

<https://doi.org/10.23854/07199562.2021571esp.Barreto29>

EL ESTADO DE LA EROSIÓN COSTERA POST-HURACÁN MARÍA EN PUERTO RICO.

THE STATE OF COASTAL EROSION IN PUERTO RICO AFTER HURRICANE MARÍA.

Sra. Maritza Barreto^{1,2}; Sr. Rafael Méndez Tejeda^{5,1} Srta. Nahir Cabrera^{2,3}; Srta. Valeria Bonano^{1,2}; Sra. Elizabeth Díaz²; Sr. Kevian Pérez⁴ y Sr. Aurelio Castro¹

RESUMEN

Se realizó un estudio del estado de la costa de Puerto Rico para 10 municipios de Puerto Rico en el periodo del 2017 al 2018. La meta principal de esta evaluación es identificar el estado de la erosión costera de las playas después del paso del huracán María (septiembre 2017) a nivel de municipio. El estudio se realizó integrando técnicas de teledetección (imágenes de alta resolución; vehículos aéreos no tripulados (UAV), Sistemas de Información Geográfica (SIG), diseño de banco de datos geoespacial de playas y trabajo de campo. Los hallazgos indican que existen dos tipos de erosión presente en la costa luego del paso del huracán María. Estos son: erosión de playas y costas elevadas. El huracán María produjo un evento de erosión costera, especialmente en segmentos costeros ubicados en el noroeste, norte central y sureste de la isla. Para el 2018, se identificó una recuperación en el ancho de playa en varios municipios. Uno de los hallazgos más importantes es la identificación de una migración de playa hacia tierra adentro en secciones de los municipios de Rincón, Añasco, Barceloneta y Humacao. Los eventos de erosión y migración de playa plantean un escenario de una nueva costa que incrementa la vulnerabilidad física, social e infraestructura en la franja costera ante nuevos eventos de huracanes. Estos hallazgos son una aportación importante para el manejo y ordenación del territorio costeros especialmente ante escenarios de eventos extremos y cambio climático.

Palabras claves: cambios costeros; playas; Huracán María; migración de playa.

ABSTRACT

A study of the state of the coast of Puerto Rico was conducted in 10 municipalities of Puerto Rico for 2017 to 2018 period. The main goal of this evaluation is to identify the state of Post- María beach erosion (September 2017) at the municipality level. The study was conducted using the integration of remote sensing techniques (high resolution images; unmanned aerial vehicles (UAV), Geographic Information Systems (GIS), beach geospatial database design and field work. Findings indicate the presence of two main types of coastal erosion after the occurrence of Hurricane Maria. These are: beach erosion and coastal bluff erosion. Important loss of sand was occurred in beaches located on the northwest, central north and southeast coastlines at the island after Hurricane Maria. In 2018, a beach recovery was identified in some of the selected coastal municipalities. One of the most important findings is this study is the identification of beach migration inland in the municipalities of Rincón, Añasco, Barceloneta and Humacao. Beach erosion and beach migration inland define a new coastal scenario that may increase the physical, social and infrastructure vulnerability in the coastal area. These findings are an important contribution to the management and planning of coastal territory, especially facing new extreme events and climate change scenarios.

Keywords: coastal erosion; beaches; Hurricane María; beach migration

¹ Escuela Graduada de Planificación, Universidad de Puerto Rico, Recinto de Río Piedras

² Instituto de Investigación y Planificación Costera de Puerto Rico (CoRePI), Universidad de Puerto Rico, Recinto de Río Piedras

³ Departamento de Historia, Universidad de Puerto Rico, Recinto de Río Piedras

⁴ Departamento de Ciencias Ambientales, Universidad de Puerto Rico, Recinto de Río Piedras

⁵ Departamento de Ciencias Naturales, Universidad de Puerto Rico, Recinto de Carolina

Recibido 31 de julio de 2021

Aprobado 25 de septiembre de 2021

INTRODUCCIÓN

Las costas han presentado cambios geomórficos importantes en diversas áreas geográficas a nivel mundial donde se identifican pérdida y ganancia de material sedimentario en las playas. Son diversos los estudios que presentan esta huella de la erosión que se ve acentuada en la pasada década (Thinh et al., 2019; Barreto et al., 2019; Baig et al., 2020). A nivel mundial, se ha identificado algún tipo de erosión costera que varía entre un 10% a 60% de la extensión de costa de la región (Luijendijk et al., 2018). En el caso de Puerto Rico, aproximadamente un 60% de las costas de la isla presentó algún tipo de erosión costera (baja, moderada y alta) para el 2010 (Barreto et al., 2019; Mendez-Tejeda, 2020). La erosión costera es causada por la combinación de diversas variables físicas (naturales) y antropogénicas (Figura 1).



Figura 1. Causales de erosión costera. Los causales incluyen variables naturales y antropogénicas. Elaboración propia.

Entre las variables oceanográficas asociadas a la ocurrencia de erosión están: el oleaje (Bheeroo et al., 2016;; Godoi et al., 2017; Franco et al., 2020), la ocurrencia de sistemas ciclónicos tropicales y extratropicales (Morelock & Barreto, 2003; Tamura et al., 2019; Barreto et al., 2019), la marejada ciclónica (Bheeroo et al., 2016; Shaw et al., 2016; Bromirski et al., 2017; Harris, 2017; De Lima et al., 2020), corrientes marinas; Saltos-Andrade et al., 2020), y el aumento relativo o eustático del nivel del mar (Enríquez et al., 2016; Whal et al., 2018; Athanasiou et al., 2020; Vousdoukas et al., 2020), que actúan sobre superficies que son fácilmente erosionadas como lo son las dunas, playas, depósitos de fangos (Shi et al., 2017; Nguyen et al., 2020), entre otros. Entre los causales de erosión antropogénicos se identifican: los cambios de

cobertura y usos de terreno (Pérez-Hernández, 2020; Bunicontro et. al., 2020), la extracción de arena (Krause et al., 2010), y la construcción en la costa (Danaher, 2005; Merlotto & Bértola, 2008), los cuales pueden afectar el transporte y distribución de sedimentos hacia adentro o fuera de la costa. Se conoce que, en algunas ocasiones, las estructuras duras de mitigación como paredes de concreto, espigones, rocas, entre otras, pueden causar cambios dramáticos en la morfología de la costa especialmente cuando estas estructuras son vistas erróneamente como una solución permanente a los problemas de erosión y no como una solución a corto plazo.

Por otro lado, la erosión costera es altamente preocupante cuando esta se identifica en zonas geográficas donde el asentamiento poblacional, actividades económicas y servicios se realizan cerca de la línea costera. Se ha observado como infraestructuras localizadas en zonas de alta erosión costera han sido expuestas al alcance de eventos de inundaciones que han interrumpido los servicios esenciales que allí se realizan (Barreto et al., 2019). En adición, el escenario se convierte en uno más complicado cuando los cambios costeros ocurren en sistemas isleños tropicales donde la costa es compleja dada la diversidad de variables geológicas, oceanográficas y climáticas que ocurren simultáneamente en una limitada zona geográfica (Barreto et al., 2019).

Tomando en consideración lo anteriormente discutido, en este artículo se presenta la primera parte de la evaluación de la situación geomorfológica de las playas de Puerto Rico para el periodo del 2017 y 2018. Esta evaluación geomórfica incluye la identificación de eventos de erosión, acreción y/o estabilidad en playas para diez (10) de los 44 municipios costeros de la isla. La meta principal de este proyecto fue identificar el estado geomórfico de las playas después del paso del huracán María (2017), a nivel de municipio, a través de la integración de técnicas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), teledetección y trabajo de campo. Las preguntas de investigación principales son: ¿Cuál es la situación de los cambios morfológicos de las playas (ancho de playa) de Puerto Rico Post-Huracán María (2017-2018)? ¿Cuál es la situación de erosión costera en los municipios estudiados? ¿Cuáles son las implicaciones de estos cambios? Los objetivos principales fueron: 1) cuantificar los cambios geomórficos en el ancho de playa Post huracán

María (2017 y 2018); 2) identificar playas con eventos de erosión en los municipios estudiados; e 3) identificar las implicaciones del estado de erosión en la isla. Cabe destacar que, la realización de este tipo de estudio es muy importante para generar datos e información que sirvan como base para el diseño de instrumentos de planificación adecuados para realizar la ordenación del territorio costero. Adicionalmente, la información de la situación de la erosión en las playas en Puerto Rico es punto importante para realizar la evaluación y revisión de los reglamentos y leyes que inciden sobre la costa. Ciertamente, realizar este ejercicio de planificación es valioso para construir las bases de la resiliencia de la costa en un escenario post-desastre y cambio climático.

Por otro lado, conociendo el estado del cambio costero se puede identificar: el grado de exposición de la costa ante próximos eventos; vulnerabilidad de la población e infraestructura; Cursos de Acción (COAs por sus siglas en inglés) adecuados para la mitigación; adaptación y resiliencia de la costa; e identificar acciones inmediatas ante los efectos del cambio climático.

ÁREA DE ESTUDIO Y MÉTODOS

Puerto Rico es la isla más pequeña en extensión de las Antillas Mayores. La isla se localiza entre las latitudes 17 y 18 grados norte y longitud 66 a 68 grados oeste. La isla posee una forma rectangular con orientación de este a oeste y con dimensiones de 180 kms (este a oeste) y 60 kms (norte a sur). Puerto Rico tiene 44 municipios costeros. En esta publicación se presenta la situación del estado de erosión post-huracán para diez (10) de los 44 municipios costeros de la isla. Estos son: Añasco, Rincón, Aguada, Aguadilla, Arecibo, Barceloneta, San Juan, Loíza, Humacao y Arroyo (Figura 2).



Figura 2. Localización de las municipalidades costeras incluidas en la evaluación del estado de la erosión costera en Puerto Rico (Grupo 1 de 4 grupos que

conforman los 44 municipios de la isla). Elaboración propia.

La franja isleña presenta una variedad de tipos de costas, con 1225 playas que presentan variadas morfologías y composición de sedimentos, a lo largo de sus planos costeros. Puerto Rico posee 1285 kms de costa con cuatro (4) tipos de costas principales, estas son: la costa de playa, vegetación, rocosa y aluvión (Barreto et al., 2019). El siguiente procedimiento se utilizó para completar los objetivos definidos en la investigación.

Objetivo 1. Cuantificar los cambios geomórficos (ancho de playa) en las playas de los diez municipios seleccionados para el periodo 2017 y 2018 (Post-Huracán María). Se utilizaron imágenes aéreas de alta resolución espacial (menos de 1 metro) para identificar y delimitar los cambios geomorfológicos (ancho de playa) en los planos de playas. Estas imágenes fueron adquiridas a través de compañías privadas (VALTUS), la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA por sus siglas en inglés) y el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos (USACE por sus siglas en inglés) para marzo y septiembre del 2017 y marzo 2018 respectivamente. Las imágenes se utilizaron para extraer la línea de costa (“shoreline”), la línea detrás de la playa (“backbeach”) y estructuras costeras localizadas en la línea de agua. Para propósitos de esta investigación, se utiliza la línea de costa y la zona detrás de la playa para delimitar los límites del ancho de playa. La línea de costa es definida como la línea que representa el elemento físico donde la tierra y el agua se encuentran en un mapa (Pajak & Leatherman, 2002). Se digitaliza la línea de marea alta como referencia a la línea de agua (“shoreline”). Esta referencia facilita la identificación de esta línea de costa tanto en el campo como en el proceso de fotointerpretación considerando el ambiente dinámico que tiene la misma. Se define también como la línea o límite mojado (“wetline”) que se identifica por las marcas dejadas en la playa por la última marea alta (Pajak & Leatherman, 2002). Esta línea mojada facilita la comparación entre posiciones de línea de costas existentes para varios periodos (Pajak & Leatherman, 2002). La incertidumbre de la delineación de la línea de costa en este estudio es de 4 metros. La incertidumbre total incluye la evaluación de la resolución espacial de la imagen, cambios del estado de la marea y errores en la digitalización Para la extracción de estas líneas de

las imágenes se utilizó el programa ArcGIS Pro y ArcMap de la empresa ESRI. Se preparó un banco de datos geoespacial que contiene diversos atributos de los componentes costeros de la línea de agua y de la parte detrás de la playa, para cada periodo definido. Entre las capas de información completadas están: tipos de costas, ancho de playas para cada periodo, cambios de ancho de playa por periodo, identificación de zonas de erosión/acreción y estabilidad, presencia de infraestructura en la línea de agua, entre otras. Se utiliza la aplicación software Digital Shoreline Analysis System (DSAS) en conjunto con ARCGIS 10.4-10.6 para identificar los cambios de extensión de los anchos de playas para los periodos estudiados. La aplicación DSAS fue diseñada por la Oficina de Geología Federal de los Estados Unidos (USGS por sus siglas en inglés) (Himmelstoss et al., 2018). Utilizando la aplicación de DSAS se definen transectos con un intervalo de 10 metros entre los mismos. Se generaron 12,000 transectos de ancho de playa para los municipios incluidos en este estudio.

Objetivo 2. Identificar playas con eventos de erosión en los municipios estudiados.

Se compararon los transectos definidos para cada periodo y se calcularon los cambios de extensión del ancho de playa para septiembre 2017 (Post-huracán María) y marzo 2018. Se prepararon gráficos y tablas para presentar datos de erosión, acreción y estabilidad por transecto, en las municipalidades.

Objetivo 3. Identificar implicaciones de la erosión costera. A partir de los resultados se identifican las implicaciones de la erosión costera basado en la definición de la exposición y vulnerabilidad de la costa.

RESULTADOS

EL HURACÁN MARÍA

El huracán María (HM) tocó tierra en la costa sureste de Puerto Rico el 20 de septiembre de 2017, como un huracán intenso de categoría 4, con una presión atmosférica de 908 hPa (Pasch et al., 2018). Por lo que, el HM es el huracán más fuerte que tocó tierra en la isla desde San Felipe en 1928. HM batió récords de lluvia que resultaron en inundaciones y deslizamientos de tierra sin precedentes, combinado con vientos sostenidos de 250 kph (155 MPH), donde la lluvia tuvo una

acumulación total de 965 mm (38 pulgadas) (Hernández-Ayala and Mendez-Tejeda; 2020) que contribuyó a una pérdida casi completa de la red eléctrica y del suministro de agua municipal para los 3.4 millones de residentes (Mendez-Tejeda, 2018).

En su entrada al Caribe el impacto del cuadrante norte del HM resultó en una marejada ciclónica que con el efecto combinado del oleaje y la marea produjo niveles de inundación de 6 a 9 pies (1.82 a 2.74 m) sobre el nivel del suelo, lo que afectó a los municipios de Humacao, Yabucoa, Naguabo y Ceiba en PR, al momento de impactar la isla estas olas con período entre 14 y 18 segundos golpeaban las costas. La altura de las olas aumentó, produciendo olas rompientes estimadas de 25-30 pies (7.62 a 9.14 m), (https://www.weather.gov/sju/swell_mar2018).

El resultado final fue que toda la infraestructura física se vio afectada con la destrucción del 80% de la energía eléctrica y los sistemas de transmisión de comunicaciones, incluidos los postes de servicios públicos y las torres celulares, y finalmente la tormenta resultó en un costo estimado de 94 mil millones (\$USD) en daños en PR, con estimado de pérdida de vidas de más de 3,000 directa e indirecta (Mendez-Tejeda, 2019).

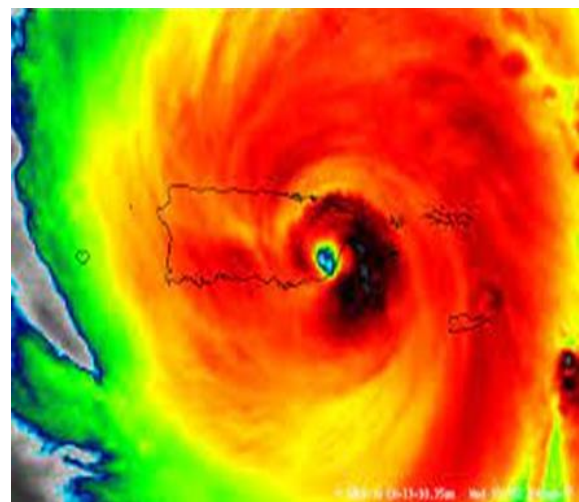


Figura 3. El ojo bien definido del HM bordeando la isla de St Croix a las 02.15 am del 20 de septiembre de 2017. Aproximadamente 4 horas después, a las 06.15 am, la tormenta tocó tierra en Puerto Rico por el Municipio de Yabucoa como un huracán de categoría 4 con sostenidos vientos de alrededor de 250 kph. Fuente: satélite Suomi NPP de NOAA / NASA.

CAMBIOS EN LA MORFOLOGÍA DE PLAYAS (ANCHO DE PLAYA) POST- MARÍA

En términos generales, la costa post-huracán presenta la ocurrencia de eventos de acreción y erosión a lo largo de la costa playera de Puerto Rico. El paso del HM produjo que la mayoría de las playas perdieran elevación y ocurriera reducción de ancho de playa en secciones costeras del noroeste, norte-central y sureste de la isla (Barreto et al., 2019). Hubo indicadores de acreción en algunos municipios en el área noreste y suroeste. Las secciones de costas que perdieron mayor cantidad de ancho de playa se identificaron mayormente en los municipios de Añasco, Rincón, Aguada, Aguadilla, Arecibo, Barceloneta, San Juan, Loíza, Humacao y Arroyo (Mapa 1). Secciones costeras en los municipios de Arroyo, Humacao y Barceloneta presentaron las mayores pérdidas de ancho de playa a partir del paso del huracán María. Se calcularon pérdidas máximas de ancho de playa de 33 metros en secciones de la costa en menos de 24 horas. Para el 2018, se identifica recuperación del ancho de playa en muchas secciones de costas de los municipios. Uno de los hallazgos más relevantes de este estudio es que se identifica migración de unidades de playas (línea de costa y parte detrás de la playa) en varias secciones costeras de los municipios. Esta es la primera vez que se logra documentar de manera cuantitativa y cartográfica el evento de migración de playas en Puerto Rico. La migración de playa consiste en el movimiento tierra adentro de la unidad geomórfica de la playa a partir del desplazamiento de la línea de costa y parte detrás de la playa. Los municipios incluidos en este estudio que presentan mayor migración de playas en secciones de su costa post-huracán es: Añasco, Humacao, Arecibo, Aguada y Rincón. Otro hallazgo general relevante es que se identificó erosión en secciones de playas adyacentes a estructuras rígidas en la mayoría de los municipios. Muchas de estas estructuras rígidas (formales e informales) son estructuras que se usaron para mitigar eventos de erosión anteriores. Entre los tipos de estructuras rígidas de mitigación se identificaron rocas, gaviones y paredes de concreto. Esto sugiere que las estructuras rígidas identificadas a lo largo de la línea de costa en las áreas de estudios, podrían tener un impacto o control en los procesos de erosión/acreción de las playas. Los municipios que tienen mayores estructuras rígidas de mitigación a lo largo de su franja de costas (porcentaje de su franja total) son: San Juan (54% de su franja),

Rincón (33%), Humacao (32%), Aguadilla (18%) y Arecibo (13%).

A continuación, se incluye una descripción del estado de la costa para varios de los 11 municipios incluidos en este escrito.

AÑASCO

La costa de Añasco tiene una extensión de 6.82 kms. El 63% de la costa está compuesta por playas con extensiones de ancho que varían de 1 a 54 metros para el 2018. Aproximadamente un 4% de la costa presenta estructuras rígidas tales como negocios y residencias ubicadas cerca de la línea de agua, en la sección norte del municipio. Luego del paso de HM se identificó que 66% de los 4.3 kms de playa sufrió erosión, específicamente en la sección norte de la desembocadura del Río Grande de Añasco (Figura 4). Para el 2018, se identificó un cambio en varias áreas, donde zonas de erosión se invirtieron a zonas de acreción y viceversa.. Aproximadamente 2.5 kms de la costa playera del municipio migró tierra adentro para marzo de 2018. La mayor migración de playa se identificó en la sección donde se ubican las facilidades de FURA, en la Playa Tres Hermanos y Rincón Beach Resort. El sector Caguabo presenta una de las secciones costeras con mayor exposición a riesgos costeros en el municipio, al tener estructuras costeras duras localizadas muy cercanas a la línea de agua y donde a marzo 2018, se observa que la línea de agua se posiciona cada vez más cerca de las estructuras.

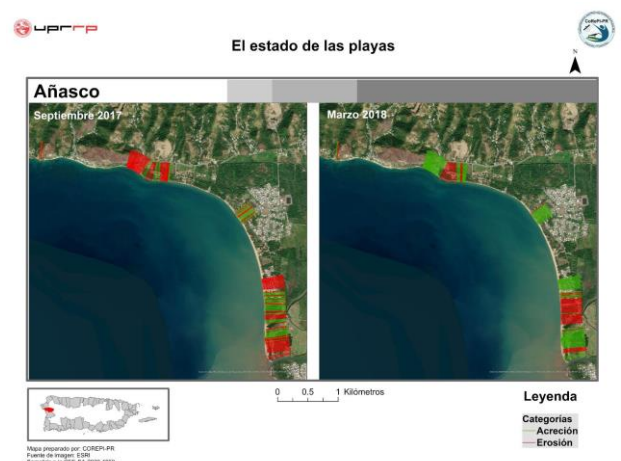


Figura 4. Los mapas demuestran mayores zonas de erosión costera (color rojo) para septiembre del 2017 post-Huracán a lo largo de la costa del municipio de Añasco. Elaboración propia.

RINCÓN

La costa de Rincón cuenta con 14.5 kms de costa, predominando el tipo de costa de playa con aproximadamente 11.7 kms (80% de la costa) . El ancho de las playas varía de entre 1.5 a 61 metros de extensión para el periodo de marzo de 2018. Se identificaron estructuras duras (rígidas) como residencias, negocios y estructuras de mitigación ubicadas en o cerca de la línea de costa a lo largo de 1.5 km en secciones de Bo. Barrero, Punta Cadena, Playa Córcega y Sandy Beach en Punta Gorda.

Luego del paso de HM, 35% de la costa playera sufrió erosión. Las pérdidas de ancho de playa variaron de entre -0.02 a -46 metros Hay que subrayar que el paso del huracán produjo acreción en la costa en los sectores de Playa Doña Lala y Punta Higüero (Figura 5). Para el 2018, se observa una reducción de la erosión en la costa playera (26%) indicando que varias de las playas afectadas comenzaron a recuperar arena. Se identifican nuevas zonas de erosión en Playa Doña Lala y la sección norte del Balneario de Rincón.

Es evidente que la posición de la línea de agua (línea costera) ha migrado tierra adentro para marzo del 2018. Los sectores costeros con migración de la línea de agua son: extremo sur de la carretera 429, sector Barrero, Playa Los Almendros y Playa Córcega.

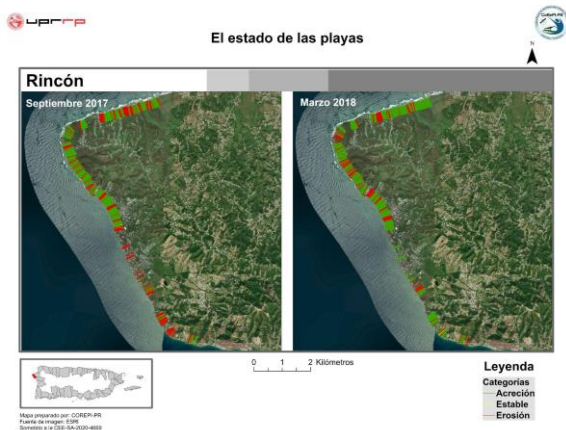


Figura 5. La zona costera de Rincón presenta gran pérdida de ancho de playa luego del paso del HM. La mayoría de la erosión se ubica en la parte del sur del municipio. Elaboración propia.

AGUADA

El municipio cuenta con 10.77 kms de costas de los cuales 9 kms (91%) son playas. La costa presenta diversas estructuras rígidas en aproximadamente 3 kms. Los tipos de estructuras duras identificadas son las rampas y líneas de rocas. Es evidente que la mayoría de las estructuras rígidas de la zona inciden en la presencia de erosión hacia un lado de la estructura lo que indica la posibilidad de que la estructura detenga el transporte de sedimentos lateral.

Luego del paso del HM se observa erosión en un 44% de la costa de playa. Sin embargo, para el 2018 se identifica recuperación en varias secciones de la misma (Figura 6).

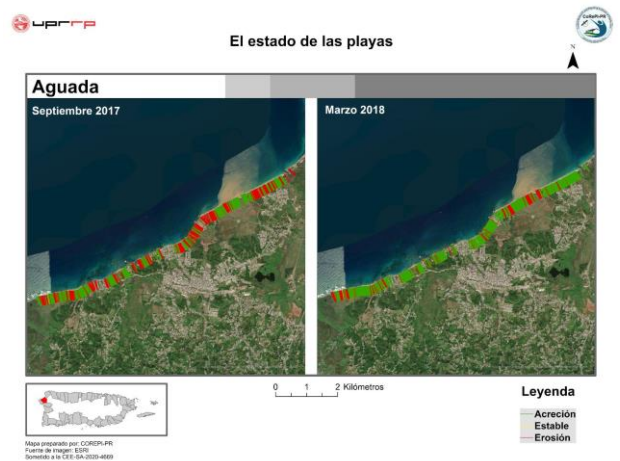


Figura 6. Se identifican secciones de erosión luego del paso del HM. Elaboración propia.

Se identificó migración de playa tierra adentro en la zona de Espinal. Esta zona de migración de playa tierra adentro, es uno de los desplazamientos más extremos observados de las áreas de estudio.

AGUADILLA

La costa de Aguadilla cuenta con 20 km de costas de los cuales 44% son playas, 38% son costas rocosas y, aproximadamente un 14% de la costa está armada con diversos tipos de estructuras tales como rampas, muelles, espigones (“groynes”), líneas de rocas (“rip-rap”) y paredes de concreto (“seawall”). Hay secciones de costas donde se presentan diversos tipos de estructuras en el mismo lugar.

Aproximadamente 70% de la costa playera del municipio, sufrió erosión luego del paso del HM (Figura 7). Para el 2018 hubo una reducción de erosión de costa y acreción en segmentos de la costa de Aguadilla.

Se identificó migración de playa en la playa Crash Boat. No existe información para validar si la acreción o posible recuperación de las costas del municipio, especialmente en secciones localizadas cercas de marinas y estructuras, se dieron por un evento natural o por que se practicaron estrategias de mitigación formales y/o informales.

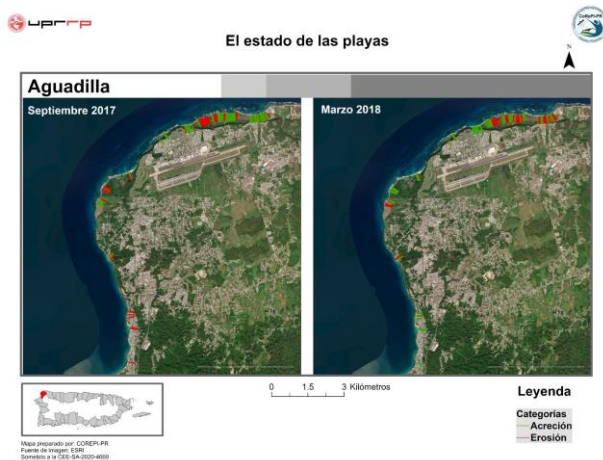


Figura 7. La erosión de playas se identifica mayormente cerca de las estructuras rígidas en la franja costera. Elaboración propia.

ARECIBO

La costa de Arecibo tiene 33 kms de costas de los cuales 38% son playas, 53% son costas rocosas y, aproximadamente 8%, son costas armadas por estructuras rígidas. Entre los tipos de estructuras rígidas que se encuentran son líneas de roca (“rip-raps”), paredes de cemento (“seawall”), espigones (“groynes”) y embarcaderos (“jetties”) para el periodo del 2018. Las zonas playeras más extensas se localizan al este de la desembocadura del Río Grande de Arecibo.

La situación de la costa de Arecibo presenta un proceso complejo de cambios morfológicos costeros donde la erosión no se limita solamente a las costas playeras sino también incluyen secciones de costas elevadas que están degradándose y, a consecuencia de esto, ocurre movimiento de material (derrumbes) desde la pendiente hacia la línea de agua. La mayoría de la

degradación de la pendiente costera ocurre en la sección de costa al oeste del Río Grande de Arecibo, y, la erosión en las playas, se identifica al este del Río Grande de Arecibo.

Aproximadamente 61% de las costas playeras experimentaron erosión luego del paso del HM. (Figura 8).

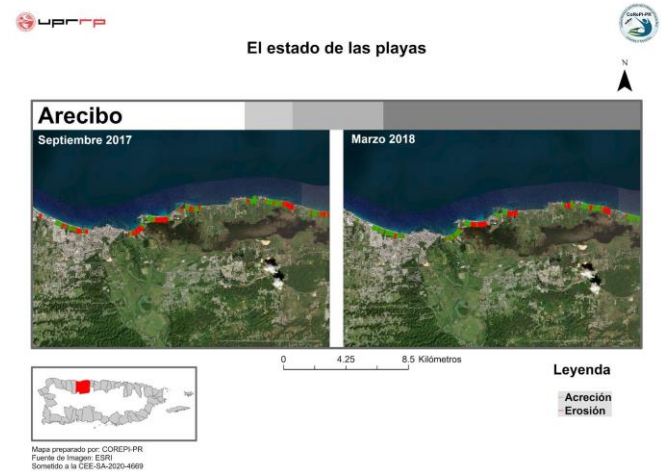


Figura 8. Parte de la costa presenta erosión en el municipio de Arecibo luego del paso del huracán María. Elaboración propia.

Para el 2018, no hubo recuperación en las playas Caza y Pesca, y en secciones de Playa Grande al este del municipio. Se encontró recuperación en el ancho de playas en secciones playeras al oeste del Río Grande de Arecibo, debido a que estos planos de playas fueron alimentados en parte por el material de derrumbe, provenientes de las pendientes costeras colindantes, como se observó en el pueblo de Arecibo y zonas circundantes. Se identificaron zonas de migración de playas en secciones playeras al oeste de la desembocadura del Río Grande de Arecibo.

BARCELONETA

La costa del municipio de Barceloneta posee 8.7 km de costas. El tipo de costa predominante es la playa, donde el municipio presenta el 64% de su costa con planos playeros. Aproximadamente un 4.8% de su extensión de costa es armada donde posee estructuras rígidas tales como rampas, mamparos (“bulkhead”), muelles, líneas de rocas (“rip-rap”) y paredes de concreto (“seawall”). Luego del paso de HM, la costa playera sufrió erosión (46%) y acreción (54%). La mayoría de la pérdida

de extensión de playa se localizó en secciones de playas al este del municipio (Figura 9).

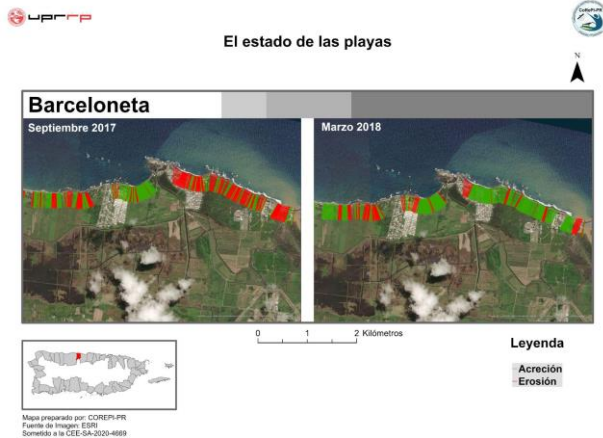


Figura 9. El HM produjo eventos extensos de erosión costera en la sección este de Barcelonaeta. Elaboración propia.

Para el 2018, se redujo la erosión en algunas secciones de playas al este del municipio. Se observa un aumento de erosión en las secciones de La Boca y Las Criollas. Se identificó migración de playa importante en la playa La Boca en Barcelonaeta. Esta sección costera muestra una posición de línea de costa tierra adentro para el 2018.

SAN JUAN

El municipio de San Juan tiene aproximadamente un 52% de su costa armada. La costa armada está compuesta mayormente de estructuras rígidas como mamparos ("bulkhead"), muelles, rompeolas, embarcaderos ("jetties"), espigones ("groynes"), línea de rocas o revestimientos ("rip-raps"), y paredes de concreto ("seawall"). Luego del paso del HM, la costa playera del municipio presentó mayormente acreción (91%) (Figura 10).

Para el 2018, las playas del municipio comenzaron a experimentar un aumento en erosión (47%) principalmente en las zonas de Playa Puerta de Tierra, Playa del Ocho, secciones de Playa del Condado y el Último Trolley. Se observa un corto segmento de migración de playas en la costa frente a la Antigua Base Naval y la playa del hotel del Condado, para marzo de 2018.

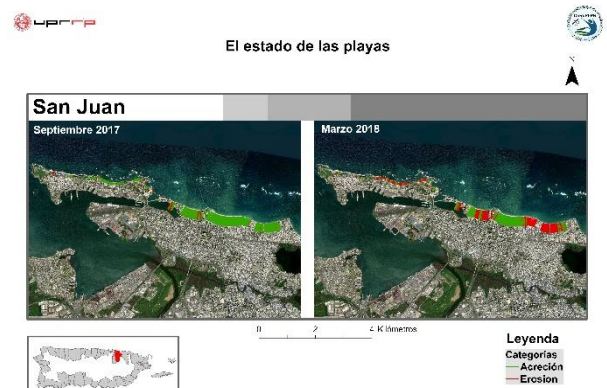


Figura 10. El HM produjo acreción en la mayoría de las playas de San Juan en el 2017. Para el 2018, se observa erosión en la mayoría de la sección costera del municipio. Elaboración propia.

LOÍZA

La costa de Loíza tiene una extensión de 23 km de costas donde el tipo de costa predominante son las playas (81%). Aproximadamente un 3% de costa está armada con estructuras mayormente rígidas tales como paredes de concreto ("seawall") y líneas de rocas ("rip-rap"). Luego del paso del HM, la costa playera presentó un 58% de erosión y 42% de acreción (Figura 11). Es posible que esta zona no sufrió mucha erosión debido a que dos semanas antes de este evento ocurrió un depósito de arena extenso en la costa producido por el huracán Irma.



Figura 11. El HM produjo erosión y acreción en varios segmentos de la costa de Loíza. Elaboración propia.

HUMACAO

La costa de Humacao presenta 23 km de costa donde 56% de su costa son playas. Aproximadamente un 32% de la extensión de la costa del municipio presenta costa armada con estructuras mayormente rígidas como muelles y marinas, espigones (“groynes”), rompeolas, mamparos (“bulkhead”), embarcaderos (“jetties”) y líneas de roca (“rip-rap”). Se identificó erosión en un 31% de la costa playera del municipio luego del HM (Figura 12).

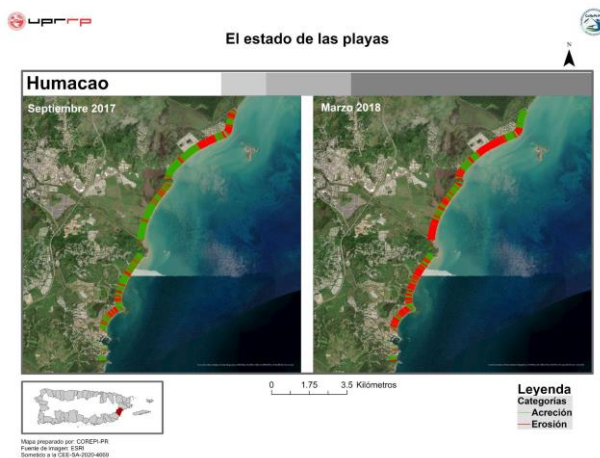


Figura 12. La mayor erosión del área se observa a 6 meses después del paso del HM (2018). Elaboración propia.

Las zonas playeras con mayor erosión se ubican en Punta Santiago y secciones de Palmas del Mar. En el 2018, se observa un aumento en la erosión (57%) a lo largo de la costa, con áreas adicionales de erosión en la zona sur del municipio. Se identifica una zona extensa de migración de playas en Punta Santiago. Esto significa que la línea de agua migró tierra adentro.

ARROYO

Arroyo tiene una extensión aproximada de 8.7 km. La costa playera es el tipo de costa predominante (80%). Aproximadamente un 9% de la costa es armada, compuesta mayormente con estructuras rígidas tales como mamparos (“bulkhead”) y líneas de rocas (“rip-raps”). Luego del paso del HM, 60% de la costa playera sufrió erosión (Figura 13). Para el 2018, se identifica una recuperación en la zona playera de Punta Figuras y Playa Las Palmas.

Se observa erosión en el malecón y Guásima. Hay migración de playas en Punta Guilarte.

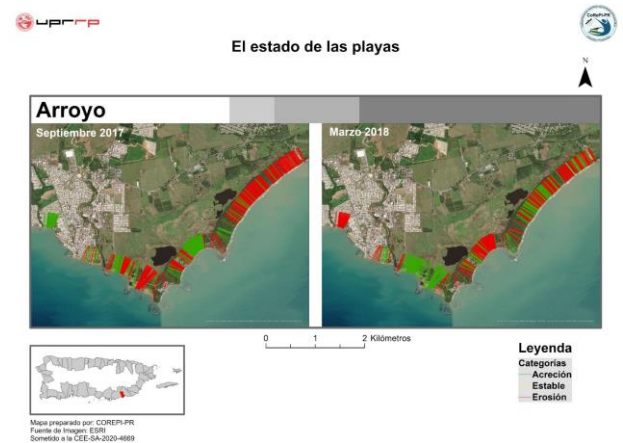


Figura 13. El HM produce erosión en secciones costeras del municipio. Para el 2018, se observa una leve reducción de la erosión. Elaboración propia.

DISCUSIÓN

A partir de los hallazgos de la evaluación de los cambios de ancho de playa Post-María, no hay duda que el huracán María produjo cambios importantes en las playas de Puerto Rico. El huracán tuvo un doble efecto sobre la costa. Este produjo erosión y acreción en secciones costeras, aunque la erosión fue el evento predominante en los 11 de los 44 municipios estudiados. Los cambios morfológicos costeros fueron producidos mayormente por la combinación del evento de la marejada ciclónica (nivel de inundación de 1.8 a 2.74 m al este de la isla), estado de marea alta y el oleaje asociado al huracán (1.5 a 6.0 metros de altura) (National Weather Service, 2017). La diferencia en los cambios en la extensión de playa por área geográfica se asocia posiblemente con el efecto combinado de la dirección de trayectoria del huracán, velocidad de traslación del huracán, orientación de la playa respecto a la trayectoria del sistema y grado de protección de la playa por la presencia de barreras naturales como eolianitas, manglares, rocas de playa y arrecifes de coral. Por ejemplo, áreas costeras protegidas por arrecife en Ocean Park en San Juan presentaron aproximadamente un 97% de atenuación de oleaje producido durante el huracán María (Díaz, 2018). Por otro lado, zonas con historial de erosión previo al huracán mostraron cambios en su costa posiblemente asociado con la disminución del umbral geomórfico de la playa.

CONCLUSION

Los cambios en los anchos de playas identificados en 10 de los 44 municipios costeros, validan que secciones de la geomorfología costera de la isla ha cambiado post-huracán. El escenario de tener una nueva costa nos presenta grandes retos dentro del marco de manejo y planificación costera local.

Entre los retos que presentan están: 1) definir protocolos de preparación y respuesta ante la realidad de la nueva costa; 2) ordenar el territorio a partir de los escenarios actuales; y 3) revisar y enmendar instrumentos de planificación. No alinearse ni entender esta nueva realidad costera post-huracán, llevarían a tomar decisiones de manejo inadecuadas que podría generar mayores problemas de erosión costera en la isla.

No hay duda que, el conocer el estado de las playas será de gran ayuda para: 1) entender las condiciones costeras actuales y futuras; 2) identificar las implicaciones de este escenario desde la perspectiva de riesgo; y 3) validar los problemas enfrentados por el municipio relacionado con el problema de erosión costera. Este último, ayudará a las comunidades y a los gerentes del municipio a delinear iniciativas que los apoyen en los procesos de preparación, reconstrucción y mitigación. El próximo paso es presentar la situación de las playas post-huracan para los restantes municipios.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es apoyado por fondos de la Oficina Central de Recuperación, Reconstrucción y Resiliencia (COR3) del Gobierno de Puerto Rico y la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias (FEMA por sus siglas en inglés), Proyecto Post María Beach Assessment Subgrantee: Hazard Mitigation Grant Program (HMGT) 4339-0007-P DR-PR. Agradecemos a los asistentes de investigación que trabajaron en la preparación del banco de datos y proceso de digitalización de las imágenes. Ellos son: Laura Fidalgo, Loderay Bracero, Mariana López, Alfredo Montañez, Ana Santos, David Peña, Roberto Torres, Alejandra Bonilla, Aileen Aponte, Thomas Flecha. A los coinvestigadores, Dr. Luis Santiago de la Universidad Central de la Florida (UCF). Agradecemos a la Sra. Wilma González, personal administrativo de este proyecto.

REFERENCIAS

- ATHANASIOU, P., VAN DONGEREN, A., GIARDINO, A., VOUSDOKAS, M. I., RANASINGHE, R., & KWADIJK, J. "Uncertainties in projections of sandy beach erosion due to sea level rise: an analysis at the European scale". *Science Reports*, no. 10, 2020, p. 10-14.
- BAIG, M. R. I., AHMAD, I. A., SHAHFAHAD, TAYYAB, M., & RAHMAN, A. "Analysis of shoreline changes in Vishakhapatnam coastal tract of Andhra Pradesh, India: an application of digital shoreline analysis system (DSAS)". *Annals of GIS*, vol. 26, 2020, p. 361-376.
- BARRETO-ORTA, M., MÉNDEZ-TEJEDA, R., RODRÍGUEZ, E., CABRERA, N., DÍAZ, E. & PÉREZ, K. "State of the beaches in Puerto Rico after Hurricane Maria". *Shore & Beach*, n 87, 2019, p. 16.
- BROMIRSKI, P. D., FLICK, R. E. & MILLER, A. J. "Storm surge along the Pacific coast of North America". *Journal of Geophysical Research*, vol 122, 2017, p. 441-457.
- BUNICONTRO, M., MARCOMINI, S. C., & LÓPEZ, R. A. "Coastal Morphology and Human Intervention in Golfo Nuevo, Patagonia Argentina". *Journal of Coastal Research*, vol 36, 2020, p. 780-794.
- DÍAZ, E. 2018. Current Climate and Ocean Conditions, Trends and Projections: A Blueprint for the Next Generation of Puerto Rico's Coastal Infrastructure. <http://www.pr-ccc.org/wp-content/uploads/2019/12/1>.
- DANAHER, M. "Reconciling Foreshore Development and Dune Erosion on Three Queensland Beaches: An Historical Perspective". *Environment and History*, vol 4, 2005, p. 447-474.
- DE LIMA, A. D. S., KHALID, A., MIESSE, T. W., CASSALHO, F., FERREIRA, C., SCHERER, M. E. G., & BONETTI, J. "Hydrodynamic and waves response during storm surges on the Southern Brazilian coast: A hindcast study". *Water*, vol 12, 2020, p. 35-38.
- ENRÍQUEZ, A. R., MARCOS, M., ÁLVAREZ-ELLACURÍA, A., ORFILA, A., & GOMIS, D. "Changes in beach shoreline due to sea level rise

- and waves under climate change scenarios: application to the Balearic Islands (western Mediterranean)". *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions.*, vol 17, 2016, p. 1075–1089.
- FRANCO, C., ZAMBRANO, Y., PLATA ROCHA, W., MONJARDIN, S., RODRÍGUEZ CUETO, Y., ESCUDERO, M. & MENDOZA, E. "Long-Term Analysis of Wave Climate and Shoreline Change along the Gulf of California". *Applied Sciences*, vol 10, 2020, p. 1-17.
- GODOI, V., BRYAN, K. & GORMAN, R. "Storm wave clustering around New Zealand and its connection to climatic patterns". *International Journal of Climatology*. vol 38. 2017.
- HARRIS, K. "Potential Impacts of Accelerated Sea-Level Rise and Hurricane-Induced Storm Surge in Western Pasco County, Florida". Graduate Theses and Dissertations. 2017, p.1-46.
- HERNÁNDEZ Ayala JJ, MENDEZ-TEJEDA R. 2020. How much rainfall did Hurricane Maria really drop in Puerto Rico? Weather.
- HIMMELSTOSS, E., HENDERSON, R., KRATZMANN, M., & FARRIS, A. "Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 5.0 user guide. Reston, Virginia: U.S". *Geological Survey*, 2018. Open-File Report 1179.
- KRAUSE, J. C., DIESING, M., & ARLT G. "The Physical and Biological Impact of Sand Extraction: a Case Study of the Western Baltic Sea". *Journal of Coastal Research*. 2010, pp. 215-226.
- LUIJENDIJK, A., HAGENAARS, G., RANASINGHE, R., BAART, F., DONCHYTS, G. & AARNINKHOF, S. "The State of the World's Beaches". *Scientific Reports*, vol 8, 2018, p. 1-11.
- MÉNDEZ -TEJEDA Rafael. "Hurricane Maria: 12 hours that changed the history of a country. Weather 2018" *Royal Meteorological Society*. vol 3, n 12. 2018, p. 402.
- MÉNDEZ-TEJEDA; R. "An Analysis of the Deaths Reported by Hurricane Maria: A Mini Review". *Journal of Scientific Research & Reports (JSRR)*, vol 24, n 1, 2019, p. 1-6.
- MERLOTTO, A. & BÉRTOLA, G. R. "Evolución urbana y su influencia en la erosión costera en el balneario Parque Mar Chiquita, Argentina". *Papeles de Geografía*. 2008, p. 143-158.
- National Weather Service. Hurricane Maria. National Hurricane Center, 2017. Report AL152017.
- NGUYEN, H. M., BRYAN, K. R., & PILDITCH, C. A. "The effect of long-term aerial exposure on intertidal mudflat erodibility". *Earth Surface Processes and Landforms*. Vol 45, 2020, p. 3623–3638.
- PASCH RJ, PENNY AB, BERG R. 2018. National HurricaneCenter. https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/AL152017_Maria.pdf
- PAJAK, M. J., & LEATHERMAN S. "The high-water line as shoreline indicator". *Journal of Coastal Research*, vol 18, 2002, p. 329-337.
- PÉREZ-HERNÁNDEZ, E., SANTANA-CORDERO, A., & HERNÁNDEZ-CALVENTO, L. "Beach surface lost historically: The case of the eastern coast of Las Palmas de Gran Canaria (Canary Islands, Spain)". *Ocean and Coastal Management*, vol 185 2020, p.1-16.
- SALTOS-ANDRADE, I., ANDRADE-BOWEN, G., MAQUILÓN-MUÑOZ, B., MARTILLO-BUSTAMANTE, C., ANDRADE-GARCÍA, G., CEDEÑO-OVIEDO, J. & CERVANTES-BERNABE, E. "Evaluation of Alternatives for Coastal Protection, a Traditional Engineering Infrastructure and a Nature-Based Solution, using numerical models. Case Study: San Pedro, Ecuador". *Engineering, Integration, and Alliances for a Sustainable Development*. 2020, p. 1-8.
- SHAW, A., HASHEMI, M. R., SPAULDING, M., OAKLEY, B. & BAXTER, C. "Effect of Coastal Erosion on Storm Surge: A Case Study in the Southern Coast of Rhode Island". *Journal of Marine Science and Engineering*, vol 4, 2016, p. 85.
- SHI, B., COOPER, J. R., PRATOLONGO, P. D., GAO, S., BOUMA, T. J., LI, G., LI, C., YANG, S. L. & WANG, Y. P. "Erosion and accretion on a Mudflat: The importance of VERY Shallow-Water Effects". *Journal of Geophysical Research: Oceans*. vol 122, 2017, p. 9476–9499.

TAMURA, T., OLIVER, T. S. N., CUNNINGHAM, A. C., & WOODROFFE, C. D. "Recurrence of extreme coastal erosion in SE Australia beyond historical timescales inferred from beach ridge morphostratigraphy". *Geophysical Research Letters*, vol 46, 2019, p. 4705-4714.

THINH, N. A., THANH, N. N., TUYEN, L. T., & HENS, L. "Tourism and beach erosion: valuing the damage of beach erosion for tourism in the Hoi An World Heritage site, Vietnam". *Environment, Development and Sustainability*, vol 21, 2019, p. 2113-2124.

VOUSDOUKAS, M. I., RANASINGHE, R., MENTASCHI, L., PLOMARITIS, T. A., ATHANASIOU, P., LUIJENDIJK, A., & FEYEN, L. "Sandy coastlines under threat of erosion". *Nature climate change*, vol 10, 2020, p. 260-263.

WHAL, T., BROWN, S., HAIGH, I. & NILSEN, J. E. "Coastal Sea Levels, Impacts, and Adaptation". *Journal of Marine Science and Engineering*, vol 6, 2018, p. 1-7.