26 estaciones de observación del Censo de Aves Navideño Gamaliel Pagán Hernández en la cuenca hidrográfica del Estuario de la Bahía de San Juan.

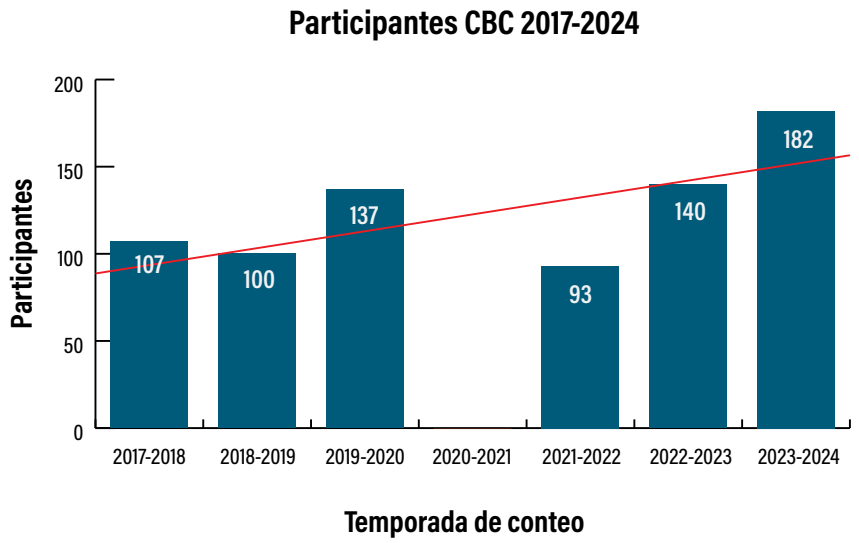


Figura 2. Cantidad de participantes en los censos de aves a partir del 2017. Note el aumento en la participación de ciudadanos científicos con el pasar del tiempo.

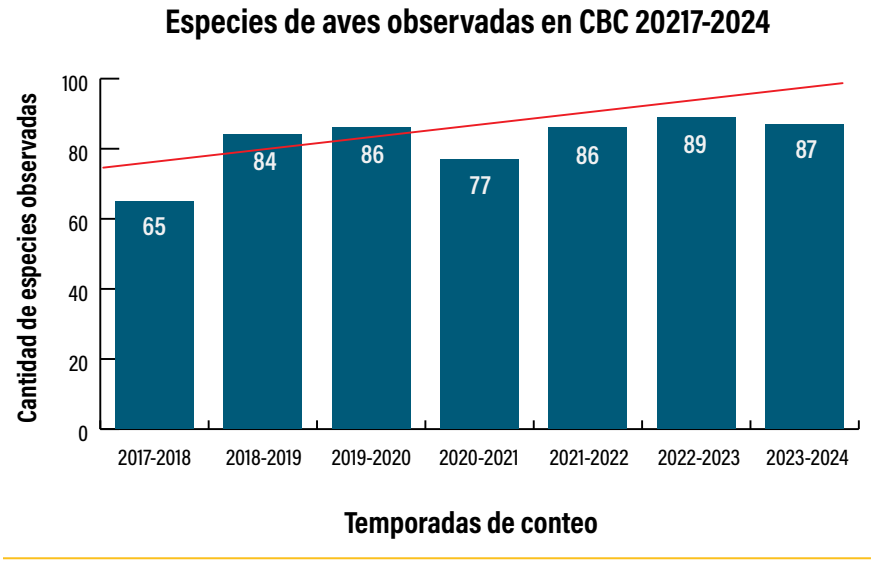


Figura 3. Cantidad de especies observadas. Las especies de aves reportadas han aumentado desde 65 en la temporada 2017-2018 a un máximo de 89 especies en la temporada 2022-2023.



Figura 4. La cantidad de individuos observados en los censos casi se ha triplicado desde la primera temporada (2017-2018). En el censo de 2023-2024 se avistaron 4,952 individuos.

Desde 2017, se han realizado siete temporadas de conteos con la participación de cerca de 600 voluntarios (Figura 2), mediante las cuales se han obtenido importantes datos sobre la abundancia y distribución de las aves en nuestra área de acción, incluyendo la presencia de 119 especies de aves, 11 de ellas endémicas y 30 migratorias.

Las especies de aves reportadas han aumentado desde 65 en la temporada 2017-2018 a un máximo de 89 especies en la temporada 2022-2023 (Figura 3). También la participación de voluntarios ha ido en aumento, fluctuando entre 93 a 182 participantes.

Por otro lado, la cantidad de individuos reportados ha aumentado desde la primera temporada 2017-2018 con 1,698 individuos hasta casi triplicarse en la temporada 2023-2024 con 4,952 individuos (Figura 4).

b. Censo de Aves Terrestres (*Caribbean Landbird Monitoring* —CLM)

El Censo de Aves Terrestres es un programa de monitoreo de aves de BirdsCaribbean, organización sin fines de lucro regional dedicada a la conservación de aves en el Caribe y sus hábitats. Este proyecto es parte de un esfuerzo mayor para aumentar la capacidad de monitorear aves terrestres en el Caribe mediante el uso de tres herramientas: conteos estandarizados, anillamiento y rastreo de aves con la tecnología MOTUS.

En 2022, ESTUARIO obtuvo fondos de BirdsCaribbean para documentar la diversidad

de aves terrestres en bosques urbanos de la cuenca a través de conteos estandarizados (Figura 5). La metodología de conteo utilizada fue la de PRO-ALAS, un manual diseñado por CONABIO para el monitoreo de aves en Latinoamérica. Esta metodología estandarizada utiliza los métodos reconocidos de puntos de conteo con bandas de distancia y transectos. Además, incorpora los datos a la plataforma de ciencia ciudadana eBird, lo que permite compilar, ordenar y validar los datos.



Los censos de aves en el estuario han permitido documentar la presencia de 119 especies, 11 de ellas endémicas y 30 migratorias.



Figura 5. Estaciones del Censo de Aves Terrestres (*Caribbean Landbird Monitoring*) en bosques urbanos dentro la cuenca hidrográfica del Estuario de la Bahía de San Juan.



Figura 6. Ciudadanos científicos y manejadores de las áreas naturales que participaron en el Censo de Aves Terrestres del 2022.

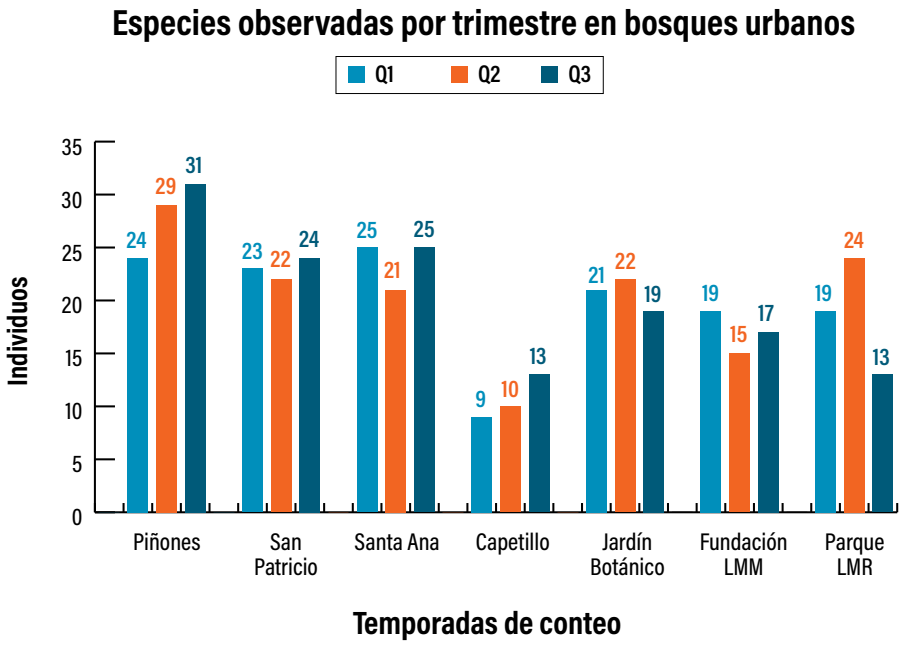


Figura 7. Especies observadas por trimestres durante el Censo de Aves Terrestres.

c. Censo de Aves Acuáticas (*Caribbean Waterbird Census* —CWC)

Los humedales del Caribe proporcionan un hábitat esencial de parada e invernada para más de 126 especies migratorias neotropicales acuáticas y terrestres (Sorenson, et al, 2019). La cuenca hidrográfica del Estuario de la Bahía de San Juan está compuesta de diversos tipos de humedales desde ríos, quebradas, lagunas, lagos, playas, estuarios, ciénagas, manglares, canales y arrecifes de coral. Todos estos humedales son parte de una cuenca hidrográfica urbanizada, pero representan lugares importantes para el hábitat de aves acuáticas tanto residentes como migratorias.

Como "los humedales del Caribe y sus poblaciones de aves son muy poco conocidos" (Sorenson, et al, 2019), ESTUARIO se une al Caribbean Waterbird Census, un programa regional de monitoreo de humedales y aves acuáticas de BirdsCaribbean. Este conteo es una colaboración regional informal, basada en una meta compartida y un objetivo común de promover la conservación y la gestión de las aves acuáticas residentes y migratorias y sus hábitats de humedales a través del monitoreo (Sorenson, et al, 2019).

A nivel regional, este conteo de aves acuáticas busca contestar las siguientes preguntas:

- ¿Qué especies de aves acuáticas están presentes en el sitio o sitios?
- ¿Cómo están cambiando sus números con el tiempo?
- ¿Qué factores ambientales (naturales o inducidos por el



Figura 9. Transecto (en rojo) donde se realizaron los censos de aves acuáticas por el canal Blasina, comenzando en el Museo del Niño de Carolina hasta la laguna La Torrecilla.

hombre) están vinculados a estos cambios?

ESTUARIO realizó el Censo de Aves Acuáticas en colaboración con el Museo del Niño de Carolina, con el objetivo de documentar las especies de aves del canal Blasina en Carolina para obtener un inventario actualizado de las especies que habitan en este humedal. Se realizaron siete conteos trimestrales entre febrero de 2022 y agosto de 2023. La metodología utilizada fue el protocolo de nivel 1 del CWC. El transecto donde se realizan los censos es una ruta de 2.4 millas recorridas en bote por el canal Blasina, comenzando en el Museo del Niño de Carolina (Figura 9).

Durante estos censos, se documentaron 56 especies de aves, cuatro de ellas endémicas y siete migratorias (Figura 10). También se documentaron especies de interés como el Ibis lustroso (*Plegadis falcinellus*) y el Ibis Blanco (Eudocimus albus). Estas especies se

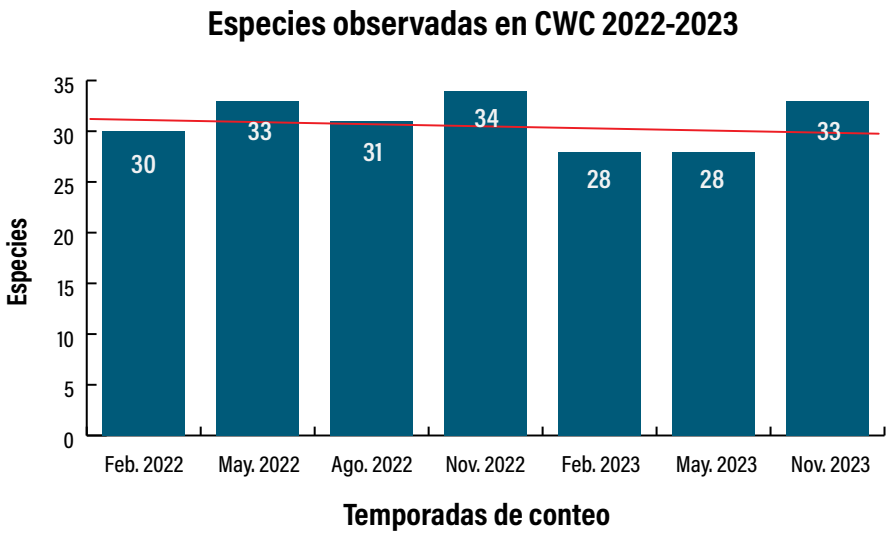
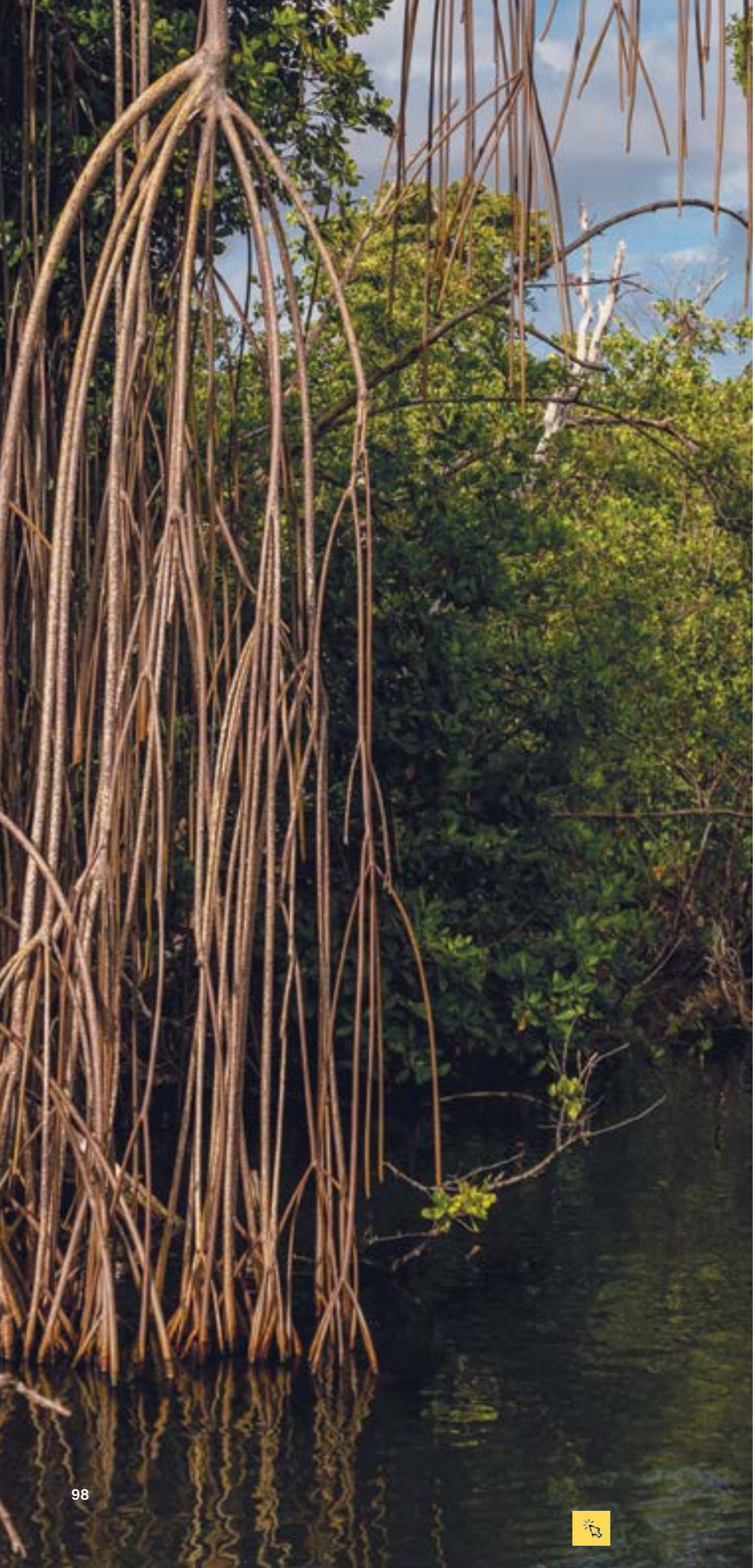


Figura 10. Especies observadas como parte del Censo de Aves Acuáticas. Durante estos censos, se documentaron 56 especies de aves, cuatro de ellas endémicas y siete migratorias.



han documentado en áreas del oeste de Puerto Rico y no se conoce una colonia de anidamiento en el este de la Isla.

Conclusión

La cuenca hidrográfica del Estuario de la Bahía de San Juan es un tesoro de biodiversidad y naturaleza urbana única que alberga una amplia variedad de especies de aves nativas, endémicas y migratorias, las cuales dependen de estos hábitats para su supervivencia. Los censos de aves realizados en esta región desde hace ya siete años son fundamentales para monitorear la salud de estos ecosistemas y detectar cambios que puedan indicar amenazas emergentes. A través de estos esfuerzos, hemos obtenido datos valiosos que no solo enriquecen nuestro conocimiento sobre la avifauna local, sino que también informan las estrategias de conservación necesarias para proteger este ecosistema único. La interconexión entre las aves, el ecosistema estuarino y el bienestar de las comunidades humanas subraya la importancia de conservar y restaurar este entorno de manera integral y sostenible. El monitoreo participativo ayuda a fortalecer la percepción y la apropiación del territorio y la naturaleza, además de propiciar el involucramiento y corresponsabilidad de las comunidades, así como la participación de la gente en actividades (Ruiz-Gutiérrez, V., et al, 2020).

Estos esfuerzos han permitido actualizar la lista de especies avistadas en los municipios de

la cuenca hidrográfica estuarina, que ya alcanza las 279 especies de un total de 387 identificadas en Puerto Rico. Esto representa el 72 % de las especies de aves en la Isla y convierte a la región de la cuenca del estuario en una de las más biodiversas de Puerto Rico. Al mismo tiempo, la participación ciudadana ha crecido y cada año tenemos personas que continúan participando y personas nuevas que se integran a estos esfuerzos de monitoreo. La continuidad de los censos y el compromiso de la comunidad son esenciales para garantizar que el Estuario de la Bahía de San Juan siga siendo un refugio vital para la biodiversidad y un recurso natural invaluable para las generaciones presentes y futuras.



El impacto de los metales pesados en el Estuario de la Bahía de San Juan

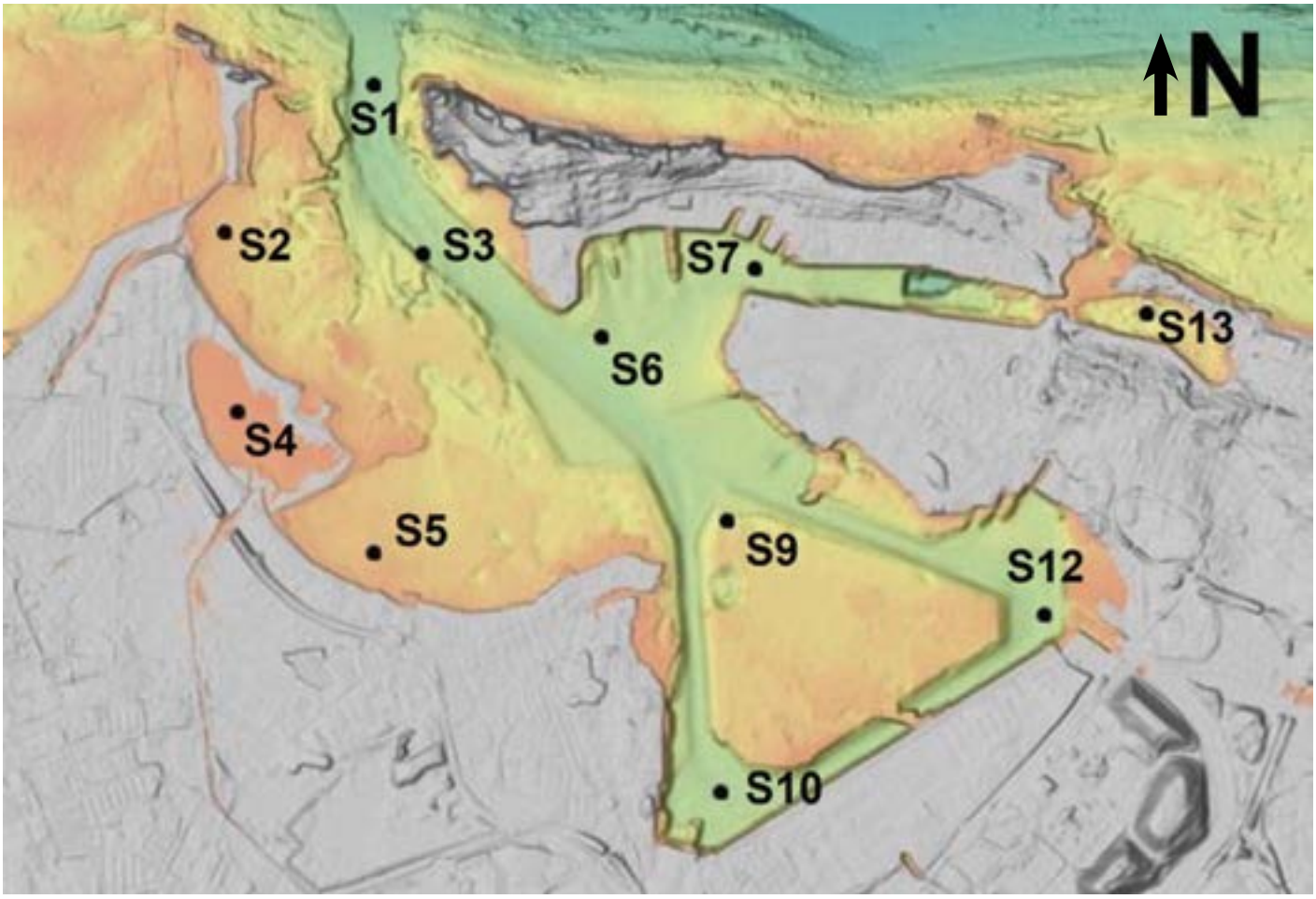


Figura 1. Estaciones en el Estuario de la Bahía de San Juan para determinar la concentración de metales pesados en los sedimentos.

Michael Martínez Cólon PhD
School of the Environment, Florida A&M University, Tallahassee, FL, USA
Benjamin G. Shirey
AUT Lab for Cephalopod Ecology and Systematics (ALCES), Department of Environmental Science, Auckland University of Technology, Aukland, New Zealand

La aprobación de la Ley Federal de Contaminación de Agua (1948) y de la Ley de Agua Limpia (1972) permitió establecer estándares para el uso (recreativo, pesca, potable) y la protección de todos los cuerpos de agua en Estados Unidos. En Puerto Rico, agencias como el Departamento de Recursos Naturales y Ambientales, la Junta de Calidad Ambiental y la oficina regional de la Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés), así como organizaciones comunitarias, se encargan del monitoreo de los ambientes marinos. En específico, ESTUARIO cumple 30 años como una organización centinela, cuyo motor principal es el monitoreo de la calidad del agua superficial del Estuario de la Bahía de San Juan. El monitoreo incluye medir, por ejemplo, los niveles de oxígeno disuelto y de bacterias, entre otros. La amenaza de contaminantes en ambientes estuarinos es un asunto de gran interés a la hora de velar por la salud ambiental de los cuerpos de agua y sus sedimentos. Lamentablemente, es

muy difícil monitorear el transporte de todo tipo de contaminante que se descarga en este ecosistema y se deposita en los sedimentos.

La contaminación antropogénica de los sedimentos en la Bahía de San Juan por metales pesados (Tabla 1) representa una amenaza significativa para la salud ambiental del ecosistema. Como estos contaminantes son insolubles en cuerpos de agua, se mantienen dispersos y, a su vez, se combinan con sedimentos (ejemplo, arcillas) al igual que con materia orgánica. Esto puede causar posibles impactos en organismos que son filtradores (ejemplo, ostras) y aquellos que consumen detrito (ejemplo, sedimento y materia orgánica). Estos metales tienen un marcado efecto negativo en la flora y fauna. Su transporte trófico (en la cadena alimentaria) produce un alto pronóstico de afectar al ser humano por el consumo de peces y crustáceos (ejemplo, Callinectes sapidus o cocolía), ya que algunos de estos contaminantes son carcinógenos (arsénico) o causantes de síndromes neurológicos (mercurio), entre otros.

	Símbolo	Concentración máxima (ppm)	Este estudio (ppm)	ERL (ppm)	ERM (ppm)
Antimonio	Sb	0.64	--		
Arsénico*	As	0.36	no se detectó	8.2	70
Cadmio	Cd	0.008	no se detectó	1.2	9.6
Cobre^	Cu	0.004	11–78	34	270
Cromo^	Cr	0.05	1–30	81	370
Mercurio^	Hg	$5x10^{-5}$	< 0.23	0.15	0.71
Níquel^	Ni	0.008	0–5	20.9	51.6
Plata	Ag	0.002	--		
Plomo^	Pb	0.009	no se detectó	46.7	218
Selenio	Se	0.071	no se detectó		
Talio	Tl	$4.7x10^{-4}$	--		
Zinc^	Zn	0.09	no se detectó	150	410

Tabla 1. Estándares de calidad del agua por metales pesados para cuerpos de agua (Clase SB- costas, aguas superficiales, estuarios, acuíferos) en Puerto Rico. * = carcinógeno. ^ = metal pesado en este estudio. -- = no se estudió. ERL = Effect Range- Low. ERM = Effect Range- Median. ppm = partes por millón

En el Estuario de la Bahía de San Juan se realizó un estudio para determinar las concentraciones de metales pesados en los sedimentos (Figura 1), tomando en cuenta los estándares de calidad del agua de la EPA. Según los mapas de distribución (Figura 2), las concentraciones más altas (Tabla 1) de cobre (Cu), cromo (Cr), mercurio (Hg) y níquel (Ni) se encontraron hacia el sur de la bahía en las áreas aledañas a la zona portuaria. Otros metales como arsénico (As), cadmio (Cd), plomo (Pb) y selenio (Se) no se detectaron.

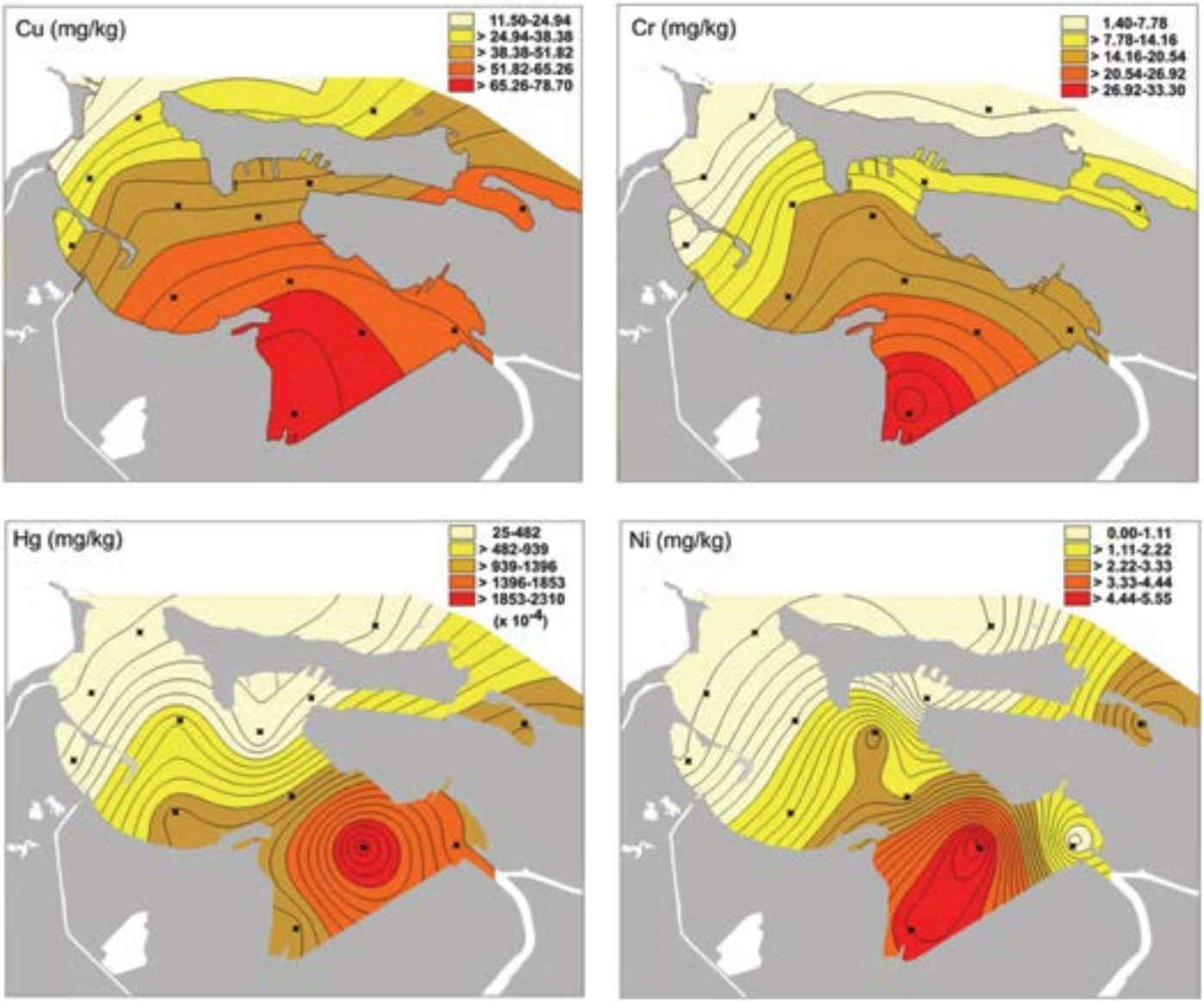


Figura 2. Mapas de distribución de la concentración de metales pesados (cobre, cromo, mercurio y níquel) en los sedimentos del Estuario de la Bahía de San Juan.

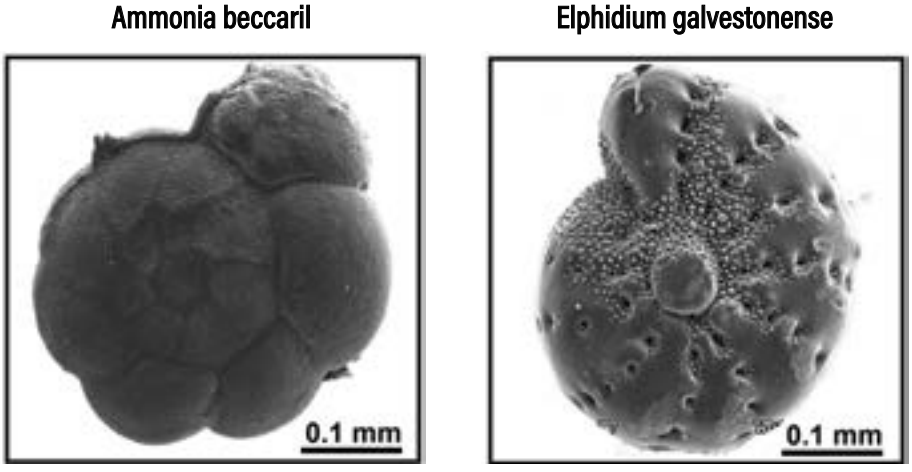


Figura 3. Imagen de los foraminíferos bentónicos utilizados como bioindicadores en este estudio. Estos microorganismos (tamaño: 0.1–5.0) viven sobre o dentro del sedimento y, al igual que nosotros, se alimentan de otros organismos (ejemplo: bacterias, fitoplancton) y de materia orgánica. Estos crean una "concha" de carbonato de calcio (como las ostras) que se preserva en los sedimentos, lo cual facilita su uso como bioindicadores de salud ambiental en ambientes marinos. Por ejemplo, la presencia, cantidad, ausencia y su distribución están determinadas por las condiciones normales del medioambiente o por la contaminación por metales pesados.

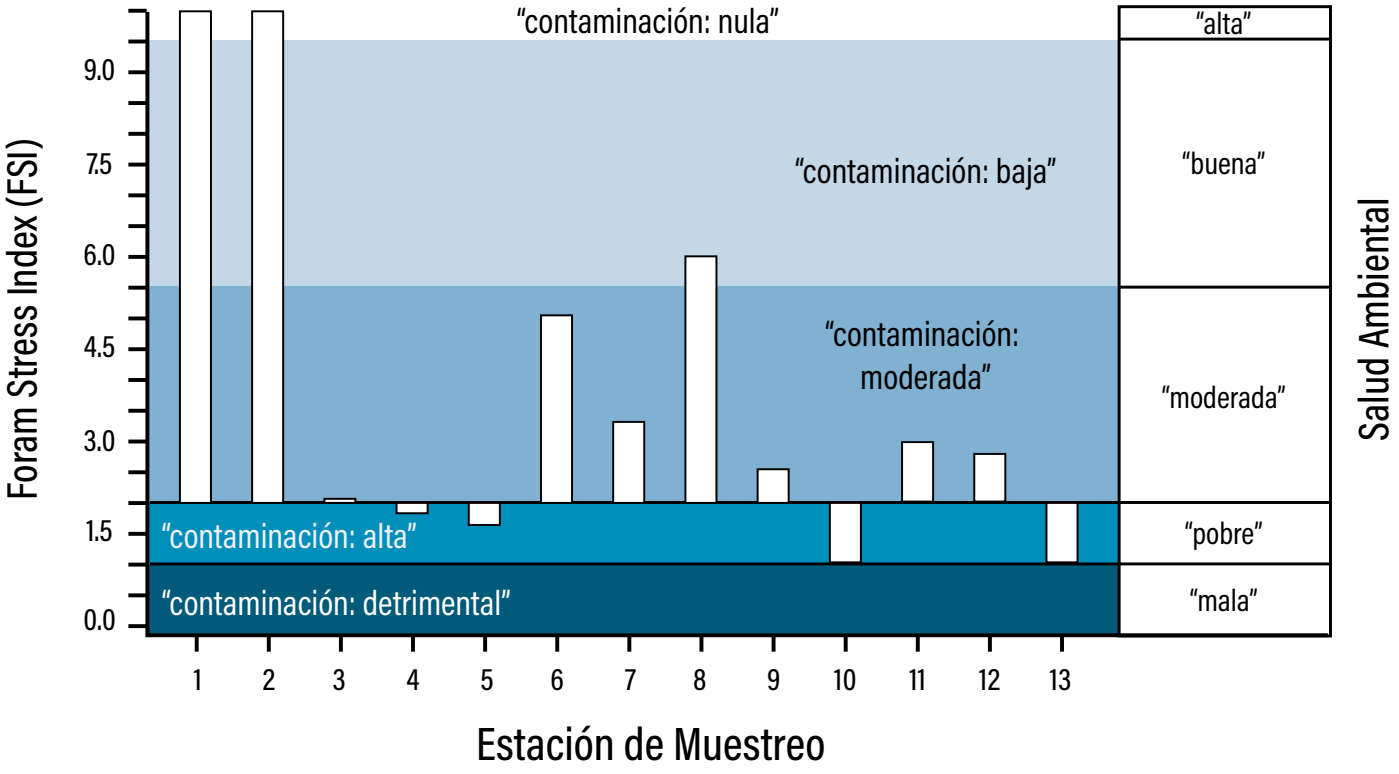


Figura 4. El nivel de la salud ambiental del sistema estuarino se considera "moderado", según la respuesta de los foraminíferos bentónicos utilizados como bioindicadores en este análisis.

Para poder entender el efecto de estos contaminantes, se implementó el uso de un bioindicador de salud ambiental en el cual los foraminíferos bentónicos (Figura 3) fueron los organismos de interés. Los bioindicadores son organismos cuya reacción ecológica a los cambios en el medioambiente puede ser positiva o negativa. Su aplicación es de mucho interés en ambientes marinos y estuarinos, ya que proveen información respecto a contaminantes, como los metales pesados.

Estos foraminíferos (Figura 3) reaccionan rápidamente a cambios ambientales. Los resultados indican que el estuario sí está impactado por metales pesados, pero a pesar de esto la salud ambiental del sistema estuarino es de un nivel "moderado" (Figura 4). Las únicas dos áreas donde no se encontró contaminación son las de la entrada al estuario entre la desembocadura del río Bayamón y Punta del Morro.



Índice de calidad de la cuenca del Estuario de la Bahía de San Juan: metodología, componentes, indicadores y métricas



Uno de los pilares para presentar un buen índice de calidad para la cuenca estuarina es la calidad y cantidad de los datos que se tengan del paisaje que se quiere evaluar, fortalecido por un diseño de muestreo representativo del área que se evalúa.

Edgardo González
Centro para la Conservación del Paisaje

La aplicación de un índice de calidad para la cuenca del Estuario de la Bahía de San Juan por parte de ESTUARIO permitiría integrar datos de una serie de componentes físicos, ambientales y sociales que presenten un marco o parámetro de sostenibilidad integral de la zona o región. En este escrito se resume el trabajo realizado por el Centro para la Conservación del Paisaje (CCP), donde se presentó una metodología y proceso para desarrollar este índice para ESTUARIO.

Las recomendaciones presentadas consideraron tres componentes: ecológico, hidrológico y socioeconómico. Se dividieron los componentes en subtemas para asociarlos a indicadores y métricas que se pudieran considerar por parte de ESTUARIO. Por ejemplo, el componente ecológico incluye subtemas de hidrología, calidad de agua y conectividad de paisaje, entre otros. Cada subtema incluye una serie de indicadores y estos indicadores se asocian a métricas.

Uno de los propósitos del índice es condensar y llevar la información por un proceso de normalización de datos que permita considerar una escala estándar comprensible. Luego se aplica un proceso de

ponderación que se usa para clasificar o calificar la contribución de una de las categorías consideradas en el índice en relación con el impacto general del área considerada. La normalización estandariza los valores numéricos con una unidad de referencia. Ponderar significa medir la importancia de cada categoría de impacto en comparación con otras. Por ejemplo, datos de pH, turbidez y oxígeno disuelto son indicadores de condiciones particulares en el agua. Integrar y combinar estos datos mediante el proceso de normalización nos lleva a desarrollar un índice de calidad del agua. Si la calidad del agua conlleva una importancia mayor en la escala del área que se maneja, entonces en el proceso de ponderación se le asigna mayor peso al índice de calidad del agua que al de biodiversidad, que también puede integrar otra serie de indicadores.

En el trabajo realizado se consideraron datos de la plataforma del Atlas que ESTUARIO tiene en su página electrónica (https://estuario.org/category/recursos/atlas/), donde el público tiene acceso a una serie de informes con métricas que se pueden considerar para el índice. También se identificaron otras fuentes de datos y se establecieron recomendaciones para aplicar métricas a nivel de la cuenca. Las recomendaciones se pueden integrar a los esfuerzos existentes de ESTUARIO para lograr la representación a nivel de la cuenca que considera el índice. De igual forma, se ofrecen recomendaciones para el diseño de muestreo y para mejorar la representatividad de la cuenca.

Uno de los pilares para presentar un buen índice es la calidad y cantidad de datos que se tenga del paisaje que se quiere evaluar, fortalecido por un diseño de muestreo representativo del área que se evalúa. Los datos recopilados por medio de ese muestreo representativo son la base para considerar indicadores. Se consideraron tres tipos de indicadores: de *proceso*, *resultado* y de *impacto*. Por ejemplo, el número de árboles de mangle sembrados en el estuario es un indicador de proceso. La razón de sobrevivencia de estos árboles por unidad de área, como acres o cuerdas, es un indicador de resultados. El aumento en la biodiversidad o la presencia de nuevas especies en el área sembrada representa un indicador de *impacto*. El índice considera integrar indicadores ecológicos y socioeconómicos relacionados con iniciativas y proyectos de ESTUARIO. El índice del estuario es una integración de varios índices, por lo que cada uno de ellos en su carácter individual provee también información de la condición del componente que representa.

Los componentes (ecológicos, sociales, económicos, etc.) se dividieron en subtemas que pasaron a vincularse a indicadores y métricas. Por ejemplo, el componente ecológico incluye subtemas de hidrología, calidad del agua y conectividad del paisaje, entre otros. Las recomendaciones para ampliar u optimizar la recopilación de datos considerando componentes, indicadores y métricas se presentan en el documento producto del trabajo del CCP titulado ***San Juan Bay Estuary Watershed Index: methodology, components, indicators and metrics***. La tabla 1 resume los componentes, subtemas, indicadores y métricas recomendadas.

	Componentes	Subtemas	Indicadores	Métricas
1	Ecológico	Conectividad de habitáculos Biodiversidad	Análisis del índice de biodiversidad del paisaje (*output indicator*)	1. Perímetro área verde fractal 2. % de tipo de paisaje 3. # de parches de vegetación 4. Índice de parches grandes 5. Índice de contagio de parches
2	Ecológico	Avifauna de cuenca Avifauna en hábitat positivos	Relación especies nativas, endémicas o exóticas por estación / Presencia de migratorios (*output indicator*)	1. Endémicos a la población 2. Nativos a la población 3. Exóticos a la población 4. Presencia de migratorios
3	Ecológico	Hidrología	*Land cover wetness index*	*Compound topographic index*
4	Ecológico	Hidrología	Zona riparia permeable	% de zona riparia con cubierta de terreno permeable
5	Ecológico	Calidad del agua	O2 disuelto, turbidez, pH, BOD	Aplicar el índice Brown (1971) para tener escala de 0-1
6	Ecológico	Calidad del agua	Concentración de enterococcus	Usar el *Beach Action Value* de EPA y ajustar valores a escala 0 - 100 s
7	Social	Orden social (*Hierarchy*)	Desempleo Población bajo el nivel de pobreza	1. Población bajo el nivel de pobreza 2. Población desempleada
8	Económico	Ingreso / Desempleo/ Población	Ingreso por hogar Población bajo el nivel de pobreza	*Median annual household income*
9	Resiliencia de residentes	Peligro/exposición (H) Vulnerabilidad (V) Baja capacidad de respuesta (C)	Zona inundable (H) / Proximidad a áreas costeras (H) / Distribución de edades en zonas inundables (V) / Ingresos en zonas inundables (V) (C) / Falta de acceso a recursos (información/tecnología) (V) / Fondos luego de desastres (V) / Presupuesto por municipio (C)	Población expuesta
10	Vulnerabilidad social / económica	Población vulnerable a eventos de inundaciones	Socioeconómico – desempleo / Población bajo nivel de pobreza Demografía – edad sobre los 65 años y por debajo de los 18 años	Análisis por medio de los *census tracks*
11	Comparación a nivel de subcuenca	EPA - RPS Indicadores y tensión	Ecológico	Efecto de tensión (estrés) sobre indicadores ecológicos-seleccionados

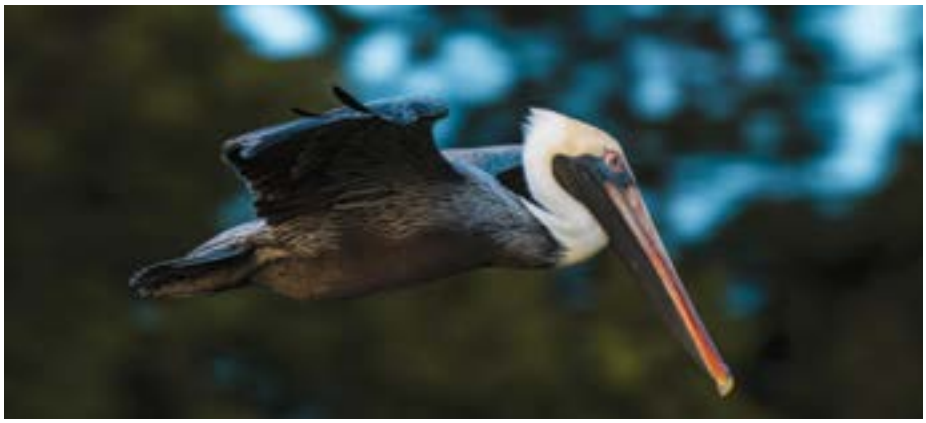
Tabla 1. Componentes, subtemas, indicadores y métricas recomendadas a ESTUARIO.

Para mostrar el proceso de manejo de los datos, el reporte consideró información sobre la fauna, recopilada por ESTUARIO mediante los censos de aves, y la calidad del agua. También se utilizaron datos socioeconómicos obtenidos del censo para calcular un índice estimado de la cuenca con tres índices de diferentes componentes (*Bird Species Richness Indicator, Water quality watershed index y Socioeconomic index*), aplicando siete métricas y destacando que la fauna del componente ecológico incluye solo los datos de aves. Para analizar los datos se aplica el proceso de normalización y se definen valores entre 0 y 1. Para el análisis de los resultados, luego de normalizar los mismos e integrarlos sumándolos y dividiéndolos entre el número de datos o indicadores, se utilizan las cantidades de la mediana (*median*) y el promedio (*average*). La mediana representa los valores que separan la mitad más alta de los datos de la mitad más baja. El promedio se compara con la mediana para identificar si estamos sobre o bajo la mediana. Un promedio considerablemente más bajo que la mediana nos debe representar preocupación. Valores sobre la mediana nos presentan una mejor condición para el índice.

Aun cuando ESTUARIO levanta datos y mantiene varios proyectos de monitoreo, se recomendó mejorar el diseño del muestreo representativo del área que se evalúa. Por ejemplo, los datos de las observaciones de aves se efectúan en lugares donde se espera tener una buena población de aves, como son las áreas naturales protegidas y ambientes como el aljibe Las Curías. Estos datos pueden ser un indicador local para lugares positivos para la avifauna, pero no son representativos de toda la cuenca. En los datos de calidad del agua, aunque se consideran puntos desde las áreas de mayor elevación hasta la costa, se recomendó ampliar la distribución de ese muestreo considerando los cuerpos de agua y vertientes adicionales para mejorar la representatividad de los datos de la hidrografía de la cuenca. Por otro lado, los datos del censo y el tipo de dato que se pueda trabajar con imágenes de cubierta de terreno, como la cantidad, proximidad y forma de los parches de vegetación en toda la cuenca, pueden trabajarse con esa información sin la necesidad de levantar datos adicionales.



El componente ecológico del índice incluye subtemas de hidrología, calidad del agua y conectividad del paisaje, entre otros.



Los datos de observaciones de aves pueden servir como un indicador local de sitios favorables para la avifauna, pero no son representativos de toda la cuenca. Esto se debe a que dichas observaciones suelen realizarse en lugares donde se anticipa una alta presencia de aves, como las áreas naturales protegidas.

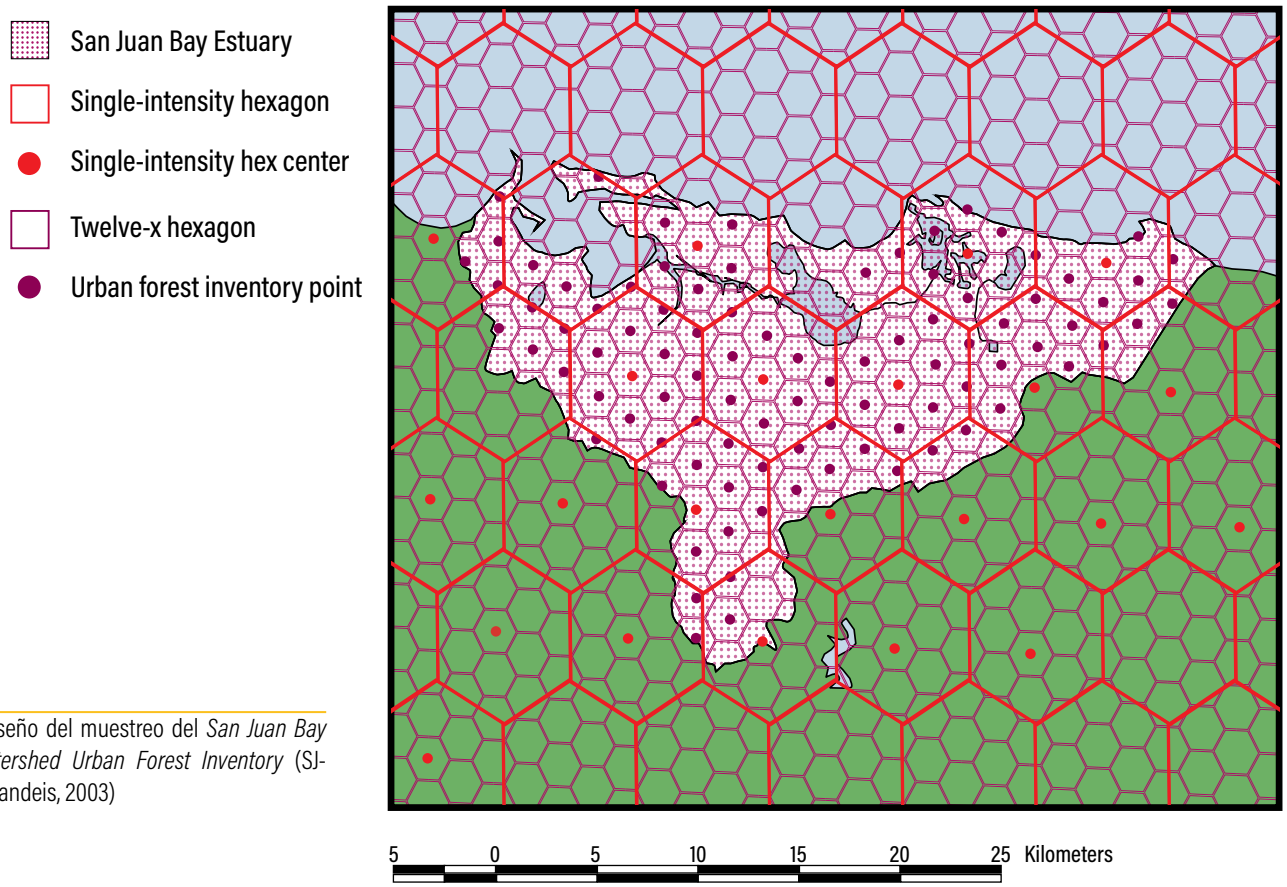


Figura 1. Diseño del muestreo del *San Juan Bay Estuary Watershed Urban Forest Inventory* (SJBEWUFI) (Brandeis, 2003)

Una recomendación presentada fue la posibilidad de considerar y estudiar el diseño de muestreo de la vegetación desarrollado en el *San Juan Bay Estuary Watershed Urban Forest Inventory* (SJBEWUFI) (Brandeis, 2003), (Brandeis, Escobedo, & Staudhammer, 2014). En ese muestreo se trabaja con una rejilla de hexágonos (grid) que se ubica sobre el mapa de toda la isla basado en la escala de muestreo de todo Puerto Rico. Para considerar el área de muestreo de la cuenca del Estuario de la Bahía de San Juan se bajó de escala la rejilla y se intensificó el número de rejillas 12 veces. Este diseño establece 108 puntos de muestreo asociados a los hexágonos, definiendo una parcela de muestreo aproximadamente cada 200 hectáreas (494.2 acres). Este muestreo integra todas las cubiertas de terreno y puede considerarse para inventarios de la fauna y otros componentes. Un beneficio de este diseño de muestreo es que el Servicio Forestal ha realizado el muestreo de vegetación y caracterización de estos puntos repitiendo el inventario más de una vez. La Figura 1 presenta el diseño del muestreo aplicado en el SJBEWUFI.

Otra recomendación presentada en el informe a ESTUARIO fue trabajar el índice estratégicamente al considerar métricas por la dinámica de los usos del suelo y las alteraciones en los sistemas de drenaje y las escorrentías que ocurren en la cuenca. En este sentido, el análisis en la hidrología podría considerar el sistema de lagunas de la cuenca. El sistema de lagunas, aunque con alteraciones, mantiene cierta consistencia y puede ser muestreada con relativa

facilidad. Existen trabajos y publicaciones (Ellis & Gómez-Gómez, 1976 y Gómez-Gómez, Quiñones, & Ellis, 1983) que pueden usarse como línea de base para desarrollar un indicador relacionado con la conectividad hidrológica.

Muchas de las características naturales de la hidrología en un área urbana se afectan por el patrón de conectividad en la vías de flujo del agua (Pickett et al., 2011). El patrón espacial de las zonas ribereñas puede influenciar su función de actuar como retenedores de nutrientes, por lo que se puede considerar contemplar las medidas y métricas de distancia de estas zonas, así como su patrón de distribución en la cuenca, para reconocer indicadores (Gergel, Turner, Miller, Melack, & Stanley, 2002). El informe presentado considera la escala y distribución de las zonas ribereñas, indicando que se pueden examinar a nivel de subcuencas y reconociendo la cuenca del Estuario de la Bahía de San Juan, la cuenca del río Piedras y la cuenca de la ciénaga Las Cucharillas.

En resumen, el documento ***San Juan Bay Estuary Watershed Index: methodology, components, indicators and metrics*** presentó una metodología y posibles escenarios considerando los datos existentes y recomendando ajustes de muestreo que logren mejores métricas para el índice. En el documento se recomiendan también más indicadores para que el índice ayude a mostrar una mejor representación de la condición de la cuenca y que se pueda repetir para documentar las mejoras de los componentes del índice luego de las aplicaciones de manejo en la zona.









CUENCA HIDROGRÁFICA, MODELAJE Y RESILIENCIA COSTERA

Elementos a considerar en la hoja de ruta para la planificación del manejo integrado de la infraestructura hídrica: el caso de la quebrada Juan Méndez



En Puerto Rico se observan manifestaciones del llamado "síndrome de los ríos urbanos", entre las que se encuentran inundaciones frecuentes y altas concentraciones de nutrientes, como en la quebrada Juan Méndez.

Sofía Burgos Caraballo
Oficial de Proyectos bajo la Ley de Inversión en Infraestructura y Empleo (IIJA), ESTUARIO
Lourdes Pérez Medina
Gerente de Infraestructura Resiliente, ESTUARIO

Puerto Rico es una isla densamente poblada. Los cambios sociales ocurridos en Puerto Rico durante más de 80 años resultaron en el desarrollo ineficiente y desmedido de la tierra. La expansión desregulada de la cobertura urbana ha afectado negativamente los ecosistemas costeros (Martinuzi et al, 2009), pero también los ecosistemas de agua dulce. En las zonas urbanas, los ríos y las quebradas exhiben una serie de características propias de lo que se conoce como el "síndrome de ríos urbanos", como son: cambios hidrológicos, altas concentraciones de nutrientes, modificaciones en la morfología del canal, alteraciones en los procesos del ecosistema y la pérdida de biodiversidad (Meyer et al. 2005, Walsh et al. 2005). En los ríos y las quebradas urbanas de Puerto Rico podemos observar algunos de estos "síntomas" descritos para los ríos urbanos, como

inundaciones frecuentes y altas concentraciones de nutrientes, causados principalmente por la canalización y por una infraestructura para el manejo de aguas pluviales y sanitarias envejecida (Ramírez et al., 2009), tal como ocurre en la quebrada Juan Méndez (en adelante, QJM).

El Plan de Integral de Manejo y Conservación del Estuario de la Bahía de San Juan orienta las estrategias y acciones necesarias para mejorar la calidad del agua en el sistema del Estuario de la Bahía de San Juan. La acción GI-2 del capítulo de Infraestructura Verde propone: "Crear un proyecto piloto para revertir la canalización de concreto de un segmento de río, quebrada o afluente de agua dulce en el Estuario de la Bahía de San Juan (SJBE)". En particular, la estrategia 2.3 contempla el desarrollo de un proyecto piloto para revertir la canalización en concreto de la QJM, un afluente crítico para el drenaje de aguas urbanas en el municipio de San Juan.

Estudios de monitoreo de la calidad del agua del estuario han identificado esta quebrada como un cuerpo de agua de interés prioritario, dado el significativo aporte de nutrientes que hace a la laguna San José (Santos Flores y Martínez Rodríguez, s. f.). El estudio de viabilidad y la declaración de impacto ambiental del proyecto de restauración del ecosistema del Caño Martín Peña (2016) identifican a la QJM como un cuerpo de agua de prioridad por sus posibles consecuencias en el proceso de restauración del Caño. Posteriormente, en el 2021, el Plan de Mitigación contra Riesgos Naturales del Municipio de San Juan incluyó un proyecto de alta prioridad para la mitigación de la reconstrucción y el refuerzo del canal en la QJM (Municipio de San Juan, 2021). Los esfuerzos de Estuario en la QJM van dirigidos a establecer un modelo de infraestructura resiliente en el trópico mediante el desarrollo de una gestión colaborativa en la toma de decisiones para la planificación integral de la infraestructura hídrica. Este enfoque va dirigido a desarrollar e implementar soluciones centradas en la adaptabilidad y la sostenibilidad que integren infraestructura verde y azul. En este contexto, Estuario utilizará los fondos otorgados por el Congreso a través de la Ley de Inversión en Infraestructura y Empleos del 2021, (IJJA, por sus siglas en inglés) para elaborar un plan de estrategias innovadoras de infraestructura híbrida orientado a la revitalización de la QJM.

Estuario convocará a las diversas agencias gubernamentales, actores clave y partes interesadas en el uso y manejo de la quebrada para promover la planificación colaborativa. La iniciativa busca mejorar la calidad del agua, así como atender la degradación, tanto de la infraestructura canalizada como de la infraestructura sanitaria, de esta zona urbana densa cuya zona de drenaje abarca múltiples comunidades en el corazón de San Juan.

¿Dónde se ubica la quebrada Juan Méndez y qué problemas enfrenta?

La quebrada Juan Méndez tiene su origen en el Bosque Estatal Nuevo Milenio, cercano a la urbanización Villa Andalucía, en San Juan. Su cauce atraviesa las comunidades de Capetillo, Villa Capri, Dos Pinos, Manuel



Figura 1. Comunidades circundantes a la QJM. Mapa extraído de la Estrategia de Equidad del Estuario de la Bahía de San Juan.



Figura 2. La línea azul marca el canal principal de la quebrada Juan Méndez previo a la canalización. Mapa topográfico de 1941 (US Geological Survey, US Topo Maps, Escala 1:30,000).

A. Pérez, Truman, Oriente, Israel, Bitumul y San José hasta desembocar en la laguna San José (Figura 1).

Esta quebrada tiene una cuenca de drenaje relativamente pequeña, de aproximadamente 8.2 km^2, y una longitud de aproximadamente 6.75 km. Originalmente, la desembocadura de la quebrada cruzaba un humedal hasta desembocar en el Caño Martín Peña (Figura 2). En esta cuenca, el uso del suelo ha experimentado cambios drásticos que han transformado un paisaje previamente agrícola en un entorno de alta densidad urbana. La quebrada fue canalizada en la década de 1950 como parte de un proyecto para el control de inundaciones y el manejo de la escorrentía pluvial (Nytch et al., 2016). Hoy día, solo unas pocas secciones de la quebrada permanecen como "canal abierto y natural", mientras que gran parte de su cauce ha sido modificado mediante su canalización en concreto.

La canalización facilitó el desarrollo urbano, permitiendo la expansión hacia áreas que, sin esta intervención, no habrían sido viables para la construcción de viviendas, edificios y carreteras. Algunos tramos de la quebrada están entubados y enterrados. Un ejemplo de esto se encuentra en el barrio Oriente, donde se modificó un segmento de la quebrada para nuevas construccio-



Figura 3. Imágenes aéreas de la misma ubicación con el paso de casi una década, 1994 (arriba) y 2003 (abajo). La imagen de 2023 muestra un edificio construido sobre una porción de la QJM (desconocemos el año de su construcción), en la intersección de la avenida Barbosa con la calle Sicilia (barrio Oriente) a la derecha y la calle América a la izquierda. Fuente: Google Earth, 2023.



Figura 4. La línea azul identifica la posible ubicación de la QJM, cerca del monumento al Regimiento 65 de Infantería, San Juan, PR. Fuente: Google Earth, 2024.

nes (Figura 3). Otro ejemplo es la parte de la carretera estatal tres (PR-3), a la altura de la avenida 65 de Infantería, que pasa sobre una parte completamente entubada y enterrada de la QJM (Figura 4).



Figura 5. Entrada al Centro de Diagnóstico y Tratamiento Dr. Enrique Koppish, en la comunidad San José, en San Juan. Efectos del evento de lluvia del 17 de agosto de 2024 (Imagen provista al Estuario, anónimo).

Las zonas circundantes a la QJM han sufrido de un sinnúmero de eventos de inundación. En búsqueda de implementar medidas que pudiesen salvaguardar la vida y la propiedad, en 1989, el Municipio de San Juan solicitó asistencia del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos (USACE, por sus siglas en inglés) para remover un banco de arena en la desembocadura de la quebrada y minimizar la huella de los eventos de inundación. El proyecto redirigió la desembocadura de la quebrada, desde el Caño Martín Peña hasta la laguna San José (USACE 1994). En el estudio de viabilidad y la declaración de impacto ambiental del proyecto de restauración del ecosistema del Caño Martín Peña se reconoció que los aportes de sedimentos de



Figura 6. Modificaciones de canalización a lo largo de la QJM. Arriba a la izquierda: rectificación y ensanchamiento (al lado del Centro de Diagnóstico y Tratamiento Dr. Enrique Koppish, San José); arriba a la derecha, profundización (cerca de la intersección entre la calle de Diego y la calle Cabo Máximo Alomar); abajo a la izquierda, cierre (cerca de la intersección entre las calles de Diego y Cabo Máximo Alomar); y abajo a la derecha, tuberías descargando agua en la QJM, comunidad Buen Consejo (Fotos tomada por S. Burgos, el 3 de enero de 2024 y el 3 de julio de 2024).

esta quebrada tienen el potencial de afectar la salida este del caño que conecta con la laguna San José (USACE 2016). A pesar de estas intervenciones, persisten áreas con alta frecuencia de inundación (Figura 5) cerca de la desembocadura.

¿Qué es una canalización?

La canalización es un tipo de hidromodificación que, según describe la Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés), puede degradar los recursos hídricos (EPA, 2007). En los ríos y las quebradas, esta práctica facilita el transporte de contaminantes y sedimentos que llegan a los cuerpos de agua mediante las escorrentías e infraestructura pluvial. Un canal revestido de concreto interrumpe el paso del agua tanto por la zona hiporreica[1] como por la zona riparia. En estas zonas, los microorganismos son los responsables de reciclar los nutrientes. La desconexión de las quebradas con estas zonas hace que los nutrientes fluyan aguas abajo. La alta velocidad de la corriente en estos cuerpos de agua canalizados impide la retención de los sedimentos y la eliminación efectiva de los nutrientes (Bukaveckas, 2007). Además, la canalización transforma el cauce natural de la quebrada, eliminando su sinuosidad. En ríos y quebradas canalizados, el hábitat acuático es homogéneo, lo que afecta la fauna acuática por la falta de áreas de refugio y alimento. También la temperatura del agua afecta la fauna, a medida que las superficies de concreto quedan expuestas a la radiación solar.

En el caso de la QJM, se observan diferentes tipos de canalización a lo largo de su curso, tales como la rectificación, el ensanchamiento, la profundización y el entubado (Figura 6). Además, tuberías de distintos diámetros

1 Las porciones saturadas de los lechos de las quebradas, los bancos y las llanuras de inundación contienen agua que se origina en la quebrada y regresa al canal. Se caracterizan por una mezcla de agua subterránea local y regional junto con el agua de la quebrada, y típicamente varían en extensión y duración. Las zonas hiporreicas son hábitats y refugios para varias etapas de organismos acuáticos, tales como microbios, macroinvertebrados y peces, según la definición de Woessner (2017).



Figura 7. Sistema sanitario y pluvial interconectado. La tubería verde corresponde a las líneas sanitarias, mientras que la tubería gris corresponde al sistema pluvial. En este caso se utilizó un colorante para identificar el origen de la contaminación de las aguas sanitarias (Imagen obtenida de una presentación del Dr. Gustavo Martínez, 2023).

desaguan en las paredes de concreto. Es probable que muchos de los afluentes que drenan a la quebrada estén entubados, enterrados y conectados al cauce principal a través de las paredes del canal, como se observa en la comunidad Buen Consejo (Figura 6, derecha inferior), y en el bosque, vivero y huerto urbano de Capetillo.

Principales problemas

Además de los problemas asociados a la canalización, la QJM presenta tres problemas principales: descargas sanitarias, residuos sólidos y el colapso de la infraestructura del canal.

Las descargas sanitarias llegan al cauce a través de diversos medios, agravadas por factores relacionados con el diseño y desarrollo de nuevas construcciones, el mantenimiento inadecuado de pozos sépticos y tuberías sanitarias, conexión entre la infraestructura pluvial y sanitaria, la falta de infraestructura sanitaria en ciertas áreas, y el desgaste de la infraestructura al haber superado su vida útil.

Desde 2019, el programa de Detección y Eliminación de Descargas Ilícitas de Estuario, que se realiza en la cuenca del estuario, ha identificado numerosas fugas de agua sanitaria que se infiltran diariamente al cauce (ver Figura 7), y que llegan hasta la laguna San José. Las descargas ocurren cuando el sistema de alcantarillado tiene fugas de aguas sanitarias que se mezclan con el sistema de drenaje pluvial (EPA, 2004). La detección de estas descargas se informa a la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados de Puerto Rico (AAA) para que sean reparadas. Sin embargo, debido a varios factores, es común que tras una reparación continúen ocurriendo fugas, lo que resulta en un problema recurrente que requiere una solución integral.

Subbasin	Variable	N	Mean	Std Dev	Min	25th Petl	Median	75th Petl	Max
Juan Méndez	DP	383	0.279	0.205	0.039	0.160	0.252	0.348	3.120
	NH4N	383	1.752	1.497	BDL	0.536	1.437	2.470	11.387
	NO3N	383	0.726	0.498	BDL	0.270	0.732	1.119	2.134
	DIN	383	2.477	1.287	0.569	1.554	2.150	3.119	11.561

Tabla 1. Concentraciones de nutrientes detectadas en la QJM. La tabla es parte del informe anual del proyecto Detección y Eliminación de Descargas Ilícitas en la QJM (Martínez-Rodríguez, 2024). Siglas de nutrientes en inglés: DP- fosforo disuelto, NH4N- Amonia disuelto, NO3N- Nitrato disuelto y DIN- Nitrógeno inorgánico disuelto, todos reportados en mg/L.

Por otro lado, los residuos sólidos abundan en múltiples zonas de la quebrada. Algunas secciones se utilizan como vertederos clandestinos para disponer de desechos y escombros. Según Natalia Rodríguez, investigadora auxiliar de CAUCE (comunicación oral), la mayoría de estos residuos proviene de personas que no son residentes de las comunidades aledañas a la quebrada. Arrojar estos residuos al canal puede causar obstrucciones o hace que terminen aguas abajo en la laguna San José (Figura 8).

Por último, las paredes han colapsado en varios tramos del canal de la quebrada, comprometiendo así la capacidad hidráulica para el manejo eficiente de la descarga. Esto pone en riesgo a los residentes cuyas casas colindan

Figura 8. Desechos y escombros acumulados en la desembocadura de la QJM (Imagen tomada por S. Burgos, febrero 2024).





Figura 9. Muro de gaviones instalado en parte de la QJM donde la pared del canal ha colapsado (Foto tomada por S. Burgos, 1 de agosto del 2024).

con la quebrada. Se han establecido medidas preventivas temporeras para proteger la ribera y salvaguardar la vida y la propiedad mediante la instalación de muros de gaviones (Figura 9). Sin embargo, esto es una medida no sustentable debido a los problemas de corrosión y abrasión de la malla, la socavación de la estructura y a fallas hidráulicas (Morris et al.).

¿Por qué utilizar un enfoque integral?

Los problemas observados en la QJM son resultado de la falta de integración de conceptos y estrategias de diseño híbrido que consideren el ecosistema y las comunidades como criterios fundamentales. La priorización de la ingeniería, junto con el manejo ineficiente de infraestructuras que inciden en la quebrada, como la infraestructura pluvial y la sanitaria, han llevado a las condiciones actuales de degradación y riesgo a la salud pública. Estuario reconoce a la QJM como un área importante a intervenir para recuperar la integridad ecológica y la calidad del agua. Sus esfuerzos abordan estos desafíos desde un manejo integrado.

Este proceso se debe enfocar en recuperar los servicios ecosistémicos clave, como el control de inundaciones y la retención de nutrientes, utilizando soluciones de infraestructura híbrida. La infraestructura pluvial y sanitaria degradada, la proximidad de viviendas a las paredes del canal, y la disposición inadecuada de los residuos plantean desafíos significativos en la planificación de este esfuerzo. Por lo tanto, se requiere un enfoque holístico que aborde



múltiples perspectivas y estrategias para lograr una revitalización integral en diferentes aspectos.

El acercamiento al proyecto durante el proceso de planificación debe identificar las áreas de oportunidad relacionadas a la hidrología de la zona, sus características biológicas, la restauración de la calidad del agua, y la infraestructura necesaria para minimizar el impacto de las actividades urbanas a largo plazo.

¿Hacia dónde nos dirigimos con esta iniciativa?

Las descargas sanitarias a lo largo de la QJM no solo afectan el ecosistema de la quebrada y la salud de las personas que entran en contacto con ella durante eventos de inundación, sino que también impactan el equilibrio químico de la laguna San José y su vida acuática. Como parte del proyecto Detección y Eliminación de Descargas Ilícitas se ha evaluado la dinámica de la comunidad de fitoplancton, incluyendo una caracterización taxonómica detallada, especialmente en relación con los pulsos repentinos de nutrientes derivados de aguas residuales (Santos Flores and Martínez-Rodríguez, 2021).

La inspección de imágenes aéreas de la subcuenca de la QJM revela importantes desafíos y oportunidades para la recuperación del ecosistema. Muchas residencias están ubicadas cerca de las paredes del canal, particularmente en zonas donde la canalización permitió edificar dentro de la llanura de inundación. En algunas áreas de la parte baja de la cuenca, las paredes de las

Figura 10. Imagen mostrando la condición del agua cerca de la desembocadura de la quebrada Juan Méndez en el área de la comunidad de Israel. (Foto tomada por L. Pérez Medina el 16 de mayo del 2025.)



Figura 11: Objetivos de la fase de preplanificación.

viviendas se integran directamente con las del canal, lo que plantea preocupaciones de salud pública, ya que, en áreas sin infraestructura adecuada, la quebrada se usa con frecuencia para la disposición de desechos y aguas residuales. En eventos de inundación, los residentes cercanos a la desembocadura quedan expuestos, y frecuentemente entran en contacto directo con las aguas de escorrentía mezcladas con las aguas sanitarias.

A pesar de estos desafíos, varias secciones —especialmente aquellas donde las paredes de

concreto han colapsado— ofrecen oportunidades óptimas para implementar soluciones basadas en la naturaleza. Estas áreas, situadas junto a espacios verdes importantes, son ideales para reintroducir procesos naturales y recuperar servicios ecosistémicos esenciales.

Hoja de ruta para la revitalización de la quebrada Juan Méndez

Con este objetivo, Estuario liderará un esfuerzo de planificación multisectorial para desarrollar una hoja de ruta que trace un plan para el proyecto piloto de restauración de la QJM (Figura 11).

La Hoja de Ruta tiene el fin de incluir un análisis integral de las condiciones existentes; la visión, metas y objetivos para el desarrollo del plan de revitalización de la QJM; las fases del proyecto, incluyendo un cronograma; los programas y proyectos a corto, mediano y largo plazo que serán necesarios para promover la restauración y las soluciones híbridas, y la gestión integrada de residuos sólidos; así como las estructuras de gobernanza, financiamiento y fiscales necesarias para desarrollar e implementar el plan de restauración.

Comité de Infraestructura: El Comité de Infraestructura será crucial para garantizar el éxito del proyecto. Los miembros guiarán los aspectos técnicos asociados a las actividades de planificación. El comité reune a los principales actores y tomadores de decisiones, incluyendo agencias gubernamentales como el Municipio de San Juan (MSJ), la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados (AAA), el Departamento de Recursos Naturales y Ambientales (DRNA), la Agencia de Protección Ambiental (EPA, *por sus siglas en inglés*), entre otras. Los miembros se comprometerán a incluir el proyecto en sus planes de trabajo y a participar durante el proceso de planificación, considerando los marcos regulatorios y planes existentes que destacan a la QJM como un área de interés.

A través de su trayecto en el corazón de San Juan, la QJM es testimonio de un pasado donde la canalización favoreció el desarrollo urbano, pero que hoy requiere una visión renovada y una acción colaborativa para asegurar su futuro y el de las comunidades que la rodean. Este proyecto de restauración es tanto una oportunidad para mejorar la calidad del agua y restaurar el ecosistema, como un camino hacia una infraestructura hídrica resiliente en el área metropolitana de San Juan.

Para alcanzar estos objetivos, necesitamos el compromiso y la participación activa de todos los sectores: ciudadanos, organizaciones comunitarias, entidades gubernamentales, investigadores, y líderes empresariales. Juntos podemos transformar la QJM en un modelo de infraestructura hídrica adaptable que inspire otras intervenciones en Puerto Rico y el trópico.

Características geomorfológicas de la costa del Estuario de la Bahía de San Juan



El litoral del Estuario de la Bahía de San Juan presenta una línea de costa altamente irregular, con una extensión aproximada de 94 kilómetros.

Maritza Barreto, PhD
Profesora Distinguida y Catedrática
Escuela Graduada de Planificación, Recinto de Río Piedras. Universidad de Puerto Rico

Este informe incluye la caracterización geomórfica de la costa que cubre la zona del Estuario de la Bahía de San Juan. La caracterización de los tipos de costas y cambios costeros se realizó utilizando la integración de herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), Percepción Remota y trabajo de campo. Los datos geomorfológicos presentados a continuación se obtuvieron de un nuevo análisis proveniente del banco de datos del proyecto Post Maria Beach Assessment (Proyecto FEMA-4339-DR-PR Subgrantee Number 4339-0007P).

Tipos de costas encontradas en la zona del Estuario de la Bahía de San Juan

La sección de costa ubicada en el Estuario de la Bahía de San Juan (el estuario) tiene una extensión de línea de costa altamente irregular de aproximadamente 94 km. Esta franja de costa se encuentra en los municipios de Loíza, Carolina, San Juan, Guaynabo, Cataño y Toa Baja. Con base en un análisis

geoespacial, se identifica que el área del estuario tiene cuatro tipos de costas principales. Estas son: la costa de playa, la costa rocosa, la costa con vegetación y la costa antropogénica. La playa es el tipo de costa predominante en la zona de estudio (44 %). En esta área se identifican aproximadamente 82 unidades de playas subaéreas, que varían de forma, ancho, largo y composición de sedimentos (biogénico, terrígeno y mezclada). Las playas más largas y anchas se identifican en el municipio de Loíza, donde también se ubica la playa más larga de Puerto Rico (playa de Piñones). La costa antropogénica es el segundo tipo de costa más común en el área del sistema del estuario (31 %). Esta se caracteriza por tener en la línea de costa diversos tipos de infraestructuras de concreto y de madera. Los municipios de San Juan (18.58 km), Toa Baja (4.57 km) y Carolina (1.92 km) presentan la mayor extensión de costa antropogénica para el periodo del 2018 (Figura 1). Las costas rocosas y aquellas con vegetación son las menos frecuentes en el Estuario de la Bahía de San Juan.

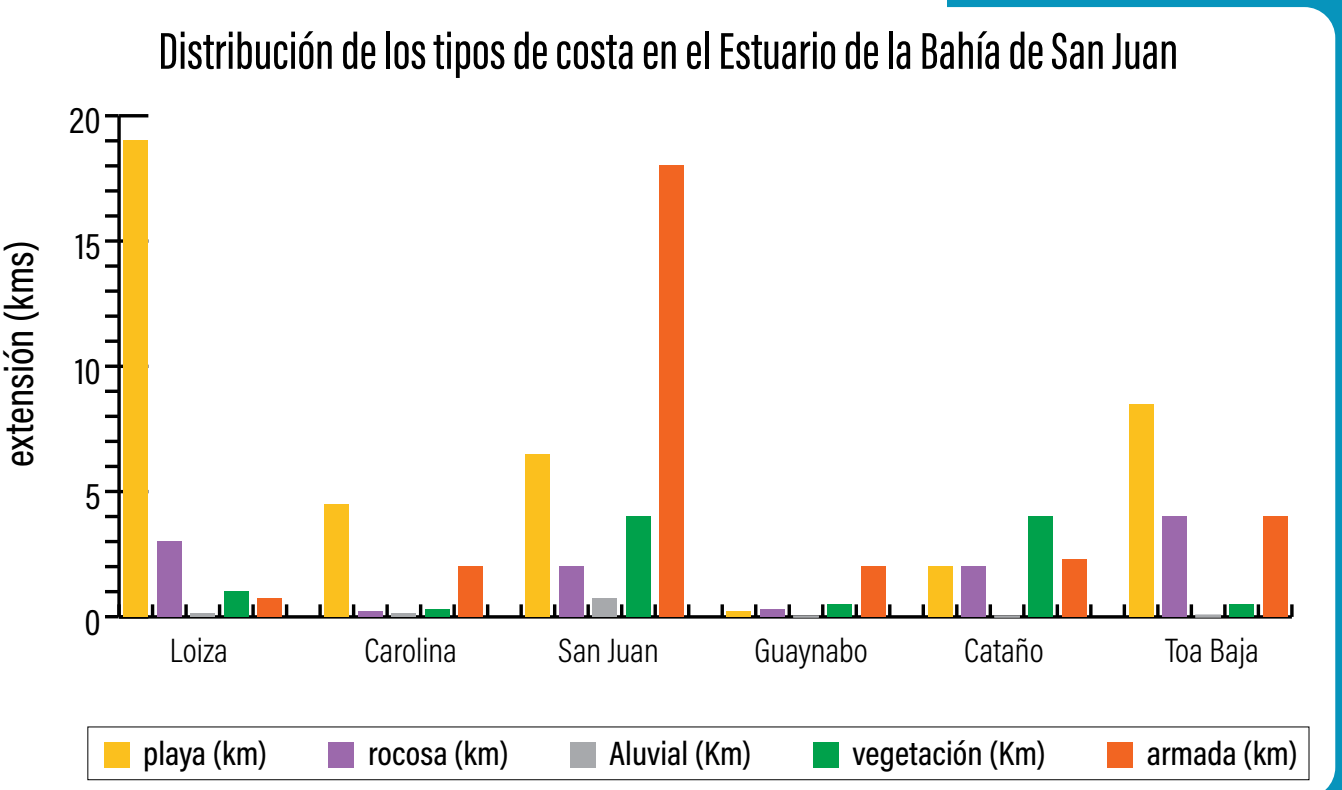


Figura 1. Distribución de tipos de costas en el área del Estuario de la Bahía de San Juan, Puerto Rico. Datos provenientes del análisis del GeoDato de la línea de costa a 2018, Post Maria Beach Assessment, Barreto 2021.

Varios tipos de costas presentaron cambios en la distribución en la línea de costa luego del paso del huracán María, en septiembre de 2017. Entre los cambios observados se pueden mencionar: 1) la reducción de la costa antropogénica luego del paso del huracán María para los municipios de Cataño, Toa Baja y San Juan; y 2) el aumento del tipo de costa antropogénica en los municipios de Carolina y Loíza.



Cambios en el ancho de las playas en la costa del Estuario de la Bahía de San Juan

Las playas identificadas en la zona del estuario presentan cambios diversos en su ancho de playa durante el periodo de marzo de 2017 a julio de 2018. Estos cambios se traducen en erosión y acreción del ancho de playa. La erosión se presenta como la reducción de la extensión de playa que abarca desde la parte detrás de la playa hasta la línea alta de agua (*high water level*). La acreción se identifica con ganancia de extensión de playa desde la parte detrás de la playa hasta la línea alta de agua.

La costa de Loíza tiene una extensión de 23 km, donde el tipo de costa predominante es la playa (81 %). Aproximadamente un 3 % de costa está armada con estructuras mayormente rígidas, tales como paredes de concreto (*seawall*) y líneas de rocas (*rip-rap*). Luego del paso del huracán María, la costa playera presentó un 58 % de erosión y 42 % de acreción (Figura 2). Es posible que esta zona no sufrió mucha erosión debido a que dos semanas antes de este evento ocurrió un depósito de arena extenso en la costa producido por el huracán Irma. Las secciones de playas que presentaron erosión fueron: playa La Pocita, playa Aviones, playa Las Tres Palmitas, Vacía Talega y desde las playas ubicadas en Ocean Point a Santillana del Mar. Las zonas de acreción se identificaron en secciones de la playa Aviones y las playas Linda y Palmarenas. Para julio de 2018, varias secciones de costas playeras recuperaron sedimentos (72 %).

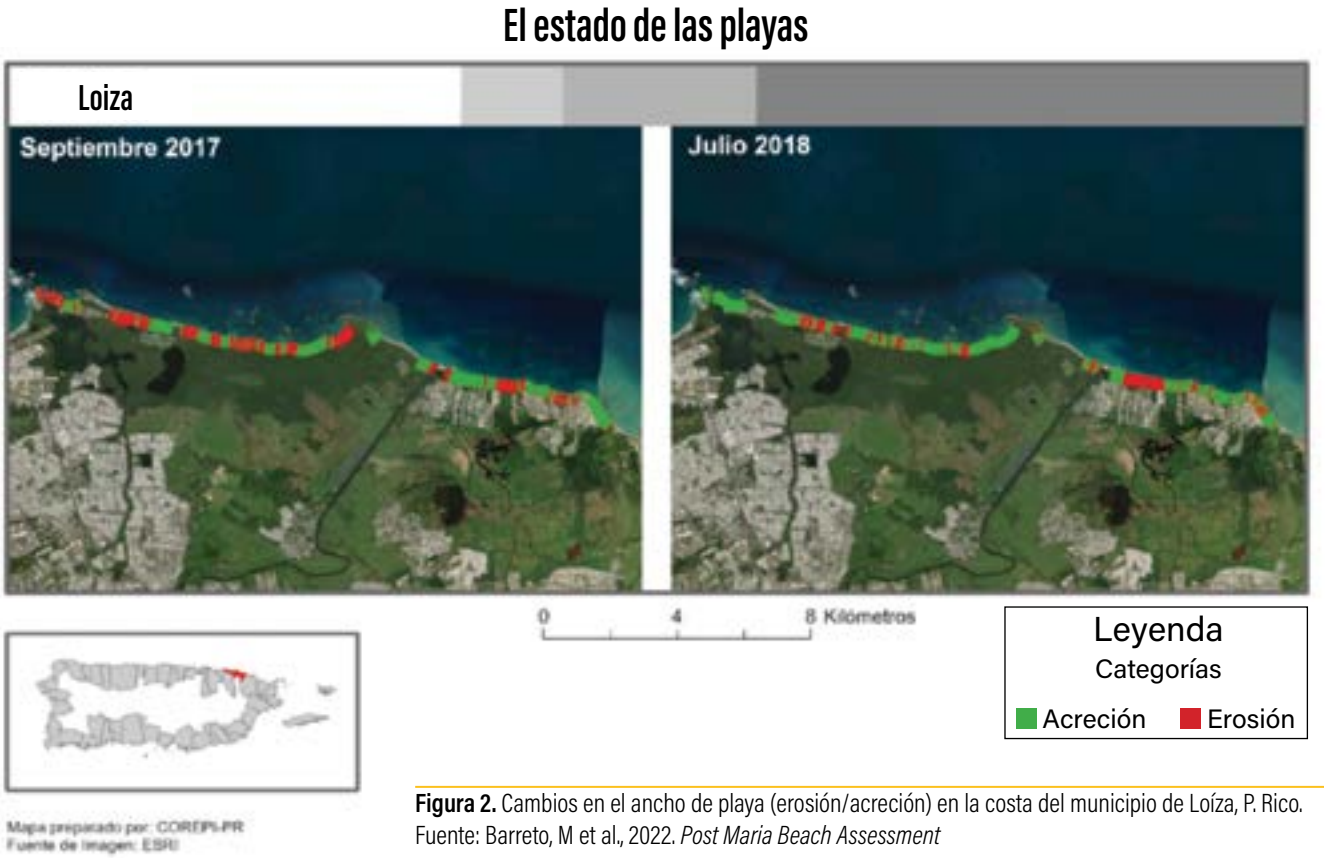


Figura 2. Cambios en el ancho de playa (erosión/acreción) en la costa del municipio de Loíza, P. Rico. Fuente: Barreto, M et al., 2022. *Post Maria Beach Assessment*

La costa de Carolina tiene una extensión de 6 km. El 81 % de la costa está compuesta por playas con extensiones de ancho que varían de 5 a 40 metros para 2018. El restante de la costa es mayormente de tipo antropogénico con estructuras duras (18 %).

Para septiembre de 2017, un 48 % de la costa playera del municipio presentó erosión. La zona afectada con mayor erosión fue Playa Hobbie y secciones del Balneario de Carolina. Para julio de 2018, estas playas recuperaron arena (Figura 3).

El municipio de San Juan tiene aproximadamente un 40 % de costa. El tipo predominante es la costa antropogénica (67 %). La costa antropogénica está compuesta mayormente de estructuras rígidas como mamparos (*bulkhead*), muelles, rompeolas, embarcaderos (*jetties*), espigones (*groynes*), línea de rocas o revestimientos (*rip-raps*) y paredes de concreto (*seawall*). Luego del paso del huracán María, la costa playera del municipio presentó mayormente acreción (91 %) (Figura 4). Para 2018, las playas del municipio comenzaron a experimentar un aumento en la erosión (47 %), principalmente en las zonas de la playa Puerta de Tierra, Playa del Ocho, secciones de las playas del Condado y Último Trolley.

El municipio de Guaynabo tiene una sección costera de 2.09 km. Esta corta sección de costa está mayormente compuesta de estructuras costeras (29.4 %). En el caso particular de Guaynabo, las secciones identificadas como playas son en realidad depósitos de sedimentos que no se clasifican como playas. Aproximadamente



El tipo de costa predominante en San Juan es la antropogénica (67 %), compuesta principalmente por estructuras rígidas, como muelles, rompeolas, líneas de rocas o revestimientos y paredes de concreto.

El estado de las playas

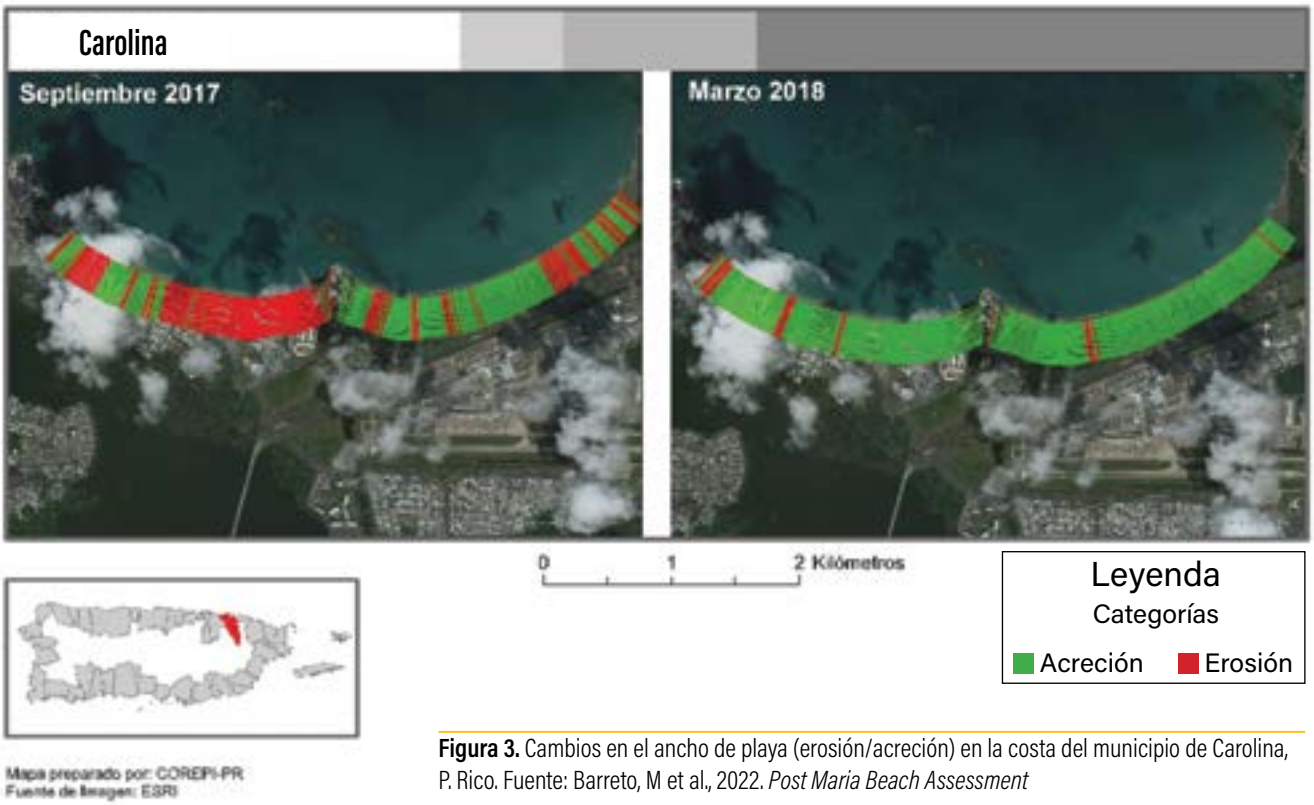


Figura 3. Cambios en el ancho de playa (erosión/acreción) en la costa del municipio de Carolina, P. Rico. Fuente: Barreto, M et al., 2022. *Post Maria Beach Assessment*

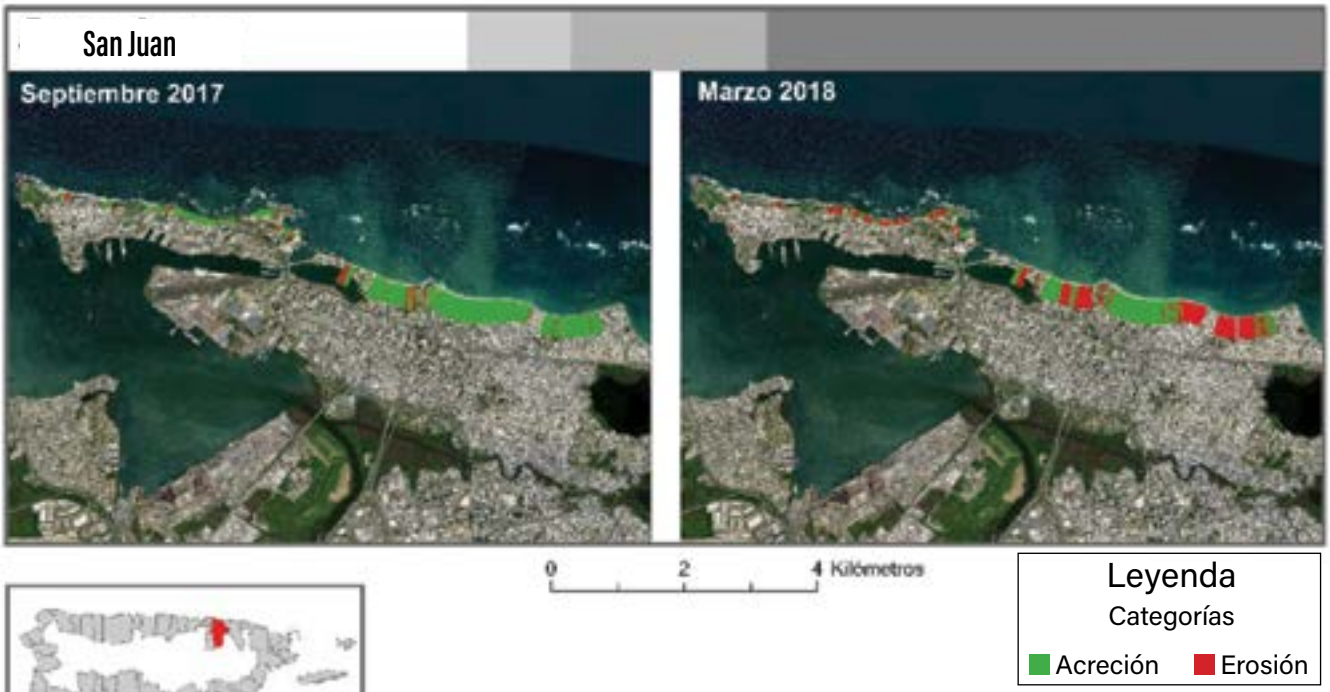


Figura 4. Cambios en el ancho de playa (erosión/acreción) en la costa del municipio de San Juan, P. Rico. Fuente: Barreto, M et al., 2022. *Post Maria Beach Assessment*

El estado de las playas

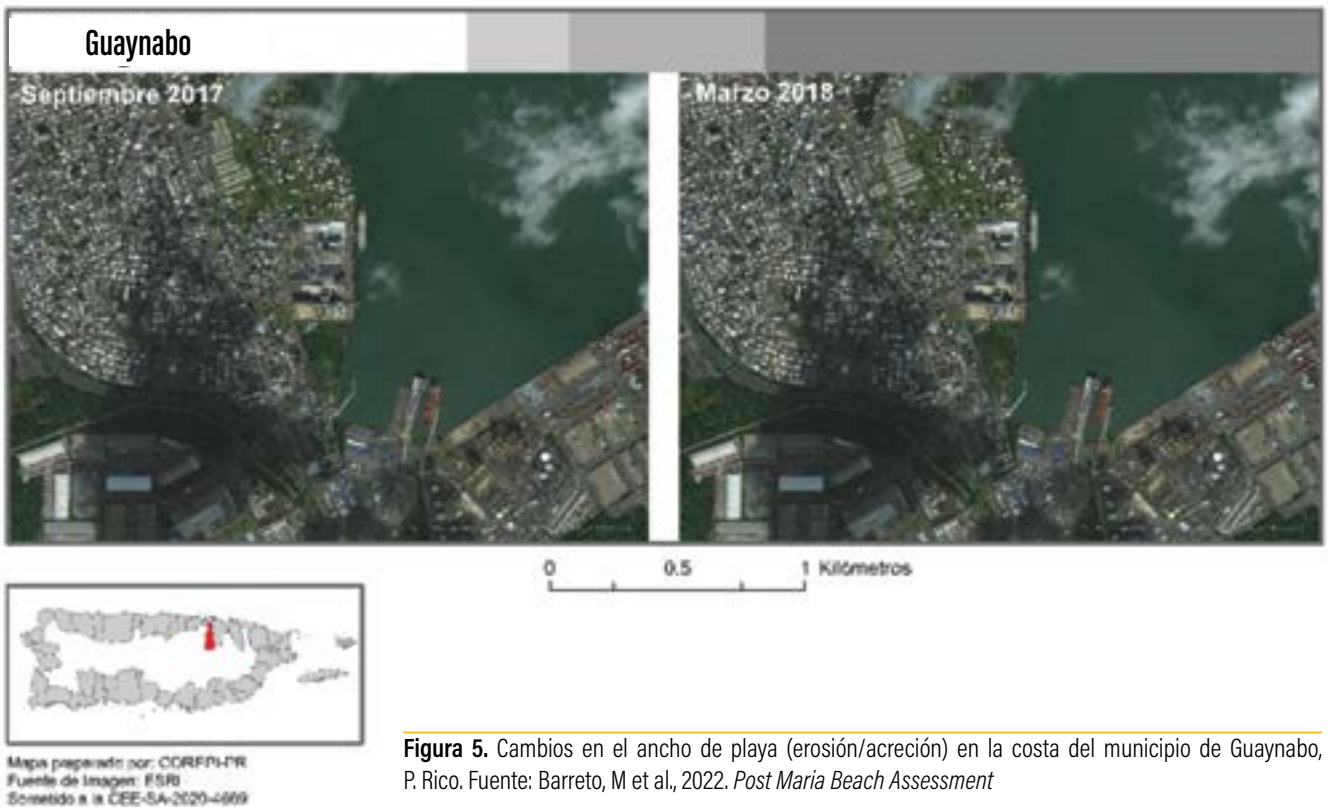


Figura 5. Cambios en el ancho de playa (erosión/acreción) en la costa del municipio de Guaynabo, P. Rico. Fuente: Barreto, M et al., 2022. *Post Maria Beach Assessment*

0.13 km de la costa presenta desplazamiento de la línea de agua tierra adentro para julio de 2018, en secciones de la costa al final de la Calle Principal y cerca del muelle de Puma Energy Oil (Figura 5).

La costa de Cataño tiene una extensión de 11.3 km. La mayoría de la costa está revestida de estructuras costeras de diversos tipos y tamaños (21.7 %). La costa de Cataño presenta playas (19 %), costa rocosa (18 %) y una extensa costa con vegetación (36 %). Para septiembre de 2017, se identifica una zona extensa de acreción en las pocas playas de la zona. Entre las zonas que presentan acreción se identifica la zona de costa del Parque La Esperanza. A diez meses del paso del huracán María, se continúa observando acreción en la zona. Aproximadamente 0.57 km de la costa presenta desplazamiento de línea de agua tierra adentro en el municipio para julio de 2018 (Figura 6). La mayor migración se observa en el Parque La Esperanza y la playa cerca de la desembocadura del caño Aguas Frías.

La costa de Toa Baja tiene una extensión de 18.6 km. El tipo de costa predominante es playa (47 %). Un 22 % de su costa está compuesta de costa rocosa y un 24 % de la costa es antropogénica con diversos tipos de estructuras duras. Para septiembre de 2017, la mayoría de las playas del municipio ganaron arena después del paso del huracán María (75 %). Para julio de 2018, se observó que hubo un aumento de eventos de erosión en secciones costeras del municipio, aunque todavía gran parte de las playas continúan ganando sedimentos. (Figura 7) Las playas con erosión se identificaron en secciones de la costa de Levittown (sección oeste) y Punta Salinas (sección oeste).

Carreteras estatales expuestas a erosión e inundación costera en el área del Estuario de la Bahía de San Juan

Se identifican 20 segmentos de carreteras estatales que están en zonas de erosión e inundación costera, según definidos en el geodato de erosión costera del proyecto *Post Maria Beach Assessment* y los mapas FIRMS (zona VE). La Tabla 1 muestra la identificación de carreteras estatales que presentan segmentos expuestos a erosión e inundación

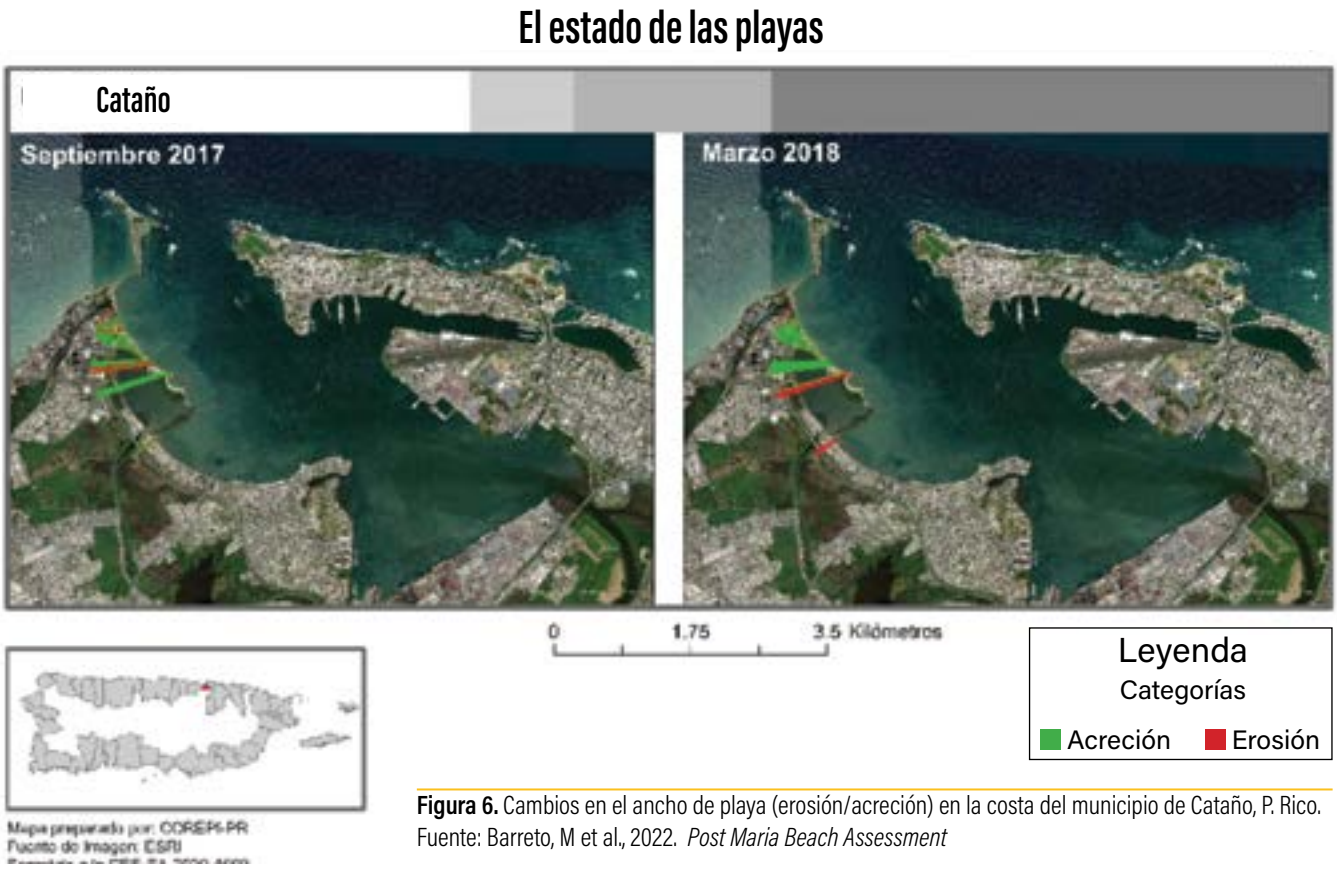


Figura 6. Cambios en el ancho de playa (erosión/acreción) en la costa del municipio de Cataño, P. Rico. Fuente: Barreto, M et al., 2022. *Post Maria Beach Assessment*

costera. El municipio de Toa Baja presenta 77 segmentos de carreteras expuestos a erosión e inundaciones en las PR-165, PR-868, PR-870 y PR-866 (Figura 8). El municipio de San Juan presenta 153 segmentos de carreteras expuestos a erosión e inundación costera en las PR-1, PR-37, PR-25 y PR-2 (Figura 9). La identificación de esta infraestructura aportará a identificar de manera proactiva áreas de exposición y vulnerabilidad de la infraestructura vial ante nuevos eventos de inundaciones. También aportará a preparar estrategias puntuales de mitigación, adaptación y relocalización de los segmentos de carreteras estatales para salvaguardar vida y propiedad.

Conclusiones

A partir de los hallazgos de la evaluación de los cambios de ancho de playa pos-María en los municipios por los que se extiende el Estuario de la Bahía de San Juan, no hay duda de que el huracán María produjo cambios importantes en sus playas. El huracán tuvo un doble efecto sobre la costa: produjo erosión y acreción en secciones costeras. En el caso de los eventos de erosión, se identifican en algunos casos segmentos de carreteras estatales afectados con erosión y que presentan alta exposición a inundaciones costeras debido a la reducción del umbral geomórfico de la zona.

Toa Baja	PR-165
	PR-868
	PR-870
	PR-866
Cataño	PR-888
	PR-24
	PR-875
	PR-165
	PR-5
Guaynabo	PR-24
San Juan	PR-1
	PR-37
	PR-25
	PR-2
Carolina	PR-37
	PR-26
	PR-187
Loiza	PR-187
	PR-951
	PR-965

Tabla 1. Segmentos de carreteras primarias expuestos a erosión e inundación costera en 1 km desde la línea de agua.

El estado de las playas

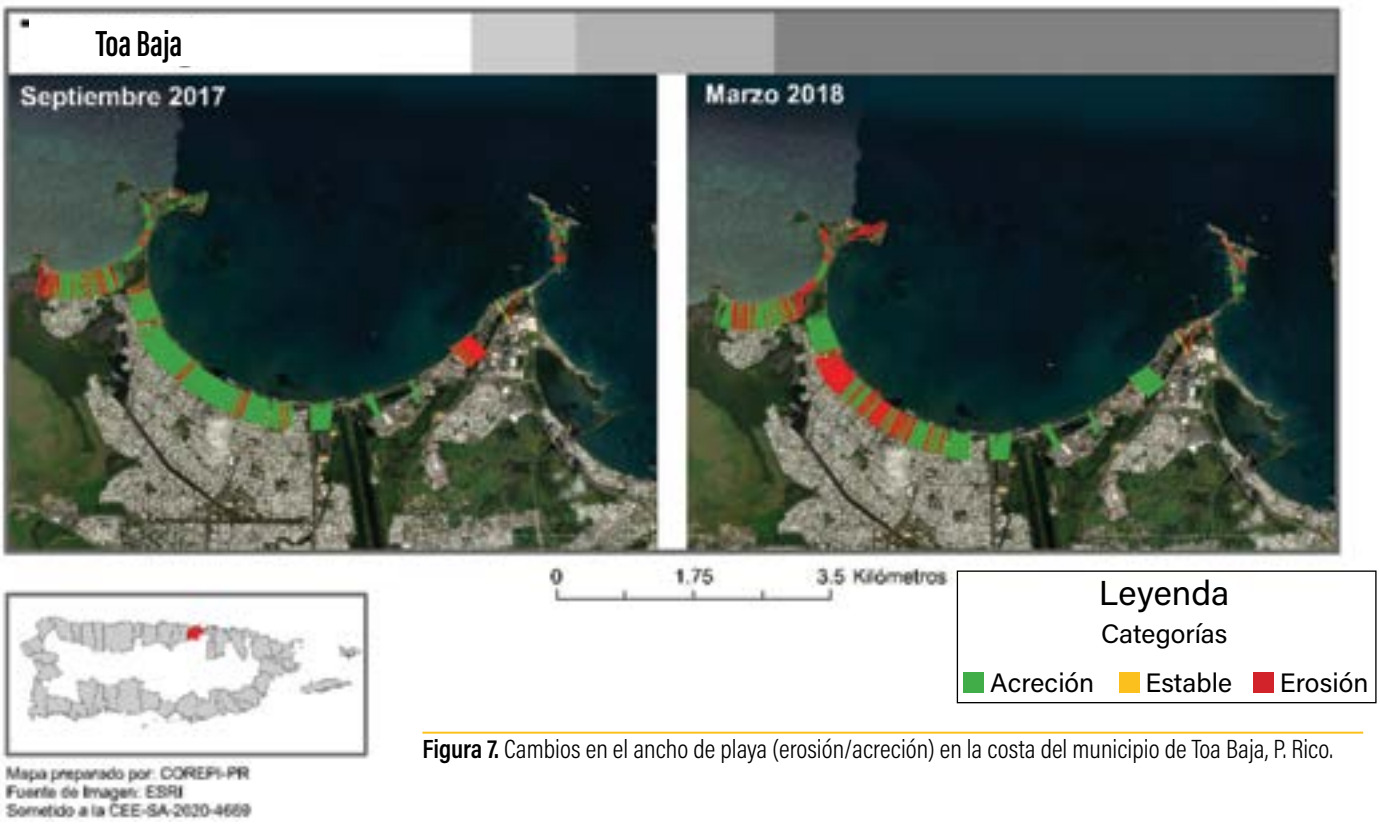


Figura 7. Cambios en el ancho de playa (erosión/acreción) en la costa del municipio de Toa Baja, P. Rico.

Los cambios geomorfológicos identificados en las playas para el periodo de 2018 validan que la geomorfología costera ha cambiado y presenta unos retos mayores dentro del marco de manejo y planificación costera de la región.

Recomendaciones

A partir de la situación de las playas ubicadas en el Estuario de la Bahía de San Juan se recomienda: 1) ordenar el territorio a partir de los escenarios actuales; 2) revisar y enmendar instrumentos de planificación para que se alineen a esta nueva realidad y 3) definir protocolos de manejo costero adecuados que se basen en los datos científicos geomorfológicos; 4) hacer revisiones de los cambios costeros en las áreas playeras al menos cada dos años.

Lecciones aprendidas

No alinearse ni entender la nueva realidad costera poshuracán llevaría a tomar decisiones de manejo y planificación inadecuadas, que podrían generar mayores problemas de erosión costera. Sin duda, conocer el estado de las playas será de gran ayuda para: 1) entender las condiciones costeras actuales y futuras; 2) identificar las implicaciones de este escenario desde la perspectiva de riesgo; y 3) validar los problemas enfrentados por los municipios relacionados con el problema de la erosión costera. Esto último ayudará a las comunidades y a los administradores de los municipios a delinear iniciativas que los apoyen en los procesos de preparación, reconstrucción y mitigación con el propósito de conseguir la resiliencia costera.

Mapa de Infraestructura de Transportación en la Línea de Costa de Toa Baja Julio 2018

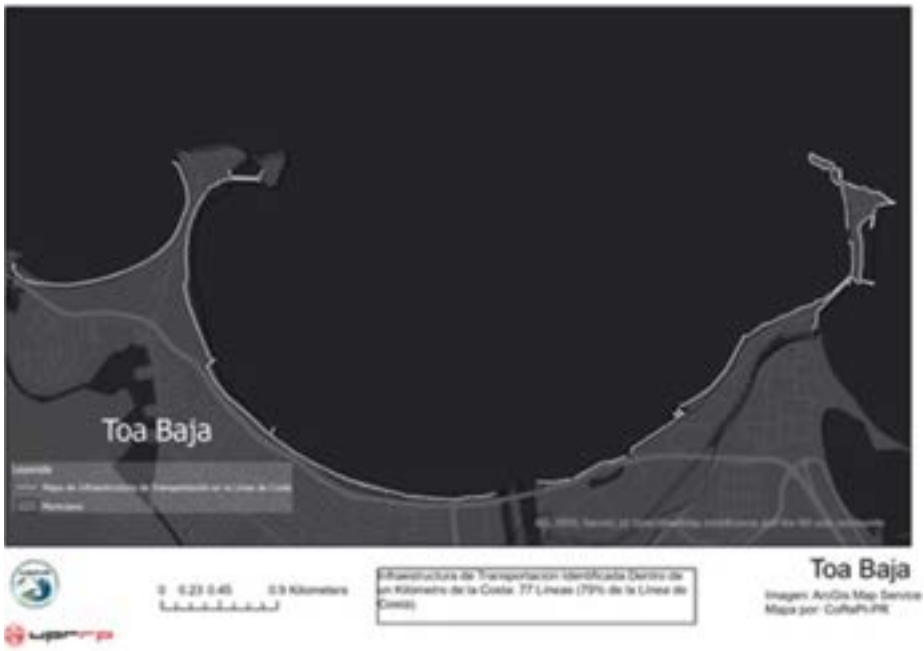


Figura 8. Segmentos de carreteras principales localizados a 1 km de la línea de agua que están expuestos a erosión e inundación costera, Toa Baja, P. Rico. Tomado de Barreto y Santos, 2022.

Mapa de Infraestructura de Transportación en la Línea de Costa de San Juan Julio 2018

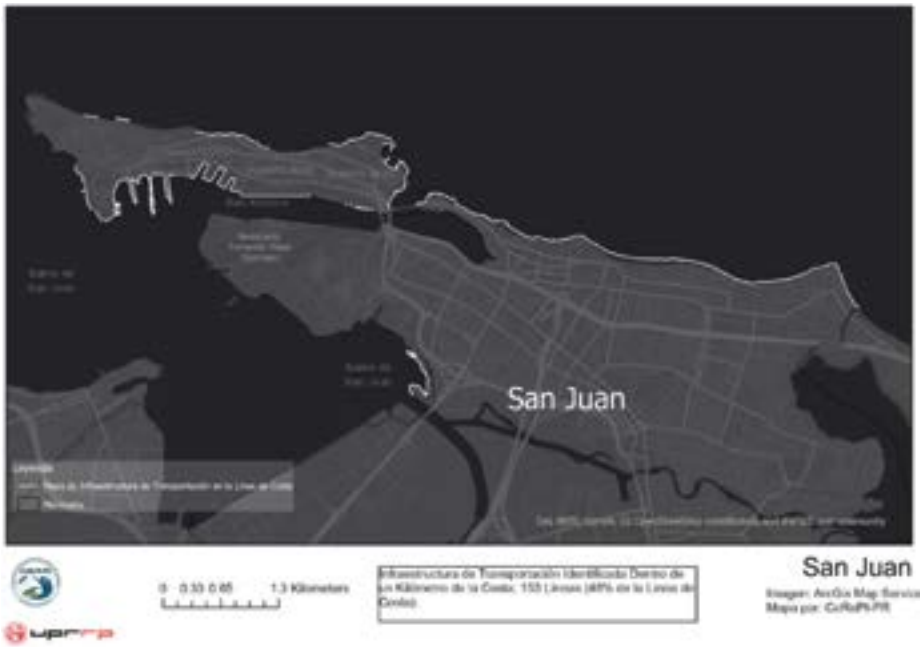


Figura 9. Segmentos de carreteras principales localizados a 1 km de la línea de agua que están expuestos a erosión e inundación costera, San Juan, P. Rico. Tomado de Barreto y Santos, 2022.

Modelado de nutrientes y sedimentos en la cuenca del Estuario de la Bahía de San Juan

Estaciones Meteorológicas de la NOAA

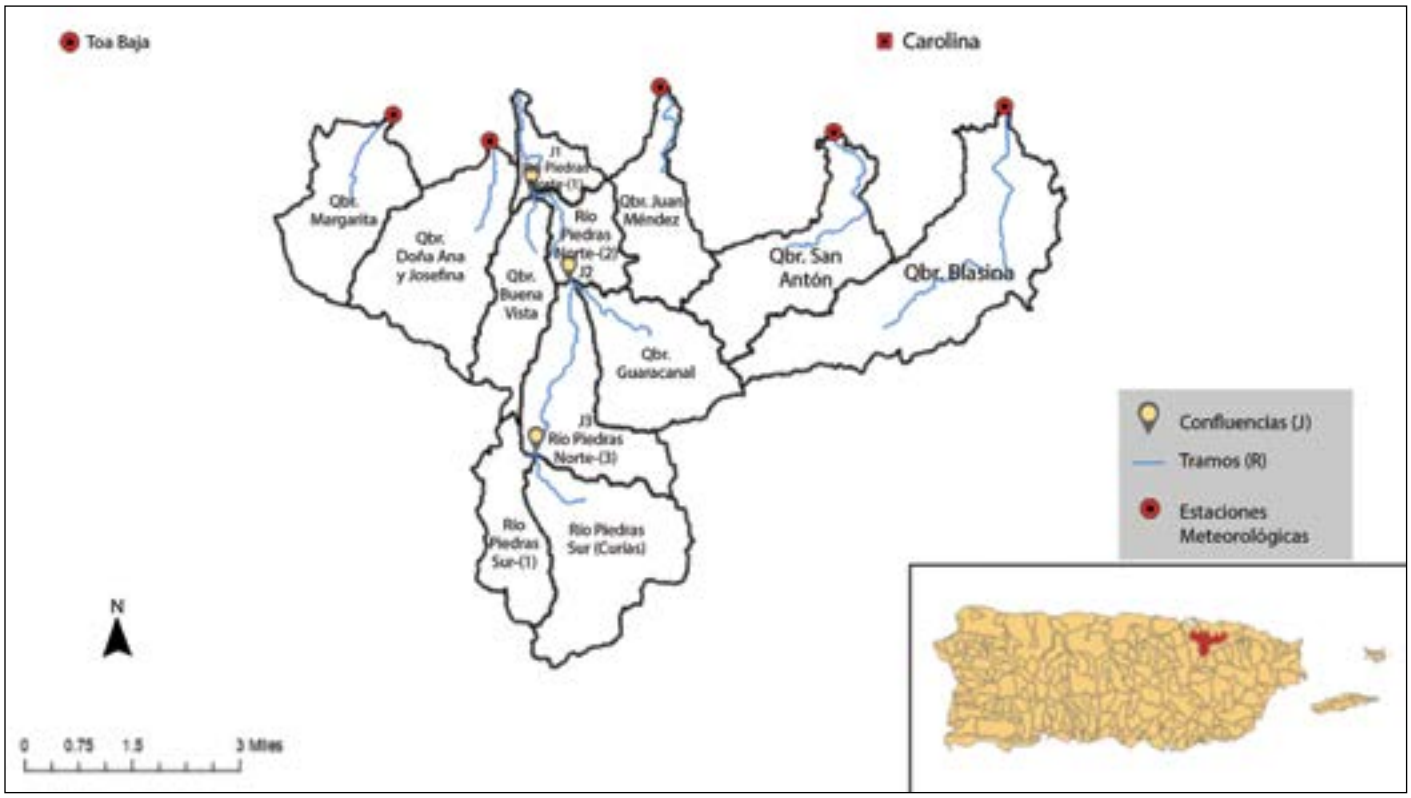


Figura 1. Estaciones meteorológicas (NOAA) en la cuenca del Estuario de la Bahía de San Juan.

Luis R. Pérez Alegría, PhD., PE
Catedrático UPR Mayaguez
Andrés Felipe Lizarazo Casilimas, M.Sc.
Egresado UPRM-INCI-Recursos de Agua

Descripción del área de estudio

El área de captación hidrológica del Estuario de la Bahía de San Juan (el estuario) está localizada entre los municipios de San Juan, Guaynabo, Caguas, Gurabo y Trujillo Alto (18° 19′ 40.38″ N; 66° 0′ 56.72″ W). Los principales usos del suelo son residencial-urbano, comercial (desarrollo comercial y financiero), industrial, recreacional y alberga una amplia red de infraestructura civil. En este estudio, el área del estuario se subdividió en 12 subcuencas hidrográficas que producen escorrentía superficial que eventualmente llegan a las aguas estuarinas cargando sedimentos suspendidos y de arrastre como nutrientes disueltos, principalmente nitrógeno y fósforo. Usando esta unidad de mapeo se determinaron los tipos de suelo que predominan en el área de estudio, el uso del suelo, un modelo de elevación digital (DEM) y la clasificación hidrológica de los suelos. La Figura 1 muestra el área de estudio, la red hidrológica y las subcuencas asociadas a los principales ríos y quebradas que sirven el área de estudio del estuario.

Este estudio se llevó a cabo para identificar el origen y cuantificar las cargas de sedimentos y nutrientes de cada uno de los usos del suelo en el área de captación del Estuario de la Bahía de San Juan. La identificación de las fuentes de sedimentos y nutrientes permitirá desarrollar planes de manejo del suelo y control de la erosión y sedimentación en el área para reducir

el impacto que estas cargas producen en el ecosistema acuático del estuario.

Para entender la dinámica generada en los procesos de transporte de sedimentos se desarrolló un modelo de simulación hidrológica continua que incorpora datos meteorológicos con las características hidrográficas e hidráulicas de la red de canales en la cuenca estuarina. Uno de esos modelos es el desarrollado por el Centro de Modelado Hidrológico del Ejército de Estados Unidos, denominado Sistema de Modelado Hidrológico (HEC-HMS). HEC-HMS simula procesos de precipitación y escorrentía de cuencas hidrográficas como las que contiene el área de captación del estuario (Kamal et al., 2022). Además, HEC-HMS incluye una versión modificada del modelo de erosión de suelos conocida como MUSLE, que se aplicó a cada una de las subcuencas y se utilizó para estimar la carga de sedimentos generados por acción antropogénica, el tipo de suelo, el uso del suelo y la precipitación en cada una de las subcuencas del estuario (Rodríguez González et al., 2022).

También se utilizó el conjunto de modelos de calidad del agua integrados al modelo hidráulico de ríos HEC-RAS para identificar y cuantificar el efecto del uso del suelo en el enriquecimiento de nutrientes (principalmente nitrógeno y fósforo) en el agua de los ríos y quebradas que drenan el área de captación del estuario. Este modelo tiene cuatro módulos de calidad de agua integrados (Temperatura, GCSM, NSNI, NSMII) para el análisis de la calidad del agua. Las capacidades del modelo de calidad del agua unidimensional (1D) HEC-RAS se han utilizado para respaldar estudios para análisis de carga diaria máxima total (TMDL) y otros estudios ambientales. Estudios recientes incluyen la cuenca del río Columbia-Snake, el río Misuri, la parte baja del río Minnesota y el río Patuxent en Estados Unidos. (USCACE-HEC, 2024).

En este trabajo se determinó la carga de sedimentos y nutrientes exportados en términos de las partículas del suelo (arenas, limos y arcillas) y en términos de nutrientes principales como fósforo total y nitrógeno total a través de los cuerpos de agua principales para el período comprendido entre el 1 de enero de 2020 hasta el 1 de febrero de 2024.

Metodología

Sistema de Información Geográfico (SIG)

El Estuario de la Bahía de San Juan se subdividió en 12 subcuencas para facilitar y determinar los usos del suelo, los tipos de suelo, DEM y clasificación hidrológica de los suelos, la red hidrológica y las subcuencas (Figura 1). La delineación de ríos, quebradas y cuencas hidrográficas se hizo mediante el DEM de 5-m de resolución, publicado por el Servicio Geológico de Estados Unidos —USGS— (2021).



Variable asignada	Land Use / Land Cover
Proyección de datos	Universal Transverse Mercator (UTM)
Medida	Global
Fuente de la imagen	Sentinel – 2
Tamaño de celda	10 m
Tipo	Temático
Fuente	ESRI, Microsoft, Impact Observatory
Año de la imagen	2021

Tabla 1. Descripción general de la fuente de datos, donde se obtuvo el uso del suelo (ESRI,2022).

Gridcode	Uso de suelo	Área (mi^2)	% Área
1	Agua	0.053	0.16
2	Forestal	3.40	10.04
7	Urbano	29.96	88.43
11	Pastizales	0.47	1.37
Total		33.88	100

Tabla 2. Distribución de los usos del suelo para el Estuario de la Bahía de San Juan en términos de área (mi) y en porcentaje (%) (ESRI, 2022).

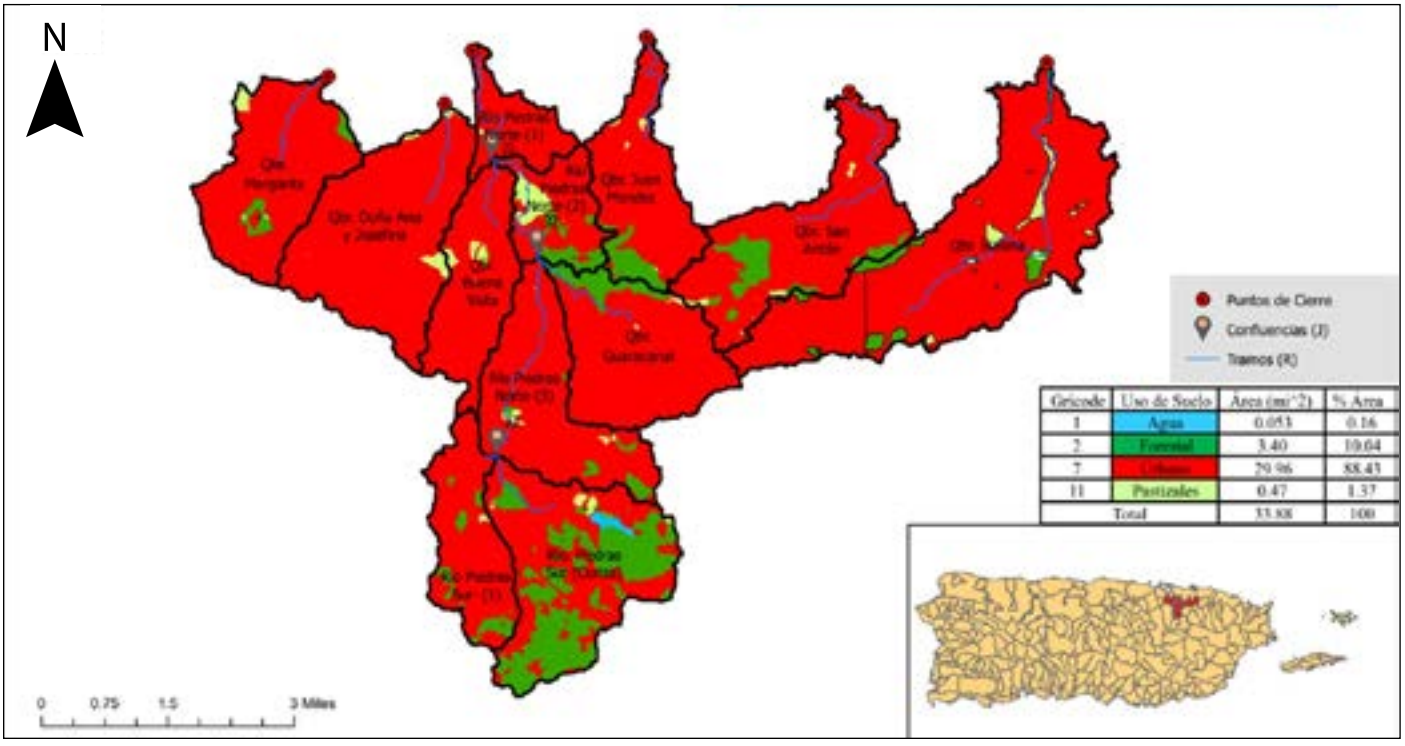
Usos del suelo

Los usos del suelo se determinaron mediante la clasificación supervisada de imágenes satelitales del sensor Sentinel-2 para el año 2022 (Tabla 1) y publicada por ESRI (2022).

La Tabla 2 muestra los usos de suelo obtenidos a partir de la imagen satelital clasificada partiendo de la imagen del satélite Sentinel-2 (ESRI, 2022). Como se puede observar, los principales usos del suelo en la cuenca del estuario son: urbano-comercial (88.43 %), forestal (10.04 %), pastizales (1.37 %) y agua superficial (0.16 %).

Figura 2. Mapa de los usos del suelo en la cuenca del Estuario de la Bahía de San Juan.

Usos del suelo en el área del Estuario de la Bahía de San Juan



Los suelos en el área del estuario se tomaron del USDA Web Soil Survey (USDA-NRCS, 2023) usando como unidad de mapeo las 12 subcuencas del estuario (Figura 2). Se identificaron las texturas de los suelos dominantes por subcuenca y se determinó el tamaño de las partículas del suelo en términos de arenas, limos y arcillas para cada unidad de suelo. Además, se tomaron otras propiedades físicas del suelo que son necesarias para el desarrollo del modelo de simulación continua de transporte de sedimentos. La Tabla 3 muestra los porcentajes de arenas, limos y arcillas para cada subcuenca con su respectiva densidad aparente (Da) y la clasificación de textura del suelo tomada del triángulo de textura (IGAC, 2022).

Tabla 3. Porcentajes de arcilla, limo y arena para cada una de las subcuencas del Estuario de la Bahía de San Juan.

Subcuenca	Arenas (RV) %	Limos (RV) %	Arcillas (RV) %	Densidad aparente (g/cm3)	Textura
Río Piedras Sur (Las Curías)	18.6	39	40.7	1.30	Franco Arcilloso
Río Piedras Sur (1)	18.6	39	40.7	1.30	Franco Arcilloso
Quebrada Guaracanal	19.4	36	43.8	1.35	Arcillo Limoso
Río Piedras Norte (3)	20.5	33.8	44.6	1.42	Arcilla
Quebrada Buena Vista	27.5	35.0	36.0	1.39	Franco Arcilloso
Río Piedras Norte (2)	18.6	41.9	38.4	1.42	Franco Arcilloso Limoso
Quebradas Doña Ana y Josefina	12.0	39.0	48.0	1.40	Arcilla
Río Piedras Norte (1)	18.6	41.9	38.4	1.4	Franco Arcilloso Limoso
Quebrada Margarita	17.0	33.0	49.0	1.44	Arcilla
Quebrada San Antón	20.3	39.0	39.3	1.43	Franco Arcilloso
Quebrada Blasina	18.9	39.3	41.1	1.43	Franco Arcilloso Limoso
Quebrada Juan Méndez	21.0	35.0	42.8	1.44	Arcilla



Las pendientes de las cuencas del estuario se determinaron mediante un DEM de 7m de resolución para cada una de las subcuencas (Tabla 4 y Figura 3).

Como parte de la metodología, se identificaron las texturas de los suelos dominantes por subcuenca y se determinó el tamaño de las partículas del suelo en términos de arenas, limos y arcillas para cada unidad de suelo.

Subcuenca	Arenas (RV) %	Limos (RV) %	Arcillas (RV) %	Densidad aparente (g/cm3)	Textura
Río Piedras Sur (Las Curías)	18.6	39	40.7	1.30	Franco Arcilloso
Río Piedras Sur (1)	18.6	39	40.7	1.30	Franco Arcilloso
Quebrada Guaracanal	19.4	36	43.8	1.35	Arcillo Limoso
Río Piedras Norte (3)	20.5	33.8	44.6	1.42	Arcilla
Quebrada Buena Vista	27.5	35.0	36.0	1.39	Franco Arcilloso
Río Piedras Norte (2)	18.6	41.9	38.4	1.42	Franco Arcilloso Limoso
Quebradas Doña Ana y Josefina	12.0	39.0	48.0	1.40	Arcilla
Río Piedras Norte (1)	18.6	41.9	38.4	1.4	Franco Arcilloso Limoso
Quebrada Margarita	17.0	33.0	49.0	1.44	Arcilla
Quebrada San Antón	20.3	39.0	39.3	1.43	Franco Arcilloso
Quebrada Blasina	18.9	39.3	41.1	1.43	Franco Arcilloso Limoso
Quebrada Juan Méndez	21.0	35.0	42.8	1.44	Arcilla

Tabla 3. Porcentajes de arcilla, limo y arena para cada una de las subcuencas del Estuario de la Bahía de San Juan.

Subcuenca	Promedio	STD	Mediana	Clasificación (FAO)	Clasificación (HMS)
Río Piedras Sur (Las Curías)	24.70	18.28	21.02	Moderadamente quebrada	5.72
Río Piedras Sur (1)	20.04	18.11	14.46	Moderadamente quebrada	5.72
Qbr. Guaracanal	10.83	13.07	6.11	Moderadamente inclinada	4.29
Río Piedras Norte (3)	11.36	12.17	7.02	Moderadamente inclinada	4.29
Qbr. Buena Vista	6.60	7.18	4.50	Ligeramente inclinada	2.86
Río Piedras Norte (2)	9.69	12.45	4.86	Ligeramente Inclinada	2.86
Qbr. Doña Ana y Josefina	4.93	4.33	3.79	Ligeramente inclinada	2.86
Río Piedras Norte (1)	3.31	4.41	2.19	A nivel / Casi nivel	1.43
Qbr. Margarita	6.79	9.18	4.47	Ligeramente inclinada	2.86
Qbr. San Antón	10.23	13.00	5.58	Moderadamente inclinada	4.29
Qbr. Blasina	6.07	9.76	3.16	Ligeramente inclinada	2.86
Qbr. Juan Méndez	7.61	10.41	4.16	Ligeramente inclinada	2.86

Tabla 4. Clasificación de las pendientes del terreno (%) para cada subcuenca del Estuario de la Bahía de San Juan.



Las pendientes facilitan el transporte de sedimentos a los cuerpos de agua estuarinos.

Pendientes en términos de porcentaje (%)

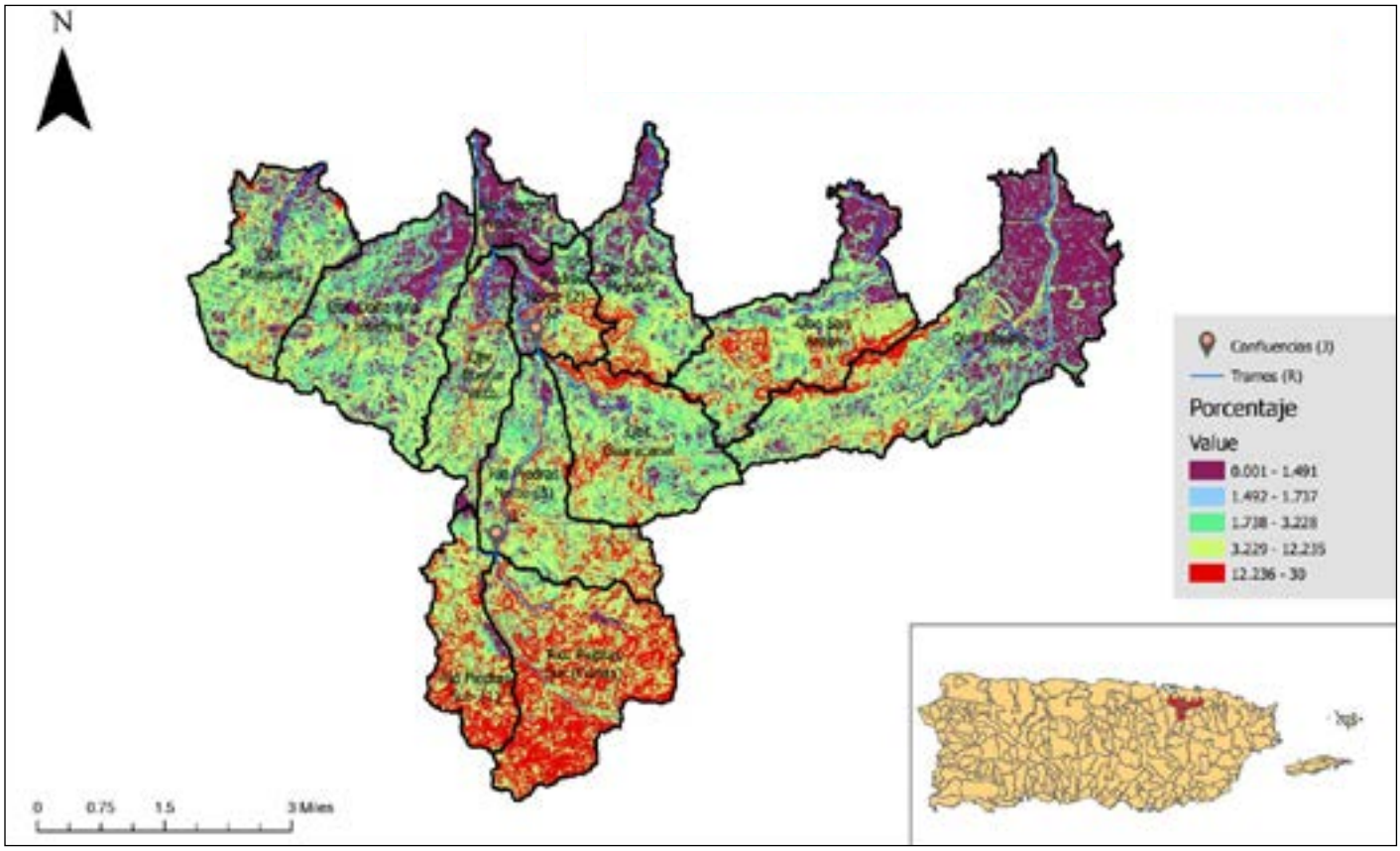


Figura 3. Pendientes en términos de porcentaje (%) en la cuenca del Estuario de la Bahía de San Juan.

Modelo de elevación digital (DEM)

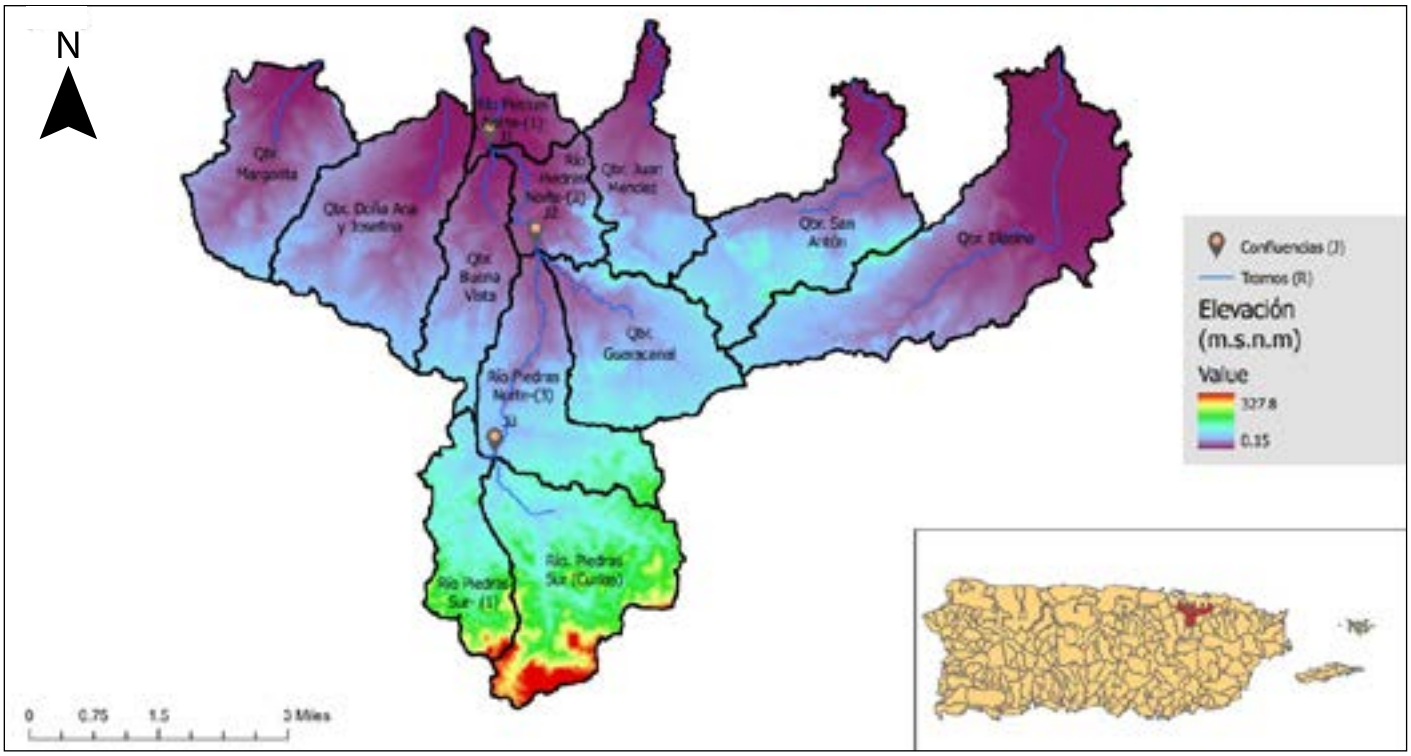


Figura 4. Modelo de elevación digital (DEM) en la cuenca del Estuario de la Bahía de San Juan.

Análisis de los eventos de tormenta

Estudios previos de Martínez et al. (2005) indican que más del 96 % de los sedimentos son transportados por eventos de tormenta. Por lo tanto, en el modelado hidrológico-hidráulico se usaron los datos de las estaciones meteorológicas provistas por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA, por las siglas en inglés). La Figura 1 muestra la localización de las estaciones meteorológicas empleadas para el análisis y la Tabla 5 muestra sus descripciones.

Tabla 5. Descripción de las estaciones meteorológicas empleadas para los análisis de tormenta

Nombre	Código	Coordenadas geodésicas	Elevación (msnm)	Fecha de inicio	Fecha final	Cobertura
Toa Baja Levittown, US	669415	18.4356, -66.1678	8.5	1/1/2020	2/1/2024	90 %
Carolina, 1.7NNW, US	6	18.431143, -65.991773	2.7	1/1/2020	2/1/2024	100 %

Modelo de simulación continua de escorrentía superficial, HEC-HMS

Para el desarrollo del modelo de simulación hidrológica de escorrentía superficial en HEC-HMS versión 4.11, se incorporaron los datos meteorológicos a cada una de las subcuencas definidas para el estuario. Las estaciones meteorológicas se muestran en la Figura 1 y Tabla 5; y se asignaron tal como se muestra en la Tabla 6.

Las estaciones meteorológicas (Tabla 6) poseen datos de precipitación continuas que fueron registrados por estaciones oficiales de la NOAA para el período comprendido desde el 1 de enero de 2020 hasta el 1 de febrero de 2024. En este mismo período de tiempo se tomaron datos de sedimentos suspendidos y de nutrientes disueltos (nitrógeno y fósforo total) en los ríos de la red hidrológica del estuario.

Subcuenca	Estación meteorológica
Río Piedras Sur (Las Curías)	Carolina
Río Piedras Sur (1)	Carolina
Qbr. Guaracanal	Carolina
Río Piedras Norte (3)	Carolina
Qbr. Buena Vista	Toa Baja
Río Piedras Norte (2)	Toa Baja
Qbr. Doña Ana y Josefina	Carolina
Río Piedras Norte (1)	Toa Baja
Qbr. Margarita	Carolina
Qbr. San Antón	Carolina
Qbr. Blasina	Carolina
Qbr. Juan Méndez	Carolina

Tabla 6. Asignación de las estaciones meteorológicas para las subcuencas.

HEC-HMS tiene una interfaz que utiliza SIG para crear elementos hidrológicos (archivos de entrada) a HEC-HMS, el cual contiene los parámetros y las especificaciones de control para la simulación continua de escorrentía superficial como los que se muestran en la Figura 5 y Tabla 7.

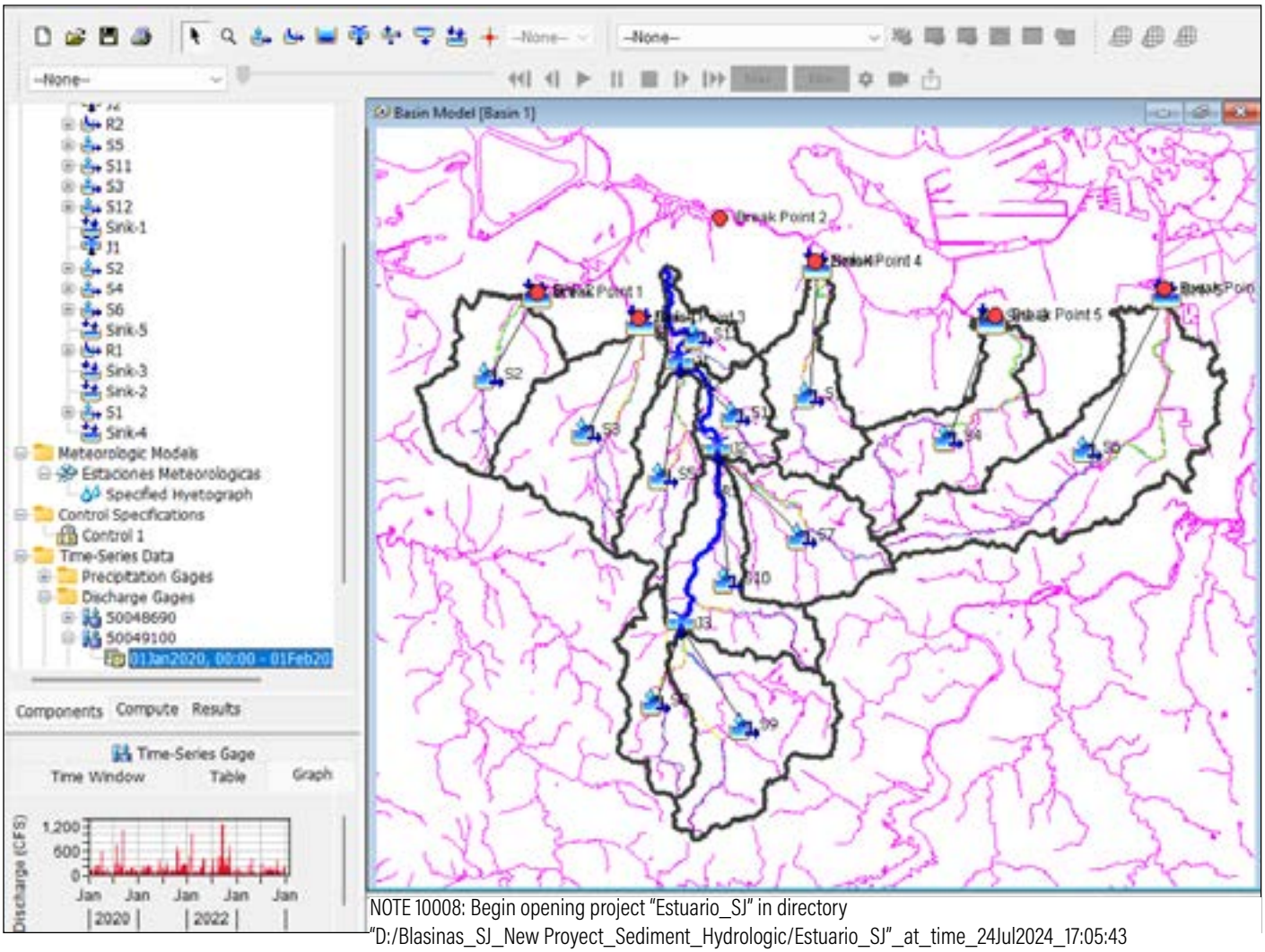


Figura 5. Interfase de HEC-HMS con los elementos hidrológicos.

Elementos Hidrológicos	Descripción
Tramos (R)	Es un elemento con una o más entradas y una sola salida. Si hay más de una entrada, todas las entradas se suman antes de calcular la salida. Su función es el transporte de agua (ríos o quebradas).
Subcuencas (S)	Es un elemento que no tiene entrada y solo una salida. Es una forma de producir flujo en el Modelo de Cuenca.
Confluencias (J)	Combinan múltiples flujos de entrada.
Punto de Cierre (Sink-1)	Salida de una cuenca. Punto de cierre del área de captación.

Tabla 7. Descripción de los elementos hidrológicos o archivos de entrada.

Tramo (R)	Longitud (pie)	Pendiente (pie/pie)	Manning (n)	Método índice	Flujo índice (pie3/s)	Sección transversal
R3	15774.528	0.00608	0.06	Flow	26.23	R3
R2	10110.619	0.00298	0.014	Flow	31.22	R2
R1	10399.646	0.00112	0.014	Flow	59.06	R1

Tabla 8. Parámetros establecidos para cada uno de los tramos que emplea el método de Muskingum-Cunge.

Método de rastreo hidrológico (Muskingum-Cunge)

Se utilizó el método de rastreo hidrológico de Muskingum-Cunge para modelar los procesos hidrológicos-hidráulicos en los tramos de los ríos de las cuencas. En este método se implementan las ecuaciones de flujo no permanente completas (USACE-HMS, 2022). Este método se basa en la conservación de masa, importante en el transporte de sedimentos. Además, los parámetros de rastreo se recalculan en cada intervalo de tiempo en función de las propiedades del canal, las profundidades de flujo y se puede usar en tramos de poca pendiente (USACE-HMS, 2022). La Tabla 8 muestra los parámetros usados y sus valores para los tramos del canal: R1, R2 y R3.

Las secciones transversales de los canales para los tramos R1, R2 y R3 se tomaron con una estación de agrimensura total Trimble R12. Los valores de rugosidad de Manning (n) para cada tramo del canal se asignaron mediante observación de campo; y se cotejaron con los valores establecidos por Ven Te Chow (1959) y con los manuales de HEC-RAS.

El coeficiente de Manning compuesto se calculó con la ecuación de Horton (Ven Te Chow, 1959) como se describe en la ecuación 1.

$$n_c = \left[\frac{\sum_{i=1}^{N} P_o n_i^{\frac{3}{2}}}{P_m} \right]^{\frac{2}{3}} \quad (1)$$

Donde,

n_c = rugosidad compuesta.

P_o = el perímetro mojado para cada uno de los bancos y el lecho.

n_i = factor de rugosidad de Manning que corresponde a cada frontera sólida en banco y el lecho bajo consideración.

P_m = perímetro mojado total de la sección transversal.

Método de transformada (onda cinemática)

Para el método de transformada se usó la transformada de onda cinemática. Los parámetros de esta ecuación se obtuvieron del

Subcuenca	Tipo de gráfico	Tiempo de concentración (min)
Río Piedras Sur (Las Curías)	Standard (PRF 484)	64.99
Río Piedras Sur (1)	Standard (PRF 484)	22.99
Qbr. Guaracanal	Standard (PRF 484)	43.76
Río Piedras Norte (3)	Standard (PRF 484)	49.46
Qbr. Buena Vista	Standard (PRF 484)	57.99
Río Piedras Norte (2)	Standard (PRF 484)	45.91
Qbr. Doña Ana y Josefina	Standard (PRF 484)	63.19
Río Piedras Norte (1)	Standard (PRF 484)	47.32
Qbr. Margarita	Standard (PRF 484)	52.74
Qbr. San Antón	Standard (PRF 484)	68.30
Qbr. Blasina	Standard (PRF 484)	89.94
Qbr. Juan Méndez	Standard (PRF 484)	64.97

Tabla 9. Parámetros y tiempos de concentración para cada subcuenca.



procesamiento del DEM usando herramientas de SIG disponibles en HEC-HMS y se validaron en ArcGIS-Pro. Los resultados se observan en la Tabla 9, que corresponden al tiempo de concentración para las 12 subcuencas; se calculó este parámetro para poder compararlo con métodos más simples de transformadas y poder validar los datos obtenidos de las ondas cinemáticas, ya que son cálculos complejos y es necesario validar dicha información.

Para la selección del PRF, se usó el criterio establecido por USACE-HEC que indica que para cuencas planas generalmente tienen un PRF más bajo que puede ser 100; y para las cuencas con mayor pendiente el PRF puede llegar a 600. Y para hidrogramas unitarios se usó el valor de 484.

Método de déficit y constante

El déficit de humedad inicial del suelo se calculó mediante la ecuación 2 que determina la lámina inicial de agua en el suelo. La profundidad de la lámina de agua para cada una de las subcuencas se determinó usando la densidad aparente y la profundidad del horizonte o capa activa del suelo (Tabla 3). Se usó una profundidad activa del suelo de 9.84 pulgadas (25 cm). Se hizo una variación de humedad a base de (Wi) con valores desde 65 %, 50 %, 45 %, 30 %, 25 % y 10 % como se observa en la Tabla 2.10.

$$lam = W_i * D_a * Prof \quad (2)$$

Donde,

W_i = contenido de humedad gravimétrica al inicio con base en masa (%).

D_a = densidad aparente (lb/pulg3).

Prof = profundidad del suelo expresada en (pulg).

Lam = contenido de humedad del suelo expresado en lámina equivalente, pulg

El Déficit Máximo de humedad en el suelo (DM) se calcula con la porosidad (η) para cada una de las subcuencas con la ecuación 3. La Tabla 10 muestra los resultados obtenidos para el DM.

$$DM = (\eta - PMP) * Prof \quad (3)$$

Subcuenca	Porosidad	Punto de Marchitez Permanente (PMP)	Déficit Máximo (pulg)
Río Piedras Sur (Las Curías)	0.51	0.2	3.03
Río Piedras Sur (1)	0.51	0.2	3.03
Qbr. Guaracanal	0.49	0.25	2.35
Río Piedras Norte (3)	0.47	0.27	1.92
Qbr. Buena Vista	0.48	0.2	2.73
Río Piedras Norte (2)	0.46	0.21	2.51
Qbr. Doña Ana y Josefina	0.47	0.27	1.99
Río Piedras Norte (1)	0.46	0.21	2.51
Qbr. Margarita	0.46	0.27	1.86
Qbr. San Antón	0.46	0.2	2.55
Qbr. Blasina	0.46	0.21	2.45
Qbr. Juan Méndez	0.46	0.27	1.83

Tabla 10. Resultados de Déficit Máximo para cada una de las subcuencas del Estuario de la Bahía de San Juan.

Donde,

DM = Déficit Máximo (pulg).

PMP = Punto de Marchitez Permanente (pulg3/pulg3).

Prof = profundidad del horizonte de suelo o capa activa (pulg).

Modelo de transporte de sedimentos en HEC-HMS

Para el desarrollo del modelo de transporte de sedimentos es necesario definir el potencial de transporte (Laursen-Copeland) y los coeficientes de la ecuación MUSLE y definir variables y factores de cada una de estas ecuaciones como se presentan en las siguientes secciones.

Método de potencial de transporte

La función Laursen-Copeland requiere de parámetros iniciales los cuales son definidos por el programa y se muestran en la Tabla 11.

Gravedad específica (SG)	2.65
Peso unitario de arcillas (lb/pie3)	30
Peso unitario de limos (lb/pie3)	65
Peso unitario de arenas (lb/pie3)	93
Velocidad de caída	Van Rijn
Grado de escala	Arcilla, Limo, Arena y Grava

Tabla 11. Parámetros iniciales para el método de potencial de transporte (Laursen-Copeland).

Método de pérdida por la ecuación universal de erosión de suelos (MUSLE)

En este trabajo se seleccionó la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos Modificada (MUSLE) para cuantificar el potencial de erosión en las cuencas del estuario. Esta ecuación tiene cinco factores (Ecuación 4), obtenidos de la base de datos del NRCS en su plataforma de Web Soil Survey (USDA-NRCS, 2023) y procesados en la aplicación ArcGIS-Pro.

El factor de erodabilidad (*Kf*) de los suelos (Tabla 13) se obtuvo de las propiedades físicas de cada suelo *Kf*, publicados por el NRCS para Puerto Rico (USDA-NRCS, 2023). Los valores para el factor topográfico (*LS*) se tomaron de la Tabla 2.4 de la columna (Clasificación HMS).

Para los factores de cobertura (*C*), se define el efecto de la cubierta vegetal sobre la erosión; se asignó según definido por Morgan (2009). Estos valores se reconocen en la literatura según Kuok et al. (2013) y dependen también de cómo la precipitación erosiva se distribuye a lo largo del año simulado (Tabla 12).

$$Sed = 11.8\,(Q_{sup} \times q_{pico})^{0.56} \times Kf \times LS \times C \times P \qquad (4)$$

Donde,

Sed = producción de sedimento por evento de lluvia (Ton).

Q_{sup} = volumen de escorrentía superficial (pulg).

q_{pico} = tasa máxima de escorrentía (pie^3/s).

Kf = factor de erodabilidad del suelo.

LS = factor topográfico.

C = factor de cobertura.

P = factor de práctica de conservación.

Factor de prácticas de conservación, P. El valor de este factor se estableció usando la distribución de usos del suelo para el área de estudio (Figura 2), en donde el 10.04 % del área de la cuenca es de uso forestal, seguido del uso urbano con 88.43 % y pastizales 1.37 % del área total de la cuenca. Las zonas forestales son autosostenibles, las áreas urbanas son sostenibles siempre que exista un control de mitigación del impacto humano sobre las áreas forestales y que cuenten con todos los parámetros de seguridad (sobre todo, atención y mitigación de desastres). Se usó el siguiente rango para asignar valores de las prácticas de conservación en el área de estudio y que fueron tomadas de Kaberia et al. (2023), como se muestra en la Tabla 13.

Usos de suelo	Factor de cobertura (*C*)
Pastizales	0.06
Suelo desnudo	1
Agricultura	0.15
Urbano	0.03
Agua	0
Forestal	0.01

Tabla 12. Tabla de factor de cobertura (C) basado en el uso del suelo (Morgan, 2009).

0	Prácticas perfectas
0.5	Prácticas intermedias
1	No hay prácticas

Tabla 13. Rangos de clasificación para el factor de práctica (P).



Curvas de gradación (granulometría) para las subcuencas

La curva granulométrica de los suelos se obtuvo de la plataforma de Web Soil Survey (USDA-NRCS, 2023. Además, se desarrollaron las curvas de granulometría con los siguientes tamices: 4, 10, 40 y 200, granulometrías provistas por el NRCS (2023); y con esos datos se construyeron las curvas de granulometría para las 12 subcuencas pertenecientes al estuario. En la Figura 6, se muestra un ejemplo de la curva granulométrica asignada a la subcuenca Río Piedras Sur (Las Curías).

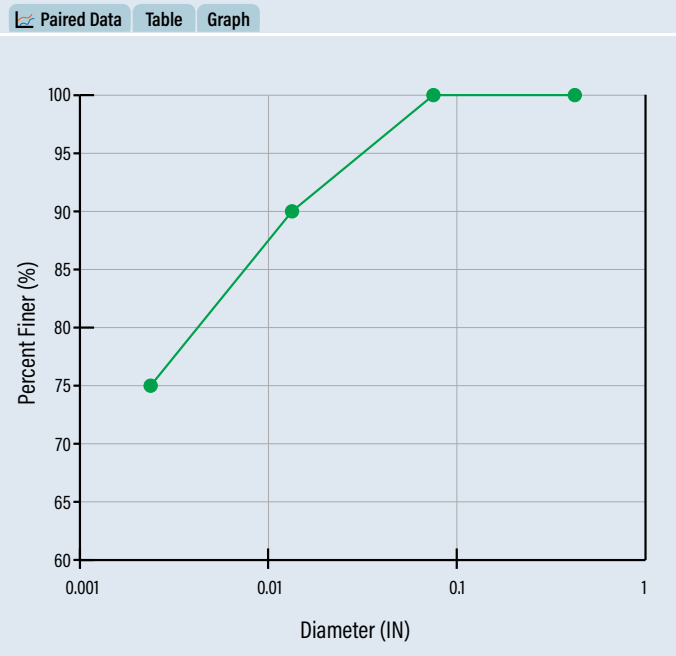


Figura 6. Curva granulométrica asignada a la subcuenca Río Piedras Sur (Las Curías).

Parámetros o factores asignados en el método de erosión (MUSLE) a cada subcuenca

Una vez definidos cada uno de los parámetros o factores que se mencionaron en los subíndices anteriores, se excluye el subíndice del método de potencial de transporte, ya que no es parte del cálculo de MUSLE. Con los demás subíndices se asignan los parámetros o factores que requiere el método de MUSLE, como se muestra en la Tabla 14. Estos se asignan a cada una de las 12 subcuencas.

Tabla 14. Parámetros de la ecuación universal de pérdida de suelos modificada (MUSLE).

Subcuenca	Factor de Erodabilidad (Kf)	Factor topográfico (LS)	Factor de cobertura (C)	Factor de práctica (P)	Threshold (pie/s)	Exponente	Curva Gradación
Río Piedras Sur - (Curías)	0.24	5.72	0.021	0.5	1	0.75	Río Piedras Sur - (Curías) Granulometría
Río Piedras Sur - (1)	0.24	5.72	0.028	0.5	1	0.75	Río Piedras Sur - (1) Granulo-metría
Qbr. Cuaracanal	0.19	4.29	0.028	0.5	1	0.75	Qbr. Guaracanal Granulometría
Río Piedras Norte - (3)	0.19	4.29	0.03	0.5	1	0.75	Río Piedras Norte (3) Granulometía
Qbr. Buena Vista	0.2	2.86	0.031	0.5	1	0.75	Qbr. Buena Vista Granulo-metría
Río Piedras Norte - (2)	0.24	2.86	0.03	0.5	1	0.75	Río Piedras Norte - (2) Granulometría
Qbr. Doña Ana y Josefina	0.2	2.86	0.031	0.5	1	0.75	Qbr. Doña Ana y Josefina Granulometía
Río Piedras Norte - (1)	0.25	1.43	0.03	0.5	1	0.75	Río Piedras Norte - (1) Granulometría
Qbr. Margarita	0.2	2.86	0.03	0.5	1	0.75	Qbr. Margarita Granulometría
Qbr. San Antón	0.22	4.29	0.028	0.5	1	0.75	Qbr. San Antón Granulometría
Qbr. Blasinas	0.2	2.86	0.03	0.5	1	0.75	Qbr. Blasinas Granulometría
Qbr. Juan Méndez	0.2	2.86	0.028	0.5	1	0.75	Qbr. Juan Méndez Granulometría

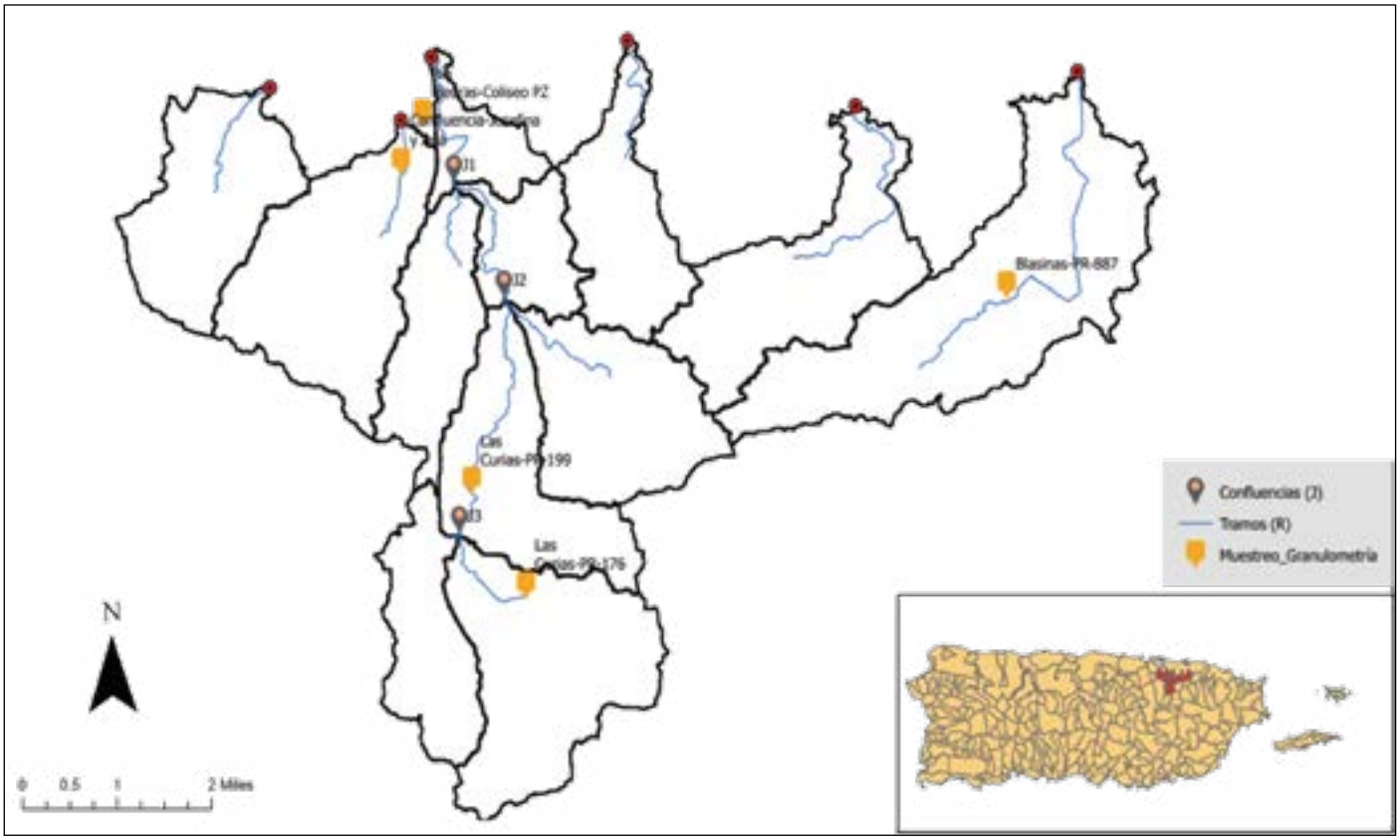


Figura 7. Localización de los puntos de muestreo para análisis granulométrico en la cuenca hidrografía del Estuario de la Bahía de San Juan.

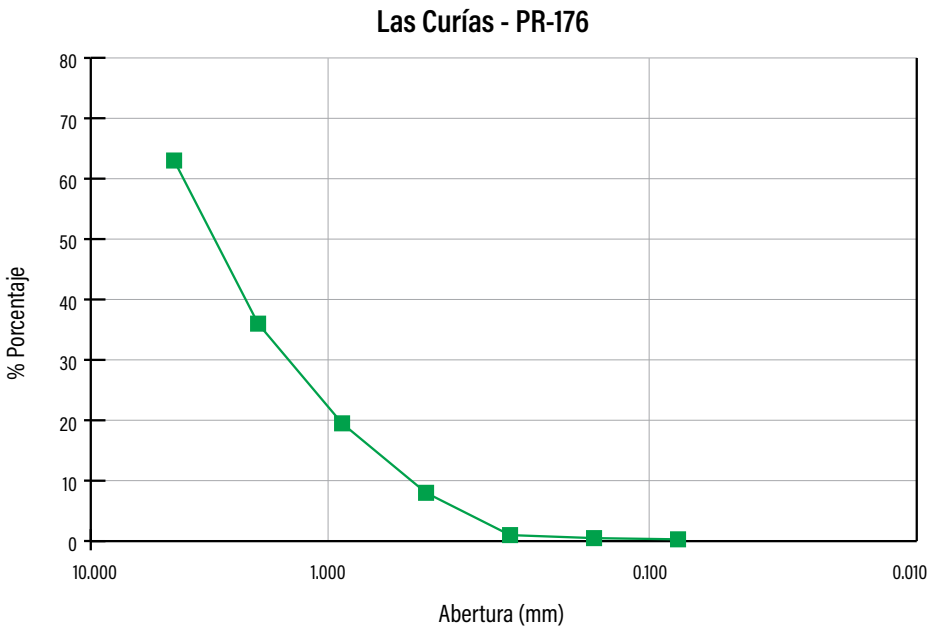


Figura 8. Resultados del análisis de granulometrías para la quebrada Las Curías.

Método de relación y volumen

En el desarrollo del modelo de transporte de sedimentos usando el método de relación volumen, es necesario determinar, para cada tramo (R) de la red hídrica, el flujo de la corriente y su capacidad de transportar material erosionado. En la rutina de cálculo se requieren las siguientes propiedades: muestras del lecho del canal para el desarrollo de la curva de granulometría inicial, ancho del lecho y profundidad del sedimento en el lecho. Estas mediciones se hicieron en campo con una estación total Trimble R12. Se tomaron muestras del lecho del tramo del canal y la profundidad del lecho (Figura 7). Las muestras se procesaron en el laboratorio de suelos en INCI-UPRM.

Los resultados del análisis de granulometrías para la quebrada Las Curías se observan en las Figura 8 como ejemplo. Otras curvas similares a la Figura 8 se desarrollaron para los otros ríos y quebradas de la cuenca del estuario (Lizarazo y Pérez-Alegría, 2024).

La Tabla 15 muestra los parámetros para los tramos de ríos y profundidad del sedimento en el lecho del río disponible para arrastre (método de relación volumen).

Calibración del modelo hidrológico - HEC-HMS

La calibración del modelo hidrológico en HMS se hizo comparando los resultados de la simulación con los datos de flujos observados en las estaciones de aforo del USGS. Para esto, utilizamos las confluencias marcadas como J1, J2 y J3 (mostradas en la Figura 9) y los datos observados en la Tabla 16.

Tramo (R)	Curva inicial del lecho (Granulometría)	Ancho del lecho (pie)	Profundidad del lecho (pie)
R3	PR-176 - Las Curías-Granulometría	57.65	0.4921
R2	PR-199 - Granulometría	49.87	0.328
R1	PR-887 - Granulometría	50.25	1.575

Tabla 15. Parámetros establecidos para cada tramo (R).

Nombre	Código USGS	Coordenadas geodésicas	Fecha de inicio	Fecha final
Río Piedras at Hato Rey	50049100	18.4075533; -66.06894369	1/1/2020	1/2/2024
Quebrada Josefina at Piñero Avenue	50049310	18.40717006; -66.075166	1/1/2020	1/2/2024
Qda. Margarita at Caparra Inter. NR Guaynabo	50049620	18.4135311; -66.1029717	1/1/2020	1/2/2024

Tabla 16. Estaciones del USGS disponibles en el Estuario de la Bahía de San Juan.

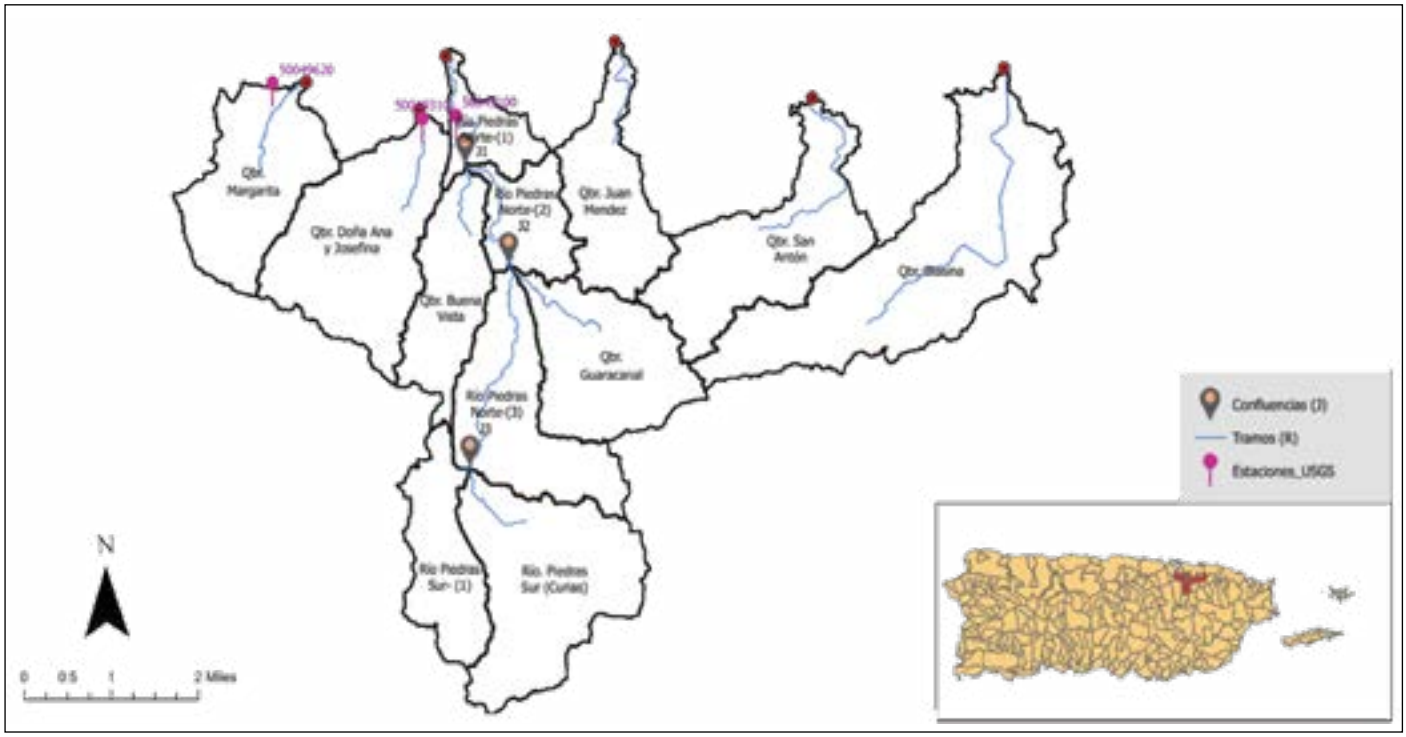


Figura 9. Localización de las estaciones del USGS y las confluencias (J) utilizadas para comparar los datos de las simulaciones.

Confluencias	Estaciones USGS
J1	50049100
Qbr. Doña Ana y Josefina	50049310
Qbr. Margarita	50049620

Tabla 17. Análisis de optimización global para los datos simulados confluencias (J), subcuencas; y datos observados (estaciones del USGS)

Usos de Suelo	NT (kg/ha-año)	FT (kg/ha-año)
Forestal	50049100	0.20
Urbano	50049310	1.50
Pastizal	50049620	0.32

Tabla 18. Carga de nutrientes para el Estuario de la Bahía de San Juan

Estaciones USGS	Confluencia o subcuenca	NSE	R^2	PBIAS
50049620	Qbr. Margarita	0.75	0.68	7
50049310	Qbr. Doña Ana y Josefina	0.34	0.25	50
50049100	J1	0.73	0.55	7.5

Tabla 19. Promedios de los resultados del análisis de optimización global para la confluencia J1 y las subcuencas quebradas Margarita, Doña Ana y Josefina para flujos de escorrentía superficial.

La Tabla 17 muestra las confluencias del modelo (J1, J2, J3) y las correspondientes estaciones de aforo del USGS con las cuales hemos comparado los resultados del modelo hidrológico y datos observados (estaciones del USGS). Esto, con la finalidad de ejecutar los análisis de optimización global.

Determinación de fósforo total (FT) y nitrógeno total (NT)

Para determinar los nutrientes en el estuario, se usaron los datos publicados por Frink (1991), que establecen relaciones de fuentes puntuales y no puntuales, y relaciones estadísticas empíricas hasta modelos mecanicistas altamente detallados. Estos no revelan adecuadamente la causa ni el efecto de los nutrientes (FT y NT). Los valores seleccionados para la carga ambiental de estos nutrientes para los usos del suelo en el estuario se presentan en la Tabla 18 (Frink, 1991).

Resultados

Calibración y validación para el flujo de escorrentía superficial y transporte de sedimentos

Esta sección presenta los resultados de la simulación hidrológica-hidráulica y de los modelos de simulación de sedimentos y nutrientes en la cuenca del estuario. Las figuras 17, 18 y 19 presentan los valores de escorrentía superficial observados y simulados para la confluencia J1, USGS 50049310 y las subcuencas de las quebradas Margarita, Doña Ana y Josefina.

La Tabla 19 muestra los resultados de los parámetros estadísticos NSE, R^2 y PBIAS que compara los valores de flujo observados con los simulados por el modelo hidrológico-hidráulico para el punto de cierre de tres de las cuencas del área de captación del estuario.

Como se puede observar en la Tabla 19, los tres parámetros estadísticos tienen una clasificación de buenos según Moriasi et al. (2007). Los flujos observados y simulados para las tres subcuencas evaluadas en este estudio (quebradas Margarita, Doña Ana y Josefina y la confluencia J1) se compararon con los registros de las estaciones de aforo del USGS 50049620, 50049310 y 50049100. Los parámetros de comparación fueron: las relaciones entre abstracción inicial, porcentaje impermeable, pérdidas constantes y pérdidas iniciales.

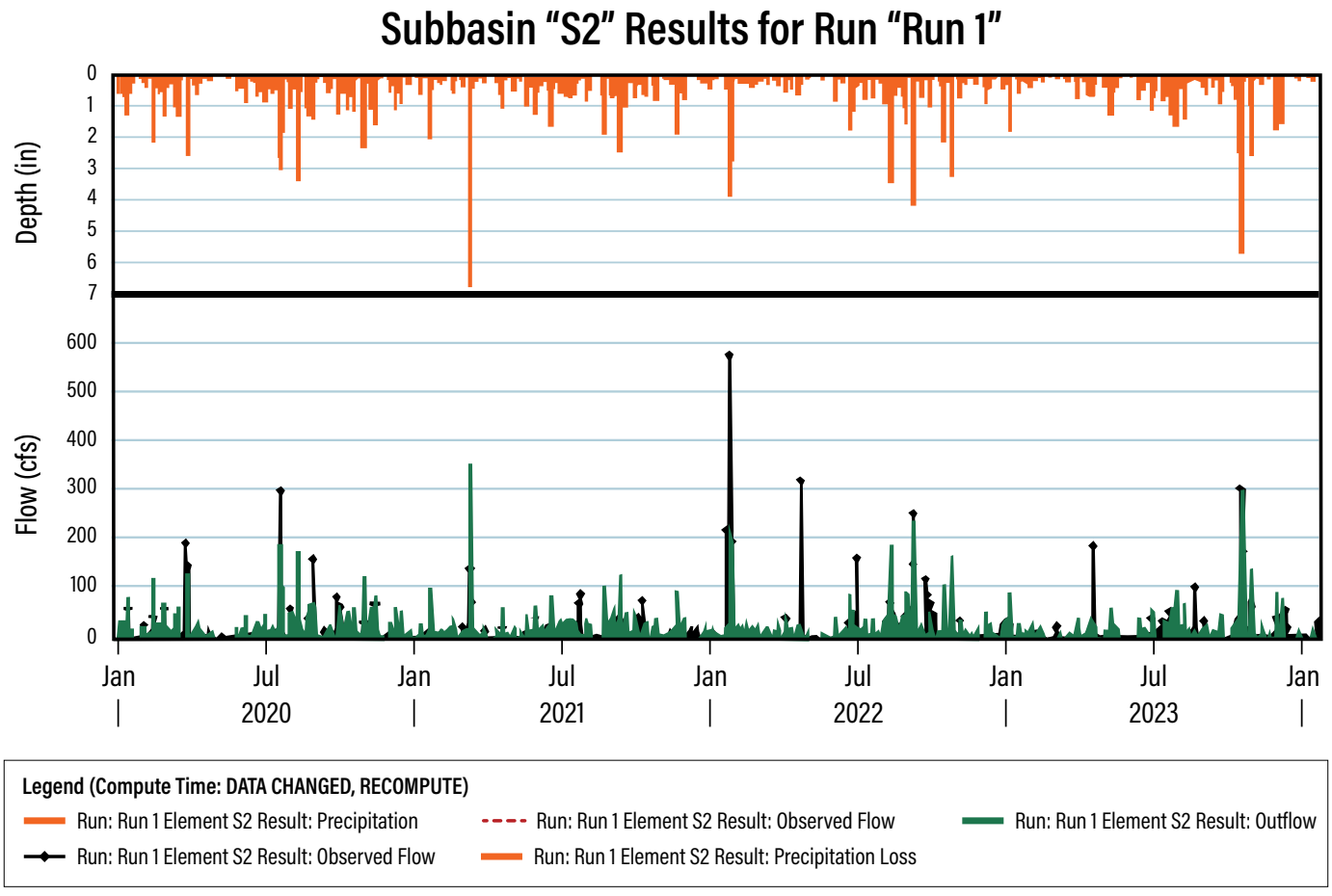


Figura 10. Resultados de la simulación hidrológica-hidráulica y de los modelos de simulación de sedimentos y nutrientes en la cuenca del Estuario de la Bahía de San Juan-subcuenca "S2".

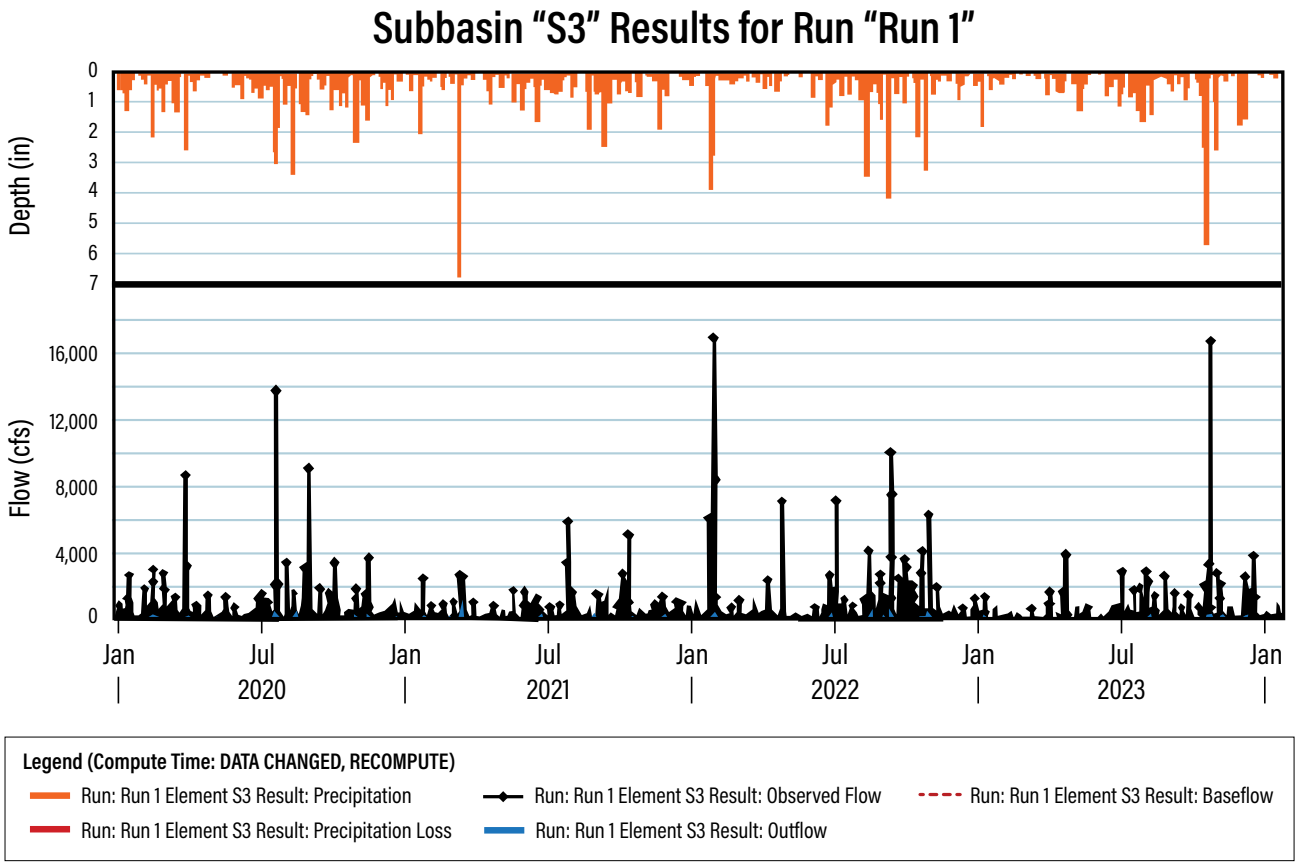


Figura 11. Resultados de la simulación hidrológica-hidráulica y de los modelos de simulación de sedimentos y nutrientes en la cuenca del Estuario de la Bahía de San Juan-subcuenca "S3".

Las abstracción inicial y pérdidas constantes e iniciales para el estuario son irrelevantes, ya que el 88.43 % de la cuenca es área construida. En otras palabras, la cuenca responde a mayor variación en volumen y flujos máximos debido a la impermeabilidad del terreno (Gunathilake et al., 2020), hay poca oportunidad para atenuar la escorrentía superficial generada por un evento de precipitación en el área de captación.

La excepción a esta regla se presentó en la subcuenca Río Piedras Sur – (Las Curías), donde el área impermeable abarca el 55.61 %. En este caso, los parámetros de abstracción inicial y pérdidas constantes e iniciales son relevantes debido al uso del suelo forestal, que representa 41.96 % del área. En el uso forestal son relevantes las pérdidas constantes (infiltración y evapotranspiración); y las pérdidas iniciales (almacenamiento superficial de agua). Por ende, se generan más pérdidas por infiltración, ocasionando disminución en la escorrentía superficial (Gunathilake et al., 2020). En la Figura 13, se presentan los gráficos de escorrentía superficial, precipitación e infiltración (pérdidas de precipitación) para la subcuenca Río Piedras Sur – (Las Curías), (barras rojas, Figura 13).

En términos estadísticos, los resultados de los parámetros NSE, R2 y PBIAS tienen una clasificación buena según Moriasi et al. (2015). Estos valores se logran por la estabilidad en el balance hídrico. Al no haber cobertura vegetal significativa, las propiedades físicas de los suelos no intervienen generando poca o ninguna atenuación de la escorrentía superficial. Esto ocasiona que un 90 % de la precipitación se transforme en escorrentía superficial.



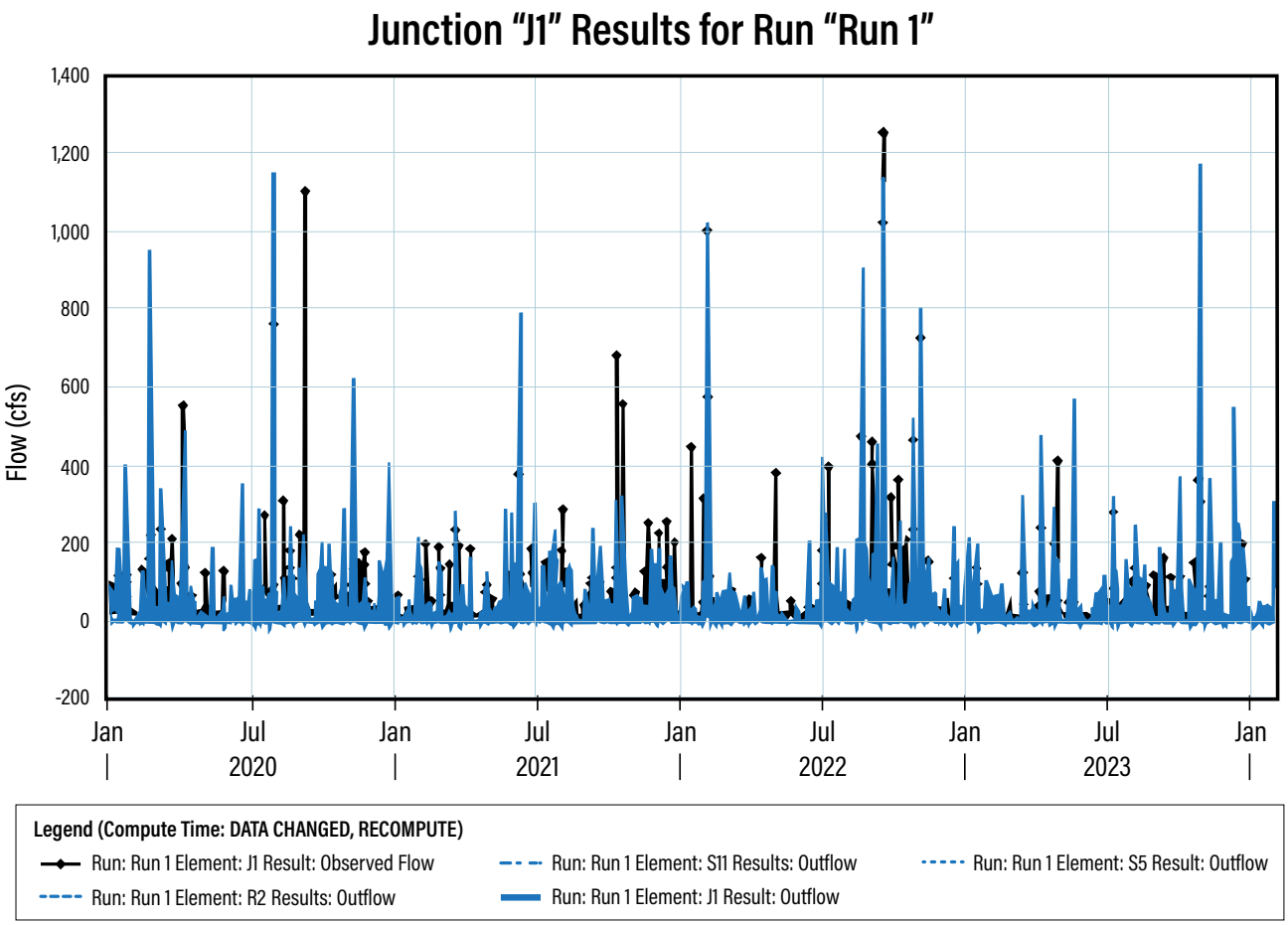


Figura 12. Flujo observado y simulado en la estación del USGS-50049100 y la confluencia (J1).

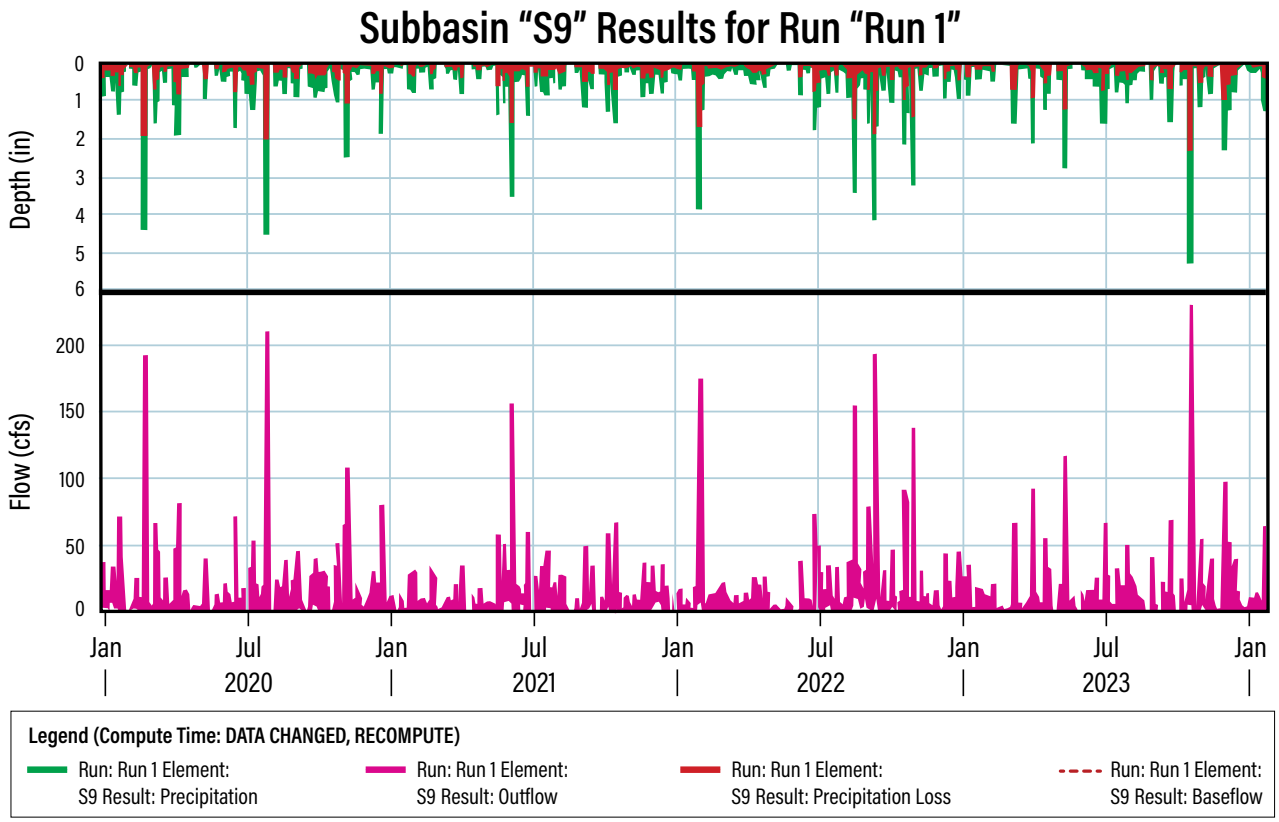


Figura 13. Escorrentía superficial, precipitación e infiltración (pérdidas de precipitación) para la subcuenca Río Piedras Sur - (Las Curías).

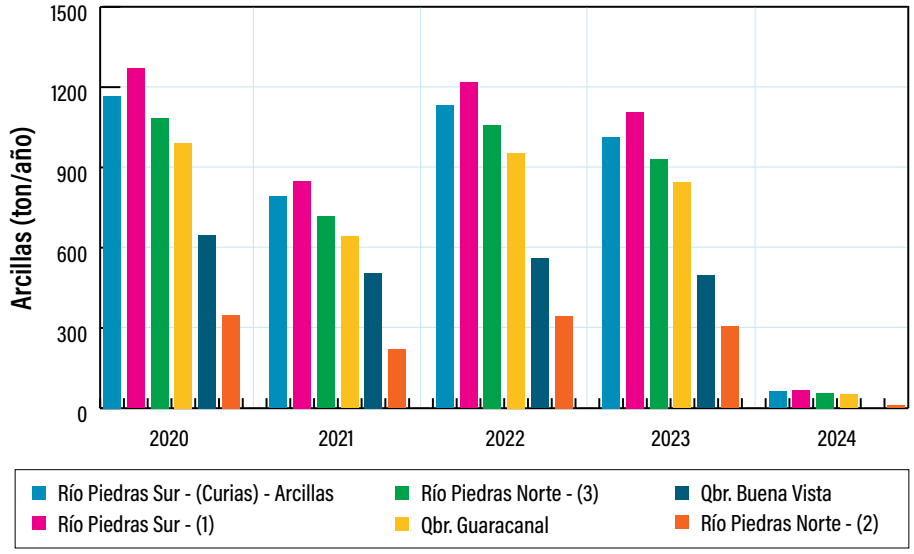


Figura 14. Transporte de arcillas totales (ton/año).

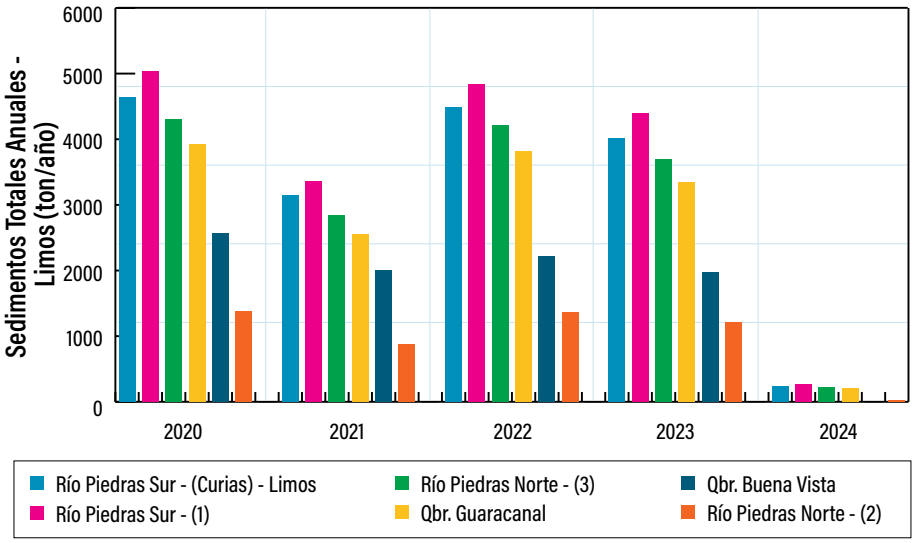


Figura 15. Transporte de limos totales (ton/año).

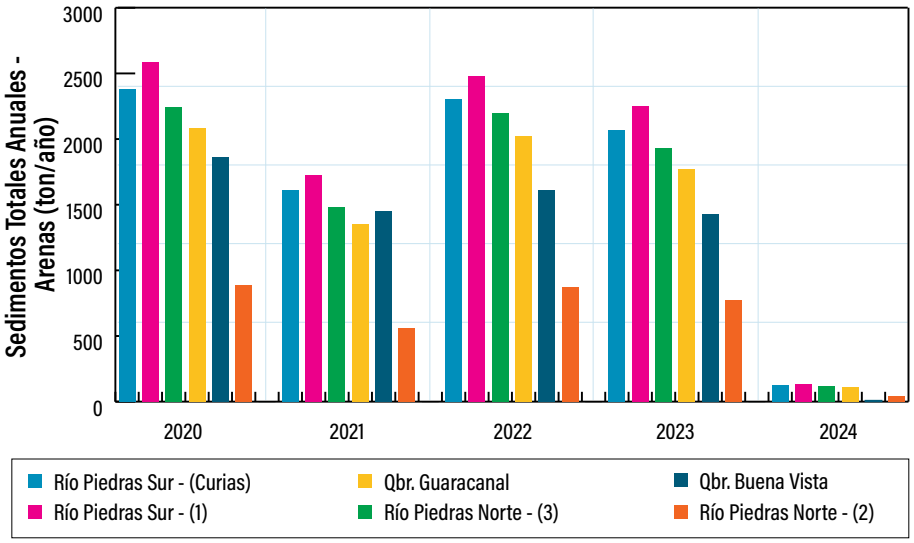


Figura 16. Sedimentos totales anuales en términos de arenas para las subcuencas que aportan a la confluencia (J1).

Transporte de sedimentos

Carga de sedimentos totales

Los resultados indican que Río Piedras Sur-1 es la subcuenca de mayor tasa de exportación de sedimentos en las tres texturas de suelo (arenas, limos y arcillas) con un total global de 6.54 ton/ha-año a la confluencia J1, a pesar de tener la menor área superficial entre las subcuencas que aportan escorrentía al estuario. Esto se debe principalmente a la poca cobertura vegetal, alta erodabilidad del suelo y a la pendiente del terreno. Le siguen Río Piedras Norte (3), Buena Vista y Guaracanal con tasas de erosión de 3.70, 3.41, 3.29 ton/ha-año. Entre las quebradas independientes que descargan directamente al estuario, las que aportan más sedimentos (arcillas, limos y arenas) son Blasina, San Antón y Doña Ana/Josefina, alcanzando valores de 3.18, 4.47, 3.60 ton/ha-año, respectivamente. Un detalle importante de esta carga de sedimentos es que la quebrada Blasina aporta 5,064 ton/año de arenas a las playas de Carolina (Isla Verde) y San Juan (figuras 14 a 22).

Las aportaciones de sedimentos de las cuencas independientes que descargan directamente a las aguas del estuario se muestran en las figuras 17 a 22 y corresponden a las subcuencas quebradas Doña Ana y Josefina, Margarita, Blasina, Juan Méndez y San Antón.

En este estudio incluimos la calibración del modelo de simulación de nutrientes en los ríos y quebradas del estuario, utilizando

el programa HEC-RAS y los módulos de simulación de nutrientes (NSMI y NSMII) desarrollados por el Cuerpo de Ingenieros (USACE, 2018). Para la calibración y validación del modelo de nutrientes, utilizamos datos de calidad del agua tomados en campo por el grupo de la Estación Experimental Agrícola de Universidad de Puerto Rico en Mayagüez (UPRM), dirigido por el Dr. Gustavo Martínez por los pasados cuatro años. Las estaciones de muestreo (Figura 23) se visitaron entre seis a ocho ocasiones por año. Las muestras se procesaron en el laboratorio de calidad del agua de la Estación Experimental Agrícola en Río Piedras.

Los puntos más cercanos al punto de cierre de cada una de las subcuencas se seleccionaron para comparar con los resultados de la simulación de calidad del agua (NSMI) para fósforo y nitrógeno.

Para la determinación de carga de nutrientes aportados al estuario, se utilizó la metodología propuesta por Frink (1991) en la cual se definen cargas puntuales y distribuidas de los nutrientes principales (fósforo total y nitrógeno total) para cada uso del suelo en el área de estudio, usando relaciones estadísticas empíricas hasta modelos mecanicistas altamente detallados. En este caso, se seleccionaron valores de carga para cada uso del suelo según propuestos por Frink (1991) para inicializar el modelo de calidad del agua en la cuenca del estuario (Tabla 20).

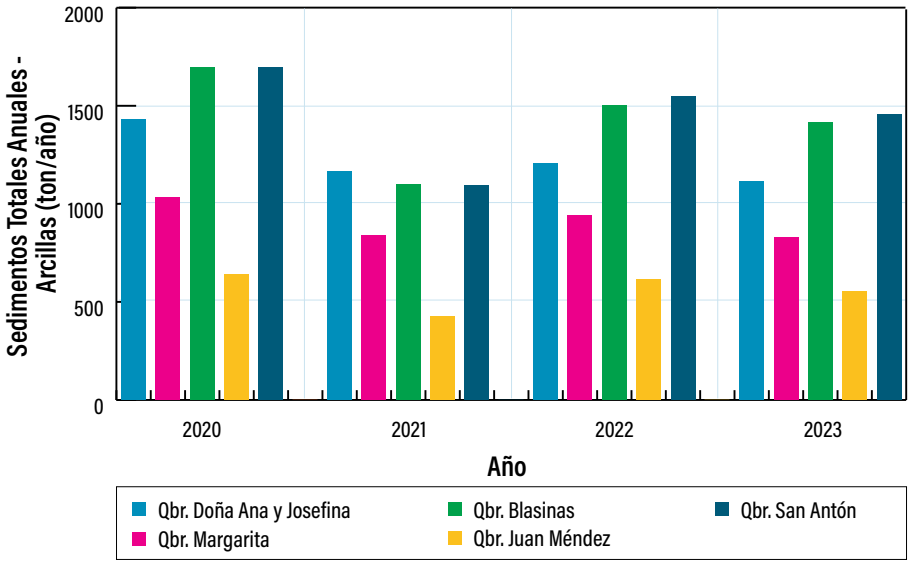


Figura 17. Sedimentos totales anuales en términos de arcillas para las subcuencas independientes.

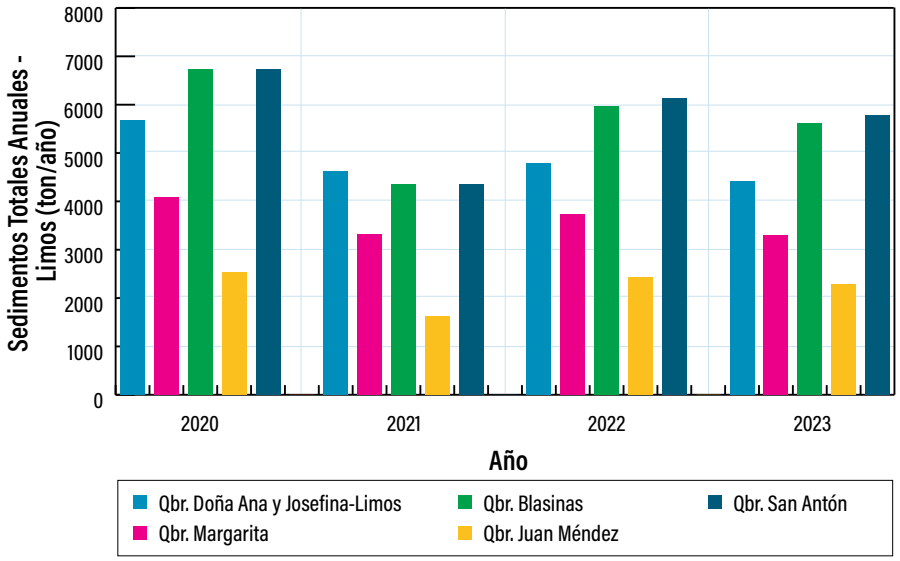


Figura 18. Sedimentos totales anuales en términos de limos para las subcuencas independientes.

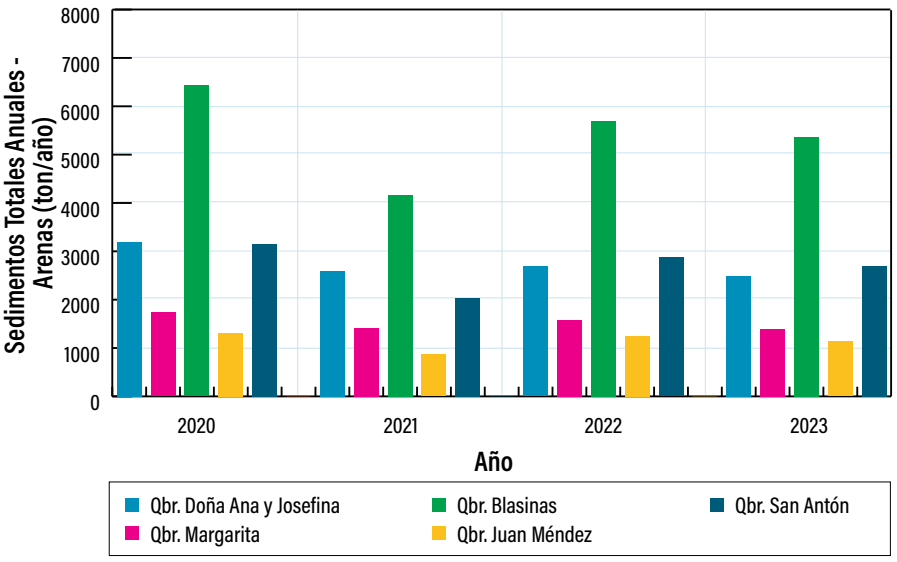


Figura 19. Sedimentos totales anuales en términos de arenas para las subcuencas independientes.

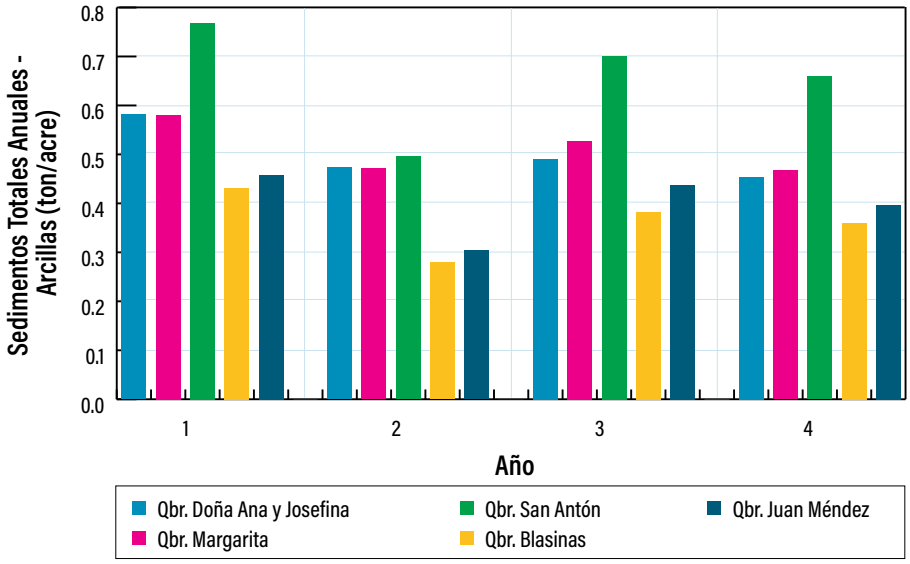


Figura20. Sedimentos totales anuales por área para las arcillas en las subcuencas independientes.

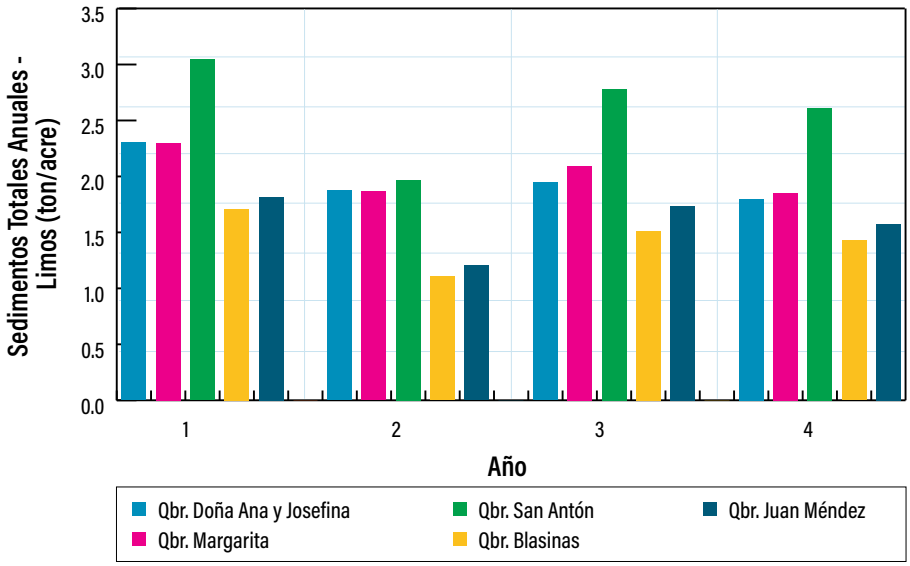


Figura 21. Sedimentos totales anuales por área para los limos en las subcuencas independientes.

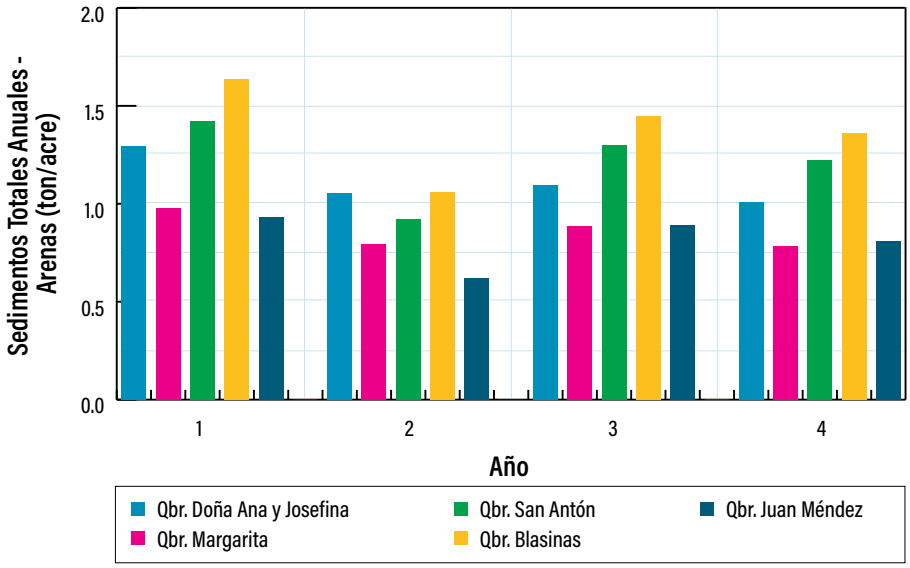


Figura 22. Sedimentos totales anuales por área para las arenas en las subcuencas independientes.

Usos del suelo	NT (kg/ha-año)	FT (kg/ha-año)
Forestal	2.50	0.20
Urbano	5.00	1.50
Pastizal	5.10	0.32

Tabla 20. Carga de nutrientes para uso del suelo en la cuenca del estuario.

A partir de estos valores (Tabla 20) sugeridos por Frink (1991), se calculó la carga potencial de nutrientes disponible para arrastre por escorrentía superficial para cada una de las subcuencas y sus usos particulares (Tabla 21).

Las cargas de nutrientes (Tabla 21) disponibles anualmente en cada una de las subcuencas se ingresan al modelo HEC-RAS con los hidrogramas y condiciones de frontera inicial, secciones transversales y alineación de ríos y quebradas, flujos bases o iniciales para cada cuerpo de agua simulado. Esta simulación permitió estimar las cargas anuales en el punto de descarga de cada río o quebrada en el estuario.

Las tablas 22 y 23 muestran los resultados de calibración del módulo NSMI de calidad del agua en HEC-RAS para las cuencas del estuario evaluadas, y muestra los parámetros estadísticos NSE, R2 y PBIAS propuestos por Moriasi et al., 2015, para evaluar los resultados de la simulación de nitrógeno total y fósforo total.

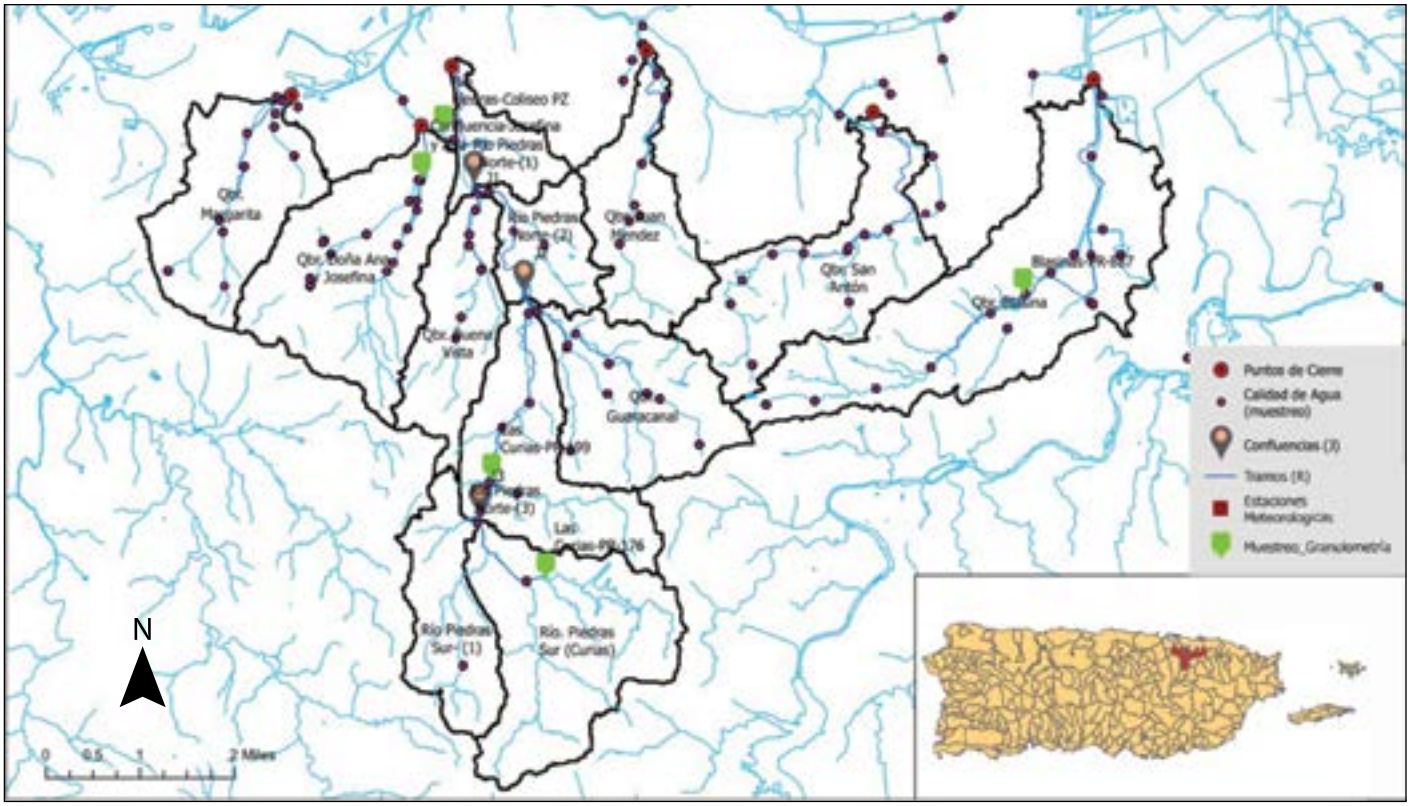


Figura 23. Localización de los puntos de muestreo de la calidad del agua en las cuencas hidrográficas del Estuario de la Bahía de San Juan.

			Nitrógeno (lb/d)			Fósforo (lb/d)		
Subcuenca	**Área (mi²)**	**Área (ha)**	**Urbano**	**Forestal**	**Pastizal**	**Urbano**	**Forestal**	**Pastizal**
Río Piedras Sur (Las Curías)	3.86	999.96	16.79	6.70	0.00	4.02	0.54	0.00
Río Piedras Sur (1)	1.86	480.92	13.15	0.65	0.07	3.94	0.05	0.00
Qbr. Guaracanal	2.88	747.11	20.27	1.06	0.17	6.08	0.09	0.01
Río Piedras Norte-(3)	2.82	730.46	20.89	0.45	0.28	6.27	0.04	0.02
Qbr. Buena Vista	1.98	513.19	14.97	0.03	0.47	4.49	0.00	0.03
Río Piedras Norte-(2)	1.27	329.56	7.19	0.79	1.21	2.16	0.06	0.08
Qbr. Doña Ana y Josefina	3.84	994.99	29.38	0.02	0.63	8.82	0.00	0.04
Río Piedras Norte-(1)	0.93	240.19	7.23	0.00	0.02	2.17	0.00	0.00
Qbr. Margarita	2.78	719.91	20.37	0.50	0.35	6.11	0.04	0.02
Qbr. San Antón	3.45	894.01	23.87	1.41	0.32	7.16	0.11	0.02
Qbr. Blasina	6.15	1592.50	44.62	1.05	1.40	13.39	0.08	0.09
Qbr. Juan Méndez	2.19	566.51	14.99	0.97	0.19	4.50	0.08	0.01

Tabla 21. Carga de nutrientes disponibles para arrastre en las 12 subcuencas del estuario.

Calidad del agua (muestreo)	Confluencia	NSE	R^2	PBIAS
Sampling point-5 y 7	J1	0.76	0.95	4.5
Sampling point 6 y 7	J2	0.77	0.92	4
Sampling point 5 y 6	J3	0.78	0.91	3.5

Tabla 22. Análisis de calibración global para los datos simulados para las confluencias (J) y datos observados (calidad del agua) sobre el río Piedras.

Calidad del agua (muestreo)	Subcuenca	NSE	R^2	PBIAS
Sampling point-10	Qbr. Margarita	0.79	0.97	4.5
Sampling point-7	Qbr San Antón	0.82	0.95	4.3
Sampling point-7	Qbr. Blasina	0.815	0.98	3.87
Sampling point-7	Qbr. Juan Méndez	0.83	0.9	3.1

Tabla 23. Análisis de calibración global para los datos simulados subcuencas y datos observados (calidad del agua).

Las estadísticas de las tablas 22 y 23, esto es NSE, R2 y PBIAS, indican que la calibración del módulo de nutrientes NSMI en HEC-RAS fue Muy bueno (NSE>0.80) para representar la exportación de nutrientes en los puntos de salida de las subcuencas San Antón, Blasina y Juan Méndez y Bueno (0.7<NSE<=0.8) para la quebrada Margarita.

Los resultados de la simulación para las concentraciones de nitrógeno y fósforo total observado y el valor simulado por NSMI para la confluencia J2 del río Piedras (Figuras 24 y 25) en función del tiempo indican que el modelo de nutrientes predice razonablemente el comportamiento de estos nutrientes en la cuenca hidrográfica del río Piedras.

Cargas de nitrógeno y fósforo total

Al aplicar este modelo de simulación de nutrientes en las confluencias J1, J2 y J3 a lo largo del río Piedras, obtenemos la carga de nutrientes por unidad de área que se muestra en las figuras 26 a 31 para nitrógeno y fósforo total.

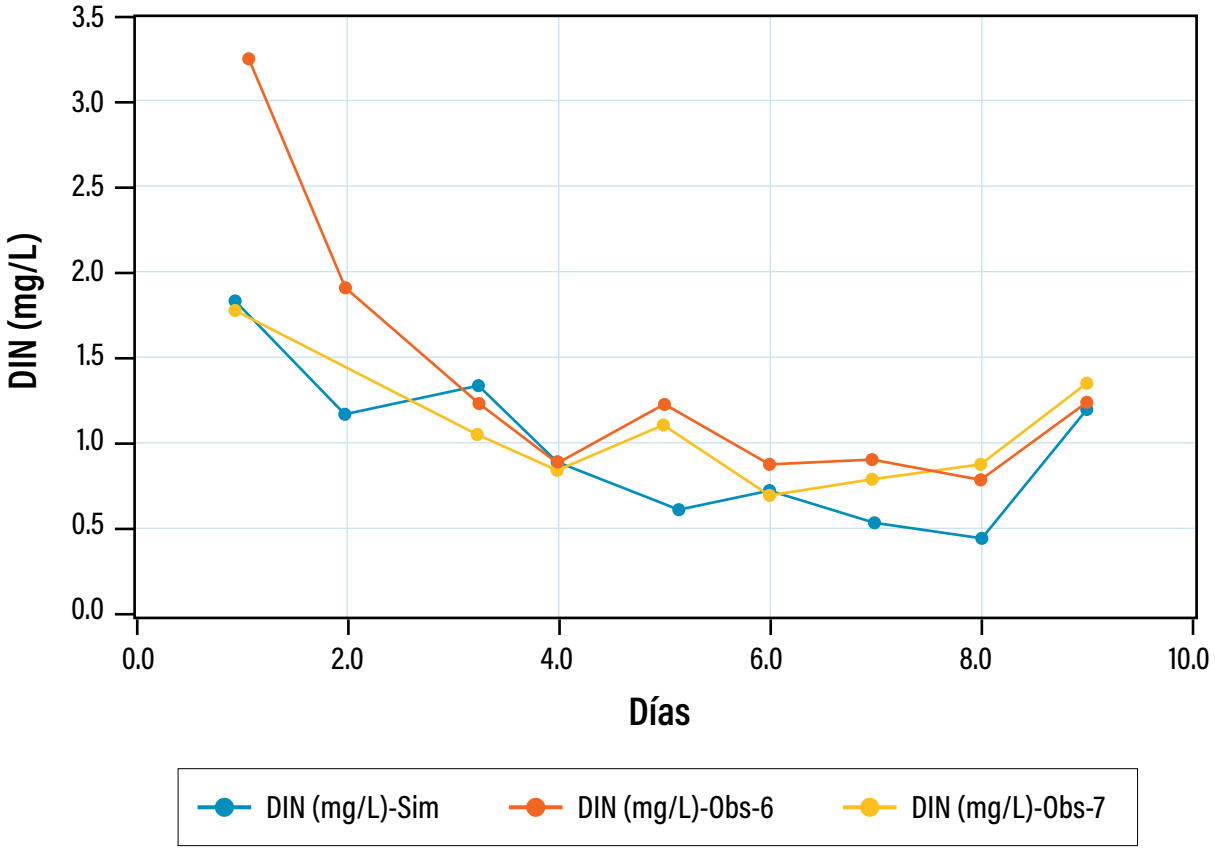


Figura 24. Nitrógeno total (DIN) observado y simulado (HEC-RAS: NSMI) para la confluencia J2, río Piedras, en el año 2021.

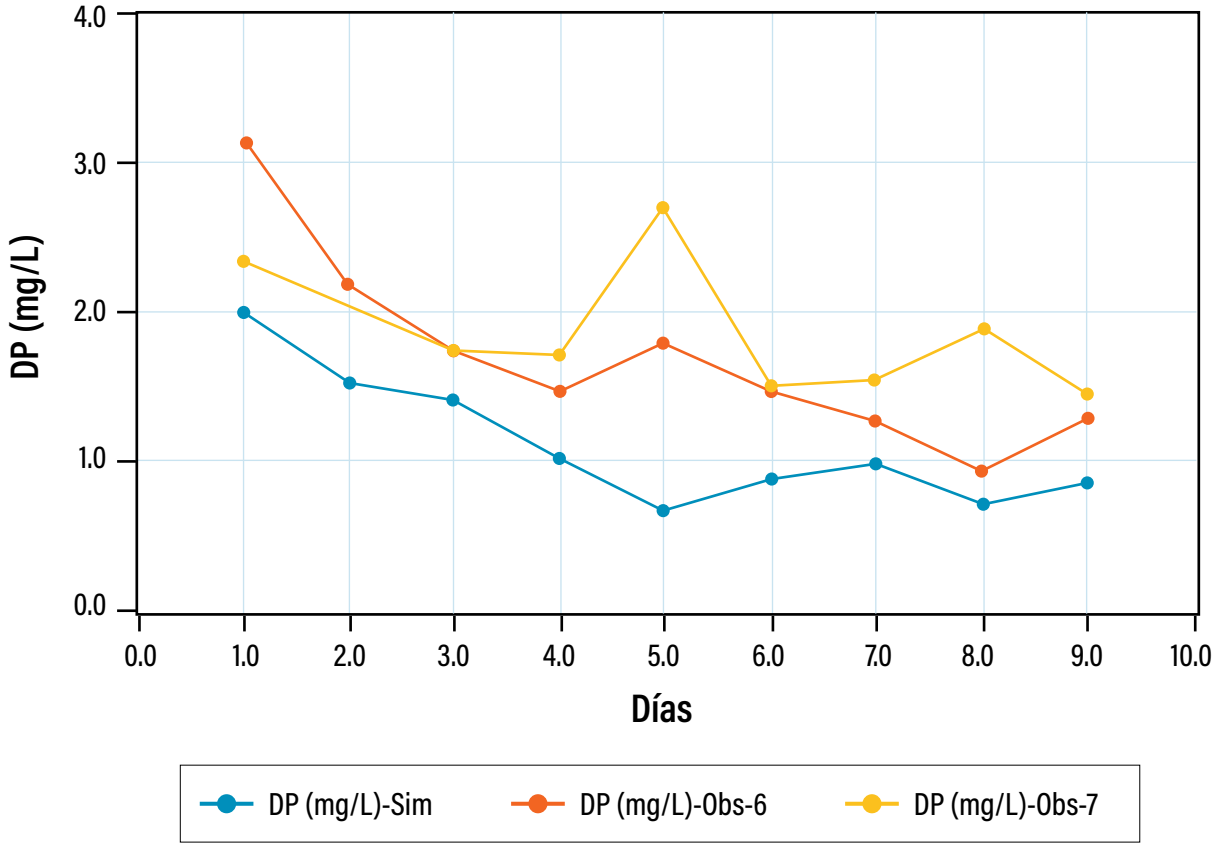


Figura 25. Fósforo total (DP) observado y simulado para la confluencia J2, río Piedras, en el año 2021.

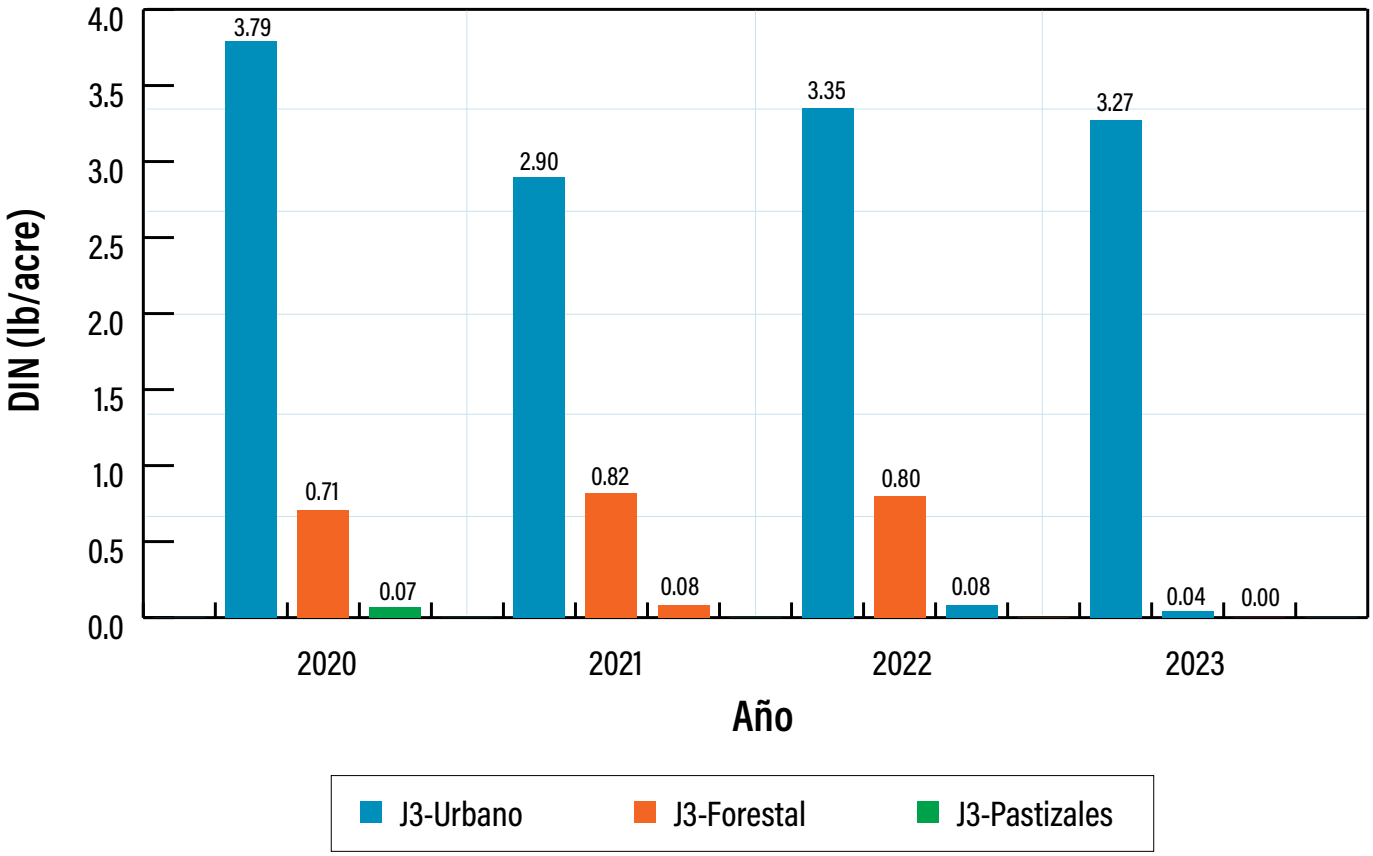


Figura 26. Nitrógeno total (DIN) por unidad de área para la confluencia (J3).

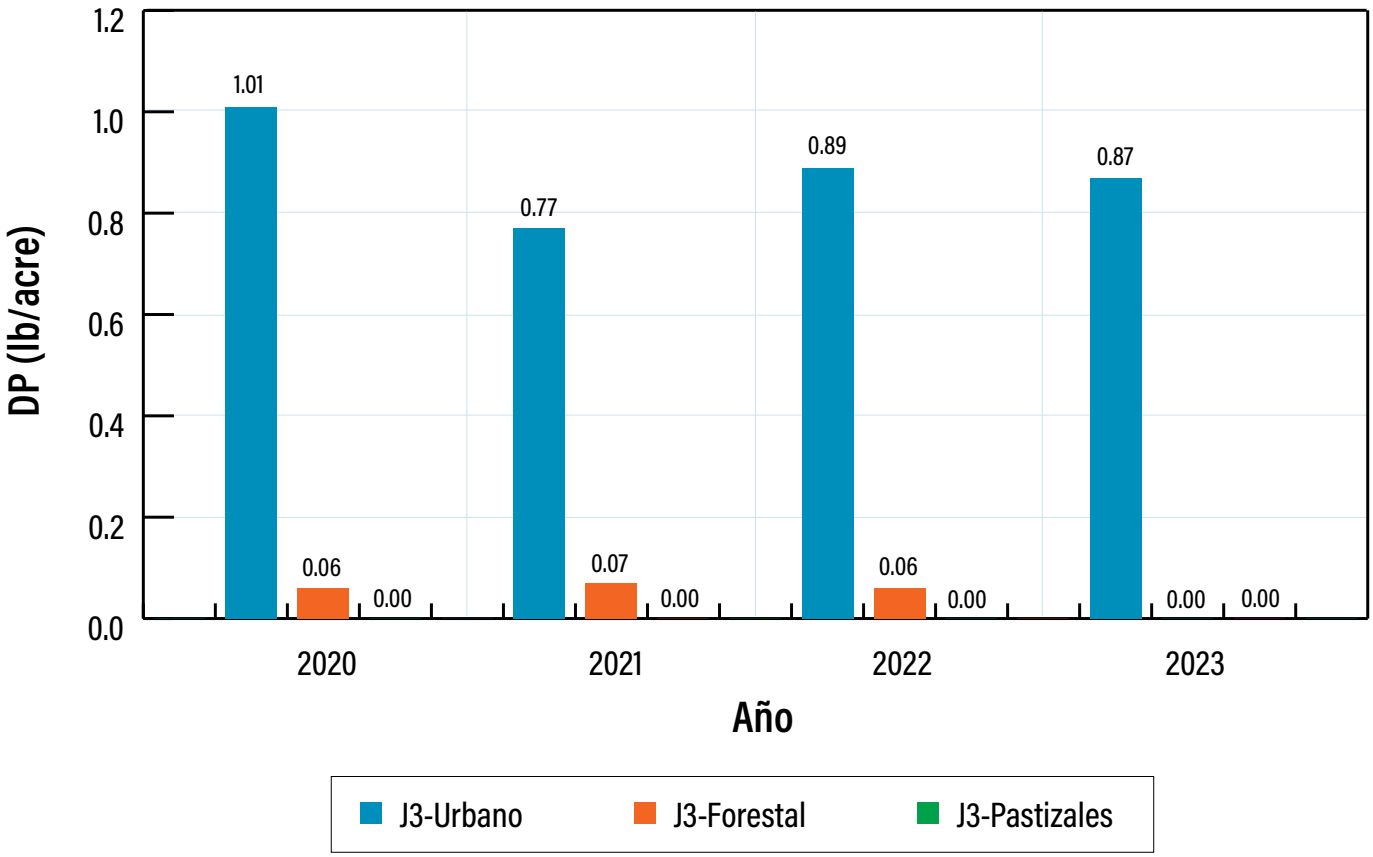


Figura 27. Fósforo total (DP) por unidad de área para la confluencia (J3).

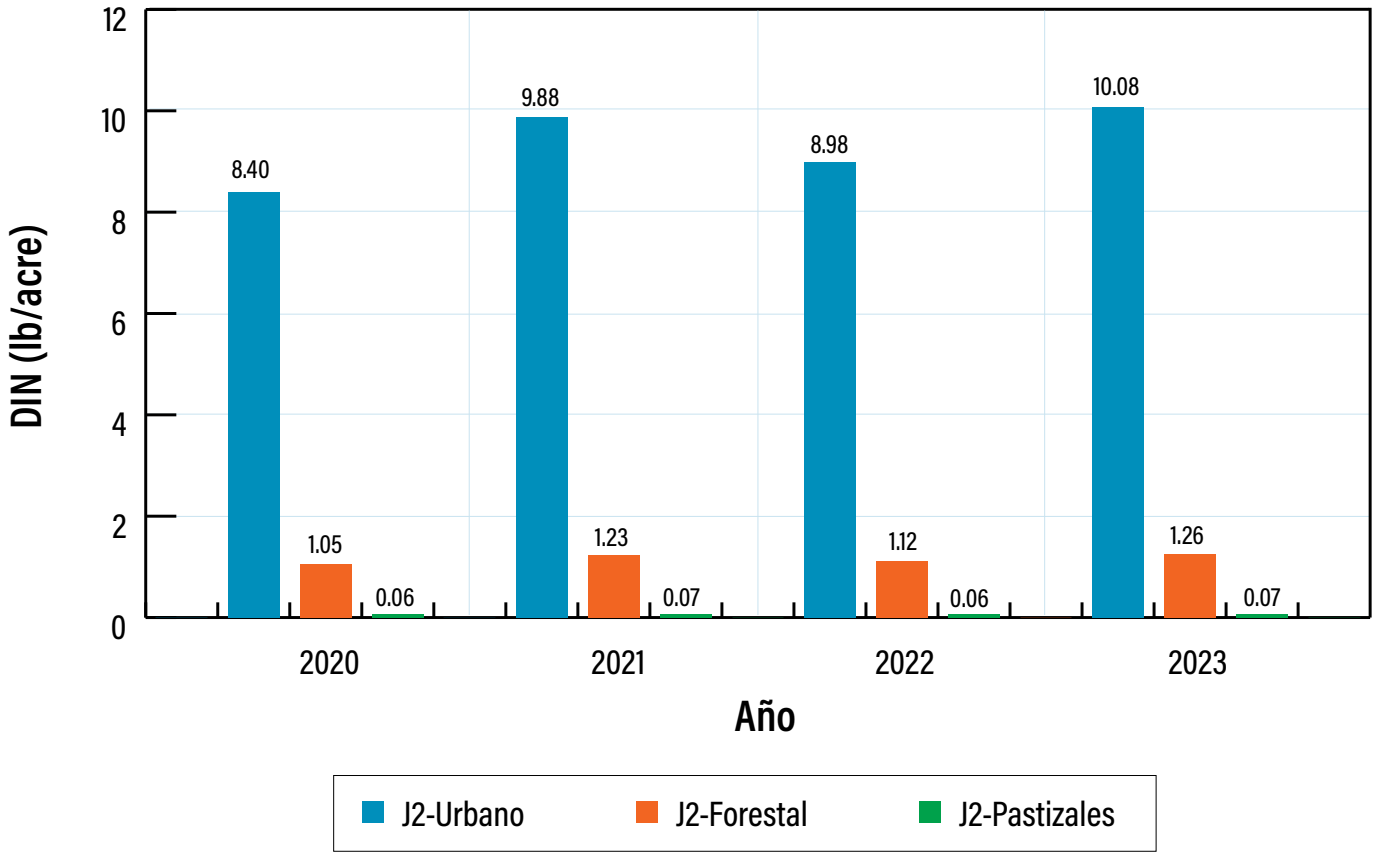


Figura 28. Nitrógeno total (DIN) por unidad de área para la confluencia (J2).

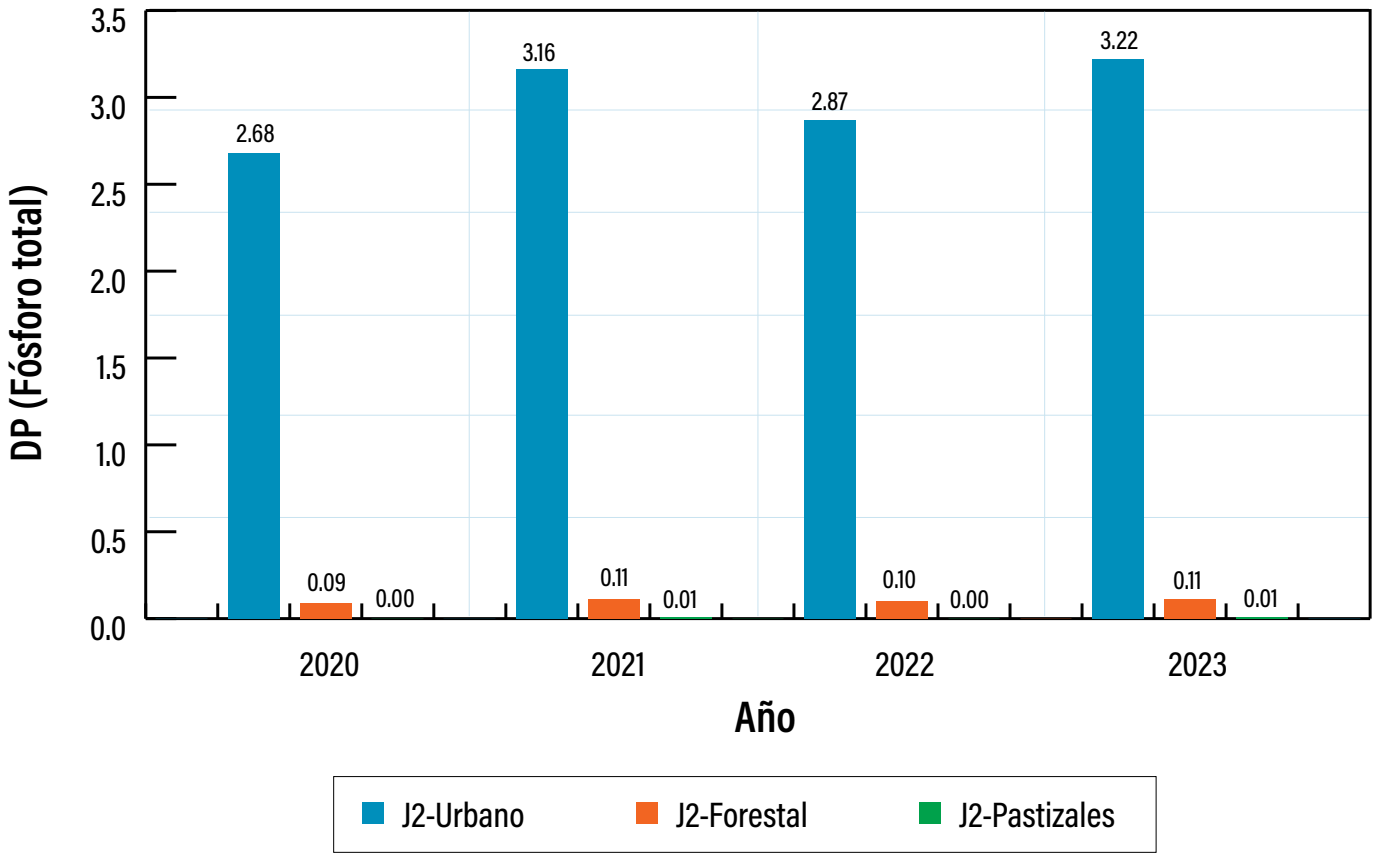


Figura 29. Fósforo total (DP) por unidad de área para la confluencia (J2).

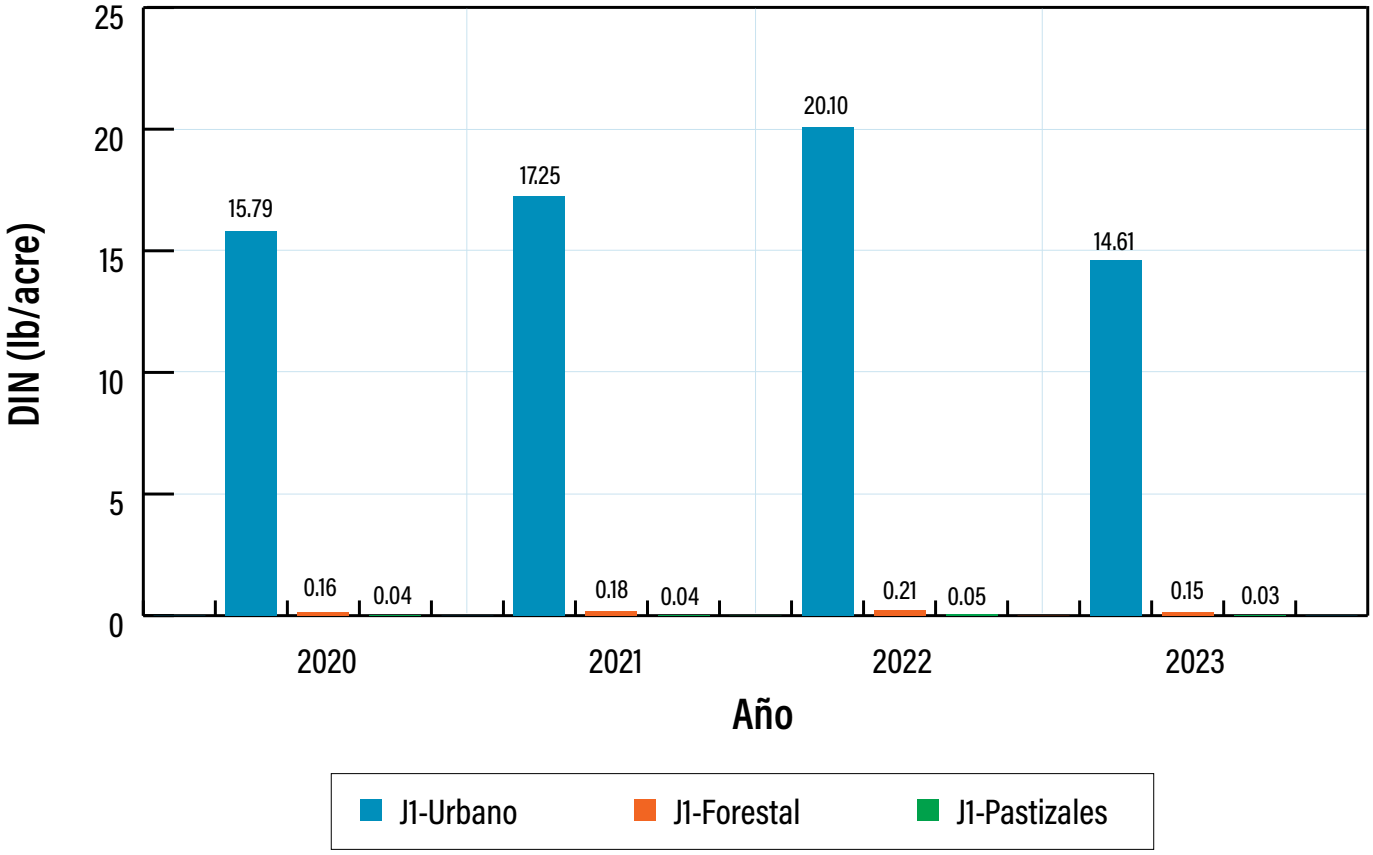


Figura 30. Nitrógeno total (DIN) por unidad de área para la confluencia (J1).

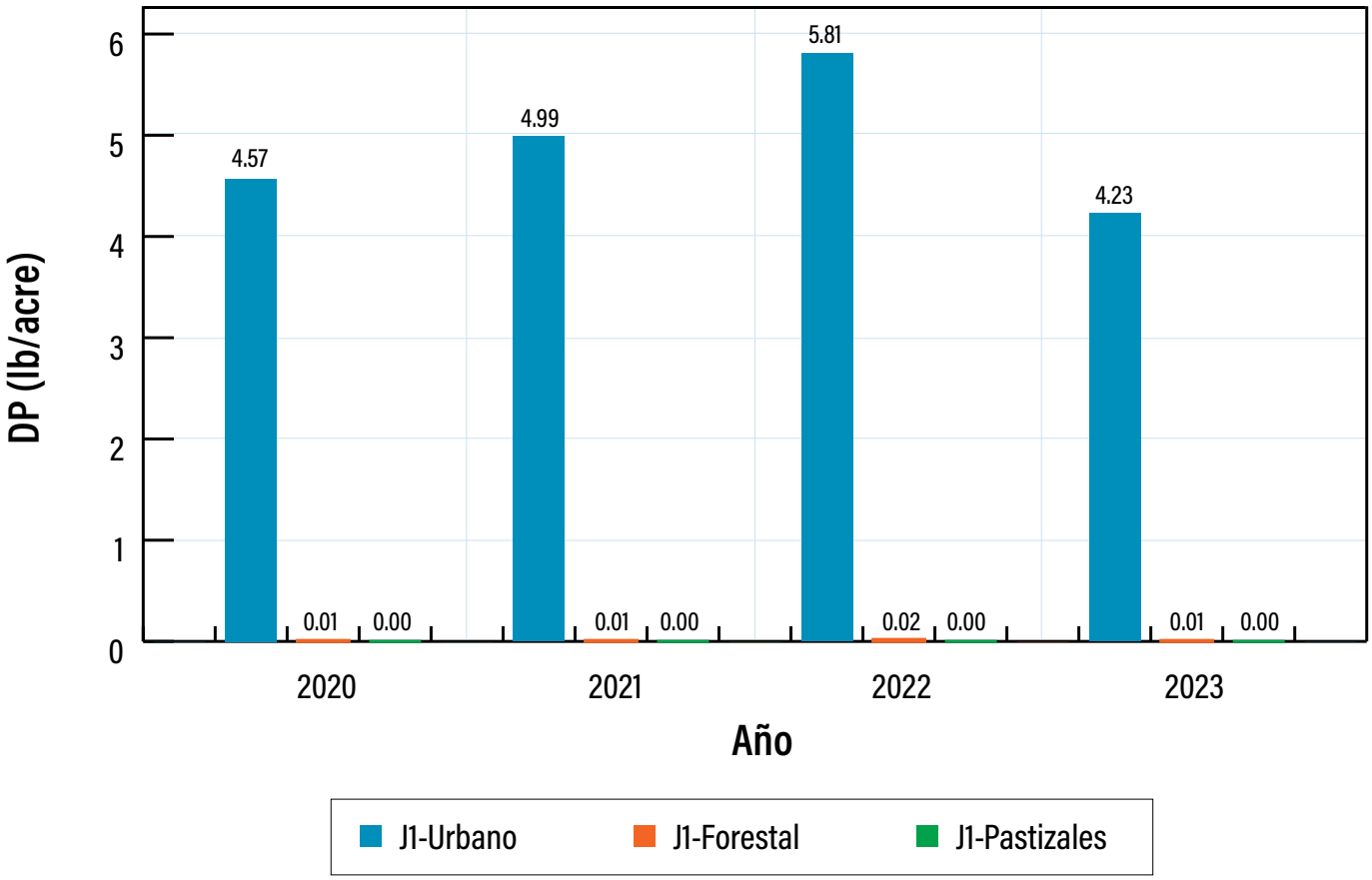


Figura 31. Fósforo total (DP) por unidad de área para la confluencia (J1).

En las figuras 26 a 31 se observa un efecto de dilución de los nutrientes (DIN y DP) por el aumento del área de captación y, por lo tanto, del volumen de escorrentía generado por la hidrología del lugar. También se observa que el DIN y el DP generados por el área forestal son prácticamente imperceptibles cuando entran las aportaciones de los usos urbanos del suelo, al pasar de la confluencia J3 a J2 a J1. En J2 y J1, las aportaciones de nutrientes de los usos urbanos dominan y alcanzan cargas de 15.79 Lb/Ac de DIN y 4.57 Lb/Ac de DP en la confluencia J1 en el año 2020 y un pico de 20.10 Lb/Ac de DIN y 5.81 Lb/Ac de DP en el año 2022.

Entre las quebradas independientes, Blasina aportó al estuario 1.95 lb/Ac DP en el año 2020 y 2.25 Lb/Ac DP en 2023. Blasina aporta también 6.49 y 7.59 Lb/Ac de DIN los años 2020 y 2023, respectivamente.

No se observa el mismo fenómeno de dilución para el DIN y DP generado por el uso urbano del suelo. Esto se debe a que, a medida que el río Piedras avanza aguas abajo, se suman más áreas urbanas que descargan en el río principal (río Piedras). Por lo tanto, los niveles de concentración y carga aumentan a medida que el río se va acercando al mar.

Conclusiones

1. El uso urbano del suelo es la mayor cobertura del suelo en el área de captación del Estuario de la Bahía de San Juan. Este uso urbano es el que más aporta sedimentos a la confluencia J1 en el río Piedras, con valores que van desde 4.99 a 7.49 ton/Ac-yr de sedimentos totales (arenas, limos y arcillas).

2. Las quebradas Doña Ana y Josefina son las subcuencas del río Piedras que más cantidad de nitrógeno total aportan a este río, con valores de 30 lb/día durante el período de simulación.

3. La quebrada Blasina es la que más aporta nitrógeno total al estuario, entre las quebradas independientes que descargan directamente allí, alcanzando valores de 47.1 lb de nitrógeno total por día.

4. La quebrada Blasina es la que más aporta arenas al estuario, alcanzando valores de hasta 6,430 ton/año para 2020 y 5,064 ton/año en promedio anual durante el periodo de estudio. Esta aportación de Blasina es positiva para la sustitución de arena en las playas de Carolina y de Ocean Park, en San Juan.







ESTUARIO

Reviviendo nuestras costas: Estrategias para la conservación y restauración de la resiliencia en el Estuario de la Bahía de San Juan



A medida que las amenazas ambientales se intensifican, al igual que aquellas asociadas a los eventos climáticos extremos y al aumento del nivel del mar, es crucial implementar estrategias de conservación y restauración ecológica que fortalezcan la resiliencia costera.

Edwin A. Hernández Delgado
Sociedad Ambiente Marino

La conservación de la resiliencia costera en el Estuario de la Bahía de San Juan (el estuario) es esencial para asegurar la protección de sus ecosistemas y comunidades frente a los crecientes desafíos eventos climáticos extremos y el aumento del nivel del mar. El estuario alberga una biodiversidad invaluable, incluyendo manglares, arrecifes de coral y praderas de hierbas marinas, que no solo sustentan la vida marina, sino que también actúan como barreras naturales contra tormentas, marejadas invernales y la erosión costera. Sin embargo, estos ecosistemas son altamente vulnerables a la degradación ambiental crónica (Altieri et al., 2015; González Figueroa y Hernández Delgado, 2021), a las especies invasivas (Rivera Aponte et al., 2021), al impacto combinado de los huracanes y el aumento del nivel del mar (Odériz et al., 2020; Patrick et al., 2022) y los eventos de calor extremo (Hernández-Delgado, 2015, 2023), afectando a largo plazo la resiliencia costera.

La resiliencia costera es la capacidad de los sistemas socioeconómicos y naturales del ambiente costero para hacer frente a las perturbaciones, inducidas por factores como el aumento del nivel del mar, los fenómenos extremos y los impactos humanos, manteniendo al mismo tiempo sus funciones esenciales (Masselink y Lazarus, 2019). La resiliencia ecológica a los eventos climáticos extremos podríamos definirla como la combinación de la resistencia a una frecuencia y severidad de perturbaciones que va en aumento, la capacidad de recuperación y autoorganización de un ecosistema, y la habilidad de

adaptarse a nuevas condiciones (Bernhard y Leslie, 2013). Para ello es necesario que los ecosistemas costeros cuenten con tres características ecológicas fundamentales, que son la diversidad, la conectividad y la capacidad adaptativa. La diversidad incrementa la variedad de respuestas de un ecosistema ante una perturbación y la probabilidad de que las especies se compensen unas a otras. La conectividad entre las especies, poblaciones y ecosistemas aumenta la capacidad de recuperación proveyendo fuentes de propágulas y de nutrientes. La capacidad adaptativa incluye la plasticidad fenotípica, cambios en los rangos de distribución de las especies y la capacidad de microevolución. Esto hace vital la conservación y restauración de los ecosistemas costeros.

Para asegurar la resiliencia socioeconómica de la costa, es necesario garantizar antes su resiliencia ecológica. A medida que las amenazas ambientales se intensifican, al igual que aquellas asociadas a los eventos climáticos extremos y al aumento del nivel del mar, es crucial implementar estrategias de conservación y restauración ecológica que fortalezcan estos ecosistemas que constituyen las primeras líneas de defensa contra las marejadas, tormentas y el aumento del nivel del mar (Lacambra et al., 2013; Hernández-Delgado, 2024), protegiendo tanto el patrimonio natural como el bienestar de las comunidades locales. La resiliencia costera es no solo una cuestión de preservación ambiental, sino también de seguridad económica y social para las generaciones presentes y futuras.







El estuario proporciona servicios esenciales, como la filtración de agua, para mantener las aguas costeras más limpias de turbidez, sedimentos y contaminación.

El Estuario de la Bahía de San Juan es de gran importancia socioeconómica por varias razones:	
Recursos pesqueros	El estuario proporciona un hábitat crucial para la crianza de diversas especies marinas que son esenciales para la pesca comercial y recreativa, sustentando así la economía local, generando empleos y ayudando a proporcionar seguridad y soberanía alimentaria.
Turismo	La belleza natural y la biodiversidad del estuario atraen a turistas, lo que impulsa el sector turístico y contribuye a la economía local mediante actividades recreativas como el ecoturismo, paseos en kayak, esnórquel y observación de aves.
Protección costera	Los ecosistemas costeros, como los manglares, las dunas de arena, las hierbas marinas y los arrecifes de coral, actúan como barreras naturales que protegen las áreas costeras de la erosión y los daños causados por tormentas y marejadas invernales. Esto ayuda a reducir costos de mantenimiento de infraestructura y recuperación tras desastres, mientras se protegen las vidas humanas.
Servicios ecosistémicos	El estuario proporciona servicios esenciales, como la filtración de agua para mantener las aguas costeras más limpias de aguas turbias, sedimentos y contaminación. También nos brinda la regulación del clima local y el almacenamiento de carbono, lo que contribuye a amortiguar el impacto de los eventos climáticos extremos y beneficia a la comunidad en general.
Cultura y patrimonio	El estuario es un espacio de gran relevancia cultural e histórica para las comunidades locales que dependen de sus recursos para mantener sus tradiciones y modos de vida.
Investigación y educación	El estuario sirve como un laboratorio natural para la investigación científica y la educación ambiental, contribuyendo al conocimiento y la conservación de la biodiversidad.
Desarrollo sostenible	La gestión adecuada del estuario puede fomentar un desarrollo económico sostenible y promover la autogestión y participación comunitaria, equilibrando la conservación del medioambiente con el crecimiento económico participativo y justo.



En conjunto, estas características hacen del Estuario de la Bahía de San Juan un recurso invaluable para Puerto Rico, lo que subraya la necesidad de conservarlo y manejarlo de forma sostenible. Esto resulta vital para el sostenimiento y la restauración de la resiliencia social y ecológica de la costa. Sin embargo, factores de carácter regional o global como son el calor extremo y el aumento del nivel del mar constituyen potencialmente las dos amenazas más significativas para las comunidades humanas y naturales en la costa

en las islas tropicales (Hernández-Delgado, 2015, 2023, 2024). Esto amerita implementar una amplia diversidad de acciones en la gestión de las costas para minimizar las consecuencias a largo plazo de dichos impactos. Las recomendaciones prioritarias para el sostenimiento y la restauración de la resiliencia costera en el estuario, considerando el aumento del nivel del mar y los eventos climáticos extremos, incluyen las siguientes:

1. **Restauración de los ecosistemas costeros**: Implementar proyectos de restauración de arrecifes de coral, comunidades de hierbas marinas, manglares, humedales y dunas de arena que actúan como las primeras líneas de defensa contra inundaciones costeras y erosión litoral, aumentando la protección de la infraestructura costera y la vida. De acuerdo con Hernández-Delgado (2024), en el contexto de las islas tropicales, la integración híbrida de la infraestructura verde y gris (estructuras artificiales) es una de las estrategias alternativas para la protección de los entornos urbanos costeros, como el caso del Estuario de la Bahía de San Juan.

2. **Manejo integrado de zonas costeras**: Establecer un enfoque de manejo que integre la conservación, la restauración ecológica, el desarrollo sostenible y la adaptación al calor extremo y el aumento del nivel del mar en la planificación costera.

3. **Infraestructura verde**: Promover la restauración de infraestructuras verdes, como los arrecifes coralinos, manglares y otros ecosistemas costeros, o la integración de arrecifes artificiales, diques y muros de contención combinados con comunidades naturales, para mitigar el impacto de tormentas y el aumento del nivel del mar, al igual que para mitigar el impacto de las escorrentías urbanas y mejorar la calidad del agua en la costa.

4. **Educación y concienciación comunitaria**: Desarrollar programas de educación para sensibilizar a la comunidad sobre la importancia de la resiliencia social-ecológica costera y las acciones que pueden tomar.

5. **Monitoreo y evaluación continua**: Implementar sistemas de monitoreo de cambios ecológicos y ambientales para evaluar los cambios en el ecosistema, los impactos de eventos en específico y la efectividad de las medidas adoptadas, ajustando las estrategias según sea necesario. Esto debe incluir la expansión de los monitoreos actuales de calidad del agua en la zona.

6. **Políticas de uso del suelo**: Reforzar y actualizar las regulaciones de uso del suelo para evitar construcciones en áreas vulnerables en la zona marítimo terrestre y en zonas vulnerables de las cuencas hidrográficas. También, promover prácticas de desarrollo sostenible.







7. **Investigación y desarrollo**: Fomentar la investigación sobre los impactos producto de los eventos climáticos extremos y el aumento del nivel del mar en la costa y sobre nuevas tecnologías y métodos de adaptación y mitigación de impactos.

8. **Colaboración interinstitucional**: Establecer alianzas entre gobiernos, organizaciones no gubernamentales, el sector privado y las comunidades locales para coordinar esfuerzos y recursos en apoyo a diversas iniciativas.

9. **Financiamiento sostenible**: Buscar fuentes de financiamiento para proyectos de resiliencia, incluyendo fondos federales, estatales y donaciones de organizaciones internacionales y del sector privado en apoyo a los diversos tipos de proyectos.

10. **Planes de emergencia y respuesta**: Desarrollar y actualizar planes de emergencia que incluyan estrategias específicas para la recuperación de desastres naturales, adaptados a las condiciones locales, particularmente, en aquellos sectores sujetos al impacto de inundaciones, marejadas ciclónicas y el aumento del nivel del mar.

Estas recomendaciones pueden contribuir significativamente al sostenimiento y recuperación de la resiliencia costera del Estuario de la Bahía de San Juan frente a los desafíos producto de los eventos climáticos extremos y el aumento del nivel del mar.

Dentro de las recomendaciones más importantes que ameritan atención inmediata en la próxima década está la restauración de los ecosistemas costeros urbanos principales para minimizar los impactos de los eventos de calor extremo. Esto incluye la restauración ecológica de los arrecifes de coral, comunidades de hierbas marinas y de los manglares. En el contexto de los arrecifes de coral, se recomienda:

1. **Restauración de corales**: Implementar programas de cultivo y trasplante de corales para fomentar la recuperación de poblaciones más importantes en los arrecifes llanos, tales como el coral cuerno de alce (Acropora palmata), el coral cuerno de venado (Acropora cervicornis) y el coral de cerebro (Pseudodiploria strigosa). Estas especies han sufrido mortandades significativas en años recientes debido a pulsos de escorrentías contaminadas y a brotes de enfermedades. Al momento, existen esfuerzos de restauración poblacional de A. palmata en la playa de El Escambrón liderados por la Sociedad Ambiente Marino y Grupo VIDAS desde 2023. Aunque aún de pequeña escala, han tenido resultados promisorios con 95 % de sobrevivencia luego de los primeros 15 meses de trasplantes de 500 corales. Estos esfuerzos validarían la Ley 72 de 2020 que declaró a los arrecifes de coral como una infraestructura natural crítica para la protección de la costa.

2. **Control de contaminación**: Reducir la contaminación de las aguas costeras mediante la mejora de sistemas de drenaje pluvial, tratamiento de aguas residuales y control de escorrentías agrícolas, en cumplimiento con la Ley 147 de 1999 (Ley de Arrecifes de Coral).

3. **Monitoreo de la salud del coral**: Establecer un programa de monitoreo continuo para evaluar la salud de los arrecifes y detectar cambios en tiempo real.

4. **Educación y sensibilización**: Promover campañas de educación sobre la importancia de los arrecifes de coral y las prácticas sostenibles de conservación entre la comunidad y los visitantes.

5. **Regulación de la pesca**: Implementar regulaciones más estrictas sobre la pesca en los arrecifes llanos costeros para proteger las especies clave y prevenir la sobreexplotación, sobre todo de los peces herbívoros que son vitales para el pastoreo de las algas que compiten por espacio con los corales.

6. **Áreas marinas protegidas**: Establecer y fortalecer áreas marinas protegidas para conservar los ecosistemas de coral y permitir su recuperación.

7. **Investigación científica**: Fomentar la investigación sobre la biología de los corales restaurados, sus interacciones con el ecosistema y los efectos de la calidad del agua y de los eventos climáticos extremos.



8. **Reducción de los impactos producto de los eventos climáticos extremos**: Abogar por políticas que mitiguen el impacto del calor extremo, incluyendo la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, la promoción de energías renovables y de estrategias para secuestrar carbono, como la reforestación y la restauración de manglares, hierbas marinas y corales.

9. **Involucramiento comunitario**: Involucrar a las comunidades locales mediante programas de voluntariado y de ciudadanos científicos en proyectos de restauración y conservación costera, fomentando un sentido de propiedad y responsabilidad.

10. **Recuperación de hábitats**: Restaurar hábitats adyacentes a la costa, como las praderas de hierbas marinas y manglares, que son cruciales para la salud de los arrecifes de coral.



Estas acciones pueden ayudar a revertir el daño ya causado a los arrecifes de coral y fomentar un ecosistema marino más saludable y resiliente en el Estuario de la Bahía de San Juan. Por otro lado, la restauración de las comunidades de hierbas marinas aportaría también beneficios vitales, tales como:

1. **Restauración de hábitats:** Implementar proyectos de trasplante de hierbas marinas nativas en áreas degradadas para fomentar su recuperación.
2. **Control de contaminación:** Reducir la contaminación de las aguas costeras, incluyendo nutrientes y sedimentos, mediante mejoras en la gestión de aguas residuales y control de escorrentías urbanas, particularmente, en la zona de la Laguna del Condado.
3. **Monitoreo y evaluación:** Establecer un programa de monitoreo ecológico para evaluar la salud de las comunidades de hierbas marinas y detectar cambios en su estado.
4. **Educación y concienciación:** Desarrollar programas educativos para informar a la comunidad sobre la importancia de las hierbas marinas y su papel en el ecosistema.
5. **Protección legal:** Hacer cumplir la Ley 147 de 1999 que, además de proteger los arrecifes de coral, protege sus hábitats asociados, incluyendo las hierbas marinas. Implementar regulaciones que protejan las áreas de hierbas marinas de actividades destructivas, como el anclaje, la navegación inadecuada y la contaminación.
6. **Investigación científica:** Fomentar estudios sobre la ecología de las hierbas marinas, su relación con otros ecosistemas y los efectos del deterioro ambiental, de la hierba invasiva (Halophila stipulacea) y de los eventos climáticos extremos.
7. **Involucramiento comunitario:** Involucrar a las comunidades locales mediante programas de voluntariado y de ciudadanos científicos en la restauración y monitoreo de las hierbas marinas, promoviendo un sentido de responsabilidad y propiedad.
8. **Reducción de los impactos producto de los eventos climáticos extremos:** Abogar por acciones que mitiguen los impactos producto del calor extremo, ya que el aumento de la temperatura y la acidificación del océano afectan negativamente a las hierbas marinas.
9. **Áreas marinas protegidas:** Establecer áreas marinas protegidas que incluyan hábitats de hierbas marinas para asegurar su conservación y recuperación.
10. **Fomento de prácticas sostenibles:** Promover prácticas de pesca y recreativas sostenibles que minimicen el impacto en las comunidades de hierbas marinas.

Estas recomendaciones son esenciales para la restauración y conservación de las comunidades



de hierbas marinas en el Estuario de la Bahía de San Juan, contribuyendo a la salud del ecosistema marino.

Finalmente, una de las mayores prioridades debe ser la restauración de las comunidades de manglares en el estuario. Estos constituyen uno de los hábitats costeros dominantes de todo el sistema. Entre las recomendaciones específica se encuentran las siguientes:

1. **Restauración de manglares:** Implementar proyectos de reforestación con especies de manglares, principalmente con el mangle rojo (Rhizophora mangle), en áreas degradadas para recuperar la cobertura forestal. Esto debe lograrse fomentando el desarrollo de diversos viveros comunitarios para la crianza de árboles de mangle para la reforestación.
2. **Protección de áreas críticas:** Identificar y proteger áreas clave de manglares mediante la designación de áreas protegidas marinas y programas de integración

ciudadana y comanejo comunitario.

3. **Control de contaminación:** Reducir la contaminación del agua, especialmente de productos químicos y sedimentos, a través de la mejora de los sistemas de drenaje y tratamiento de aguas residuales.

4. **Monitoreo ecológico:** Establecer un programa de monitoreo para evaluar la salud de las comunidades de manglares y su biodiversidad, integrando programas de voluntariado y de ciudadanos científicos.

5. **Educación y sensibilización:** Desarrollar programas educativos para informar a la comunidad sobre la importancia de los manglares y su papel en la protección costera y la biodiversidad.



6. **Regulación de actividades:** Implementar regulaciones que restrinjan actividades destructivas, como la tala ilegal, la construcción y la pesca no sostenible en áreas de manglares.

7. **Investigación científica:** Fomentar estudios sobre la ecología de los manglares y su relación con otros ecosistemas, así como su respuesta a la degradación ambiental y los eventos climáticos extremos.

8. **Involucramiento comunitario:** Involucrar a las comunidades locales en proyectos de restauración y conservación, promoviendo un sentido de responsabilidad compartida.

9. **Adaptación a los eventos climáticos extremos:** Desarrollar estrategias para aumentar la resiliencia de los manglares ante el aumento del nivel del mar y otros impactos climáticos.

10. **Fomento de prácticas sostenibles:** Promover prácticas sostenibles en la pesca y el turismo que minimicen el impacto en los ecosistemas de manglares.

Estas recomendaciones son cruciales para la restauración y conservación de las comunidades de manglares en el Estuario de la Bahía de San Juan, contribuyendo a la protección del ecosistema costero.

La conservación y la restauración de la resiliencia social-ecológica del estuario son fundamentales no solo para la protección de su rica biodiversidad, sino también para el bienestar económico y social de las comunidades locales. Conservar los ecosistemas costeros y maximizar su resiliencia garantizará que las comunidades costeras urbanas puedan seguir beneficiándose de los servicios ecosistémicos y mejorar su capacidad de adaptación para hacer frente a los impactos adversos en el futuro (Nguyen et al., 2022). Esto amerita la implementación de estrategias de planificación y desarrollo sostenible de las costas a corto, mediano y largo plazo.

Al salvaguardar los ecosistemas costeros, se asegura la continuidad de los servicios esenciales como la pesca, el turismo y la protección natural de la infraestructura y la vida contra desastres. Además, estos esfuerzos fomentan la cohesión social y la participación comunitaria, así como crean oportunidades para el involucramiento y apoyo del sector privado, generando un sentido de pertenencia y responsabilidad social y corporativa hacia el entorno costero urbano. Invertir en la resiliencia del estuario beneficia no solo a las generaciones actuales, sino que también establece un legado sostenible para el futuro, garantizando que este invaluable recurso continúe prosperando en un mundo cada vez más desafiante ante la degradación ambiental, el aumento del nivel del mar y los eventos climáticos extremos. La salud del estuario es, en última instancia, un reflejo de la salud de la comunidad que depende de él y en un entorno de isla pequeña es aún más importante.



CIENCIA CIUDADANA, PARTICIPACIÓN Y GOBERNANZA HACIA LA RESILIENCIA SOCIOECOLÓGICA

Red Intermunicipal de Manejo Integrado de Recursos y Residuos: hacia un modelo de gobernanza colaborativa para una gestión sostenible

Cristina I. Ramírez Colón
Gerente de Desechos Acuáticos de ESTUARIO
Stacy A. Larancuent Ramos
Asesora de Política Pública de ESTUARIO
Paul Lanctin
Coordinador de Proyectos de Desechos Acuáticos de ESTUARIO

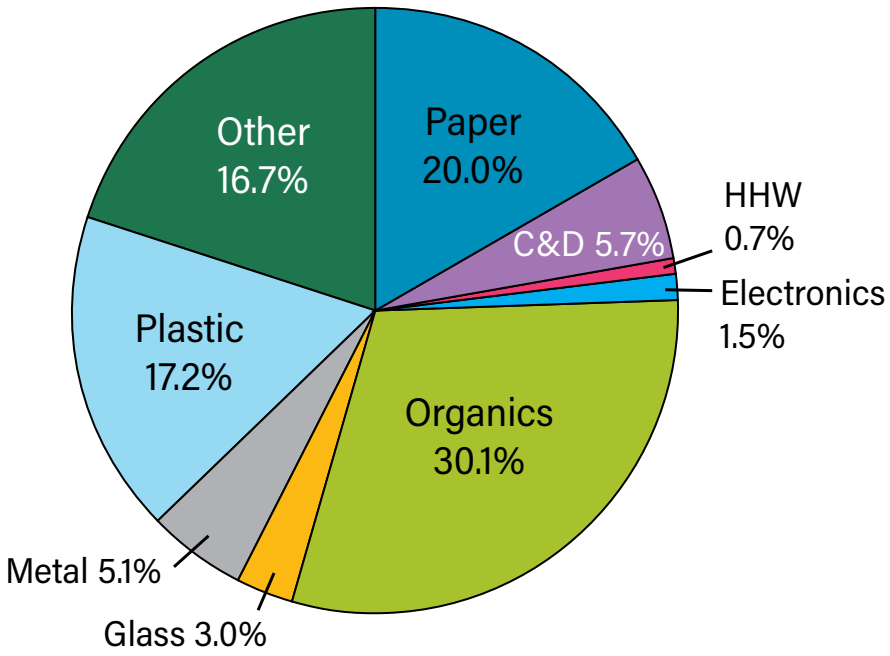
Las actividades humanas incontroladas resultan en la generación y el volumen desmedido de los residuos sólidos que se desechan en Puerto Rico diariamente. A menor escala, pero generando casi una tercera parte (⅓) de todos los residuos del archipiélago, los municipios de la cuenca del estuario enfrentan retos logísticos, económicos y ambientales (Estuario, 2022) que afectan la salud pública y los recursos naturales. En los pasados años, se han desarrollado investigaciones, esfuerzos colectivos y actividades puntuales para visibilizar la problemática de los residuos sólidos. En 2021, se publicó el plan *Generación Circular: hacia una economía circular*, que presenta una ruta hacia el manejo de los residuos sólidos compatible con el desarrollo de una economía sostenible y que promueve un uso coherente de los recursos que existen en la Isla. El plan presenta estrategias efectivas e integrales dentro de un marco de políticas viables que invitan al país a adoptar una propuesta comprensiva y accionable como sociedad.

Desde el Estuario de la Bahía de San Juan (ESTUARIO), nos dimos a la tarea de identificar acciones concretas que ayuden a mejorar la calidad del hábitat y aumentar los valores estéticos, recreativos y económicos, garantizando que la cuenca esté libre de residuos acuáticos como parte de las acciones establecidas en el Plan del Estuario. En 2022, se publicó el documento *Análisis y recomendaciones para el manejo integrado de recursos y residuos*, enmarcado en los conceptos de la economía circular y dirigido a atender las oportunidades y necesidades de los municipios de la cuenca. El informe tiene como propósitos: 1) aumentar el conocimiento e interés ciudadano, 2) promover la transparencia y la rendición de cuentas, 3) estructurar formas de trabajo más efectivas, 4) maximizar el uso de fondos, 5) lograr conexiones entre los diversos actores, y 6) aprovechar los recursos y materiales bajo la economía lineal en la cual nos hemos educado. Este análisis ayuda a trazar un camino de colaboración y comparte estrategias que adelantan los esfuerzos de reducción, desvío, reúso, reciclaje y educación para los municipios. En conclusión, presenta seis recomendaciones que invitan a los municipios estuarinos a implementarlas a nivel regional, fomentando un modelo de gobernanza colaborativa para una gestión sostenible.

En el 2023, la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica y la Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés) elaboraron el Plan Estratégico de Puerto Rico para Reducir los Desechos Acuáticos, herramienta que promueve la coordinación multisectorial activa y medible, y la colaboración amplia, con la finalidad de reducir los desechos en los cuerpos de agua de la Isla. El plan cuenta con las siguientes metas: prevención, remoción y disposición, respuesta de emergencia y coordinación.

Por último y más reciente, en el 2024, el Departamento de Recursos Naturales y Ambientales (DRNA) publicó el *Estudio de Caracterización de Residuos Sólidos de Puerto Rico* (Figura 1). Los resultados muestran que un total estimado de 55,000 toneladas de residuos se manejaron en las instalaciones de la Isla para el 2023. Estos se caracterizaron en nueve categorías, siendo los más comunes: residuos orgánicos (30 %), papel (20.2 %) y plástico

2023 Waste Characterization Study / Department of Natural and Environmental Resources
Island-wide MSW Composition



Simple Bin Category		Comp.
Paper	Corrugated Cardboard (OCC)	8.4%
	High Quality Paper (Newspaper/Print, Magazines, Catalogs)	1.3%
	Low Quality Paper (Mixer Paper)	3.8%
	Compostable Paper (Paper Towels/ Napkins, Non-Coated)	4.7%
	Remainder/Composite Paper	1.8%
Plastic	PET (Plastic #1)	2.2%
	HDPE (Plastic #2)	1.5%
	Other (Plastic #3 to #7)	2.7%
	Other Rigid Plastic	2.1%
	Other Plastic Film	6.9%
	Chip Bags/Candy Wrappers (Multiple Layered Packaging)	0.4%
	Remainder/Composite Plastic	1.4%

Simple Bin Category		Comp.
Metal	Ferrous Metals (incl. Cans)	3.3%
	Aluminum Cans/Foil	1.3%
	Other Non-Ferrous Metals	0.5%
Glass	Glass Bottles/Jars	3.0%
Organics	Food Scraps	13.7%
	Yard Waste (Leaves, Grass, Brush)	13.1%
	Remainder/Composite Organics	3.3%
Electronics	Mixed Electronics	1.5%
HHW	Batteries	0.1%
	Biomedical Waste	0.3%
	Remainder/ Composite HHW	0.2%
C&D	Mixed C&D	5.7%
Other	Textiles and Clothing	6.0%
	Diapers/Sanitary Products	4.4%
	Rubber	0.5%
	Unclassified	5.7%

Figura 1. Composición de los residuos sólidos municipales a nivel Isla, Estudio de Caracterización (DRNA, 2023).



Es imperativo que los ciudadanos y municipios reconozcan de manera urgente el problema que representa la generación y disposición inadecuada de residuos sólidos, busquen nuevas alternativas y adopten conductas de consumo más responsables y sostenibles.

(17.3 %) (Figura 1). El 51 % de los residuos provino del sector residencial. Es imperativo que los ciudadanos y municipios reconozcan de manera urgente el problema, busquen nuevas alternativas y adopten conductas de consumo más responsables y sostenibles. En conclusión, el estudio presenta 12 oportunidades de integrar tendencias económicas y demográficas al manejo de los residuos sólidos en Puerto Rico. Otro proyecto en curso que utilizará estos resultados es el Plan Integrado de Infraestructura de Residuos Sólidos de Puerto Rico, liderado por el DRNA.

Esfuerzos como los mencionados son proyectos alineados con la política pública actual en Puerto Rico. Se conoce como política pública al conjunto de acciones intencionales, diseñadas para abordar las causas de los problemas y alcanzar los objetivos de valor para la sociedad. Las políticas públicas proporcionan un marco que facilita la colaboración entre diferentes sectores, creando un sistema en el que cada actor tiene un rol definido. Este enfoque permite que las políticas públicas se utilicen como instrumentos efectivos para lograr resultados concretos. Cada jurisdicción formula políticas públicas con el fin de atender los desafíos específicos de su comunidad, de acuerdo con sus prioridades y necesidades.

La inclusión de diversos actores en el desarrollo de políticas públicas es un factor clave para su éxito. Involucrar a la comunidad, las organizaciones no gubernamentales (ONG) y a los sectores privado y público permite capturar una variedad de perspectivas. Esta colaboración asegura que las soluciones propuestas se adapten a las circunstancias únicas, lo que aumenta la efectividad de las políticas públicas al tomar en cuenta a la comunidad y los recursos disponibles. Además, la colaboración entre sectores fomenta un ambiente de participación que beneficia a todos; establece las bases para un desarrollo sostenible a largo plazo a favor de las generaciones actuales y futuras.

La problemática de los residuos sólidos y desechos acuáticos ha sido atendida en otras jurisdicciones a través de políticas públicas exitosas, enmarcadas en la participación, estructuración y fiscalización de diversos actores. Estas políticas públicas promueven una gestión integrada de los recursos y residuos esencial para un futuro más sostenible. Aplicar la dinámica de la gobernanza colaborativa es crucial para el manejo integrado de los recursos y residuos en Puerto Rico, donde una política pública bien formulada se convierte en una herramienta necesaria para proteger la salud pública y los recursos naturales, incluyendo la calidad del agua.

Desde ESTUARIO, y como parte de las recomendaciones publicadas en 2022, se ha buscado fomentar un modelo de gobernanza colaborativo, implementando la recomendación #2: Impulsar la colaboración estructurada entre los municipios, a través de la creación de la Red Intermunicipal

de Manejo Integrado de Recursos y Residuos de la Cuenca (Red). La Red reúne a representantes municipales de diversas dependencias, en un espacio donde se busca facilitar la planificación conjunta dirigida a minimizar el consumo y el desecho. También se procura maximizar el reúso y el reciclaje, identificar oportunidades de financiamiento federal y otros programas que permitan atender las necesidades detectadas a nivel municipal y regional. Como parte de la Red, se desarrolló un acuerdo de entendimiento con el fin de consolidar el compromiso de los municipios con los esfuerzos dirigidos a garantizar una cuenca libre de residuos acuáticos. Esta colaboración busca desarrollar una alianza estratégica y oficial para implementar acciones conjuntas dirigidas al objetivo de desarrollar el Plan Integral de Manejo de Recursos y Residuos de la Cuenca del Estuario.

Las reuniones de la Red comenzaron en abril de 2023. Hasta el segundo semestre del 2024, hemos logrado celebrar un total de seis reuniones entre los municipios de la cuenca junto a otros colaboradores. En estos encuentros se han presentado: 1) la publicación del análisis y recomendaciones del manejo integrado de recursos y residuos de la cuenca, 2) las oportunidades de fondos de agencias federales, 3) estrategias y propuestas de política pública alineadas con las responsabilidades de los municipios, 4) iniciativas para la implementación de los programas de desvío de aceite y empresas que ofrecen servicios de recogido, 5) talleres de desarrollo de capacidades y 6) la reunión anual que buscó facilitar una discusión sobre el cumplimiento de la política pública y la responsabilidad de desarrollar planes de reciclaje.

Con el fin de facilitar y compartir la política pública con los municipios y otras audiencias, ESTUARIO desarrolló la Biblioteca de Política Pública. El objetivo de esta herramienta virtual es divulgar y clasificar de manera ordenada las políticas públicas relacionadas con la gestión de recursos y residuos. Las clasificaciones en la biblioteca están segmentadas en: leyes federales y estatales, ordenanzas y códigos municipales, proyectos de ley, planes, reglamentos e informes. Esto promueve la colaboración entre ciudadanos, organizaciones, el gobierno y otros actores, lo que fomenta un enfoque más sostenible y responsable en la gestión de nuestros recursos. La herramienta facilita capacitar a la comunidad e invitarla a tomar decisiones más informadas y responsables hacia un futuro más sostenible.

Un ejemplo reciente es la Ley 51-2022, Ley para prohibir el expendio y utilización de plásticos de un solo uso, publicada en la Biblioteca de Política Pública junto a su Reglamento 9570. Este reglamento es producto de las dos agencias fiscalizadoras de la Ley, el DRNA y el Departamento de Asuntos del Consumidor (DACO). Ambas políticas públicas expresan la prohibición de los siguientes seis artículos de plástico de un solo uso: cubiertos, platos, sorbetos, vasos, tazas y contenedores de alimentos hechos de poliestireno expandido (foam).



Una política pública bien formulada puede convertirse en una herramienta necesaria para proteger la salud pública y los recursos naturales, incluyendo la calidad del agua.

Desde ESTUARIO se han liderado diversos esfuerzos relacionados con esta legislación. Entre ellos:

1. talleres informativos
2. campañas educativas sobre el manejo responsable de los residuos sólidos a través de la cuenca
3. el desarrollo de una hoja informativa
4. la coordinación de los Juntes a beneficio de los comerciantes en la calle Loíza y en Piñones con el objetivo de presentar a los comercios alternativas a los plásticos de un solo uso.

Por último, se desarrollaron comentarios al Reglamento y se difundió una serie de publicaciones educativas enfocadas en la iniciativa global Julio sin plástico.

Estos esfuerzos fueron posibles gracias a la colaboración de los municipios de la cuenca a través de la Red Intermunicipal de Manejo Integrado de Recursos y Residuos. Con el fin de innovar y mejorar la gestión de los residuos en la región metropolitana, se documentaron y presentaron casos exitosos y casos fallidos en otras jurisdicciones que sirven de modelos a replicar dentro de un contexto intermunicipal. La iniciativa permitió identificar prácticas efectivas ya probadas, facilitando la adopción de estrategias innovadoras que minimicen el riesgo de errores y aumenten las probabilidades de éxito en la gestión integrada de residuos en la cuenca del estuario.

Se utilizaron tres casos a modo de ejemplo: la ciudad de San Francisco, el condado de Honolulu en Hawái y la isla de Martinica. Cada uno proveyó lecciones valiosas que pueden adaptarse a las necesidades locales. Por otro lado, el análisis de la crisis en Nápoles, Italia, ejemplifica desafíos y riesgos que emergen en sociedades sin espacios para la participación, sin estructura ni fiscalización. En conclusión, estos casos mostraron que el éxito depende de: 1) una planificación estratégica sólida que priorice la prevención y el manejo adecuado de los residuos, 2) una colaboración efectiva entre los gobiernos locales y los sectores público y privado, y 3) una participación comunitaria activa con transparencia en la información.

Es fundamental desarrollar herramientas con el fin de fortalecer las capacidades locales. Para esto, se presentó una serie de recursos enfocados en potenciar las capacidades necesarias para los municipios de la región. Una de las reuniones de la Red se enfocó en proveer herramientas y promover prácticas sostenibles que permiten gestionar los residuos de manera más eficiente con menos impacto ambiental. Estas herramientas se resumen de la siguiente manera:



- Implementación de un programa de capacitación intermunicipal.
- Identificación de fondos de financiamiento.
- Homogeneización de programas de reciclaje.
- Creación de programas de comunicación, sensibilización y participación pública.
- Fomento, mejora e implementación de las alianzas público-privadas.
- Medición del progreso en el desarrollo de capacidades.

ESTUARIO coordinó la reunión anual de la Red, a la cual asistieron representantes de municipios, agencias gubernamentales, empresas privadas y organizaciones sin fines de lucro. Los objetivos del evento fueron: 1) reportar los logros y avances de la Red, 2) identificar oportunidades de colaboración para fortalecer el Plan de Acción Intermunicipal de Manejo Integrado de Recursos, y 3) proporcionar herramientas para desarrollar planes de reciclaje a nivel municipal (Figura 2).

El gobierno municipal de Trujillo Alto fue el anfitrión de este evento y portavoz de su inauguración, como parte de la extensión de su programa de reciclaje, galardonado con una subvención de la EPA. Como parte de la reunión, se facilitó un taller colaborativo con la participación de los diversos sectores, con el propósito de adelantar el desarrollo de planes de re-

ciclaje alineados con las políticas públicas vigentes. Por otro lado, contamos con la participación de representantes del DACO para hablar sobre la Ley 51-2022 y el Reglamento 9570, su implementación y su aplicación; y personal del DRNA presentó los proyectos actuales y futuros sobre el manejo de los recursos y residuos en Puerto Rico. El evento concluyó con una presentación de Generación Circular sobre las oportunidades y subvenciones disponibles para los municipios.

Esta actividad es un ejemplo del éxito de la colaboración intermunicipal y del sector público-privado. Fue un espacio de sinergia para compartir experiencias, abordar desafíos comunes y emprender un camino hacia una gobernanza colaborativa para una gestión sostenible a nivel regional.

A modo de conclusión, compartimos otros esfuerzos concretos y exitosos que buscan aportar a la gestión sostenible expuesta en este artículo. A través de los pasados años, ESTUARIO se dio a la tarea de desarrollar el Modelo Estratégico que visibiliza los esfuerzos de uno de los Centros Resilientes de la cuenca. Esta herramienta, dividida en secciones, ayuda a crear programas para reducir, reutilizar, desviar y reciclar recursos y residuos desde el ámbito comunitario. En la sección I, se presenta el modelo de una estructura replicable de reducción, reutilización, desvío y reciclaje. En la sección II, se presentan diversas herramientas favorables para cada sector, como son: políticas públicas, sus etapas y sus roles en los problemas de la sociedad, así como las subvenciones. La sección III, contiene el Manual de implementación y sugerencias de aplicabilidad y relevancia para áreas geográficas diversas, guía para conocer la comunidad e implementar prácticas responsables a beneficio del medioambiente. Se presenta un caso de estudio que brinda la experiencia de una comunidad y su proceso. Por último, se encuentra la Guía para la creación de un programa de desvío de aceite vegetal, acompañada por el ejemplo de comunidades con características diversas que lo implementaron de manera exitosa. Los portavoces de la efectividad son: Taller Comunidad La Goyco, el Centro Comunitario de Puente Blanco, la institución educativa Robinson School y las urbanizaciones Río Piedras Heights y El Paraíso. El Modelo Estratégico en su totalidad se convierte en una herramienta aplicable y replicable para su implementación en áreas geográficas diversas.

Otros esfuerzos educativos enfocados en la implementación del programa de manejo de aceites y grasas se llevaron a cabo a través de la pasantía de educación y concienciación sobre el manejo de los recursos y residuos. Estudiantes universitarios se destacaron en ofrecer talleres de desvío de aceites a través de los municipios de la cuenca. Un total de 108 personas recibieron información sobre la importancia de desviar



Figura 2. Participantes de la reunión de la Red Intermunicipal de Manejo Integrado de Recursos y Residuos de la cuenca, a la cual asistieron representantes de municipios, agencias gubernamentales, empresas privadas y organizaciones sin fines de lucro.









el aceite vegetal, salvaguardar la infraestructura gris y conservar la calidad del agua. Un esfuerzo puntual en el manejo adecuado de aceites y grasas fue la colaboración interagencial, coordinando el operativo educativo entre el Municipio de San Juan, la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados y ESTUARIO. Este esfuerzo se enfocó en el sector comercial, específicamente en los restaurantes de la calle Loíza.

Por último, ESTUARIO continúa los esfuerzos para reducir significativamente los desechos acuáticos más allá de su cuenca hidrográfica, a través de la campaña colaborativa *Reduzcamos juntos nuestra huella ambiental de costa a costa*, realizada junto a las organizaciones LimPiaR y Alelí Environmental (Figura 3). La iniciativa busca crear conciencia en torno al modelo de gestión sostenible enfocado en el manejo integrado de los recursos y residuos.


Reduzcamos juntos
nuestra huella ambiental
de costa a costa
COMIDA SIN HUELLA
ALIANZA DE RESTAURANTES POR LAS PLAYAS
QUE NO TOQUE EL PISO
NI LLEGUE AL AGUA
Deja una
huella limpia
en Piñones
¡Únete a este
esfuerzo!

Figura 3.

Científicos somos todos: El rol de ESTUARIO en la diseminación, aplicación y accesibilidad de conocimientos científicos



Desde sus inicios, ESTUARIO ha reconocido el rol esencial que desempeñan los voluntarios y ciudadanos en llevar a cabo su misión de restaurar y conservar la calidad de las aguas del ecosistema del Estuario de la Bahía de San Juan.

Sahid L. Rosado Lausell
Gerente de Educación y Ciencia Ciudadana
ESTUARIO

Si bien podemos reconocer que durante los tiempos prehistóricos la ciencia se practicaba por todos —personas sin títulos académicos ni batas blancas— durante el transcurso del siglo XIX, un giro cultural llevó a que la práctica de la ciencia se tornara exclusiva y que los científicos se percibieran como aquellos que trabajaban en problemas altamente complejos, difíciles de entender para la mayoría. Por esto, no nos debe sorprender que aún la ciencia luzca inaccesible y que el conocimiento y las destrezas científicas parezcan estar en manos de unos pocos. Reconociendo esta problemática, muchos se han dado a la tarea de romper con esas nociones y democratizar la participación en la ciencia, incluyendo a ESTUARIO.

Desde sus inicios, ESTUARIO ha reconocido el rol esencial que desempeñan los voluntarios y los ciudadanos en llevar a cabo su misión de restaurar y conservar la calidad de las aguas del ecosistema del Estuario de la Bahía de San Juan. Esto se refleja en las acciones realizadas durante los últimos 30 años, tales como la Red Comunitaria de Agua, la iniciativa escolar Guardianes del Estuario y la más reciente de Certificación de Ciudadanos Científicos (CCC).

Centrados en la premisa de que la ciencia es de todos y para todos, la CCC de ESTUARIO da paso a la participación pública en prácticas científicas, entre ellas, la recopilación de datos científicos, el registro y documentación de información, y el análisis y diseminación de datos científicos. De esta forma, ESTUARIO logra promover el desarrollo científico del público en general con el fin de que puedan y deseen asumir roles primordiales en los esfuerzos de restauración y conservación junto a científicos profesionales.

Lanzado en el año fiscal 2017-2018, la CCC comenzó con los módulos de Monitoreo de Calidad del Agua y Censos de Aves Participativos. Durante el siguiente año fiscal, se añadió un tercer módulo —Caracterización y Reducción de Microplásticos—, el cual atrajo la participación de 112 personas en su año inaugural (Tabla 1). Estos tres módulos se ofrecen hoy en día. Al momento de esta publicación, la CCC consta de cuatro módulos —el más reciente es el módulo de Resiliencia Costera, el cual se añadió en 2022—, cada uno acompañado de talleres de capacitación y experiencias de campo.

Título del módulo	Descripción general	Taller introductorio	Talleres temáticos	Experiencias de campo
Monitoreo de Calidad del Agua	Presenta los conceptos básicos del análisis de parámetros de calidad del agua con el fin de determinar las condiciones actuales de los ecosistemas de la cuenca del estuario.	*Calidad del agua*	1. Análisis bacteriológico del agua 2. Parámetros físico-químicos del agua	1. Monitoreo de calidad del agua 2. Monitoreo bacteriológico de calidad del agua
Censos de Aves Participativos	Presenta los conceptos básicos de identificación de aves, así como las técnicas, herramientas y tecnologías para realizar censos de aves en los diversos ecosistemas de la cuenca del estuario.	*Introducción a censos de aves participativos*	1. Aves acuáticas de los humedales del estuario 2. Aves endémicas de Puerto Rico en la cuenca del estuario 3. Introducción a eBird y Merlin Bird ID: identificando, contando y registrando aves	1. Censo de aves participativos
Caracterización y Reducción de Microplásticos	Presenta los conceptos básicos para identificar partículas de plástico en la arena y el agua. Además, ofrece información sobre las técnicas y los recursos disponibles para tomar muestras de microplásticos en la cuenca del estuario.	*Introducción a microplásticos y otros desechos acuáticos*	1. Microplásticos en arena 2. Plásticos a microplásticos: política pública e impactos	1. Caracterización y reducción de microplásticos
Resiliencia Costera	Presenta conceptos enfocados en ecosistemas tropicales costeros con el fin de estudiar los servicios que proveen y sus roles en la resiliencia socioecológica.	*Resiliencia costera*	1. Restauración costera de dunas y manglares 2. Evaluación ecológica de corales y hierbas marinas	1. Siembra de vegetación costera 2. Evaluación ecológica de hierbas marinas 3. Evaluación ecológica de arrecifes de coral

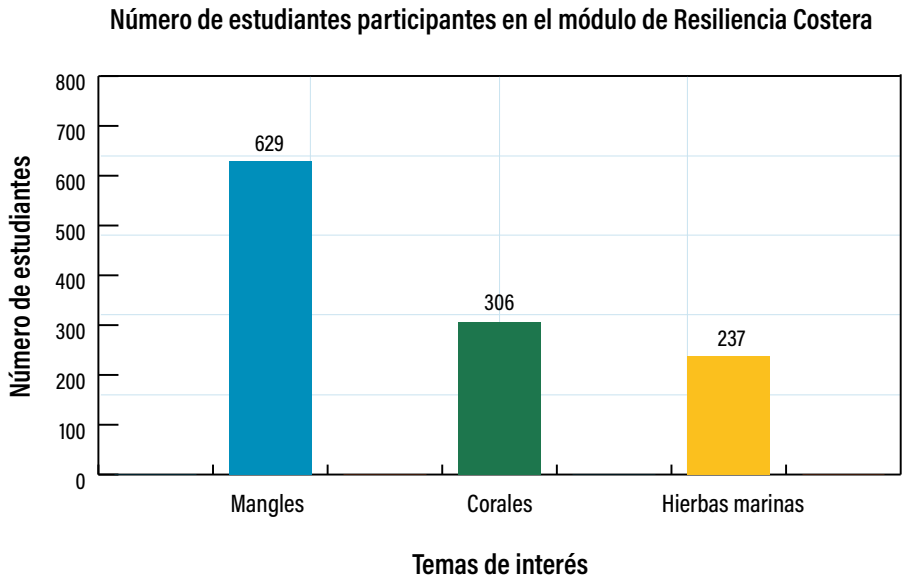


Figura 1. Participación de estudiantes de escuela superior en el módulo de Resiliencia Costera en 2023.

La CCC no requiere nada de los participantes, más allá del compromiso y la motivación de aprender y desarrollar destrezas científicas. Se ofrece de forma gratuita y no exige conocimiento científico previo. Los talleres de capacitación se ofrecen virtualmente para que todos puedan sintonizarse. Esto permite la participación de todos, sin importar sus calificaciones o trasfondo académico. De esta forma, ESTUARIO no solo democratiza la participación en la ciencia, sino que fomenta a gran escala el cuidado por el medioambiente y los ecosistemas, como bien compartió un ciudadano científico recientemente: "[La iniciativa] me ayuda a crear más conciencia sobre el tema y aplicarlo a mi vida diaria. Además de [permitirme] compartir con otros el conocimiento adquirido".

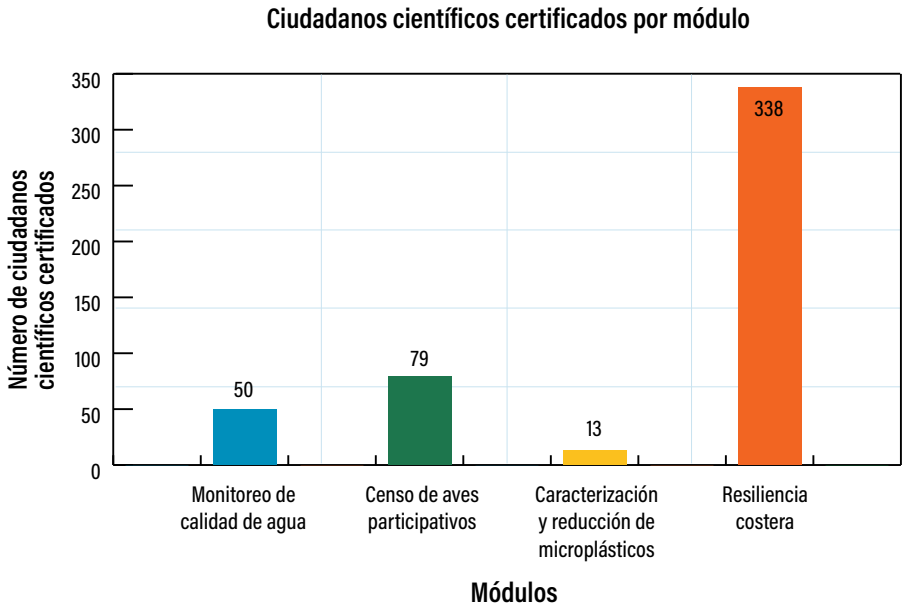


Figura 2. Número de ciudadanos científicos certificados por módulo a partir de 2020.

Es precisamente por su compromiso con el público que, en 2023, ESTUARIO expandió el módulo de Resiliencia Costera para incluir grupos de escuela superior. Desde entonces, y con el apoyo de maestros, directores de escuela, consejeros y la comunidad escolar en general, ha llegado a cerca de 1,000 estudiantes de escuela superior provenientes de 10 escuelas alrededor de la cuenca hidrográfica, asegurando que el trabajo de restauración y conservación se lleve a cabo a escalas mayores (Figura 1).

Desde 2020, cerca de 500 ciudadanos han recibido la CCC a través de los cuatro módulos. Los módulos han llegado también a más de 4,850 personas, de las cuales alrededor del 20 % son estudiantes de escuela superior (Figuras 2 y 3).

Es con estos ciudadanos científicos certificados que ESTUARIO cuenta para que contribuyan y lideren esfuerzos de restauración y conservación de las aguas en sus propias comunidades y a través de la cuenca hidrográfica. De hecho, en julio de 2024, ESTUARIO celebró a Angeli Torres, la primera ciudadana científica certificada y capacitada que lideró y realizó sin supervisión un monitoreo semanal bacteriológico de la Laguna del Condado y playas limítrofes –incluyendo la preparación del equi-

po, el muestreo de campo, el análisis de las muestras y el informe de los resultados para el público. Con esta gesta, Angeli Torres demostró que ESTUARIO y su CCC van encaminados hacia su objetivo de aumentar la participación ciudadana en las ciencias para que puedan aportar a los esfuerzos de restauración y conservación.

Angeli Torres es graduada de la Universidad Ana G. Méndez de Cupey, donde completó el bachillerato en Biología. Ha participado como voluntaria en el programa de Mamíferos Marinos y Especies Protegidas del Departamento de Recursos Naturales y Ambientales de Puerto Rico. Como estudiante de SEAS Island Alliance, participó en el internado Bridge to PhD, en la Penn State University, donde realizó una investigación independiente centrada en la fotoquímica de los corales. Actualmente, Angeli es *Workforce Fellow* de la propuesta SEAS Island Alliance de la Universidad Interamericana. Su trabajo se enfoca en el mantenimiento de fincas de coral en Culebra.

¿Hacia dónde vamos?

Es importante reconocer que los retos ambientales que enfrentamos hoy día se podrán solucionar solo cuando más personas entiendan y trabajen por la restauración y conservación del ambiente. Con esta urgencia, es imperativo que reconozcamos que todos somos científicos y que todos podemos contribuir a generar información científica que dé paso a soluciones sostenibles para ayudar a corregir el daño que le hemos ocasionado a nuestro medioambiente.

Sin embargo, aún queda camino por recorrer para llegar a esto. Según el estudio más reciente y comprensivo de la Fundación Nacional de Ciencias de Estados Unidos sobre la diversidad en los grados otorgados y empleos dentro de las ciencias, tecnología, ingeniería y matemáticas (STEM, por sus siglas en inglés), solo el 35 % de la fuerza laboral STEM son mujeres, el 24 % proviene de grupos minoritarios y el 3 % tiene alguna discapacidad (National Center for Science and Engineering Statistics, 2023). Con esto, ESTUARIO se enfrenta a otro gran reto: ¿cómo se puede lograr que, en efecto, todos podamos ser científicos y podamos contribuir a las ciencias si quisiéramos, sin necesidad de títulos académicos, batas blancas ni rasgos demográficos específicos? Ciertamente es un gran desafío y uno que requiere de esfuerzos incansables de entidades como ESTUARIO y otras. Por eso, le extendemos una invitación a unirse a dichos esfuerzos —así sea certificándose como ciudadano científico con ESTUARIO, incentivando a otros a certificarse o uniéndose a grupos y entidades con fines similares— ya que ¡científicos somos todos!

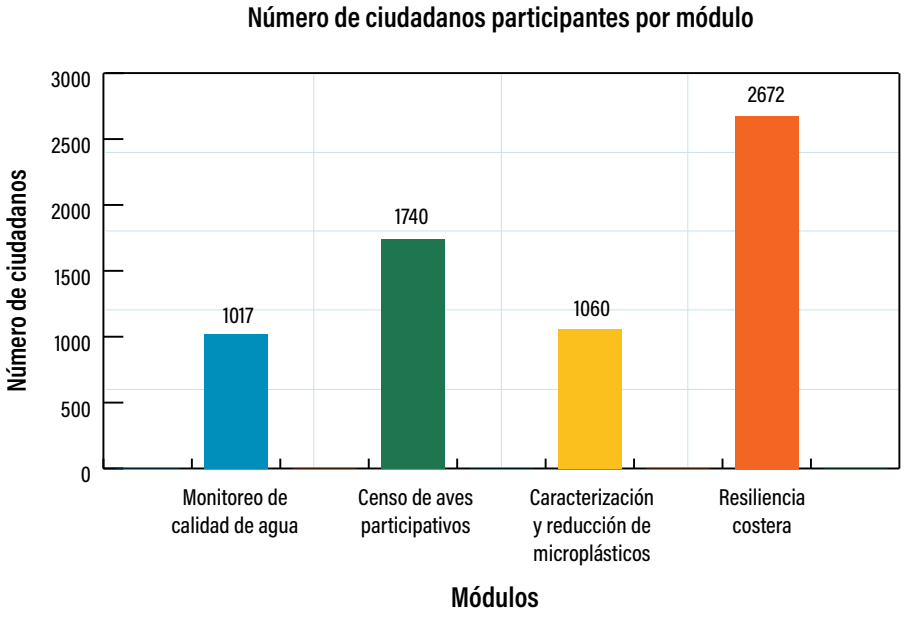


Figura 3. Número de ciudadanos participantes en la CCC a partir de 2020.



ESTUARIO

Los programas de concienciación ambiental y su importancia en la conservación del Caño Martín Peña y el entorno natural urbano en el Distrito de Planificación Especial del Caño Martín Peña



Las ocho comunidades que forman parte del Distrito de Planificación Especial del Caño Martín Peña en San Juan son: Barrio Obrero Oeste, Barrio Obrero San Ciprián, Barrio Obrero Marina, Buena Vista Santurce, Parada 27, Las Monjas, Buena Vista Hato Rey e Israel-Bitumul.

Estrella D. Santiago Pérez
Gerente del Área de Asuntos Ambientales
Corporación del Proyecto ENLACE del Caño Martín Peña

Sobre el Proyecto ENLACE del Caño Martín Peña

El Proyecto ENLACE del Caño Martín Peña (Proyecto ENLACE) es una iniciativa que vincula a los sectores público, privado y comunitario para rehabilitar y revitalizar las comunidades aledañas al Caño Martín Peña (CMP) con el fin de mejorar la calidad de vida, recuperar los recursos naturales y superar la pobreza a través de la autogestión de los(as) residentes de dichas comunidades. Sus beneficios trascienden estas comunidades y repercuten en mejoras sustanciales al entorno urbano y ambiental del área metropolitana de San Juan. Las ocho comunidades que forman parte del Distrito de Planificación Especial del Caño Martín Peña (Distrito) en San Juan, Puerto Rico, son: Barrio Obrero Oeste, Barrio Obrero San Ciprián, Barrio Obrero Marina, Buena Vista Santurce, Parada 27, Las Monjas, Buena Vista Hato Rey e Israel-Bitumul.

Los trabajos del Proyecto ENLACE se enmarcan en la política de participación ciudadana en el proceso de toma de decisiones, las metas y políticas rectoras, y los proyectos y programas del Plan de Desarrollo Integral y Usos del Terreno del Distrito de Planificación Especial del Caño Martín Peña (Plan del Distrito). El Proyecto ENLACE se compone de las siguientes entidades:

Corporación del Proyecto ENLACE del Caño Martín Peña (Corporación): Corporación pública creada al amparo de la Ley Núm. 489 del 24 de septiembre de 2004, según enmendada, encargada de coordinar e implementar las políticas públicas y los proyectos contenidos en el Plan del Distrito. El Plan está dirigido a promover el desarrollo urbano, social y económico equitativo de las ocho comunidades que conforman el Distrito.

Grupo de las Ocho Comunidades Aledañas al Caño Martín Peña, Inc. (G-8): Reúne al liderato comunitario, integrando a más de 12 organizaciones de base comunitaria, cívicas y recreativas de cada una de las comunidades aledañas al Caño. La misión del G-8 es promover el interés y la participación efectiva y asertiva de los residentes de las ocho comunidades, mediante el desarrollo y la implementación de programas, estrategias y actividades dirigidas a la permanencia, la autogestión y el desarrollo integral, mejorando la calidad de vida de los residentes de las comunidades aledañas al Caño.

Fideicomiso de la Tierra del Caño Martín Peña: Mecanismo novedoso de tenencia colectiva de la tierra que atiende el histórico problema de falta de titularidad, evita el desplazamiento involuntario de la comunidad como resultado de las fuerzas del mercado, garantiza vivienda asequible, y permite generar ingresos para reinvertir en el área y superar la pobreza.



El Plan del Distrito está dirigido a promover el desarrollo urbano, social y económico equitativo de las ocho comunidades establecidas en torno al Caño Martín Peña.



Una de las metas y políticas rectoras del Plan del Distrito es promover una mayor concienciación y apoderamiento ambiental entre los residentes del Caño Martín Peña.

G-8

Su misión es promover el interés y la participacion efectiva y asertiva de los vecinos mediante el desarrollo de iniciativas dirigidas a la permanencia, autogestión y el desarrollo integral, mejorando la calidad de vida de los residentes de las ocho comunidades aledañas al Caño Martín Peña.

Sobre los programas de concienciación ambiental en el Distrito

La integración de la población juvenil en las discusiones sobre la conservación ambiental y los eventos climáticos extremos es sumamente importante para los procesos de planificación y adaptación. La participación activa en asuntos comunitarios como la sostenibilidad medioambiental es uno de los muchos procesos que fomentan el desarrollo positivo de la juventud. (Pittman, Irby, Tolman, Yohalem, & Ferber, 2003; Schusler & Krasny, 2010). Los programas enfocados en la naturaleza, que incluyan un currículo estructurado, fomentan un sentido de pertenencia medioambiental entre los(as) jóvenes.[2] Una de las metas y políticas rectoras del Plan del Distrito es "[p]romover una cultura de conservación, sensibilidad y respeto hacia el CMP, y una mayor concienciación y apoderamiento ambiental entre los(as) residentes". De conformidad con las metas y políticas sobre ambiente del Plan del Distrito, la Corporación creó el Programa de Concienciación Ambiental y Jóvenes Científicos(as) del CMP (Programa) como un elemento clave para prevenir la contaminación, promover el empoderamiento y propiciar la restauración ambiental del Caño.

A través del Programa —el cual se divide entre Patrulleros del Ambiente a nivel elemental y Estudiantes Dispuestos a la Restauración Ambiental del Caño (EDRA) a nivel superior— las y los estudiantes aumentan sus conocimientos sobre los problemas de salud pública a los que se enfrentan y cómo proteger su salud ante esos retos. Además, desarrollan un sentido de la importancia de conocer, proteger y restaurar el Caño como un cuerpo de agua urbano e integral para el sistema del Estuario de la Bahía de San Juan. Asimismo, promueve el campo de las ciencias como una alternativa de educación superior y profesional entre la juventud residente en el Distrito.

A través del Programa —el cual se divide entre Patrulleros del Ambiente a nivel elemental y Estudiantes Dispuestos a la Restauración Ambiental del Caño (EDRA) a nivel superior— las y los estudiantes aumentan sus conocimientos sobre los problemas de salud pública a los que se enfrentan y cómo proteger su salud ante esos retos. Además, desarrollan un sentido de la importancia de

1 Browne, Laurie P., et al. "Engaging Youth in Environmental Sustainability: Impact of the Camp 2 Grow Program." *Journal of Park and Recreation Administration*, vol. 29, no. 3, 2011, pp. 70–85, www.researchgate.net/profile/Barry-Garst/publication/266386118_Engaging_youth_in_environmental_sustainability_Impact_of_the_Camp2Grow_Program/links/5666d7ef08ae4d38f7abfc5c/Engaging-youth-in-environmental-sustainability-Impact-of-the-Camp2Grow-Program.pdf. Accessed 22 Oct. 2024.

2 Véase, íd.

conocer, proteger y restaurar el Caño como un cuerpo de agua urbano e integral para el sistema del Estuario de la Bahía de San Juan. Asimismo, promueve el campo de las ciencias como una alternativa de educación superior y profesional entre la juventud residente en el Distrito.

El Programa tiene como VISIÓN promover un modelo de liderazgo participativo, en el que niños(as) y jóvenes se conviertan en facilitadores(as) y protagonistas de actividades enfocadas en el empoderamiento, el conocimiento y la concienciación ambiental; su MISIÓN es aumentar el conocimiento sobre situaciones ambientales en el entorno escolar y comunitario mediante un sentido de pertenencia, respeto y sensibilidad hacia el medioambiente, y el análisis crítico para la toma de decisiones responsables.

Los tres pilares principales del Programa son:

Soberanía alimentaria: Según la Red de Cátedras Libres de Soberanía Alimentaria y Colectivos Afines (Red CALISAS), la soberanía alimentaria "es el derecho de las personas, pueblos, comunidades y países a definir sus propias políticas agrícolas, laborales, pesqueras, alimentarias y de acceso a la tierra, de forma adecuada al punto de vista ecológico, social, económico y cultural de sus circunstancias únicas". [3] Mediante la participación en talleres y la creación y mantenimiento de huertos escolares, los(as) estudiantes aprenden sobre la biología de







3 "Quiénes Somos - Red Calisas". Red Calisas, 5 Sept. 2024, redcalisas.org/quienes-somos/. Accessed 28 Oct. 2024.

4 *Véase*, Business, Faculty of. "How Citizen Science Can Benefit Research in Tackling Societal Problems." *Business.leeds.ac.uk*, business.leeds.ac.uk/research-cdr/dir-record/research-blog/2111/how-citizen-science-can-benefit-research-in-tackling-societal-problems.





plantas, prácticas agroecológicas y la importancia del acceso a una alimentación saludable. Asimismo, se promueve la toma de decisiones en el diseño, la elección de siembra en el huerto y los usos de los huertos escolares.

Manejo del agua: A través de talleres prácticos sobre calidad y monitoreo del agua del CMP, los(as) estudiantes adquieren perspectiva sobre el rol biológico que tiene el CMP en el ecosistema del estuario. Asimismo, este pilar promueve la ciencia ciudadana como herramienta para fomentar el entendimiento de los estudiantes sobre la relación entre la calidad del agua del CMP, la degradación ambiental, la protección de las comunidades y de su ambiente. La ciencia ciudadana ayuda a "democratizar la ciencia", fomentando un diálogo más profundo sobre los retos medioambientales asociados a la degradación ambiental del CMP y la importancia de la participación en el proceso de restauración ambiental de dicho cuerpo de agua estuarino. [4]

Manejo de desperdicios sólidos: En alianza con la empresa comunitaria Martín Peña Recicla, Inc., se realizan talleres enfocados en la reducción, el reúso y reciclaje de los residuos en aras de disminuir la cantidad de residuos que se producen en las escuelas participantes y entre los(as) estudiantes. Asimismo, se crean estaciones de reciclaje en las instalaciones escolares y los(as) estudiantes realizan actividades para promover el reciclaje entre sus pares.

5 Véase, Brinton, Amanda, et al. "Systems Thinking and Solid Waste Management in Puerto Rico: Feedback Loops over Time." *Sustainability*, vol. 15, no. 5, 6 Mar. 2023, p. 4648, https://doi.org/10.3390/su15054648.

6 *Véase*, íd.

En Puerto Rico, existen 28 vertederos de los cuales 11 cumplen con los estándares establecidos por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos.[5] La mayoría de estos vertederos han alcanzado su capacidad máxima y se prevé que el resto esté a su capacidad dentro de unos pocos años.[6] Ante ello, este pilar resulta sumamente importante para fomentar prácticas de reducción y reciclaje de los residuos en las comunidades del Distrito.

Conclusiones

El Programa alcanza directamente a entre 30 y 50 estudiantes anualmente, y a otros cientos de personas indirectamente, incluyendo a la facultad y administración escolar, los familiares y vecinos(as) de los(as) participantes. Desde su formalización en el 2012, el Programa ha llegado a más de 3,000 estudiantes en nueve escuelas del Distrito a través de talleres dinámicos, visitas a proyectos y sistemas ecológicos, monitoreos de calidad del agua, creación y mantenimiento de huertos escolares, entre muchas otras actividades. El Programa ha demostrado ser un componente crítico para la restauración ambiental del CMP y la conservación del entorno ambiental del Distrito.


















PRESENTACIÓN
CORTOMETRAJES
MICRORRELATOS DEL
CAMBIO CLIMÁTICO



La importancia de la participación activa de la comunidad en la preservación de la Reserva



Además de ser una atracción turística y sede de eventos locales e internacionales, la Reserva Natural Estuarina Laguna del Condado es un lugar donde ocurren actividades desde el amanecer a la noche, todos los días.

Marisol Jiménez
Presidenta del Comité Asesor de Ciudadanos de ESTUARIO

Tener una laguna en medio de la ciudad puede ofrecer numerosos beneficios, tanto tangibles como intangibles, enriqueciendo el entorno urbano y la vida de sus residentes. Representa un espacio verde vital que conecta a las personas con la naturaleza, y ofrece una gama multifacética de beneficios que mejoran el medioambiente y contribuyen a la vitalidad cultural y económica de la ciudad. Además de ser una atracción turística y sede de eventos locales e internacionales, la Laguna del Condado es un lugar donde ocurren actividades diarias desde temprano al amanecer hasta por la noche. Actividades regulares en la laguna son clases de yoga al amanecer, práctica de los atletas del equipo puertorriqueño de canotaje, de remos y de paddleboard, también

alquiler de kayaks de día y noche, uso y alquiler de tablas, natación, avistamiento de aves y actividades familiares, entre otras.

Mantener la Laguna del Condado libre de contaminación y proteger su vida silvestre[1] es un reto diario. También surgen múltiples incidentes como la tala ilegal o destrucción de los mangles que la rodean, o el uso de embarcaciones con motor. Por eso, los vecinos y usuarios de la Laguna del Condado juegan un papel crucial en la vigilancia y preservación de la laguna. Su proximidad les permite monitorear, detectar con regularidad e informar cualquier cambio o problema. Estos son algunos de los roles clave que los vecinos y usuarios de la laguna pueden desempeñar:

1. **Detección temprana de problemas ambientales:** La comunidad funge como los ojos y oídos de las agencias gubernamentales locales, alertándolas sobre cualquier violación de las regulaciones ambientales o nuevas amenazas al ecosistema de la laguna. Hay que reportar los incidentes a la mayor brevedad posible, nunca se puede asumir que alguien ya lo reportó. Los vecinos y usuarios son los primeros en notar cambios en la calidad del agua, contaminación, actividad inusual de la vida silvestre, actividades ilegales como derrames o el desborde de aguas pestilentes del alcantarillado sanitario que desembocan en la laguna. La detección temprana ayuda a una respuesta más rápida de las agencias pertinentes. Con una llamada del ciudadano, se puede minimizar o evitar un desastre ambiental. En el enlace https://estuario.org/protocolo-denuncias-ambientales/ obtiene información de la agencia a cargo y los protocolos para realizar querellas en cada agencia. Siempre se debe exigir un número de querella para poder darle seguimiento y porque es la única manera de evaluar el desempeño de la entidad en atender el asunto objeto de la querella.



2. **Vigilancia comunitaria:** Los vecinos y usuarios pueden monitorear y denunciar colectivamente las actividades que impactan la laguna, como la construcción no autorizada, destrucción o tala ilegal de mangles, pesca ilegal y otros.



1 La diversidad de vida silvestre en la Laguna del Condado es variada debido a la mezcla única de agua dulce y salada que crea un ecosistema dinámico. Alberga una amplia gama de especies, desde microorganismos hasta animales grandes como el manatí, y es un hábitat importante tanto para especies residentes como para las migratorias. Las aves migratorias —como el garzón cenizo— utilizan la Laguna del Condado como punto de parada durante sus largos viajes anuales, lo que la hace un lugar importante para la conservación de las aves.

3. **Defensa y concienciación:** Los vecinos y usuarios pueden abogar por la protección de la laguna y su vida silvestre, colaborando con las autoridades locales y los grupos ambientales, difundiendo la conciencia sobre su importancia y fomentando prácticas respetuosas con el medioambiente, incluyendo pero no limitado a que los usuarios mantengan una distancia prudente con los animales que habitan en la laguna, como el manatí y las aves, entre otros.



4. **Prácticas sostenibles:** Al adoptar prácticas sostenibles como reducir la escorrentía química, evitar los plásticos de un solo uso, eliminar adecuadamente los desechos y reciclar el aceite de cocinar, la comunidad contribuye directamente a la preservación de la Laguna del Condado.



5. **Participar en los esfuerzos de limpieza:** Organizar o unirse a las campañas de limpieza ayuda a mantener la laguna y sus alrededores libres de basura y escombros. Esto no solo mejora su valor estético, sino también la salud ecológica de la laguna.



6. **Fomentar la plantación de manglares:** Plantar manglares a lo largo de los bordes de la laguna ayuda a reducir la erosión costera, a filtrar los contaminantes de las aguas pluviales y proporcionar un hábitat para la vida silvestre. Los vecinos y usuarios pueden participar en eventos de siembra y ayudar a mantener estas áreas libres de escombros y basura.



7. **Participar en los esfuerzos del grupo Amigos de la Laguna:** El grupo Amigos de la Laguna se creó hace aproximadamente cinco años con la colaboración de ESTUARIO. Este grupo se reúne varias veces al año y está compuesto de miembros de la comunidad, usuarios de la laguna, comercios que alquilan equipo, ESTUARIO y el Municipio de San Juan. El propósito de las reuniones es dialogar y buscar soluciones sobre las incidencias que ocurren en la laguna, su restauración y preservación. También procura alcanzar el objetivo de ESTUARIO de mejorar la calidad del agua y su comanejo, así como planificar actividades educativas y familiares, además de cualquier otro asunto relacionado con la Laguna del Condado.



En resumen, cuando los residentes y usuarios actúan como custodios de la laguna, pueden ayudar a protegerla a través de la vigilancia activa, la defensa y la participación en los esfuerzos de conservación. La laguna puede servir como punto focal para iniciativas ambientales lideradas por la comunidad, como campañas de limpieza, proyectos de plantación o programas de conservación de la vida silvestre, fomentando un sentido de administración entre los residentes y usuarios.







La creación de habitáculos en los espacios sumergidos del estuario



Figura 1. Los BIOHUTS permiten la libre entrada y salida de los peces pequeños a través de los orificios (mallas de 5 cm x 5 cm). Además, contienen un compartimiento interno que sirve de zona de alimentación.

Jorge F. Bauzá-Ortega
Director Científico
ESTUARIO

Habitáculos sumergidos

La creación de habitáculos sumergidos para abrir espacios de protección y alimentación de especies marinas es parte del esfuerzo de ESTUARIO para mejorar y restaurar los ecosistemas marinos y estuarinos. Por ejemplo, en 2021 se colocaron cinco unidades conocidas como BIOHUTS entre la Laguna del Condado y la Bahía de San Juan, en un cuerpo de agua conocido como el canal San Antonio. Estas unidades de acero inoxidable tienen forma de canastas rectangulares de aproximadamente un metro de alto por medio metro de ancho. Están diseñadas para la protección y alimentación de especies de peces y crustáceos en sus etapas juveniles (Figura 1).

Es decir, estas especies pueden protegerse de sus depredadores cuando son todavía pequeñas, utili-

zando los BIOHUTS como viveros mientras crecen. Las unidades permiten la libre entrada y salida de los peces pequeños, a través de los orificios (mallas de 5 cm x 5 cm) del BIOHUT. Pero además de esta sección de protección, los BIOHUT contienen un compartimiento interno que sirve de zona de alimentación. Este compartimiento (Figura 2) está constituido por fragmentos del caracol conocido como carrucho (*Lobatus gigas*, antes *Strombus gigas*).



Figura 2. Sobre la superficie de las conchas de carrucho (Lobatus gigas) crecen las algas y microrganismos (fitoplancton y zooplancton) que serán la fuente de alimento de los peces y crustáceos juveniles.

Sobre el carrucho y el mangle

El carrucho es el caracol de mayor crecimiento en la región del Caribe. Es un recurso importante en la pesca comercial en Puerto Rico por su alto valor comestible. Una vez se extrae la criatura que vive dentro, la concha se utiliza para artesanías y adornos. No obstante, una gran cantidad se descarta. Estas conchas descartadas se recogieron y fragmentaron para llenar la canasta interna del BIOHUT. Sobre la superficie de las conchas crecen las algas y microrganismos (fitoplancton y zooplancton) que serán la fuente de alimento de los peces y crustáceos juveniles. Es como volver a darle vida al carrucho, pues estás utilizando



Figura 3. Ubicación de los BIOHUTS en el Club Náutico de San Juan, entre la Bahía de San Juan y la Laguna del Condado (canal San Antonio).

una parte ya muerta para dar paso a la vida. En resumen, el BIOHUT provee protección a través de su compartimento externo y alimentación a través del compartimento interno (Figura 2). Estas unidades imitan las funciones (protección y alimentación) de las raíces sumergidas del mangle rojo (*Rhizophora mangle*), pero en lugares donde esta especie de árbol no crece.



Figura 4. Reunión de consulta con la administración del Club Náutico de San Juan, donde se les hizo una presentación con detalles sobre el proyecto de BIOHUTS y sus objetivos.

Ubicación estratégica

Los BIOHUTS se colocaron bajo los muelles del Club Náutico de San Juan (Figura 3) por ser un punto clave de conexión entre el océano Atlántico, la Laguna del Condado y la Bahía de San Juan. Las unidades quedan suspendidas –como canastas– bajo los muelles. Es decir, se atan con tensores al muelle de forma que quedan sumergidas aproximadamente medio metro bajo la superficie del mar. Esto facilita la observación de los BIOHUTS desde el muelle, pues este proyecto va dirigido también a la educación y la recreación. Permite a las personas disfrutar de la biodiversidad de peces que utilizan los BIOHUTS como hábitat, sin necesidad de mojarse. Por otro lado, este proyecto fomenta la propagación de especies de importancia comercial como son los pargos (*Lutjanidae*), los meros (*Serranidae*) y las sardinas/anchoas (*Clupeidae*).

Logística

Cualquier instalación de una estructura sumergida requiere de permisos emitidos por agencias estatales y federales. Por ejemplo, en Puerto Rico se requiere completar la Solicitud Conjunta (*Joint Permit*), documento donde se describe en detalle la actividad para la cual se solicita permiso al Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos (USACE, por las siglas en inglés). Esto se debe a que el proyecto ubica en aguas navegables y humedales jurisdiccionales. Una vez radicado, otras agencias evalúan el documento, entre ellas, el Servicio de Pesca y Vida Silvestre, la Agencia de Protección Ambiental, el Departamento de Recursos Naturales y Ambientales de Puerto Rico y el Servicio Nacional de Pesquerías Marinas. Estas agencias presentan sus comentarios al USACE, detallando las condiciones para que se emita el permiso y las directrices para su cumplimiento.

La coordinación con la comunidad es un paso medular para el éxito y perpetuación de cualquier proyecto de conservación, restauración y mejoramiento ambiental. En este caso, se consultó con la administración del Club Náutico de San Juan, en una presentación en la que se explicaron los detalles del proyecto y sus objetivos (Figura 4).

El día de la instalación (sábado, 24 de septiembre de 2021) se unieron miembros de Boy Scouts of America para ayudar a instalar las unidades (Figura 5). De igual forma, se convocó a la prensa (ver reseña en la página 207) para dar a conocer el proyecto, ya que es de suma importancia que la ciudadanía conozca estas iniciativas y, sobre todo, cómo pueden unirse y participar.

Respuesta ecológica

La abundancia (cantidad) y diversidad de peces se cuantificaron con una frecuencia mensual, durante un año. De igual forma, se tomaron videos de alta resolución alrededor de cada BIOHUT (Figura 6). En



Figura 5. El equipo de ESTUARIO, colaboradores y voluntarios participaron en la colocación de los BIOHUTS.



Figura 6. BIOHUTS fijado al muelle con tensores de acero inoxidable.

Scientific Name	English Name	Spanish Name
Abudefduf saxatilis	Sergeant Major	Sargento mayor
Pomacanthus paru	French Angelfish	Pez ángel francés
Chaetodon capistratus	Foureye Butterflyfish	Mariposa
Cryptotomus roseus	Bluetip Parrotfish	Loro barbazul
Aulostomus maculatus	Trumpetfish	Pez trompeta
Sparisoma viride	Stoplight Parrotfish	Pez loro semáforo
Monacanthus tuckeri	Slender Filefish	Lija reticulada
Scarus iseri	Striped Parrotfish	Loro listado
Sparisoma rubripinne	Yellowtail Parrotfish	Loro colirubio
Acanthusrus coeruleus	Blue Tang	Cirujano azul
Lutjanus griseus	Gray Snapper	Pargo mulato
Nicholsina usta	Esmerald Parrotfish	Loro esmeralda
Cantherhines pullus	Orangespotted Filefish	Lija pintada
Stegastes planifrons	Threespot Damselfish	Chopita amarilla
Lutjanus apodus	Schoolmaster	Pargo canchix
Scarus taeniopterus	Princess Parrotfish	Lora princesa
Lutjanus jocu	Dog Snapper	Pargo jocú
Sargocentron vexillarium	Dusky Squirrelfish	Gallito
Serranus tabacarius	Tobaccofish	Serrano jácome
Holacanthus tricolor	Rock Beauty	Isabelita
Sphoeroides spengleri	Bandtail Puffer	Tamborito

Tabla 1. Especies de peces observadas utilizando los BIOHUTS como hábitat durante los primeros 12 meses de observación.

Scientific Name	English Name	Spanish Name
Dendostrea frons	Frond Oyster	Ostra fronda
Crassostrea rhizophorae	Mangroves Oyster	Ostión
Pteria colymbus	Atlantic Wing Oyster	Ostra alada del Atlántico
Pinctada radiata	Atlantic Pearl-Oyster	Ostra perlera del Atlántico
Isognomon alatus	Flat Tree Oyster	Ostra árbol
Pinna carnea	Amber Penshell	Rompechinchorro

Tabla 2. Ostras identificadas creciendo sobre la superficie de los BIOHUTS.

total, se observaron 21 especies de peces (Tabla 1) que utilizaban los BIOHUTS como hábitat. La abundancia aumentó hasta alcanzar 299 individuos (Figura 7) y la riqueza –medida como el número de especies distintas– fue de 11 especies (mes 12, Figura 8). Curiosamente, seis especies de ostras comenzaron a crecer sobre la superficie de las unidades (Tabla 2).

Recomendaciones

Indudablemente, la colocación de estructuras sumergidas para crear habitáculos acuáticos es una herramienta comprobada en el manejo de los recursos vivos. Particularmente, estructuras como los BIOHUTS permiten crear viveros en lugares que carecen de hábitats naturales, como los fondos bajo las instalaciones portuarias y marinas. No obstante, es importante que la selección del lugar se base en la seguridad de las unidades y la accesibilidad para su monitoreo y mantenimiento. El mantenimiento consiste en limpiar superficialmente las unidades del sobrecrecimiento de algas pardas (feófitas), utilizando un cepillo de fibra suave y mediante extracción manual.

Finalmente, sugerimos utilizar los BIOHUTS como un laboratorio de espacios abiertos, incorporando actividades educativas y de aprendizaje ecológico.

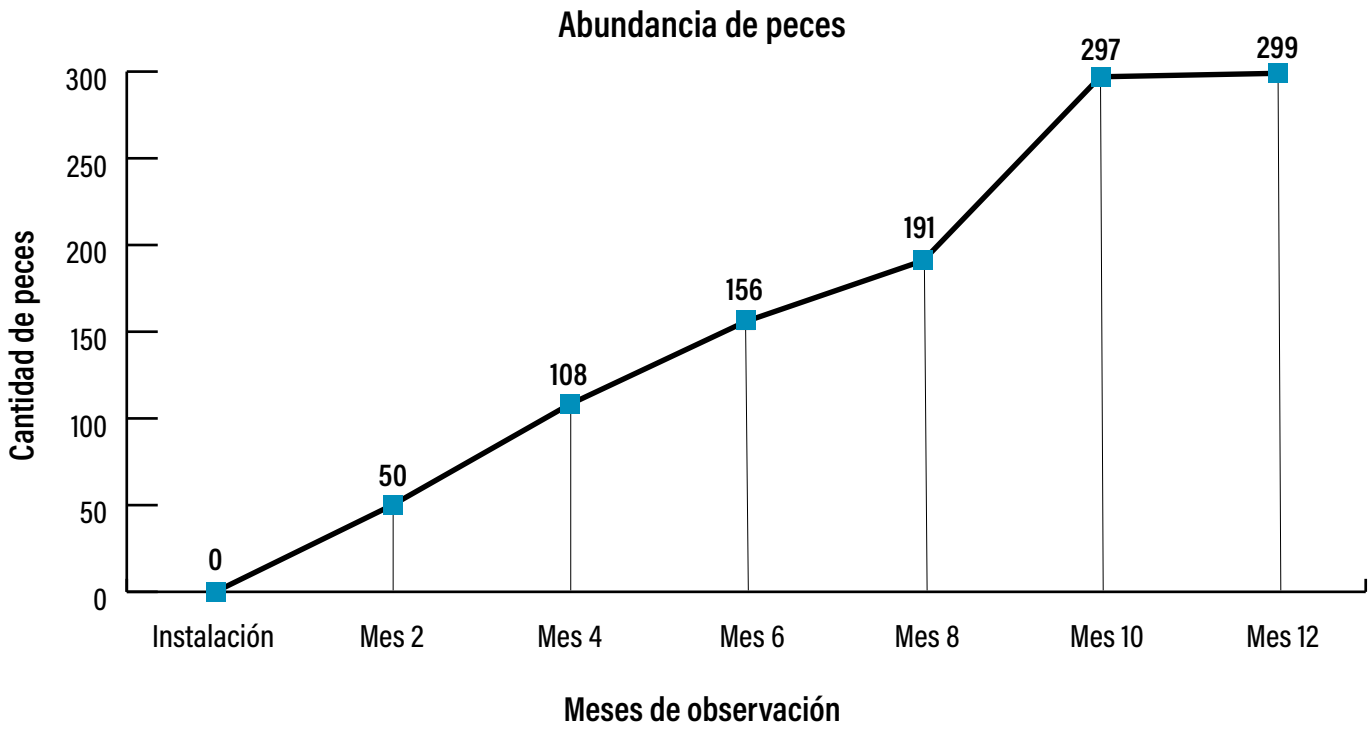


Figura 7. Cantidad de peces (abundancia) cuantificada durante los 12 meses de observación, una vez colocados los BIOHUTS (total de 5 unidades).

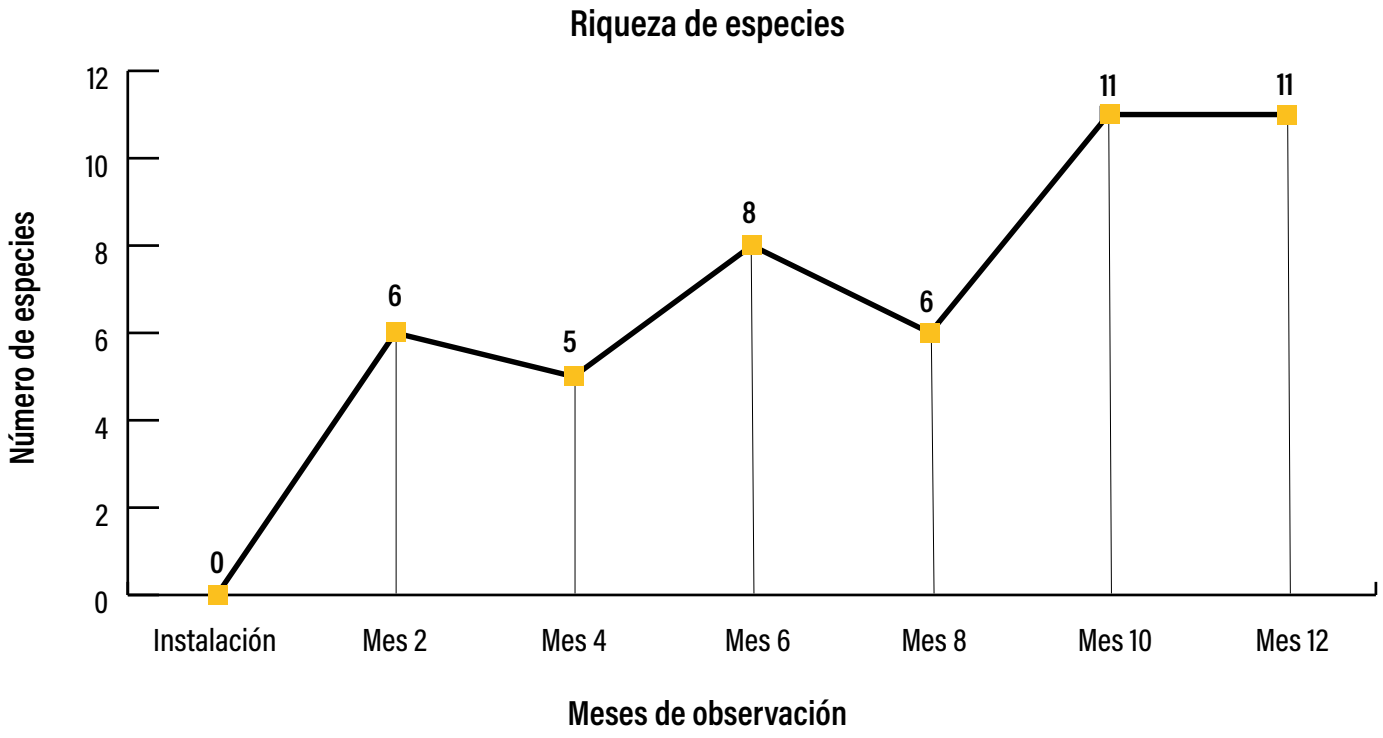
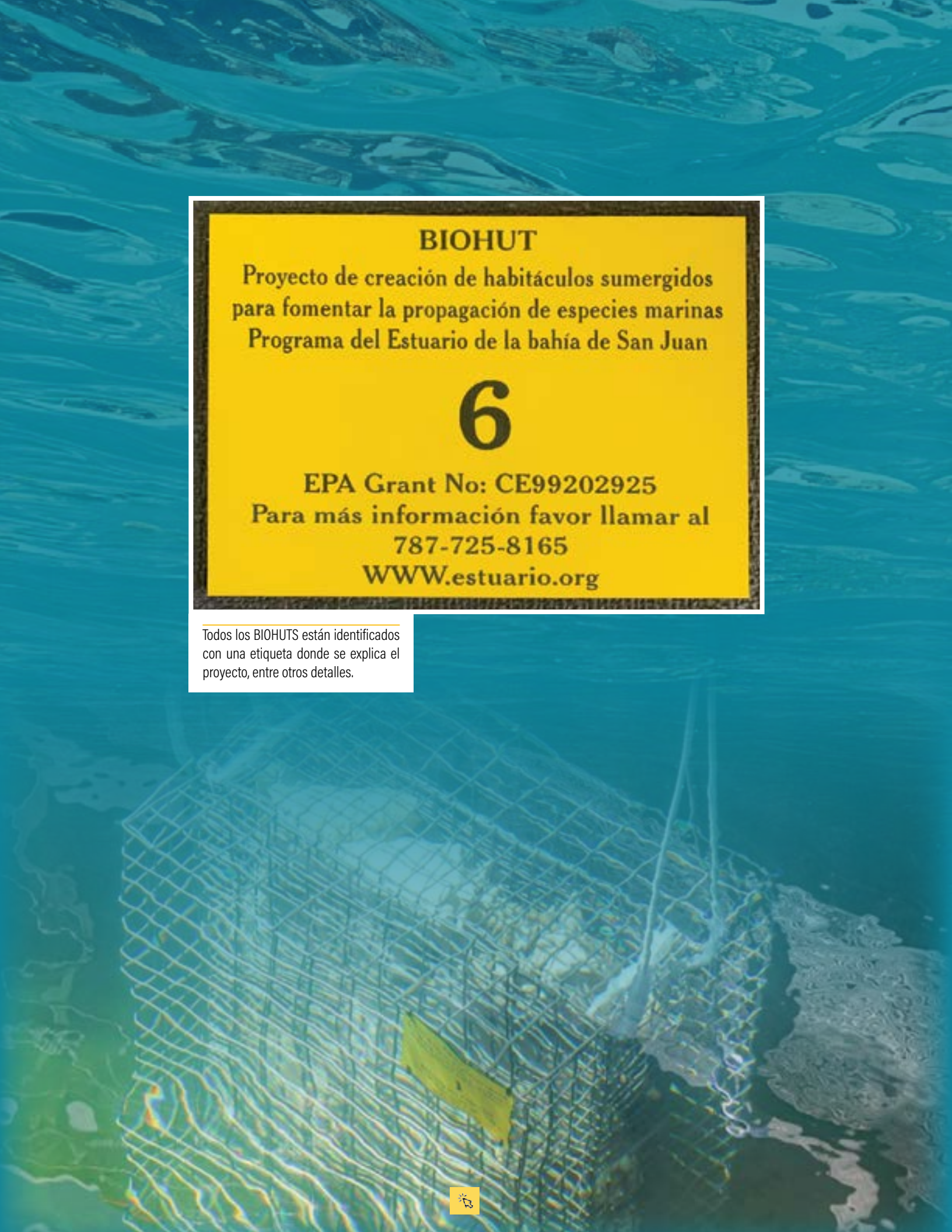


Figura 8. Riqueza de especies de peces (diversidad) cuantificada durante los 12 meses de observación, una vez colocados los BIOHUTS (total de 5 unidades).



Todos los BIOHUTS están identificados con una etiqueta donde se explica el proyecto, entre otros detalles.

Reseña El Nuevo Día



Los BioHUTS son compartimientos o canastas de acero inoxidable con huecos, en cuyo interior hay conchas vacías de caracol que fueron descartadas una vez extraído el marisco.



GERARDO E. ALVARADO LEÓN
galvarado@elnuevodia.com
Twitter: @GAlvarado_END

PROGRAMA DEL ESTUARIO

Transforman hábitat marino

Instalan cinco estructuras –conocidas como BioHUTS– bajo los muelles del Club Náutico de San Juan para crear un espacio que ayude a la propagación de especies de peces y crustáceos

La instalación de cinco estructuras –conocidas como BioHUTS– marcó el inicio de la transformación de las aguas bajo los muelles del Club Náutico de San Juan en un hábitat que ayudará a la propagación de peces y crustáceos.

Son estructuras que, a partir de ahora, se convertirán en viveros acuáticos, ya que están diseñadas para proveer alimento y refugio a diversas especies, particularmente en su etapa juvenil.

Se trata de una iniciativa del Programa del Estuario de la Bahía de San Juan, que fue subvencionada por la Agencia federal de Protección Ambiental (EPA, en inglés) y surgió tras los "daños considerables" que la población de peces sufrió por el paso del huracán María, cuyo cuarto aniversario se cumplió el pasado lunes.

"En la región metro, donde estamos ahora mismo, los estimados han llevado a los expertos a concluir que las descargas de aguas no tratadas fueron de 52 billones (52,000 millones de litros. El Estuario está apoyando el restablecimiento de comunidades de peces a través de estos módulos", dijo en conferencia de prensa, el viernes, la directora ejecutiva de la entidad sin fines de lucro, **Brenda Torres**.

"Lo que presentamos es una pieza en el rompecabezas de una restauración ambiciosa y necesaria para atender los retos del cambio climático", agregó, al hacer referencia a un informe del Centro de Análisis Operativo de Seguridad Nacional (CNA, en inglés) sobre la recuperación de Puerto Rico post-María, en el que se recomienda la designación como área protegida de la "barrera de coral de San Juan", desde Isla Verde hasta El Escambrón.

¿CÓMO FUNCIONA?

Jorge Bauzá, director científico del Estuario, indicó que la instalación de los BioHUTS "va en la línea de intervenir en la conservación y la acción" para ayudar a la recuperación de los ecosistemas.

Resaltó que las estructuras "imitan" las raíces de los mangles rojos, que son los hábitats naturales predilectos para diversas especies de peces y crustáceos en sus etapas de crecimiento. "Las especies se crían aquí y, luego, migran a los arrecifes de coral o al océano profundo", dijo.

Bauzá describió los BioHUTS como compartimientos o canastas de acero inoxidable con huecos, en cuyo interior hay



Brenda Torres y Jorge Bauzá, del Estuario, y Carlos Ramírez, del Club Náutico de San Juan, lideraron la colocación de los BioHUTS.

pressreader

ESTUARIO

Tejiendo redes de esperanza desde la justicia del agua: reflexiones sobre la Red Comunitaria de Agua en el Estuario de la Bahía de San Juan



Figura 1. La cuenca hidrográfica del estuario abarca más de 14 cuerpos de agua en la región metropolitana, desde las zonas altas de San Juan hasta Loíza (al este) y Toa Baja (al oeste).

Alejandro Torres-Abreu
Investigador Asociado; Instituto Transdisciplinario de Investigación-Acción Social
Departamento de Ciencias Sociales, UPR en Humacao

Nilsa Medina Piña
Catedrática jubilada
Facultad de Estudios Generales de la Universidad de Puerto Rico en Río Piedras

Carlos García
Director Ejecutivo de Programas e Iniciativas Comunitarias de Apoyo Empresarial de la Península de Cantera

Una ventana a la problemática de las aguas del estuario

En la zona metropolitana de San Juan ha surgido un movimiento social en respuesta a la problemática del agua, denominado Red Comunitaria de Agua del Estuario de la Bahía de San Juan (de ahora en adelante, RCA o "la Red"). Ese proceso responde a la defensa de uno de los territorios hidrosociales más complejos, cultural y ecológicamente valiosos de Puerto Rico. La cuenca hidrográfica del estuario abarca más de 14 cuerpos de agua y el sistema de manglar de mayor extensión territorial del archipiélago, que es el de Piñones (Figura 1). En este

escenario tenemos infraestructura crítica, vive gran parte de la población y es epicentro de la actividad socioeconómica de las islas de Puerto Rico.

El Estuario de la Bahía de San Juan (en adelante, el estuario) es, además, un territorio vulnerado, donde se identifican distintas dinámicas de injusticia del agua. El proceso histórico de urbanización de la naturaleza en este territorio ha generado profundos cambios ambientales, con una dinámica de ciudad caracterizada por una planificación y un proceso de ordenamiento territorial deficiente. Esta situación es el resultado de una combinación de desarrollos espontáneos en algunas comunidades y una expansión urbana descontrolada, impulsada por intereses privados y facilitada por administraciones gubernamentales sucesivas.

Las dinámicas de urbanización de la naturaleza han derivado en graves problemas relacionados con el agua. Las comunidades del estuario enfrentan múltiples desafíos socioambientales, tales como el deterioro o, en algunos casos, la ausencia de infraestructura de saneamiento básico, desbordes recurrentes de aguas residuales, inundaciones urbanas, contaminación de los cuerpos de agua por residuos químicos provenientes de fuentes residenciales e industriales, y la falta de mecanismos efectivos de protección de las zonas ribereñas para controlar la escorrentía y la sedimentación de los cuerpos de agua. Actualmente, esta problemática ambiental representa un serio reto de salud pública y amenaza la calidad de vida de los 614,181 habitantes del área estuarina (EBSJ, 2018).

En este trabajo compartimos parte de la experiencia en la evolución de la Red: una iniciativa de participación ciudadana y educación popular vinculada a los esfuerzos de restauración ambiental en este territorio hidrosocial.

Las preguntas que guían esta reflexión son:

1. ¿Qué es la Red?
2. ¿Cómo surge?
3. ¿En qué consiste la propuesta teórico-metodológica de la RCA?
4. ¿Cuál ha sido la experiencia organizativa de la Red?
5. ¿Qué logros y desafíos podemos identificar relacionados con este proceso?



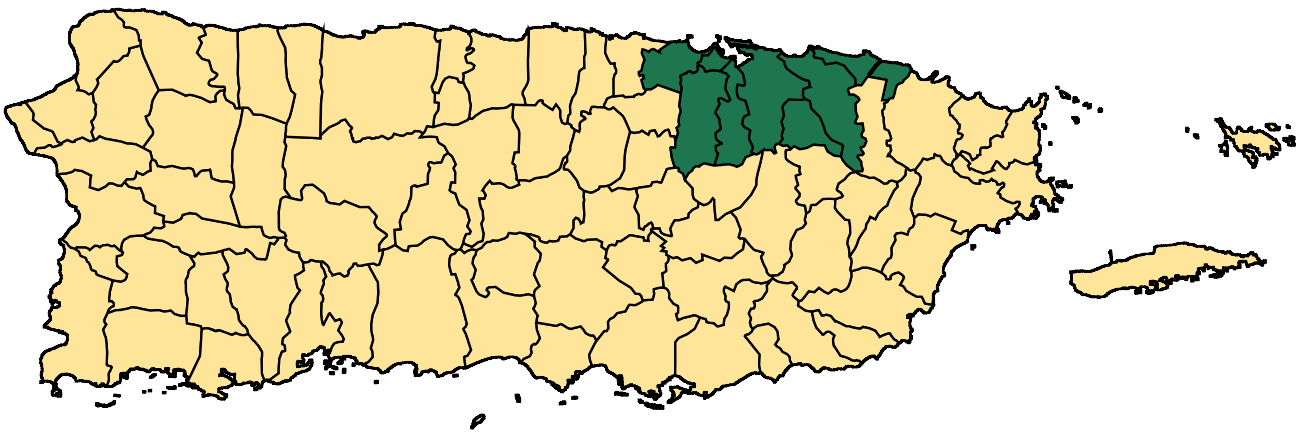
Figura 2. Reunión de la Red Comunitaria de Agua en La Goyco, enero de 2023.

Situando la Red como espacio de acción colectiva

La Red es una iniciativa de investigación-acción, educación y participación ciudadana centrada en una variedad de asuntos y problemáticas relacionadas con la situación del agua en el Estuario de la Bahía de San Juan. Su objetivo es identificar y abordar los desafíos recurrentes vinculados al estuario y cultivar un proceso de apoderamiento para que las comunidades asuman un rol más activo en los procesos de investigación, planificación, uso y gestión del agua en este ecosistema urbano. Concebimos este esfuerzo como un proceso de articulación entre distintos sectores de la ciudad, organizaciones, grupos y ciudadanos que trabajan en temas relacionados con el agua; tales como la educación, el monitoreo, la creación, el trabajo comunitario, la investigación, el activismo y la recreación (Figura 2). Mediante la convergencia de identidades diversas y enfoques variados de las luchas representadas en la Red, estamos construyendo una subjetividad colectiva que reconoce nuestro poder ciudadano. En esta interconexión de actores sociales, nos consideramos capaces de influir en los espacios de toma de decisiones y contribuir a la restauración de las aguas del ecosistema de la Bahía de San Juan, buscando generar cambios transformadores.

A través de intercambios de saberes y experiencias, un diálogo continuo y debate interno, así como un proceso de toma de conciencia y planificación, hemos logrado integrar en la RCA a más de una veintena de organizaciones comprometidas con la protección de las aguas del estuario. En este espacio de participación y acción ciudadana, se reúnen representantes de diversas

Municipios que forman parte de la cuenca



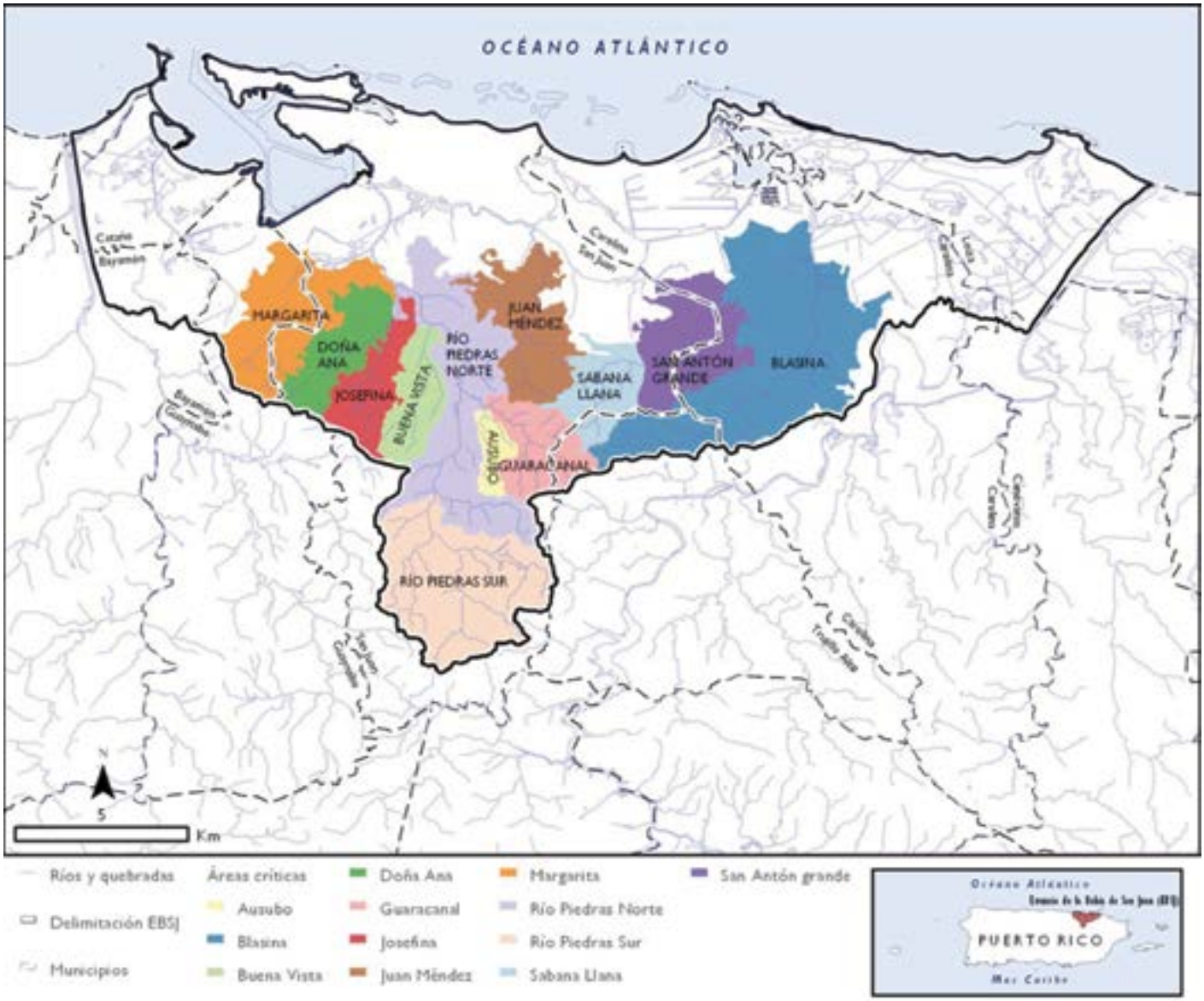


Figura 3. Mapa de las subcuencas críticas del Estuario de la Bahía de San Juan (Torres Abreu A. y Mori González R. 2019).

organizaciones, vecinos y personas involucradas en la discusión pública sobre los problemas del agua que nos afectan a todos. El alcance de la Red se extiende a las ocho municipalidades que conforman el Estuario de la Bahía de San Juan, reconocido como uno de los ecosistemas más valiosos y, a la vez, más vulnerados de la zona metropolitana de Puerto Rico.

Las municipalidades que forman parte de la cuenca son: Bayamón, Cataño, Carolina, Guaynabo, Loíza, San Juan, Toa Baja y Trujillo Alto. Entre las organizaciones que participan activamente en la Red, destacan: las comunidades del G-8 del Caño Martín Peña, Península de Cantera, Guarda Río, Por las aguas, Toabajeños en Defensa del Ambiente, Colectivo El Ancón de Loíza, El Puente Enlace de Acción Climática, Comunidades del Lago Las Curías, Sector ecuménico e Iglesias Discípulos de Cristo, Vecinos Unidos de Carraízo Mejorando el Ambiente, Huerto y vivero urbano del Bosque de Capetillo y CAUCE, Comunidad de Venus Gardens, Comunidad de Caimito, ALIANZA por la Cuenca del Río Piedras, Sierra Club de Puerto Rico, Universidad del Sagrado Corazón, la Universidad



de Puerto Rico en Bayamón, Río Piedras, Humacao y ESTUARIO, entre otras.

Surgimiento y evolución de la Red Comunitaria de Agua

En el año 2017, ESTUARIO realizó un estudio mediante el que identificó 12 áreas críticas o subcuencas donde existen problemas serios de contaminación por desbordes de aguas sanitarias y desarrolló todo un esfuerzo interagencial para la corrección de estas descargas ilícitas (Figura 3). Las subcuencas identificadas se conectan directamente con los principales cuerpos de agua del estuario, incluyendo la Bahía de San Juan, la Laguna del Condado y las lagunas La Torrecilla, San José, Piñones y Secreta, entre otras, y son fundamentales para su restauración.

La Red surge de un acuerdo colaborativo entre ESTUARIO y el Instituto Transdisciplinario de Investigación Acción Social (ITIAS) de la Universidad de Puerto Rico en Humacao para desarrollar el componente de participación ciudadana vinculado a ese esfuerzo de restauración.

Su creación y desarrollo responde a tres momentos diferentes, los cuales imprimen rasgos particulares a su fisonomía. En 2018, tras el huracán María, el equipo del ITIAS reconoció que una respuesta innovadora a la situación estructural de las aguas consistía en desarrollar un proceso de acción colectiva desde las organizaciones de base. Este proceso promovería lo que Latta y Whitman (2012) denominan 'ciudadanía ambiental', fomentando una dinámica de trabajo en red entre diversos sectores clave en torno a este paisaje hídrico. Para los autores, la ciudadanía ambiental: "constituye no solo una serie de derechos y obligaciones, sino un espacio dinámico para la lucha, dentro del cual los derechos se pueden reclamar" (*ibid*, pág. 6). En esta etapa inicial, el esfuerzo se concentró en movilizar organizaciones y sectores clave dentro de las 12 áreas críticas determinadas por ESTUARIO y no necesariamente en la cuenca completa del estuario. El segundo momento ocurrió entre 2021 y 2022, cuando ESTUARIO contactó al ITIAS para reactivar la iniciativa colaborativa original. Desde el ITIAS, propusimos fortalecer la estrategia inicial basada en un marco de Justicia del Agua y ampliar el alcance del proyecto para abarcar toda la cuenca del estuario, más allá de las 12 subcuencas críticas.

En ambas instancias, el acercamiento de investigación-acción participativa para el desarrollo de la RCA ha girado en torno a cuatro objetivos principales: 1) propiciar una reflexión crítica en torno a la condición de las aguas del siste-

ma del estuario y las dinámicas de injusticia asociadas a este proceso; 2) mapear los conflictos relacionados con la justicia hídrica desde una perspectiva situada y comunitaria; 3) entender y documentar las iniciativas de agua de distintos grupos y organizaciones trabajando estos asuntos en diversas comunidades; y 4) fomentar la acción colectiva para lograr mayor justicia hídrica y la restauración de las aguas del estuario. Conscientes de la complejidad que implica este esfuerzo, insistimos en que esta estrategia de participación ciudadana debe implementarse de manera continua y a largo plazo.

Desde este espacio de interacción, la iniciativa ha ido tomando forma y el colectivo ha decidido evolucionar hacia un proceso organizativo más autónomo y autogestionado, en el que participan diversas organizaciones ambientales. Juntas, están enfocadas en desarrollar una agenda de trabajo común que aborde las múltiples manifestaciones de la crisis hídrica y ambiental que enfrenta esta región de Puerto Rico. En 2023, el proceso de planificación participativa realizado para darle forma a esa evolución representa el tercer momento significativo de la RCA. Durante este período, hemos diseñado un conjunto de metas y objetivos que nos han permitido organizarnos en cuatro grupos de trabajo, lo cual constituye la base de nuestro esfuerzo colaborativo actual. En resumen, estas cuatro metas y sus respectivos objetivos se centran en: 1) la incorporación de nuevos grupos y el mantenimiento de una participación activa por parte de los integrantes, 2) el diseño de actividades educativas tanto a nivel interno de la Red como en las comunidades representadas, 3) la promoción del activismo en apoyo a las luchas de organizaciones y comunidades que participan de la RCA, y 4) el monitoreo del agua con un enfoque comunitario (Figura 4). Los contenidos y la estructura de estas actividades están alineados con una metodología que prioriza el diálogo de saberes, el contacto directo con las experiencias de trabajo, y la educación popular como eje transversal en nuestros talleres de formación. Además, se contempla el acompañamiento a las manifestaciones de lucha programadas por los grupos y el monitoreo de las aguas desde una perspectiva de reflexión y acción comunitaria.

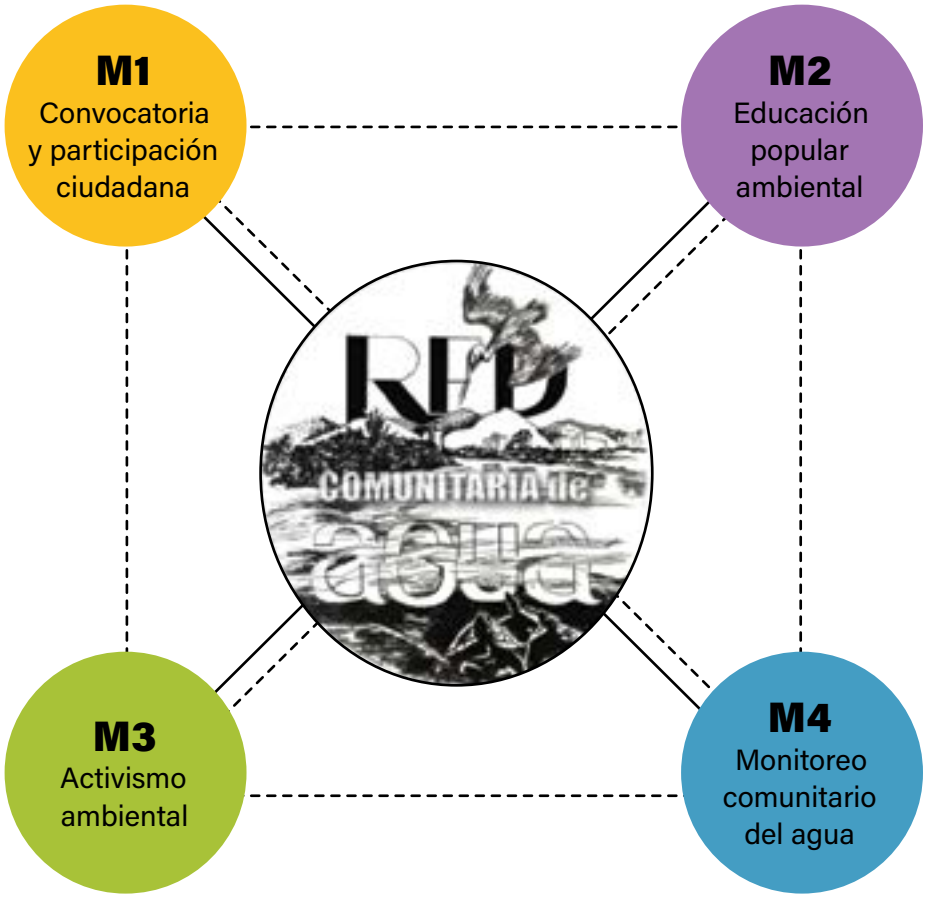


Figura 4. Estructura organizativa, metas principales y grupos de trabajo de la Red. M= meta y grupo.



Un punto de partida fundamental para la Red es que —contrario a otros acercamientos— es imposible dividir aquellos aspectos ecológicos de las dimensiones sociales en torno a los asuntos del agua.

¿Desde qué perspectiva teórico-metodológica se construye colectivamente la Red?

La RCA se nutre de corrientes teóricas interconectadas como la investigación-acción participativa, la educación popular ambiental y las ecologías políticas del agua. Parte del argumento a postular aquí es que existe un desafío grande de enfoque, porque la perspectiva del estado, del sector privado o del capital y hasta de algunos sectores dentro de la academia y las organizaciones no gubernamentales locales es representar o concebir estos problemas del agua como meros asuntos científico-técnicos. A esta perspectiva, Roca Servat (2020) la denomina *visión hegemónica del agua*.

Un punto de partida fundamental para la RCA es que —contrario a otros acercamientos— es imposible dividir aquellos aspectos ecológicos de las dimensiones sociales en torno a los asuntos del agua (véase, por ejemplo, Bakker 2012). Las organizaciones que conforman la Red afirman que la restauración del ecosistema requiere una gestión que reconozca no solo el ciclo natural del agua, sino también las dinámicas sociales que influyen en su uso, las relaciones culturales con el recurso y cómo éstas transforman dicho ciclo. La literatura sobre ecologías políticas del agua denomina esto como el "ciclo hidrosocial" (Linton y Budds, 2013). Cómo se dan esas interacciones entre los procesos sociales y la condición ecológica en un territorio es un campo analítico esencial para abordar este ciclo y su impacto sobre los problemas de acceso, protección y distribución del agua.

Precisamente, debido a que esa visión hegemónica genera escenarios desiguales en el manejo del agua, la RCA adopta el marco de justicia hídrica como parte de su inspiración teórico-metodológica. Este es "un concepto amplio que busca reflexionar críticamente sobre las injusticias socioambientales relacionadas con el agua y proponer nuevas respuestas basadas en la solidaridad, la colaboración, la equidad y la democracia" (Avilés-Santiago et al., 2023, p. 8). La justicia del agua invita a un análisis estructural, transdisciplinario e



interseccional de la problemática del agua en Puerto Rico. Es estructural en cuanto a que el acceso, distribución y uso del agua responden a dinámicas de poder entre distintos sectores sociales; transdisciplinario, porque fomenta el intercambio de saberes y la coproducción de alternativas orientadas a transformar las relaciones hidrosociales; e interseccional, ya que conecta factores socioeconómicos, raciales y de género (entre otros) para abordar las desigualdades en la gestión del agua.

Nos encontramos frente a lo que el investigador ambiental Julio Postigo (2013) cataloga como una disputa o tensión entre diversas epistemologías del cambio climático; aquella que enfatiza los aspectos físicos, químicos, biológicos, ecológicos o geográficos del fenómeno y la que se preocupa en abordar su dimensión política, económica, socioambiental y cultural. El autor reclama una mayor inclusión de las ciencias sociales en estos debates. Esta perspectiva aplicada a los asuntos del agua nos convoca a trascender esa dicotomía disciplinar y promover un trabajo en red, donde se aborden los saberes de manera horizontal.

Educación popular ambiental como proceso organizativo y formativo

Es fundamental enriquecer y actualizar el vocabulario y los conceptos que utilizamos para abordar los asuntos relacionados con el agua. Como mencionamos anteriormente, muchos de los enfoques que informan la política hídrica actual se basan en una visión dicotómica de la relación entre agua y sociedad, donde los aspectos ecológicos del agua parecen desvinculados de los factores sociales y políticos que también influyen en la gestión del paisaje hídrico. En la RCA estamos comprometidos con un proceso formativo que revitaliza este vocabulario y redefine nuestra forma de concebir la problemática del agua.

Llevamos a cabo esta dinámica mediante la discusión de conceptos y marcos teóricos consolidados en otras latitudes para seguir construyendo un vocabulario propio a nuestro contexto caribeño y culturas del agua. A través de técnicas de educación popular ambiental, como cineforos, reco-

Cómo se dan las interacciones entre los procesos sociales y la condición ecológica en un territorio es un campo analítico esencial para abordar el ciclo hidrosocial y su impacto sobre los problemas de acceso, protección y distribución del agua.



La construcción de un espacio continuo de reflexión y acción —que integra los saberes y experiencias de las organizaciones que componen la Red— hace de esta iniciativa formativa una herramienta vital e imprescindible.

rridos ecoterritoriales y diálogos de saberes, abordamos temas centrales para enfrentar la problemática, conflictos e injusticias del agua desde una perspectiva renovada y contextualizada.

Entre las temáticas que hemos explorado en nuestros talleres más recientes destacan: 1) el impacto de la ideología neoliberal y el capitalismo del desastre en la transformación del agua y la naturaleza en simples mercancías, y sus implicaciones para nuestras comunidades (*mercantilización de la naturaleza*); 2) la propuesta de entender las relaciones agua-sociedad mediante el concepto del ciclo hidrosocial, que resalta las interconexiones socioecológicas que posibilitan el acceso y la gestión del agua; 3) la revalorización de ríos, lagunas y otros cuerpos de agua como sujetos de derecho, lo que subraya su valor inconmensurable y la importancia de protegerlos ante la emergencia climática (Martínez Alier, 2015); 4) la interpretación de los asuntos del agua como cuestiones políticas y de poder, promoviendo el derecho humano y no humano al agua y defendiendo el territorio hidrosocial, así como fomentando una ciencia transdisciplinaria, y una gobernanza que aborde las dimensiones estructurales de la crisis hídrica del estuario.

La construcción de este espacio continuo de reflexión y acción —que integra los saberes y experiencias de las organizaciones que componen la Red— hace de esta iniciativa formativa una herramienta vital e imprescindible. Nos proporciona una distancia estratégica que permite contextualizar los desafíos y profundizar en enfoques alternativos para abordar la justicia en el contexto de la agenda ambiciosa de restauración del estuario.

Estrategia organizativa y persistencia de la Red

Una de las mayores fortalezas de nuestro proceso organizativo es la consolidación de la Red, basada en un modelo de colaboración horizontal que refleja los intereses y la experiencia de las organizaciones involucradas en la problemática del agua. Nuestra estrategia para activar, movilizar y fomentar la participación de las organizaciones se articula en cuatro componentes interrelacio-



La cuenca estuarina incluye el sistema de manglar de mayor extensión territorial de Puerto Rico. El Bosque Estatal de Piñones constituye una tercera parte del remanente de bosques de mangles protegidos en la isla.

nados. Primero, realizamos un reclutamiento continuo, identificando organizaciones y actores clave interesados en temas hídricos, a quienes acercamos mediante reuniones individuales para presentarles la iniciativa de la Red. En segundo lugar, nos enfocamos en documentar las perspectivas, desafíos y trabajos de estas organizaciones a través de procesos de cartografía participativa y entrevistas no estructuradas, así como de otros acercamientos propios de las ciencias sociales y las humanidades. Estos encuentros nos han permitido tomar el pulso a los alcances y retos de sus luchas, contextualizarlas, generar diálogos y aprendizajes conjuntos, además de identificar paralelismos y denominadores comunes a los problemas y conflictos ambientales e hidrosociales que confrontan.

En tercer lugar, realizamos talleres formativos basados en la educación popular ambiental, que invitan a la reflexión sobre diversas cuestiones relacionadas con el agua, incluidas las causas estructurales de la contaminación. Finalmente, organizamos reuniones y visitas de campo en diferentes puntos de la cuenca, lo que nos permite profundizar en el entendimiento de este paisaje hídrico desde la óptica de las organizaciones de base y sus luchas. En el marco de nuestras reuniones mensuales, confraternizamos con los nuevos integrantes en sus propios espacios, allí donde viven e interactúan como actores comunitarios enfrentando injusticias socioambientales y del agua. Estas actividades mensuales —concebidas como espacios de intercambio y co-construcción de saberes— han sido cruciales para el éxito y el fortalecimiento de nuestra iniciativa.

Cohesión y colaboración: avances en la Red

Nuestro trabajo en la Red ha ido fortaleciéndose de manera constante, tanto en su dimensión institucional como en el quehacer comunitario, lo que nos ha permitido alcanzar logros categorizados en diversas áreas temáticas y ámbitos de lucha. La primera categoría tiene que ver con procesos de organización interna. Uno de los logros principales se relaciona con el desarrollo del Plan de Trabajo, que establece metas y objetivos,

resultado de un proceso de planificación participativa que ha facilitado la incorporación de nuevas organizaciones y la articulación de nuestras actividades. A partir de un diálogo constructivo, hemos formado cuatro grupos de trabajo, cada uno enfocado en una meta específica, lo que ha incrementado nuestra cohesión interna y la claridad en las líneas de acción. Además, la comunicación entre estos grupos se ve potenciada por una instancia coordinadora que integra a representantes de cada grupo, asegurando así la conexión entre ellos, promoviendo sinergias y fortaleciendo la cohesión necesaria para impulsar nuestras iniciativas en la Red.

La segunda categoría se centra en la cobertura regional e intersectorial. El accionar colectivo en la RCA nos ha permitido ampliar nuestra presencia en la región y fortalecer los lazos de colaboración con diversos actores de luchas ambientales, así como expandir el campo de acción intersectorial de la Red. Un claro ejemplo de esto es la integración del sector ecuménico-religioso y el apoyo al desarrollo de su liderazgo ambiental. El campamento de verano con jóvenes de la Iglesia Discípulos de Cristo de Puerto Nuevo y Sonadora ilustra cómo la programación, temáticas y actividades de este esfuerzo se han enriquecido gracias a la participación de su liderazgo y los contactos establecidos a través de la Red. Otro caso notable es la movilización del grupo de activismo ambiental de la RCA (M3), que ha facilitado un proceso colaborativo entre varias organizaciones para documentar actividades ilegales de remoción de corteza terrestre y otros proyectos de construcción en la cuenca alta del río Piedras. En este contexto, la colaboración intergeneracional ha sido excepcional, con jóvenes utilizando las tecnologías de drones para documentar los casos, mientras que otros miembros de la comunidad contribuyen al monitoreo e identificación de las áreas afectadas y examinan documentos de archivo. Además, hemos logrado expandir la representación de organizaciones en partes de la cuenca donde antes no habíamos podido establecer conexiones, como es el caso del Colectivo El Ancón de Loíza (Figura 5).



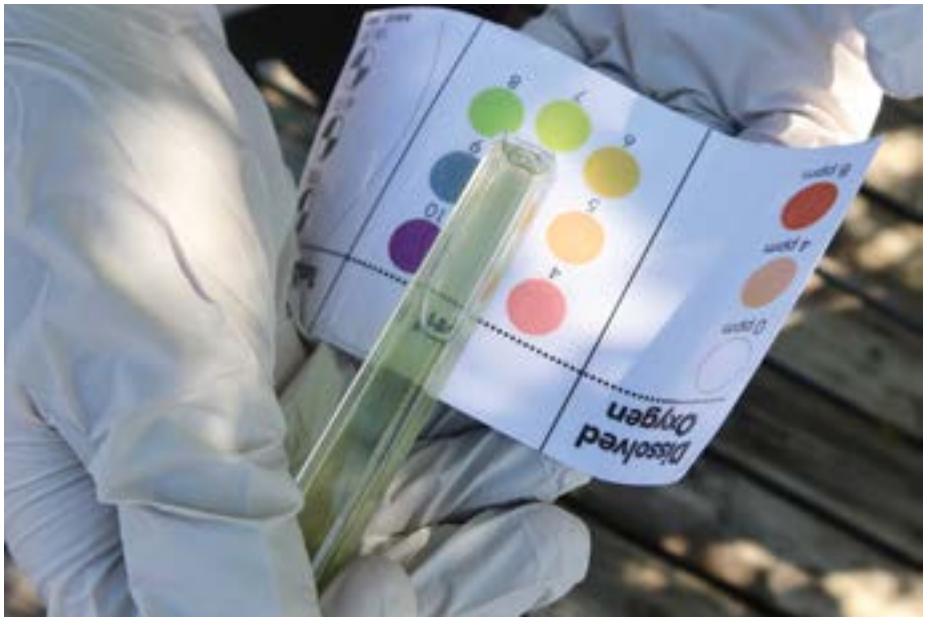
Figura 5. Reunión de la Red Comunitaria de Agua con el Colectivo El Ancón de Loíza, septiembre de 2024.

En tercer lugar, destacan los procesos de investigación-acción y divulgación. La vocación de documentar y difundir como herramientas para ampliar el marco de reflexión y acción en torno a la justicia del agua ha inspirado a la RCA a desarrollar una variedad de materiales educativos que forman parte de nuestra plataforma educativa. Desde su fundación en 2018, bajo el liderazgo del ITIAS, la RCA ha generado varias publicaciones y recursos audiovisuales

que reflejan su proceso de desarrollo, su enfoque teórico-metodológico y su experiencia organizativa. Entre estos materiales se encuentran la sistematización de experiencias del primer ciclo de la Red (Torres-Abreu, A. y Mori-González, R. 2019), el artículo arbitrado "Ciencia ciudadana y activismo ambiental en el Estuario de la Bahía de San Juan" (Torres-Abreu, A. et al. 2020), la guía formativa "Contra la corriente", en torno a la justicia ambiental (Avilés-Santiago et al., 2023), y el video "Justicia hídrica en el Estuario de la Bahía de San Juan", coproducido por el cineasta Juan Manuel Pagán Teitelbaum.

Además, se incluyen videos sobre la conformación de la Red y la sección del ATLAS de ESTUARIO, dedicada a compartir los hallazgos del proceso de cartografía participativa realizado en 2023 (https://estuario.info). Para complementar estas iniciativas, la Red ha estado representada en diversos foros nacionales e internacionales. Entre las actividades más recientes, destacan el Encuentro caribeño-latinoamericano por la justicia climática en Medellín, Colombia, en junio de 2023; la participación en el Junte del Colectivo de CEAAL en Puerto Rico; y el 2.º Simposio de Educación Climática y Sociedad, organizado por El Puente en 2024. Analizados desde el conjunto, este cuerpo de conocimiento puede considerarse como una aportación significativa al estudio y documentación de los asuntos de justicia del agua en el contexto del estuario.

Por último, en los pasados años, la Red ha evolucionado en su dinámica de autogestión y logro de autonomía. Por su propio talante y vocación transformadora, ha ido ganando representatividad en los espacios de lucha comunitaria ambiental. Informada por los marcos de la ecología política, la justicia del agua y la educación popular ambiental, somos hoy un sujeto que avanza en capacidad de convocatoria, movilización y acompañamiento a nivel de base comunitaria. Las organizaciones y actores inmersos en el trabajo nos vamos apoderando de los procesos, compartiendo valores, y dejando impreso nuestro compromiso en cada gesta en favor de la justicia hídrica y la justicia social, en sentido amplio. El proceso de gestar una agenda propia de trabajo desde la estructura emergente de la Red ha facilitado la organización de talleres dirigidos a públicos diversos. El taller llevado a cabo en C3Tec para presentar la guía Contra la corriente es no solo un ejemplo de este tipo de actividades, sino que también refleja un proceso de madurez y colaboración, en el que representantes de diversas organizaciones



La colaboración intergeneracional ha sido excepcional, con jóvenes utilizando nuevas tecnologías para documentar los casos o participando en el monitoreo de calidad del agua, entre otras actividades.

de la Red se unieron para cofacilitar un taller dirigido a maestras de la región de Caguas; modelo que continuamos ampliando.

Desafíos y aprendizajes en la construcción de la Red Comunitaria de Agua

Como en todo proceso que busca hacer avanzar una causa justa, la organización de la Red enfrenta desafíos importantes. Una administración pública desconectada, la falta de planificación participativa y un sistema educativo que aún carece de conceptos y valores ambientales representan grandes retos para la Red y su plan de acción. Ante estos obstáculos, la Red promueve una integración activa de la ciudadanía en los procesos de gestión, de modo que las experiencias de las comunidades sirvan como referencia en la toma de decisiones. Además, propone un acercamiento crítico a la incorporación de infraestructura verde en la planificación y el desarrollo urbano, junto con una educación inclusiva que represente a todos los sectores y fomente el compromiso con la protección y defensa del paisaje hídrico.

A medida que la Red forja su identidad, ha tenido que responder al reto de mantener la participación activa de organizaciones, líderes y residentes comunitarios. A través de sus procesos administrativos y organizativos, y mediante una convocatoria constante, ha ido tejiendo una conciencia colectiva que impulsa acciones para la defensa y la justicia del agua en las comunidades del estuario. Siguiendo el trabajo de Marchioni et al. (2008), este esfuerzo se afianza en un proceso abierto de convocatoria en el que se reconocen distintos niveles e intensidades de participación, la necesidad de fomentar una comunicación abierta y transparente sobre el proceso de colaboración y actividades, además de concebir esta plataforma de colaboración como una dinámica y fluida. Hoy podemos celebrar que, desde la segunda etapa de consolidación en 2022, hemos logrado mantener un proceso de colaboración continuo y vibrante, a partir de reuniones mensuales y del encuentro en distintos puntos claves de la cuenca amplia del Estuario de la Bahía de San Juan.



Los desafíos enfrentados a lo largo de esta trayectoria han dejado importantes lecciones. En el trabajo conjunto con otras organizaciones, es fundamental construir valores compartidos que fortalezcan el sentido de propósito común. Esta lección reconoce la diversidad de acercamientos, necesidades y niveles de interacción de las distintas organizaciones representadas en la Red con el estuario. Parte de un proceso de co-construcción de valores desde los cuales se pretende afianzar la lucha en defensa de lo común y del agua de este paisaje.

Las actividades de la RCA son más efectivas cuando se desarrollan en comunidades con proyectos emergentes o consolidados. Esto facilita la integración y el impacto de la Red. El reto de organización social que asume este colectivo reconoce la complejidad y los distintos niveles de trabajo que realizan estas organizaciones de base y grupos. Por eso, hemos insistido en fortalecer los procesos organizativos existentes. Una vez logremos la estabilidad necesaria, podremos incidir en otros espacios con menor grado de organización social o interés por los asuntos del agua.

Además, es crucial incluir en la programación de actividades unos espacios intencionados para la reflexión crítica sobre el proceso organizativo de la Red. Esto permite la revisión continua de su rumbo y efectividad. Partimos de la premisa de que el proceso de la sistematización de experiencias es tan importante como los resultados (Jara, 2018). El desastre ecológico que confrontamos en este territorio obliga a una articulación mayor entre las luchas de distintas comunidades, organizaciones de base y ciudadanía involucradas en la cuestión del agua.

De igual forma, es esencial seguir invitando a nuevas organizaciones y fortalecer la participación activa de las organizaciones que ya forman parte de la RCA. Fomentar un sentido de corresponsabilidad resulta clave, ya que la movilización social es un esfuerzo constante que requiere el compromiso activo de todos los actores involucrados. Como esa pequeña gota de agua que da en la piedra de manera constante e incómoda, seguimos fortaleciendo vínculos entre nuestras culturas del agua.









Hacia el Informe sobre la condición ambiental del Estuario de la Bahía de San Juan 2029: La necesidad de la revisión del Plan del Estuario



María Gabriela Huertas Díaz
Gerente Sénior de Programa
ESTUARIO

Maricela Perryman
Gerente de Subvenciones y Cumplimiento
ESTUARIO

Delia Jiménez
Oficial de Proyectos del Programa del Fondo Rotatorio Estatal (SRF)
ESTUARIO

Sofía Burgos Caraballo
Oficial de Proyectos bajo la Ley de Inversión en Infraestructura y Empleo (IIJA)
ESTUARIO

En vista de la actual revisión del Plan Integral de Manejo y Conservación del Estuario de la Bahía de San Juan, mejor conocido como el Plan del Estuario, es importante analizar dónde estamos en la implementación del Plan vigente y cuáles han sido las lecciones aprendidas en el trayecto.

Introducción

En 2023, Estuario lanzó la revisión del Plan Integral de Manejo y Conservación del Estuario de la Bahía de San Juan, mejor conocido como el Plan del Estuario.

El Plan del Estuario establece las acciones que los ciudadanos y entidades responsables de manejar la infraestructura pública y los recursos naturales de la región deben implementar con el fin de conservar el ecosistema del Estuario de la Bahía de San Juan. El Plan del Estuario delinea estrategias, presenta el presupuesto requerido e identifica a los responsa-

bles y colaboradores necesarios para lograr la implementación efectiva de las acciones.

En línea con el fundamento científico de Estuario, el Plan del Estuario identifica los estresores principales del sistema como base para priorizar la acción colectiva de la región hacia la restauración y conservación. Los estresores principales identificados incluyen:

- Capacidad limitada de intercambio de agua en el Caño Martín Peña, entre la Ensenada de la Península La Esperanza y la Bahía de San Juan, y a través de Isla de Cabras (*Limited Flushing Capacity in the Martín Peña Channel, between La Esperanza Peninsula Cove and the San Juan Bay, and across Isla de Cabras*)
- Descargas ilícitas (*Illegal Discharges*)
- Contaminantes (Tóxicos, altos niveles de nutrientes, PFAS, etc) (*Contaminants* (*Toxics, high level of nutrients, PFAS, etc.*))
- Residuos y desperdicios (*Waste, Trash and Litter*)
- Manejo deficiente del ecosistema (*Deficient Ecosystem Management*)
- Concienciación y participación pública (*Public Awareness and Participation*)
- Eventos extremos recurrentes (*Recurring Extreme Events*)

El Plan del Estuario data del año 2000. Durante su primera actualización completada en 2016, se integró de manera sistemática la atención a los eventos naturales extremos en nuestras prioridades y acciones. Sin embargo, las prioridades identificadas en el Plan del Estuario no contemplan los efectos de la temporada de huracanes de 2017, cuando el huracán María reveló las vulnerabilidades de la región, así como el apoyo directo y natural que ofreció la infraestructura verde para mitigar los efectos.

Conscientes de esta brecha en nuestro entendimiento, en 2019 Estuario publicó el *Diagnóstico de vulnerabilidad de la cuenca y el sistema del estuario de la bahía de San Juan ante el impacto de huracanes*. Publicado como la *Condición del Estuario* de ese año, este documento ancló las prioridades identificadas en el Plan del Estuario en el contexto del Puerto Rico pos-María, y ha servido de base para el desarrollo de nuestros proyectos más emblemáticos de los últimos cinco años.



En vista de la revisión del Plan de Estuario corriente, aprovechamos esta oportunidad para reflexionar sobre los esfuerzos que hemos liderado para atender estas problemáticas prioritarias, en particular las vulnerabilidades identificadas en la *Condición del Estuario 2019*.

ACCIONES PRINCIPALES DURANTE LOS PASADOS CINCO AÑOS

En orden alfabético		En orden de actividades	
Acción	Actividades	Acción	Actividades
AD-01	12	PI-03	50
AD-04	11	PI-04	41
AD-05	9	WS-18	27
AD-06	7	WS-17	18
AD-07	7	GI-01	15
AD-08	1	HW-22	15
GI-01	15	PI-01	13
GI-02	4	PI-06	13
GI-03	1	AD-01	12
HW-01	1	AD-04	11
HW-10	1	PI-07	10
HW-14	6	AD-05	9
HW-17	2	PI-11	9
HW-19	3	HW-24	8
HW-22	15	PI-14	8
HW-24	8	AD-06	7
PI-01	13	AD-07	7
PI-02	4	HW-14	6
PI-03	50	PI-08	6
PI-04	41	WS-05	6
PI-05	3	WS-03	5
PI-06	13	WS-04	5
PI-07	10	GI-02	4
PI-08	6	PI-02	4
PI-09	3	HW-19	3
PI-10	3	PI-05	3
PI-11	9	PI-09	3
PI-12	2	PI-10	3
PI-13	1	HW-17	2
PI-14	8	PI-12	2
WS-02	1	WS-19	2
WS-03	5	AD-08	1
WS-04	5	GI-03	1
WS-05	6	HW-01	1
WS-09	1	HW-10	1
WS-17	18	PI-13	1
WS-18	27	WS-02	1
WS-19	2	WS-09	1



CALIDAD DE AGUA Y SEDIMENTOS

Acciones principales:

- WS-18 Continuar y fortalecer el programa de monitoreo de ESTUARIO, incluyendo su componente de ciencia ciudadana, prestando particular atención al río Piedras, la quebrada Juan Méndez, la quebrada San Antón y sus tributarios.
- WS-17 Determinar las áreas de mayor descarga de aguas sanitarias en la cuenca del EBSJ.
- WS-05 Mejorar el flujo en el Caño Martín Peña.
- WS-04 Eliminar las descargas sanitarias residenciales y comerciales ilegales al sistema de alcantarillado pluvial.
- WS-03 Eliminar las descargas de aguas sanitarias sin tratar no autorizadas (desvíos) del sistema de recolección y de las estaciones bombas de la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados (AAA) hacia el Estuario de la Bahía de San Juan.
- WS-19 Documentar la localización y extensión de los tributarios de agua dulce de la cuenca del Estuario de la Bahía de San Juan, con especial atención al río Piedras, la quebrada Juan Méndez y la quebrada San Antón y sus tributarios.
- WS-09 Minimizar las cargas de sedimentos que llegan al sistema del Estuario de la Bahía de San Juan.
- WS-02 Reubicar a las familias que viven en los márgenes del Caño Martín Peña.

Monitoreo colaborativo de la calidad del agua (WS-05, WS-17, WS-18, PI-03)

El monitoreo de la calidad del agua es la zapata de los proyectos de ESTUARIO, ya que nos permite medir el progreso de la región en la implementación del Plan del Estuario y la restauración y conservación de las aguas del sistema del estuario. Además, el Departamento de Recursos Naturales y Ambientales de Puerto Rico utiliza los datos de ESTUARIO para cumplir con las secciones 305(b) y 303(d) de la Ley de Agua Limpia de Estados Unidos.

Durante los pasados cinco años, ESTUARIO ha ido expandiendo sus esfuerzos para monitorear la calidad del agua, particularmente a través de la creación del Colaborativo de monitoreo de calidad del agua. El Colaborativo integra los esfuerzos de recopilación, análisis y publicación de datos sobre la calidad de agua generados por 12 organizaciones: el Sistema de observación costera y oceánica del Caribe (CARICOOS, por sus siglas en inglés); la Oficina de Investigación y Desarrollo de la Agencia de Protección Ambiental de los EE. UU.; el Servicio Geológico de los EE. UU.; el Departamento de Salud Ambiental del Recinto de Ciencias Médicas de la Universidad de Puerto Rico; el Departamento de Recursos Naturales y Ambientales (DRNA); la Escuela de Salud y Ciencias de la Universidad del Sagrado Cora-





zón; SurfRider Foundation-Rincón Chapter; Arrecifes Pro Ciudad; el Centro de Educación, Conservación e Interpretación Ambiental (CECIA) de la Universidad Interamericana de Puerto Rico; la Reserva Nacional de Investigación Estuarina de Bahía de Jobos; el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos; y el Centro de Conservación de Manatíes.

Con una mayor cantidad de datos, ESTUARIO podrá medir con mayor precisión el impacto de proyectos de mejoras capitales y de infraestructura en la calidad del agua y apoyar el análisis de la efectividad y buen uso de fondos públicos. En los próximos años, ESTUARIO estará robusteciendo su capacidad de manejo y análisis de datos, y desarrollará una plataforma web accesible al público para presentar los datos recopilados.

Igualmente, ESTUARIO ha invertido en un sistema de monitoreo autónomo remoto para instalar en seis estaciones estratégicas a través de la cuenca: en la laguna de Piñones, en el río Puerto Nuevo/río Piedras, en la Laguna del Condado, la laguna La Torrecilla, y en la laguna San José en la boca del Caño Martín Peña. El sistema obtendrá información sobre la calidad del agua en intervalos de una hora sin la necesidad de personal. Esto facilitará el monitoreo continuo del sistema, particularmente cuando se imposibilite hacerlo en persona de manera segura, por ejemplo, durante un huracán. Esta información nos permitirá estudiar el comportamiento del ecosistema y entender con más precisión los efectos de los eventos naturales extremos sobre el sistema estuarino.

Proyecto de detección y corrección de descargas ilícitas (WS-03, WS-04, WS-17)

En 2015, ESTUARIO comenzó una colaboración con el Servicio de Extensión Agrícola de la Universidad de Puerto Rico en Mayagüez para completar un diagnóstico detallado de la infraestructura de aguas sanitarias e identificar a ciencia cierta las deficiencias y necesidades de atención para prevenir las descargas ilícitas. Este esfuerzo identificó 12 subcuencas críticas que requerían atención por sus altos niveles de contaminación por aguas usadas. Desde 2018, el proyecto ha remitido 429 casos de descargas ilícitas a la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados (AAA). La AAA ha logrado atender un 25 % de estos casos, lo que resalta la complejidad de atender la problemática a nivel regional. Las mejoras realizadas han logrado reducir significativamente los contaminantes en el estuario, lo que protege tanto la biodiversidad como los recursos hídricos.

El proyecto de detección y corrección de descargas ilícitas ha evidenciado que la razón principal detrás de estas descargas contaminantes es el colapso y mal estado de nuestra infraestructura de aguas servidas. ESTUARIO continúa priorizando acciones correctivas y de planificación alrededor de las 12 subcuencas para asegurar que se atiendan los casos más críticos de manera efectiva.

Automatización de las estaciones de bombeo de aguas servidas (WS-03, WS-04, WS-17)

Como parte del proyecto de detección y corrección de descargas ilícitas, entre 2016 y 2024, ESTUARIO analizó los derrames imprevistos de las estaciones de bombeo de aguas sanitarias (EBAS) en la zona metropolitana con el apoyo del Servicio de Extensión Agrícola de la Universidad de Puerto Rico en Mayagüez. Esta colaboración identificó que cerca del 40 % de las EBAS generan al menos un informe de derrame anual. Ante esta situación, ESTUARIO ha colaborado con la AAA y asignado fondos para automatizar las funciones de al menos 15 EBAS prioritarias en zonas bajas de la región metropolitana. Este proyecto permitirá monitorear en tiempo real las operaciones de estas estaciones, previniendo futuros desbordamientos.

Proyecto de restauración del ecosistema del Caño Martín Peña (WS-01, WS-02, WS-05)

La restauración ecológica del Caño Martín Peña es uno de los proyectos prioritarios de infraestructura y contemplados en el Plan del Estuario. Luego de participar en el proceso de desarrollo y aprobación de la Ley para el Desarrollo Integral del Distrito de Planificación Especial del Caño de Martín Peña (Ley 489 de 2004), ESTUARIO se ha enfocado en apoyar a la Corporación del Proyecto ENLACE y al G-8 como líderes de este esfuerzo. ESTUARIO es miembro activo del Comité Científico y Técnico del proyecto y facilita la implementación de la iniciativa de Aguas Urbanas de la Agencia de Protección Ambiental de los EE. UU. (EPA, por las siglas en inglés), administrando los fondos que facilitan el Caño Martín Peña Urban Waters Federal Partnership. Durante los pasados cinco años, estos esfuerzos multisectoriales han logrado aumentar la cantidad autorizada del proyecto de $150 millones a $256 millones. Gracias a la Ley Bipartita de Infraestructura, el dragado del Caño Martín Peña cuenta con los fondos para implementar la totalidad del proyecto. La fase 1 ya está completada, y el proyecto se encuentra en el diseño de la fase 2.

Proyecto de mejoramiento de la infraestructura sanitaria (WS-03, WS-04)

De acuerdo con lo expuesto previamente, la causa principal de la contaminación por descargas ilícitas en el estuario es el colapso de nuestra infraestructura de agua sanitaria. Desde 2013, la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados provee el pareo de los fondos federales asignados por la EPA que ESTUARIO necesita para poder operar. Durante los pasados cinco años, este pareo ha significado una inversión de más de $8.4 millones en proyectos para atender obstrucciones e infiltraciones de agua de escorrentías pluviales al alcantarillado sanitario, que provocan reflujos y desbordamientos en las tapas de acceso, los sistemas de alcantarillado sanitario y pluvial combinados, y desbordamientos en las estaciones de bombeo de aguas servidas. Con la inspección, limpieza, relocalización y reemplazo de líneas de alcantarillado minimizamos las instancias de descargas, viendo mejorías significativas en la calidad del agua a través de la región.





HÁBITAT, PECES Y VIDA SILVESTRE

Acciones principales:

- HW-22 Estimar o modelar la vulnerabilidad del EBSJ ante los impactos de los eventos naturales extremos y presentar medidas de adaptación.
- HW-24 Asegurar la implementación de la Ley 112 de 2013, que crea la Reserva Natural Estuarina de la Laguna del Condado.
- HW-14 Proteger las poblaciones existentes de especies de aves vulnerables y en peligro de extinción, y proteger y restaurar su hábitat en el sistema del EBSJ.
- HW-19 Identificar zonas en el EBSJ para su designación como áreas marinas protegidas y continuar con el proyecto de restauración de arrecifes y corales de ESTUARIO.
- HW-17 Determinar las áreas actuales y tradicionalmente usadas para la pesca recreativa en el EBSJ y desarrollar un plan para manejar adecuadamente los recursos pesqueros recreativos.
- HW-01 Sembrar mangle a lo largo del lado oeste de la Bahía de San Juan.
- HW-10 Implementar un plan de recuperación de tortugas marinas.

Plan Multijurisdiccional de Mitigación de Riesgos (HW-22, PI-03, PI-04)

La planificación y mitigación de riesgos es clave para romper el ciclo de desastre, reconstrucción y desastre. En los pasados cinco años, ESTUARIO ha encaminado el desarrollo del primer Plan Multijurisdiccional de Mitigación de Riesgos en Puerto Rico. El Plan Multijurisdiccional procura articular los planes municipales de Bayamón, Canóvanas, Carolina, Cataño, Guaynabo, Loíza, San Juan, Toa Baja y Trujillo Alto para maximizar los recursos y la eficacia de las estrategias e inversiones de reconstrucción y mitigación a través de la región. Se tiene previsto presentar el Plan Multijurisdiccional ante la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias (FEMA, por las siglas en inglés) para su debida aprobación en diciembre de 2025. Además de cumplir con los requisitos de FEMA, el Plan Multijurisdiccional sigue los estándares de la Organización Internacional de Normalización (mejor conocida por las siglas en inglés, ISO), por lo que cada estrategia de mitigación definirá cómo apoya la implementación de los objetivos de desarrollo sostenible de las Naciones Unidas.

Comanejo de la Reserva Natural Estuarina de la Laguna del Condado (HW-24, HW-02, HW-03, PI-09)

Desde 2013, ESTUARIO funge como comanejador de la Reserva Natural Estuarina de la Laguna del Condado bajo la Ley 112 promulgada ese año. Durante los pasados cinco años, ESTUARIO ha enfocado sus esfuerzos en promover a la Laguna como un laboratorio viviente para estudiantes, educadores e investigadores de la región, celebrando talleres y viajes de campo para púbico de todas las edades. Igualmente, el

primer sábado de cada mes ESTUARIO celebra su pasadía familiar en el Parque Jaime Benítez, como ejemplo de cómo podemos disfrutar de estos espacios verdes con actividades pasivas y de bajo impacto. Más de 2,300 personas disfrutaron de estos pasadías en 2024. Después del huracán María, ESTUARIO ha facilitado la creación y colaboración de los Amigos de la Laguna, iniciativa que reúne a residentes, visitantes y aliados de la reserva comprometidos con apoyar su restauración y conservación. En 2025, ESTUARIO y el DRNA formalizaron su colaboración con la firma de un acuerdo de comanejo.

Monitoreo de indicadores ambientales (HW-14, PI-01, PI-03, PI-04)

Como parte de los esfuerzos de expandir el monitoreo de las condiciones del sistema estuarino, ESTUARIO creó un proyecto de monitoreo de indicadores ambientales. Los datos alimentan el Índice de indicadores ambientales basado en parámetros hidrológicos y ecológicos, una herramienta para facilitar que el público pueda ver el progreso de la restauración y conservación del sistema. Igualmente, en 2021, ESTUARIO comenzó a desarrollar una metodología preliminar para producir un índice de la cuenca estuarina, el cual considera parámetros ecológicos, hidrológicos y socioeconómicos como herramienta para comunicar la salud del sistema de una manera comprensiva.



DESECHOS ACUÁTICOS

Acciones principales:

- AD-01 Desarrollar e implementar programas comunitarios para el manejo y reciclaje de desperdicios sólidos en coordinación con los municipios.
- AD-04 Realizar actividades periódicas de limpieza de desechos acuáticos en lugares sugeridos del EBSJ.
- AD-05 Establecer programas piloto de prevención de contaminación en diferentes lugares del EBSJ.
- AD-06 Implementar medidas para detectar, corregir y controlar las actividades ilegales de desecho y hacer cumplir la ley que prohíbe la disposición ilegal de basura en Puerto Rico (Ley Núm. 11 de 1995).
- AD-07 Hacer cumplir la Ley para el Manejo de Neumáticos Usados (Ley Núm. 171 de 1996) y otras medidas reglamentarias relacionadas con la disposición ilegal de gomas usadas dentro del sistema estuarino y su cuenca de drenaje.
- AD-08 Desarrollar un proyecto de reducción y prevención de contaminación en marinas, villas pesqueras y clubes náuticos del Estuario de la Bahía de San Juan.

Red Intermunicipal para el Manejo Integrado de Recursos y Residuos (AD-01, AD-04, AD-05, AD-06, AD-07)

Uno de los estresores principales del sistema estuarino es la contaminación por fuentes dispersas, que suele identificarse con la basura. En 2022, ESTUARIO publicó el informe *Análisis y recomendaciones para el manejo integrado de recursos y residuos*, en el que se identifican alternativas y estrategias para fortalecer el manejo adecuado de los recursos y residuos por parte de los municipios y agencias, fundamentadas en una evaluación de la infraestructura, capacidad, el manejo y la disposición de desechos y recursos en la región. En 2023, ESTUARIO inauguró la Red Intermunicipal para el Manejo In-

tegrado de Recursos y Residuos para impulsar la acción en torno a las recomendaciones del informe y desarrollar un sistema integrado de manejo de recursos y residuos entre los municipios de la cuenca.

Reciclaje de aceite vegetal de cocinar usado (AD-01, AD-04, AD-05, AD-06, AD-07)

El 60 % de los desbordamientos del sistema de alcantarillado sanitario se deben a obstrucciones en las líneas por masas de grasa provenientes del vertimiento de aceite de cocinar usado al sistema por residentes y comercios. En 2019, ESTUARIO puso en marcha un esfuerzo de reciclaje de aceite de cocinar usado con el objetivo de educar a la ciudadanía sobre las alternativas para disponer adecuadamente del aceite usado. En sus inicios, la iniciativa se limitó a colaboraciones con los centros resilientes establecidos luego del huracán María en colaboración con las comunidades estuarinas. Desde el establecimiento de la Red Intermunicipal, ESTUARIO está enfocado en apoyar a los municipios para que integren el recogido de aceite en sus esfuerzos de manejo de recursos y residuos y así maximizar el impacto de la estrategia. Desde su inauguración, los esfuerzos de ESTUARIO han desviado sobre 600 galones de aceite de cocinar usado de nuestro alcantarillado sanitario.



INFRAESTRUCTURA VERDE

Acciones principales:

- GI-01 Crear un plan maestro de infraestructura verde en la cuenca del EBSJ y desarrollar proyectos piloto de jardines pluviales, techos verdes, dunas y otros ecosistemas.
- GI-02 Crear un proyecto piloto para revertir el proceso de canalización con hormigón y cemento de un segmento de un río, quebrada o tributario de agua dulce del EBSJ.
- GI-03 Promover el uso de medios alternos de transporte, como las bicicletas, en el contexto del crecimiento inteligente.

Plan Maestro de Infraestructura Verde para el Manejo de Escorrentías Pluviales (GI-01, WS-16)

ESTUARIO comenzó a desarrollar el primer Plan Maestro de Infraestructura Verde para el Manejo de Escorrentías Pluviales en Puerto Rico. Este nuevo plan se integrará con el Plan Multijurisdiccional de Mitigación de Riesgos para apoyar el manejo adecuado de las escorrentías, lo que ayudará a reducir la cantidad de agua que debe manejar el sistema de alcantarillado pluvial, mejorando la calidad del agua que llega al sistema estuarino. ESTUARIO se encuentra en el proceso de validar el plan con los diversos sectores de interés, en particular los municipios de la cuenca, que se beneficiarán del documento para cumplir con sus permisos generales para descargas de escorrentías de pequeños sistemas separados de alcantarillado pluvial municipal o MS4 (por sus siglas en inglés).

Restauración de la quebrada Juan Méndez (GI-02, WS-18, WS-19)

En 2021, el Congreso de los Estados Unidos aprobó la Ley Bipartita de Infraestructura como un esfuerzo titánico de inversión en la infraestructura y resiliencia de la nación. Cada localidad del Programa Nacional de Estuarios recibió una designación de $4.5 millones para invertir en cinco años. Con esta inversión histórica,

ESTUARIO desarrolló el Plan de restauración de la quebrada Juan Méndez. La quebrada tiene un amplio tramo canalizado y la calidad del agua está comprometida por las descargas ilícitas, el colapso de la canalización en cemento y la acumulación de basura y escombros, entre otros problemas que ponen en peligro la salud de los ecosistemas estuarinos y sus comunidades. Su restauración es imprescindible para asegurar la calidad del agua de la laguna San José y, sobre todo, para proteger la inversión y el progreso de la restauración del ecosistema del Caño Martín Peña. Para ESTUARIO es esencial que la restauración de la quebrada Juan Méndez sea un proceso participativo de cocreación entre las comunidades, agencias y entidades responsables. Estuario se encuentra en proceso de crear un comité timón, el cual integrará a agencias, municipios y comunidades para asegurar una colaboración estrecha dirigida a restaurar este cuerpo de agua. Para asegurar la participación activa de las comunidades, se estará desarrollando un plan de participación comunitaria.

Resiliencia Costera (GI-01, PI-03, PI-04)

En 2021, ESTUARIO lanzó el proyecto de Resiliencia Costera con la intención de desarrollar en nuestras comunidades, particularmente aquellas costeras, la capacidad de identificar y priorizar iniciativas de adaptación y restauración de los ecosistemas costeros críticos. A través del módulo nuevo en resiliencia costera de la Certificación de Ciudadanos Científicos, los participantes recopilan datos sobre la condición de los manglares, las praderas marinas y los arrecifes de coral para crear un diagnóstico de la salud de esos ecosistemas como base para la planificación y acción. En 2023, el módulo se extendió a estudiantes de escuela superior. El proyecto apoya la economía verde y azul de la región como un esfuerzo de desarrollo de la fuerza laboral, entrenando a trabajadores a evaluar e informar sobre los ecosistemas costeros afectados por eventos atmosféricos extremos.



EDUCACIÓN Y PARTICIPACIÓN CIUDADANA

Acciones principales:

- PI-03 Establecer un Programa de Voluntarios a fin de proveer a los ciudadanos con oportunidades efectivas de participación en proyectos de restauración del EBSJ (monitoría de calidad del agua, educación, etc.).
- PI-04 Desarrollar un programa a largo plazo de alcance comunitario y educación pública.
- PI-06 Desarrollar un Programa de Educación Ambiental dirigido a la población escolar u otras instituciones educativas a través de toda la cuenca del EBSJ.
- PI-01 Desarrollar y promover actividades recreativas de bajo impacto en áreas escogidas del EBSJ.
- PI-07 Establecer un Memorando de Entendimiento entre entidades públicas y privadas y el ESTUARIO para ampliar la esfera de acción de las actividades de educación pública y alcance comunitario.
- PI-11 Crear un proyecto a largo alcance de comunicación sobre el Estuario de la Bahía de San Juan, que incluya las redes sociales y un método

para medir conocimiento en torno al ecosistema.

- PI-14 Crear un proyecto continuo de recopilación y acceso a la información mediante alternativas como el WebAtlas y la biblioteca del ESTUARIO.
- PI-08 Promover un mejor entendimiento de los recursos estuarinos entre las agencias reguladoras y su personal.
- PI-02 Colocar rótulos interpretativos y educativos en áreas de tráfico pesado y de alta visibilidad en toda la cuenca del EBSJ (puentes, carreteras, parques, marinas, puertos, frentes portuarios, etc.) para educar al público sobre los componentes, las funciones y los valores del sistema.
- PI-10 Realizar un estudio sobre el valor económico de los bienes y servicios ambientales del Estuario de la Bahía de San Juan.
- PI-09 Promover el acceso público a los cuerpos de agua y la franja de playas arenosas del EBSJ.
- PI-05 Desarrollar un programa de ecoturismo a fin de promover actividades sostenibles de bajo impacto en el disfrute de los recursos naturales del EBSJ, como un medio para fomentar su conservación.
- PI-12 Mantener informados a los y las oficiales electos y jefes de agencias sobre el proceso de restauración del EBSJ, sus retos y logros.
- PI-13 Desarrollar una serie de guías ciudadanas para promover el concepto de cuenca hidrográfica y proteger los cuerpos de agua del EBSJ, incluyendo los principales ríos y quebradas del ecosistema.

Día de Calidad del Agua (PI-03, PI-04, WS-18)

El Día de Calidad del Agua de Puerto Rico es el evento de ciencia ciudadana más grande a nivel Isla y el evento principal de nuestro calendario anual. Desde 2009, este emblemático evento ha convocado a más de 12,000 ciudadanos a monitorear la calidad del agua en los embalses, lagunas, quebradas y playas más cercanas, promoviendo el compromiso con sus recursos naturales y educando sobre los parámetros que determinan las condiciones saludables del entorno natural. Como parte de la iniciativa internacional *EarthEcho Water Challenge*, los datos del monitoreo de la calidad del agua de Puerto Rico se unen a los de al menos 143 países que participan anualmente, generando así datos para más de 250,000 cuerpos de agua alrededor del mundo. En los pasados cinco años, ESTUARIO ha ajustado su estrategia para facilitar y catalizar la colaboración entre entidades afines con el propósito de lograr atraer una mayor cantidad de participantes. Cabe destacar el apoyo de las siguientes entidades y organizaciones alrededor de la Isla: EPA, Donativos Ambientales Ford, MAPFRE, DRNA, Surfrider Foundation, la Red Comunitaria de Agua, Ponce Health Sciences University, Universidad Interamericana de Puerto Rico en Fajardo, Universidad de Puerto Rico en Río Piedras, el EcoExploratorio, BoriCorps en Salinas, AmeriCorps, Municipio Autónomo de San Juan, y grupos de homeschoolers en Guayanilla y Morovis.



Estudio de Valoración e Impacto Económico (PI-10)

En 2024, ESTUARIO comenzó el *Estudio de valoración e impacto económico del Estuario de la Bahía de San Juan*, a completarse en 2026. El estudio asignará valores monetarios a los bienes y servicios que ofrece el sistema del estuario, siguiendo una metodología científica reconocida. Esta herramienta apoyará los esfuerzos de comunicación sobre la importancia de restauración y conservación del estuario desde la perspectiva económica, informando el desarrollo de política pública a nivel regional.

Certificación de Ciudadanos Científicos (WS-18, PI-03, PI-04)

La Certificación de Ciudadanos Científicos ha sido un esfuerzo emblemático de ESTUARIO desde sus comienzos en 2018. Durante la pandemia del COVID-19, la iniciativa mostró un crecimiento exponencial al extender sus ofrecimientos a la modalidad virtual.

En respuesta, ESTUARIO ha continuado fortaleciendo el proyecto, añadiendo nuevos módulos para un total de cuatro: Monitoreo de Calidad del Agua, Resiliencia Costera, Censos de Aves Participativos y Caracterización de Microplásticos. En 2023, la Certificación se extendió a estudiantes de escuela superior a través del módulo de Resiliencia Costera. En 2024, se graduaron los primeros 16 estudiantes, quienes completaron los tres talleres y seis experiencias de campo requeridas en los temas de vegetación costera, praderas marinas y comunidades coralinas.

Educación para la concienciación comunitaria (PI-01, PI-03, PI-04, PI-06, PI-08)

Luego del huracán María, ESTUARIO se enfocó en promover actividades educativas centradas en la resiliencia y el manejo adecuado de emergencias. Durante la pandemia del COVID-19, ESTUARIO se esforzó en integrar las mejores prácticas en la educación a distancia para asegurar el acceso a sus ofrecimientos educativos, en particular a comunidades históricamente marginadas. Estos esfuerzos se tradujeron en un alza significativa de participantes en las actividades de ESTUARIO. Durante el año fiscal 2019-2020, logramos llegar a más de 1,000 participantes provenientes de las ocho municipalidades del estuario y 58 de otros municipios. Desde entonces, ESTUARIO se asegura de ofrecer actividades educativas tanto presenciales como en línea para seguir fomentando la concienciación en toda la Isla.

Centros Resilientes (PI-03, PI-04, HW-22)

ESTUARIO estableció la iniciativa de los Centros Resilientes en 2018, luego del paso del huracán María. Con la llegada de la pandemia del COVID-19, los esfuerzos de ESTUARIO se dirigieron a apoyar a las comunidades de manera virtual, ofreciendo talleres y actividades para todas las edades en temas de resiliencia, cómo navegar momentos de estrés agudo, y primeros auxilios en salud mental. Una vez fue seguro volver a encontrarnos en persona, ESTUARIO se enfocó en continuar los programas de reciclaje de aceite de cocinar usado y otros esfuerzos para el manejo adecuado de los recursos y residuos con los centros de Taller Comunidad La Goyco, Centro Cultural de Caimito y Comunidad Organizada de Puente Blanco. En Cantera, ESTUARIO continuó trabajando la integración de la comunidad a la conversación sobre el Proyecto de restauración del ecosistema del Caño Martín Peña, logrando integrar a la Corporación para el Desarrollo Integral de la Península de Cantera en el Urban Waters Federal Partnership. En 2024, ESTUARIO desarrolló la *Guía para el manejo y mantenimiento de los Centros Resilientes*, en colaboración con cada uno de los centros, para continuar apoyando la autogestión de estos espacios por parte de las comunidades.



Comunicaciones (PI-11, PI-14)

En 2023, ESTUARIO lanzó la campaña *Con el estuario convivimos* para resaltar la interconexión de nuestro ecosistema con la infraestructura gris de la región, tales como las autopistas y carreteras, como parte de nuestro contexto urbano. La campaña enaltecó las voces de nuestra juventud, quienes evaluaban su entorno con ojos críticos y buscaban crear un sentido de pertenencia para restaurar y conservar el sistema, particularmente en entidades de manejo y toma de decisiones. La campaña incluyó anuncios de cartelera tipo billboards, televisión, radio, y redes sociales. En 2024, ESTUARIO presentó su segunda tablilla especial ambiental, esta vez destacando al tinglar, para continuar el esfuerzo de concienciar.



NECESIDAD DE REVISIÓN DEL PLAN DEL ESTUARIO

Los pasados cinco años han visto el desarrollo de proyectos nuevos y la evolución de los proyectos existentes para apoyar la realidad del estuario pos-María. El Diagnóstico de vulnerabilidad de 2019 ha sido clave en establecer la base científica para la toma de decisiones en este proceso, pero es importante que el Plan del Estuario responda a nuestra realidad presente.

Desde la actualización del Plan del Estuario en 2016, el contexto social, económico y climático de la región metropolitana de San Juan ha cambiado significativamente. La revisión del Plan del Estuario es necesaria para atemperar los planes de acción a la realidad actual y responder de manera más efectiva a las necesidades del sistema del Estuario de la Bahía de San Juan y las comunidades aledañas. Esta revisión del Plan del Estuario tiene el objetivo de crear un ecosistema estuarino saludable y vital que nutra la biodiversidad, promueva la estabilidad para una recuperación más rápida después de desastres naturales, fomente el desarrollo económico a través del crecimiento empresarial inteligente y fomente una comunidad apasionada que vive un estilo de vida armonioso con el Estuario de la Bahía de San Juan.

En 2024, ESTUARIO identificó los temas claves a atenderse en la revisión del Plan del Estuario. Estos temas establecen las nuevas áreas de prioridad que estaremos atendiendo a través de la región:

- Ampliación del área de estudio del estuario
- Eventos extremos recurrentes y la necesidad de un manejo basado en la adaptación y la resiliencia
- Visión programática de ESTUARIO y su rol como convocante y facilitador regional
- Deficiencias de política pública e implementación
- Descargas ilícitas y su impacto en la salud pública
- El deterioro de la infraestructura y la necesidad de rediseñarla
- Modificaciones del sistema y canalizaciones
- Contaminación por fuentes dispersas y la necesidad de un manejo integrado de recursos y residuos
- Contaminantes de preocupación emergentes (medicamentos, microplásticos, PFAS, contaminantes industriales, etc.)
- Erosión costera y la degradación de los ecosistemas
- Mejoras en la calidad del agua
- Mejoras en la calidad del aire
- Educación y cultura

A través de este proceso, será imprescindible la participación activa de todos los sectores, tanto gubernamental, como privado, sin fines de lucro y comunitario. Les exhortamos a participar de las discusiones y de la cocreación de nuevas acciones para la restauración y conservación del sistema

en torno a los siguientes cinco objetivos:

- Mejorar la infraestructura en apoyo a la calidad del agua y los sedimentos en el lecho estuarino.
- Mejorar y mantener la biodiversidad.
- Eliminar fuentes de contaminantes.
- Promover la adaptación ante los eventos naturales extremos mediante un desarrollo sostenible y el uso de infraestructura natural.
- Fomentar la gestión mediante una gobernanza efectiva y una cultura de sostenibilidad y solidaria.

Pueden visitar nuestra página web en https://estuario.org/revision-del-plan-del-estuario-2024/ para registrarse y recibir noticias sobre el proceso, fechas de reuniones y oportunidades de someter comentarios directamente a su correo electrónico.









REFERENCIAS

Referencias

El Estuario de la Bahía de San Juan

Lugo, Ariel E.; Ramos González, Olga M.; Rodríguez Pedraza, Carlos. 2011. The Río Piedras watershed and its surrounding environment. FS-980. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, International Institute of Tropical Forestry. 46 p.

Desarrollo de una plataforma predictiva de afloramiento (brotes) de algas peligrosas para la laguna San José

Ellis, S.R., and F. Gómez-Gómez. (1975). Water quality and hydraulic data, San Juan Lagoon system, Puerto Rico: *U.S. Geological Survey Open-file Report* 75-2, 142 pp.

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

El Nuevo Día. 2020. Esclarecen Evento de Mortandad. Kevin Alicea Torres. 16 agosto 2020, p. 42-43.

Webb, R. M. T., and Gómez-Gómez, F. 1998. Synoptic Survey of Water Quality and Bottom Sediments, San Juan Bay Estuary System, Puerto Rico, December 1994-July 1995. *U.S. Geological Survey. Water-Resources Investigations Report* 97-4144.

El frágil ecosistema de la bahía de San Juan: una década de contaminación

Aldarondo-Torres, J. X., Samara, F., Mansilla-Rivera, I., Aga, D. S., & Rodríguez-Sierra, C. J. (2010). Trace metals, PAHs, and PCBs in sediments from the Jobos Bay area in Puerto Rico. *Marine Pollution Bulletin*, 60(8), 1350-1358.

Álvarez-Muñoz, D., Llorca, M., Blasco, J., & Barceló, D. (2016). Contaminants in the Marine Environment. En Elsevier eBooks (pp. 1-34). https://doi.org/10.1016/b978-0-12-803371-5.00001-1

Otero E. y Meléndez A (2011). Estuarine Environmental Indicators for the San Juan Bay Estuary: Assessment of Sediment and Fish Tissue Contaminants. San Juan Bay Estuary Program

USEPA 2008b. Puerto Rico Fish Tissue Analysis, Final Report. EPA Region 2. Division of Environmental Science and Assessment. USEPA. Office of Water. Washington DC

Aguas no aptas para el uso recreativo: conoce los microorganismos implicados

Tortora, Gerard J., Funke, Berdell R., Case, Christine L. (2023). *Microbiology: an introduction* (14th). Chicago: Pearson.

Programa del Estuario de la Bahía de San Juan. (2013) Tercer Informe de la condición ambiental del Estuario de la Bahía de San Juan. https://estuario.org/wp-content/uploads/2021/02/Ebook-SOB-2013-compressed.pdf

Environmental Protection Agency (15 de mayo de 2024), What are Water Quality Standards? https://www.epa.gov/wqs-tech/what-are-water-quality-standards

Censos de aves en la cuenca hidrográfica del Estuario de la Bahía de San Juan (2017-2024)

Brandeis, Thomas J., Escobedo, Francisco J., Staudhammer, Christina L., Nowak, David J. and Zipperer, Wayne C. (2014), San Juan Bay Estuary watershed urban forest inventory. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Research Station http://dx.doi.org/10.2737/SRS-GTR-190

Castro-Prieto, Jessica; Wunderle, Jr., Joseph M.; Salguero-Faría, José A.; Soto-Bayó, Sandra; Crespo-Zapata, Johann D.; Gould, William A. (2021) The Puerto Rico breeding bird atlas. Gen. Tech. Rep. IITF-53. Río Piedras, PR: U.S. Department of Agriculture Forest Service, International Institute of Tropical Forestry. 311 p. https://doi.org/10.2737/IITF-GTR-53.

Herbert A. Raffaele, Clive Petrovic, Sergio A Colón López, Lisa Yntema, y José A. Salguero Faria. (2021) BIRDS OF PUERTO RICO AND THE VIRGIN ISLANDS. Princeton University Press, Princeton, New Jersey. 224 pp.

Nieves Rodríguez, E. (2018). Geografía y aves: una oportunidad de hacer ciencia ciudadana y promover la conservación de la biodiversidad en los ecosistemas urbanos. http://bit.ly/GeografiayAves

Ruiz-Gutiérrez, V., Berlanga, H.A., Calderón-Parra R., Savarino-Drago, A., Aguilar-Gómez, M.A. Rodríguez-Contreras, V. (2020) Illustrated Manual for Landbird Monitoring. PROALAS: Latin American Program for Landbirds. National Commission for the Knowledge and Use of Biodiversity / Initiative for the Conservation of the Birds of North America, Mexico and Cornell Laboratory of Ornithology Mexico City and Ithaca N. Y. 104 pp. PROALAS_Carib_English_HighRes.pdf (birdscaribbean.org)

Sorenson, L. G., A. Haynes-Sutton, F. Rivera-Milan, and J. Gerbracht. (2019) Caribbean Waterbird Census Manual: Promoting Conservation of Waterbirds and Wetlands through Monitoring. BirdsCaribbean, Natick, MA. Xx pp.Microsoft Word - CWC Manual-Formatted-1 April 2019.docx (birdscaribbean.org)

Índice de calidad de la cuenca del Estuario de la Bahía de San Juan: metodología, componentes, indicadores y métricas

Brandeis, T. J. (2003). Adapting the Forest Inventory and Analysis Program to a Caribbean Island. *Journal of Forestry*, 8-18.

Brandeis, T. J., Escobedo, F. J., & Staudhammer, C. L. (2014). *San Juan Bay Estuary watershed urban forest inventory*. Asheville, NC. : Gen. Tech. Rep. SRS-190 US Departmet of Agriculture Forest Service.

Brown, R. M., McClelland, N. I., Deininger, R. A., & Tozer, R. G. (1971). Water Quality Index-do we dare? *Water Sewage Works*, 117(10).

Ellis, S. (1976). *History of dredging and filling of lagoons in the San Juan area, Puerto Rico*. San Juan: U.S. Geological Survey Water Resources Investigations.

Ellis, S., & Gómez-Gómez, F. (1976). *Hydrologic characteristics of lagoons at San Juan, Puerto Rico, during a January 1974 tidal cycle*. San Juan: U. S. Geological Survey Water Resources Investigations .

Gergel, S. E., Turner, M. G., Miller, J. R., Melack, J. M., & Stanley, E. H. (2002). Landcscape indicators of human impacts to riverine systems. Aquatic Science, 118-128.

Gómez-Gómez, F., Quiñones, F., & Ellis, S. R. (1983). *Hydrologic Characteristics of Lagoons at San Juan, Puerto Rico During an October 1974 Tidal Cycle*. San Juan : Water Resources Investigations U.S. Geological Survey.

Lugo, A. E., Ramos-González, O. M., & Rodriguez-Pedraza, C. (2011). *The Rio Piedras Watershed and Its Surrounding Environment*. Rio Piedras: Forest Service U.S. Department of Agriculture.

Pickett, S., Cadenasso, M., Grove, J., Boone, C. G., Groffman, P. M., Irwin, E., . . . Warren, P. (2011). Urban ecological systems: Scientific foundations and a decade of progress. *Jounal of Environmental Management*, 331-362.

United Stte Environmental Protection Agency. (2018). *User Guide for the Recovery Potential Screening (RPS)*. Washibgton DC: EPA.

Referencias

Elementos a considerar en la hoja de ruta para la planificación del manejo integrado de la infraestructura hídrica: el caso de la quebrada Juan Méndez

Bukaveckas, Paul. 2007. Effects of Channel Restoration on Water Velocity, Transient Storage, and Nutrient Uptake in a Channelized Stream. Environmental Science and Technology. 41 (5): 1570-1576.

Environmental Protection Agency. 2004. Illicit discharge detection and elimination A guidance Manual for Program Development and Technical Assessments. EPA Cooperative Agreement X-82907801-0

Environmental Protection Agency. 2007. National Management Measures to Control Nonpoint Source Pollution from Hydromodification, Assessment and Watershed Protection Division Office of Water U.S. EPA 841-B-07-002.

Final Feasibility Report Delivery Package, Caño Martín Peña Ecosystem Restoration Project, USACE 2016, 1-10.

Martinuzzi, S., Gould, W.A., and Ramos-González, O.M.(2007). Land development, land use, and urban sprawl in Puerto Rico-Integrating remote sensing and population census data. Landscape and Urban Planning. 79: 288-297

Nytch, C. J., Fortune, J., Ramsay, M. M., Meléndez J., Sánchez García, M. A., Arache, A. V. Fontánez Prez J. A. and Ortiz Zayas J. R. (2016) Investigating the water balance and quality of a tropical urban sewershed through collaborating learning. Acta Científica. 30: 217:254.

Martínez- Rodríguez, G. (2024) Implementation of water quality restoration strategy at the San Juan Bay Estuary and the Río Grande de Loíza (below dam) Estuary contribution zone (Phase II). Progress report.

Meyer, Judy L, Paul, M. J. and Taulbee, W. K. (2005) Stream ecosystem function in urbanizing landscapes. Journal of the North American Benthological Society 24:602–612.

Morris G. L., Portalatín J., De Jesús, R., Ramos, M., Toledo, T. Guía para el manejo de ríos en Puerto Rico. Departamento de Recursos Naturales y Ambientales de Puerto Rico. p 9.7-9.9

Ramírez, A., De-Jesús-Crespo, R., Martinó-Cardona, D. M., Martínez-Rivera, N., y Burgos-Caraballo, S. (2009) Urban streams in Puerto Rico: what can we learn from the tropics? Journal of the North American Benthological Society. 28(4): 1070-1079.

Santos Flores, C. L. and Martínez-Rodríguez, G. A. (2021). A preliminary characterization of the plankton of San Jose Lagoon, Puerto Rico. University of Puerto Rico- Mayagüez Campus.

USACE (1994) QJM, San Juan, Puerto Rico. Detailed Project Report. Section 208. Study Clearing and Snagging.

US Geological Survey Topo Maps, TopoView, San Juan PR 1941. https://ngmdb.usgs.gov/topoview/viewer/#11/18.3884/-66.1133

Walsh, Christopher J, Roy, Allison, Feminella, Jack, Cottingham, Peter, Groffman, Peter, Morgan II, Raymond (2005) The urban stream syndrome: current knowledge and the search for a cure. American Benthological Society. 24. 706-723.

Woessner, William W. (2017) Hyporheic Zones. In Lamberti, G. A. & Hauer, F. R. (Eds.), Methods in stream Ecology (3rd Ed., pp129).

Características geomorfológicas de la costa del Estuario de la Bahía de San Juan

Barreto, M., Méndez, R., Rodríguez, E., Cabrera, N., Díaz, E., Pérez, K. 2019. State of the beaches in Puerto Rico after Hurricane Maria (2017). Shore and Beach, V. 87, N.1, p. 16-23.

Barreto, M., Méndez Tejeda, R., Cabrera, N., Bonano, V., Díaz, E., Pérez, K., & Castro, A. 2021. The state of coastal erosion in Puerto Rico after Hurricane María. Revista Geográfica de Chile Terra Australis, 1(1), 29–40. https://doi.org/10.23854/07199562.2021571

Barreto, M., Santos, A. 2022. Infraestructura Vial (Carreteras Estales) ubicada en zonas de erosión costera e inundación en PR. Proyecto Post Maria Beach Assessment. https://storymaps.arcgis.com/stories/61653d2d9a1748168488235d866f3e89Méndez,-\

Tejeda, R., Pérez, K. y Barreto, M. 2020. Impact of Extreme Weather Events on the Beaches of Puerto Rico. The Case of Ocean Park, San Juan. American Journal of Marine Science, v.8, n.1, 1-15.

Reviviendo nuestras costas: Estrategias para la conservación y restauración de la resiliencia en el Estuario de la Bahía de San Juan

Bernhardt, J. R., & Leslie, H. M. (2013). Resilience to climate change in coastal marine ecosystems. *Annual Review of Marine Science*, 5(1), 371-392.

González-Figueroa, M.C., & Hernández-Delgado, E.A. (2021). Variación espacial en los patrones de recuperación natural de los arrecifes de coral someros urbanos en Puerto Rico. *Perspectivas en Asuntos Ambientales* 9:90-111. https://uagm.edu/es/v9-perspectivas

Hernández-Delgado, E. A. (2015). The emerging threats of climate change on tropical coastal ecosystem services, public health, local economies and livelihood sustainability of small islands: Cumulative impacts and synergies. *Marine Pollution Bulletin*, 101(1), 5-28. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.09.018

Hernández-Delgado, E.A. (2023). Climate change impacts on Caribbean coastal ecosystems: Emergent ecological and environmental geography challenges. 36-50. In, Engel-Di Mauro, S., B. Bustos, D. Ojeda, F. Milanez, & G. García (eds.), *Handbook of Latin America and the Environment.* Routledge https://doi.org/10.4324/9780429344428-6

Hernández-Delgado, E. A. (2024). Coastal restoration challenges and strategies for small island developing states in the face of sea level rise and climate change. Coasts, 4(2), 235-286. https://doi.org/10.3390/coasts4020014

Lacambra, C., Friess, D., Spencer, T., & Moller, I. (2013). Bioshields; Mangrove ecosystems as resilient natural coastal defences. *The Role of Ecosystems in Disaster Risk Reduction*, F.G. Renaud, K. Sudmeier-Rieux, and M. Estrella (eds.), 82-109.

Masselink, G., & Lazarus, E. D. (2019). Defining coastal resilience. *Water*, 11(12), 2587.

Nguyen, N. T., Friess, D. A., Todd, P. A., Mazor, T., Lovelock, C. E., Lowe, R., ... & Huang, D. (2022). Maximising resilience to sea-level rise in urban coastal ecosystems through systematic conservation planning. *Landscape and Urban Planning*, 221, 104374.

Odériz, I., Gómez, I., Ventura, Y., Díaz, V., Escalante, A., Gómez, D. T., ... & Silva, R. (2020). Understanding drivers of connectivity and resilience under tropical cyclones in coastal ecosystems at Puerto Morelos, Mexico. *Journal of Coastal Research, 95*(SI), 128-132.

Patrick, C. J., Kominoski, J. S., McDowell, W. H., Branoff, B., Lagomasino, D., Leon, M., ... & Zou, X. (2022). A general pattern of trade-offs between ecosystem resistance and resilience to tropical cyclones. *Science Advances, 8*(9), eabl9155.

Rivera-Aponte, I.M., Hernández-Delgado, E.A., Bauzá-Ortega, J., & Ithier-Guzmán, W. (2021). Distribución espacial y preferencia de hábitat del pez león *Pterois volitans* en el Estuario Urbano de la Bahía de San Juan. Perspectivas en *Asuntos Ambientales* 9:67-89. https://uagm.edu/es/v9-perspectivas

Referencias

Tejiendo redes de esperanza desde la justicia del agua: reflexiones sobre la Red Comunitaria de Agua en el Estuario de la Bahía de San Juan

Avilés Santiago, C., Nieves Rodríguez, E. Torres Abreu, A, A., Rivera Ramos, J.C. y González Nieves, L. (2023). Contra la corriente: guía para la justicia hídrica en el Estuario de la Bahía de San Juan, Instituto Transdisciplinario de Investigación-Acción Social y Programa del Estuario de la Bahía de San Juan.

Bakker, K. (2012). Water: Political, biopolitical, material. *Social Studies of Science, 42*(4), 616-623. https://doi.org/10.1177/0306312712445773

García Santiago, O. (2020). Educación popular ambiental en contextos de crisis: Orientaciones pedagógicas para transitar las alternativas ecosociales. Revista de Pedagogía Crítica: Paulo Freire, (24), 38–55.

Jara, Oscar (2018). La sistematización de experiencias: práctica y teoría para otros mundos políticos – 1ed. Bogotá: Centro Internacional de Educación y Desarrollo Humano - CINDE, 258 pp Primera edición, Colombia.

Postigo, J. (Ed.). (2013). *Cambio climático, movimientos sociales y políticas públicas: Una vinculación necesaria*. CLACSO/ICAL. Santiago, Chile.

Linton, J., y Budds, J. (2013). The Hydrosocial Cycle: Defining and Mobilizing a Relational-Dialectical Approach to Water. *Geoforum*. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.geoforum.2013.10.008

Marchioni, M., Morán Ramírez, L., & Álamo Candelaria, J. (2008). Metodología de la intervención comunitaria: Los procesos comunitarios. En J. Buades Fuster & C. Giménez Romero (Coords.), *Hagamos de nuestro barrio un lugar habitable: Manual de intervención comunitaria en barrios* (pp. 58-72).

Martínez Alier, J. (2015). La ecología política y el movimiento global de justicia ambiental. *Ecología Política* 25, 55-61.

Roca-Servat, D., y Botero-Mesa, M. (2020). La justicia hídrica y el desarrollo: más allá de los discursos de la economía verde, los derechos humanos neoliberales y los bienes comunes rentables. Revista *NuestrAmérica 8*(16).

Torres-Abreu, A. y Mori González, R. 2019. Hacia la restauración colectiva del Estuario de la Bahía de San Juan: participación ciudadana, monitoreo comunitario y liderazgo socioambiental. Universidad de Puerto Rico en Humacao, Instituto Transdisciplinario de Investigación-Acción Social.

Torres-Abreu, A., Mori, R., Reyes, A., Rivera, J., Molina, R., y Molina, S. (2020). Ciencia ciudadana y activismo ambiental en el Estuario de la Bahía de San Juan, Puerto Rico. *WaterLat-Gobacit Network: Working Papers 7*(2), 9-29. https://drive.google.com/file/d/1rw7L1PnUX28I3OsN0H_PP6GniM5RhHRc/view



COLABORADORES

Colaboradores



Coral Avilés Santiago

Coral posee un bachillerato en Ciencias Ambientales de la Universidad de Puerto Rico, Recinto de Río Piedras y la Certificación de Guía Intérprete (CIG) de la National Association for Interpretation (NAI). Actualmente es educadora ambiental en el Estuario de la Bahía de San Juan, donde coordina iniciativas relacionadas con el monitoreo de aves en ecosistemas urbanos. Desde el 2020 forma parte de la Junta Directiva de la Sociedad Ornitológica Puertorriqueña (SOPI), donde colabora en iniciativas de conservación y educación de nuestras aves y sus hábitats. Además colabora con otras entidades sin fines de lucro ofreciendo recorridos de observación de aves y coordinando eventos de monitoreo de biodiversidad.



Dra. Maritza Barreto Orta

La Dra. Maritza Barreto Orta es oceanógrafa geológica, geóloga profesional, catedrática y Profesora distinguida de la Escuela Graduada de Planificación del Recinto de Río Piedras de la Universidad de Puerto Rico. es fundadora y directora del Instituto de Investigación y Planificación Costera de Puerto Rico (CoRePI), donde ha liderado investigaciones sobre erosión costera, cambio climático, geomorfología de playas y resiliencia costera en Puerto Rico y el Caribe. Su trayectoria académica y científica ha sido respaldada por proyectos auspiciados por agencias como NASA, FEMA, USGS, NOAA y NSF. La Dra. Barreto Orta fue miembro del Comitè de Expertos y Asesores de Cambio Climàtico del Gobierno de Puerto Rico, miembro de la American Shore and Beach Association, organizaciones latinoamericana de erosión costera, red pro playa. Entre sus reconocimientos se destaca el premio "Efraín Pérez Chanis" como Amiga de la Planificación 2016, otorgado por la Sociedad Puertorriqueña de Planificación, en reconocimiento a sus aportaciones a la planificación y protección ambiental de Puerto Rico.



Dr. Jorge Bauzá-Ortega

El Dr. Jorge Bauzá-Ortega se desempeña como director científico del Estuario de la Bahía de San Juan, donde lidera los progra-mas técnico-científicos de ca-lidad del agua, restauración y mejoramiento de ecosistemas costeros, entre otros. Posee un doctorado en Ciencias Marinas otorgados por la Universidad de Puerto Rico, Recinto de Mayagüez. Ha impartido cursos como profesor conferenciante y catedrático auxiliar en el Departamento de Ciencias del Marinas de la Universidad de Puerto Rico, Recinto de Mayagüez y el Recinto de Ciencias Médicas de la Universidad de Puerto Rico. Tiene más de 18 años de experiencia profesional en ciencias acuáticas y ecológicas, monitoreo de la calidad del agua y análisis de datos, restauración, mejoras y rehabilitación de ecosistemas costeros, así como en muestreo biótico y mediciones ecológicas. Sus trabajos le han valido importantes distinciones, entre ellas el USEPA Environmental Quality Award 2008, por su proyecto de restauración de mangles, y el U.S. Coral Reef Task Force Outstanding Public Awareness & Education Award, por su trabajo con corales submarinos y arrecifes artificiales. Además, su pasión por la academia y la ciencia lo han llevado a publicar varios artículos de su autoría en revistas, libros y columnas editoriales. Recientemente por sus contribuciones científicas ingreso a la sociedad de honor de investigación científica SIGMA Xi. Esta sociedad, fundada en el 1886 en la Universidad de Cornell, ostenta entre sus miembros a sobre 200 Laureados de premios Nobel. En el 2024 publica su segundo libro titulado *Explorando el Océano y su Litoral*.



Sofía Burgos Caraballo

Sofía es parte del equipo de trabajo de Estuario, donde se desempeña como Oficial de Proyecto mediante la subvención de la Ley de Infraestructura y Empleo de 2021. Cuenta con un Bachillerato en Biología Marina Costanera de la Universidad de Puerto Rico, Recinto de Humacao, y un Doctorado en Biología de la Universidad de Puerto Rico, Recinto de Río Piedras. Se destacó como bióloga III en la División de Monitoreo del Plan Integral de Recursos de Agua del Departamento de Recursos Naturales y Ambientales. Luego trabajó en la Florida International University, primero como *Senior Laboratory Technician* y luego como *Research Analyst*.



Daritzel Cintrón Nieves

Mi nombre es Daritzel Cintrón Nieves, soy coordinadora de proyecto del Estuario de la Bahía de San Juan. Con una maestría en Biología de la Universidad Interamericana de Puerto Rico y un bachillerato en Ciencias Marinas. Cuento con más de 2 años de experiencia en investigación marina, centrada en la diversidad genética de elasmobranquios y la conservación de especies marinas. He trabajado sobre 8 años en proyectos relacionados con el monitoreo de biodiversidad en áreas protegidas, la restauración de ecosistemas marinos degradados y la recuperación de especies en peligro. Actualmente, estoy interesada en estudiar la hierbas invasora (Halophila stipulacea) y la interacción con los organismos de la Laguna del Condado, buscando estrategias de su uso y posible manejo para la conservación marina.



Carlos R. García Cabassa

Carlos R. García Cabassa es trabajador social y director ejecutivo de la organización comunitaria Apoyo Empresarial para la Península de Cantera. Posee una Maestría en Educación con especialidad en Administración de Programas Recreativos y cuenta con una amplia trayectoria en desarrollo comunitario, gestión de programas sociales y procesos de organización de base. Ha trabajado en iniciativas de servicios sociales, vivienda, educación y desarrollo socioeconómico en las comunidades Península de Cantera y Caimito, con énfasis en el acompañamiento y apoyo a familias impactadas por procesos de realojo vinculados a las comunidades aledañas al Caño Martín Peña. Actualmente forma parte de la Red Comunitaria de Agua en el Estuario de la Bahía de San Juan, donde colabora en esfuerzos para promover la justicia hídrica, la resiliencia comunitaria y el acceso equitativo a los recursos ambientales en las comunidades que conforman el sistema estuarino.



Edgardo González

Edgardo ha mantenido una práctica de consultoría forestal por los pasados 14 años y realizaproyectos técnicos con ONG, especialmente en aspectos de iniciativas de conservación en áreas forestales y a nivel de paisaje. Tiene un Bachillerato en Ciencias, con especialización en Biología, de la Universidad de Puerto Rico, y una Maestría en Dasonomía de la Escuela de Dasonomía y Estudios Ambientales de la Universidad de Yale. Trabajó durante más de 20 años en el Departamento de Recursos Naturales y Ambientales de Puerto Rico y dirigió la Oficina Forestal de Puerto Rico del 2003 al 2009. En 2009, comenzó a trabajar con el Centro para la Conservación del Paisaje (CCP), una organización enfocada en aspectos profesionales de iniciativas de conservación a nivel de paisaje. Actualmente es director ejecutivo del CCP.

Colaboradores



Edwin A. Hernández Delgado, Ph.D.

Edwin A. Hernández-Delgado has a B.Sc. in Marine Biology, M.Sc. in Biology (Environmental Microbiology of Tropical Waters), Ph.D. in Tropical Biology (Coral Reef Ecology), and a Post-Doc in Ecology and Molecular Microbiology of Coral Diseases. Contracted Assistant Professor (2001-2003), Lecturer and Affiliate Researcher (2005-2011) at the Dept. Biology of the University of Puerto Rico, Río Piedras Campus (UPRRP). Contracted Professor at the Faculty of Natural Sciences' Interdisciplinary Studies Program and at the Dept. of Environmental Sciences (2016-Present) at UPRRP. Research Fellow, Center for Applied Tropical Ecology and Conservation (CATEC) at UPRRP (2007-2025 – until CATEC closing). Senior Scientist at NGO Sociedad Ambiente Marino (SAM) since 2002, coordinating many of its marine conservation projects, applied research activities, coral propagation and coral reef rehabilitation program. Certified Ecological Restoration Practitioner #0670 (Society for Ecological Restoration). Research interests: 1) Local anthropogenic and climate change impacts on coral reef, seagrass, reef fish and littoral communities; 2) Conservation of endangered coral species; 3) Coral demographic dynamics; 4) Disturbed coral reef recovery dynamics; 5) Coral propagation and reef ecological restoration; 6) Invasive and nuisance species impacts in coral reef and seagrass dynamics; 7) Connectivity between terrestrial and marine ecosystems and integration of remote sensing tools into understanding impacts of changes in coastal water quality; 8) Fish community dynamics and marine reserves design and effectiveness; 9) Climate modeling and the future of coral reefs; and 10) Caribbean paleo-climate. Highly accomplished and results-driven Marine Ecologist, Environmental Scientist, and Certified Ecological Restoration Practitioner with over 39 years of successful academic research, coral reef conservation and marine ecosystem rehabilitation leadership. Leverages finely-honed interpersonal and time management skills to successfully manage academic research activities, community-based entrepreneurship, and small environmental consulting business development. Energetic and goal-oriented, with a genuine passion for applying science to seek solutions to environmental problems. Achieves research and costumer goals and objectives. Successful grants writer. Astute communicator and presenter.

B.Sc. en Biología Marina, M.Sc. en Biología (Microbiología Ambiental de Aguas Tropicales), Ph.D. en Biología Tropical (Ecología de Arrecifes de Coral), Postdoctorado en Ecología y Microbiología Molecular de Enfermedades de los Corales. Profesor Contratado (2001-2003) y Conferencista e Investigador Afiliado (2005-2011) en el Departamento de Biología de la Universidad de Puerto Rico, Recinto de Río Piedras (UPRRP). Profesor contratado en el Programa de Estudios Interdisciplinarios de la Facultad de Ciencias Naturales y en el Departamento de Ciencias Ambientales (2016-Presente) de la UPRRP. Investigador, Centro de Ecología Tropical Aplicada y Conservación (CATEC) de la UPRRP (2007-2025, fecha de cierre de CATEC). Científico Senior de la ONG Sociedad Ambiente Marino (SAM) desde 2002 hasta el presente, coordinando muchos de sus proyectos de conservación marina, actividades de investigación aplicada, propagación de corales y programas de rehabilitación de arrecifes de coral. Ecólogo Certificado en Restauración #0670 (Sociedad para la Restauración Ecológica). Sus líneas de investigación: 1) Impactos humanos y del calor extremo en las comunidades de arrecifes de coral, pastos marinos, litorales y peces de arrecife; 2) Conservación de especies de corales en peligro de extinción; 3) Dinámica demográfica de los corales; 4) Dinámica de recuperación de arrecifes de coral perturbados; 5) Propagación de corales y restauración ecológica de arrecifes; 6) Impactos de las especies invasoras y molestosas en la dinámica de los arrecifes de coral y los pastos marinos; 7) Conectividad entre ecosistemas terrestres y marinos e integración de percepción remota satelital para comprender el impacto de los cambios en la calidad del agua en la costa; 8) Dinámica de las comunidades de peces y diseño y efectividad de las reservas marinas; 9) Modelos climáticos y el futuro de los arrecifes de coral; y 10) Paleoclima caribeño.



María Gabriela Huertas

María Gabriela se dedica a impulsar proyectos que integren la planificación urbana, las ciencias ambientales, la educación, y la participación comunitaria. Actualmente lidera la restauración de los islotes Guachinanga y Guachinanguita en la Laguna San José, proyecto impulsado por la Compañía para el Desarrollo Integral de la Península de Cantera, y apoya en la gerencia de Sagrado Bosque Urbano, proyecto impulsado por la Universidad del Sagrado Corazón. Durante 5 años y medio, fue parte del equipo del Estuario de la Bahía de San Juan, donde se destacó como Senior Program Manager y gerente de la revisión del Plan del Estuario y el Plan Multijurisdiccional de Mitigación de Riesgos del Área Metropolitana de San Juan. Cuenta con un bachillerato en estudios urbanos y regionales de Cornell University.



Marisol Jiménez

Marisol Jiménez, presidenta del comité de acción ciudadana del Estuario, miembro del grupo Amigos de la Laguna de Condado, abogada de profesión y residente de San Juan.



Paul Lanctin

Paul Lanctin es un consultor especializado en desarrollo sostenible y manejo integrado de residuos. Completó dos maestrías en Francia: una en Gestión e Ingeniería Ambiental y otra en Derecho Ambiental.

Durante su trayectoria profesional en Francia, participó en diversos proyectos de alcance nacional relacionados con la economía circular, tanto en el sector público como en el privado. En Puerto Rico, obtuvo la certificación en Industria del Reciclaje del Skill-Up Puerto Rico Workforce Training Program.

Actualmente, se desempeña como Coordinador de Proyectos en el equipo de Desechos Acuáticos de Estuario. En esta función, está a cargo de la implementación de estrategias, el desarrollo de herramientas y la coordinación y facilitación de actividades para la Red Intermunicipal de Manejo Integrado de Recursos y Residuos. Además, coordina iniciativas de reciclaje de aceite usado. Su trabajo se enfoca en fortalecer la colaboración y fomentar la sinergia entre los esfuerzos intersectoriales para promover un manejo integrado y sostenible de los residuos sólidos en la región metropolitana.



Stacy A. Larancuent Ramos

Stacy A. Larancuent Ramos es abogada licenciada con una sólida formación en Administración Pública y Derecho Ambiental. Completó su Juris Doctor y su Maestría en Administración Pública en la Universidad de Puerto Rico, Recinto de Río Piedras, donde también obtuvo su Bachillerato en Ciencias Políticas, con énfasis en Gobierno, Derecho y Política Pública.

Participó en la Clínica de Asistencia Legal en Derecho Ambiental, donde adquirió experiencia en investigación legal y en la aplicación de habilidades analíticas a temas técnicos y sobre política pública ambiental.

Actualmente, se desempeña como Asesora en Política Pública en Estuario, donde realiza análisis exhaustivos de datos y desarrolla estrategias para abordar problemas ambientales, elabora materiales educativos e informativos sobre la gestión de residuos, y lleva a cabo investigaciones para formular propuestas sobre la gestión integrada de recursos

Colaboradores

y residuos. Desde ese rol también facilita capacitación en políticas públicas ambientales a municipios, ONG, comunidades y otros sectores, así como colabora con diversos actores para implementar y promover políticas efectivas para el manejo adecuado de residuos sólidos en Puerto Rico.



Imar Mansilla Rivera

Imar Mansilla Rivera posee un Bachillerato en Ciencias en Química de la Universidad de Puerto Rico – Recinto de Río Piedras y un doctorado (PhD) en Ciencias de Salud Ambiental de la Universidad de Michigan en Ann Arbor. Actualmente se desempeña como Catedrática del Departamento de Salud Ambiental de la Escuela Graduada de Salud Pública, Recinto de Ciencias Médicas, Univesidad de Puerto Rico. Sus intereses de investigación se centran en la caracterización química de muestras ambientales, la evaluación de la exposición a contaminantes ambientales y la epidemiología del cáncer de mama.



Gustavo A. Martínez, Ph.D.

Investigador en la Universidad de Puerto Rico, Recinto de Mayagüez, por más de 30 años. Doctor en Química de Suelos por la Universidad Estatal de Ohio; Maestría por la Universidad de Cornell y Licenciatura por la UPR-RUM. Mi programa de investigación se centra en abordar el impacto del exceso de nutrientes en la integridad ecológica de las aguas superficiales (arroyos y embalses). Gran parte de mi trabajo se ha dedicado al desarrollo del marco técnico para establecer directrices regulatorias locales. Como Investigador Principal, he liderado iniciativas para: 1) Establecer criterios numéricos de nutrientes para ríos y arroyos de Puerto Rico, 2) Establecer criterios numéricos de nutrientes para embalses de Puerto Rico y 3) Desarrollar un protocolo de evaluación para la implementación de los criterios de vida acuática (es decir, oxígeno disuelto) en embalses de Puerto Rico. En trabajos relacionados, también he liderado iniciativas para desarrollar niveles ambientales de fósforo en suelos de Puerto Rico y para establecer el Índice de Fósforo del Caribe, una herramienta semicuantitativa para ayudar a los operadores de granjas de animales a establecer un programa sólido de gestión de residuos. En uno de mis proyectos más recientes, nuestro grupo desarrolló e implementó una estrategia sistemática estratificada para identificar y corregir descargas sanitarias críticas en una cuenca hidrográfica altamente urbanizada (el área metropolitana de San Juan) de Puerto Rico. Los resultados de este trabajo han sido muy alentadores. Más de 30 publicaciones en revistas revisadas por pares.



Michael Martínez Colón

Michael Martínez Colón es Catedrático Asociado de oceanografía geológica y contaminación marina en el Departamento de Ciencias Ambientales en Florida A&M University (FAMU) en Tallahassee, FL. Él es co-director en el area de "Coastal Intelligence" del Centro de Ecosistemas Costeros y Marinos (CCME-II) que es auspiciado por NOAA con cede en FAMU. A su vez, él es miembro del grupo de asesoría de investigación de las reservas estuarinas de Jobos (Jobos Bay National Estuarine Research Reserve, Puerto Rico) y Apalachicola (Apalachicola Bay National Estuarine Research Reserve, Florida). Por último, él forma parte de la directiva del "Foraminiferal Biomonitoring (FOBIMO)" que es un grupo Europeo de trabajo relacionado al mejoramiento de prácticas de investigación en ambientes costeros.

Por los últimos 18 años, el Dr. Martínez Colón ha estado trabajando con diferentes aspectos ambientales en los sistemas estuarinos de Puerto Rico. Como educador e investigador, él ha involucrado a

estudiantes subgraduados, graduados, y post doctorales en investigaciones relacionadas a: micropaleontología ambiental, contaminación por metales pesados, microbiomas (ADN ambiental), ecología costera, tranporte de contaminantes relacionados al cangrejo violinista, y pesticidas entre otros.



Kelitsha Enideth Mulero Cruz

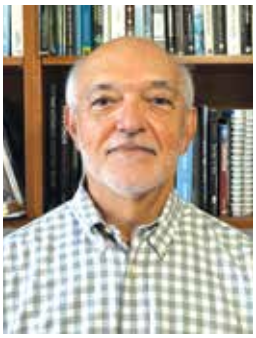
Kelitsha Enideth Mulero Cruz es graduada de bachillerato en Ciencias Ambientales de la Universidad de Puerto Rico, Recinto de Río Piedras. Ha participado activamente en proyectos de investigación, labores de laboratorio y programas de internado, los cuales han enriquecido su experiencia y comprensión del campo. Como apasionada defensora de la conciencia ambiental, Kelitsha se dedica a hacer accesibles ideas científicas complejas, inspirando así a una audiencia amplia y diversa.

Su compromiso va más allá de la investigación; su objetivo es avanzar el conocimiento sobre las relaciones entre las ciencias ambientales y sus impactos en las comunidades más vulnerables, promoviendo un cambio positivo y sostenible.



Eliezer Nieves Rodríguez

Eliezer Nieves Rodríguez es educador ambiental, geógrafo y profesor de la Universidad de Puerto Rico, donde ha impartido cursos relacionados con geografía, conservación ambiental, biogeografía y ecoturismo. Actualmente se desempeña como especialista en educación y participación pública en el Estuario de la Bahía de San Juan, coordinando iniciativas educativas y proyectos de ciencia ciudadana enfocados en aves, biodiversidad y ecosistemas urbanos y estuarinos. Su trabajo integra estudiantes, voluntarios y comunidades en experiencias participativas de observación y monitoreo ambiental. Además, es instructor certificado por la National Association for Interpretation, donde promueve la interpretación del patrimonio natural y cultural como herramienta para la educación y la conservación.



Luis R. Pérez Alegría, Ph.D., P.E.

Luis R. Pérez Alegría, Ph.D., P.E. is a retired professor from the University of Puerto Rico at Mayagüez (UPR-M), where he dedicated over three decades to teaching and research in soil and water conservation engineering and Geographic Information Systems (GIS). Throughout his tenure, Dr. Pérez Alegría mentored both undergraduate and graduate students while collaborating with interdisciplinary teams to study the environmental impacts of land use changes and agricultural practices. His extensive fieldwork and advanced water modeling across Puerto Rico provided critical insights into soil erosion and sedimentation, resulting in practical management recommendations to safeguard the island's natural resources.



Lourdes Pérez Medina

La planificadora Lourdes Pérez Medina es la Gerente de Infraestructura Resiliente del Estuario de la Bahía de San Juan. Está encargada de liderar los proyectos de infraestructura verde del Estuario como lo son el Proyecto de Restauración de la Quebrada Juan Méndez y el proyecto de Mitigación de Erosión Costera de la Laguna del Condado. Lourdes posee un bachillerato profesional en Arquitectura de la Universidad Politécnica de Puerto Rico y una maestría en Planificación Regional y de Ciudad de Pratt Institute en Brooklyn. Previo a unirse al equipo del Estuario, Lourdes desempeñó diver-

Colaboradores

sos roles relacionados a la gestión de programas y proyectos orientados a la planificación participativa enfocados en la adaptación climática y la justicia ambiental desde Puerto Rico y Nueva York.



Cristina Ramírez

Cuenta con un Bachillerato en Geografía de la Universidad de Puerto Rico y una Maestría en Gestión y Tratamiento de Residuos de la Universidad Autónoma de Madrid. Recientemente, culminó el Experto Universitario en Economía Circular en Territorios Aislados de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. En su trayectoria laboral brindó servicios profesionales a Estuario como coordinadora de los esfuerzos para los programas nacionales: Basura Marina de la NOAA y Aguas Libres de Basura de la EPA. Posteriormente, laboró en la Oficina de Cumplimiento y Planificación Ambiental del Municipio Autónomo de San Juan. En 2016, participó en el Primer Taller de Evaluación de Microplásticos en Recursos Pesqueros de la Comisión Permanente del Pacífico Sur, coordinado por la Universidad Católica de Chile. Es miembro de la Asociación de Residuos Sólidos de Norte América (SWANA) y secretaria de SWANA, Capítulo Caribe-Puerto Rico.

En 2018, se integró nuevamente al equipo de Estuario como Coordinadora de Alianzas y Alcance Comunitario. Posteriormente, fungió como Coordinadora de Proyectos de Desechos Acuáticos de la entidad. Fue invitada a presentar sus esfuerzos en manejo de residuos acuáticos y su amenaza en la cuenca del Estuario de la Bahía de San Juan durante el Foro Internacional sobre Basura Marina y Economía Circular, Marlice 2019, dirigido por la Asociación Española de Basuras Marinas. Actualmente, ejerce como Gerente de Desechos Acuáticos de Estuario, liderando los esfuerzos de reducción y desvío de materiales, así como las iniciativas de manejo integrado de recursos y residuos de la cuenca, incluyendo el módulo de caracterización y reducción de microplásticos.



Rebeca I. Rivera Riera

Rebeca I. Rivera Riera es la coordinadora del programa de monitoreo de calidad de agua del Estuario, con tres años de experiencia colaborando con la organización. Realiza monitoreos semanales y mensuales para recopilar datos sobre la calidad del agua, incluyendo parámetros bacteriológicos y físico-químicos. Además, capacita a ciudadanos científicos en la toma de muestras, análisis de laboratorio y recopilación de datos mediante instrumentos especializados. Se graduó de Ciencias Ambientales con un minor en Portugués de la UPR Río Piedras y ha trabajado en diversos proyectos enfocados en el monitoreo, protección y restauración ambiental junto a organizaciones como la Sociedad Ambiente Marino y Protectores de Cuencas. Le apasiona disfrutar de la naturaleza y educar a otros sobre la importancia de conservar y valorar nuestros recursos naturales.



Carlos J. Rodríguez Sierra

Carlos J. Rodríguez Sierra posee un Bachillerato en Ciencias en Biología de la Universidad del Estado de la Florida, en Tallahassee, una Maestría en Ciencias (MS) Ambientales de la Universidad de Indiana, en Bloomington, y un Doctorado (PhD) en Toxicología Ambiental de la Universidad de Wisconsin, en Madison. Actualmente, funge como Catedrático en el Departamento de Salud Ambiental de la Escuela Graduada de Salud Pública del Recinto de Ciencias Médicas de la Universidad de Puerto Rico. Sus áreas de interés en investigación giran en torno al transporte y paradero de contaminantes ambientales, su caracterización química y toxicológica, la evaluación de la exposición a los mismos y el riesgo a la salud.



Sahid Rosado Lausell

Sahid Rosado Lausell actualmente funje como la Gerente de Educación y Ciencia Ciudadana en el Estuario, donde maneja el programa de Certificación de Ciudadanos Científicos y lidera los esfuerzos para concientizar y educar a la ciudadanía sobre la importancia de apreciar, proteger y conservar la calidad de agua y sus ecosistemas. Previo a esto, del 2018-2024, Rosado Lausell se destacó como *Director of Outreach, Recruitment, and Diversity Initiatives* dentro de la Facultad de Ingeniería en Oregon State University, donde desarrolló numerosas iniciativas y programas para atraer y retener estudiantes de comunidades desventajadas al campo de la ingeniería. En su rol, desarrolló charlas educativas y ofrecía consultoría sobre los temas de justicia social en la ingeniería y la importancia de consolidar ambos temas durante el proceso de diseño de ingeniería – desde la identificación del problema hasta la etapa de diseño y evaluación. En este tiempo, fue miembro de comités de suma importancia para la universidad, tales como el Black Student Access & Success Initiative y el Engineering Master Plan Steering Committee. También recibió múltiples reconocimientos, incluyendo el Inclusive *Excellence Award, Advisor of the Year Award y Sobresaliente Faculty/Staff Award*.

Del 2015-2018, Sahid trabajó como la *Assistant Director of Outreach en la Facultad de Ingeniería* en University of Illinois at Urbana-Champaign. Durante este tiempo, trabajó con la facultad de ingeniería y con organizaciones comunitarias para crear currículos, actividades y programas para estudiantes de K-12 y así concientizar sobre la ingeniería y su rol crucial en la sociedad. También lideró a un equipo de más de 50 personas para ofrecer campamentos de verano de ingeniería que impactaban a más de 300 estudiantes cada verano.

Sahid cuenta con un bachillerato de Ingeniería Civil de la Universidad de Puerto Rico – Mayagüez, y con dos maestrías – una en Ingeniería Ambiental y una segunda en Currículo e Instrucción – ambas de University of Illinois at Urbana-Champaign.



Estrella Santiago

Estrella es la Gerente de Asuntos Ambientales de la Corporación del Proyecto ENLACE del Caño Martín Peña (ENLACE). Está a cargo de asegurar el cumplimiento por parte de ENLACE de las políticas rectoras y la implementación del programa de mejoras en asuntos ambientales incluido en el Plan de Desarrollo Integral y Usos del Terreno del Distrito de Planificación Especial Caño Martín Peña. Estrella tiene un bachillerato en Biología de la Universidad de Puerto Rico, Recinto de Río Piedras, y un Juris Doctor de la Facultad de Derecho de la Universidad de Puerto Rico. Antes de trabajar con ENLACE, Estrella trabajó como consultora ambiental y cabildera ambiental comunitaria.



Carlos José Santos Flores

Carlos José Santos Flores es un junqueño nacido en Humacao. Es profesor e investigador en el Departamento de Biología de la Universidad de Puerto Rico-Recinto de Mayagüez (UPRM) desde 2001. Su investigación se centra particularmente en la taxonomía, diversidad y distribución de la fauna y microflora de agua dulce de Puerto Rico. Posee una Maestría en Biología de la UPRM, y su proyecto de investigación de maestría fue una monografía sobre los hifomicetos acuáticos (hongos) de Puerto Rico y otras localidades neotropicales. Tiene un Doctorado en Limnología de la Universidad de Wisconsin-Madison. Su disertación trató sobre la taxonomía y biogeografía de las algas de agua dulce y los microcrustáceos en las Antillas, pero también incluyó tres contribuciones a los cladóceros (Crustácea: Eubranchiopoda) de América del Norte. Se desempeñó como director de la Colección de Invertebrados de la UPRM entre 2010 y 2014. Actualmente es colaborador de esta y otras colecciones. Ha recolectado extensamente en Estados Unidos, República Dominicana, Colombia, Canadá y Puerto

Colaboradores

Rico, con publicaciones sobre virus transmitidos por mosquitos, calidad del agua y fitoplancton en lagos, biodiversidad de algas de arroyos, zooplancton en humedales, microcrustáceos en bosques nubosos, nuevas especies de crustáceos y arácnidos (escorpiones), ecología de ranas, hongos acuáticos y terrestres y mixomicetos, entre otros temas.



Noemí Soto Nieves, Ph.D.

Noemí Soto Nieves es Catedrática Auxiliar en la Universidad del Sagrado Corazón en Puerto Rico. Obtuvo un Bachillerato en Biotecnología Industrial de la Universidad de Puerto Rico, Recinto Universitario de Mayagüez, y un doctorado en Ciencias Biomédicas, con especialización en Inmunología, Biología Molecular y Genética, de Albert Einstein College of Medicine, en Nueva York.

Aunque trabajó brevemente en el sector privado, la mayor parte de su trayectoria profesional se ha dedicado a la enseñanza de cursos de Biología en instituciones académicas de Puerto Rico y a la investigación científica en áreas como el tratamiento del cáncer y la calidad del agua.

Desde finales de 2020, lidera un proyecto enfocado en el estudio de contaminantes microbiológicos en el Estuario de la Bahía de San Juan, en colaboración con la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos y los laboratorios de investigación ambiental del Departamento de Recursos Naturales y Ambientales de Puerto Rico. Esta investigación busca generar datos científicos que respalden el dragado del Caño Martín Peña, el cual ha permanecido contaminado con coliformes fecales desde hace más de 40 años. Estudios previos han evidenciado que las comunidades aledañas presentan tasas de enfermedad más altas que las de la población general.

Recientemente, su grupo de investigación publicó un estudio en la revista *Journal of Tropical Ecology* sobre los procesos biogeoquímicos y ecológicos del Estuario de la Bahía de San Juan, aportando información relevante sobre la dinámica ambiental de estos ecosistemas urbanos.

Su meta a largo plazo es caracterizar el microbioma del agua y establecer posibles correlaciones entre la presencia de patógenos microbianos y la incidencia de enfermedades en las comunidades cercanas al estuario.



Alejandro Torres-Abreu

Alejandro Torres-Abreu es sociólogo ambiental e investigador del Instituto Transdisciplinario de Investigación-Acción Social (ITIAS) de la Universidad de Puerto Rico (UPR) en Humacao. Obtuvo un Doctorado en Sociología Ambiental de la Universidad de Lancaster (Inglaterra), una Maestría en Ecología Humana de la Universidad Libre de Bruselas (Bélgica) y un Bachillerato en Estudios Interdisciplinarios de la Universidad de Puerto Rico, Recinto de Río Piedras. Su trabajo académico se centra en las relaciones entre ambiente y sociedad, con énfasis en la ecología política del agua, la justicia ambiental y la gobernanza participativa de los bienes comunes. A través de proyectos de investigación-acción, articula el conocimiento académico con los saberes locales y la acción comunitaria en Puerto Rico. Entre sus publicaciones recientes destacan trabajos sobre justicia hídrica, ciencia ciudadana y gestión comunitaria ambiental. También es coeditor del libro *Ambiente y democracia: Experiencias de gestión comunitaria ambiental en Puerto Rico* (Editorial UPR, 2018). Entre agosto de 2016 y diciembre de 2023 fue coordinador del ITIAS. Actualmente, preside la Junta de Protección de los Seres Humanos en la Investigación de la UPR en Humacao y es cofundador de la Escuela de Etnografía, Comunidad y Ambiente y de la Red Comunitaria de Agua del Estuario de la Bahía de San Juan.



Brenda Torres Barreto

Brenda Torres Barreto es la directora ejecutiva del Estuario de la Bahía de San Juan (Estuario), único componente del Programa Nacional de Estuarios (NEP, por sus siglas en inglés) ubicado fuera de los Estados Unidos continentales. Cuenta con más de dos décadas de experiencia en gobernanza ambiental, restauración de cuencas hidrográficas y resiliencia, impulsando soluciones colaborativas donde convergen la ciencia, la política pública y la acción comunitaria.

Ha ocupado roles de asesoría para gobernadores tanto en Puerto Rico como en el estado de Nueva York, aportando experiencia en política ambiental, manejo de recursos naturales y estrategias de desarrollo sostenible. Su trabajo en estas posiciones se enfocó en promover iniciativas multisectoriales que integran la restauración ecológica con la resiliencia social y económica, proveyendo recomendaciones basadas en la ciencia a los más altos niveles de toma de decisiones.

En Estuario, Brenda ha liderado iniciativas emblemáticas como la restauración ecológica de la quebrada Juan Méndez, el desarrollo del primer Plan Multijurisdiccional de Manejo de Riesgos para la región metropolitana de San Juan, el desarrollo de un estudio de valoración económica de los servicios ecosistémicos del sistema del Estuario de la Bahía de San Juan, y la expansión de programas de resiliencia costera y de monitoreo de calidad del agua mediante iniciativas de ciencia ciudadana. Ha asegurado y administrado inversiones federales y filantrópicas de varios millones de dólares, al tiempo que fortalece alianzas con agencias como la Agencia de Protección Ambiental y el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos, la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados y el Departamento de Recursos Naturales y Ambientales, además de municipios, universidades y el sector privado.

Actualmente, cursa estudios conducentes al Doctorado en Ciencias Ambientales en la Universidad de Puerto Rico. Su investigación examina la resiliencia en la gobernanza del agua para territorios insulares tropicales, aplicando marcos conceptuales como la teoría de panarquía y el *Water Resilience Assessment Framework*. Obtuvo su Maestría en la Yale School of the Environment, con especialización en Política y Gobernanza Ambiental.



Benjamin Shirey

Mi nombre es Benjamin Shirey y mi transfondo académico es en taxonomía, evolución y ecología de invertebrados marinos. Poséo un bachillerato en Ciencias Marinas del Eckerd College en St. Petersburg, FL y una Maestría en Ciencias Ambientales del Florida A&M University (FAMU) en Tallahassee, FL. En estos momentos estoy estudiando la taxonomía y ecología del calamar gigante como parte de mi trabajo doctoral en Auckland University of Technology en Aukland, Nueva Zelandia.

A través de mi carrera, mi pasión siempre ha estado relacioando a ambientes marinos. Todo comenzó con el estudio del cangrejo de "herradura" y con los foraminíferos bentónicos. También yo tengo un gran interés en entender como organismos marinos interactuan con los seres humanos en diferente ambientes. Aparte de la ciencias, a mi me encanta pasar mi tiempo en la naturaleza ya sea en el tope de una montana o buceando en el fondo del océano.



https://estuario.org