

UNIVERSIDAD INTERAMERICANA DE PUERTO RICO
RECINTO DE SAN GERMÁN
DEPARTAMENTO CIENCIAS Y TECNOLOGÍA
PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS EN
CIENCIAS AMBIENTALES

**RELACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA, PATRONES DE LLUVIA Y SALINIDAD
CON LA MORTANDAD DE MANGLE EN LA
RESERVA NATURAL PANTANO ESPINAR Y CAÑO MADRE VIEJA
AGUADA-AGUADILLA, PUERTO RICO**

ISBETH C. LÓPEZ PÉREZ

2024

Tesis presentada y aprobada para completar los requisitos para el grado de Maestría en Ciencias en Ciencias Ambientales especialización en Química Ambiental.

**RELACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA, PATRONES DE LLUVIA Y SALINIDAD
CON LA MORTANDAD DE MANGLE EN LA
RESERVA NATURAL PANTANO ESPINAR Y CAÑO MADRE VIEJA
AGUADA-AGUADILLA, PUERTO RICO**

Isbeth C. López Pérez

Miembros del Comité Graduado:



Angela M. González, Ph.D.
Directora de Tesis

6 feb. 2024
Fecha



Ana J. Navarro Rodríguez, Ph.D.
Miembro del comité de Tesis

6 feb 2024
Fecha



Miguel Ángel Rodríguez Montalvo M.S.
Miembro del comité de Tesis

6 febrero 2024
Fecha



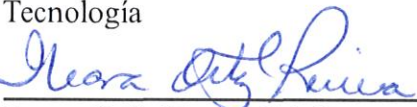
Carlos Irizarry Guzmán D.B.A
Director Escuela de Estudios Graduados e Investigación

6 de febrero de 2024
Fecha



Lina Llanos Vargas Ed. D.
Directora de Departamento Ciencias y Tecnología

7 de febrero 2024
Fecha



Ileana Ortiz Rivera, Ed. D.
Decana Interina de Asuntos Académicos

7 de febrero de 2024
Fecha

DEDICATORIA

Dedico este trabajo principalmente a Dios, por su amor y su bondad, las cuales no tienen fin. Este trabajo de tesis ha sido de gran bendición y agradezco a Dios el poder cumplir esta meta. “Y Jehová va delante de ti; el estará contigo, no te dejará, ni te desampará; no temas ni te intimides.” - Deuteronomio 31.8.

Quiero agradecer a mis padres Mildred e Ismael por haberme forjado como la persona que soy, muchos de mis logros se los debo a ellos, en especial este. Gracias por motivarme constantemente para alcanzar mis anhelos y objetivos que significan alegría y orgullo para mí y también para ellos.

A mi Pastor el Rev. Nelson Gutiérrez por ser un líder ejemplar e inspirador, que Dios le bendiga y derrame sabiduría para que sea siempre un instrumento en las manos de Él.

AGRADECIMIENTOS

- A mi mejor amigo, Abimael Milian, gracias por la ayuda y las horas de trabajo en conjunto para poder realizar esta investigación. Logramos cumplir una de nuestras metas, no puedo dejar de agradecerte por tu apoyo, constancia y por compartir muchas horas de estudio e investigación.
- Agradezco a Lemuel López por estar a mi lado siempre y por su ayuda infinita en este trabajo.
- Agradezco a mi comité de tesis, la Dra. Angela González Mederos, la Dra. Ana J. Navarro Rodríguez y el Dr. Angel M. Ríos González por su ayuda en este proyecto, sin ustedes este trabajo no estaría completo.
- Agradezco al Prof. Miguel Angel Rodríguez Montalvo por su colaboración en el análisis y aprendizaje del programa de teledetección QGIS.
- Agradezco al programa ESEM, gracias por los talleres para poder continuar con este trabajo.
- Agradezco al Programa Sea Grant de la Universidad de Puerto Rico (UPR-Sea Grant), gracias por los materiales para poder continuar con este trabajo.
- Agradezco el financiamiento del programa *Bulding Research, Education and Leadership for Agriculture and Related Careers* (bREAL ARC) del USDA-NIFA bajo la subvención: Award No. 2022-22040-376.
- Agradezco a la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados (AAA, por sus siglas en español), por la colaboración con los equipos para el análisis de calidad de agua, en especial a Jessiemarie Rodríguez por ser una gran facilitadora en este proceso.

Tabla de Contenido

ABSTRACT	vi
RESUMEN	vii
ACRÓNIMOS	viii
ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
INTRODUCCIÓN	x
JUSTIFICACIÓN	15
OBJETIVOS	16
REVISIÓN DE LITERATURA	17
MATERIALES Y METODOS	30
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	38
CONCLUSIÓN.....	64
RECOMENDACIONES.....	66
REFERENCIAS.....	67

ABSTRACT

Water quality, rainfall patterns and salinity were documented in three areas of the Pantano Espinar and Caño Madre Vieja Natural Reserve (RNPECMV) of Aguada – Aguadilla, Puerto Rico, where a decline in mangrove populations was observed after the passage of the Hurricane María and was compared to areas of the reserve where mangrove populations remained healthy. The temperature, salinity and pH of the selected areas complied 100% with the water quality standards for healthy estuaries, as referenced by the Department of Natural and Environmental Resources of Puerto Rico (DRNA). On the contrary, dissolved oxygen and turbidity did not meet the standard established by the DRNA in 100% of the samples. No changes were observed in the parameters studied during rain events and in salinity changes. Total coliforms and pathogenic coliforms met the standard established for estuarine waters. Significant differences were observed in the parameters of dissolved oxygen, turbidity, and salinity for the three selected areas (stations). Satellite images of the reserve area were evaluated from the period from 2016 to 2023. The temperature, pH and salinity of all the stations studied were within the optimal growth margins for mangroves, so no problems were evident with the Water quality as a cause of mangrove mortality in the area. The massive mangrove loss may have been due to the cycles of system development following the passage of a strong atmospheric event.

RESUMEN

Se documentó la calidad del agua, los patrones de lluvia y salinidad en tres áreas de la Reserva Natural Pantano Espinar y Caño Madre Vieja (RNPECMV) de Aguada – Aguadilla, Puerto Rico, donde se observó decaimiento de las poblaciones de mangle luego del paso del Huracán María y se compararon con áreas de la reserva donde las poblaciones de mangle se mantuvieron saludables. La temperatura, la salinidad y el pH de las áreas seleccionadas cumplieron en un 100% con los estándares de calidad de aguas para estuarios saludables, según referenciados por el Departamento de Recursos Naturales y Ambientales de Puerto Rico (DRNA, por sus siglas en español). Por el contrario, el oxígeno disuelto y la turbidez no cumplieron con los estándares establecidos por el DRNA en el 100% de las muestras. No se observaron cambios en los parámetros estudiados durante eventos de lluvia y en los cambios de salinidad. Los coliformes totales y coliformes patogénicos cumplieron con el estándar establecido para aguas estuarinas. Se observaron diferencias significativas en los parámetros de oxígeno disuelto, turbidez y salinidad para las tres áreas o estaciones seleccionadas. Se evaluaron imágenes satelitales del área de la reserva del periodo del 2016 al 2023. La temperatura, el pH y la salinidad de todas las estaciones estudiadas se encontraban dentro de los márgenes de crecimiento óptimo para los mangles por lo que no se evidenciaron problemas con la calidad del agua como causante de la mortandad de mangle en la zona. La pérdida de mangle masiva pudo haber ocurrido por los ciclos del desarrollo del sistema luego del paso de un evento atmosférico fuerte.

ACRÓNIMOS

RNPECMV - Reserva Natural Pantano Espinar y Caño Madre Vieja

DRNA - Departamento de Recursos Naturales y Ambientales de Puerto Rico

OD - Oxígeno Disuelto

E. coli - *Escherichia coli*

CO₂ - Dióxido de Carbono

hPa - Hecto Pascales o Milibares

kph - Kilómetros por Hora

mm - Milímetros

NTU - Nephelometric Turbidity unit/ Unidad de Turbidez Nefelométrica

GPS – Global Positioning System/ Sistema de Posicionamiento Global

NUT - Nutriente -TTC Agar/ Trifeniltetrazolio/ Agar nutritivo

MAC - MacConkey Agar

ANOVA - Análisis de Varianza

UFC – Unidades formadoras de colonia

ÍNDICE DE TABLAS

Tablas	Páginas
1. Resultados de parámetros fisicoquímicos determinados estación 1	39
2. Resultados de parámetros fisicoquímicos determinados en la estación 2.....	40
3. Resultados de parámetros fisicoquímicos determinados en la estación 3.....	40
4. Coliformes totales (NUT) y patogénicos (MAC) en la estación 1.....	50
5. Coliformes totales (NUT) y patogénicos (MAC) en la estación 2.....	51
6. Coliformes totales (NUT) y patogénicos (MAC) en la estación 3.....	51
7. Estadísticas descriptivas de los parámetros fisicoquímicos determinados en las estaciones monitoreadas de RNPECM.	53
8. Prueba de análisis de varianza (ANOVA) de los parámetros fisicoquímicos determinados en las estaciones monitoreadas de RNPECM.	54
9. Prueba Tukey de los parámetros fisicoquímicos determinados en las estaciones monitoreadas de RNPECMV.....	55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figuras	Páginas
1. Localización de las estaciones de muestreo en la RNPECMV. (a)	30
2. Foto de la estación 1, desembocadura del estuario	31
3. Foto de estación 2, ramificación hacia el norte de la desembocadura	32
4. Foto de la estación 3, ramificación hacia el oeste de la desembocadura del estuario	32
5. Clave para la enumeración de las bacterias en los BioPaddles. Imagen tomada del documento técnico	36
6. Promedio de OD para cada estación	42
7. Datos de oxígeno disuelto (OD) para las 3 estaciones.....	43
8. Promedio de temperatura para cada estación.....	45
9. Promedio de pH para cada estación.....	46
10. Promedio de turbidez para cada estación.....	47
11. Variaciones de turbidez para las tres estaciones.....	48
12. Promedio de salinidad para cada estación.....	49
13. Datos de salinidad para las tres estaciones.....	49
14. Imagen de Satélite de la RNPECMV para el año 2016 (b).....	57
15. Imagen de Satélite de la RNPECMV para el año 2017 (c).....	58
16. Imagen de Satélite de la RNPECMV para el año 2017 luego del paso Huracán María (d).....	59
17. Imagen de Satélite de la RNPECMV para el año 2018 (e).....	60
18. Imagen de Satélite de la RNPECMV para el año 2019 (f).....	60
19. Imagen de Satélite de la RNPECMV para el año 2020 (g)	61

20. Imagen de Satélite de la RNPECMV para el año 2021 (h)	61
21. Imagen de Satélite de la RNPECMV para el año 2022 (i)	62
22. Imagen de Satélite de la RNPECMV para el año 2023 (j).....	62
23. Área estimada de mangle vivo y mangle muerto de RNPECMV	63

INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas costeros tropicales, tales como los humedales, manglares, arrecifes de coral, salinas y estuarios, además de ser importantes en el desove de especies de peces y tortugas marinas, ejercen como barreras costeras contra eventos naturales, como los son: las marejadas ciclónicas y los tsunamis. Estos ecosistemas son propensos a estresores, los cuales pueden causar el deterioro de poblaciones de bosques de mangle, incluyendo otros impactos severos a mencionados ecosistemas (Osland et al., 2018).

En los estuarios podemos encontrar bosques de mangle, los cuales funcionan como hábitat para diferentes especies de aves, reptiles, peces y plantas acuáticas (Jusino, 2019). Estos bosques son importantes para la cadena alimenticia y contribuyen a la economía, ya que son utilizados como áreas pesqueras de crustáceos y peces (Ortíz et al., 2018). También, son la primera línea de defensa para tormentas, huracanes, inundaciones y marejadas en el Archipiélago de Puerto Rico, una protección importante para las costas dado al impacto de los eventos climáticos extremos que ha enfrentado Puerto Rico recientemente (Osland et al., 2018).

Según Ellison (2008) nivel mundial, alrededor de un 2% de los bosques de mangle se han perdido debido a las pobres políticas de conservación. La urbanización y las actividades en los bosques y en terrenos aledaños causan daños a la integridad y sobrevivencia de los mangles (Branoff, 2019). El investigador Branoff, en el 2019, entre los años 2000 al 2012 se observó un deterioro en las poblaciones de los bosques de mangle, a nivel mundial, de un 0.16%. La mayoría de este deterioro se le atribuyó a la urbanización de espacios naturales y los problemas que trae consigo, como las descargas de aguas residenciales y escombros. A raíz del paso de Huracán María por Puerto Rico, en el año 2017, se reportó un deterioro y mortandad en la población del Bosque de Mangle de la Reserva Natural Pantano Espinar y Caño Madre Vieja de Aguada – Aguadilla,

Puerto Rico (RNPECMV). Diversos fenómenos atmosféricos extremos que han trastocado el área, así como el uso del bosque en actividades recreativas y el crecimiento urbano, podrían tener impacto negativo directo en la población de mangle.

La Reserva Natural Pantano Espinar y Caño Madre Vieja (RNPECMV) se encuentra en Puerto Rico, en la colindancia entre los municipios de Aguada y Aguadilla. La reserva consta de un área que comprende 57 cuerdas de bosques de mangle y humedales, cuerpos de agua, la zona marítimo - terrestre y 9 millas náuticas de mar territorial que abarca aproximadamente 4,065 cuerdas (equivalente a 3948.01 acres) (DRNA, 2016).

Según el DRNA (2016), la Reserva Natural del Pantano Espinar y Caño Madre Vieja (RNPECMV) forma parte del llano costanero de Aguada. El Caño Madre Vieja, desemboca en el Pasaje de la Mona y su boca permanece cerrada en la época seca (diciembre a marzo) debido a la arena depositada por la marea. En la época lluviosa (mayo a octubre), el estuario se mantiene abierto lo que provoca la mezcla del agua dulce con el agua de mar y el intercambio de nutrientes y organismos en el ambiente costero.

El Pantano Espinar, según describe el DRNA, en el 2016, este es un sistema de mangle al margen del cauce principal del Caño Madre Vieja. Está compuesto mayormente de mangles caribereños, los cuales crecen en óptimas condiciones en lugares con bajas salinidades y alta disponibilidad de oxígeno. El mangle rojo (*Rhizophora mangle*) y el mangle blanco (*Laguncularia racemosa*) son los más predominantes en los márgenes de la Reserva Natural Pantano Espinar y Caño Madre Vieja (RNPECMV). Esta zona se utiliza para fines recreativos, escolares y residenciales. En la vecindad de la reserva se encuentra el Parque Colón de Aguada, una escuela, un complejo de apartamentos y algunas residencias en el barrio Espinar de Aguada.

En esta investigación se documentó la calidad del agua, los patrones de lluvia y salinidad en áreas de la Reserva Natural Pantano Espinar y Caño Madre Vieja (RNPECMV) donde se reportó el deterioro de las poblaciones del mangle (Ciudadanos Aguadeños Pro-Conservación del Ambiente, 2020). Por lo que, se comparó la calidad de agua y la salinidad de las estaciones estudiadas.

Los Ciudadanos Aguadeños Pro-Conservación del Ambiente, en el año 2020, destacaron que en los pasados años se reportó mortandad de árboles de mangle, particularmente luego del paso del Huracán María, por lo que en esta tesis se utilizaron imágenes de satélite de “Google Earth” para evaluar cambios en el bosque luego del huracán María. Las observaciones de deterioro del bosque inicialmente fueron documentadas por miembros de la organización antes mencionada. En la literatura científica se ha documentado que, en el área de los trópicos, las sequías y salinidades extremas, en adición a factores antropogénicos, han provocado deterioro de las poblaciones de mangles (Rossi, Archer, Giri, & Layman, 2020), razones por las cuales en esta investigación se evalúa la calidad de agua en el estuario y las imágenes de satélite para monitorear cambios en la población del mangle en el área.

JUSTIFICACIÓN

En esta tesis se documentó la calidad de agua, los patrones de lluvia y la salinidad en tres estaciones de la Reserva Natural del Estuario Pantano Espinar y Caño Madre Vieja (RNPECMV) en donde se reportó deterioro de las poblaciones de mangle (Ciudadanos Aguadeños Pro-Conservación del Ambiente, 2020). Esta información permitirá conocer si la calidad del agua cumple con los estándares establecidos por el Departamento de Recursos Naturales y Ambientales de Puerto Rico para aguas estuarinas y evidenciar posibles causas del deterioro del bosque. Debido a la observación del grupo ambientalista Ciudadanos Aguadeños Pro-Conservación del Ambiente sobre la pérdida del bosque de mangle se evaluaron imágenes satelitales antes y después del paso de Huracán María por Puerto Rico, para detectar posibles cambios poblacionales en los bosques de mangle. Este estudio investigativo ofrece información sobre el estado actual del bosque de mangle y la calidad de agua de la reserva, proveyendo datos que no se habían reportado previamente.

OBJETIVOS

Esta investigación tiene como objetivos:

1. Documentar la calidad de agua, los patrones de lluvia y salinidad en tres áreas de la RNPECMV.
2. Comparar la calidad de agua, los patrones de lluvia y salinidad de las tres estaciones seleccionadas para determinar si existe diferencias entre ellas.
3. Evaluar imágenes satelitales de las áreas monitoreadas, antes y después del paso de Huracán María por Puerto Rico, para evidenciar posibles cambios poblacionales en los bosques de mangle.

REVISIÓN DE LITERATURA

Los bosques de mangle costeros son parte de la flora de los estuarios en Puerto Rico. Un estuario es un cuerpo de agua marina o fluvial que se encuentra en terrenos inundables cuya profundidad puede cambiar dependiendo de las marejadas (DRNA, 2016). Los estuarios son áreas que desembocan al mar abierto y pueden permanecer cerrados o abiertos (Jusino, 2019). Las áreas estuarinas están expuestas a cambios abruptos en salinidad, cuyos valores pueden oscilar entre menos de 5 partes por mil ppt a 35 ppt. En los bordes del estuario se pueden encontrar los boques de mangles (Day, Yañez & Hall, 1990), específicos para los ecosistemas tropicales (Nagelkeren et al., 2008). Según Hernando y colaboradores (2019), los manglares son importantes debido a que son ecosistemas de mucha biodiversidad, siendo refugio para insectos, crustáceos, peces, reptiles y aves, además de brindar protección para la costa.

Los mangles contribuyen a los procesos hidrológicos, entre ellos la recarga de acuíferos, reposición de aguas subterráneas, estabilización de la costa y depuración de las aguas (Quintero, 2012). Kathiresan y Bingham, en el 2001, establecer que los bosques de mangles son el límite entre comunidades terrestres, el comienzo de las praderas de pastos marinos y arrecifes de coral. Los bosques de mangles son una gran fuente de materia orgánica debido al desprendimiento de hojas y ramas, creando materia orgánica disuelta que beneficia el ecosistema costero como productores de carbono orgánico. El ciclo de nutrientes de los mangles comienza con el desprendimiento de las hojas. Al caer, estas pasan por un proceso de degradación llevado a cabo por microorganismos (bacterias y hongos) y “*lixiviación*”¹. La descomposición es influenciada por las marejadas, los períodos de lluvia y los cambios en temperatura. En temporadas de poca lluvia el proceso de descomposición es más rápido. La descomposición de esta materia orgánica provee, al ambiente,

¹ La lixiviación ocurre cuando una sustancia compleja, como minerales, se mezcla con un disolvente adecuado y se separa en partes solubles de las insolubles. (Parra)

los nutrientes que contribuyen a la cadena alimenticia de los macroinvertebrados acuáticos, crustáceos y peces (Kathiresan & Bingham, 2001).

Estos bosques promueven: biodiversidad, al ser utilizados como criadero de especies, son alojamiento para organismos como aves, insectos, arácnidos, nematodos, crustáceos, hongos y bacterias. Por otro lado, son una barrera natural contra eventos de marejadas, huracanes e inundaciones. Estos bosques actúan también como paredes, evitando la erosión de la zona costera, atrapan sedimentos y hojarasca (Ortíz et al., 2018). A su vez, representan alto valor económico, ya que sustentan la industria pesquera, la comunidad científica y las actividades turísticas (Quintero, 2012).

Según Osorio y colaboradores en el 2016 los manglares tienen la habilidad de fijar carbono de la atmósfera por su biomasa y suelo, lo que contribuye a combatir el cambio climático. Adicionalmente, protegen de marejadas, tormentas e inundaciones a la población vecina. En las últimas décadas se ha observado un deterioro en las poblaciones de mangles a nivel mundial (Nagelkeren et al., 2008). Se ha estimado que su valor económico es de 194,000 dólares por hectárea por año, por lo que su valor global se estima en 2.7 trillones de dólares por año (Sippo et al., 2018).

Los mangles tienen tolerancia a altos niveles de sal, dado a que sostienen mecanismos para obtener agua dulce en ambientes salinos, en sus hojas tienen mecanismos excretores de sal mediante exclusión, excreción y acumulación de sal (Kathiresan & Bingham, 2001). Estos bosques pueden tener diferentes estresores, los cuales tienden a manifestarse de manera crónica, ocasionando posiblemente su futura muerte. Los cambios pueden ser mínimos, por lo que se hace difícil detectar los signos hasta que comienza la mortalidad masiva del bosque. Algunos de los estresores pueden fluctuar entre el relleno de sedimentos de manera artificial y cambios en la

calidad de agua. También pueden ser variaciones en la hidrología del lugar, afectando la calidad de agua, así como cambios en la hidrología por causa de construcciones que interrumpan flujos críticos o daños al río que reduzcan los sedimentos que lleguen a estos bosques.

Calidad del agua y bosques de mangles

La calidad del agua describe las características químicas, físicas y biológicas del agua, lo que permite identificar si es apta para el consumo, uso específico o para mantener la salud de los ecosistemas. Se han establecido estándares de calidad de agua que son los límites máximos de los parámetros estudiados que son permitidos por ley, sin que se afecten los ecosistemas y la salud pública. En Puerto Rico, el Departamento de Recursos Naturales y Ambientales (DRNA, por sus siglas en español) es la agencia a cargo de reglamentar los estándares de calidad de agua que protegen y conservan los recursos hídricos de Puerto Rico. Bajo el Reglamento de Estándares de Calidad de Agua de Puerto Rico (2019), la RNPECMV se clasifica como “SB” según la clasificación de aguas de Puerto Rico (Reglas 1302.2 (B)). La clasificación “SB” incluye las aguas costaneras y aguas estuarinas destinadas al uso de recreación y contacto primario y secundario, para propagación y mantenimiento de especies, incluidas las especies amenazadas o en peligro de extinción (DRNA, 2019). Según la normativa un cuerpo de agua “SB” debe cumplir con los siguientes estándares de calidad, para garantizar la salud del ecosistema: el oxígeno disuelto no debe de tener menos de 5ppm. Los coliformes totales no deben exceder de 10,000 col/100mL y los coliformes fecales patogénicos no excederá de 200 col por 100mL. El pH debe estar entre 7.3 y 8.5, a excepción de ser alterada por un fenómeno natural. El color no será alterado, con excepción de un fenómeno natural. La turbidez no debe de exceder 10 unidades de nefelométrica (NTU) (con excepción de un fenómeno natural. La temperatura no debe de exceder de 32.2 °C (90°F), con excepción de fenómenos naturales (DRNA, 2019).

Mantener la calidad de agua, según Jusino (2019), es de vital importancia, ya que la degradación de ésta se considera uno de los mayores problemas ambientales en todos los ecosistemas acuáticos. Los parámetros fisicoquímicos del agua influyen sobre el ambiente acuático así, la temperatura del agua influye en la flora y fauna marina, el pH determina los procesos metabólicos, fisiológicos y de crecimiento de los organismos, mientras que la salinidad determina el crecimiento de especies específicas de mangles y actúa como un factor limitante en la distribución de los organismos.

La temperatura influye en las actividades tanto químicas, biológicas como los eventos de reproducción y migración de especies. Los cambios lentos en temperatura permiten la aclimatación de los organismos, en contraste, un cambio rápido puede ser un estresor de las especies (Sawyer & McCarty, 1978). Los efectos más comunes en las plantas o mangles provocados por un alza en temperatura son: el limitar los procesos fisiológicos debido a daños en la membrana o provoca la desnaturalización de las proteínas, lesiones necróticas en el tallo o en los hipocótilos² y muerte. Temperaturas extremas entre 40 a 55 °C (104 – 131 °F) pueden provocar más daños en los mangles en las primeras etapas de crecimiento. Afectando mayormente el tejido nuevo y las plántulas (Lovelock et al., 2008).

La temperatura también afecta la cantidad de oxígeno disuelto (OD) presente en el agua. El oxígeno disuelto (OD) en el agua dulce varía entre 14.6mg/L a 0°C (32°F) hasta 7mg/L a 35°C (89.6°F). Otros factores que pueden influenciar en la concentración de OD en el agua son la presión atmosférica y el contenido de sales. En general, el agua salada tiene menos oxígeno disuelto que el agua dulce, cuando están en las mismas condiciones (Sawyer & McCarty, 1978). El agua salada

² La parte del tallo, debajo de las hojas de semillas o cotiledones que se encuentra directamente encima de la raíz.

tiene una concentración de oxígeno disuelto de 9.0mg/l a 10°C (50°F), si la temperatura aumenta a 20°C (68°F), el OD disminuye a una concentración de 7.3mg/l (Numbere & Gerardo, 2017).

En el escrito de Numbere y Gerardo (2017), la temperatura también afecta la fotosíntesis y los procesos metabólicos de los organismos. Una temperatura mayor de 35 °C (95°F) puede ocasionar problemas en los propágulos, la tasa de respiración y la evapotranspiración en los mangles (EPA, 2006). En un estudio realizado en 41 países, incluyendo a Puerto Rico, con ocho especies de mangle del género *Rhizophora*, se determinó que *R. mangle* puede tolerar a temperaturas de 23-26°C (73.4 la 78.8 °F). Lo que significa que la temperatura es un factor que influencia en la distribución de *R. mangle*.

La salinidad determina el crecimiento de especies específicas de mangles y actúa como un factor limitante en la distribución de organismos. El óptimo crecimiento de los mangles ocurre en concentraciones de agua salada de 5 a 25ppt (Lovelock et al., 2008). La salinidad se ve afectada por la evaporación del agua, concentraciones altas de calcio (Ca), magnesio (Mg), sílice o minerales de sílice pueden provocar aumentos en salinidad (Nethaji, Nivas, Kanmani et al., 2016). Los estuarios tienden a tener cambios en salinidad debido a la entrada de agua dulce, desde los tributarios y la mezcla de agua salada con estos. Los niveles de salinidad de un estuario se clasifican por oligohalino (0.5 – 5 ppt), mesohalino (5 a 18 ppt) y polihalino (18 a 30 ppt). Por otro lado, el agua dulce que entra por los tributarios al estuario tiende a tener una salinidad de 0.5 ppt, lo que lo hace una zona oligohalino. Cercano de la conexión del estuario con el mar, la salinidad tiende a estar en 30.0 ppt o mayor lo que ocasiona que tenga la misma salinidad del océano (EPA, Voluntary Estuary Monitoring Manual, 2006).

En el 2016, Garcés destacó, que los cambios en salinidad pueden afectar el crecimiento de los mangles al igual que la zona en el bosque de estos mangles. En este estudio, los efectos de

cambios en salinidad en mangles y la tolerancia a la salinidad depende de la especie de mangle, destacando que hay especies que pueden tolerar áreas hipersalinas que alcanzan los 70 ppt y otros que sobreviven en 0 ppt. A pesar de que algunos manglares sobreviven en agua dulce, compiten mejor en agua salada. Lo que salta a la conclusión que altas concentraciones de salinidad pueden afectar la asimilación del dióxido de carbono (CO_2), conductancia estomática³ y su crecimiento.

El mangle rojo “*R. mangle*” muestra un crecimiento óptimo en niveles de baja salinidad, ya que es una especial halófila. Su tolerancia a salinidad comienza a 35ppt sin efectos nocivos en su crecimiento. El efecto de estrés puede comenzar a salinidades de 65 ppt, afectando su proceso de fotosíntesis y su conductancia estomática (Biber, 2006). Mientras mayor sea el estrés en la planta, la resistencia estomática⁴ aumenta, lo que provoca que la conductancia de vapor de agua disminuya y se fije menos carbono. En los estudios de Biber (2006), este reportó una baja en la fijación de CO_2 y producción de O_2 . En otro estudio realizado por Arachchilage, Pullukuttige, Huxham y colaboradores en el 2018, sobre los efectos de salinidad en mangles, se encontró que la tasa de supervivencia de las semillas de mangles era mayor en aguas con menor salinidad de 80 – 97%. Como también, el mangle negro, “*Avicennia germinans*”, presenta mayor tolerancia a cambios en salinidad, crecimiento óptimo en salinidad 0 a 40ppt (Escalera, Rivera & López, 2020).

El pH de los estuarios tiende a ser ligeramente alcalino, debido a la acción de los amortiguadores de carbonatos y los bicarbonatos encontrados en el agua, este puede ser afectado por los minerales disueltos, aerosoles, polvos y desperdicios humanos. El promedio del pH de un estuario es de 8.0 a 8.6, la mayoría de los organismos que viven en los estuarios prefieren un pH de 6.5 a 8.5. Un exceso de nutrientes tales como nitrógeno y fósforo, puede producir floración de

³ La conductancia estomática la pérdida de agua hacia la atmosfera por medio de las estomas.

⁴ La resistencia estomática es el proceso mediante el cual las plantas cierran las estomas para modular la transpiración.

algas, causando la eutrofización del estuario, provocando un ambiente con poco oxígeno debido a que el exceso de algas en descomposición crea materia orgánica exacerbadamente, lo que a su vez produce CO_2 . Cambios en la concentración de CO_2 en el agua afecta el pH de esta, disminuyendo el pH a medida que aumenta la concentración del CO_2 , lo que es conocido como la acidificación del cuerpo de agua (NOAA, 2023), provocando que se pierda biodiversidad en un estuario. Además, existen otros factores que pueden afectar el pH del agua, estos son: la actividad bacteriana, la turbidez del agua y un flujo alto de agua dulce (EPA, 2006).

Otro parámetro importante en la calidad de agua, lo es el oxígeno disuelto (OD). La disponibilidad de oxígeno en ambientes marinos es limitada, ya que el agua salada tiende a absorber menos oxígeno que el agua dulce, por lo que este factor controla las especies marinas presentes. El OD es necesario para la respiración celular, los procesos metabólicos y la descomposición de materia orgánica, la cual es esencial en el ciclo ecológico de los estuarios. Niveles bajos de oxígeno pueden ocurrir naturalmente, provocan que los nutrientes del fondo marino sean liberados y produzcan una floración de fitoplancton natural. El oxígeno disuelto puede cambiar durante el día, así al mediodía puede estar cercano a saturación, debido al movimiento y mezcla del agua mientras que durante la noche este puede ir en declive, ya que la fotosíntesis disminuye y las plantas consumen más oxígeno. El OD que se encuentra también puede variar dependiendo de la estación del año (EPA, 2006). En un estudio realizado por Mottone y Sheaves (2017), en Blacksoil Creek, un área tropical al norte de Queensland, Australia determinó que el OD depende de la entrada de agua hacia dentro del bosque. La parte de bosque de mangle tierra adentro muestra menos concentración de oxígeno que la que conecta con el mar. Naturalmente los bosques de mangle tienen un ambiente de OD bajos, aunque pequeños cambios en la hidrología pueden impactar todo el ecosistema (Mottone & Sheaves, 2017).

La turbidez del agua es una medida que se realiza evaluando la cantidad de material que se encuentra suspendida en el agua y cómo este material permite el paso de la luz. Los materiales que pueden estar suspendidos en el agua pueden ser y no se limitan a: partículas, sedimentos, algas, plancton y otras sustancias. Las fuentes que pueden afectar la turbidez en los estuarios son la erosión, el agua de escorrentía, los sedimentos del fondo oceánico y el crecimiento excesivo de algas. Cuando existen diversidad y cantidad de sólidos suspendidos en el agua, la productividad y la salud del estuario pueden verse afectadas. El OD puede disminuir si la turbidez del agua es alta, ya que no permite que la luz llegue, afectando la fotosíntesis. La temperatura del agua puede aumentar debido a que las partículas suspendidas en el agua absorben más calor. Si ocurre un aumento en temperatura el OD continúa disminuyendo, dado a que el agua caliente retiene menos oxígeno que al agua fría. La turbidez también puede afectar los peces y la vida oceánica, ya que mucho particulado puede tapar las agallas provocando que no ocurra el intercambio de oxígeno (EPA, 2006).

Según, EPA (2006), las bacterias son importantes para los estuarios, estas se encargan del proceso de descomposición de la materia orgánica que es producida, liberando nutrientes al estuario. Las bacterias se encuentran mayormente en la materia orgánica encontrada en el agua, siendo flora normal de los estuarios. Los indicadores de calidad de agua incluyen bacterias, virus y protozoarios asociados a desperdicios fecales. Los que se encuentran en mayor cantidad en aguas costaneras y estuarinas son los enterococos, los coliformes totales, coliformes fecales y *Escherichia coli* (*E. coli*), las cuales están asociadas al sistema digestivo de los mamíferos. Estos organismos son monitoreados en los cuerpos de agua en Puerto Rico por el DRNA, y se utilizan para recomendar el uso de playas, ríos y otros cuerpos de agua para recreación o consumo de agua. La contaminación fecal en ambientes acuáticos ha ido en aumento debido a la urbanización de

áreas aledañas a las costas y estuarios. Las actividades humanas pueden ocasionar que se introduzcan a las aguas desperdicios fecales, provenientes de aguas de escorrentía, cienos, aguas grises, aguas no tratadas, animales y desperdicios marinos (EPA, 2006).

Según Escalera, Rivera & López (2010), otro factor que puede afectar el ecosistema de bosques de mangles es la alteración al sistema hidrológico ya que la pérdida en conexión hidrológica de los cuerpos de agua cambia la calidad de agua. Mientras que las modificaciones a los patrones de drenaje pueden causar condiciones hipersalinas o en casos de construcciones de represas, diques y canalización de agua dulce pueden tener el mismo efecto que condiciones hipersalinas. Al igual que la salinidad se ve afectada, la temperatura del agua y la estructura forestal pueden ser impactadas. La alteración del sistema hidrológico disminuye el vigor y la densidad forestal de los mangles, produce menos concentración de oxígeno, aumento en las concentraciones de sulfuros y cambios en los ciclos de nutrientes. Estos procesos causan la degradación vegetal y la pérdida de la función del ecosistema (Echeverría-Ávila, et al., 2019).

Factores que afectan los bosques de mangles

Existen periodos en los cuales el bosque de mangle aumenta su área de extensión y otros donde disminuye. Estos periodos son parte del ciclo de establecimiento, crecimiento y mortandad de su especie. Aunque su ciclo de vida tiene periodos de mortandad masiva debido a la naturaleza de su ecosistema, puede haber eventos debido a la intervención directa del ser humano (Escalera, López, & Rivera, 2020). La mayor mortandad de mangles ocurre en las zonas del Caribe y el Golfo de México (Sippo, Lovelock, Santos et al., 2018). Según la literatura científica los factores que afectan con mayor severidad los mangles son los relacionados al cambio climático, como: los cambios en temperatura, los cambios en pH y el alza del nivel del mar. Los mangles tienen la capacidad de recuperarse mediante rebrote o movimiento de propágulos, sin embargo, la

recuperación de estos bosques puede ser lenta, dependiendo del evento de mortandad y la habilidad de recuperación de la especie. Los manglares también pueden ser afectados por la sedimentación, cambios en salinidad, cantidad de agua dulce que reciben y contaminantes que puedan lixiviarse al terreno (Jiménez & Lugo, 1985).

Los investigadores Sippo, Lovelock, Santos y colaboradores (2018) destacan que, los eventos naturales que afectan los mangles se encuentran y no se limitan a huracanes que pueden afectar la integridad de la estructura y causar erosión del terreno. Las inundaciones que pueden afectar el proceso de oxigenación de las raíces. Las temperaturas altas que pueden provocar pérdida de agua. Las sequías que pueden provocar pérdida de agua, desecación y producir condiciones hipersalinas en el suelo. Los tsunamis, al igual que los huracanes, provocan daños estructurales en los mangles y causan problemas de oxigenación en las raíces. Los agentes patógenos que pueden afectar la estructura de los mangles, dañar la hoja, descomponer el tallo y las raíces, entre otros.

Los huracanes son uno de los fenómenos atmosféricos más violentos que impactan a los bosques de mangle en el Caribe. La temporada de huracanes en Puerto Rico comienza el 1ro de junio y finaliza el 30 de noviembre de cada año. Se ha encontrado que los mangles pueden amortiguar los efectos de los huracanes en la costa atenuando la energía de las olas (Branoff, 2019). La atenuación depende de la localización, el tamaño de la población y de su recuperación luego de estos fenómenos (Zhang, Yuepeng, Huiqing et al., 2012). Luego de un fenómeno atmosférico las poblaciones de mangles se ven afectadas. Estas pueden tener una mortalidad poblacional de un 25 - 90%, dependiendo de la especie, lugar y categoría del fenómeno. Los estudios realizados luego de fenómenos atmosféricos muestran que "*R. mangle*" es una de las especies más afectadas y una de las que más tarda en recuperarse (Branoff, 2019).

El efecto de los huracanes puede causar que los árboles pierdan sus hojas, alterar la hidrología del estuario o incluso pueden arrancar árboles. En un estudio realizado en el bosque del Yunque en Luquillo, Puerto Rico, se demostró que el huracán María tuvo un efecto más agresivo en los árboles que los huracanes Hugo (1989) y Georges (1998). En el estudio se estimó que los daños ocasionados por el huracán María pueden llegar a 31 millones de árboles (Marlier, Resetar, Lachman et al., 2022).

En el estudio de Taillie y colaboradores (2020) sobre el paso de los huracanes, entre 2009 al 2017, determinó que los bosques de mangles son los ecosistemas más afectados. Se observó que los bosques de mangles que recibieron vientos de $100 - 150 \text{ km h}^{-1}$ tuvieron más daños, sin importar la altura del dosel. Los huracanes traen consigo mucha lluvia lo que provoca inundaciones extensas, cambios en la vegetación y mayor deposición de sedimentos, limitando el oxígeno en el terreno y la fotosíntesis. Un estudio realizado en Puerto Rico determinó que las inundaciones prolongadas por los huracanes pueden ocasionar que las raíces aéreas de los mangles estén cubiertas de agua mucho tiempo, provocando una mortandad masiva (Yu & Gao, 2020). Los tsunamis componen un 10% de las tormentas extremas, estos han provocado un 18% de la mortalidad a nivel histórico de los bosques de mangle. Estos provocan daños a la estructura de los mangles y problemas de oxigenación en las raíces (Ellison, 1999).

En el estudio de Imbert (2018), en la isla de Martinica y Guadalupe, reportó que “*R. mangle*” es más susceptible a los daños de los vientos de huracanes y tormentas. En áreas activas por el paso de huracanes, la recuperación de los mangles fue más lenta e incluso no se lograron recuperar por completo antes del paso de otro huracán. Esto hace referencia al paso del huracán Hugo que, luego de 23 años, aún no se había recuperado por completo los mangles estudiados,

posiblemente debido a que “*R. mangle*”, por el tamaño de sus ramas se afecta severamente por la velocidad del viento (Imbert , 2018).

Por otro lado, las sequías traen consigo condiciones en las que los estuarios se llenan de sedimentos y se reduce la entrada de agua dulce, aumentando el agua salada. En adición, las sequías ocasionan que se reduzca el área donde crecen los mangles (Wilson , 2017). El aumento de agua salada ocasiona alteraciones al hábitat de las especies de agua dulce, por lo que disminuye la abundancia, crecimiento y limita las actividades microbianas; y la altura media de los mangles disminuyen con el aumento de salinidad (Ahmed, et al., 2022). En un estudio en el Amazonas, Brasil, durante los años 2012 al 2013 se observó cómo la sequía afectaba los mangles. Se observó que al disminuir la precipitación se encontró un aumento en sedimentación y reducción de oxígeno disuelto. La turbidez encontrada en el estudio fue de 400 NTU, mientras que la salinidad y el pH aumentaron con la sequía (Cajueiro et al., 2017).

La sobrepoblación urbana también trae consecuencias negativas para los bosques de mangles debido a la contaminación con desperdicios sólidos, escombros y el vertimiento de aguas residuales, generalmente por falta de sistema de alcantarillado sanitario adecuado (Garcés, 2016).

Uso de imágenes satelitales

El uso de imágenes satelitales es uno de los métodos remotos más eficientes para el monitoreo de los bosques. Las imágenes satelitales se pueden utilizar para adquirir información sobre vegetación, cobertura terrestre, áreas urbanas y vegetación (Maurya, Mahajan & Chaube, 2021). Debido a que los bosques de mangle pueden ser extensos y tener áreas de difícil acceso, usar imágenes satelitales puede proveer información sobre dichas áreas, como textura y características generales. Aplicando el análisis de las imágenes de satélite en conjunto con el

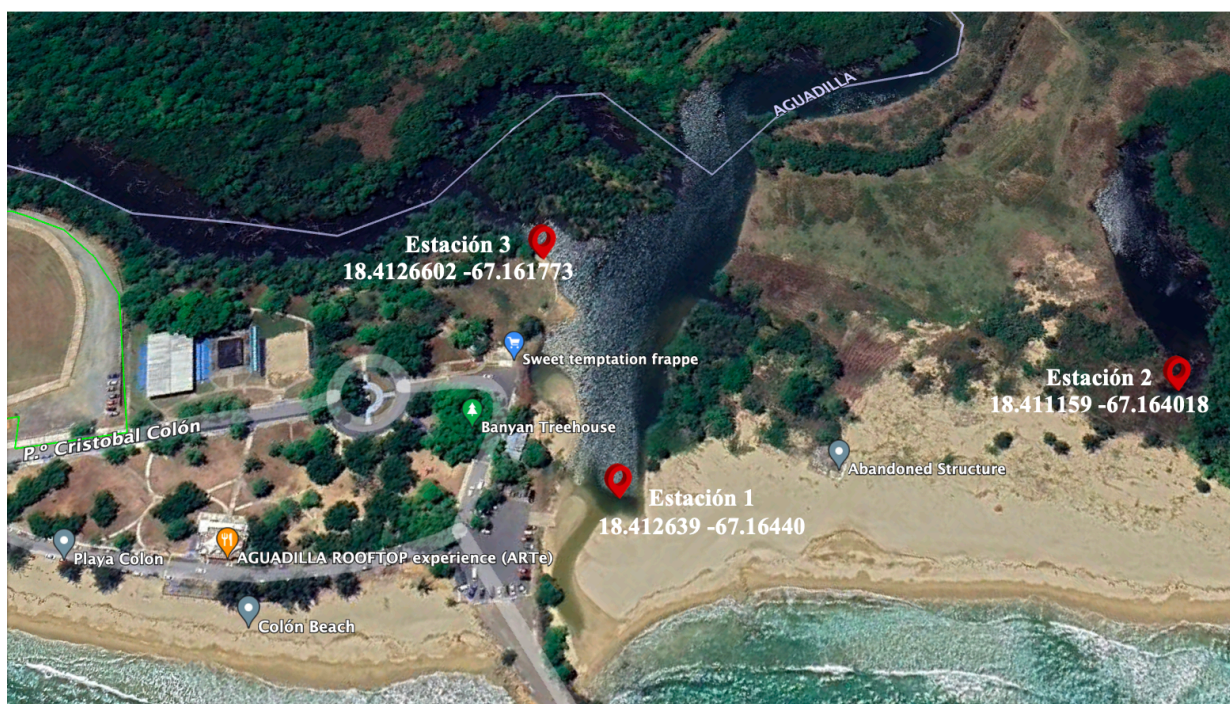
sistema de información geográfica (GIS, por sus siglas en inglés), se puede hacer un monitoreo completo del bosque (Maurya, Mahajan & Chaube, 2021).

En un estudio realizado en el sur de Florida, USA, se utilizaron imágenes satelitales del año 1985 al año 2011 para identificar disturbios en el bosque de mangle. Usando este método obtuvieron la información para cuantificar los cambios en el bosque de mangle durante el cambio de temporada. En un estudio en Cabo Rojo, Puerto Rico, los investigadores Escalera, Rivera & López (2020) interpretaron fotos aéreas tomadas de “Google Earth” para calcular áreas del bosque de mangle afectado luego del huracán María. Delinearon las áreas para poder calcular mangle vivo y mangle muerto, reportando la recuperación del bosque después de dos años del paso del huracán María. Por tal razón, en esta tesis se utilizaron imágenes de “Google Earth” para evaluar cambios en el bosque de mangles de la Reserva Natural del Estuario Pantano Espinar y Caño Madre Vieja (RNPECMV) entre los años 2016 y 2023.

MATERIALES Y METODOS

En esta tesis se documentaron los parámetros fisicoquímicos, biológicos y patrones de lluvia en estaciones de la Reserva Natural del Estuario Pantano Espinar y Caño Madre Vieja (RNPECMV), donde se un grupo de ciudadanos reportó una alta mortandad de las poblaciones de mangle (véase figura 1). Adicionalmente, se analizaron imágenes satelitales de las áreas monitoreadas para observar posibles cambios poblacionales.

Figura 1: Localización de las estaciones de muestreo en la RNPECMV. (a)



Nota. Google Earth Pro. (2022) Reserva Natural Pantano Espinar y Caño Madre Vieja.

Descripción de las estaciones de muestreo

Para este estudio se escogieron tres estaciones en la RNPECMV (véase figura 1). La RNPECMV está compuesta por dos ramificaciones principales: la ramificación del norte, donde se encuentra la desembocadura del estuario (estación 1), el medio del estuario (estación 2) y la ramificación del este donde se encuentra la estación 3. La estación 1 se encuentra en la

desembocadura del estuario colinda por el oeste con Parque Colón, recorre parte la berma de la playa y es un lugar mucha actividad humana (véase figura 2).

Figura 2: *Foto de la estación 1, desembocadura del estuario*



Nota. Foto tomada por Isbeth López Pérez.

La estación 2 se encuentra por el lado oeste del parque Colón, recorre la berma de la playa de Espinar. El suelo es cenagoso y se observó frecuentemente desperdicios sólidos en el área (véase figura 3). La actividad humana era media, esta zona era la más lejana de la desembocadura del estuario lo que provocaba que el agua estuviera estancada por largos periodos de tiempo. Se observaba mangle muerto a la orilla de la ramificación. La estación 3 se encuentra por el lado norte y colinda con una escuela, esta tenía fluctuaciones en profundidad que dependían de la apertura del estuario, el suelo era cenagoso (véase figura 4).

Figura 3: *Foto de estación 2, ramificación hacia el norte de la desembocadura*



Nota. Foto tomada por Isbeth López Pérez.

Figura 4: *Foto de la estación 3, ramificación hacia el oeste de la desembocadura del estuario*



Nota. Foto tomada por Isbeth López Pérez.

Colección de las muestras de agua

Las muestras se colectaron de aguas superficiales aproximadamente a seis pulgadas bajo la superficie, se colectaron en envases plásticos reusables de 120 ml, en duplicados. Los duplicados se tomaron a una distancia máxima de tres metros, para el control negativo se utilizó agua destilada en cada muestreo. Se determinaron los parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos, algunos de los cuales se midieron directamente en los lugares de muestreo en campo. Estos muestreos se llevaron a cabo bisemanal durante 26 semanas del año 2022 (febrero – agosto, 2022), y se colectaron un total de catorce muestras (una muestra por estación, con duplicado) para análisis. (EPA, 2006).

Determinación de parámetros fisicoquímicos

Oxígeno disuelto, temperatura y pH

Se utilizó el medidor multi pH/OD HQ40d para determinar la temperatura y el oxígeno disuelto (OD) (mg/L) y pH. Las muestras fueron tomadas *in situ*, a la misma hora durante todos los muestreos. Antes de cada muestreo se calibró la sonda de oxígeno disuelto siguiendo las instrucciones del fabricante. La sonda de pH cisis se calibró antes de cada muestreo, donde la sonda de pH se utilizó tres soluciones con amortiguador de pH certificado, y se calibró siguiendo las instrucciones del fabricante.

Se llevó el Metro multi pH/OD HQ40d hasta los puntos de muestreos, según las coordenadas de GPS de cada estación, se colocaba la sonda directamente en el agua y se movía hacia arriba y hacia abajo para eliminar burbujas de agua, una vez estuviera estable, la sonda mostraba la lectura del oxígeno disuelto y la de temperatura del agua. Se limpió con agua destilada al finalizar cada medida para prepararla para la siguiente medición (Hach Company, 2006).

Turbidez

Para realizar las pruebas de turbidez se utilizó Turbidímetro 2100Q (Marca HACH Cat. No. 2100 Q0, DOC 022.97.80041,08/2017). El instrumento fue calibrado por una compañía externa, teniendo validez de tres meses. Antes de cada muestreo se utilizaba el control de agua destilada. Se utilizaron los envases plásticos reusables de 120ml o de cuatro onzas para guardar las muestras de agua que se iban a utilizar para medir turbidez. Se sumergió el contenedor en el agua, se enjuagaba tres veces antes de colectar la muestra de agua. Luego se procedió a almacenar en una nevera portátil para evitar descomposición microbiana de los sólidos durante su transportación (Hach Company, 2021). Las muestras eran procesadas el mismo día antes de cuatro horas.

Salinidad

En la medición de salinidad se utilizó el “*Salinity Refractometer*” marca Vitalsine Code 5-0020Model SR-6. En la calibración del refractómetro se utilizó una solución estándar (agua destilada), se agregaron de dos a cinco gotas de la solución en el cristal de lectura, se cerró la tapa, y se tomó la lectura, luego de corroborar que la salinidad estuviese en 0 partes por mil (ppt). Se limpiaba nuevamente con agua destilada y se procedía a secar. Posteriormente su calibración se utilizó para medir la salinidad de las estaciones. Se limpió con agua destilada y se secó con toallas que no liberaran particulado. Se utilizó para el análisis de salinidad de cada estación y sus duplicados. Se vertían de dos a cuatro gotas de agua verificando que cuando se cerrara la tapa del refractómetro, el agua quedara uniforme y luego se procedía a hacer la lectura de salinidad. Al final de cada lectura se limpió el instrumento con agua destilada.

Indicadores biológicos

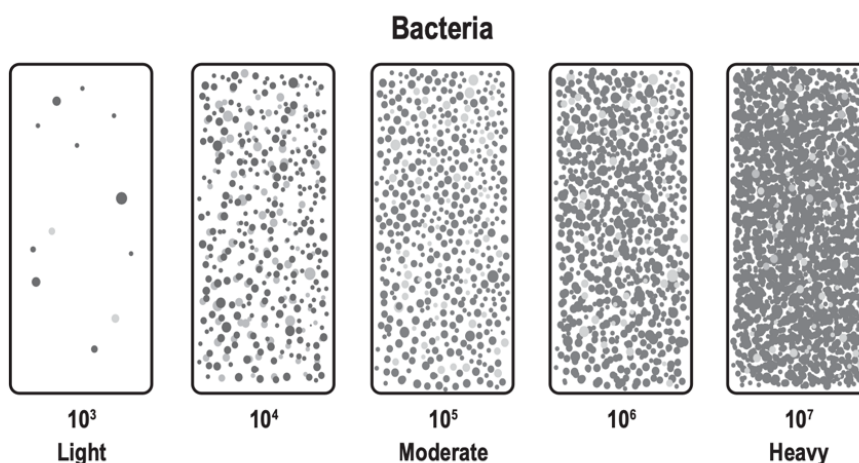
Se utilizaron los “*BioPaddles*” (Marca LaMotte) para determinar indicadores biológicos: coliformes totales, coliformes fecales y *E. coli*. Los BioPaddles están compuestos de agares sólidos Nutriente -TTC Agar (NUT) y MacConkey Agar (MAC). El agar de color amarillo (NUT) es el medio no selectivo, este facilita el crecimiento de organismos aeróbicos y anaeróbicos. Las bacterias anaeróbicas pueden ser detectadas, ya que tiene la habilidad de reducir el tinte de cloruro de trifeniltetrazolio (TTC) a un tinte de color rojo. Estas colonias de bacterias se ven de color rojo en el medio amarillo compuesto de TTC. El MAC posee el agar de color rosado, es un medio selectivo y diferencial. Se utiliza para diferenciar las bacterias Gram negativas, inhibiendo la mayoría de las bacterias Gram positivas. Este medio, igualmente, se utiliza para diferenciar de los coliformes fermentadores de lactosa (Lac +) y los no fermentadores de lactosa (LAC -), según LaMotte Biopaddles.

Se utilizaron los *BioPaddles* de NUT/MAC para cada estación, donde se obtuvieron muestras de 40mL en el agua superficial. Se introdujo la paleta que contiene el agar en el agua por un tiempo aproximado de 15 a 30 segundos. Luego se descartó el agua y se incubó el *BioPaddles* a 37 °C por 24 y 48 horas utilizando la incubadora HHD 12 egg. La incubadora se preparó antes de cada muestreo para regular la temperatura a 37 °C. Luego, se llenó de agua destilada el tanque para el proceso de precalentar, luego de 20 a 30 minutos se verificaba la temperatura. Se utilizó el termómetro que tiene integrado la incubadora y un termómetro externo (“*armored*” código 1066) para verificar que la temperatura fuera la óptima para incubar los *Biopaddles*.

Al culminar las 24 horas se realizaron las lecturas, cada *Biopaddles* tiene unos puntos de sujeción moldeados que tiene una medida de 4 milímetros (mm) para estimar el tamaño de las colonias. Se realizó el conteo total de colonias e índice para las muestras líquidas $10^3 - 10^7$

CFU/ml⁵. Luego se colocaba nuevamente en la incubadora para hacer su lectura a las 48 horas. Su enumeración va de 10³ (leve) a 10⁷ (fuerte) (véase figura 5). Luego de que los *Biopaddles* se utilizaban estos eran descartados. Se colocaron en 40 ml de una solución de 1:9 de agua: Cloroxtm (Hipoclorito de sodio), se dejó en contacto con esta solución durante 15 minutos y luego se descartaron como desperdicios no peligrosos. Se realizó un conteo de unidades formadoras de colonias (UFC) en ambos agares. Se contabilizaron las colonias utilizando una lupa y una lámpara.

Figura 5: Clave para la enumeración de las bacterias en los *BioPaddles*



Nota. Imagen tomada de LaMotte Biopaddles Technical Document

Los análisis de varianza se realizaron para comparar los resultados de cada parámetro entre las estaciones. Se utilizó un análisis de varianza, mejor conocido como ANOVA, con un 95% de confianza. Mientras que las imágenes de satélites fueron recuperadas de “*Google Earth*” (GE) de RNPECMV entre los años 2016 al 2022. Utilizando imágenes de satélite se evaluaron y delinearon las áreas como mangle vivo y mangle muerto. Se determinó el área de mangle total, mangle muerto y el porcentaje de mangle muerto. Para validar la determinación del mangle vivo se utilizaron los datos de mangle vivo en el documento de Designación Reserva Natural del Estuario Pantano

⁵ Número total de colonias multiplicado por el factor de dilución dividido por el volumen del cultivo.

Espinar y Caño Madre Vieja, que estipula que la reserva cuenta con 47.5 cuerdas (186,694 m²) de área conformada por mangle (DRNA, 2016), (véase tabla 1). Se utilizó la herramienta en “Google Earth” para determinar las áreas donde se podían observar vegetación viva, dada por la coloración verde. Esta información se utilizó para el año 2016 hasta el año 2022. Se utilizaron dos imágenes, una antes del huracán María, ocurrido para el año 2017, y una obtenida algunos días luego del paso del Huracán María.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La calidad de agua de la Reserva Natural del Estuario Pantano Espinar y Caño Madre Vieja (RNPECMV) fue evaluada determinando el oxígeno disuelto, temperatura, pH, salinidad, porcentaje de saturación, turbidez, patrones de lluvia, bacteriología, mientras que la dimensión del bosque de mangles fue determinada por imágenes satelitales. Para cada estación de la reserva se determinó el cumplimiento con los estándares de agua por el Reglamento de Estándares de Calidad de Agua de Puerto Rico según referenciado por el Departamento de Estado de Puerto Rico, Reglamento número 9079 del Departamento de Recursos Naturales y Ambientales (DRNA, 2019).

Los resultados de las pruebas de calidad de agua de la RNPECMV se resumen en las tablas 1, 2 y 3. Las tablas incluyen los parámetros medidos, unidades reportadas, fecha de los muestreos, episodios de lluvia y geomorfología del estuario. Los estándares del DRNA están presentados entre paréntesis al principio de cada columna.

La tabla 1 contiene los valores de los parámetros fisicoquímicos medidos para la estación 1. En esta estación la temperatura, pH y salinidad se encontraron dentro de los parámetros recomendados en los estándares del DRNA para un estuario en todos los muestreos o el 100% de los muestreos. En un 79% de los muestreos el OD fue menor a lo recomendado (5ppm) mientras que en 29% de los muestreos, la turbidez fue mayor a la recomendada para aguas estuarinas SB.

La tabla 2 presenta los valores de los parámetros fisicoquímicos medidos para la estación 2. El porcentaje de cumplimiento para los estándares de calidad de agua según el reglamento del DRNA fue de un 100% para temperatura, pH, y salinidad. Mientras que el OD fue menor a lo recomendado, en el 92% y el 71% de las muestras, respectivamente, no cumplió con la turbidez establecida para aguas estuarinas SB.

La tabla 3 contiene los valores de los parámetros fisicoquímicos medidos en la estación 3. El porcentaje de cumplimiento para los estándares de calidad de agua según el reglamento del DRNA fue de un 100% para temperatura, pH y salinidad. Los demás parámetros, el 85% de las muestras no cumplió con el estándar de OD y el 71% de las muestras no cumplió para la turbidez para aguas estuarinas SB.

Tabla 1: Resultados de parámetros fisicoquímicos determinados estación 1

Núm. Muestras	Fecha	OD	Temp.	pH	Turbidez	Salinidad	(C) o (A)	Lluvia
	Estándar	(>5ppm)	(<32.2 °C)	(7.3- 8.5)	(≤10NTU)	(0-35ppt)		
1	2/5/22	4.40*	22.8	7.58	1.7	3.5	C	Si
2	2/19/22	4.14*	24.0	7.60	1.8	10.0	A	No
3	4/2/22	6.10	26.2	7.83	6.5	0.0	A	No
4	4/16/22	4.57*	26.3	7.59	2.0	5.5	A	No
5	5/7/22	5.30	27.8	7.64	3.3	6.0	A	No
6	5/21/22	4.55*	29.0	7.70	2.8	5.0	C	No
7	6/4/22	4.00*	28.9	7.71	4.0	15.0	A	No
8	6/18/22	3.51*	27.4	7.55	80.7*	15.0	A	No
9	7/2/22	3.57*	28.8	7.68	4.6	9.5	A	Si
10	7/5/22	5.49	30.3	7.93	3.4	7.0	A	Si
11	7/16/22	2.68*	25.9	7.60	27.3*	7.5	A	Si
12	7/18/22	3.51*	27.4	7.55	4.6	9.5	A	SI
13	7/30/22	2.88*	26.8	7.63	29.4*	1.5	A	SI
14	8/20/22	4.48*	28.7	7.79	16.5*	10.0	A	No

Nota. No cumplieron con el estándar de calidad de agua de Puerto Rico, OD 79% y turbidez 29%. Cerrado (C) y Abierto (A).

Tabla 2: Resultados de parámetros fisicoquímicos determinados en la estación 2

Núm. Muestras	Fecha	OD	Temp.	pH	Turbidez	Salinidad	(C) o (A)	Lluvia
	Estándar	(>5ppm)	(<32.2 °C)	(7.3- 8.5)	(≤10NTU)	(0-35ppt)		
1	2/5/22	1.24*	24.4	7.47	8.7	7.5	C	Si
2	2/19/22	0.18*	23.5	7.52	17.5*	5.5	A	No
3	4/2/22	3.75*	25.9	7.72	10.4	2.5	A	No
4	4/16/22	3.36*	25.9	7.62	10.1	5.0	A	No
5	5/7/22	4.72*	27.4	7.80	12.4*	6.5	A	No
6	5/21/22	2.88*	28.6	7.69	16.6*	5.0	C	No
7	6/4/22	5.18	27.6	7.88	11.6*	5.5	A	No
8	6/18/22	2.92*	27.9	7.67	14.0*	6.0	A	No
9	7/2/22	2.87*	28.3	7.75	12.1*	5.0	A	Si
10	7/5/22	6.10	30.4	7.88	2.2	5.5	A	Si
11	7/16/22	3.02*	26.6	7.60	38.2*	1.0	A	Si
12	7/18/22	2.92*	27.9	7.67	12.1*	5.0	A	SI
13	7/30/22	2.12*	28.5	7.69	33.3*	2.0	A	SI
14	8/20/22	3.88*	28.9	7.78	20.3*	1.5	A	No

Nota. No cumplieron con el estándar de calidad de agua de Puerto Rico, 92% OD y turbidez 71%. Cerrado (C) y Abierto (A).

Tabla 3: Resultados de parámetros fisicoquímicos determinados en la estación 3

Núm. Muestras	Fecha	OD	Temp.	pH	Turbidez	Salinidad	(C) o (A)	Lluvia
	Estándar	(>5ppm)	(<32.2 °C)	(7.3- 8.5)	(≤10NTU)	(0-35ppt)		
1	2/5/22	2.10*	25.0	7.50	29.7*	5.0	C	Si
2	2/19/22	3.33*	25.0	7.59	23.7*	15.0	A	No
3	4/2/22	5.75	25.5	7.85	6.7	5.5	A	No
4	4/16/22	4.34*	25.7	7.62	22.0*	11.0	A	No
5	5/7/22	4.69*	28.5	7.68	20.2*	9.0	A	No
6	5/21/22	3.72*	28.9	7.66	45.9*	8.0	C	No
7	6/4/22	1.67*	28.4	7.66	8.0	14.0	A	No
8	6/18/22	3.63*	28.2	7.56	11.7*	0.5	A	No

Tabla 3: Resultados de parámetros fisicoquímicos determinados en la estación 3 (continuación)

Núm. Muestreos	Fecha Estándar	OD ($>5\text{ppm}$)	Temp. (<32.2 $^{\circ}\text{C}$)	pH (7.3- 8.5)	Turbidez ($\leq 10\text{NTU}$)	Salinidad (0-35ppt)	(C) o (A)	Lluvia
9	7/2/22	2.60*	29.3	7.65	41.9*	15.5	A	Si
10	7/5/22	6.01	29.5	7.91	1.7	5.5	A	Si
11	7/16/22	1.73*	27.7	7.52	115.0*	3.5	A	Si
12	7/18/22	3.68*	28.2	7.56	41.9*	15.5	A	SI
13	7/30/22	2.86*	27.1	7.66	92.0*	2.0	A	SI
14	8/20/22	4.02*	28.0	7.77	10.0	9.0	A	No

Nota. No cumplieron con el estándar de calidad de agua de Puerto Rico, 85% OD y turbidez 71%. Cerrado (C) y Abierto (A)

Comparación de las Tres Estaciones Monitoreadas

Las tres estaciones se diferencian entre sí por su localización y alrededores. La estación 1 es la desembocadura del estuario y queda cerca de las áreas recreativas del Parque Colón. La estación 2 es marisma, las cuales no se comportan igual, dependen de factores como lluvia, cambios geomorfológicos y marejada para su comportamiento. Es la más distante de la costa de las estaciones muestreadas y tiene mucha vegetación. La estación 3 es la parte media del estuario, está cerca de las áreas recreativas del Parque Colón y cuenta con vegetación moderada.

El oxígeno disuelto fue menor a lo recomendado en la mayoría de las muestras tomadas, usando el estándar regulado para la calidad de agua tipo SB del DRNA. Al comparar los resultados entre la época seca (diciembre a abril) y época lluviosa (mayo a noviembre), se encontró que en la estación 1, sólo una de las muestras cumplió con el contenido de oxígeno disuelto para la época seca y para la época lluviosa solo una de las muestras cumplió. Para la estación 2 ninguna de las muestras cumplió para la época seca y sólo dos de las muestras cumplieron para la época lluviosa. En la estación 3, sólo una de las muestras cumplió para la época seca y para la época lluviosa. No

se observó correlación entre los cambios en oxígeno durante episodios de lluvia o la apertura de estuario.

El promedio de oxígeno disuelto en las tres estaciones estuvo por debajo de los 5ppm (véase figura 6), por lo que las aguas de las tres estaciones no cumplen con el OD adecuado para aguas estuarinas saludables (véase figura 7). El OD varió entre 0.18 y 6.10 ppm, lo que muestra un posible ambiente poco favorable para fomentar la diversidad. Un estudio realizado al norte del Mississippi River, en el Golfo de México, estudió los efectos de la hipoxia en los organismos. El estrés de los organismos bénticos comienza luego de que el oxígeno bajó a menos de 2ppm. Luego de 0.5 ppm reportaron un deterioro en las poblaciones de organismos. Las fluctuaciones de oxígeno de 2ppm a 5ppm son normales en los estuarios (Rabalais, 2019), y en la RNPECMV estas fluctuaciones fueron observadas, aunque con eventos de menor concentración de OD.

Figura 6 : *Promedio de OD para cada estación*

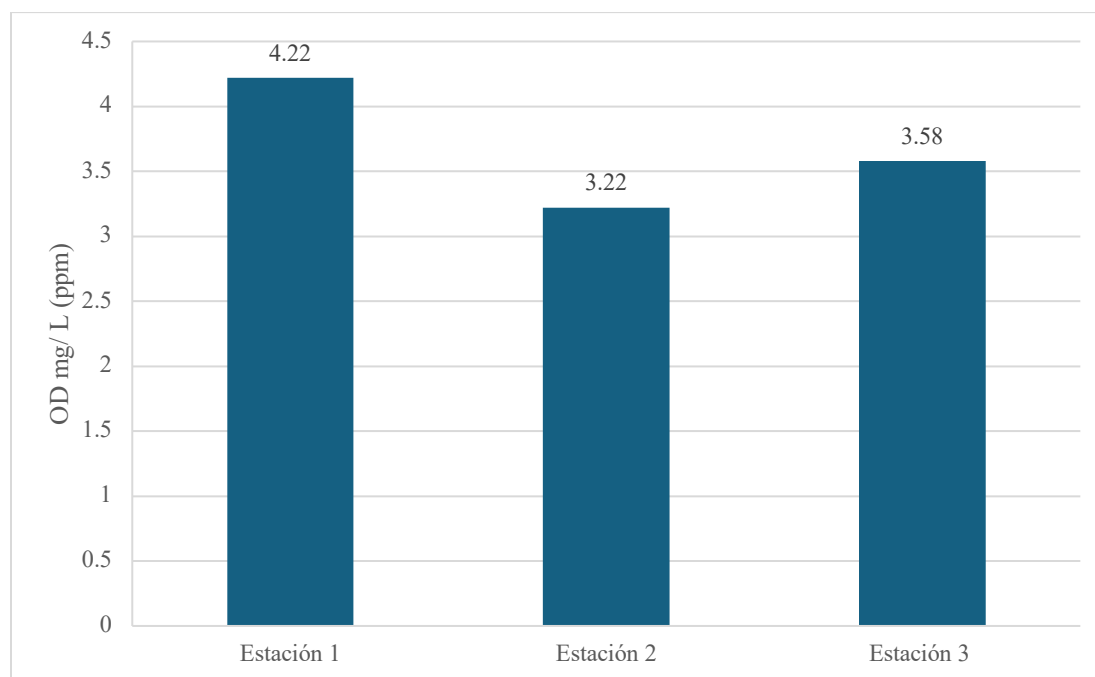
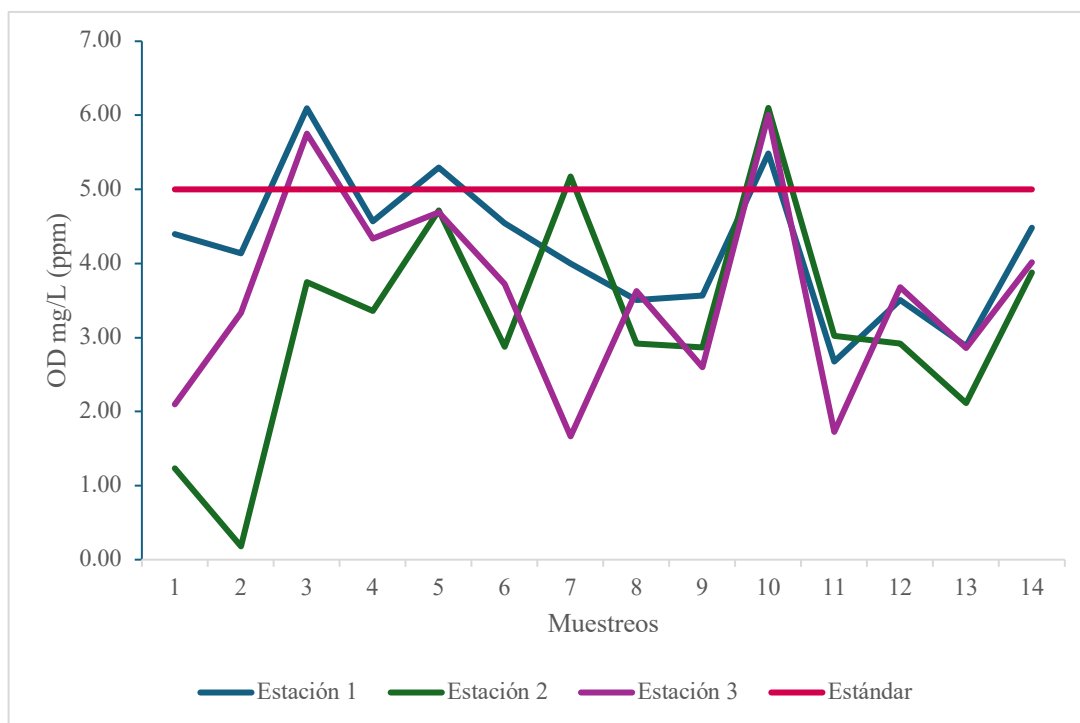


Figura 7: Resultados de oxígeno disuelto (OD) para las tres estaciones



Nuestros resultados coinciden con los resultados obtenidos de calidad de agua Caño Maní, Caño Boquilla y Caño La Puente (Jusino, 2019), en Aguadilla y Añasco, Puerto Rico, donde la cantidad de oxígeno disuelto también fue baja en las zonas del estuario estudiadas. En otro estudio realizado en el estuario de Urdaibai, en el País Vasco, España, reportó menor concentración de oxígeno en la parte geográfica superior del estuario, posiblemente debido a que esta zona recibe gran cantidad de materia orgánica y escorrentías (Iriarte , Uriarte, Villate et al., 2014. En la RNPECMV la mayor concentración de oxígeno disuelto se encontró en la estación 1, similar a lo reportado en el estuario de Urdaibai, donde la parte exterior del estuario, zona donde se conecta con el mar, tiende a tener mayor cantidad de oxígeno disuelto ya que es una zona activa (Iriarte , Uriarte, Villate et al., 2014.

En un estudio realizado en el bosque de mangle Blacksoil, Creek en Australia, se observaron fluctuaciones de oxígeno disuelto extremos, en el cual, el oxígeno se mantenía a niveles

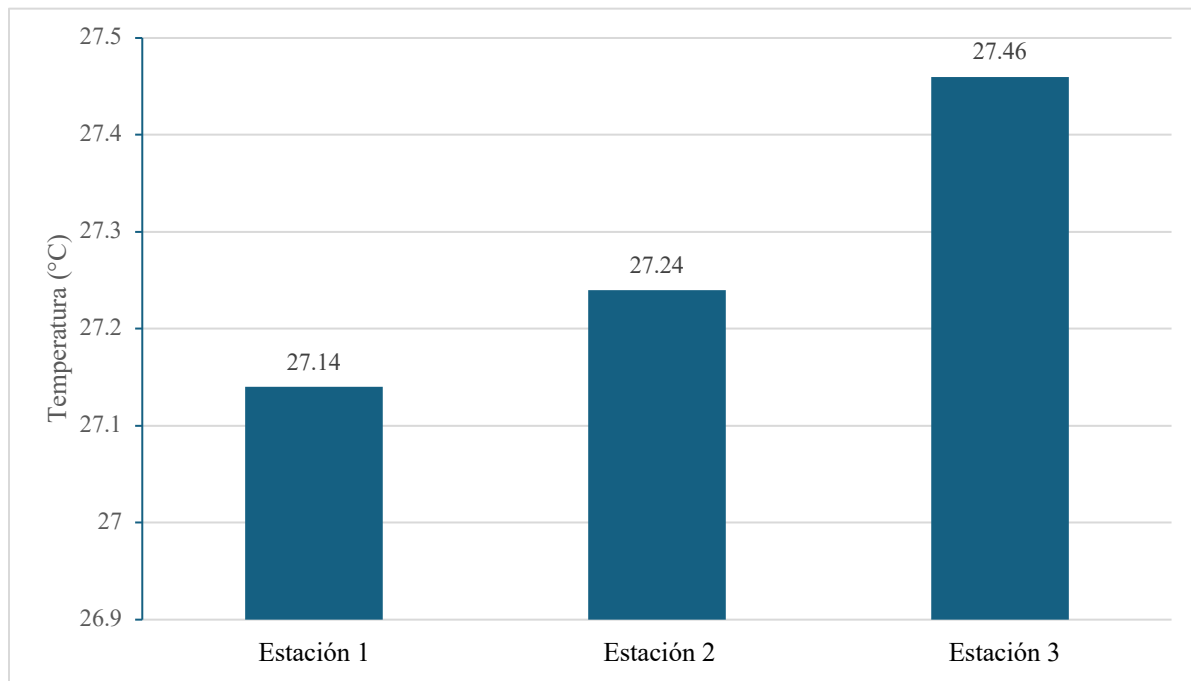
normóxico (6.5- 8mg/L) y durante la noche pasaban a hipóxicos (menor de 3mg/L). En este estudio concluyeron que, esto depende de los cambios en marejada. El oxígeno disuelto también se puede ver afectado si el agua que se está muestreando está cerca de tierra, ya que puede ser acumulación de agua que se torna anóxica (Mottone & Sheaves, 2017). La baja concentración de oxígeno disuelto en la RNPECMV puede ser debido también a la alta producción de materia orgánica del bosque de mangle, lo que puede ocasionar una disminución de oxígeno en el agua al consumirse durante la descomposición de la materia orgánica (Mottone & Sheaves, 2017; Retnaningdyah, Ridlo, Febriansyah et al., 2021). A pesar de que el oxígeno disuelto fue bajo (< 5ppm) en casi todos los muestreos, se observó vida acuática en las estaciones 1 y 2 (peces, crustáceos caracoles y aves). Si la cantidad de oxígeno fuese desfavorable la mayor parte del tiempo no se hubiese observado vida acuática en el agua.

El promedio de temperatura en las tres estaciones fue de 27.14°C, 27.24 °C, 27.46°C, cumpliendo con el estándar establecido por la reglamentación (véase figura 8). No se evidenciaron cambios en temperatura marcados entre la época seca, época lluviosa, episodios de lluvia o en la apertura de la boca del estuario.

La estación que tuvo la temperatura más alta fue la estación 2, siendo documentado en la época lluviosa durante el mes de julio. La estación con menor temperatura fue la estación 1, en el mes de febrero en la época seca. En diversos estudios realizados se evaluaron varios estuarios: Yangtze en China, Lena River en Rusia, Iberian en la Península de España, se determinó que los cambios geomorfológicos interactúan con la temperatura del estuario, sin embargo, en este estudio no se evidencia dicha interacción, posiblemente por las pocas ocasiones en que el estuario se encontraba cerrado. La temperatura de todas las estaciones cumplió con lo establecido por el DRNA para ecosistema saludables. Similar al estudio de Caño Maní, Caño Boquilla y

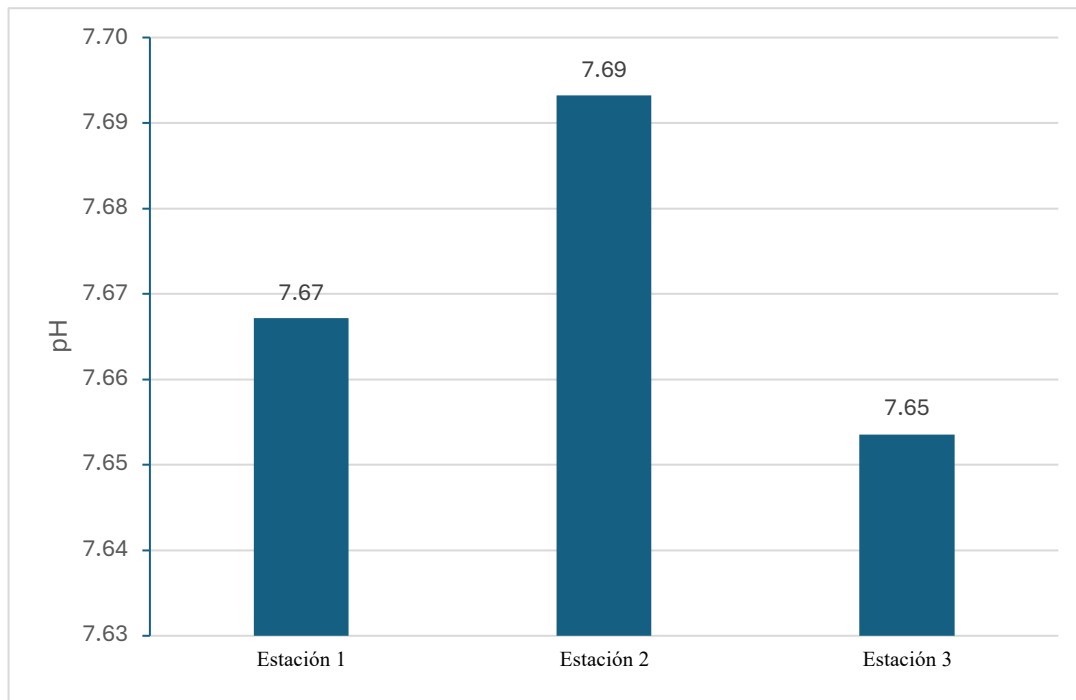
Caño La Puente (Jusino, 2019), en el cual las temperaturas de mantuvieron 22 a 30 °C al igual que la RNPECMV.

Figura 8: *Promedio de temperatura para cada estación*



En el pH se encontró que en las tres estaciones estudiadas se obtuvo un promedio de 7.67, 7.69 y 7.65 cumpliendo con el estándar de agua limpia (DRNA, 2019). No se observaron diferencias en pH en las estaciones durante la época seca, la época lluviosa, apertura del estuario o durante episodios de lluvia (véase figura 9).

Figura 9: *Promedio de pH para cada estación*



Según Xinping & Wei-Jun (2013), se esperaría que el pH aumentara en presencia de lluvia, ya que el agua dulce es alcalina, sin embargo, esto no se observó en nuestro estudio, posiblemente porque no se hicieron muestreos en un período extenso de sequía, para observar el efecto de la lluvia sobre el pH. En un estudio en Río de Bouregreg, Marruecos, se estudió la relación de los parámetros fisicoquímicos con el OD. Se concluyó que el agua de mar ocasionaba que el agua del río se tornara más alcalina cuando la apertura del estuario estuviese abierta, debido al efecto alcalino del agua salada. En esta tesis de investigación no se observaron cambios en pH debido a cambios en la apertura del estuario (Haddout et al., 2022).

En todos los muestreos y en todas las estaciones el pH se encontró dentro de lo establecido por el DRNA (7.3 – 8.5) para aguas estuarinas de buena calidad (DRNA, 2019). Similar al estudio de Jusino (2019), donde el Caño Maní, Caño Boquilla y Caño La Puente, en Puerto Rico, mantuvieron entre pH de 7.0 – 9.0.

El promedio de la turbidez para cada estación se presenta en la figura 10 y los valores de turbidez para cada estación se presentan en la figura 11. El promedio de turbidez más alto se encontró en la estación 3, posiblemente debido a que esta estación es la parte del estuario que llamamos el medio del estuario, es un área adyacente al bosque de mangle donde se tiende acumular sedimento, lo que provoca que exista más turbidez en esa área (Scanes, Jaimie & Ferguson, 2017).

Figura 10: *Promedio de turbidez para cada estación*

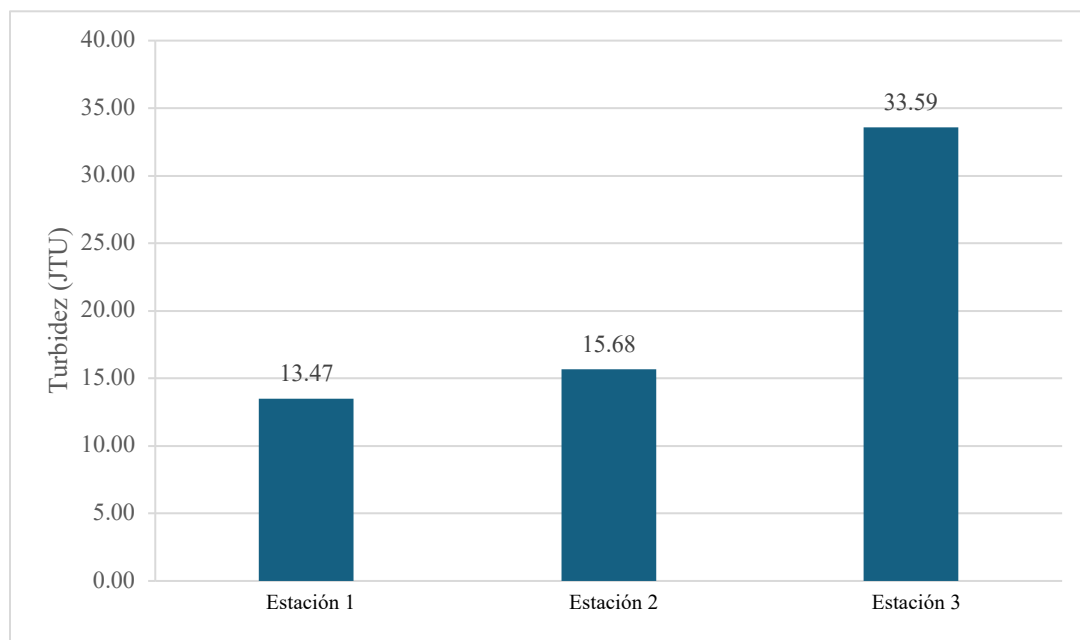
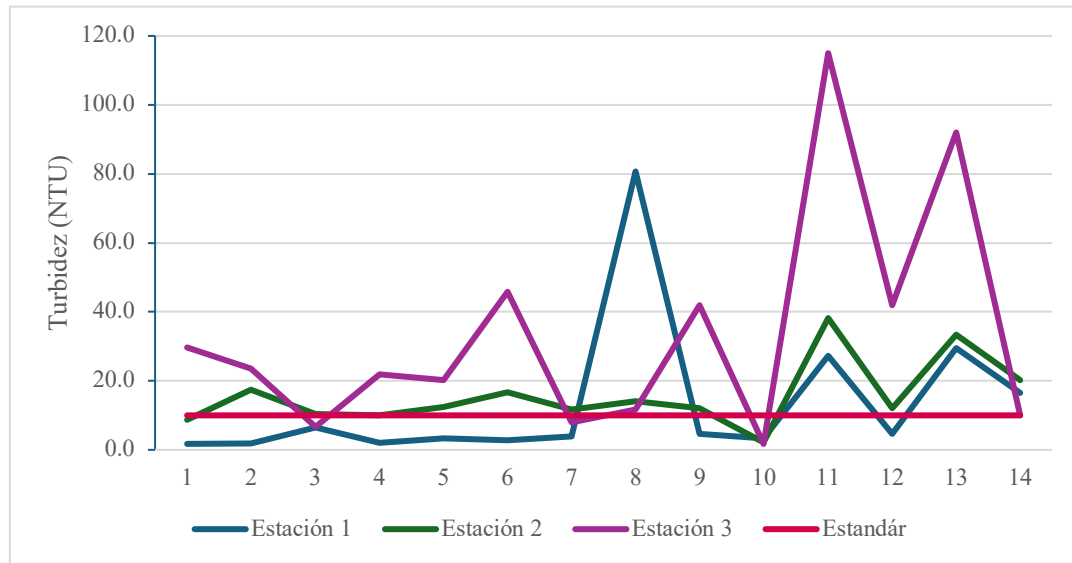


Figura 11: *Variaciones de turbidez para las tres estaciones.*



En la estación 1 todas las muestras cumplieron con el estándar de turbidez establecido para la época seca, en la época lluviosa seis de las muestras cumplieron con el estándar de turbidez establecido. Para la estación 2, solo tres de las muestras cumplieron para la época seca y solo una para la época lluviosa. En la estación 3, solo una muestra cumplió para la época seca y tres cumplieron para la época lluviosa. No se observó correlación entre cambios en turbidez durante episodios de lluvia o con la apertura de la boca del estuario. A diferencia del Estuario del Río Hudson, USA, se reportó un aumento en turbidez en periodos altos de escorrentía o lluvias (Ralstone, Yellen, Woodruff, et al., 2020). En la RNPECMV no hubo correlación entre salinidad y turbidez, al contrario del estuario del río donde sí aumentaba la salinidad del estuario en eventos con mayor turbidez (Ralstone y colaboradores, 2020).

Los valores de salinidad en las tres estaciones cumplieron con el estándar establecido para aguas estuarinas SB (DRNA, 2019). Los valores promedios para cada estación se encuentran en la figura 12. La estación que mostró tener la salinidad más alta fue la estación 3 (véase figura 13). Era la más cercana a la desembocadura del estuario similar a lo reportado en el estuario del

Guadalquivir, al suroeste de la Península Ibérica, en donde el área más salada era cerca de la boca del estuario (Díez, Contreras , Polo et al., 2013). En la RNPECMV no se observaron cambios en salinidad en la época seca, lluviosa o en la apertura del estuario, durante el período muestreado, similar a lo reportado por el investigador Jusino (2019) quien no encontró un patrón en la salinidad del estuario durante periodos de lluvia o sequía.

Figura 12: *Promedio de salinidad para cada estación*

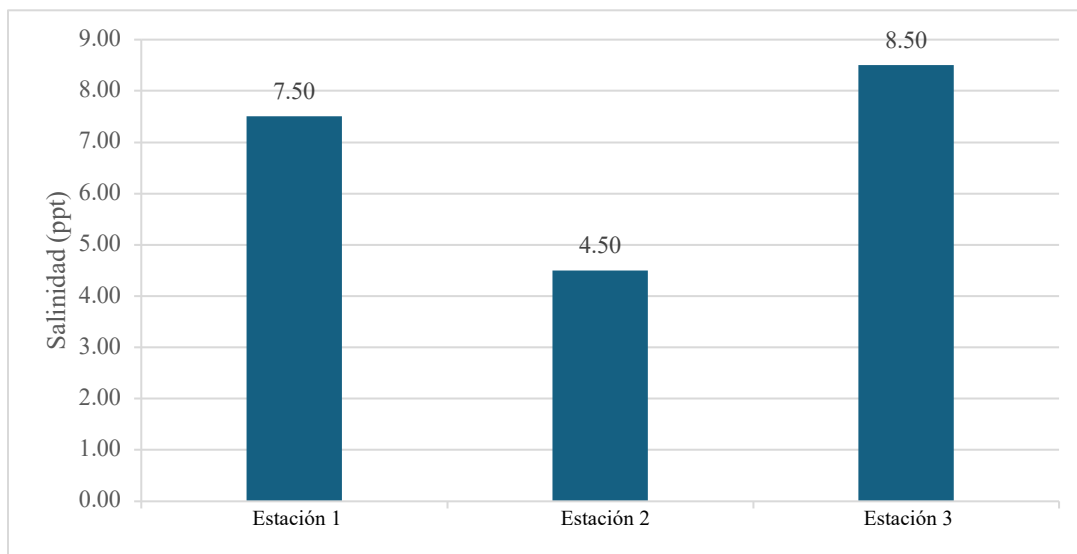
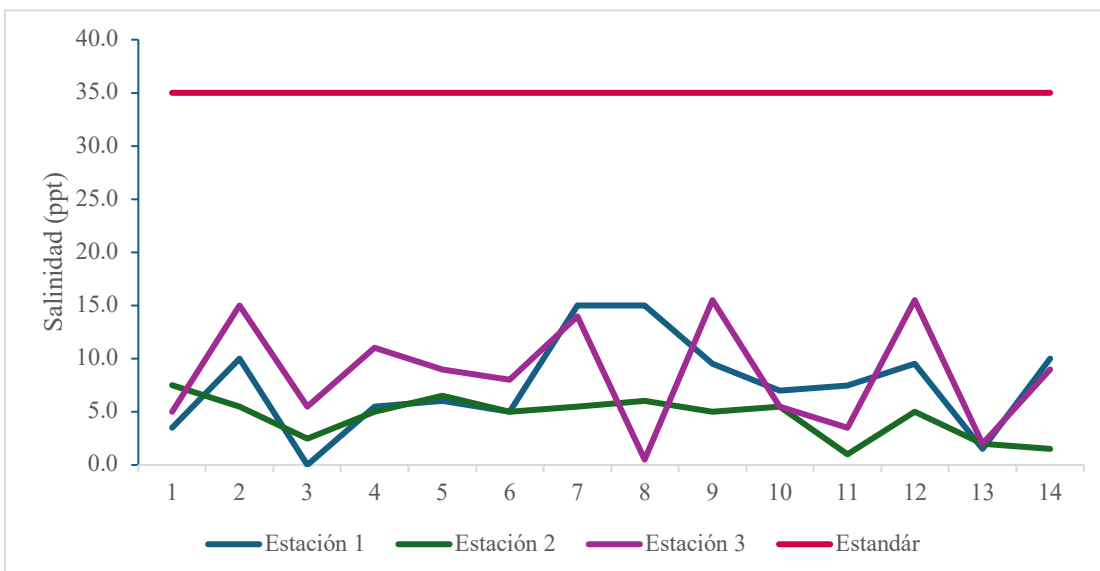


Figura 13: *Datos de salinidad para las tres estaciones*



Parámetros bacteriológicos

La cantidad de coliformes totales (NUT) y los coliformes patogénicos (MAC) en las tres estaciones de la RNPECMV fue menor a lo establecido para un estuario saludable SB en la mayoría de los muestreos, según la regulación de Puerto Rico (DRNA, 2019). Un 100% de las muestras de la estación 1 (véase tabla 4), donde se encontraron por debajo del estándar establecido, mientras que esto ocurrió en un 100% de las muestras para la estación 2 (véase tabla 5) y en 100% de las muestras de la estación 3 (véase tabla 6).

Tabla 4: *Coliformes totales (NUT) y patogénicos (MAC) en la estación 1*

Núm. Muestreos	Fecha	NUT	NUT (UFC)	MAC	MAC (UFC)
	Estándar				200 col/100mL
1	2/5/22	L	2	L	4
2	2/19/22	L	19	L	12
3	4/2/22	L	1	L	0
4	4/16/22	L	19	L	21
5	5/7/22	L	10	L	15
6	5/21/22	L	32	L	37
7	6/4/22	L	63	L	59
8	6/18/22	L	67	M	111
9	7/2/22	L	61	L	82
10	7/5/22	L	36	L	39
11	7/16/22	L	88	M	112
12	7/18/22	L	64	L	82
13	7/30/22	L	48	L	35
14	8/20/22	L	43	L	42

Nota. No cumplieron con el estándar de calidad de agua de Puerto Rico. L (Light), M (Moderate) y H (Heavy).

Tabla 5: *Coliformes totales (NUT) y patogénicos (MAC) en la estación 2*

Núm. Muestras	Parámetros Bacteriológicos	NUT	NUT (UFC)	MAC	MAC (UFC)
	Fecha				200 col/100mL
1	2/5/22	L	2	L	1
2	2/19/22	L	6	L	12
3	4/2/22	L	10	L	8
4	4/16/22	L	32	L	35
5	5/7/22	L	11	L	13
6	5/21/22	L	33	L	39
7	6/4/22	L	95	L	58
8	6/18/22	L	22	L	58
9	7/2/22	L	45	L	59
10	7/5/22	L	43	L	66
11	7/16/22	L	15	M	112
12	7/18/22	L	83	L	65
13	7/30/22	L	65	L	96
14	8/20/22	L	37	L	71

Nota. No cumplieron con el estándar de calidad de agua de Puerto Rico. L (Light), M (Moderate) y H (Heavy).

Tabla 6: *Coliformes totales (NUT) y patogénicos (MAC) en la estación 3*

Núm. Muestras	Parámetros Bacteriológicos	NUT	NUT (UFC)	MAC	MAC (UFC)
	Fecha				200 col/100mL
1	2/5/22	L	14	L	8
2	2/19/22	L	14	L	14
3	4/2/22	L	11	L	14
4	4/16/22	L	15	L	18
5	5/7/22	L	70	L	61
6	5/21/22	M	113	M	104

Tabla 6: *Coliformes totales (NUT) y patogénicos (MAC) en la estación 3 (continuación)*

Núm. Muestras	Parámetros Bacteriológicos	NUT	NUT (UFC)	MAC	MAC (UFC)
	Fecha				200 col/100mL
7	6/4/22	L	88	M	113
8	6/18/22	L	21	L	34
9	7/2/22	L	21	L	33
10	7/5/22	L	3	L	7
11	7/16/22	M	154	M	103
12	7/18/22	L	84	L	71
13	7/30/22	L	72	L	47
14	8/20/22	L	57	L	43

Nota. No cumplieron con el estándar de calidad de agua de Puerto Rico. L (Light), M (Moderate) y H (Heavy).

Se identificó una correlación alta entre los coliformes y la turbidez, lo que es de esperarse, ya que las bacterias se adhieren a las partículas suspendidas en la columna de agua (Lawrence, 2012). Las muestras que salieron moderadas fueron tomadas en periodos donde la turbidez estaba alta. Similar al estudio de Lawrence (2012) en el río Chattahoochee en Georgia, donde se observó una correlación entre coliformes y turbidez. No se observó una correlación entre los parámetros biológicos y episodios de lluvia, a diferencia del estudio realizado por Udyavara, Thangavel & Nagarajappa en el 2019, donde aumentaban los coliformes por la lluvia.

Comparación entre las estaciones de la RNPECMV

Se realizó la prueba estadística de ANOVA, con 95% de confianza, para determinar si existían diferencias significativas en los parámetros fisicoquímicos de calidad de agua evaluados entre las estaciones de la RNPECMV.

Para el análisis se utilizó el valor crítico como el límite entre la región de aceptación y la región de rechazo. Un valor F calculado a la derecha del valor crítico (p) indica diferencias entre

los parámetros calculados. Si se obtiene un F calculado menos que el valor crítico es que no existen diferencias entre los parámetros calculados. A continuación, los resultados del ANOVA comparando los parámetros fisicoquímicos de todas las estaciones ente ellos (véase tabla 7).

Tabla 7: Estadísticas descriptivas de los parámetros fisicoquímicos determinados en las estaciones monitoreadas de RNPECMV

<i>Parámetro</i>	<i>Estación</i>	<i>N</i>	<i>Promedio</i>	<i>Desviación estándar</i>	<i>Error estándar</i>
Oxígeno disuelto (OD)	E1	28	4.224	0.96	0.1814
	E2	28	3.222	1.493	0.2822
	E3	28	3.578	1.339	0.2530
Temperatura (°C)	E1	28	27.139	2.019	0.3816
	E2	28	27.243	1.814	0.3428
	E3	28	27.464	1.545	0.2920
pH	E1	28	7.667	0.113	0.0214
	E2	28	7.693	0.119	0.0225
	E3	28	7.654	0.121	0.0229
Tubidez (NTU)	E1	28	13.467	22.3	4.2143
	E2	28	15.678	10.869	2.0540
	E3	28	33.591	36.834	6.9610
Salinidad (%)	E1	28	7.500	4.426	0.8364
	E2	28	4.536	2.045	0.3865
	E3	28	8.500	5.074	0.9589

Nota. Se utilizó JASP Team (2020). JASP (versión 0.14.1) [software de ordenador]. BibTeX para obtener el cálculo de estadísticas descriptivas.

Se encontró que los parámetros de OD ($p=0.016$), turbidez ($p=0.008$) y salinidad ($p=0.001$) fueron diferentes en las tres estaciones. Mientras que no se identificaron diferencias en los parámetros de pH y temperatura en las tres estaciones. Estas diferencias entre las estaciones pueden deberse a las características del área muestreada. La estación 1 está en la desembocadura del estuario mientras que la estación 2 es marisma, por lo que son áreas que no se comportan igual, estas dependen de factores como: lluvia, cambios geomorfológicos y marejada para su comportamiento. La estación 3 es la parte media del estuario, debido que queda en una cerca de una curvatura, donde depende de factores similares a los de la estación 2.

Tabla 8: Prueba de análisis de varianza (ANOVA) de los parámetros fisicoquímicos determinados en las estaciones monitoreadas de RNPECMV.

Parámetro	$F_{\text{obs}(2,39)}^*$	$p (\alpha= 0.05)$	Efecto de tamaño (η^2)
Oxígeno disuelto (OD)	*4.386	0.016	0.098
Temperatura (°C)	0.237	7.789	0.006
pH	0.818	0.445	0.020
Turbidez (NTU)	*5.187	0.008	0.114
Salinidad (%)	*7.210	0.001	0.151

* - $F_{\text{tab } \alpha = 0.05(2,39)} = 0.1195$, $N = 28$

Nota. Se utilizó JASP Team (2020). JASP (versión 0.14.1) [software de ordenador]. BibTeX para realizar la prueba de ANOVA.

Se realizó la prueba de Tukey en los parámetros que resultan del ANOVA con diferencias para identificar los parámetros diferentes entre cada estación. Los resultados de la prueba Tukey, (véase tabla 9), indica que los niveles de oxígeno disuelto en las estaciones 1 y 2 no tienen diferencias significativas ($p = 0.012 < 0.05$), mientras que en las estaciones 1 y 3 ($p = 0.150 > 0.05$), y las estaciones 2 y 3 ($p = 0.555 > 0.05$) si demostraron diferencias significativas. La diferencia

puede deberse a que la zona 1 y 2 tienen más flujo de agua por estar más cerca de la costa, lo que no ocurre en la estación 3, donde el agua se mantiene más estancada.

Se identificaron diferencias significativas en turbidez entre la estación 1 y la estación 2 ($p=0.944$), mientras que en las estaciones 1 y 3 ($p=0.012$) al igual que la 2 y 3 ($p=0.028$) no existen diferencias significativas, posiblemente resultaron estos valores porque la estación 2 es una zona que recibe gran cantidad de materia orgánica y escorrentías, lo que la hace propensa a que su turbidez sea más alta que la estación 1.

Existen diferencias significativas en salinidad entre la estación 1 y la estación 3 ($p=0.629$), mientras que en las estaciones 1 y 2 ($p=0.021$) al igual que la 2 y 3 ($p=0.001$) no concurren diferencias significativas, posiblemente debido a la ubicación de cada estación. La estación 1 al ser la desembocadura del estuario tiene mayor contacto con el agua salada que la estación 3 que queda retirada de la apertura del estuario.

Tabla 9: Prueba Tukey de los parámetros fisicoquímicos determinados en las estaciones monitoreadas de RNPECMV

Parámetro	Estación	Diferencia de medias	p Tukey
Oxígeno disuelto	Estación 1 – Estación 2	1.002	0.012
	Estación 1 - Estación 3	0.646	0.150
	Estación 2 – Estación 3	-0.356	0.555
Turbidez	Estación 1 – Estación 2	-2.211	0.944
	Estación 1 - Estación 3	-20.124	0.012
	Estación 2 – Estación 3	-17.912	0.028
Salinidad	Estación 1 – Estación 2	2.964	0.021
	Estación 1 - Estación 3	-1.000	0.629
	Estación 2 – Estación 3	-3.964	0.001

Nota. Se utilizó JASP Team (2020). JASP (Version 0.14.1) [software de ordenador]. BibTeX para realizar la prueba de Tukey.

Similar a la investigación de Jusino (2019), identificamos diferencias entre turbidez entre las diferentes estaciones de la reserva. Sin embargo, Jusino, no reporta diferencia en oxígeno

disuelto, mientras que este estudio de investigación sí las evidencia. Esta diferencia puede deberse a que el investigador del estudio citado muestreó en la boca de los caños, a diferencia de esta tesis, donde se tomaron muestras alejadas de la boca del caño (estación 2 y 3).

Análisis de imágenes de satélite

Se utilizaron imágenes de satélite de “Google Earth” para evaluar el posible cambio en las áreas pobladas por mangle de la reserva RNPECMV, desde la fecha de su designación, año 2016 hasta el año 2022. Se manejaron imágenes de satélite para evaluar la posible pérdida de mangle como verbalizó el grupo ambientalista Ciudadanos Aguadeños Pro-Conservación del Ambiente el cual puntualizó que, “había pérdida de mangle en el estuario”, a pesar de que no sostenían evidencia de este suceso ni desde cuándo comenzaron a observar esta pérdida.

Para identificar el mangle vivo de mangle muerto se utilizó como referencia la imagen del año 2016 (véase figura 14), donde se observa la RNEPECMV con una cobertura de área completa de mangle. Para el propósito de análisis, el mangle vivo, en las imágenes correspondía a toda área vegetativa de color verde, mientras que el mangle muerto era toda el área donde se observó el color marrón o donde faltaba vegetación. Se utilizaron imágenes desde el año 2016, cuando se asume que la reserva se encontraba en su estado más saludable, y de la que se conoce el área. La imagen del año 2016 se utilizó para validar la determinación del área de mangle, empleando las imágenes al comparar el área estimada de esta con el área de mangle en el documento de designación como reserva (DRNA, 2016) y la imagen satélite de ese año. El área total de cobertura total para el año 2016 (véase figura 14), fue de 186,694 m², en la observación de las imágenes de satélite se determinó que la totalidad del mangle estaba vivo para ese año (DRNA, 2016).

En el 2017, se utilizaron dos imágenes, una antes (véase figura 15), y la otra después del Huracán María (véase figura 16). Ese año, dos huracanes afectaron la isla de Puerto Rico, el

huracán Irma que llegó a la isla el 7 de septiembre del 2017, fue categoría 5, el cual entró por el norte de Puerto Rico, y luego el huracán María, que tocó tierra el 20 de septiembre de 2017, en el sureste de Puerto Rico como categoría 4, cruzando la isla de forma diagonal, teniendo salida por el noroeste de la isla, cerca de la RNPECMV. Según reportado por Yu y Gao (2020), el huracán María devastó la flora de Puerto Rico. El censo terrestre del Yunque, situado en el área noreste de Puerto Rico, luego del huracán demostró que la cantidad de mangles era el doble a las reportadas previamente en tormentas anteriores. El efecto de los huracanes fue evidenciado en el análisis de las imágenes del año 2017, donde se observó que, para principios del año 2017 (véase figura 15), la totalidad del mangle aún estaba vivo. Luego del huracán María, (véase figura 16), se observó mayor mortalidad de mangle en las ramificaciones del río, observándose que un área de 49,683 m² del bosque estaba muerto, lo que corresponde a una pérdida de 26% de la población del mangle (Marilier, Resetar, Lachman et al., 2022; Yu & Gao, 2020).

Figura 14: *Imagen de Satélite de la RNPECMV para el año 2016 (b)*



Nota. La imagen satelital fue obtenida de “Google Earth”, su proveedor es Maxar Technologies. Fecha de la imagen: 30 de marzo de 2016.

Entre los años 2018 y 2023 se observó una recuperación de la población de mangle en la RNEPECMV (véase las figuras de la 17 a la 22), aunque las ramificaciones del caño aún no se han recuperado completamente. Se observó que la cobertura de vegetación alrededor de las ramificaciones del caño es menos densa que antes del paso del Huracán María (véase figura 13) y aún con áreas con mangle muerto a lo largo de las ramificaciones.

Figura 15: *Imagen de Satélite de la RNEPECMV para el año 2017 (c)*



Nota. La imagen satelital fue obtenida de “Google Earth”, su proveedor es Maxar Technologies. Fecha de la imagen: 2 de febrero de 2017.

Figura 16: *Imagen de Satélite de la RNPECMV para el año 2017 luego del paso Huracán María*
(d)



Nota. La imagen satelital fue obtenida de “Google Earth”, su proveedor es Maxar Technologies. Fecha de la imagen: 29 de noviembre de 2017.

De acuerdo con la literatura científica, los investigadores Ward, Friess, Day y colaboradores en el 2016, los árboles que sobrevivieron al huracán deben de alcanzar la cobertura del dosel de 12 la 18 meses. Las áreas con daños más extensos pueden tomar alrededor de 15 años para recuperarse, lo cual depende de la hidrología del estuario. La temperatura, el pH y la salinidad son los parámetros que pueden tener un efecto en la salud de los mangles. La temperatura que obtuvimos en nuestras estaciones se mantuvo dentro de 28 a 32 °C, siendo el rango para la fotosíntesis óptima de sus hojas y para sus procesos bioquímicos. El promedio del pH que se obtuvo en cada una de las estaciones se mantuvo en el rango apropiado para promover el crecimiento óptimo para los mangles (6.5 a 8.5). La salinidad alta (18 a 30ppt) afecta el crecimiento, tamaño y la cantidad de nutrientes que pueden absorber los mangles, sin embargo, alta salinidad puede promover el crecimiento del dosel, mientras que la salinidad baja (0.5 a 5ppt) promueve el crecimiento de los mangles (Ahmed et al., 2022; Dookie, Jailishun & Adil-Ansari, 2022).

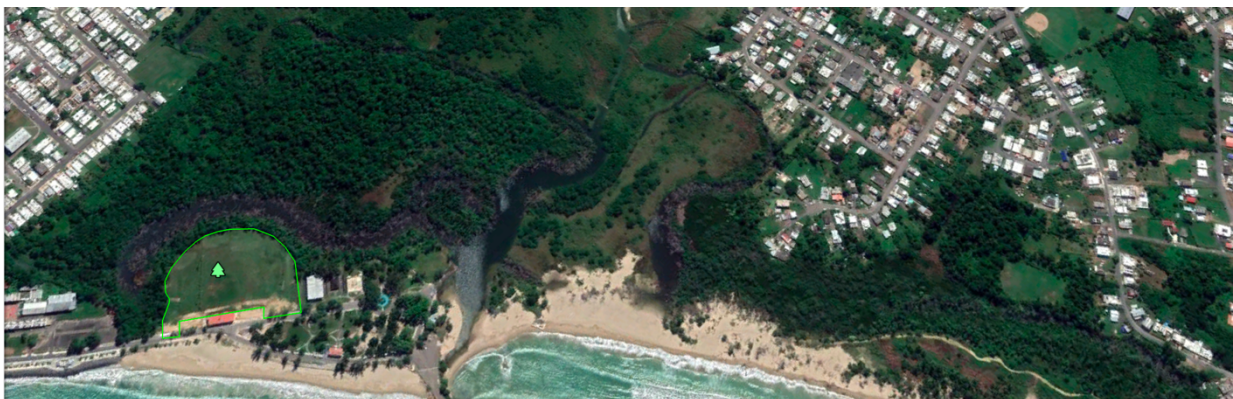
En este estudio, la salinidad se mantuvo entre baja y media (5 a 17ppt) lo que significa que, de acuerdo con la literatura, son condiciones óptimas para promover el crecimiento. Los mangles son la primera línea de defensa contra huracanes, inundaciones y fuertes mareas, por tanto, luego de eventos atmosféricos fuertes puede ocurrir una severa mortandad en los bosques de mangles, lo que es considerado como parte del proceso de ciclos del desarrollo del sistema (Escalera, López & Rivera, 2020).

Figura 17: *Imagen de Satélite de la RNPECMV para el año 2018 (e)*



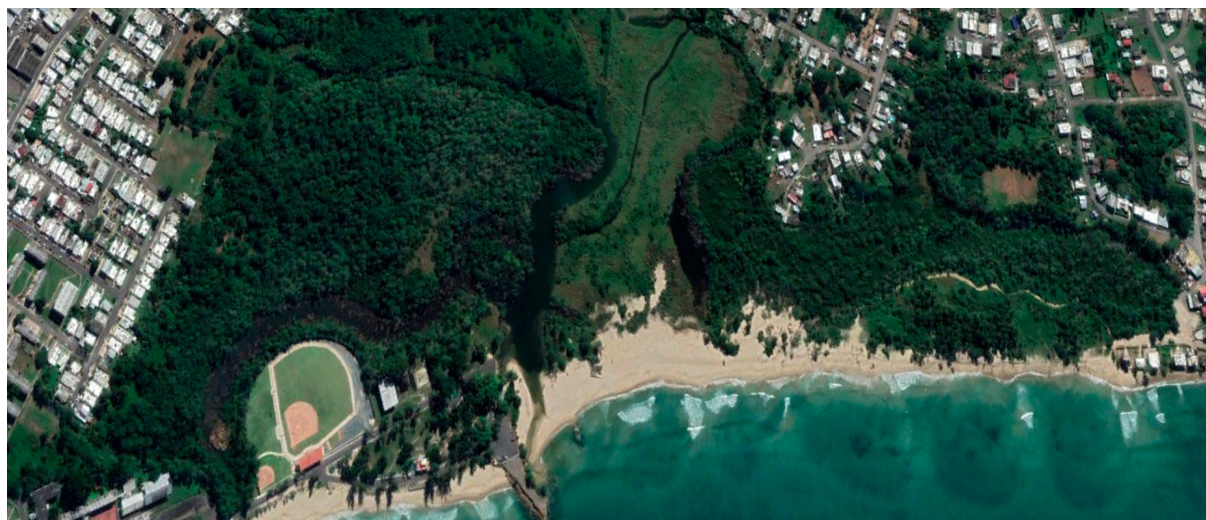
Nota. La imagen satelital fue obtenida de “Google Earth”, su proveedor es Maxar Technologies. Fecha de la imagen: 1ro de mayo de 2018.

Figura 18: *Imagen de Satélite de la RNPECMV para el año 2019 (f)*



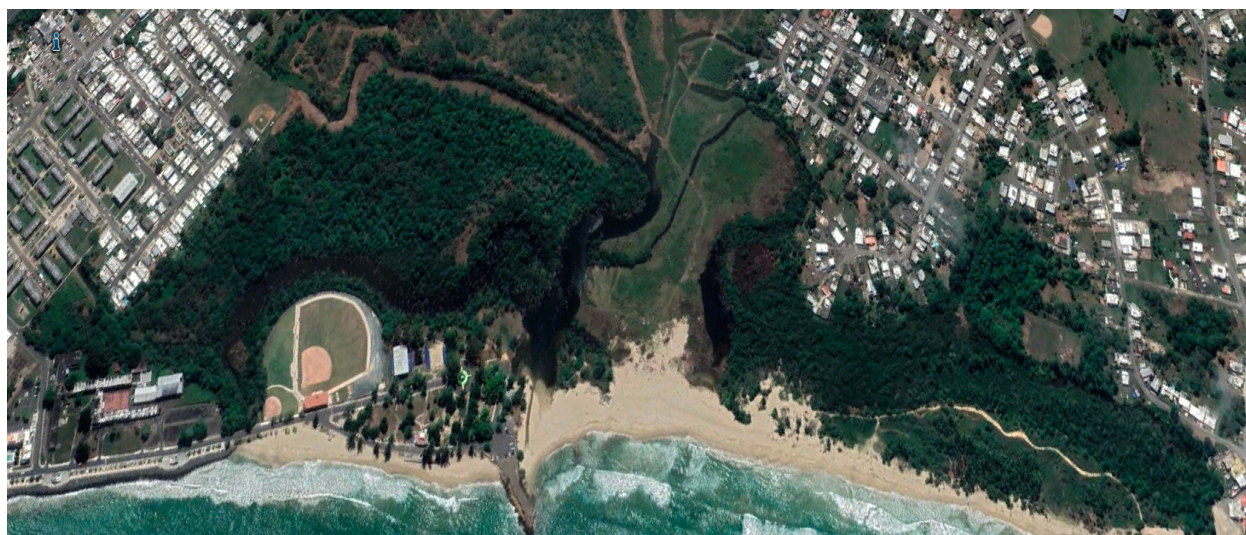
Nota. La imagen satelital fue obtenida de “Google Earth”, su proveedor es Maxar Technologies. Fecha de la imagen: 7 de diciembre de 2019.

Figura 19: *Imagen de Satélite de la RNPECMV para el año 2020 (g)*



Nota. La imagen satelital fue obtenida de “Google Earth”, su proveedor es Maxar Technologies. Fecha de la imagen: 12 de diciembre de 2020.

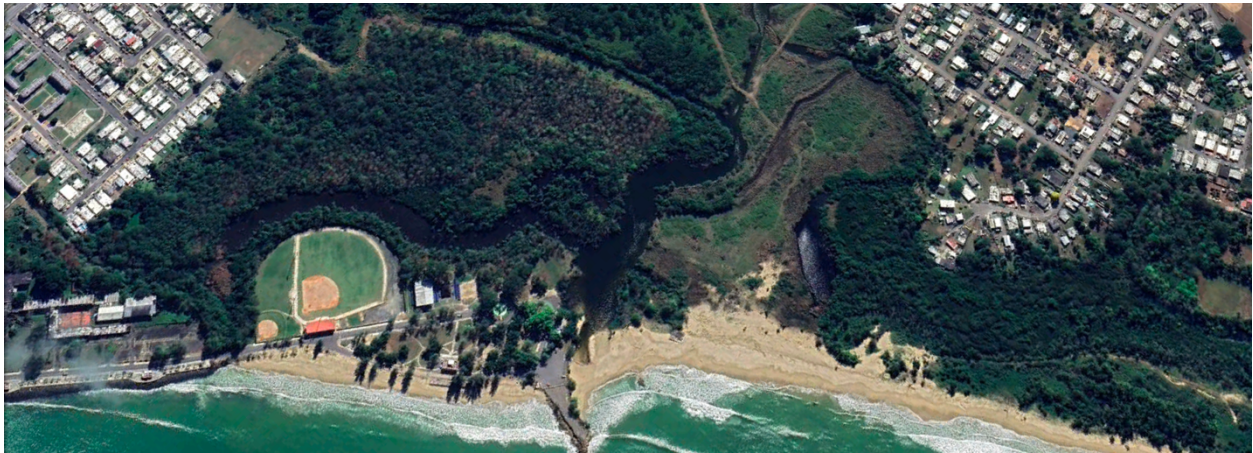
Figura 20: *Imagen de Satélite de la RNPECMV para el año 2021 (h)*



Nota. La imagen satelital fue obtenida de “Google Earth”, su proveedor es CNES/Airbus. Fecha de la imagen: 11 de Abril de 2021.

Figura 21: *Imagen de Satélite de la RNPECMV para el año 2022 (i)*

Nota. La imagen satelital fue obtenida de Google Earth, su proveedor es CNES/Airbus. Fecha de



la imagen: 1ro de enero de 2022.

Figura 22: *Imagen de Satélite de la RNPECMV para el año 2023 (j)*

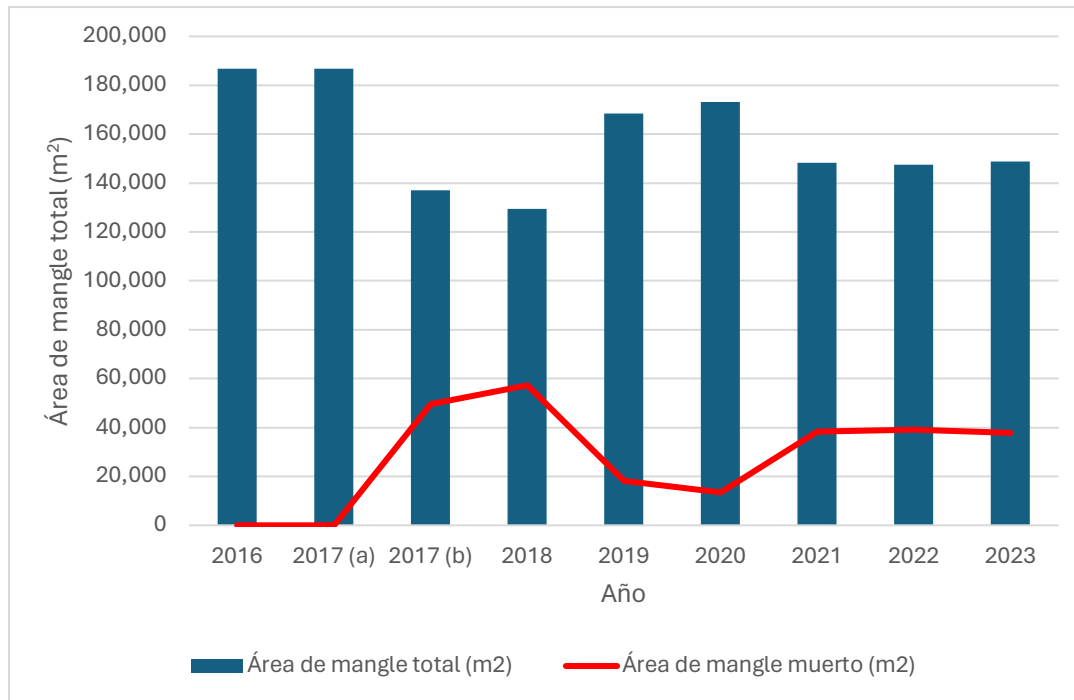


Nota. La imagen satelital fue obtenida de “Google Earth”, su proveedor es CNES/Airbus. Fecha de la imagen: 5 de mayo de 2023.

La figura 23 presenta el área estimada de mangle vivo en la RNPECMV desde el año 2016 al año 2023. Se observó que la población de mangle comenzó a recuperarse después del paso de los Huracanes en el año 2017, no obstante, se tardó dos años en recuperarse, casi en su totalidad. Esto coincide con el reporte de Escalera y colaboradores (2020), quienes reportaron la recuperación del bosque de mangle después de 2 años luego del paso del huracán María. A pesar

de observar recuperación del bosque de mangle en la reserva, se llega a la conclusión de que existe alrededor de un 20% de que éste no se ha recuperado completamente.

Figura 23: *Área estimada de mangle vivo y mangle muerto de la RNPECMV*



CONCLUSIÓN

Los resultados logrados brindan información de referencia sobre la calidad de agua, patrones de lluvia y salinidad en la Reserva Natural del Estuario Pantano Espinar y Caño Madre Vieja. Parte de la información del estuario se obtuvo del Documento de Designación Reserva Natural del Estuario Pantano Espinar y Caño Madre Vieja, documento que el Departamento de Recursos Naturales y Ambientales de Puerto Rico ejecutó. Los datos reportados son del año 2016, por lo cual la data actualizada previo a la fecha de los muestreos era inexistente.

Durante los seis meses de investigación, solo en el 43% de los muestreos se documentó lluvia y en el 86% de los muestreos la desembocadura estuvo abierta. La temperatura, salinidad y pH se encontraban dentro de los estándares del DRNA de Puerto Rico referenciados para agua estuarina SB. No obstante, el oxígeno disuelto y la turbidez se encontraron fuera de los rangos recomendados para un estuario saludable. No se reportaron cambios en los parámetros estudiados durante los eventos de lluvia y sequía, o con cambios en salinidad. Del análisis biológico se observó la presencia de coliformes totales y coliformes patogénicos, pero en cantidades bajas, cumpliendo con el estándar establecido para aguas estuarinas SB.

Al comparar los resultados de calidad de agua, patrones de lluvia y salinidad de las 3 estaciones se observó que se diferenciaron en OD, turbidez y salinidad. La cantidad de OD y salinidad fueron diferentes entre la estación 1 y la estación 3, mientras que la turbidez fue diferente entre las estaciones 1 y 2 muestreadas en este estudio.

La temperatura, el pH y la salinidad son parámetros que pueden tener un efecto en la salud de los mangles. En este estudio de investigación se reportaron márgenes óptimos para promover el crecimiento de los mangles.

Mediante las imágenes de satélite se monitoreó un período de siete años para observar el comportamiento de la población del bosque de mangles de la RNPECMV. Mediante la observación se determinó pérdida del bosque de mangle luego del huracán y la recuperación lenta del bosque. Así, luego del paso de los huracanes se observó una disminución de casi un 30% del bosque, y luego de dos años se observó recuperación de la población en el bosque casi en su totalidad. Luego de casi seis años del paso del Huracán, la población de mangle no ha regresado a su tamaño original observado en el año 2016.

La calidad del agua de la RNPECMV fue generalmente buena, por lo que esta no se puede asociar a la mortandad de mangles o a la disminución de la recuperación luego del paso de los huracanes. El paso de los huracanes puede explicar la disminución drástica en la población, posiblemente debido al viento, oleaje y las escorrentías causadas por el huracán, durante el año 2017. La recuperación del bosque fue observada en las imágenes utilizadas en nuestro estudio, sin embargo, el bosque no se ha recuperado completamente. Actualmente, el tamaño del bosque de mangle de la RNPECMV es un 26% menos que en el 2016, y dado que ya se conoce que la calidad del agua no es el factor afectando el bosque, es importante identificar otras posibles razones que expliquen la mortandad de mangles en la RNPECMV.

RECOMENDACIONES

Los resultados en esta investigación reflejan que la calidad del agua de la RNPECMV es buena y propicia para el crecimiento del bosque de mangles. Sin embargo, dado que el bosque no se ha recuperado completamente se necesita ampliar este estudio para identificar las razones por las que el bosque no se ha recuperado completamente. Se necesitan realizar muestras de suelo, documentar y observar cambios en marejada, muestrear por un periodo más largo de tiempo y en diferentes ubicaciones del bosque de mangle. Se recomienda lo siguiente: continuar realizando evaluaciones de la calidad de agua en diferentes épocas del año para obtener más información sobre la calidad de agua en los cuerpos de agua de la RNPECMV. Se recomienda un estudio de suelo del bosque de mangle para evaluar la disponibilidad de nutrientes. Realizar pruebas de Demanda Bioquímica de Oxígeno (BOD) y Demanda Química de Oxígeno (COD). Por otro lado, se recomienda realizar análisis de calidad de agua río arriba, que incluya surfactantes. A su vez, estudiar los cambios geomorfológicos del estuario durante un año. Como también, realizar un estudio de teledetección para evaluar otros parámetros que pueden afectar el crecimiento del bosque de mangle. Se exhorta realizar cálculos de índices de vegetación de diferencia normalizada (NDV) para la detección más específica de la salud de los mangles. Promover la siembra de mangles para ayudar a la recuperación del bosque. Por último y no menos importante el identificar las bacterias encontradas en el estuario.

REFERENCIAS

- Ahmed, S., Kumar, S., Friess, D., Kamruzzaman, M., Jacobs, M., Akramul, M., . . . Pretzsch, H. (2022). Salinity reduces site quality and mangrove forest function. From monitoring to understand. *Science of Total Environment*, 853.
- Arachchilage, K., Pullukuttige, L., Huxham, M., Dahdouh, F., & Koedam, N. (2018). The effects if salinity on growing and survival of mangroves seedlings changes with age. . *Acta Botanica Brasilica*, 37 - 46.
- Bachoon, D. S., Markand, S., Otero, E., Perry, G., & Ramsubaugh, A. (2010). Assessment of non-point source of fecal pollution in costal waters of Puerto Rico. *Marine Pollution*.
- Biber, P. (2006). Measuring the effects of salinity stress in the red angrove, *Rhizophora mangles* L. . *African Journal of Agricultural Reserch*.
- Branoff, B. (2017). Quantifying the influence of urban land use on mangroves biology and ecology: A meta-analysis. *Global Ecology and Biogeography*.
- Branoff, B. (2019). Mangrove disturbance and repose following the 2017 hurricane season in Puerto Rico. *Estuaries and Coast*.
- Cajueiro, L., Rodriguez da Costa, Á. K., Marino da Costa, R., Megalhães, A., Flores, M. d., & Jimenez, J. A. (2017). *Influence of Drought Event on Hydrological Characteristics of Small Etuary on the Amazon Mangrove Coast*. *Estuaries and Coast* .
- Callum, E., Sarah, M., & Downes, B. J. (2023). The influence of geomorphology and environmental conditions on stratification in intermittenly Open/Closed Estuaries. *Estuarine, Costal and Shelf Science*, 108341.
- Chaminé, H. I., Pereira, A. J., Teodoro, A. C., & Teixeira, J. (2021). Remote sensing and GIS application in earth and environmental systems sciences. *SN Applied Sciences*, 870.

Ciudadanos Aguadeños Pro-Conservación del Ambiente. (2020). *Mortandad de mangles.*

Aguadilla.

Day, J. W., Yañez, A., & Hall, C. A. (1990). Estuarine Ecology. *Estuaries*.

Descroix, L., Sané, Y., Thior, M., Manga, S.-P., Boubacar, D. B., Mingou, J. Safietou, S. (2020).

Inverse Estuaries in West Africa: Evidence of the Rainfall Recovery? *MDPI*, 647.

Díez, M. M., Contreras, E., Polo, J. M., & Losada, M. A. (2013). Spatio-temporal distribution, along-channel transport, and post-river-flood recovery of salinity in the Guadalquivir estuary (SW Spain). *Journal of Geophysical Research Oceans*, 118, 1-12.

DRNA. (2016). Documento de Designación Reserva Natural del Estuario Pantano Espinar y Caño Madre Vieja. Departamento de Recursos Naturales y Ambientales.

DRNA. (2019). Puerto Rico Water Quality Standards Regulation. Department of Natural and Environmental Resources.

Echeverría-Ávila, S., Pérez, R., Zaldívar, A., Canales, J., Brito, R., Merino, M., & Vovides, A. (2019). Regeneración natural de sitios de manglar degradado en respuesta a la restauración hidrológica. *Madera y Bosques*.

Ellison, A. (2008). Mangrove ecology - application in forestry and coastal zone management. *Aquatic botany*, 77.

Ellison, J. (1999). Impacts of sediment burial on mangroves. *Marine Pollution Bulletin*.

EPA. (2006). Voluntary Estuary Monitoring Manual. En U. S. Agency, Volunteer Estuary Monitoring Manual (Vol. Second Edition). EPA.

EPA. (2006). Voluntary Estuary Monitoring Manual. Volunteer Estuary Monitoring Manual, A Methods Manual, Second Edition.

- Escalera, I., López, T., & Rivera, C. F. (2020). Mortalidad de mangles en Cabo Rojo, Puerto Rico. Centro Interdisciplinario de Estudios del Litoral.
- Escalera, I., Rivera, C., & López, T. (2020). Mortalidad de mangles en Cabo Rojo, Puerto Rico. Apuntes de investigación.
- Evangelides, C., & Nobajas, A. (2020). Red-Edge Normalised Difference Vegetation Index (NDVI705) from Sentinel-2 imagery to assess post-fire regeneration. Remote Sensing Applications: Society and Environment.
- Ferrero, D. (2010). Estrategias recomendadas de siembra de mangle rojo (*Rhizophora Mangle*) en el Estuario de la Bahía de San Juan, Puerto Rico. San Juan: Universidad Metropolitana Escuela Graduada de Asuntos Ambientales San Juan, Puerto Rico.
- Garcés, O. (2016). Evaluación de la calidad de ambiental de los mangles de la ciénaga de Mallorquín, Departamento del Atlántico. Invemar, 1 - 40.
- García , A. (2016). Orden Ejecutiva del Gobernador del Estado Libre Asociado de Puerto Rico .
- Google Earth Pro. (s.f.-a). (2022) Reserva Natural Pantano Espinar y Caño Madre Vieja].
- Google Earth Pro. (s.f.-b). (2022) [Reserva Natural Pantano Espinar y Caño Madre Vieja].
- Google Earth Pro. (s.f.-c). (2022) [Reserva Natural Pantano Espinar y Caño Madre Vieja].
- Iriarte , A., Uriarte, I., Villate, F., & Intzausti, L. (2014). Dissolved Oxygen in a Temperate Estuary: the Influence of Hydro-climatic Factors and Eutrophication at Seasonal and Inter-annual Time Scales. Coastal and Estuarine Research Federation, 1000-1015.
- Jiabi, D., & Park, K. (2019). Estuarine salinity recovery from an extreme precipitation event: Hurricane Harvey in Galvestone Bay. Science of the Total Environment , 1049-1059.
- Jiménez , J. A., & Lugo, A. E. (1985). Tree Mortality in Mangrove Forests. Biotropica, 177-185.

- Jusino, E. (2019). Comparación de la Calidad del Agua y Cambios Geomorfológicos de los Estuarios de la Reserva Natural Caño Boquillas en Mayaguez-Añasco, Puerto Rico.
- Kai, X., Hailong, L., Shananan, M., Zhang, X., Xuejing, W., Zhang, Y., Haiyan, L. (2019). Costal water quaity assessment and groundwater transport in a subtropical mangrove swamps in Daya Bay, China. *Science of Total Environment*, 1419-1432.
- Kathiresan, K., & Bingham, B. (2001). *Biology of Mangroves and Mangrove Ecosystems*. *Advances in marine biology* , 81-251.
- LaMotte Biopaddles. (2018). Technical Document. LaMotte.
- LaMotte Biopaddles. (s.f.). NUT/MAC.
- Lovelock, C., McKee, K. L., Lòpez, L., Krauss, K. W., Ewe, S., & Sousa, W. P. (2008). Environmental drivers in mangrove establishments and early development: A review. *Aquatic botany*, 105-127.
- Marlier, M. E., Resetar, S. A., Lachman, B. E., Anania, K., & Adams, K. (2022). Remote sensing for natural disaster recovery: Lessons learned from Hurricanes Irma and Maria in Puerto Rico. *Environmental Science and Policy*, 153-159.
- Maurya, K., Mahajan, S., & Chaube, N. (2021). Remote sensing techniques: mapping and monitoring of mangroves ecosystem - a review. *Complex & Intelligent Systems*, 2797-2818.
- Méndez-Tejeda, R., Pérez-Valentín, K., Barreto , M., Cabrera , N., Bonano, V., Díaz, E., & Castro, A. (2021). El Estado de la Erosión Costera Post-Huracán María En Puerto Rico. Chile: *Revista Geográfica de Chile Terra Australis*.
- Mottone, C., & Sheaves, M. (2017). Patterns, drivers and implications of dissolved oxygen dynamics in tropical mangrove forest. *Estuarine, Costal and Shelf Science*, 205-2013.

- Nagelkeren, I., Blaber, S., Bouillon, S., Green, P., Haywood, M., Sasekumar, A., & Somerfield, P. (2008). The habitat function of mangroves for terrestrial and marine fauna: A review. *Aquatic Botany* 89, 155-185.
- Nayak, G., & Noronha, D. C. (2018). *Estuarine Mudflat and Mangrove Sedimentary Environments along Central West Coast of India*. Science Forecast Publication.
- Nethaji, M., Nivas, H., Kanmani, T., & Parthiban, S. (2016). A study of water quality status of mangroves vegetation in Pichavaram Estuary. *Journal of Agriculture and Ecology Research International*, 1-11.
- Noriega, C. E., Muniz, K., Flores-Monte, M. J., Macedo, S., Araujo, M., Feitosa, F., & Larceda, S. R. (2009). Series temporales de variables hidrobiológicas en un estuario tropical (Brasil). *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 93-108.
- Numbere, A., & Gerardo, C. (2017). Effect of Temperature and Precipitation on Global Mangrove Rhizophora Species Distribution. *American Journal of Environmental Sciencies*.
- Ortíz, A., Urrego, L., Robles, K., & Romero, M. (2018). Diversidad e interacciones biológicas en el ecosistema de manglar. *Revista de Ciencias*, 111-127.
- Osland, M., Lopez, J., Feher, L., & Day, R. (2018). Mangrove forest in a rapidly changing world: Global change impacts and conservation opportunities along the gulf of Mexico coast. *Estuarine, costal and Shelf Science*.
- Osorio, A. J., Wingfield, M. J., & Roux, J. (2016). A review of factors associated with decline and death of mangroves, with particular reference to fungal pathogens. *South Africa Journal of Botany*, 295-301.

- Quintero, H. E. (2012). Ponencia de Héctor Quintero Vilella sobre el Proyecto del Senado 606 para establecer la Ley de Reserva Natural del Estuario de Espinar y el Caño Madre Vieja. San Germán, Puerto Rico.
- Rabalais, N. N. (2019). The significance of ocean deoxygenation for estuarine and costal benthos. *Ocean deoxygenation: Everyone's problem*, 379-399.
- Ralstone, D. K., Yellen, B., Woodruff, J. D., & Fernald, S. (2020). Turbidity Hysteresis in an Estuary and Tidal River Following an Extreme Discharge Event. *Geophysical Research Letters*, 47(15).
- Reef, R., Feller, I. C., & Lovelock, C. E. (2010). Nutrition of Mangroves. *Tree Physiology*, 1148 - 1160.
- Retnaningdyah, C., Ridlo, I. A., Febriansyah, S. C., & Nusantara, B. O. (2021). Water quality evaluation of some mangrove ecosystems with variations of time restoration in South Malang, East Java, Indonesia. *The 11th International Conference on Global Resource Conservation*, 743.
- Rossi, R., Archer, S., Giri, C., & Layman, C. (2020). The role of multiple stressors in a dwarf red mangrove (*Rhizophora mangle*) dieback. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 237.
- Sawyer, C., & McCarty. (1978). *Chemistry for Environmental Engineering* (3rd ed). New York: Hill Book Company.
- Schmidt, S., Diallo, I., Derriennic, H., Hélène, F., & Lepage, M. (2019). Exploring the Susceptibility of Turbid Estuaries to Hypoxia as a Prerequisite to Designing a Pertinent Monitoring Strategy of Dissolved Oxygen. *Frontiers in Marine Science*, 352.
- Sippo, J. z., Maher, D. T., Douglas, T., Ceylena, H., & Santos, I. R. (2015). Are mangroves drivers or buffers of coastal acidification? Insights from alkalinity and dissolved

- inorganic carbon export estimates across a latitudinal transect. *Global Biogeochemical Cycles*, 753-766.
- Sippo, J., Lovelock, C., Santos, I., Sanders, C., & Maher, D. (2018). Mangrove mortality in a changing climate: An overview. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*.
- Taillie, P. J., Roman-Cuesta, R., Lagomasino, D., Cifuentes-Jara, M., Fatoyinbo, T., Ott, L. E., & Poulter, B. (2020). Widespread mangrove damage resulting from the 2017 Atlantic mega hurricane season. *Environmental Research Letters*.
- Udyavara, V., Thangavel, S., & Nagarajappa, M. (2019). Occurrence and distribution of pollution indicator bacteria in shellfish harvesting waters of Karnataka. *Indian Journal of Geo Marine Sciences*, 217-222.
- USGS. (s.f.). Biological Oxygen Demand (BOD) and Water.
- Wilson, R. (2017). Impacts of Climate Changes on Mangrove Ecosystems in the Coastal and Marine Environments of Caribbean Small Island Developing States (SIDS). *Caribbean Marine Climate Change Report Card*, 60-82.
- Xinping, H., & Wei-Jun, C. (2013). Estuarine acidification and minimum buffer zone - A conceptual study. *Geophysical Research Letters*, 5176-5181.
- Yu, M., & Gao, Q. (2020). Topography, drainage capability, and legacy of drought differentiate tropical ecosystem response to and recovery from major hurricanes. *Environmental Research Letters*.
- Zhang, K., Yuepeng, L., Huiqing, L., & Hongzhou, X. (2012). The role of mangroves in attenuating storm surges. *Estuarine Coastal and Shelf Science*.