

Análisis de costo de las alternativas para mitigar daños a la infraestructura costera de Rincón, Puerto Rico

por

Francisco J. Villafañe Rosa

Tesis sometida en cumplimiento parcial de los requisitos para el grado de

MAESTRÍA EN CIENCIAS

en

INGENIERÍA CIVIL

UNIVERSIDAD DE PUERTO RICO

RECINTO UNIVERSITARIO DE MAYAGÜEZ

2018

Aprobado por:

Luis D. Aponte Bermúdez, Ph.D., P.E.
Presidente, Comité Graduado

Fecha

Miguel Canals Silander, Ph.D.
Miembro, Comité Graduado

Fecha

Ricardo R. López Rodríguez, Ph.D., P.E.
Miembro, Comité Graduado

Fecha

Mayra Méndez Piñero
Representante de Estudios Graduados

Fecha

Ismael Pagán Trinidad, M.S.C.E
Director del Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura

Fecha

ABSTRACT

The town of Rincón is in the northwest corner of Puerto Rico with a population of about 15,000. Like other US American beach community, Rincón's local economy prosperity thrives on the condition of its beaches and has been driven primarily by the tourist industry since the late 1950s, its beachfront hotels, and the variety of small beaches along its shoreline. Coastal erosion and beach loss is a present threat of Rincon's urban beach economic progress and has raised public and government concern to protect and preserved it. The study presented in this project details the recommended framework to establish a benefit/cost ratio of beach restoration alternatives along Rincon's shoreline; these options are 1) armoring the beach (beach loss), 2) managed retreat (land loss), and beach nourishment (costly). Although beach nourishment is the primary method to combat beach erosion, a feasibility study is imperative to provide marine coastal zone manager the most reliable alternative. The study employs analysis and manipulation of geographical information system (GIS) utilizing data from the USGS, USACE, GME, and the Center for Municipal Revenue Collection referred as CRIM by its acronym in Spanish. The USGS GIS data provides historical shoreline position and erosion rate estimates; this data is used to predict the expected shoreline inland projection. A correction to the projected inland shoreline is needed to consider, sea level rise, terrain elevation, and existing beach armoring barriers (i.e. sea walls, metal sheet piling, and breakwater boulders). Field campaigns to gather GIS data of existing beach armoring system and have been carried out; these systems are typically built on the oceanfront properties, after surge events, to protect

the infrastructure. Beach armoring create a stability condition that prevents inland shoreline movement, but lessons learned from the past point out that man-made barriers have a high price to pay since these coastal barriers structures exacerbate beach erosion resulting in beach loss. The USACE 2016 data consists in a LiDAR campaign where topographic and bathymetric data was collected utilizing the SHOALS System. A photogrammetric campaign was performed by GME; the products are a georeferenced ortho mosaic and DEM, contour line and elevation profiles. Rincon's CRIM database contains 8,166 properties, of which 613 are oceanfront. The database provides a base property appraisal value adjusted to the year of 1958, of which 2,738 parcels (27%) contain data regarding recent sales value and transaction year. The mean growth rate of these properties is 6.3%, the value of Q1 is 4.66%, the median is 5.7%, and Q3 is 7.1%. The growth rate was used to adjust the CRIM database to present value and determine the cost benefit ratio with the suggested alternative to protect and restore the coastline. The areas in which the protection and armoring of the coastline are economically justified are between the Quebrada Ramos and the Hotel Villa Cofresí and the Córcega Beach.

Resumen

El municipio de Rincón está localizado al noroeste de Puerto Rico y cuenta con una población aproximada de 15,000 habitantes. Al igual que otras comunidades costeras de los Estados Unidos, Rincón le debe su prosperidad económica a su cercanía con la costa y ha sido impulsada principalmente por la industria turística desde finales de los años 1950. La erosión costera que provoca la pérdida de sus playas preocupa a los comerciantes, residentes y al gobierno quienes buscan alternativas para atender esta amenaza. El estudio presentado detalla la metodología desarrollada para establecer la razón del beneficio/costo de las posibles alternativas para restaurar las costas de Rincón y son las siguientes; 1) armar la costa (pérdida de área de playa), 2) retroceso planificado de la costa (terreno ganado por el mar) y 3) realimentación de playas (costoso). A pesar de esto la realimentación de playas es el principal método utilizado para atender la erosión costera. Sin embargo, un estudio de viabilidad es necesario para que el manejador de la zona costanera pueda seleccionar la alternativa más confiable. Esta investigación emplea análisis y manipulación de Sistemas de Información Geográfico (GIS por sus siglas en inglés) que utiliza datos del USGS, USACE, GME y CRIM. Lo aportado por el USGS proporciona los datos históricos de la posición de la costa los cuales permiten estimar las tasas de erosión o acreción; esta información puede ser utilizada para pronosticar/predecir la posición de la costa en el futuro. Para poder utilizar las tasas de erosión históricas en la generación de proyecciones de la posición de la costa, deben tomarse en consideración el aumento en el nivel del mar a través del tiempo, la elevación de terreno y protecciones costeras existentes. Se han

realizado visitas de campo para recolectar datos GIS para establecer el tipo de protección con la que cuenta la zona de estudio. La intención de las barreras son proteger la costa; se construyen frente a las propiedades que colindan con el mar para protegerlas del embate de las olas. Armar la costa con estructuras sólidas crea una condición de estabilidad que no permite que la línea costera se mueva tierra adentro, pero lecciones aprendidas del pasado indican que las barreras construidas de forma criolla tienen un alto precio y es que estas exacerbaban la erosión en las playas provocando pérdida de área de berma. Los datos del USACE consisten en el producto LiDAR utilizado para modelar la topografía y batimetría de gran parte de la costa norte de Puerto Rico que recurre al sistema SHOALS (por sus siglas en inglés). Una campaña fotogramétrica fue realizada por la compañía GME en la que los principales productos entregados fueron un orto mosaico y una nube de puntos que puede ser manipulada para crear DEM, cotas de nivel y perfiles de elevación. La base de datos del CRIM de Puerto Rico contiene 8,166 propiedades de las cuales 613 colindan con el mar. El inventario de propiedades contiene la información de la última tasación realizada por el CRIM en el 1958 y de las cuales 2,738 parcelas (27%) contiene datos de la compra/venta más reciente tales como el valor y fecha de la transacción. La tasa de crecimiento promedio para las propiedades del municipio de Rincón es de 6.3%, el valor de la Q1 es 4.7%, la mediana es 5.7% y la Q3 es 7.1%. Se utilizaron las tasas de crecimiento para ajustar los datos del CRIM al presente y determinar la razón de beneficio/costo de las sugeridas para reparar o restaurar la costa oeste de Rincón. Las zonas en las que se justifica

económicamente la realimentación y armado de las costas son entre la Quebrada Ramos y la Playa de Córcega.

...dedicado a Dios y a mi familia.

Agradecimientos

Quiero agradecer a todas las personas que hicieron posible este proyecto en especial al Dr. Luis Aponte Bermúdez por su mentoría durante el proceso de mis estudios graduados. A mis padres y hermana, Lysis José y Camila, por su apoyo incondicional en todo momento. Gracias Ruperto Chaparro, director de Sea Grant, y a todo su personal por auspiciar el trabajo de esta investigación. Al Dr. Miguel Canals Silander y todo el equipo de trabajo de CariCOOS por poner siempre a nuestra disposición sus datos y equipos.

Quiero agradecer a la Oficina del CRIM por facilitarnos los datos del Catastro Digital para realizar el análisis de costos. Al Dr. José Alameda Lozada por darnos sugerencias y datos sobre la economía de Rincón. A todos los miembros de la facultad del Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura y su director Ismael Pagán Trinidad. Por último, quiero agradecer al Dr. Ricardo López Rodríguez por sus consejos y motivación.

Tabla de Contenido

ABSTRACT	II
RESUMEN	IV
AGRADECIMIENTOS	VIII
TABLA DE CONTENIDO	IX
LISTA DE TABLAS	XII
LISTA DE FIGURAS	XIII
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.2 UBICACIÓN DE SITIO	2
1.3 JUSTIFICACIÓN	4
1.4 REPASO DE LITERATURA	5
1.4.1 Cambios en la posición de la costa	5
1.4.2 Simulación numérica	6
1.4.3 Estrategias para proteger las costas	7
1.4.4 Economía	8
2 OBJETIVOS	10
3 IMPACTO DE LA EROSIÓN COSTERA EN LA INFRAESTRUCTURA DE RINCÓN, PUERTO RICO.....	12
3.1 INTRODUCCIÓN	12
3.2 EVOLUCIÓN A LARGO PLAZO DE LA COSTA DE RINCÓN	14
3.3 SINOPSIS DEL HURACÁN MATTHEW: EROSIÓN Y RECUPERACIÓN A CORTO PLAZO	16
3.4 IMPACTO DE MATTHEW EN RINCÓN.....	21
3.5 SINOPSIS DE HURACÁN DE MARÍA	24
3.6 IMPACTO DE MARÍA EN RINCÓN	28
3.7 CONCLUSIÓN	37
4 MANEJO DE DATOS DEL CATASTRO DIGITAL DE PUERTO RICO	38
4.1 INTRODUCCIÓN	38
4.2 PARCELARIO DEL CRIM	39
4.3 METODOLOGÍA	41
4.3.1 Tasa de interés de crecimiento	42
4.3.2 Valor de la propiedad en el área de estudio.....	44

4.3.3	<i>Contribución sobre la propiedad</i>	46
4.4	RESULTADOS	48
4.4.1	<i>Tasa de interés de crecimiento</i>	48
4.4.2	<i>Estimado de valor de la propiedad a valores corrientes (2017)</i>	49
4.4.3	<i>Contribución sobre la propiedad</i>	50
4.5	CONCLUSIÓN	51
5	ESTRATEGIAS PARA PROTEGER LAS COSTAS DE RINCÓN, PUERTO RICO	52
5.1	INTRODUCCIÓN	52
5.2	ESCENARIO 1: REALIMENTACIÓN DE PLAYAS	54
5.2.1	<i>Resultados de estudios previos</i>	55
5.2.2	<i>Diseño de perfil de playa</i>	58
5.2.3	<i>Cómputo de volumen</i>	62
5.2.4	<i>Estimado de costo de proyecto de realimentación de costa</i>	64
5.2.5	<i>Evaluación del Bajo Blanco como fuente de extracción de arena</i>	65
5.3	ESCENARIO 2: ARMAR LA COSTA	68
5.3.1	<i>Metodología para armar la costa</i>	69
5.3.2	<i>Costo de estimado de armar la costa en el área de estudio</i>	69
5.4	ESCENARIO 3: HÍBRIDO DE REALIMENTAR Y ARMAR LA COSTA	70
5.4.1	<i>Costo de proyecto de realimentación de playas combinado con estructura paralela a la costa</i> 70	
5.5	CONCLUSIÓN	71
6	ANÁLISIS DE COSTOS Y BENEFICIOS DE PROTEGER Y RELLENAR LAS COSTAS DE RINCÓN	72
6.1	INTRODUCCIÓN	72
6.2	COSTOS DE PROTEGER LAS COSTAS DE RINCÓN	74
6.3	BENEFICIOS DE PROTEGER Y RELLENAR LAS COSTAS DE RINCÓN	75
6.4	METODOLOGÍA	76
6.5	RESULTADOS	77
6.6	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	80
6.7	CONCLUSIÓN	80
7	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS	81
	REFERENCIAS	83
	APÉNDICE A. FOTOGAMETRÍA AÉREA EN RINCÓN, PUERTO RICO	86

APÉNDICE B.	PASOS PARA EL DISEÑO DE BERMA PROPUESTA.....	89
--------------------	---	-----------

Lista de Tablas

Tablas	Página
Tabla 1: Ajuste de datos del CRIM (1958) a precios corrientes (2017). Fuente: CRIM de Puerto Rico.	50
Tabla 2: Resultados de la contribución sobre la propiedad.	50
Tabla 3: Parámetros de escala de sedimentos. Información adaptada de Robert Dean (2004).	56
Tabla 4: Resultados de cómputo de volumen para método 1.	63
Tabla 5: Costo por zona de rellenar la costa oeste de Rincón.	75
Tabla 6: Costo por zona de armar la costa oeste de Rincón.	75
Tabla 7: Valor de la propiedad de las propiedades colindante a la costa.	76
Tabla 8: Contribución sobre la propiedad de las parcelas colindantes a la costa.	76
Tabla 9: Costos de realizar proyectos de restauración y protección de playas utilizando técnicas de mitigación de daños por la erosión.	77
Tabla 10: Beneficios identificados como el valor de la propiedad más la contribución sobre la propiedad inmueble.	77
Tabla 11: Resultados de la razón beneficio/costo de rellenar las playas con arena y de armar la costa con estructuras paralelas a la costa con tasa de interés de 4.66%.	78
Tabla 12: Resultados de la razón beneficio/costo de rellenar las playas con arena y de armar la costa con estructuras paralelas a la costa con tasa de interés de 5.70%.	78
Tabla 13: Resultados de la razón beneficio/costo de rellenar las playas con arena y de armar la costa con estructuras paralelas a la costa con tasa de interés de 6.85%.	78
Tabla 14: Resultados de la razón beneficio/costo de rellenar las playas con arena y de armar la costa con estructuras paralelas a la costa tomando en consideración solamente las zonas 3, 4 y 5.	79

Lista de Figuras

Figuras	Página
Figura 1: Localización de sitio del Municipio de Rincón.....	3
Figura 2.: Fotografías aéreas delimitando la posición de la costa en la región del Balneario Municipal de Rincón para los años: a) 1936 – línea verde, b) 1987 – línea anaranjada & c) 2016 – línea roja.....	15
Figura 3: Fotografías aéreas delimitando la posición de la costa en la región de Córcega Rincón, Puerto Rico para los años: a) 1936 – línea verde, b) 1987 – línea anaranjada & c) 2016 – línea roja.....	15
Figura 4: Imagen de satélite infrarrojo del huracán Matthew el 3 de octubre de 2016. Fuente: NOAA (2016).....	19
Figura 5: Predicciones de la altura del oleaje del modelo de CARICOOS para el 4 de octubre del 2016. La dirección inusual del oeste-suroeste de la marejada causó severos daños en municipios de la costa oeste de Puerto Rico, con los daños más severos en Rincón. Fuente: (CariCOOS, 2016).....	19
Figura 6: Altura del oleaje Fuente: (CariCOOS, 2016).....	20
Figura 7: Zona impactada por la marejada en el Hotel Villa Cofresí, Rincón Puerto Rico (tomada el 7 de octubre de 2016).....	22
Figura 8.: Zona impactada por la marejada en la playa de Stella, Rincón, Puerto Rico: a) vista aérea de la erosión del asfalto, b) vista terrestre de la erosión en Stella (tomadas el 7 de octubre de 2016).....	22
Figura 9: Fotografía panorámica de los complejos de apartamentos residenciales en la playa de Córcega en Rincón, P.R (tomada el 18 de enero de 2017).....	23
Figura 10: Daños ocasionados en la tablestaca del complejo de apartamentos Rincón Ocean Club 2 por la marejada del huracán Matthew (tomadas el 7 de octubre de 2016): a) Vista panorámica, b) Vista cercana del área colapsada de la tablestaca resaltando los cimientos expuestos de la edificación.....	24
Figura 11: Altura de ola registrada por la boya de Rincón (ID 41115).	25
Figura 12: Dirección de ola registrada por la boya de Rincón; dicha boya es manejada por CariCOOS.....	26

Figura 13: Periodo de ola registrada en la boya los días del Huracán María.....	27
Figura 14: Huracán María - Aviso del Centro Nacional de Huracanes para el 20 de septiembre de 2017. Fuente: NOAA (2017)	28
Figura 15: Zona impactada por la marejada en el Hotel Villa Cofresí, Rincón Puerto Rico (tomada el 22 de noviembre de 2017).....	29
Figura 16: Zona impactada por la marejada en la playa de Stella, Rincón, Puerto Rico (tomadas el 22 de noviembre de 2017): a) Vista aérea, b) Vista terrestre.	29
Figura 17: Fotografía panorámica de los complejos de apartamentos residenciales en la playa de Córcega en Rincón, P.R (tomada el 22 de noviembre de 2017).....	30
Figura 18: Daños ocasionados en la tablestaca del complejo de apartamentos Rincón Ocean Club 2 por la marejada del huracán María: a) Vista frontal (tomada el 22 de noviembre de 2017), b) Vista cercana del área colapsada de la tablestaca resaltando los cimientos expuestos de la edificación (tomada el 7 de octubre de 2017).	30
Figura 19: Impacto del Huracán María al Hotel Villa Cofresí (tomadas el 8 de octubre de 2017): a) Vista panorámica, b) Vista terrestre hacia el sur, c) Vista terrestre hacia el norte.	31
Figura 20: Fotografía frente al Hotel Villa Cofresí en dirección hacia las parcelas Stella (tomadas el 8 de octubre de 2017).	32
Figura 21: Impacto del Huracán María en el complejo de apartamentos Victoria del Mar (tomadas el 8 de octubre de 2017).	33
Figura 22: Impacto del Huracán María en el complejo de apartamento Rincón Ocean Club 1 (tomadas el 8 de octubre de 2017).	34
Figura 23: Impacto del Huracán María al complejo de apartamentos Rincón Ocean Club 2 (tomadas el 8 de octubre de 2017).	35
Figura 24: Impacto del Huracán María al complejo de apartamentos Rincón Ocean Club 2 (tomadas el 8 de octubre de 2017).	36
Figura 25: Parcelario del CRIM para el Municipio de Rincón, Puerto Rico. Fuente: CRIM (2015).....	40
Figura 26: Metodología para manejar los datos del CRIM.....	41
Figura 27: Parcelas que tienen información de compraventa y pueden ser utilizadas para calcular tasa de interés de crecimiento.....	43
Figura 28: Propiedades en la costa oeste de Rincón identificadas como costeras en el área del proyecto.....	45
Figura 29: Tipos contributivos sobre la propiedad mueble e inmueble.....	47

Figura 30: Tasa de interés de crecimiento para las transacciones de compra/venta registradas por el CRIM. Las parcelas a 30 metros de la costa son en total 299, a un kilómetro de la costa 1,918 y por último, el total con 3,116 parcelas con información sobre el valor tributable.	49
Figura 31: Clasificación de barreras existentes entre el Balneario y la Casa Hines.	53
Figura 32: Maquinaria utilizada para limpiar la arena antes de colocarla en la playa.....	55
Figura 33: Vista en planta del área de estudio de Salas (2014), en color violeta la batimetría y amarillo y rojo el perfil propuesto.	57
Figura 34: Vista en planta del diseño de berma propuesto en el Balneario, está basado en dos condiciones, 35 metros a partir de la posición de la costa del 2016 o la posición de la costa en el 1936.	59
Figura 35: Vista en planta del diseño de berma propuesto en Villa Cofresí, está basado en dos condiciones, 35 metros a partir de la posición de la costa del 2016 o la posición de la costa en el 1936.	60
Figura 36: Perfil esquemático de rellenar las playas.	61
Figura 37: Vista en planta de la batimetría del Bajo de Blanco con los datos LiDAR del USACE 2016.	66
Figura 38: Plano de localización del Bajo de Blanco como posible fuente de extracción para proyecto de realimentación de playas.	67
Figura 39: Perfil esquemático del escenario donde una estructura sólida protege las estructuras adyacentes del impacto de las olas.	68
Figura 40: Clasificación de propiedades según la zona; la zona 1 es desde el, Balneario hasta la Quebrada Ramos, la zona 2 desde la Quebrada Ramos hasta el Hotel “Rincón of the Seas”, la zona tres hasta Stella, la zona 4 hasta Córcega, la 5 hasta el edificio de apartamentos Pelican y la 6 hasta la Casa Hines.	73
Figura 41: Control fotogramétrico frente al Faro de Rincón (Fuente: Global Matrix Engineering).....	87
Figura 42: Orto mosaico del proyecto fotogramétrico, el trabajo fue realizado por la compañía Global Matrix Engineering. La estrella está localiza sobre el complejo de apartamentos Rincón Ocean Club 1.....	88

1 Introducción

1.1 Planteamiento del problema

La mayor parte de la población de Puerto Rico habita en municipios costeros (Seguinot & Méndez, 2008). Esto tiene mucho sentido si consideramos que el transporte de carga más costo efectivo es por vía marítima. El problema surge cuando la infraestructura que permite el desarrollo de las comunidades costeras se encuentra vulnerable ante eventos extremos tales como, huracanes y tormentas invernales que producen grandes inestabilidades en las condiciones meteorológicas y ocasionan daños.

En el caso de Rincón, municipio al oeste de Puerto Rico, el problema principal es la tendencia de que la línea costera siga entrando cada vez más tierra adentro a través de los años. Al proceso de pérdida de área de playas se le conoce como erosión costera. La erosión ha provocado que las propiedades cerca de la costa pierdan valor y atractivo turístico. La pérdida de arena en las playas preocupa a los residentes y comerciantes de la zona porque sus principales ingresos se deben en gran parte al disfrute de su situación costera.

La erosión en Rincón ha sido estudiada desde varias perspectivas científicas. Los cambios registrados en la posición de la costa oeste se extiende desde el Faro de Rincón hasta la colindancia con el Municipio de Añasco y estos fueron calculados por Thieler, Rodríguez, & Himmelstoss, (2007). En dicho estudio se encontró que las zonas que mayor impacto han recibido por la erosión se transcurren entre el Balneario y la Playa de Córcega.

1.2 Ubicación de sitio

El municipio de Rincón se encuentra localizado al oeste de Puerto Rico y cuenta con una población de cerca de quince mil habitantes y aproximadamente trece kilómetros de costa. Al norte se encuentra el Océano Atlántico, al este, el Municipio de Aguada, al oeste el Canal de la Mona y al sur tiene el Municipio de Añasco. El Centro de Observación Oceánica y del Caribe (CariCOOS) maneja dos instrumentos esenciales para el monitoreo de las condiciones climatológicas de la región, uno de ellos es una boya capaz de obtener medidas que sirven para estimar la altura, dirección y periodo de olas, el otro es una estación meteorológica (NDBC-PTRP4 Puntas Rincón, PR) que entre otros instrumentos cuenta con un anemómetro que registra dirección y velocidad del viento. Tomando como referencia el Faro de Rincón, la boya se encuentra al noroeste mientras que la estación meteorológica se encuentra ubicada al noroeste del mismo (ver Figura 1). La zona que ha sido impactada mayormente por la erosión se ubica entre el Balneario y la Casa Hines, esta zona fue identificada como la más afectada a base de las tasas de erosión históricas (Thieler et al., 2007). La Reserva Marina Tres Palmas es un área protegida debido a su alto valor ecológico, se encuentra localizada cerca de la antigua Marina de Rincón y es disfrutada por bañistas, buzos y surfistas durante todo el año. Por otra parte, el Bajo Blanco es un área poco profunda o banco de arena, que ha sido evaluada como posible fuente de extracción de arena para proyectos de realimentación de playas (Salas, 2014 & Rojas, 2016).

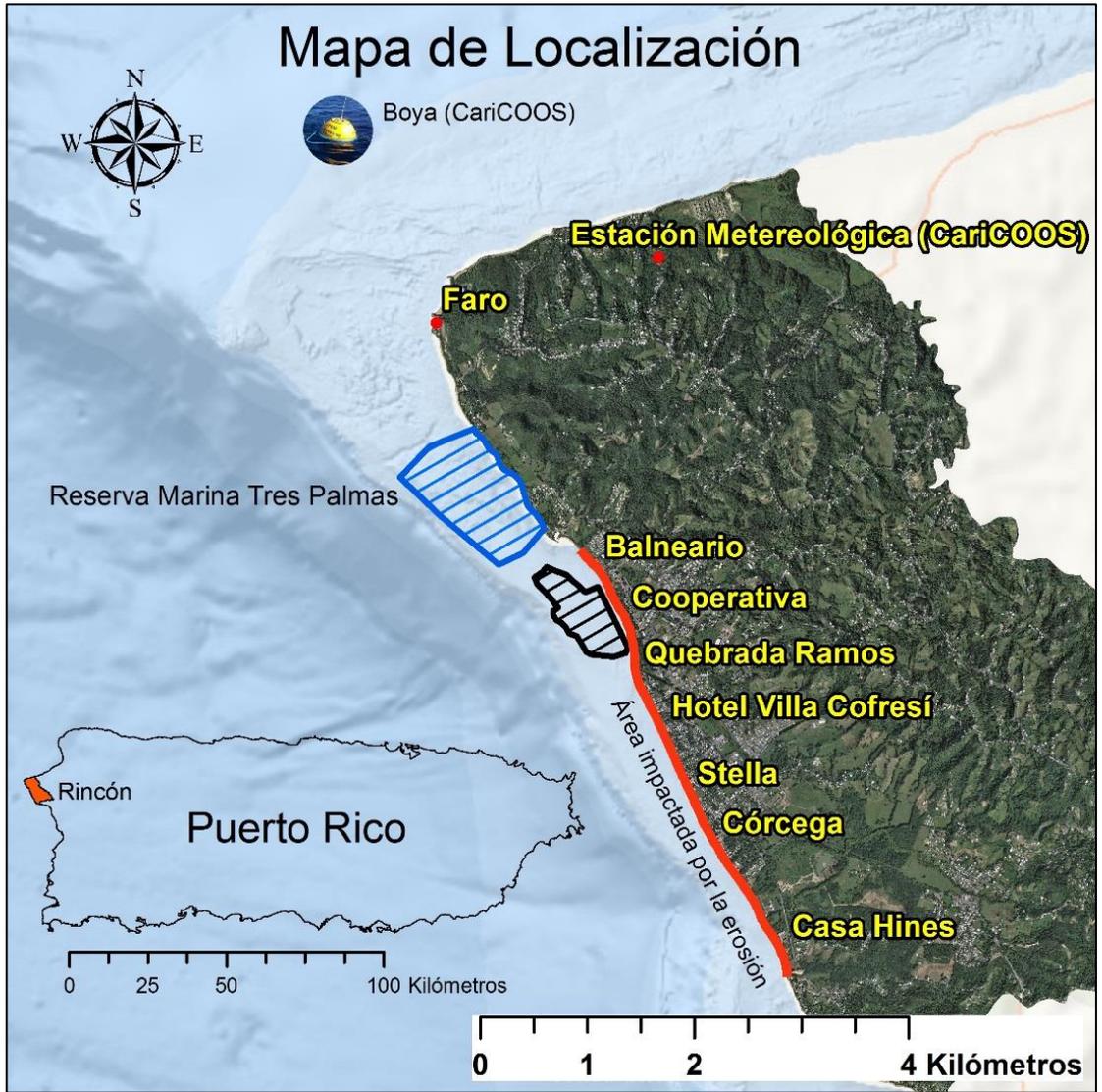


Figura 1: Localización de sitio del Municipio de Rincón.

1.3 Justificación

Uno de los principales incentivos de preservar el valor ecológico y turístico de los ecosistemas costeros mediante técnicas de restauración de playas es que estos ambientes son la razón por la cual turistas locales e internacionales visitan el Municipio de Rincón. El ingreso total de Rincón ronda los nueve millones de dólares anuales (Estado Libre Asociado de Puerto Rico, 2016), se estima que al menos un diez por ciento de esta cantidad se le puede atribuir a la industria del turismo (Pendleton, 2002). Uno de sus principales atractivos turísticos son sus playas, visitadas por surfistas y bañistas durante todo el año. La mayor parte de su actividad económica gira en torno al turismo que visita sus costas (Pendleton, 2002). A pesar de esto, Rincón no tiene jurisdicción en la Zona Marítimo Terrestre (ZMT); quien tiene la autoridad de ley sobre esta zona es el Departamento de Recursos Naturales y Ambientales (DRNA) de Puerto Rico.

La amenaza que representa el calentamiento global en cuanto al aumento en el nivel del mar y el desarrollo de eventos meteorológicos extremos es una realidad que debe enfrentar la humanidad (Díaz, 2012). Puerto Rico, al igual que otras jurisdicciones insulares, debe tomar acción para mitigar los daños ocasionados por el aumento del nivel mar y eventos costeros extremos provocados por sistemas ciclónicos y tormentas invernales. En las últimas dos décadas estos fenómenos climáticos han ocasionado un impacto directo en las costas de Puerto Rico y su infraestructura, en detrimento para la vida de los puertorriqueños. Las marejadas provocadas por los ciclones tropicales Isaac (2012), Sandy (2012), Matthew (2016) y recientemente María (2017) dejan al descubierto la vulnerabilidad de la infraestructura costera de la zona. En el caso del Municipio de Rincón,

la zona costera está compuesta por complejos de vivienda residencial, hoteles, vías públicas y comercios privados y ha sido una de las zonas donde la infraestructura ha sido impactada directamente.

Es vital unir esfuerzos multisectoriales para enfrentar el problema de erosión costera del país. La importancia de esta colaboración ha sido reconocida por las autoridades locales como el DRNA y por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos. Estos últimos se encuentran gestionando esfuerzos para atender el llamado a una solución económicamente viable (DRNA, 2015). Actualmente las alternativas reconocidas para atender el problema de erosión costera son: remover las propiedades afectadas por el mar, construcción de barreras para proteger la costa las cuales deben ser capaces de soportar el embate de las olas y, por último, realimentar las playas con arena.

Esta investigación propone proveer datos para que los utilice el Programa Sea Grant de la Universidad de Puerto Rico en Mayagüez y el Programa de Manejo de la Zona Costanera del Departamento de Recursos Naturales y Ambientales (DRNA) de Puerto Rico en sus análisis de viabilidad de proyectos de restauración de las playas de Rincón, Puerto Rico.

1.4 Repaso de Literatura

1.4.1 Cambios en la posición de la costa

La erosión de las playas es la deficiencia de arena en un tiempo y espacio determinado, puede ocurrir por factores naturales o antropogénicos. En el caso de Puerto Rico, los cambios en la posición de la costa han sido estudiados por Morelock (1978), en cuyo reporte se mencionan las razones que ocasionan la variación en la posición de la costa. Si

estos cambios ocurren tierra adentro se conoce como erosión. Si por el contrario los cambios ocurren mar afuera, se les conoce como acreción o ganancia de tierra. Las razones que ocasionan estos cambios en las costas de Puerto Rico son: las alteraciones en el nivel del mar, la erosión de barreras de coral y eolitos, la modificación del sistema por las actividades humanas y la maduración del sistema costero (Morelock, 1978).

La costa de Rincón ha sido estudiada a través de los años por varios científicos. Los cambios en la posición de la línea costera de Rincón fueron evaluados por Thieler et al., (2007). En dicho proyecto se utilizaron fotografías aéreas para delimitar la línea costera y estimar la razón de cambio entre los años 1936 y 2006 que en los transectos más cercanos a la Cooperativa de Rincón llegan a ser de -1.1 m/año siendo el área más crítica. Por otro lado, las cuatro zonas que Thieler et al. (2007) son de la A a la D y los resultados se presentan a continuación: en la zona A la tasa de cambio de la línea costera es -0.3 m/año , en la zona B -1.0 m/año, en la zona C -0.7 m/año, por último, en la zona D -0.3 m/año.

1.4.2 Simulación numérica

En la tesis titulada *Field observations and numerical simulations of storm-induced nearshore morphology change in Rincón, Puerto Rico* por Chardón, (2013) se estudió la respuesta hidrodinámica de la playa cerca del Hotel Villa Cofresí. Dicho estudio manejó datos batimétricos los cuales fueron colectados manejando técnicas de sistemas sonar ensamblado sobre una moto acuática (en inglés, “Jet Ski”). Se colectó información de perfiles de elevación antes y después de la tormenta Isaac (2012) y se compararon los resultados obtenidos en el campo versus simulaciones numéricas.

1.4.3 Estrategias para proteger las costas

En la tesis titulada *Comparing Erosion Management Strategies in Waikiki , Hawai'*, se plantean las alternativas disponibles para atender los problemas de erosión en playas (Porro, 2015). Las tres alternativas para manejar el problema de la pérdida de playas son la realimentación de arena de playas “beach nourishment”, construcción de sistemas paralelos a las costas para proteger la propiedad y remoción de la infraestructura y relocalización tierra adentro (en inglés, “retreat”). La realimentación de arena a las playas es una técnica común en la costa este de los Estados Unidos. Este proceso consiste en colocar arena utilizando maquinaria pesada en las playas para crear artificialmente una berma de mayor tamaño, en otras palabras, crear playa con el fin de proveer espacios recreacionales y proteger las estructuras del embate de las olas. Uno de los retos de este procedimiento es determinar el costo del mismo y la fuente para proveer la arena. Para esto es necesario calcular el volumen requerido para rellenar las costas afectadas con arena. En Salas (2014) se plantea la posibilidad de rehabilitar la playa frente a los hoteles “Rincón of the Seas” y Villa Cofresí colocando cerca de 60,000 m³ de arena. Rojas (2016) sugirió que si se consideraba un perfil de diseño similar al utilizado por Salas harían falta cerca de 1,000,000 m³ para rellenar la playa con una berma de 35 metros de ancho. Salas (2014) recurrió a la ecuación de perfil de playa en equilibrio (EBP por sus siglas en inglés) para diseñar la parte sumergida del perfil de la playa. Otra alternativa es armar la costa colocando tablestacado, muros de hormigón reforzado o métodos combinados para proteger la propiedad del embate de las olas. Los residentes de las zonas más afectadas por el problema de la erosión

han tomado medidas para proteger sus hogares construyendo muros de contención y colocando “rip-raps”.

1.4.4 Economía

Para poder seleccionar la alternativa más económicamente viable es necesario cuantificar el valor actual de las propiedades costeras a lo largo de la costa de Rincón a partir de datos provistos por el CRIM. Debido a que este set de datos no cuenta con los valores actuales de tasación de las propiedades del Municipio de Rincón se propone una metodología para ajustar los datos del CRIM a valores actuales en el presente. Estos datos se encuentran en el Catastro Digital de Puerto Rico. Esta herramienta permite acceso al inventario cartográfico y digital de las propiedades inmuebles de Puerto Rico (CRIM, 2016). La base de datos del CRIM cuenta con varias capas de información, entre ellas fotografías aéreas, parcelario con un número de catastro para cada propiedad, valor contributivo, dueño, etc. Esta herramienta se utiliza para llevar el inventario de las parcelas y recaudo de los impuestos municipales.

El Portal del Catastro Digital de Puerto Rico permite a los ciudadanos acceder al inventario catastral de las propiedades inmuebles (CRIM, 2016a). Para mayor información sobre el Catastro Digital se sugiere consultar el documento titulado “Guía rápida del Portal del Catastro Digital” (CRIM, 2016b). El estudio preparado por Cao y Rodríguez (2010) indica que la última tasación realizada por el CRIM fue en el año 1958 por lo que el valor contributivo del CRIM conocido como TOTALVAL corresponde al valor de tasación a precios de dicho año.

La preservación de los recursos costeros de Rincón es de mucha importancia ya que la economía local depende en gran parte del turismo (Pendleton, 2002). Los turistas que visitaron a Puerto Rico en el año 2000 gastaron \$2,387,000,000 en sus vacaciones, esta cifra representa el 7% por ciento de los ingresos de ese año. En contraste, si se toman en consideración todos los bienes y servicios que giran en torno a la economía del turismo en Rincón para el año 1997 se generaron cerca de \$17.3 millones en ganancias, esto representa cerca de un 40% de todos los ingresos para ese año (Pendleton, 2002).

2 Objetivos

El objetivo general de esta investigación es respaldar al Programa Sea Grant de la Universidad de Puerto Rico en Mayagüez con datos que sirvan como punto de partida para proyectos de restauración de playas en el municipio de Rincón. Los objetivos específicos son los siguientes:

- calcular el volumen necesario de arena para rellenar la costa oeste de Rincón, desde el área de Balneario público de Rincón hasta la Casa Hines, con una berma de diseño que varía entre 35 y 25 metros;
- estimar el costo de rellenar parte de la costa de Rincón con el volumen del punto anterior;
- estimar el costo de instalar estructuras paralelas a través de la costa;
- ajustar los datos de valorización del CRIM a precios del presente (2017) para las propiedades que colindan con la playa;
- llevar a cabo un análisis de costos y beneficios de los escenarios presentados con el objetivo de proteger las costas de Rincón.

En el Capítulo Tres, titulado Impacto de la Erosión Costera a la Infraestructura de Rincón, se presenta el impacto que ha sufrido la infraestructura costera que ha sido afectada por cambios costeros que se han documentado a corto y largo plazo. En el Capítulo Cuatro, titulado Manejo de Datos del Catastro Digital del CRIM, se presenta los métodos, presunciones y resultados del manejo de datos del CRIM para estimar valor de las propiedades a precios del 2017 y los recaudos anuales del CRIM. El Capítulo Cinco lleva

por título Estrategias para Proteger las Costas de Rincón. Se presentan las alternativas sugeridas para proteger las propiedades costeras ubicadas en la zona identificada como área del proyecto. En el Capítulo Seis, titulado Análisis de Costos y Beneficios de Proteger la Costa, tiene como propósito comparar los costos y beneficios de las estrategias sugeridas para proteger parte de la costa oeste de Rincón. Finalmente, el Capítulo Siete contiene las conclusiones y recomendaciones para proyectos futuros dados las experiencias encontradas en este proyecto investigativo.

3 Impacto de la Erosión Costera en la Infraestructura de Rincón, Puerto Rico

El presente capítulo es una versión adaptada de la investigación publicada en la Revista Dimensión del Colegio de Ingenieros y Agrimensores de Puerto Rico (CIAPR), en el cual se presenta el impacto de los huracanes Matthew (2016) y María (2017) en las costas de Rincón, titulado “Impacto de la Erosión Costera a la Infraestructura de Rincón, Puerto Rico” por Luis D. Aponte-Bermúdez, PhD, PE; Francisco J. Villafañe-Rosa, BSCE, BSST; Miguel Canals, PhD; Jonathan Muñoz-Barreto, PhD; Ernesto L. Díaz, MS. (Aponte, Villafañe, Canals, Muñoz, & Díaz, 2016)

3.1 Introducción

Esta publicación tuvo como objetivo principal documentar el impacto de las marejadas provocadas por el Huracán Matthew y en la versión adaptada en este escrito se incluye el impacto del huracán María en la costa oeste del Municipio de Rincón. En este artículo analizamos la erosión costera y su impacto a la infraestructura a dos escalas de tiempo: la erosión a largo plazo – desde el 1936 al presente – y la erosión a corto plazo causada por el oleaje asociado al huracán Matthew en el 2016 y María en el 2017. Además de lo antes mencionado se presenta el impacto del Huracán María. Estos eventos y sus consecuencias perturban indiscutiblemente la calidad de vida y el diario vivir de todos los seres humanos. Puerto Rico no es la excepción; precisamente y debido a su condición insular, resulta imperativo que se implementen medidas de mitigación ante estos fenómenos atmosféricos y oceánicos. Esto cobra mayor relevancia debido a que gran parte de la actividad económica del país depende del bienestar de las costas y su infraestructura. Puerto Rico

tiene 799 millas de costa (fuente: Programa de Manejo de la Zona Costanera de Puerto Rico) y nuestras playas son el principal atractivo turístico de la industria hotelera y un importante atractivo de recreación familiar para todos los puertorriqueños. Además, gran parte de la actividad económica del país depende del comercio marítimo ya que es el principal medio utilizado para importar la materia prima, entre otros bienes y servicios, utilizada para la generación de la energía eléctrica en la isla. Durante las últimas décadas las costas de Puerto Rico han sido afectadas por eventos de marejadas causados por ciclones tropicales y frentes fríos. Las marejadas provocadas por los huracanes Matthew (2016) y María (2017) ponen al descubierto la vulnerabilidad de la infraestructura costera del municipio de Rincón, y todo Puerto Rico.

La erosión costera ocurre debido a un déficit de arena causado cuando fuerzas hidrodinámicas transportan más arena fuera del lugar de la arena de la que llega al lugar. Esta erosión puede ocurrir a múltiples escalas de tiempo. La erosión a largo plazo se refiere al comportamiento de la costa a través de varios años y décadas. Entre sus causas se encuentran cambios (antropogénicos o naturales) al volumen de arena disponible en el entorno costero, cambios en el nivel de oleaje afectando la costa, o cambios en los patrones de corrientes costeras – también por razones naturales o antropogénicas (por ejemplo, estructuras costeras). Una visión holística de esfuerzos multisectoriales para enfrentar el problema de erosión costera es fundamental para manejar el problema. La importancia de establecer esta colaboración ha sido reconocida por las autoridades locales como el Departamento de Recursos Naturales y Ambientales (DRNA) y por el Cuerpo de

Ingenieros de los Estados Unidos, (USACE, por sus siglas en inglés). “El problema de erosión que afecta varios sectores costeros de Puerto Rico debe atenderse mediante un componente multisectorial integrado por agencias gubernamentales, municipios, comunidades, el sector privado y la academia... (Departamento de Recursos Naturales, 2015).”

3.2 Evolución a Largo Plazo de la Costa de Rincón

Los cambios morfológicos de la costa de Rincón desde el 1936 hasta 2006 han sido estudiados usando fotografías aéreas y tecnología de percepción remota (Thieler et al., 2007); en este se ha determinado un patrón acelerado en la tasa de erosión costera en los últimos catorce años del estudio (1992 al 2006) (Thieler et al., 2007). Esta investigación indica que la zona de mayor crecimiento en la tasa de erosión se extiende desde el norte del Balneario Público del municipio de Rincón hasta el área de Córcega.

En las Figuras 2 y 3 se presentan las fotografías aéreas históricas que se han tomado a lo largo de la costa de Rincón con énfasis en las regiones del Balneario Municipal y Córcega, respectivamente. Las fotografías aéreas correspondientes a los años 1936 y 1987 y la posición de la costa de estas se obtuvieron del catálogo de data del estudio de Thieler et al., (2007) .

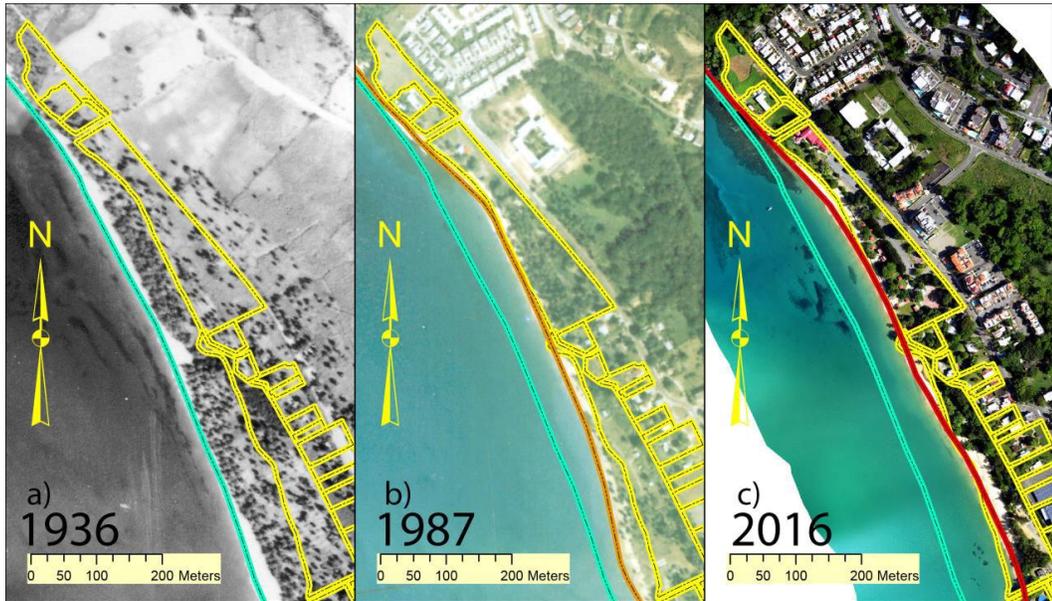


Figura 2.: Fotografías aéreas delimitando la posición de la costa en la región del Balneario Municipal de Rincón para los años: a) 1936 – línea verde, b) 1987 – línea anaranjada & c) 2016 – línea roja

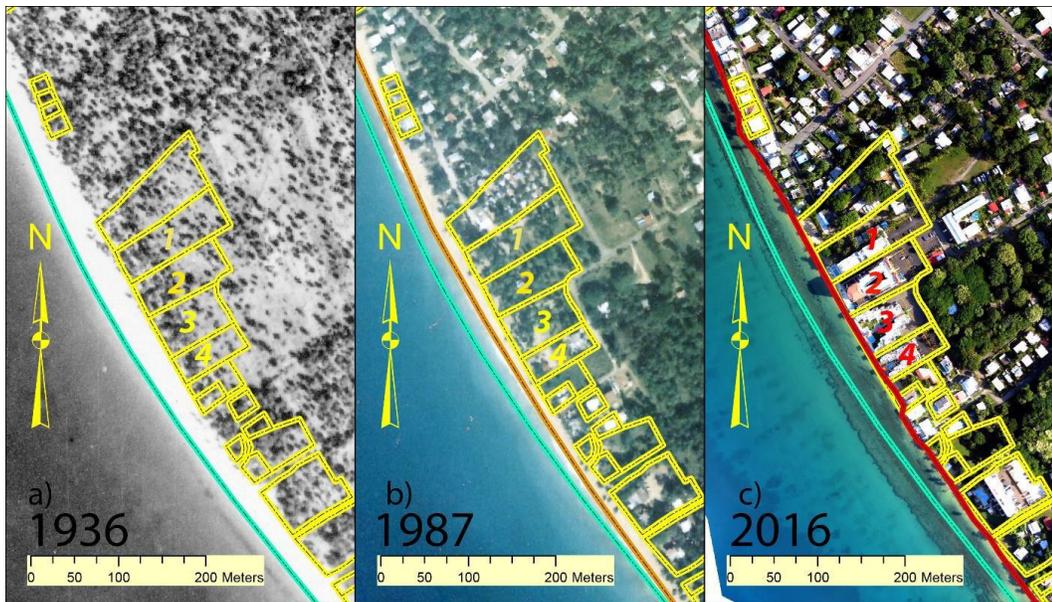


Figura 3: Fotografías aéreas delimitando la posición de la costa en la región de Córcega Rincón, Puerto Rico para los años: a) 1936 – línea verde, b) 1987 – línea anaranjada & c) 2016 – línea roja

Como parte de las tareas de la investigación se contrató a la compañía Global Matrix Engineering (GME) para tomar fotografías aéreas a lo largo de la zona de mayor erosión en la costa de Rincón. Dichas fotografías fueron tomadas el 18 de septiembre de 2016, semanas antes del impacto de la marejada del huracán Matthew. Utilizando el programa ArcMap, se trazó la línea de costa identificada en este estudio como la costa del año 2016. Como punto de referencia la línea de costa del año 1936 se ilustra en todas las fotografías en color verde, así como el parcelario del CRIM en líneas color amarillo entrecortadas de negro. Además, en la Figura 3 se identifican cuatro complejos de apartamentos residenciales en la zona de Córcega del número 1 al 4 (1 Costa Córcega, 2 Victoria del Mar, 3 Rincón Ocean Club 1, y 4 Rincón Ocean Club 2). Las Figuras 2a) y 3a) presentan la posición de la línea costera para el 1936 en color verde, las Figuras 2b) y 3b) para el año 1987 en color anaranjada, y las Figuras 2c) y 3c) para el año 2016 en color rojo. En algunos lugares se puede observar la erosión de hasta 100 metros de playa desde el 1936 al presente, por ejemplo, en la playa que colinda con la Cooperativa de Rincón.

En las playas de Rincón desde el 1936 hasta el 2006 se habían perdido cerca de 32 cuerdas de área en planta de playa o área de berma (Alvarado, 2017). La posición de las líneas de costa fue obtenida del estudio Thieler et al. (2007) y USGS.

3.3 Sinopsis del Huracán Matthew: Erosión y Recuperación a Corto Plazo

El huracán Matthew, según la escala de vientos huracanados Saffir-Simpson (National Hurricane Center, 2017a), se convirtió en categoría 1 el 29 de septiembre de 2016 en aguas

del Mar Caribe al sur de Puerto Rico. Tras su paso por la zona se intensificó a categoría 5 y afectó directamente a Haití y Cuba con intensidad de categoría 4. La Figura 4 presenta la imagen de satélite infrarrojo del huracán Matthew el 3 de octubre de 2016 a las 13:15 UTC. La marejada ciclónica es definida como el aumento del nivel del mar generado por un sistema ciclónico sobre el nivel de la marea astronómica (National Hurricane Center, 2017b). Uno de los factores más importantes que contribuyen al nivel de la misma es la intensidad de los vientos, ya que estos son responsables de empujar el agua hacia la costa. Las marejadas también contribuyen al aumento del nivel del mar sobre el nivel normal. En el caso del huracán Matthew la rápida intensificación del sistema y la gran extensión de los vientos fueron los detonantes para que la marejada ciclónica afectara la costa oeste y sur de Puerto Rico. Las olas generadas por este sistema tropical, su altura significativa y periodo, fueron documentados por la Boya de Rincón (Caribbean Coastal Ocean Observing System, 2017) del Sistema Integrado de Observación Oceánica Costera (CariCOOS por sus siglas inglés). Información adicional sobre CariCOOS y datos del sistema de observación están disponible en el portal cibernético www.caricoos.org.

El huracán Matthew generó dos eventos significativos de marejadas (o “swell” en inglés). El primero ocurrió del 2 al 5 de octubre de 2016, tras el paso del sistema ciclónico por el mar Caribe, con olas de tamaño mediano y de periodos cortos a moderados provenientes del suroeste y oeste. La Figura 5 presenta una imagen con el pronóstico de la altura del oleaje del modelo de olas de CariCOOS para el 4 de octubre de 2016 a las 2:00 pm hora local. La imagen muestra vectores que indica la dirección de la ola y la altura de

éstas relacionadas a la escala de colores, se puede observar que para este instante del pronóstico la altura significativa de las olas a lo largo de costa oeste de Rincón era de 7 a 8 pies, provenientes del oeste-suroeste. Este evento fue el causante de los daños más severos en la costa oeste de Rincón, principalmente debido a la dirección inusual de las marejadas. El segundo evento ocurrió del 11 al 15 de octubre de 2016, tras el impacto de Matthew a la costa este de los Estados Unidos, con olas de un tamaño alto y de periodos largos provenientes del noroeste. En menos de un mes la mayoría de las playas se recuperaron a sus condiciones pre-tormenta, sin embargo, los daños a la infraestructura son permanentes.

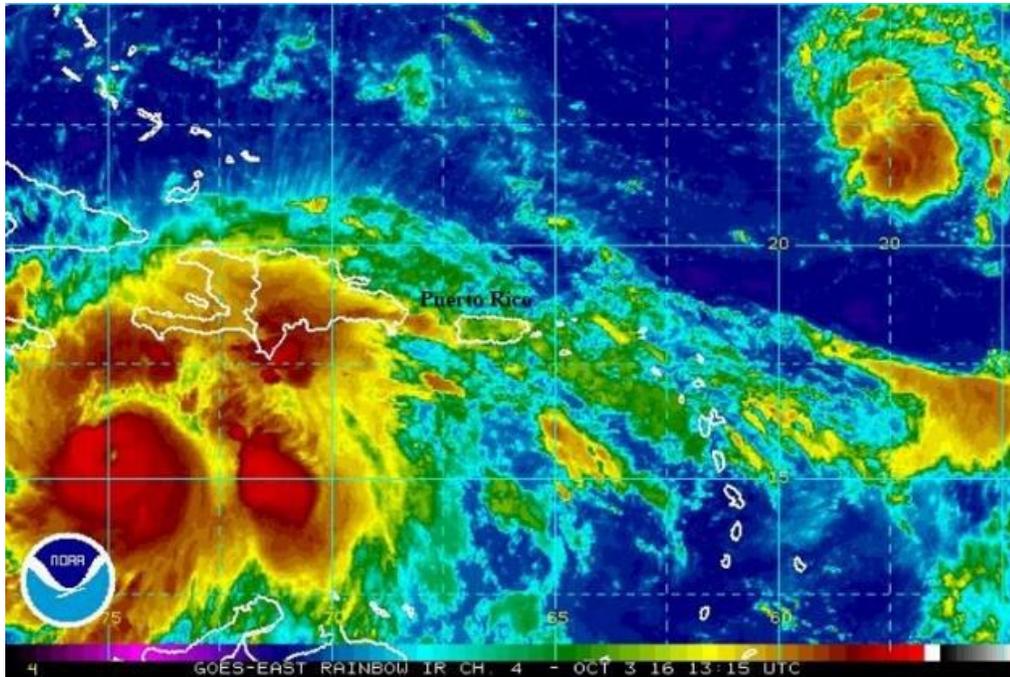


Figura 4: Imagen de satélite infrarrojo del huracán Matthew el 3 de octubre de 2016. Fuente: NOAA (2016)

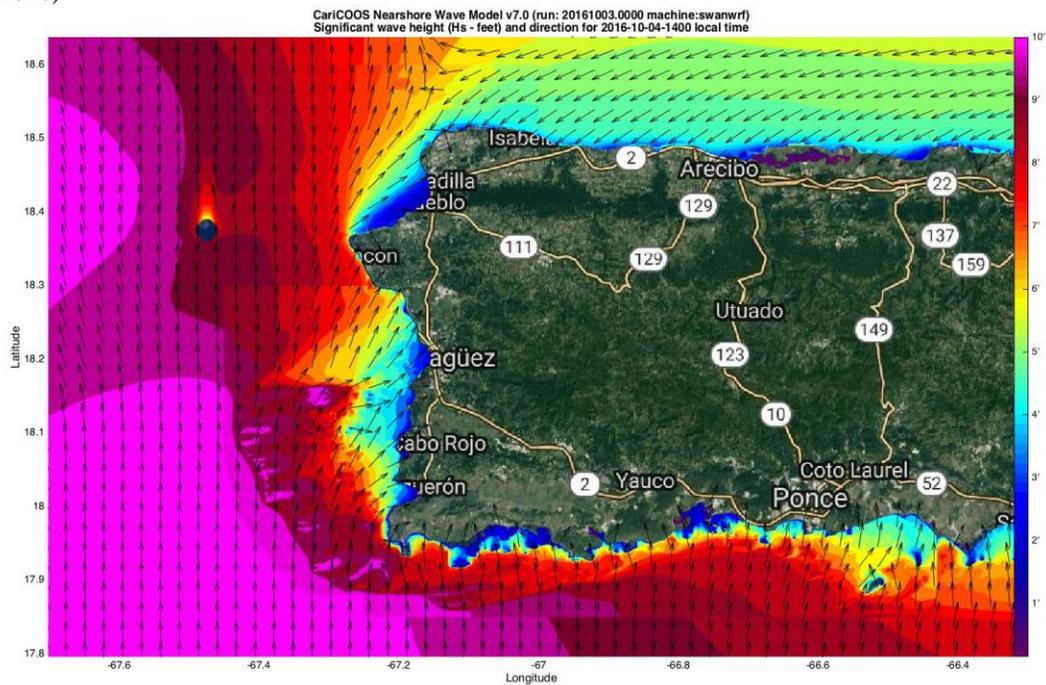


Figura 5: Predicciones de la altura del oleaje del modelo de CARICOOS para el 4 de octubre del 2016. La dirección inusual del oeste-suroeste de la marejada causó severos daños en municipios de la costa oeste de Puerto Rico, con los daños más severos en Rincón. Fuente: (CariCOOS, 2016)

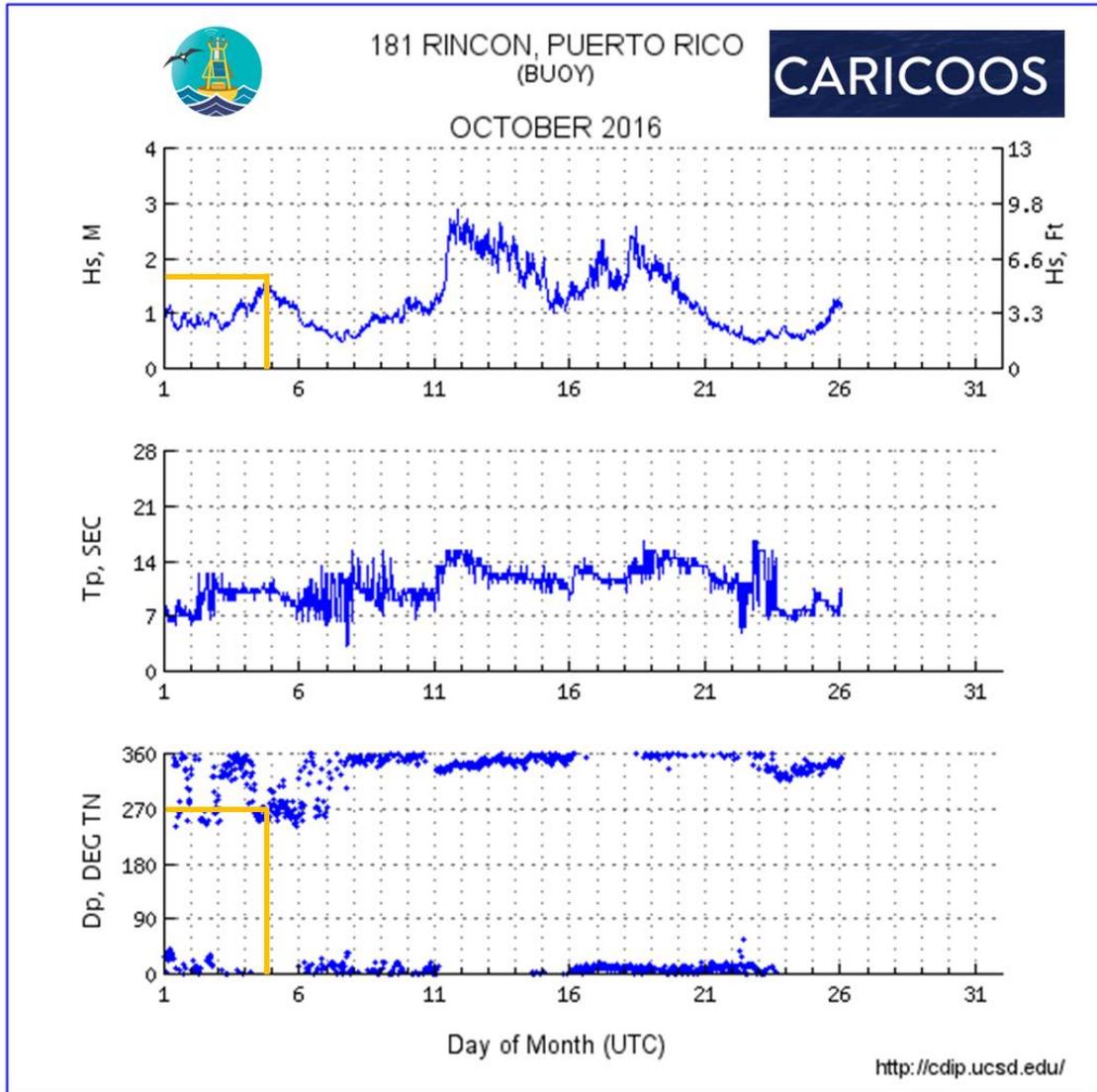


Figura 6: Altura del oleaje Fuente: (CariCOOS, 2016)

3.4 Impacto de Matthew en Rincón

En las últimas décadas, los residentes y propietarios de negocios a lo largo de la costa de Rincón han estado expuestos al impacto directo del mar en condiciones extremas y han adaptado sus edificaciones ante la amenaza que esto representa. Comúnmente las medidas adoptadas en la zona son la utilización de piedras grandes y la construcción de barreras paralelas a la costa. Sin embargo, estas medidas no son las más convenientes para mitigar el problema de erosión costera en playas ya que pueden acelerar el proceso localmente, y solo deben considerarse como soluciones temporeras. El huracán Matthew generó varias marejadas ciclónicas que impactaron severamente la infraestructura de la costa oeste de Rincón exponiendo así el estado de vulnerabilidad presente. El impacto de la primera marejada, la más fuerte, fue documentado en una visita de campo el día 6 de octubre de 2016.

Las Figuras 9 a la 12 presentan los hallazgos de la inspección ocular en la región de mayor impacto la cual se extiende desde zona del Hotel Villa Cofresí hasta la playa de Córcega. La Figura 9 presenta una fotografía de vista panorámica en la que se denota la erosión excesiva en la playa frente al hotel. La infraestructura de dicho hotel está protegida por un muro de hormigón y rocas de gran tamaño frente al mismo. Dichas rocas típicamente están cubiertas por arena en condiciones estables de la playa en la época de verano. Además, se percibe el cambio en el nivel de la arena frente a dicho muro de aproximadamente 6 pies.



Figura 7: Zona impactada por la marejada en el Hotel Villa Cofresí, Rincón Puerto Rico (tomada el 7 de octubre de 2016).

La Figura 10a) presenta una fotografía aérea de la playa de Stella. En la misma se puede observar que como medida de mitigación al problema de erosión se han colocado rocas para proteger la costa. Esta solución de mitigación limita el disfrute de los usuarios de la playa, aunque ha protegido parcialmente a las edificaciones del área. La Figura 10b) presenta la condición severa de erosión en la costa la cual afecta la vía pública, resaltando así su precaria condición actual.



Figura 8: Zona impactada por la marejada en la playa de Stella, Rincón, Puerto Rico: a) vista aérea de la erosión del asfalto, b) vista terrestre de la erosión en Stella (tomadas el 7 de octubre de 2016).

La Figura 9 presenta una vista panorámica de los cuatro complejos de apartamento antes mencionados en la región de Córcega. Es pertinente mencionar que dichas edificaciones fueron construidas a finales de la década del 1990 y en su diseño original no se incluyó el tablestacado actual. Este se construyó posteriormente como medida de protección debido a las amenazas de las fuertes marejadas. En este caso se componen de una combinación de tablestacas de metal en los complejos 1 y 2; de vinilo en los complejos 3 y 4.



Figura 9: Fotografía panorámica de los complejos de apartamentos residenciales en la playa de Córcega en Rincón, P.R (tomada el 18 de enero de 2017).

La Figura 9a) presenta la falla del tablestacado del complejo residencial 4 y la 9b) presenta la condición del cimient expuesto de la edificación. Indiscutiblemente la primera marejada del huracán Matthew pone al descubierto la vulnerabilidad de la infraestructura en la zona. Esto hace necesario que se estudien alternativas económicamente viables para desarrollar un plan estratégico de mitigación y revitalización de las playas en el municipio de Rincón.



a) **b)**
Figura 10: Daños ocasionados en la tablestaca del complejo de apartamentos Rincón Ocean Club 2 por la marejada del huracán Matthew (tomadas el 7 de octubre de 2016): a) Vista panorámica, b) Vista cercana del área colapsada de la tablestaca resaltando los cimientos expuestos de la edificación.

3.5 Sinopsis de Huracán de María

El Huracán María entró a Puerto Rico a las 6:35 am del 20 de septiembre de 2017 por Yabucoa con vientos sostenidos de 155 millas como un huracán categoría 4 según el Centro Nacional de Huracanes (NHC por sus siglas en inglés). Tras su paso dejó devastación por sus fuertes vientos y lluvias en toda la isla de Puerto Rico; de esta misma manera la marejada ciclónica provocó daños a todas sus costas. En el caso de Rincón, afectó directamente la infraestructura costera. La marejada ciclónica que provocó los daños en la costa oeste de Rincón se generó cuando el poderoso huracán se encontraba sobre la parte noroeste de Puerto Rico. La boya de CariCOOS ubicadas al noroeste de Rincón reportó olas de más de 25 pies de altura que provocaron la falla de varios sistemas de tablestaca y de hormigón reforzado poniendo en peligro la vida y seguridad sus habitantes. En el momento en que el poderoso huracán se encontraba al noroeste de Puerto Rico (ver Figura 14) las olas tenían dirección predominantemente hacia el oeste. Las Figuras de la 10 a la 12 presentan la altura de ola, la dirección y el periodo en ese orden.

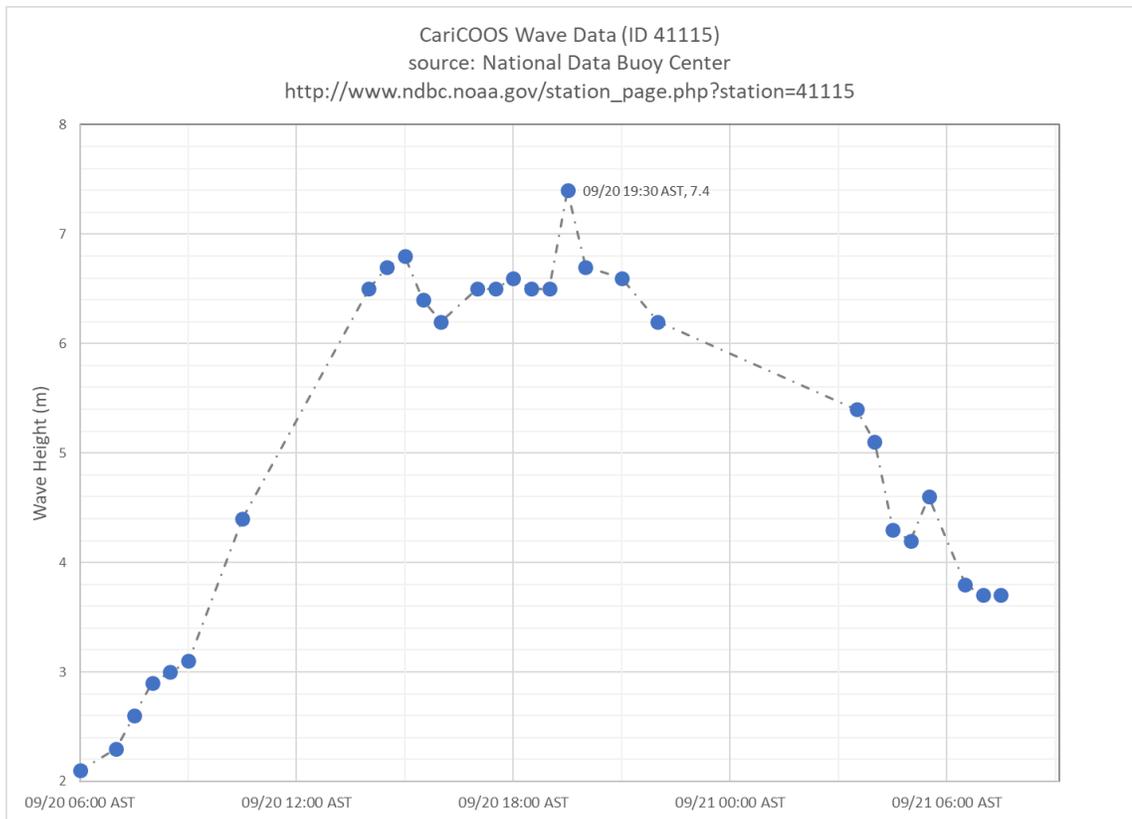


Figura 11: Altura de ola registrada por la boya de Rincón (ID 41115).

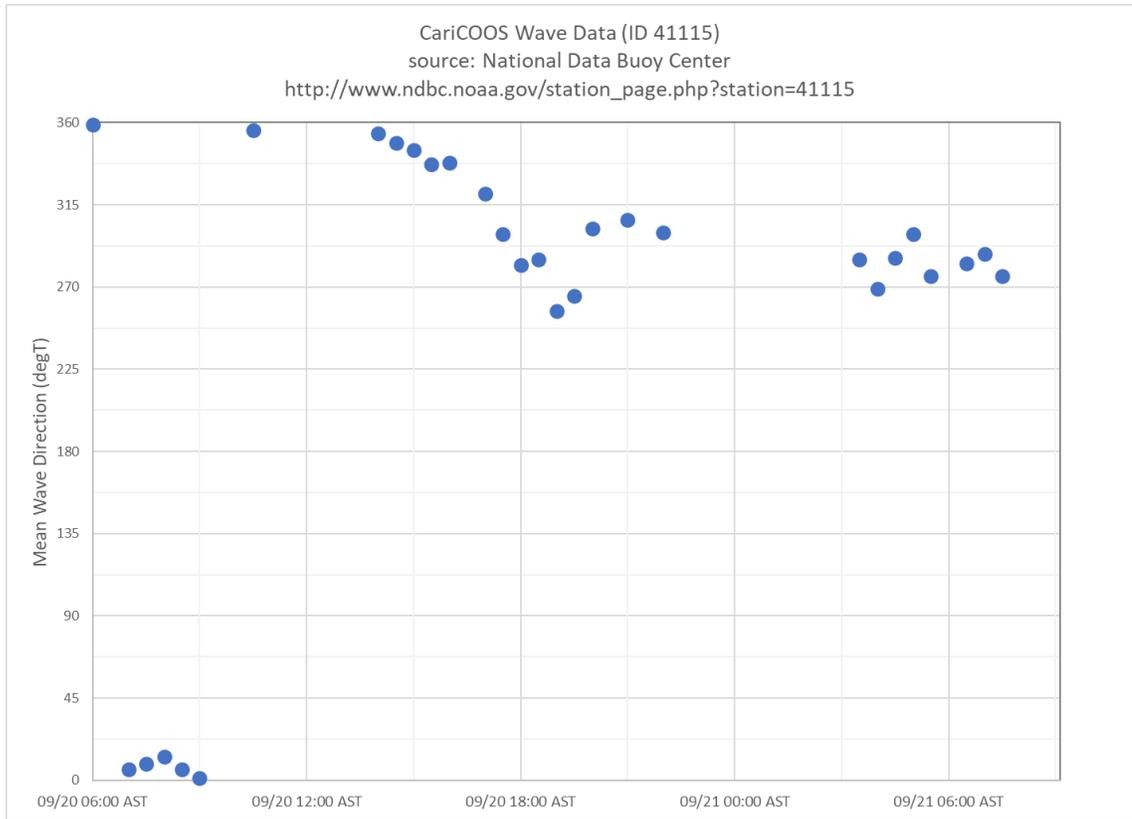


Figura 12: Dirección de ola registrada por la boya de Rincón; dicha boya es manejada por CariCOOS.

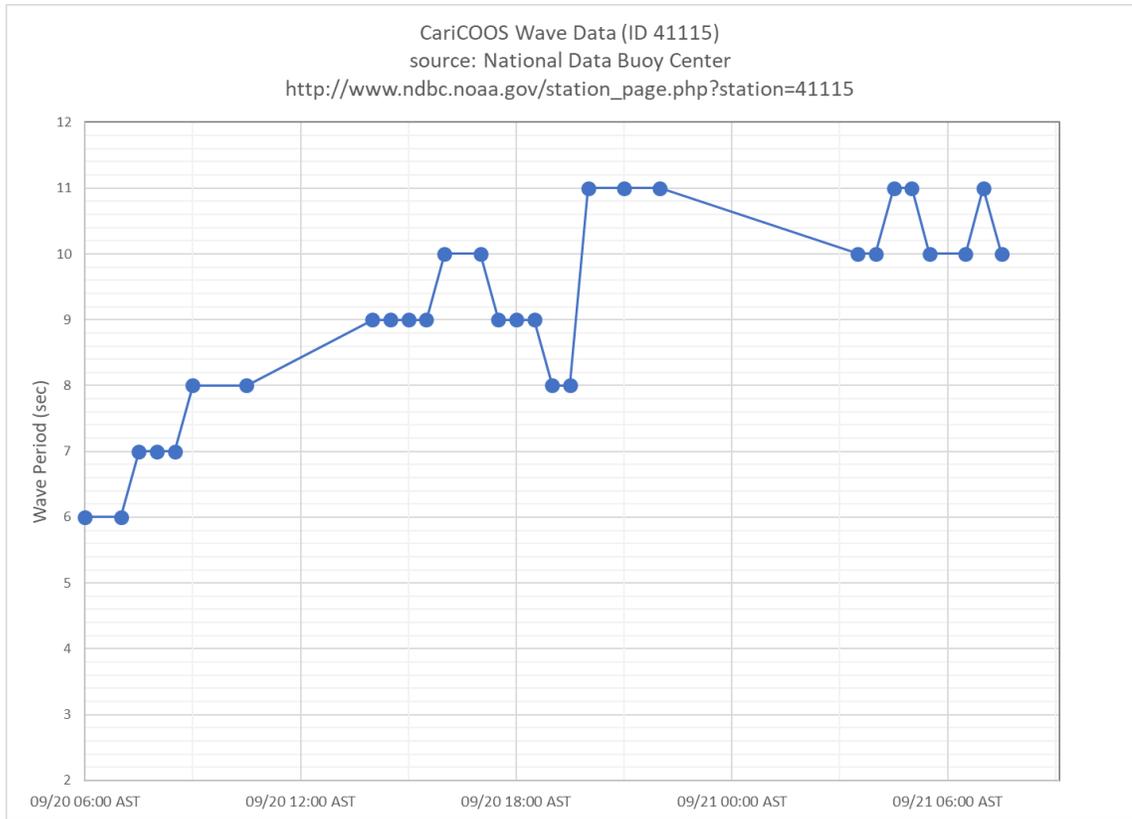


Figura 13: Periodo de ola registrada en la boya los días del Huracán María.

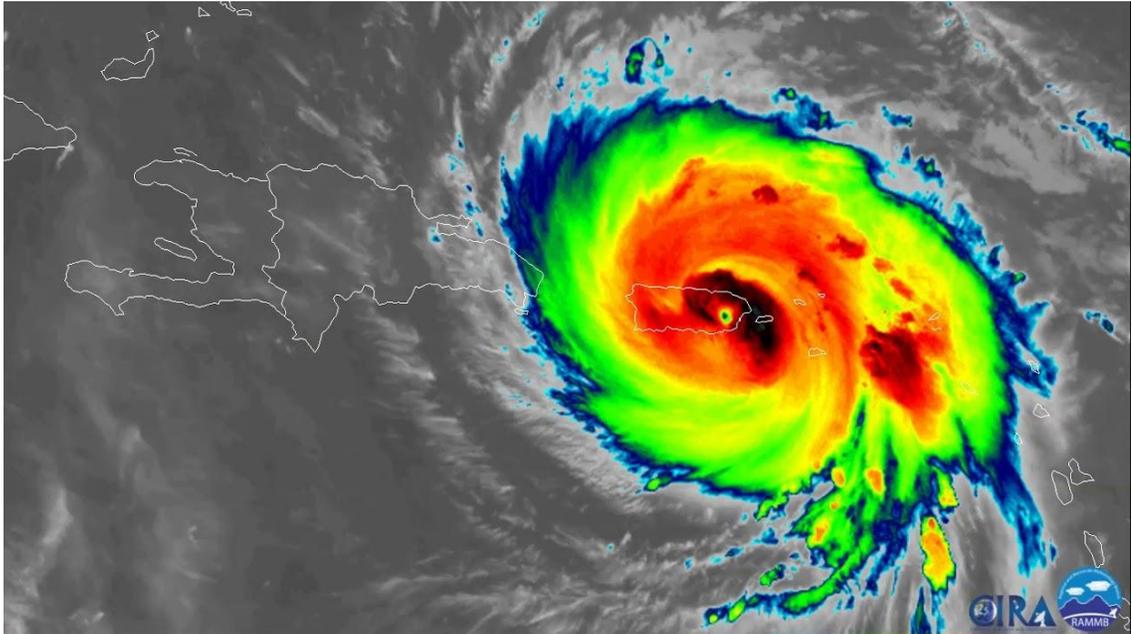


Figura 14: Huracán María - Aviso del Centro Nacional de Huracanes para el 20 de septiembre de 2017.
Fuente: NOAA (2017)

3.6 Impacto de María en Rincón

Las Figuras de la 14 a la 24 presentan fotografías tomadas luego del paso del Huracán María para el área de Villa Cofresí, Parcelas Stella y los edificios de apartamentos en la Playa de Córcega. Una práctica común entre los residentes y comerciantes de la zona es colocar “rip-raps” para proteger las infraestructuras costeras tal y como se muestra en la Figura 15 y en la Figura 16. El objetivo de dicha práctica es disipar la energía de las olas, pero a su vez imposibilita el disfrute de los bañistas de dicha playa y acelera la erosión de arena. En la Figura 15 se presenta una vista panorámica del Hotel Villa Cofresí donde se observan piedras frente al muro y si se compara con la Figura 7 dichas piedras no estaban en ese lugar un año atrás. Existen otras alternativas al “rip rap” y son los geo tubos o “geo bags” de la compañía Tencate (Tencate, 2017).

La Figura 14 presenta el estado de la playa frente al Hotel Villa Cofresí el 22 de noviembre de 2017. En dicha figura se puede observar el “rip-rap” frente al mura de hormigón reforzado.



Figura 15: Zona impactada por la marejada en el Hotel Villa Cofresí, Rincón Puerto Rico (tomada el 22 de noviembre de 2017).

La Figura 15 muestra la zona de Stella donde se aprecian los “rip-rap” que protegen la infraestructura vial. Dicha figura puede ser comparada con la Figura 7 la cual corresponde a octubre del 2016.



a)



b)

Figura 16: Zona impactada por la marejada en la playa de Stella, Rincón, Puerto Rico (tomadas el 22 de noviembre de 2017): a) Vista aérea, b) Vista terrestre.

A continuación se muestra la Figura 17 en la cual se presenta una imagen panorámica de los apartamentos de Corcega. En dicha imagen se puede observar el fallo del tablestacado de acero frente al complejo de apartamentos Victoria del Mar.



Figura 17: Fotografía panorámica de los complejos de apartamentos residenciales en la playa de Córcega en Rincón, P.R (tomada el 22 de noviembre de 2017).

En la Figura 18 se muestra el edificio de apartamentos Rincón Ocean club 2 luego del Huracán María. El tablestacado de este edificio ya había sido comprometido estructuralmente por la marejada del Huracán Matthew (ver Figura 9).

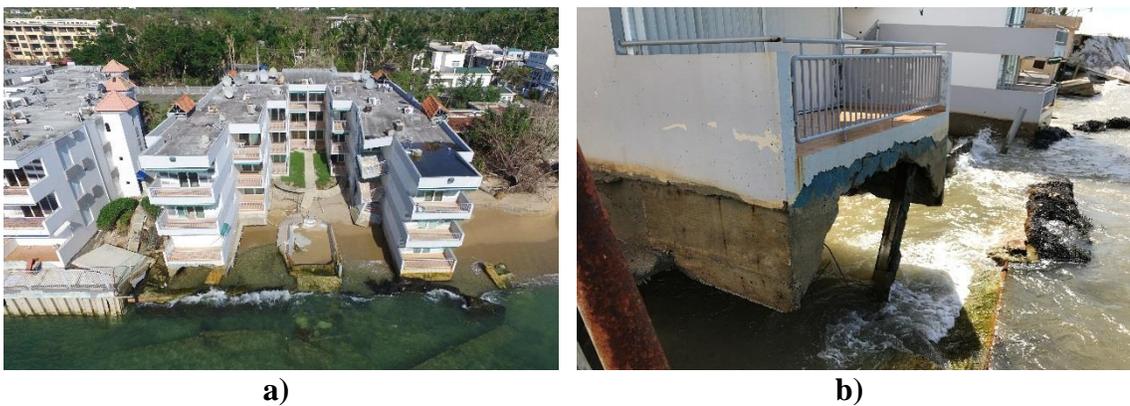


Figura 18: Daños ocasionados en la tablestaca del complejo de apartamentos Rincón Ocean Club 2 por la marejada del huracán María: a) Vista frontal (tomada el 22 de noviembre de 2017), b) Vista cercana del área colapsada de la tablestaca resaltando los cimientos expuestos de la edificación (tomada el 7 de octubre de 2017).

Las imágenes presentadas a continuación corresponden a los muros de hormigón en la playa frente al Hotel Villa Cofresí. La imagen a) de la Figura 18 presenta una vista panorámica desde el muro que divide el hotel del complejo de apartamentos adyacente. Las imágenes b) y c) de la Figura 19 presentan ausencia de arena frente al muro de hormigón y los “rip-rap” que se han colocado.



a)



b)



c)

Figura 19: Impacto del Huracán María al Hotel Villa Cofresí (tomadas el 8 de octubre de 2017): a) Vista panorámica, b) Vista terrestre hacia el sur, c) Vista terrestre hacia el norte.

La Figura 20 presenta una vista aérea de la playa de Villa Cofresí en la cual se observa que al momento en que se tomó la fotografía no había playa para el disfrute de los banistas.



Figura 20: Fotografía frente al Hotel Villa Cofresí en dirección hacia las parcelas Stella (tomadas el 8 de octubre de 2017).

La Figura 21 expone el fallo estructural que sufrió el muro de tablestaca del complejo de apartamentos Victoria del Mar. En la Figura 21a) se muestra una vista frontal del edificio mientras que en las Figuras 21b) y 21c) se muestran vistas terrestres de los escombros del tablestacado de acero.



a)



b)



c)

Figura 21: Impacto del Huracán María en el complejo de apartamentos Victoria del Mar (tomadas el 8 de octubre de 2017).

La Figura 22 presenta el estado del complejo de apartamentos Rincón Ocean Club 1 luego del paso del Huracán María.



a)



b)



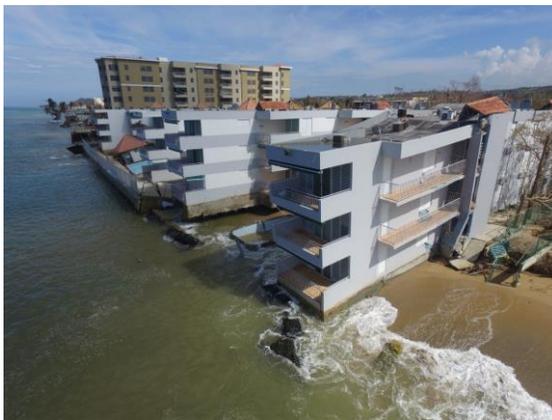
c)

Figura 22: Impacto del Huracán María en el complejo de apartamento Rincón Ocean Club 1 (tomadas el 8 de octubre de 2017).

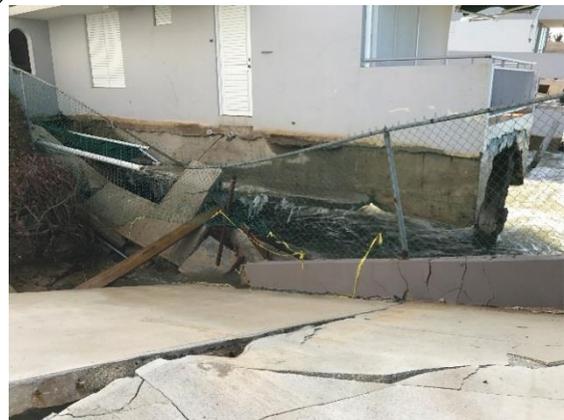
En la Figura 23 se presenta el estado del complejo de apartamentos luego del paso del Huracán María, en la Figura 23 a) se muestra vista aérea frontal, la Figura 23 b) es una vista aérea lateral mientras que la Figura 23 c) es una vista terrestre que muestra la falla de los cimientos.



a)



b)



c)

Figura 23: Impacto del Huracán María al complejo de apartamentos Rincón Ocean Club 2 (tomadas el 8 de octubre de 2017).

La Figura 24 presenta el fallo estructural de una residencia en el área de Stella, en dicha imagen se puede observar como las columnas y losa fallaron tras el embate de las olas del Huracán María en Rincón.



Figura 24: Impacto del Huracán María al complejo de apartamentos Rincón Ocean Club 2 (tomadas el 8 de octubre de 2017).

3.7 Conclusión

En este capítulo se presentó el estado actual de la costa de Rincón utilizando técnicas de percepción remota para determinar la posición de la costa para el año 2016 y se comparó la misma con su posición en el año 1936. Dicho análisis evidencia el problema severo de erosión costera a largo plazo en la zona. Se presentó evidencia de la vulnerabilidad actual a corto plazo de la infraestructura, tras el embate de la marejada de los huracanes Matthew y María. Es por esto, que queda demostrada la necesidad de desarrollar planes multisectoriales para aumentar la capacidad de resiliencia de las costas de Rincón y de todo Puerto Rico. El fallo estructural que se ha detectado en varias residencias principalmente verjas de mampostería valida los planteamientos sobre el grave problema de erosión costera que sufre el municipio de Rincón. El evento del Huracán María valida los esfuerzos para hacer más resiliente a marejadas la costa de Rincón.

4 Manejo de Datos del Catastro Digital de Puerto Rico

4.1 Introducción

El Centro de Recaudación de Ingresos Municipales de Puerto Rico es la oficina de gobierno encargada de recaudar, recibir y distribuir los fondos públicos de cada municipio (Ley del Centro de Recaudación de Ingresos Municipales - Ley Núm. 80, 1991). Además maneja el inventario cartográfico y digital de todas las propiedades de cada municipio y es conocido como el Catastro Digital de Puerto Rico (CRIM, 2017). El Catastro Digital es un mapa que contiene la base de datos con el inventario de todas las propiedades de la isla que maneja el CRIM para fines contributivos (Troche, 2006). Por tratarse de la herramienta de recaudos cumple el rol de un catastro fiscal. “El CRIM tiene a su cargo la creación y conservación del catastro digital, el cual se utiliza para la valoración y tasación de las propiedades y la imposición de las respectivas contribuciones, según establecido en el Artículo 3.01 de la Ley de Contribución Municipal sobre la Propiedad de 1991” (Ley Núm. 83 del 1991). Dentro del CRIM, la oficina del Catastro Digital de Puerto Rico, también conocida como Departamento de Cartografía, es la que ejecuta esa función y se encuentra en la Oficina Central del CRIM. (CRIM, 2017). Se conoce como el parcelario a la base de datos del CRIM filtrada para un municipio en particular. Para el caso de Rincón, el parcelario de dicho municipio fue suministrado por el Departamento de Cartografía. En este capítulo se presenta la metodología utilizada para ajustar los datos de valorización de las propiedades registradas por el CRIM a precios del presente 2017. La razón principal de ajustar los datos del CRIM es lograr establecer un análisis de costos y beneficios de

iniciativas para la restauración de las costas de Rincón cuya viabilidad debe ser justificada económicamente.

4.2 Parcelario del CRIM

El parcelario de Rincón es una base de datos que contiene filas y columnas con información sobre las propiedades registradas tales como el número de catastro, área o cabida de la propiedad, valor contributivo, fechas de transacciones de compraventa, entre otros. El primer dato es el número de CATASTRO, es un coeficiente que se le asigna a cada parcela y que consiste en catorce caracteres (ejemplo 125-000-006-048). El próximo atributo es la CABIDA registrada en el CRIM y corresponde con el área en planta de cada propiedad. Por otra parte, GIS AREA es el área calculada según el polígono de cada propiedad en formato “shapefile” (ver Figura 25). El atributo llamado LAND corresponde al valor de la tierra, STRUCTURE el valor de la estructura, MACHINERY es el valor de la maquinaria y el TOTALVAL la suma del valor de la tierra, de la estructura y la maquinaria en cada propiedad. EXEMP es la exención contributiva mientras que EXON es la exoneración. El valor TAXABLE es el TOTALVAL menos la exoneración y/o exención si aplica. Adicionalmente el SALESAMT es el valor mientras que el SALESDDTTM es la fecha de transacciones de compraventa registrada por el CRIM.

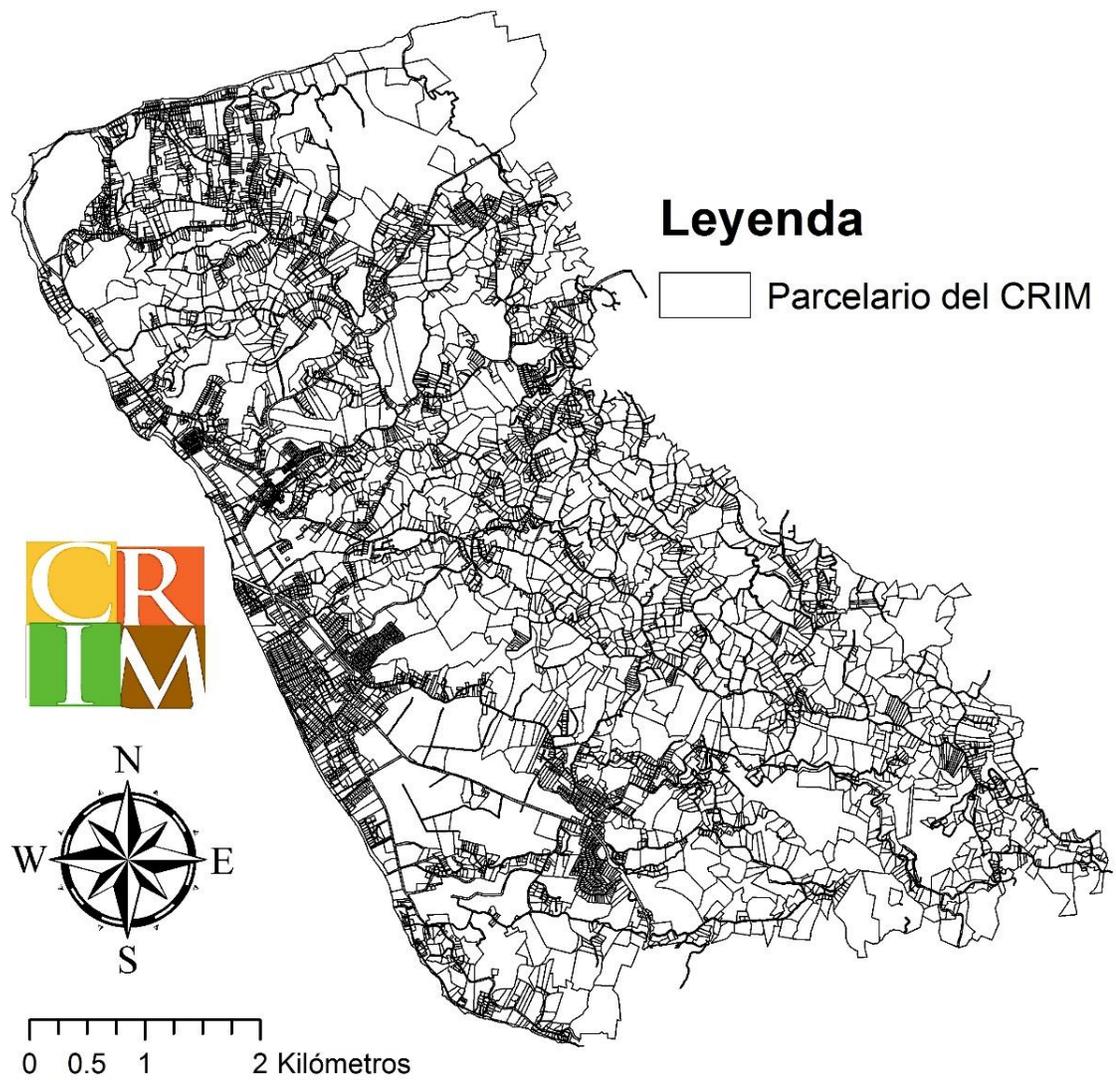


Figura 25: Parcelario del CRIM para el Municipio de Rincón, Puerto Rico. Fuente: CRIM (2015)

4.3 Metodología

En esta sección se presenta la metodología desarrollada para utilizar los datos del parcelario del CRIM a precios del 1958 y ajustarlos a precios del 2017. En la Figura 26 se presenta un flujograma con los pasos utilizados para ajustar los datos del CRIM sobre el valor de la propiedad a precios del 2017 y estimar los recaudos por concepto de contribución. El primer paso es filtrar las propiedades con valor total mayor a cero, la razón de esto es eliminar todas las propiedades que el CRIM no considera para fines contributivos. Luego, se filtraron de acuerdo con su localización, entiéndase las propiedades en todo el municipio, las que se encuentran a un kilómetro de la costa, las que se encuentran a treinta metros de la costa y las propiedades ubicadas en el área de estudio, estas últimas correspondientes desde el Balneario hasta la Casa Hines (para referencia ver Figura 28). Por último, se utilizan los datos de las variables TOTALVAL y TAXABLE de las propiedades consideradas en el área del proyecto para estimar el valor de la propiedad a precios del 2017 y los recaudos por concepto de contribución sobre la propiedad.

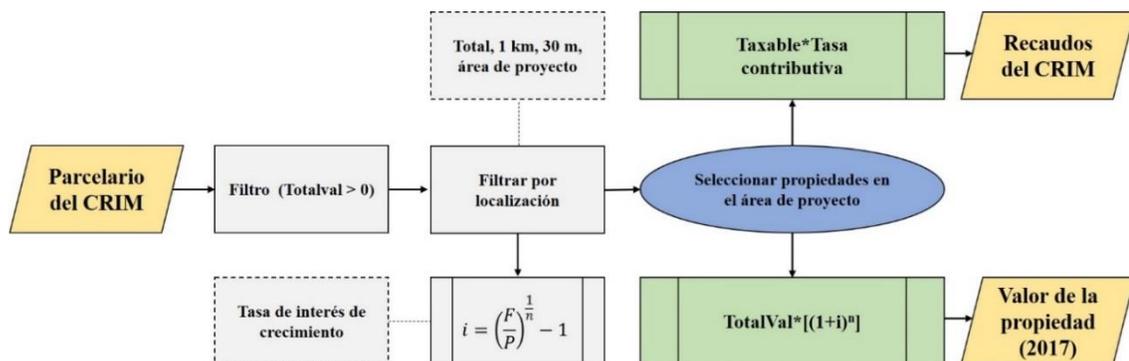


Figura 26: Metodología para manejar los datos del CRIM.

4.3.1 Tasa de interés de crecimiento

A continuación, se presentan las ecuaciones utilizadas para calcular la tasa de interés de crecimiento para las propiedades en Rincón. La ecuación (1) es la equivalencia de valor futuro (G. Cole, 2009), si esta ecuación se resuelve para la tasa de interés (i), se obtiene la ecuación (2). La ecuación (2) se puede resolver para cada transacción de compra/venta registrada en el parcelario del CRIM y de esta forma determinar estadísticamente un rango de valores que puedan ser utilizados para ajustar el valor a través del tiempo.

$$F = P(1 + i)^n \quad (1)$$

$$i = \left(\frac{F}{P}\right)^{\frac{1}{n}} - 1 \quad (2)$$

donde:

F = valor futuro (1958-2017),

P = valor pasado (1958),

n = número de periodos,

i = tasa de interés (%).

Del parcelario del CRIM se utilizaron las propiedades con información de transacciones de compra/venta para estimar la tasa de interés (ver Figura 27). Los resultados de la tasa de interés se clasifican en tres categorías, las propiedades que se encuentran a una distancia de 30 metros de la costa, las que se encuentran a un kilómetro de la línea costera y el resto del parcelario.

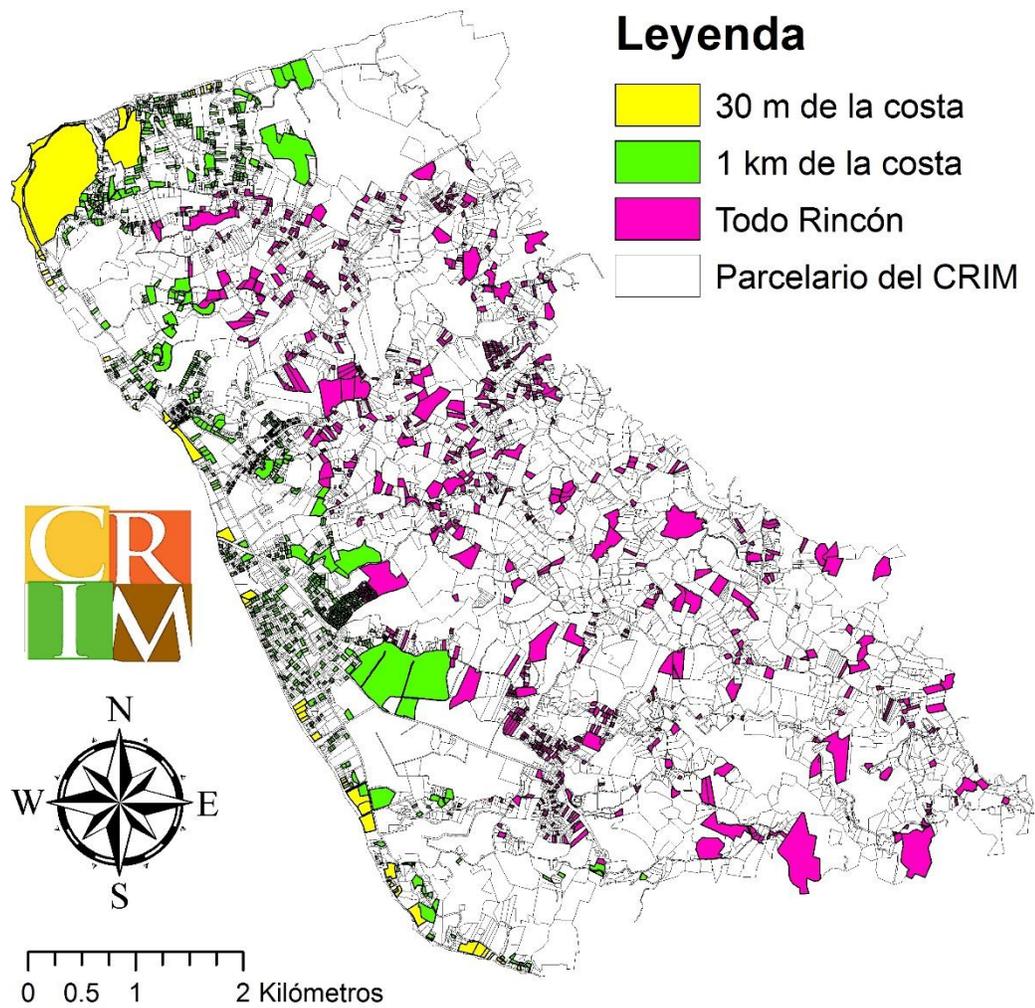


Figura 27: Parcelas que tienen información de compraventa y pueden ser utilizadas para calcular tasa de interés de crecimiento.

4.3.2 Valor de la propiedad en el área de estudio

En esta sección se describe el valor de las propiedades señaladas como propiedades en el área del proyecto. Este se extiende desde el Balneario hasta la Casa Hines. Como referencia en la Figura 28 se muestra una vista en planta de parte de la costa oeste de Rincón en donde se presentan en polígonos de color amarillo las propiedades consideradas como costeras en el área del proyecto. Más detalles del proyecto presentado en este estudio se ofrecen en el siguiente capítulo. Estas propiedades son el producto de una selección por localización de las propiedades del Parcelario de Rincón, ilustrado como líneas de color negro en la Figura 28. Se tomó como criterio una distancia de treinta metros desde la línea costera del 2016 tierra adentro.

Luego de clasificar y escoger las propiedades son consideradas dentro del área de estudio se manejaron los datos de valorización del CRIM de las propiedades para fines contributivos (TOTALVAL) y un rango de valores correspondientes a la tasa de interés de crecimiento (i) para estimar el valor de la propiedad a precios del 2017. La ecuación (3) es una adaptación de la ecuación (1) y permite estimar el valor de las propiedades junto al valor del dinero a través del tiempo.

$$\text{Valor Total}_{2017} = \text{Valor Total}_{1958} * (1 + i)^n \quad (3)$$

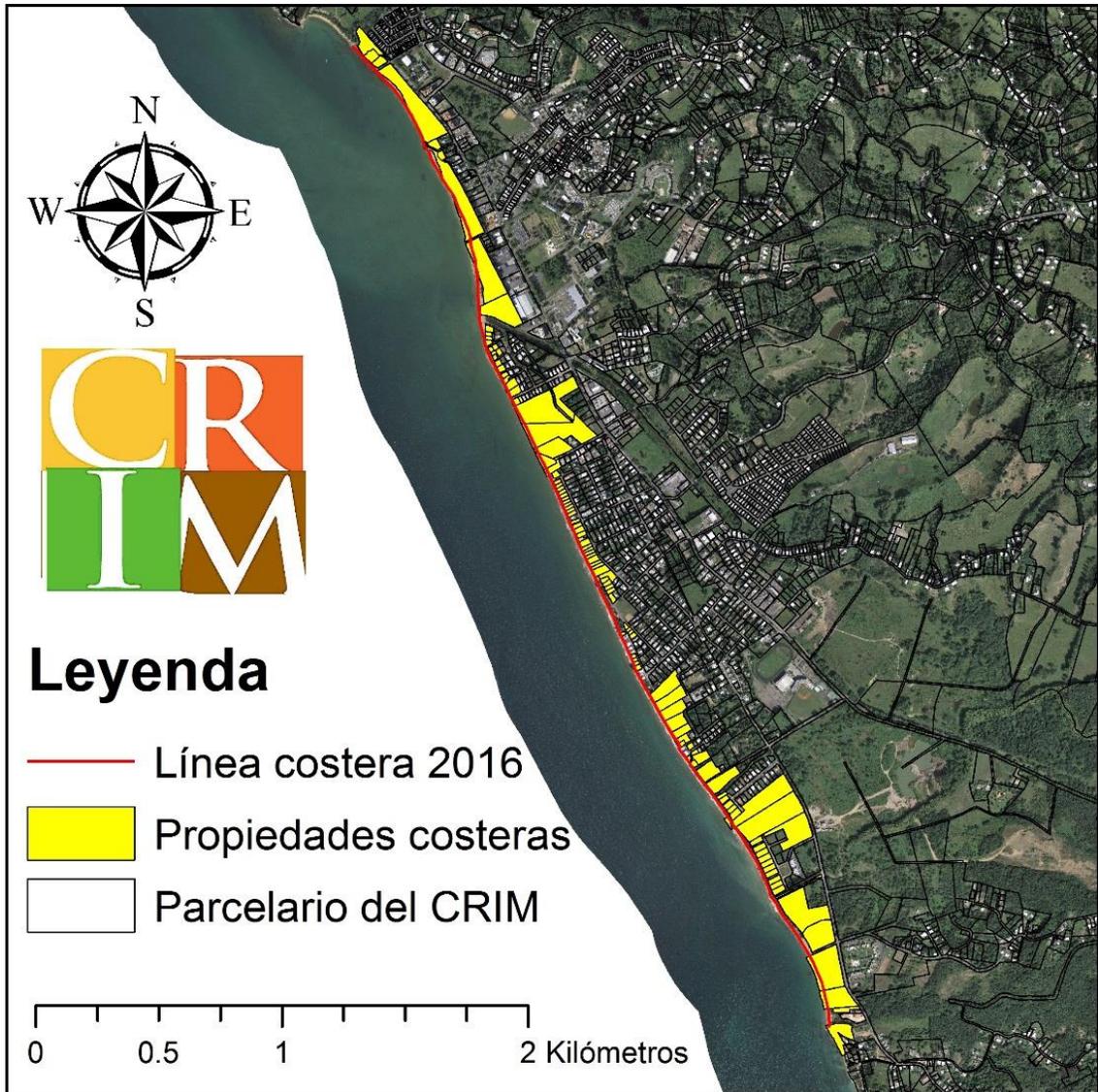


Figura 28: Propiedades en la costa oeste de Rincón identificadas como costeras en el área del proyecto.

4.3.3 Contribución sobre la propiedad

La contribución sobre la propiedad inmueble es la base de los recaudos del CRIM para fines de este proyecto se calculó a través del valor contributivo del CRIM (Taxable) y la tasa contributiva para las propiedades inmuebles (CRIM, 2016c). A continuación, se presenta la ecuación utilizada para calcular los recaudos por concepto de contribución sobre la propiedad inmueble en el área del proyecto:

$$\text{Recaudos del CRIM} = \text{Taxable} * \text{Tasa Contributiva} \quad (4)$$

La tasa contributiva por municipio es actualizada anualmente y los valores son publicados en *Tasa Contributiva: Impuestos sobre la Propiedad Mueble e Inmueble* (CRIM, 2016c). La tasa contributiva municipal para el Municipio de Rincón se ilustra en la Figura 29.



Gobierno de Puerto Rico
Centro de Recaudación de Ingresos Municipales

TIPOS CONTRIBUTIVOS SOBRE LA PROPIEDAD MUEBLE E INMUEBLE*
AÑO FISCAL 2016-2017

C o d i c o	DISTRIBUCION DEL TIPO CONTRIBUTIVO COMBINADO											TOTAL IMPUESTO AL CONTRIBUYENTE	
	FONDO DE REDENCIÓN ESTATAL		FONDO MUNICIPAL PROPIEDAD MUEBLE			FONDO MUNICIPAL PROPIEDAD INMUEBLE			TOTAL COMBINADO ESTATAL Y MUNICIPAL		MUEBLE	INMUEBLE	
	MUEBLE	INMUEBLE	TOTAL BASICA MUEBLE [^] (incluye 0.20%)	Contribución Adicional Especial (CAE)	Total Tasa Mueble Municipal	TOTAL BASICA INMUEBLE (incluye 0.20%)	Contribución Adicional Especial (CAE)	Total Tasa Inmueble Municipal	MUEBLE	INMUEBLE	MUEBLE	INMUEBLE	
			^ = indica incremento en el 2016/17 en comparación con el 2015/16										
77	Culebra	1.03	1.03	4.00	2.00	6.00	6.00	2.00	8.00	7.03	9.03	6.83	8.83
11	Dorado	1.03	1.03	4.00	4.00	8.00	6.00	3.75	9.75	9.03	10.78	8.83	10.58
24	Fajardo	1.03	1.03	4.00	2.00	6.00	6.00	3.50	9.50	7.03	10.53	6.83	10.33
81	Florida	1.03	1.03	4.00	3.50	7.50	6.00	3.50	9.50	8.53	10.53	8.33	10.33
59	Guánica	1.03	1.03	4.00	3.75	7.75	6.00	3.75	9.75	8.78	10.78	8.58	10.58
71	Guayama	1.03	1.03	4.00	3.25	7.25	6.00	3.25	9.25	8.28	10.28	8.08	10.08
61	Guayanilla	1.03	1.03	4.00	4.00	8.00	6.00	4.00	10.00	9.03	11.03	8.83	10.83
16	Guaynabo	1.03	1.03	4.00	3.25	7.25	6.00	3.25	9.25	8.28	10.28	8.08	10.08
47	Gurabo	1.03	1.03	4.00	3.00	7.00	6.00	5.00	11.00	8.03	12.03	7.83	11.83
5	Hatillo	1.03	1.03	3.72	2.50	6.22	5.72	2.50	8.22	7.25	9.25	7.05	9.05
54	Hormigueros	1.03	1.03	4.00	3.00	7.00	6.00	3.00	9.00	8.03	10.03	7.83	9.83
51	Humacao	1.03	1.03	4.00	2.00	6.00	6.00	2.00	8.00	7.03	9.03	6.83	8.83
2	Isabela	1.03	1.03	4.00	2.50	6.50	6.00	2.50	8.50	7.53	9.53	7.33	9.33
36	Jayuya	1.03	1.03	4.00	1.25	5.25	6.00	1.25	7.25	6.28	8.28	6.08	8.08
64	Juana Díaz	1.03	1.03	4.00	3.50	7.50	6.00	2.50	8.50	8.53	9.53	8.33	9.33
49	Juncos	1.03	1.03	4.00	3.50	7.50	6.00	3.50	9.50	8.53	10.53	8.33	10.33
57	Lajas	1.03	1.03	4.00	3.50	7.50	6.00	3.50	9.50	8.53	10.53	8.33	10.33
33	Lares	1.03	1.03	4.00	3.25	7.25	6.00	3.25	9.25	8.28	10.28	8.08	10.08
31	Las Marias	1.03	1.03	4.00	1.35	5.35	6.00	1.35	7.35	6.38	8.38	6.18	8.18
50	Las Piedras	1.03	1.03	4.00	2.00	6.00	6.00	3.50	9.50	7.03	10.53	6.83	10.33
21	Loíza	1.03	1.03	4.00	3.40	7.40	6.00	3.40	9.40	8.43	10.43	8.23	10.23
23	Luquillo	1.03	1.03	4.00	2.00	6.00	6.00	2.00	8.00	7.03	9.03	6.83	8.83
8	Manatí	1.03	1.03	4.00	2.75	6.75	6.00	2.75	8.75	7.78	9.78	7.58	9.58
32	Maricao	1.03	1.03	4.00	1.00	5.00	6.00	3.50	9.50	6.03	10.53	5.83	10.33

Figura 29: Tipos contributivos sobre la propiedad mueble e inmueble.

4.4 Resultados

4.4.1 Tasa de interés de crecimiento

La ecuación (2) se resolvió para todas las propiedades con ventas registradas por el CRIM. Los resultados fueron clasificados según su localización y graficados en formato tipo “box plot” como se muestra en la Figura 30. En rosa y para un total de 3,116 propiedades aparece la gráfica de los resultados para todo el municipio de Rincón, en verde para un total de 1,918 se presentan las propiedades a un kilómetro de la costa y en amarillo para un total de 299 propiedades las propiedades que se encuentran a treinta metros de la costa. En esta misma figura se puede observar que se presentan los percentiles 75, 50 y 25 de arriba hacia abajo. En el caso de las parcelas de todo Rincón los valores de los percentiles mencionados en ese mismo orden son 7.07%, 5.70% y 4.66%. Para las parcelas a un kilómetro de la costa los valores son 6.68%, 5.81% y 4.78%. Por último, los valores de los percentiles para las propiedades a 30 metros de la costa son 7.29%, 6.37% y 5.66%.

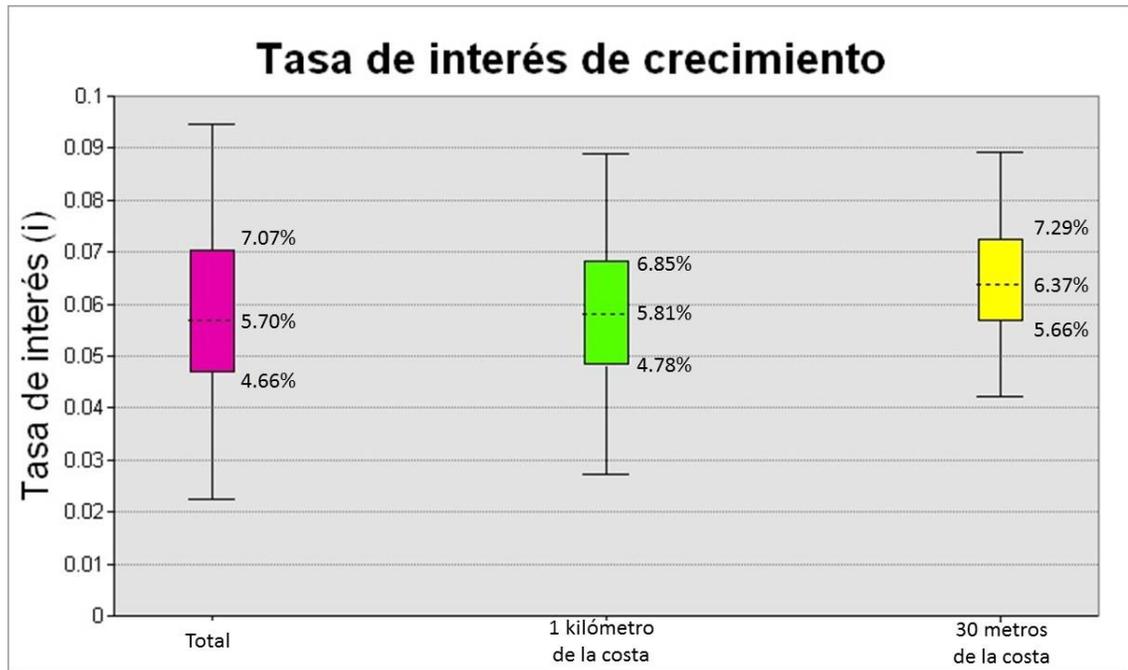


Figura 30: Tasa de interés de crecimiento para las transacciones de compra/venta registradas por el CRIM. Las parcelas a 30 metros de la costa son en total 299, a un kilómetro de la costa 1,918 y por último, el total con 3,116 parcelas con información sobre el valor tributable.

4.4.2 Estimado de valor de la propiedad a valores corrientes (2017)

El ajuste consiste en utilizar la ecuación (1) y los resultados de las tasas de interés de crecimiento estimadas en la sección 1.3.1. En la Tabla 1 se muestran los datos en una hoja de cálculos con los resultados del ajuste. El CRIM compartió el parcelario de Rincón en dos ocasiones, la primera el 15 de junio de 2015 y la segunda el 16 de noviembre de 2016, estas fechas corresponden a los datos presentados en la columna 1 de la Tabla 1. En la columna 2 aparecen los resultados de la suma del atributo de Total Val. Estos valores representan el valor de la propiedad a precios del 1958. Los resultados del ajuste de los valores de las propiedades de precios del 1958 en precios del 2017 se encuentran en las columnas 3, 4 y 5. Para calcular los valores a precios del 2017 se resolvió la ecuación (1),

donde el Total Val es el valor pasado (P) y la tasa de interés (i) bajo las columnas de la 3 a la 5.

Tabla 1: Ajuste de datos del CRIM (1958) a precios corrientes (2017). Fuente: CRIM de Puerto Rico.

Columna 1	Columna 2	Columna 3	Columna 4	Columna 5
Actualizado	SUM (Total Val)	$i = 4.66 \%$	$i = 5.70 \%$	$i = 6.85 \%$
15/julio/2015	\$ 7,563,273	\$111,115,046	\$199,128,778	\$377,056,855
16/noviembre/2016	\$ 7,529,566	\$110,619,843	\$198,241,327	\$375,376,437

4.4.3 Contribución sobre la propiedad

El resultado de los estimados de la contribución de la propiedad se presenta en la Tabla 2. La columna 1 corresponde a la fecha en la que los datos fueron enviados, en la columna 2 aparece la suma del valor tributable (Taxable) y, por último, en las columnas 3, 4 y 5, el resultado de la ecuación (4). Los valores de la columna 3 corresponden al valor contributivo y en las columnas 3, 4 y 5 los resultados de la contribución sobre ingreso de la propiedad inmueble correspondiente a la tasa contributiva (TS) de la Tabla 2.

Tabla 2: Resultados de la contribución sobre la propiedad.

Columna 1	Columna 2	Columna 3	Columna 4	Columna 5
Actualizado	SUM (Taxable)	TS = 5.96 %	TS = 6.00 %	TS = 8.83 %
15/julio/2015	\$ 4,670,804	\$ 278,380	\$ 280,248	\$ 387,677
16/noviembre/2016	\$ 4,629,949	\$ 275,945	\$ 277,797	\$ 384,286

4.5 Conclusión

En este capítulo se discutió la metodología para ajustar los datos del CRIM de precios del 1958 a precios del 2017 mediante ecuaciones de equivalencia de interés compuesto. Como parte de la metodología de ajuste se logró estimar un rango de valores que representan la tasa de interés de crecimiento para el Municipio de Rincón y clasificado según la localización de las parcelas con respecto a la posición de la costa. Los rangos de la tasa de interés sirvieron para ajustar los valores del CRIM a precios del 1958 con ecuaciones de valor futuro. Los resultados del ajuste brindan un rango de valores representativo al valor de las propiedades costeras en el área de estudio del municipio de Rincón.

5 Estrategias para Proteger las Costas de Rincón, Puerto Rico

5.1 Introducción

Las costas que sufren problemas de erosión en sus playas cuentan con tres alternativas para mitigar el impacto a) construir estructuras sólidas, tales como muros de contención o rompeolas con el propósito de preservar la posición de la línea costera; b) iniciar programas de realimentación periódica de playas para contrarrestar el problema de erosión; c) por último, abandonar o remover las estructuras, edificios y otras propiedades que puedan sufrir daños ocasionados por la erosión (Council, 1995). En este capítulo se discuten tres escenarios con el propósito de proteger las costas de Rincón y son los siguientes: a) realimentar aproximadamente 4.5 km de costa, desde el Balneario hasta la Casa Hines, con una berma que varía entre los 25 y 35 metros; b) armar los mismos 4.5 km de costa del escenario anterior con un muro de tablestacado de acero, adicional se recomienda utilizar un método para mitigar la erosión de arena frente al sistema de tablestaca con geo tubos capaces de disipar la energía de las olas; c) combinar la realimentación de la playa y el armado con sistemas de tablestacado.

La realimentación de playas es una práctica común en las costas de los Estados Unidos, en Puerto Rico no lo es, por lo que en estos momentos no existe la maquinaria necesaria para un proyecto de ese tipo. Sin embargo, la técnica de armar la costa ha sido una práctica muy común en Rincón. Algunos residentes han optado por construir barreras paralelas a la costa para proteger sus propiedades, ver la Figura 31. En esta figura aparece una vista en planta de la costa oeste de Rincón con la costa clasificada por colores según el tipo de

protección costera identificada durante visitas de campo. En color anaranjado muestra las zonas protegidas naturalmente por la arena, en color gris las protegidas por estructuras de hormigón reforzado y en color verde las barreras construidas por los residentes con diseños que no necesariamente fueron revisados por ingenieros ni cumplen con códigos de construcción, y en color rojo el conjunto de tablestacado de acero y otro de vinilo. Estudios revelan que las construcciones cerca de la costa pueden agravar el problema de erosión existente (Gómez, 2004).

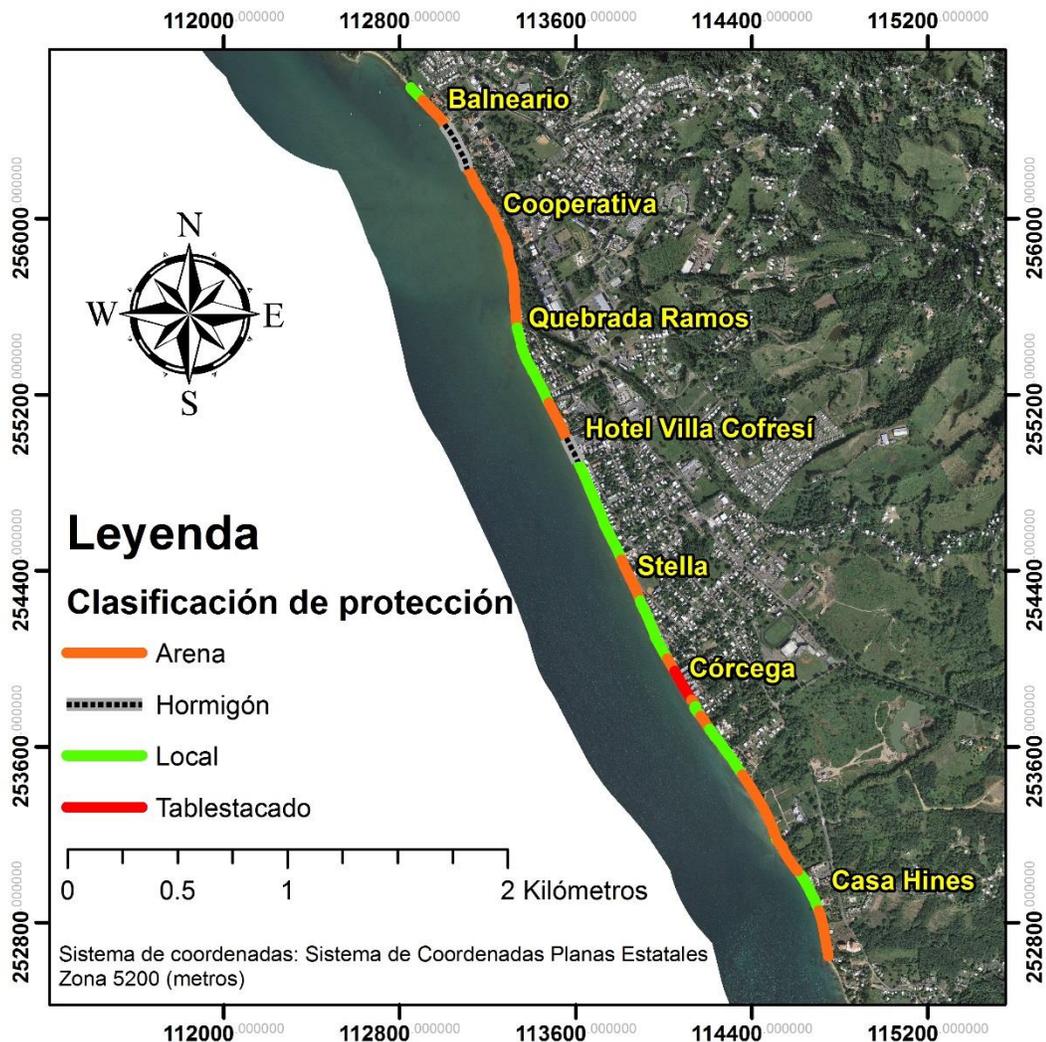


Figura 31: Clasificación de barreras existentes entre el Balneario y la Casa Hines.

5.2 Escenario 1: Realimentación de playas

La realimentación de playas (en inglés “beach nourishment”) se conoce como la acción de añadir arena a una playa erosionada o la construcción de una playa donde sólo existía una pequeña playa o simplemente no había playa (Council, 1995). El propósito de realimentar las playas es brindar una barrera natural que sirva de protección a las propiedades e infraestructura aledaña a la costa. En esta sección se analizan las alternativas para plantear la posibilidad de rellenar las costas de Rincón con arena del Bajo Blanco. El área de costas que se propone rellenar se extiende desde el Balneario hasta la Quebrada Ramos.

Esta sección comienza con la presentación de algunos resultados de estudios previos que consideran la realimentación de las playas de Rincón, luego se describen los detalles técnicos utilizados para diseñar la berma considerada en este proyecto. Más adelante se detalla la metodología adoptada para computar el volumen de la berma diseñada, es decir el volumen entre el perfil de elevación diseñado y la batimetría más reciente. Los datos batimétricos más recientes para la costa de Rincón fueron colectados por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos (USACE por sus siglas en inglés). Además, se presentan los cálculos que determinan la profundidad de la excavación requerida para extraer el volumen estimado para la berma diseñada. Por último, se propone un estimado preliminar del posible costo de rellenar las costas tomando en consideración recomendaciones técnicas del USACE e investigaciones previas. Las desventajas de este proceso son el alto costo, el mantenimiento luego de un evento y que el 35% del proyecto debe ser financiado con

fondos locales o privados ya que el USACE paga el 65% del proyecto. La Figura 32 muestra un ejemplo de la maquinaria utilizada en los Estados Unidos para limpiar y bombear la arena a través de la costa.



Figura 32: Maquinaria utilizada para limpiar la arena antes de colocarla en la playa.

5.2.1 Resultados de estudios previos

Salas (2014) realizó los cálculos del perfil de la playa en equilibrio para parte de la costa de Rincón. Esta zona se extiende 350 metros lineales de playa, desde 60 metros al noroeste del “Rincón of the Seas Hotel” hasta el Hotel Villa Cofresí. El perfil propuesto por Salas (2014) para la porción de playa fue diseñado con una altura de berma de 1 metro

sobre el nivel de promedio de marea baja (MLW por sus siglas en inglés), con un ancho de berma de 35 metros y una profundidad de cierre de -3 metros. La porción del perfil entre la elevación (5) metros (posición de la línea costera) y la profundidad de cierre fue graficada con el método de perfil de playa en equilibrio (EBP por sus siglas en inglés). Este método permite graficar el perfil de playa con la ecuación (1), la cual fue propuesta por Dean et al., 2004. El tamaño de granos promedio para la zona de estudio es 0.32 mm (Salas, 2014), según la **Error! Reference source not found.** el parámetro de escala de sedimentos (A) es 0.129. En la Figura 33 se presenta un mapa esquemático de la batimetría del 2012 y el perfil propuesto. El volumen de arena necesario para crear un perfil de playa con las dimensiones antes mencionada es 55,000 m³.

$$h = Ay^{\frac{2}{3}} \quad (5)$$

donde:

h = elevación del perfil,

A = parámetro de escala de sedimentos,

y = distancia desde la costa.

Tabla 3: Parámetros de escala de sedimentos. Información adaptada de Robert Dean (2004).

d (mm)	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.1	0.063	0.067	0.071	0.076	0.080	0.084	0.087	0.090	0.094	0.097
0.2	0.100	0.103	0.106	0.109	0.112	0.115	0.117	0.119	0.121	0.123
0.3	0.125	0.127	0.129	0.131	0.133	0.135	0.137	0.139	0.141	0.143
0.4	0.145	0.147	0.148	0.150	0.151	0.153	0.155	0.156	0.158	0.159
0.5	0.161	0.162	0.163	0.165	0.166	0.167	0.168	0.169	0.171	0.172
0.6	0.173	0.174	0.175	0.177	0.178	0.179	0.180	0.181	0.183	0.184
0.7	0.185	0.186	0.187	0.188	0.189	0.190	0.190	0.191	0.192	0.193
0.8	0.194	0.195	0.196	0.196	0.197	0.198	0.199	0.200	0.200	0.201
0.9	0.202	0.203	0.204	0.204	0.205	0.206	0.207	0.208	0.208	0.209
1	0.210	0.211	0.212	0.212	0.213	0.214	0.215	0.216	0.216	0.217

Rojas (2016) utilizó los resultados de Salas (2014) y proyectó el volumen de 350 metros de costa a la porción de costa entre el Balneario y la Playa de Córcega. Entonces sugirió

que el volumen de arena necesario para rellenar la porción de costa mencionada necesitaría una magnitud de 1,000,000 m³. Luego, realizó simulaciones numéricas sobre la hidrodinámica de llevarse a cabo dos tipos de excavación del Bajo Blanco.

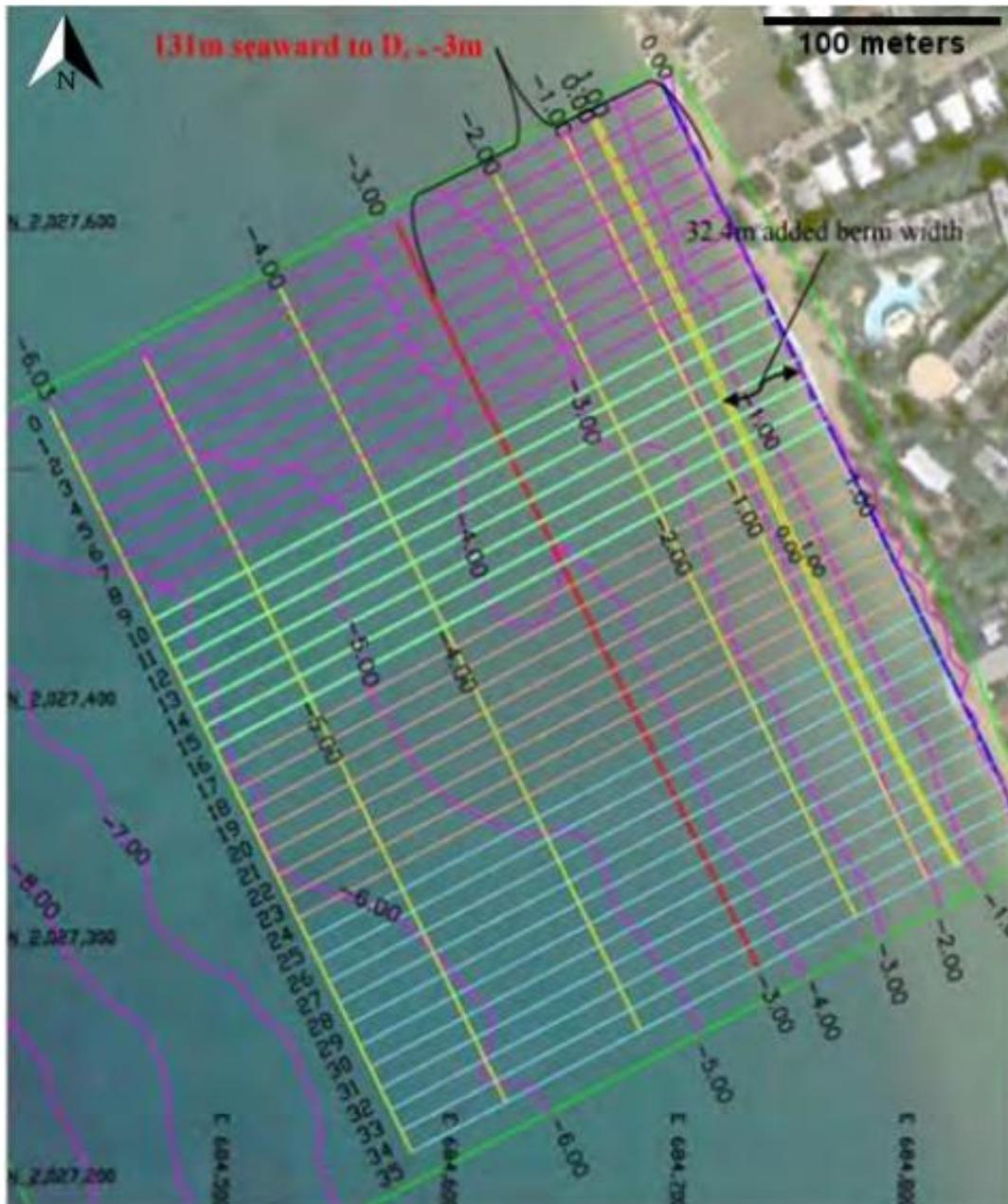


Figura 33: Vista en planta del área de estudio de Salas (2014), en color violeta la batimetría y amarillo y rojo el perfil propuesto.

5.2.2 Diseño de perfil de playa

Para diseñar el perfil de playa se tomó en consideración los resultados de la altura de la berma, profundidad de cierre (“depth of closure”) y ancho de la berma sugeridos por Salas (2014) y la posición de la costa del año 1936 por Thieler et al. (2006). La altura de berma de un metro sobre el nivel promedio de marea alta (MHW por sus siglas en inglés), la profundidad de cierre (3 metros) y ancho de la berma de berma condicionado a la posición de la costa del 1936 delimitada por Thieler et al. (2006). Es decir, si la costa del 1936 se encuentra a menos de 35 metros de la costa del 2016, se utiliza la distancia entre ambas como el ancho de berma. La costa del 2016 fue delimitada utilizando el criterio de la línea seco/mojado (“wet/dry lines” en inglés) en el orto mosaico preparado por GME (2016). En las Figuras 35 y 36 se presenta gráficamente la forma en que fue dimensionado el ancho de berma a través del área de relleno. En estas figuras se presentan vistas en planta de dos de los lugares donde la berma propuesta tiene los 35 metros y otro donde la berma tiene 29 metros. La Figura 34 corresponde al área del Balneario mientras que la Figura 35 a la porción de playa entre el Hotel *Rincón of the Seas* y el Hotel Villa Cofresí. La elevación de la porción sumergida del perfil de playa se diseñó con el método EBP (“Equilibrium Beach Profile”). Dicho método puede ser representado con la ecuación (5), presentada en la sección de resultados de estudios previos. En el Apéndice B se ofrece una descripción más detallada para crear el perfil de playa propuesta y que sería utilizado para los cálculos de volumen en las próximas secciones.

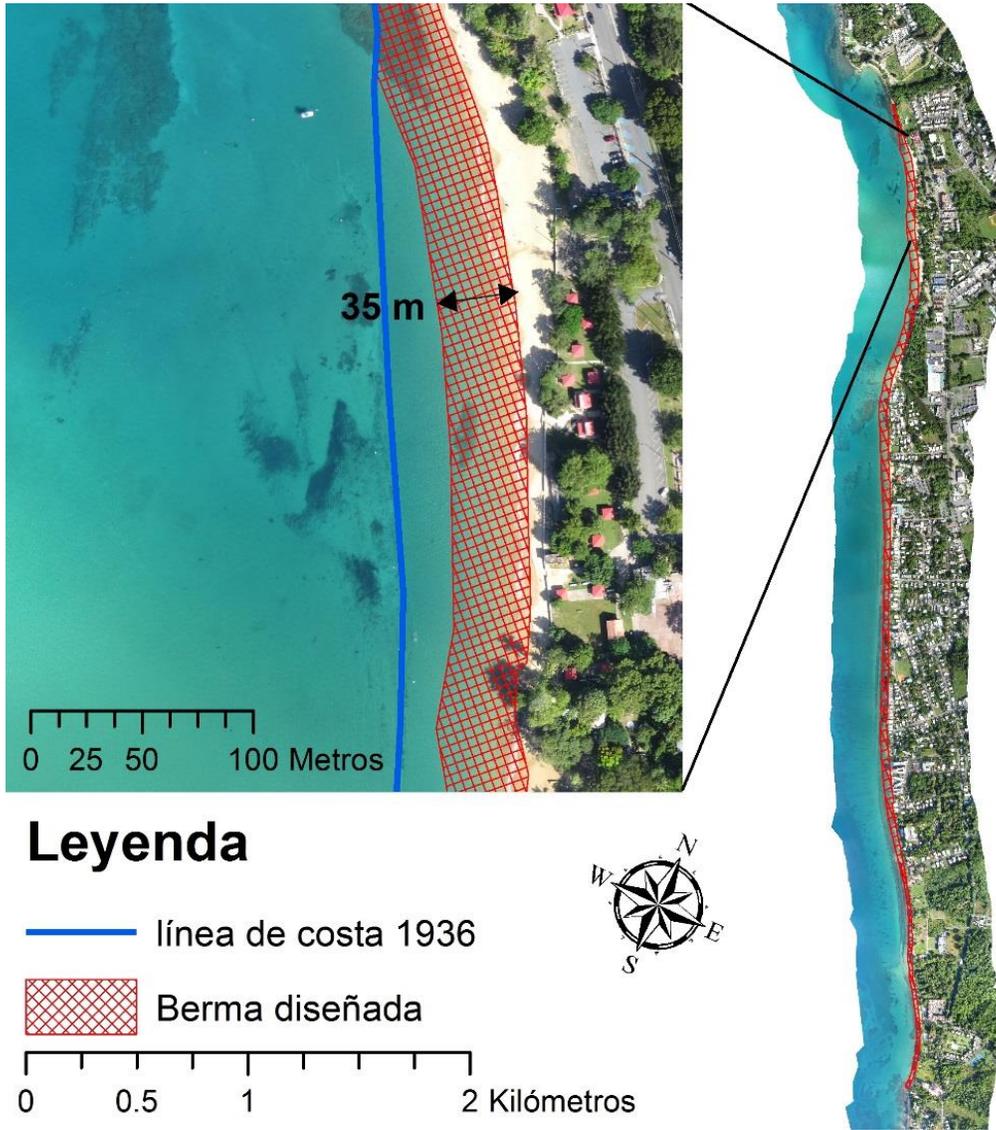
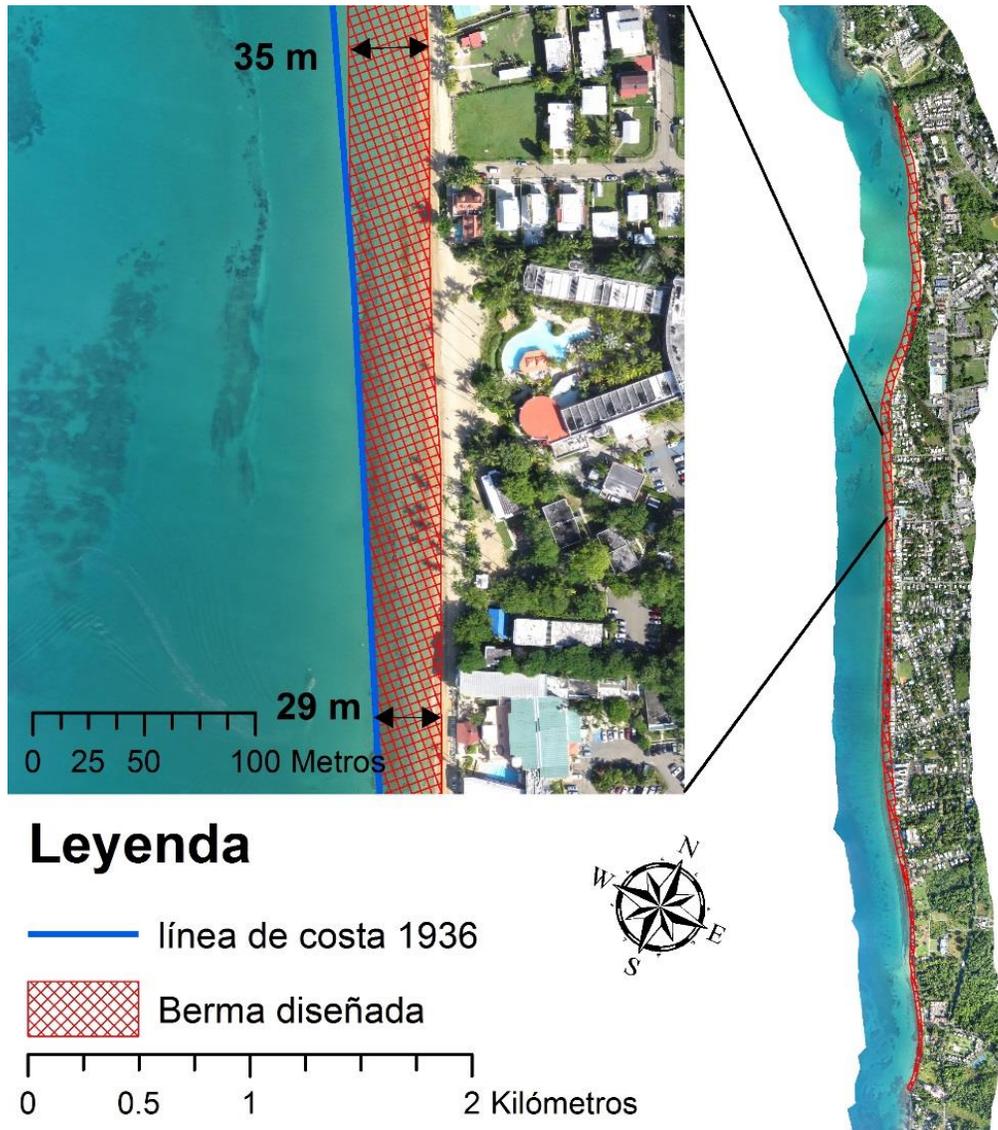


Figura 34: Vista en planta del diseño de berma propuesto en el Balneario, está basado en dos condiciones, 35 metros a partir de la posición de la costa del 2016 o la posición de la costa en el 1936.



Leyenda

— línea de costa 1936

▨ Berma diseñada

0 0.5 1 2 Kilómetros

Figura 35: Vista en planta del diseño de berma propuesto en Villa Cofresí, está basado en dos condiciones, 35 metros a partir de la posición de la costa del 2016 o la posición de la costa en el 1936.

La Figura 33 muestra el perfil típico para el relleno propuesto, para el caso de la berma propuesta varia entre 25 y 35 metros dependiendo de la línea de costa del 1936 (ver Apéndice B).

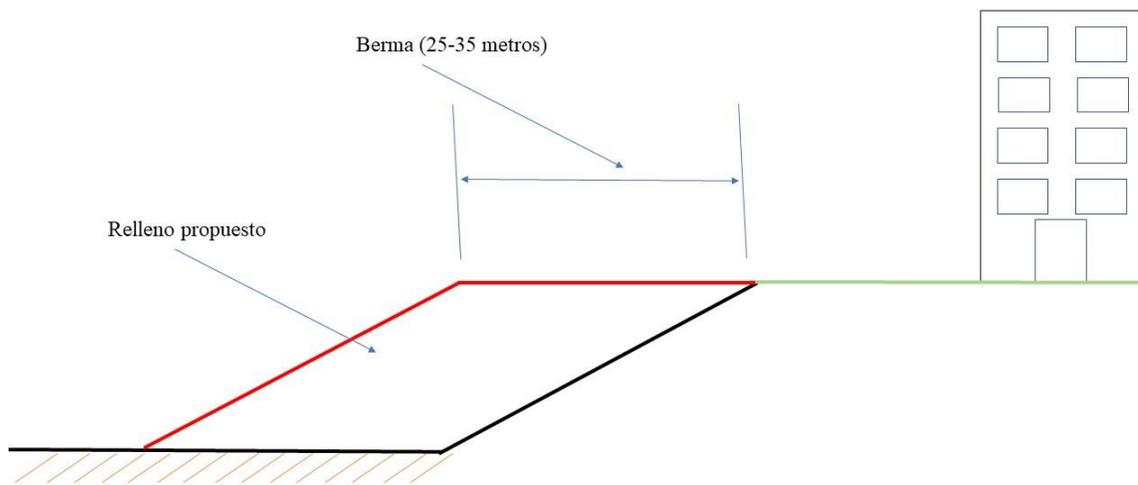


Figura 36: Perfil esquemático de rellenar las playas.

5.2.3 Cómputo de volumen

En esta sección se presentan las consideraciones tomadas para computar el volumen de arena necesario para rellenar parte de la costa de Rincón. El volumen de arena se computó, a partir de una superficie de referencia, en un modelo de elevación digital (DEM por sus siglas en inglés) basado en los datos LiDAR del USACE (2016) y como superficie propuesta un talud con las dimensiones presentadas en la sección anterior. Primero, se manejó la ecuación sugerida en (USACE, 1995) para estimar un volumen preliminar por metro lineal. Segundo, se utilizó herramienta para el cómputo de volumen entre superficies del programa ArcMap. Tercero, se recurrió a las áreas seccionales y ecuaciones de movimientos de tierra sugeridas por Cole (2009).

El primer método consistió en utilizar la ecuación (6), que permite estimar un volumen preliminar a base del ancho de berma, profundidad de cierre y de la distancia desde la costa. El estimado de volumen a partir de la ecuación mencionada es de 750,000 m³.

$$V = (B + h) * Y \quad (6)$$

donde:

V = volumen estimado,

B = altura de berma,

h = profundidad de cierre,

Y = ancho de playa.

Tabla 4: Resultados de cómputo de volumen para método 1.

	Columna 1	Columna 2	Columna 3
Fila 1	variable	cantidad	unidades
Fila 2	altura de berma (B)	1	m
Fila 3	profundidad de cierre (h)	3	m
Fila 4	ancho de playa (Y)	35	m
Fila 5	volumen por metro (V)	140	m ³ /m
Fila 6	distancia de la costa	4400	m
Fila 7	volumen estimado	616,000	m ³

El segundo método consistió en generar perfiles de elevación con la función de ArcMap conocida como Perfiles de elevación (“Stack Profile” en inglés) para computar el área seccional de cada perfil, luego aplicar la ecuación (7) que permite calcular el volumen a base de área seccional de perfiles de elevación. El volumen estimado con el método de áreas es de 667,000 m³. La ecuación examinada para estimar volumen a base de área seccional son las siguientes:

$$V = \frac{L * (A_1 + A_2)}{2} \quad (7)$$

donde:

V = volumen por áreas promedio,

A_1 = área inicial,

A_2 = área final,

L = distancia horizontal.

El tercer método consistió en aprovechar los Sistemas de Información Geográfico (GIS por sus siglas en inglés), específicamente ArcMap, para manejar las superficies como

Redes de Triángulos Irregulares (TIN por sus siglas en inglés) y con la función llamada Diferencia de Superficie (“Surface Difference” en inglés) estimar el volumen de arena. El volumen estimado utilizando GIS es 825,000 m³.

5.2.4 Estimado de costo de proyecto de realimentación de costa

En esta sección se presentan los posibles costos de un proyecto de realimentación de playas. Primero, la localización del sitio con respecto a los lugares donde se encuentra la maquinaria y el personal adiestrado para llevar a cabo este tipo de proyectos. En segundo lugar, la distancia entre la fuente de arena disponible y el área del proyecto. En tercer lugar, la disponibilidad de la maquinaria necesaria si se considera que estos equipos se reclaman para reparar playas en lugar más cerca que Puerto Rico.

Los precios unitarios típicos para proyectos de realimentación de playas en las costas de los Estados Unidos rondan los \$18 y \$20 por metro cúbico de arena. En el caso de Puerto Rico se espera que estos valores sean mayores debido al costo de acarreo de la maquinaria. El estimado de costos detallado para un proyecto de este tipo se encuentra fuera del alcance de este proyecto. Sin embargo, para fines generales en esta investigación se sugiere estimar el precio a base de un precio unitario de \$20 por metro cúbico. De los tres métodos descritos para estimar el volumen requerido para rellenar parte de la costa oeste fue el computado utilizando la batimetría del USACE (2016) y el perfil diseñado como guía de las consideraciones de Salas (2015), los detalles del perfil de diseño se encuentran en el Apéndice B. El volumen estimado es de aproximadamente 825,508 m³, si se le aplica el factor (1.6) para compensar por la granulometría según Rojas (2016) 1,320,813 m³, por lo

que si se considera los costos unitarios mencionados el costo de un proyecto de esta índole estaría entre de \$23,774,630 y \$26,416,256. A continuación, se detalla el ejemplo de cálculos del costo de rellenar una porción de la costa de Rincón.

5.2.5 Evaluación del Bajo Blanco como fuente de extracción de arena

La implantación de un proyecto de realimentación de la costa requiere identificar una fuente de extracción de arena. Esta fuente puede ser terrestre, de dragados de canales o muelles o de mar adentro (USACE, 1995). El Bajo de Blanco es una posible fuente para extraer la arena necesaria para rellenar las costas de Rincón. Las consideraciones para evaluar la viabilidad de su uso son: a) su localización, b) la profundidad del suelo marino (derivado de la batimetría), c) su granulometría d) y una evaluación del impacto o posibles efectos en los procesos costeros de la zona. El banco de arena ocupa un área de aproximadamente 380,000 m². En la Figura 37 se presenta una vista en planta del área del Bajo Blanco en la que se observa el contraste de color verde y crema, el color crema es indicador de aguas poco profunda y en este caso se permite tener una idea de su localización del banco de arena. Por otra parte, en la Figura 38 se ilustra una vista en planta de toda la costa oeste de Rincón en donde se presenta en distintos tonos de azul la batimetría del USACE (2016). En el Bajo de Blanco si se excava 4 metros según aparece en la Figura 37 como el polígono delimitado en color naranja tendría entre 1,000,000 y 1,100,000 metros cúbicos de arena disponible para alimentar las costas de Rincón.

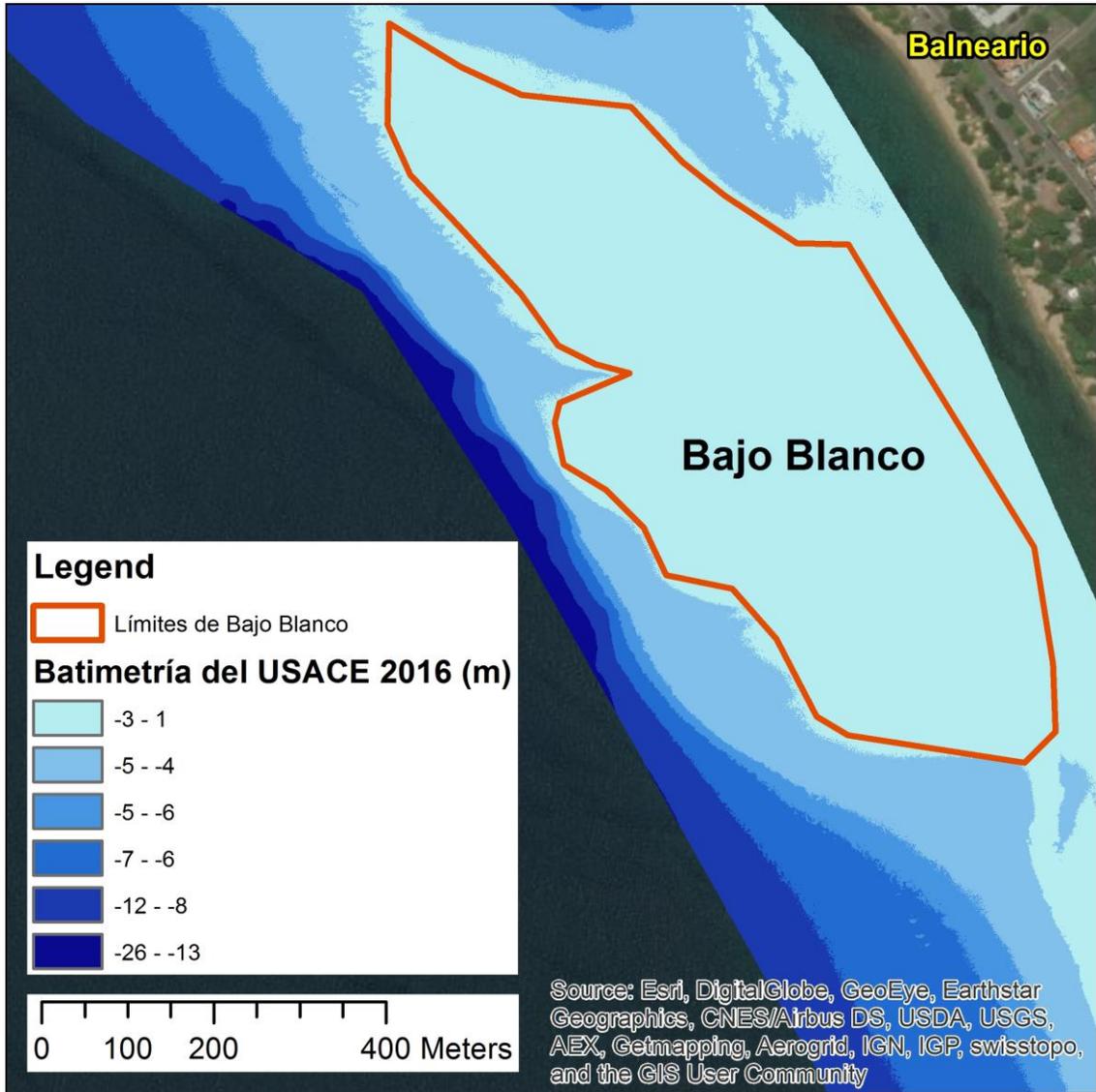


Figura 37: Vista en planta de la batimetría del Bajo de Blanco con los datos LiDAR del USACE 2016.

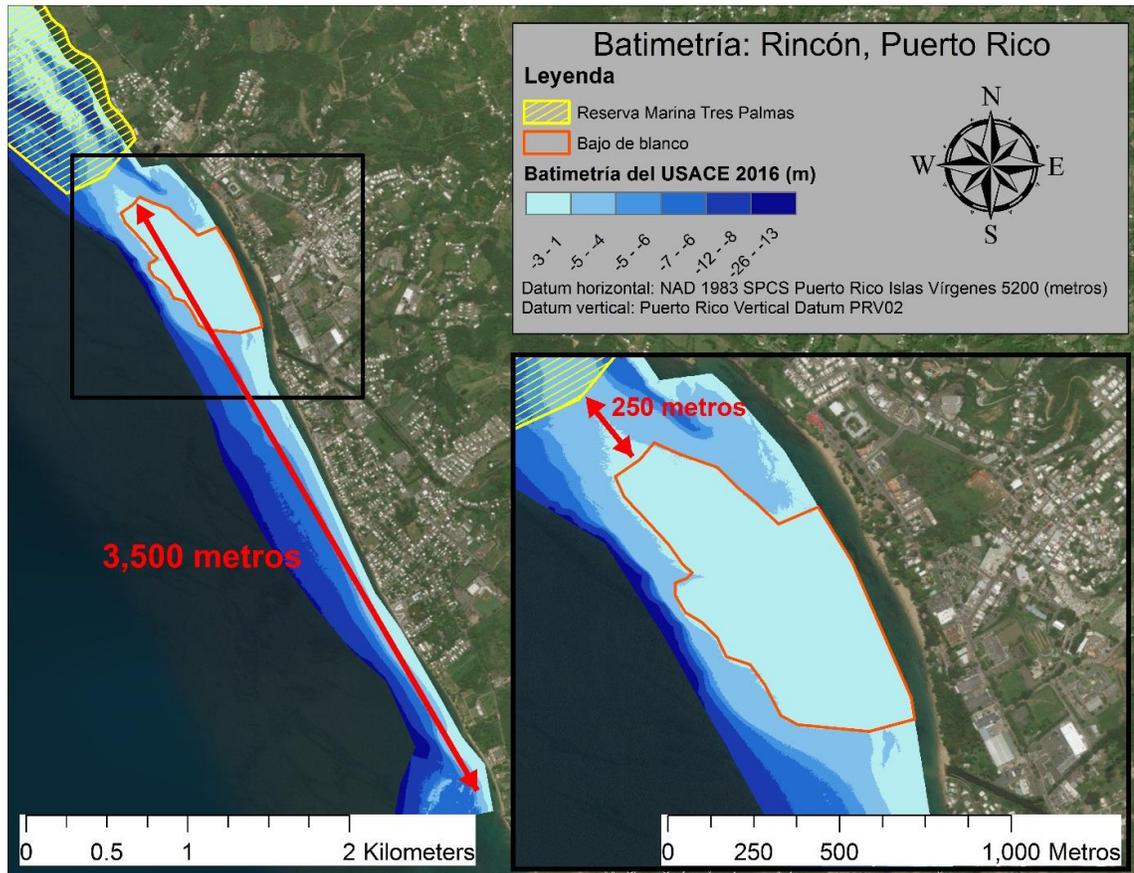


Figura 38: Plano de localización del Bajo de Blanco como posible fuente de extracción para proyecto de realimentación de playas.

5.3 Escenario 2: Armar la costa

El próximo escenario considerado para proteger la costa de Rincón es el uso de estructuras paralelas a la línea costera. Esta estrategia consiste en colocar algún tipo de estructura que resista las cargas hidrodinámicas generadas por el mar y sean capaces de proteger la integridad de la propiedad tierra adentro. Algunas de las estructuras de protección costera son los diques, muro vertical, rompeolas y muros de tablestacado (Salles & Silva, 2002). El objetivo de esta sección es plantear la alternativa de proteger la costa del área de estudio con muros de tablestacado de metal o muro de hormigón reforzado. Se incluye un estimado del posible costo de instalar este tipo de protección en las costas de Rincón. El estimado de costos se simplificó con el uso de un costo unitario típico para muros en ambientes costeros.

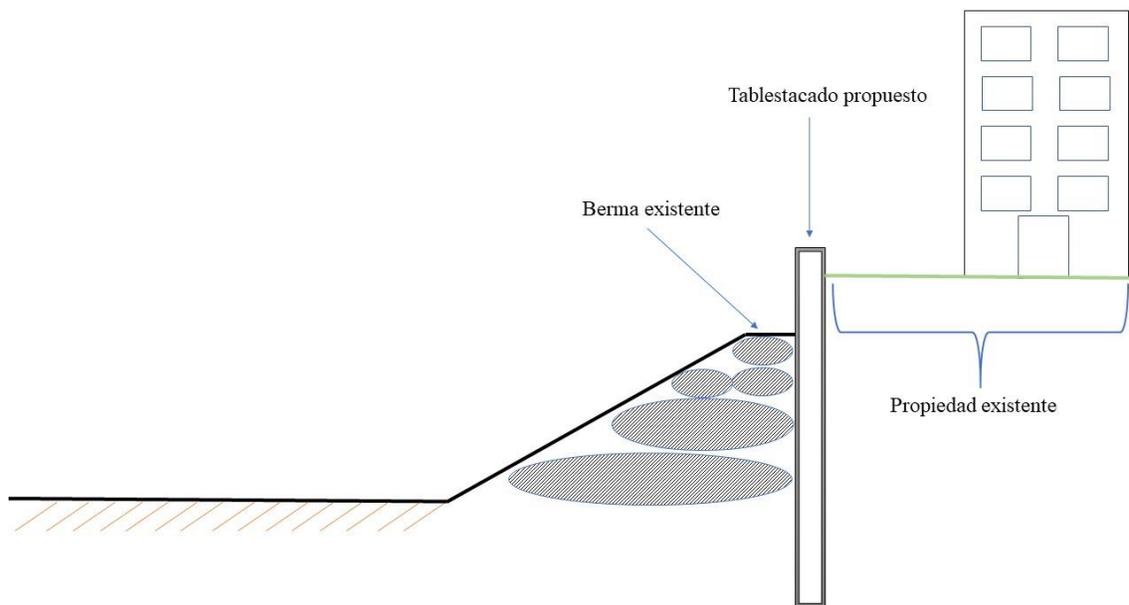


Figura 39: Perfil esquemático del escenario donde una estructura sólida protege las estructuras adyacentes del impacto de las olas.

5.3.1 Metodología para armar la costa

Esta sección detalla los métodos utilizados para armar parte de la costa oeste de Rincón. El primer paso fue identificar las zonas más afectadas históricamente por la erosión costera. El marco de referencia para la identificación de estas zonas fueron las tasas de erosión presentadas por Thieler (2006). Esta zona comprende desde el Balneario hasta la Casa Hines. El siguiente paso fue medir mediante GIS, la distancia de la porción de costa mencionada: aproximadamente 4.5 kilómetros.

5.3.2 Costo de estimado de armar la costa en el área de estudio

El análisis de costos demuestra que construir estructuras en áreas costeras resulta más alto que tierra adentro. Las razones son varias, una de ellas es la dificultad de operar maquinaria pesada. Otra de las razones es que los materiales utilizados deben ser de alta calidad para soportar el ambiente hostil debido a la cercanía al mar. A continuación, se presentan los costos unitarios de instalar muros de tablestaca de acero o de hormigón reforzado para fines de este proyecto .

Muro de tablestaca: \$1,500/ft (\$4,920/m)

Muro de hormigón reforzado: \$2,000/ft (\$6,560/m)

El costo de construir muro tablestacado de acero se estima en cerca de \$1,500 y \$2,000 el pie lineal. El largo de la costa entre el Balneario y la Casa Hines es de aproximadamente 4.512 metros (4.5 kilómetros o 2.80 millas), por lo que armar esta parte costaría entre \$22,205,709 y \$29,607,612.

Costo armar = Distancia de costa * Costo Unitario (9)

5.4 Escenario 3: Híbrido de realimentar y armar la costa

El escenario presentado en esta parte consiste en combinar las estrategias de realimentar y de armar la costa con estructuras paralelas a la costa. El resultado es un proyecto híbrido que complementa el relleno de las playas con una estructura paralela a la costa. Aunque este escenario es el más costoso es el que brinda mejor protección a la costa. Un detalle que se puede considerar es colocar geotextiles llenos de arena para intentar disipar la energía de las olas. El cómputo de los costos de colocar los geotextiles y se incluiría en el estimado de costos y beneficios por unidad lineal. Es decir, por cada pie lineal de tablestacado se añade \$200 por pie lineal.

5.4.1 Costo de proyecto de realimentación de playas combinado con estructura paralela a la costa

El costo del proyecto híbrido se determinó sumando los costos individuales para el escenario que considera el relleno de playas y el escenario que plantea armar. La ecuación (10) es el resultado del costo de la alternativa que combina la realimentación de playas y el armado de la costa con estructuras paralelas a la costa. Los resultados, discusión y análisis de estos datos se presentan en el Capítulo 6, titulado *Análisis de Costos y Beneficios de Proteger las Costas*. El costo de rellenar es el costo de colocar arena en un lugar en particular para generar acreción. El costo de armar la costa es el de colocar muros ya sean tablestacado u hormigón reforzado para proteger con una estructura sólida las propiedades cerca de la costa. Por último, el costo de proteger las barreras paralelas y perpendiculares a la costa (por ejemplo, los geotextiles llenos de arena) por pie lineal.

Costo Armar = Costo de rellenar + Costo de armar + Costo de proteger (10)

5.5 Conclusión

En resumen, en este capítulo se planteó el tipo de estrategias sugeridas para atender o mitigar el problema de erosión costera que sufre Rincón. Además, se presentaron varios escenarios que pueden ser implementados para proteger la infraestructura. Los costos sugeridos no intentan ser la última palabra, es un mero estimado que pretende arrojar luz sobre la magnitud de los costos.

6 Análisis de Costos y Beneficios de Proteger y Rellenar las Costas de Rincón

6.1 Introducción

El presente capítulo titulado *Análisis de Costos y Beneficios* tiene como propósito analizar los resultados económicos presentados en capítulos previos. También, se presenta la metodología y resultados utilizados para desarrollar el análisis de beneficios/costos de las alternativas para proteger la costa oeste de Rincón con proyectos de realimentación de playas y construcción de estructuras paralelas a la costa. Para fines de este proyecto, se identificaron tanto los costos de cada alternativa, así como la cantidad de dinero necesaria para completarlo una sola vez. Es decir, que no se toma en cuenta el mantenimiento de la realimentación de playas a través del tiempo ni la reparación de la estructura paralela a la costa.

Por otra parte, los beneficios se traducen en un aumento del valor económico de los bienes y servicios relacionados directamente al proyecto (USACE, 1991). Entiéndase, el valor de las propiedades que se encuentran en la primera línea colindante con el mar y los recaudos del CRIM para estas propiedades. Por último, se proveen las conclusiones del capítulo. En la Figura 40 se muestra una vista en planta del área de estudio en donde las propiedades se encuentran pintadas según la zona en la cual fueron clasificadas. En color naranja se muestran las propiedades de la zona 1, en rojo las de la zona 2, en amarillo las de la zona 3, en azul la zona 4, en verde la zona 5 y, por último, en turquesa la zona 6. El propósito de estas clasificaciones es determinar la razón de costos y beneficios para

identificar las zonas donde se justificarían proyectos de realimentación y restauración de playas.

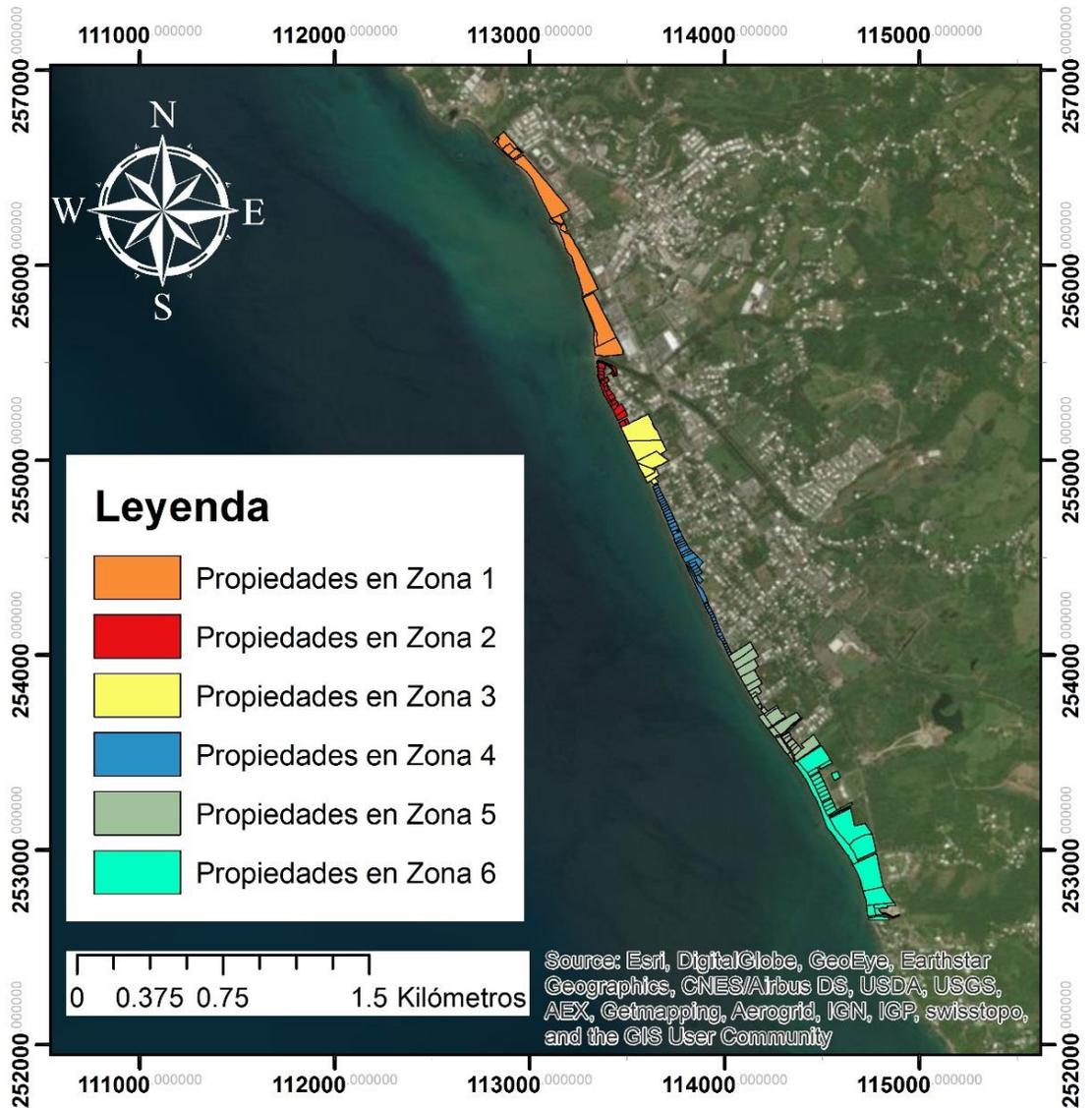


Figura 40: Clasificación de propiedades según la zona; la zona 1 es desde el, Balneario hasta la Quebrada Ramos, la zona 2 desde la Quebrada Ramos hasta el Hotel “Rincón of the Seas”, la zona tres hasta Stella, la zona 4 hasta Córcega, la 5 hasta el edificio de apartamentos Pelican y la 6 hasta la Casa Hines. .

6.2 Costos de Proteger las Costas de Rincón

En esta sección se presentan las consideraciones utilizadas para definir los valores que representan los costos de las alternativas presentadas. Los costos se refieren a la cantidad de dinero necesaria para ejecutar los tres escenarios presentados en los capítulos previos para proteger la costa de Rincón. Para fines de simplificar el estimado de costos de cada alternativa se utilizaron costos unitarios de proyectos reales en otros lugares. En el caso de realimentar las costas, según el costo de este tipo de proyectos en los Estados Unidos. Es importante reconocer que este valor es muy variable y depende de muchos factores tales como, por ejemplo, la disponibilidad y distancia de transporte de los equipos necesarios para viabilizar este tipo de proyectos.

En la Tabla 5 se presenta una hoja de cálculos con el estimado de costos desglosado por zonas para un proyecto de realimentación de playas. Para estimar el costo de un proyecto de este tipo se utilizó un rango de costo unitario de \$18 y \$20 por metro cúbico, este valor es un rango de valores típico para las costas de los Estados Unidos. En la Tabla 6 se muestra el costo por zonas de armar parte de la costa oeste de Rincón con muros de tablestacado y hormigón reforzado. Se utilizó como valor unitario \$1,500/ft (\$4,920/m) y \$2,000/ft (\$6,000/m). Estos son valores típicos para este tipo de proyecto, pero pueden variar por muchas razones, tales como la disponibilidad de la maquinaria y materiales necesarios para la instalación de dichas barreras. Un costo que no pudo ser determinado es el de demoler y disponer del material luego de limpiar la costa luego del Huracán María.

Tabla 5: Costo por zona de rellenar la costa oeste de Rincón.

Rellenar las playas con arena					
# de Zona	Descripción	Vol. Estimado (m ³)	Volumen Estimado*1.6= Volumen Ajustado (m ³)	Volumen Ajustado*\$18/m ³	Volumen Ajustado*\$20/m ³
Zona 1	Balneario a Quebrada Ramos	218,266	349,226	\$ 6,286,061	\$ 6,984,512
Zona 2	Quebrada Ramos a Rincón of the Seas	74,531	119,250	\$ 2,146,493	\$ 2,384,992
Zona 3	Rincón of the Seas a Villa Cofresí	85,404	136,646	\$ 2,459,635	\$ 2,732,928
Zona 4	Villa Cofresí a Stella	210,089	336,142	\$ 6,050,563	\$ 6,722,848
Zona 5	Stella a Córcega	128,732	205,971	\$ 3,707,482	\$ 4,119,424
Zona 6	Córcega a Calvache	108,486	173,578	\$ 3,124,397	\$ 3,471,552
Zona 1-6	Balneario a Calvache	825,508	1,320,813	\$ 23,774,630	\$ 26,416,256

Tabla 6: Costo por zona de armar la costa oeste de Rincón.

Armar la costa con estructuras paralelas				
# de Zona	Descripción	Distancia (m)	Distancia(m) * \$4,920/m	Distancia(m) * \$6,560/m
Zona 1	Balneario a Quebrada Ramos	1260	\$ 6,202,756	\$ 8,270,341
Zona 2	Quebrada Ramos a Rincón of the Seas	390	\$ 1,918,799	\$ 2,558,399
Zona 3	Rincón of the Seas a Villa Cofresí	341	\$ 1,680,118	\$ 2,240,158
Zona 4	Villa Cofresí a Stella	958	\$ 4,716,043	\$ 6,288,058
Zona 5	Stella a Córcega	649	\$ 3,194,390	\$ 4,259,186
Zona 6	Córcega a Calvache	913	\$ 4,493,603	\$ 5,991,470
Zona 1-6	Balneario a Calvache	4512	\$ 22,205,709	\$ 29,607,612

6.3 Beneficios de Proteger y Rellenar las Costas de Rincón

A continuación, se presentan los beneficios esperados si se rellenan las playas o se protegen con estructuras paralelas a la costa (ver Tabla 7 y Tabla 8). En este proyecto se identificaron dos tipos de beneficios, primero, el valor estimado de las propiedades clasificadas que se encuentran en la primera línea costera y el segundo, la aportación por concepto de contribución sobre la propiedad inmueble de dichas propiedades. Es decir, los beneficios para fines de este proyecto son dos, el primero el valor ajustado al presente (2017) el valor del CRIM a precios del 1958 (Total Val). En las Tablas 7 y 8 se encuentra el cómputo por zona correspondiente al valor de la propiedad basado en valor contributivo del parcelario del CRIM. Se utilizó la tasa de interés de 4.66%, 5.70% y 6.85% para computar el Total Val a precios del 2017, la tasa de interés y la ecuación utilizada para

estimar el Total Val₂₀₁₇ se encuentran en el Capítulo 4, titulado *Manejo de Datos del Catastro Digital de Puerto Rico*. En la Tabla 8 se presenta el cómputo de la contribución sobre la propiedad de las parcelas colindantes a la costa.

Tabla 7: Valor de la propiedad de las propiedades colindante a la costa.

Valor de la propiedad					
# de Zona	Descripción	Total Val ₁₉₅₈	Total Val ₁₉₅₈ *(1+4.66%) ²⁰¹⁷⁻¹⁹⁵⁸ = Total Val ₂₀₁₇	Total Val ₁₉₅₈ *(1+5.70%) ²⁰¹⁷⁻¹⁹⁵⁸ = Total Val ₂₀₁₇	Total Val ₁₉₅₈ *(1+6.85%) ²⁰¹⁷⁻¹⁹⁵⁸ = Total Val ₂₀₁₇
Zona 1	Balneario a Quebrada Ramos	\$ 96,842	\$ 1,422,744	\$ 2,549,694	\$ 4,827,928
Zona 2	Quebrada Ramos a Rincón of the Seas	\$ 111,452	\$ 1,637,386	\$ 2,934,351	\$ 5,556,290
Zona 3	Rincón of the Seas a Villa Cofresí	\$ 2,602,230	\$ 38,230,394	\$ 68,512,518	\$ 129,730,694
Zona 4	Villa Cofresí a Stella	\$ 837,257	\$ 12,300,475	\$ 22,043,626	\$ 41,740,327
Zona 5	Stella a Córcega	\$ 2,705,002	\$ 39,740,258	\$ 71,218,339	\$ 134,854,255
Zona 6	Córcega a Calvache	\$ 1,157,341	\$ 17,002,956	\$ 30,470,922	\$ 57,697,687
Zona 1-6	Balneario a Calvache	\$ 7,510,124	\$ 110,334,213	\$ 197,729,450	\$ 374,407,182

Tabla 8: Contribución sobre la propiedad de las parcelas colindantes a la costa.

Contribución sobre la propiedad					
# de Zona	Descripción	Taxable	Taxable*5.96%=Contribución sobre la propiedad	Taxable*6.00%=Contribución sobre la propiedad	Taxable*8.83%=Contribución sobre la propiedad
Zona 1	Balneario a Quebrada Ramos	\$ 94,883	\$ 5,655	\$ 5,693	\$ 8,378
Zona 2	Quebrada Ramos a Rincón of the Seas	\$ 106,582	\$ 6,352	\$ 6,395	\$ 9,411
Zona 3	Rincón of the Seas a Villa Cofresí	\$ 441,240	\$ 26,298	\$ 26,474	\$ 38,961
Zona 4	Villa Cofresí a Stella	\$ 555,487	\$ 33,107	\$ 33,329	\$ 49,050
Zona 5	Stella a Córcega	\$ 2,409,445	\$ 143,603	\$ 144,567	\$ 212,754
Zona 6	Córcega a Calvache	\$ 1,051,175	\$ 62,650	\$ 63,071	\$ 92,819
Zona 1-6	Balneario a Calvache	\$ 4,658,812	\$ 277,665	\$ 279,529	\$ 411,373

6.4 Metodología

La idea principal de comparar los costos y los beneficios de proyectos de restauración de costas es justificarlos económicamente. Por un lado, se tienen los costos de oportunidad que deben ser utilizados para la ejecución del proyecto mientras que en el otro los beneficios que se esperan obtener. En esta sección se presentan los métodos el análisis de costos y beneficios. La ecuación 11 compara los costos y beneficios:

$$\text{Razón beneficio costo} = \frac{\text{beneficios}}{\text{costos}} \quad (11)$$

6.5 Resultados

En esta sección se exponen los resultados de la razón de costos y beneficios para los tres escenarios disertados en el Capítulo 5 titulado *Estrategias para Proteger las Costas de Rincón*. La Tabla 9 presenta los costos de llevar a cabo estrategias de rellenar las playas con arena, de armar la costa con estructuras paralelas a la línea costera y proyectos combinados. En la Tabla 10 aparecen los beneficios esperados, que resultan en la suma del Total Val más la contribución sobre la propiedad. En las Tablas 11 a la 13 se presentan los resultados de la razón beneficio/costo de dichos proyectos. En la Tabla 14 se presenta los resultados de la razón beneficios y costos si se consideran solamente las zonas 3, 4 y 5.

Tabla 9: Costos de realizar proyectos de restauración y protección de playas utilizando técnicas de mitigación de daños por la erosión.

# de Zona	Costos							
	Rellenar		Armar		Híbrido			
	\$18/m ³	\$20/m ³	\$1,500/ft	\$2,000/ft	\$18/m ³ +\$1,500/ft	\$20/m ³ +\$2,000/ft	\$18/m ³ +\$2,000/ft	\$20/m ³ +\$1,500/ft
Zona 1	\$6,286,061	\$6,984,512	\$6,201,168	\$8,268,224	\$12,487,229	\$15,252,736	\$14,554,285	\$13,185,680
Zona 2	\$2,146,493	\$2,384,992	\$1,918,308	\$2,557,744	\$4,064,801	\$4,942,736	\$4,704,237	\$4,303,300
Zona 3	\$2,459,635	\$2,732,928	\$1,679,688	\$2,239,584	\$4,139,323	\$4,972,512	\$4,699,219	\$4,412,616
Zona 4	\$6,050,563	\$6,722,848	\$4,714,836	\$6,286,448	\$10,765,399	\$13,009,296	\$12,337,011	\$11,437,684
Zona 5	\$3,707,482	\$4,119,424	\$3,193,572	\$4,258,096	\$6,901,054	\$8,377,520	\$7,965,578	\$7,312,996
Zona 6	\$3,124,397	\$3,471,552	\$4,492,452	\$5,989,936	\$7,616,849	\$9,461,488	\$9,114,333	\$7,964,004
Zona 1-6	\$23,774,630	\$26,416,256	\$22,200,024	\$29,600,032	\$45,974,654	\$56,016,288	\$53,374,662	\$48,616,280

Tabla 10: Beneficios identificados como el valor de la propiedad más la contribución sobre la propiedad inmueble.

# de Zona	Beneficios		
	Total Val _{4,66%} + Taxable*Tipo Contributivo	Total Val _{5,70%} + Taxable*Tipo Contributivo	Total Val _{6,85%} + Taxable*Tipo Contributivo
Zona 1	\$1,428,399	\$2,555,349	\$4,833,583
Zona 2	\$1,643,738	\$2,940,704	\$5,562,643
Zona 3	\$38,256,692	\$68,538,816	\$129,756,992
Zona 4	\$12,333,582	\$22,076,733	\$41,773,434
Zona 5	\$39,883,861	\$71,361,942	\$134,997,858
Zona 6	\$17,065,606	\$30,533,572	\$57,760,337
Zona 1-6	\$110,611,878	\$198,007,115	\$374,684,847

Tabla 11: Resultados de la razón beneficio/costo de rellenar las playas con arena y de armar la costa con estructuras paralelas a la costa con tasa de interés de 4.66%.

# de Zona	Beneficio/Costo (Total Val ₂₀₁₇ , i=4.66%)							
	Rellenar		Armar		Híbrido			
	\$18/m ³	\$20/m ³	\$1,500/ft	\$2,000/ft	\$18/m ³ +\$1,500/ft	\$20/m ³ +\$2,000/ft	\$18/m ³ +\$2,000/ft	\$20/m ³ +\$1,500/ft
Zona 1	0.23	0.20	0.23	0.17	0.11	0.09	0.10	0.11
Zona 2	0.77	0.69	0.86	0.64	0.40	0.33	0.35	0.38
Zona 3	15.55	14.00	22.78	17.08	9.24	7.69	8.14	8.67
Zona 4	2.04	1.83	2.62	1.96	1.15	0.95	1.00	1.08
Zona 5	10.76	9.68	12.49	9.37	5.78	4.76	5.01	5.45
Zona 6	5.46	4.92	3.80	2.85	2.24	1.80	1.87	2.14
Zona 1-6	4.65	4.19	4.98	3.74	2.41	1.97	2.07	2.28

Tabla 12: Resultados de la razón beneficio/costo de rellenar las playas con arena y de armar la costa con estructuras paralelas a la costa con tasa de interés de 5.70%.

# de Zona	Beneficio/Costo (Total Val ₂₀₁₇ , i=5.70%)							
	Rellenar		Armar		Híbrido			
	\$18/m ³	\$20/m ³	\$1,500/ft	\$2,000/ft	\$18/m ³ +\$1,500/ft	\$20/m ³ +\$2,000/ft	\$18/m ³ +\$2,000/ft	\$20/m ³ +\$1,500/ft
Zona 1	0.41	0.37	0.41	0.31	0.20	0.17	0.18	0.19
Zona 2	1.37	1.23	1.53	1.15	0.72	0.59	0.63	0.68
Zona 3	27.87	25.08	40.80	30.60	16.56	13.78	14.59	15.53
Zona 4	3.65	3.28	4.68	3.51	2.05	1.70	1.79	1.93
Zona 5	19.25	17.32	22.35	16.76	10.34	8.52	8.96	9.76
Zona 6	9.77	8.80	6.80	5.10	4.01	3.23	3.35	3.83
Zona 1-6	8.33	7.50	8.92	6.69	4.31	3.53	3.71	4.07

Tabla 13: Resultados de la razón beneficio/costo de rellenar las playas con arena y de armar la costa con estructuras paralelas a la costa con tasa de interés de 6.85%.

# de Zona	Beneficio/Costo (Total Val ₂₀₁₇ , i=6.85%)							
	Rellenar		Armar		Híbrido			
	\$18/m ³	\$20/m ³	\$1,500/ft	\$2,000/ft	\$18/m ³ +\$1,500/ft	\$20/m ³ +\$2,000/ft	\$18/m ³ +\$2,000/ft	\$20/m ³ +\$1,500/ft
Zona 1	0.77	0.69	0.78	0.58	0.39	0.32	0.33	0.37
Zona 2	2.59	2.33	2.90	2.17	1.37	1.13	1.18	1.29
Zona 3	52.75	47.48	77.25	57.94	31.35	26.09	27.61	29.41
Zona 4	6.90	6.21	8.86	6.64	3.88	3.21	3.39	3.65
Zona 5	36.41	32.77	42.27	31.70	19.56	16.11	16.95	18.46
Zona 6	18.49	16.64	12.86	9.64	7.58	6.10	6.34	7.25
Zona 1-6	15.76	14.18	16.88	12.66	8.15	6.69	7.02	7.71

Tabla 14: Resultados de la razón beneficio/costo de rellenar las playas con arena y de armar la costa con estructuras paralelas a la costa tomando en consideración solamente las zonas 3, 4 y 5.

Beneficio/Costo (Total Val ₂₀₁₇ , <i>i</i> =4.66%)								
# de Zona	Rellenar		Armar		Híbrido			
	\$18/m ³	\$20/m ³	\$1,500/ft	\$2,000/ft	\$18/m ³ +\$1,500/ft	\$20/m ³ +\$2,000/ft	\$18/m ³ +\$2,000/ft	\$20/m ³ +\$1,500/ft
Zona 3	15.6	14.0	22.8	17.1	9.2	7.7	8.1	8.7
Zona 4	2.0	1.8	2.6	2.0	1.1	0.9	1.0	1.1
Zona 5	10.8	9.7	12.5	9.4	5.8	4.8	5.0	5.5
Zona 1-6	9.4	8.5	12.6	9.5	5.4	4.5	4.7	5.1

Beneficio/Costo (Total Val ₂₀₁₇ , <i>i</i> =5.70%)								
# de Zona	Rellenar		Armar		Híbrido			
	\$18/m ³	\$20/m ³	\$1,500/ft	\$2,000/ft	\$18/m ³ +\$1,500/ft	\$20/m ³ +\$2,000/ft	\$18/m ³ +\$2,000/ft	\$20/m ³ +\$1,500/ft
Zona 3	27.9	25.1	40.8	30.6	16.6	13.8	14.6	15.5
Zona 4	3.6	3.3	4.7	3.5	2.1	1.7	1.8	1.9
Zona 5	19.2	17.3	22.3	16.8	10.3	8.5	9.0	9.8
Zona 1-6	16.9	15.2	22.6	17.0	9.6	8.0	8.4	9.1

Beneficio/Costo (Total Val ₂₀₁₇ , <i>i</i> =6.85%)								
# de Zona	Rellenar		Armar		Híbrido			
	\$18/m ³	\$20/m ³	\$1,500/ft	\$2,000/ft	\$18/m ³ +\$1,500/ft	\$20/m ³ +\$2,000/ft	\$18/m ³ +\$2,000/ft	\$20/m ³ +\$1,500/ft
Zona 3	52.8	47.5	77.3	57.9	31.3	26.1	27.6	29.4
Zona 4	6.9	6.2	8.9	6.6	3.9	3.2	3.4	3.7
Zona 5	36.4	32.8	42.3	31.7	19.6	16.1	16.9	18.5
Zona 1-6	32.0	28.8	42.8	32.1	18.3	15.1	16.0	17.2

6.6 Discusión de resultados

Como se mencionó anteriormente, el propósito de analizar costos y beneficios es justificar económicamente estrategias que permitan proteger la costa de Rincón. Los resultados presentados en la sección 6.5 demuestran que los beneficios de tomar acción para proteger la infraestructura existente solo se justifican económicamente en algunas de las zonas. Por ejemplo, la razón de beneficio/costo de rellenar las playas y colocar estructuras que protejan las propiedades se justifica en las zonas con razón de beneficio/costo mayor a 1. Es decir, para la zona 1 y 2 la razón beneficio/costo es menor que 1 lo que significa que el costo de proyectos de realimentación y protección de playas con estructuras paralelas a la costa no se justifica económicamente.

6.7 Conclusión

El análisis presentado en esta sección sirve para ofrecer una idea de los costos y beneficios de los tres escenarios evaluados en este proyecto investigativo. Es importante reconocer que este análisis no considera el mantenimiento de la estructura paralela ni los rellenos secundarios que se requerirán luego de que azote una tormenta.

7 Conclusiones y recomendaciones para trabajos futuros

En este trabajo investigativo se logró identificar los impactos de la erosión costera a la infraestructura del Municipio de Rincón. De una parte, se describieron dos tipos de proyectos que ayuden a preservar y a dar valor a la costa. Estos consisten en realimentar la costa con arena del Bajo Blanco u otra fuente de arena y de armar la costa con estructuras solidas paralelas a la línea costera. Además, se propuso una metodología capaz de ajustar los datos de valorización parcelario del Catastro Digital del CRIM a valores presentes. Dicha metodología permitió estimar el valor de las propiedades identificadas como colindantes a la costa para luego estimar los costos y beneficios de proyectos de realimentación y protección de las playas de Rincón. Por otra parte, se pudo estimar la cantidad de dinero que dejaría de recibir las agencias municipales por concepto de contribución sobre la propiedad inmueble en el caso que las estructuras costeras sean removidas o identificadas como estorbo público. Con el análisis de costos y beneficios se pudo identificar las zonas en las cuales se justifica económicamente realizar proyectos de realimentación de playas y protección de playas.

Se recomienda emprender un proyecto fotogramétrico similar al realizado para esta investigación (ver Apéndice A) con el fin de evaluar los daños provocados por el paso del Huracán María en la costa oeste de Rincón. Sobrevolar la costa oeste tiene dos propósitos principales, el primero es crear un orto mosaico que permita delimitar la posición de la costa y evaluar los daños a la infraestructura, el segundo es crear un modelo digital de

elevación que permita estimar el cambio en volumen de arena. Otra recomendación es actualizar el análisis de costos y beneficios propuesto en esta investigación con los datos actualizados del parcelario de Rincón. Se recomienda identificar los beneficios adicionales de proteger, rellenar y restaurar las costas con el fin de que la justificación de los costos y los beneficios. Los beneficios adicionales no son tan fáciles de identificar por lo no se incluyeron en este proyecto, sin embargo, son muy importante al momento de justificar proyectos de restauración de costas. Debido a la incertidumbre que se deja al plantear la posibilidad de rellenar partes de la costa oeste de Rincón se recomienda realizar simulaciones numéricas para entender mejor la viabilidad de llevar a cabo ese tipo de proyectos.

Referencias

- Alvarado, G. (2017). Apuestan a la resiliencia en Rincón. Extraído de <https://www.elnuevodia.com/noticias/locales/nota/apuestanalaresilienciaenrincon-2381038/>
- Aponte, L., Villafañe, F., Canals, M., Muñoz, J., y Díaz, E. (2016). Impacto de la erosión costera a la infraestructura de Rincón, Puerto Rico. *Revista Dimensión Del CIAPR*. Extraído de <http://www.ciapr.net/templates/CIAPR/Dimension/03dimA31v1.pdf>
- Cao-Alvira, J. J., y Rodríguez-Rodríguez, R. J. (2010). Análisis Comprensivo de la Incidencia Contributiva del Impuesto sobre la Propiedad Inmueble en Puerto Rico (p. 6). Quest for Global Competitiveness. Extraído de http://quest.uprrp.edu/Quest_files/ProceedingsQ7/Concurrent_session_I/Analisis_comprensivo_de_la_incidencia_contributiva_del_impuesto_sobre_la_propiedad_inmueble_en_pr.pdf
- Caribbean Coastal Ocean Observing System. (2017). Rincón Buoy. Extraído de <http://www.caricoos.org/station/rincon/us>
- CariCOOS. (2016). Modelo de Oleaje. Extraído de <http://www.caricoos.org/>
- Cole, G. (2009). *Surveyor Reference Manual*.
- Cole, G. M. (2009). Earthwork. In *Surveyor Reference Manual* (Fifth, p. 37). The Power to Pass.
- Council, N. R. (1995). *Beach Nourishment and Protection*. National Academy Press.
- CRIM. (2016a). Catastro Digital de Puerto Rico. Extraído de <https://www.satagis.crimpr.net/catastrodigital/>
- CRIM. (2016b). *Guía rápida del Portal del Catastro Digital*. Retrieved from http://www.satagis.crimpr.net/cdprhelp/docs/GuiaRapida_PCD.pdf
- CRIM. (2016c). *Tipo Contributivos 2016-2017*. Extraído de <https://www.crimpr.net/crimdnn/Portals/0/archivos/Tipos Contributivos 2016-2017.pdf>
- CRIM. (2017). Preguntas frecuentes del CRIM. Extraído de <https://www.crimpr.net/crimdnn/es-es/Preguntas/Catastro-Digital-de-Puerto-Rico>
- DEAN, R. G., y DALRYMPLE, R. A. (2004). *Coastal processes with engineering applications*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.4324/9780203430590>
- Departamento de Recursos Naturales. (2015). Imprescindible el esfuerzo multisectorial para enfrentar el problema de erosión costera. Extraído de <http://drna.pr.gov/historico/oficinas/oficina-de-prensa-y-comunicaciones/comunicados-de-prensa/comunicados-2015/imprescindible-el-esfuerzomultisectorial-para-enfrentar-el-problema-deerosion-costera>.
- Díaz, E. (2012). The Puerto Rico Climate Change Council (PRCCC) Vulnerability Assessment and Adaptation Strategies. Extraído de http://drna.pr.gov/historico/oficinas/arn/recursosvivientes/costasreservasrefugios/pmzc/prccc/PRCCC_OCT2012.pdf
- DRNA. (2015). Imprescindible el esfuerzo multisectorial para enfrentar el problema de erosión costera. Extraído de <http://drna.pr.gov/historico/oficinas/oficina-de-prensa->

- y-comunicaciones/comunicados-de-prensa/comunicados-2015/imprescindible-el-esfuerzo-multisectorial-para-enfrentar-el-problema-de-erosion-costera/
 Estado Libre Asociado de Puerto Rico. (2016). Indicadores socioeconómicos. Extraído de <http://www.ocpr.gov/map/Municipios/Rincon.pdf>
- Gómez, J. (2004). *Efectos de las estructuras construidas por el hombre sobre tramos de línea de costa al norte, oeste, y sur de Puerto Rico*. United States Patent Application Publication.
- Morelock, J. (1978). Shoreline of Puerto Rico, (Figure 1), 9.
- National Hurricane Center. (2017a). Saffir-Simpson Hurricane Wind Scale. Extraído de <http://www.nhc.noaa.gov/aboutsshws.php>
- National Hurricane Center. (2017b). Storm Surge Overview. Extraído de <http://www.nhc.noaa.gov/surge/>
- NOAA. (2017). Hurricane Maria Infrared Satellite Imagery. Extraído de <https://www.youtube.com/watch?v=DDgob-vR2Hg>
- Pendleton, L. (2002). A Preliminary Study of the Value of Coastal Tourism In Rincón , Puerto Rico prepared by Environmental Defense Surfer ' s Environmental Alliance The Surfrider Foundation. *Tourism*. Extraído de https://rincon.surfrider.org/LP_study.pdf
- Porro, R. (2015). *Comparing Erosion Management Strategies in Waikiki , Hawai 'i*. University of Hawai 'i at Mānoa.
- Rodríguez, C. (2016). *Fotogrametría de la costa de Rincón, Puerto Rico*.
- Rojas, C. A. (2016). *Evaluation of the Bajo Blanco sand shoal as a beach nourishment borrow site for eroding beaches at Rincón , Puerto Rico By*.
- Salas, F. C. (2014). *Analysing Equilibrium Beach Profile To Determine Sedimentary Budget for the Nourishment of a Rapidly Eroding Beach At Rincon, Puerto Rico*, U.S. Plymouth University.
- Salles, P., y Silva, R. (2002). Infraestructura de Protección Costera. Extraído de <http://etzna.uacam.mx/epomex/pdf/mancos/cap13.pdf>
- Seguinot, J., y Méndez, P. (2008). Introducción al manejo costero en Puerto Rico. Extraído de http://hum117.uca.es/ibermar/Resultados_y_descargas/CursosySeminarios/PonenciaMCI_PUERTORICO
- Tencate. (2017). Geo Tubos y “Sand Bags.” Extraído de <http://www.tencate.com/apac/geosynthetics/product/hydraulic-marine/tencate-geotube-geocontainment-unit.aspx>
- Thieler, R. E., Rodríguez, R. W., & Himmelstoss, E. a. (2007). Historical Shoreline Changes at Rincón , Puerto Rico , 1936-2006. Extraído de <https://cmgds.marine.usgs.gov/publications/of2007-1017/ofr2007-1017.pdf>
- Troche, U. F. (2006). *Avances en el Catastro Digital de Puerto Rico*. Retrieved from http://cohemis.uprm.edu/prysig/pdfs/pres_ufeliciano06.pdf
- USACE. (1991). National Economic Development Procedures Manual: Coastal Storm Damage and Erosion. Extraído de <http://www.iwr.usace.army.mil/Portals/70/docs/iwrreports/91-R-6.pdf>
- USACE. (1995). Design of beach fills, 112. Extraído de <http://www.a->

jacks.com/Coastal/GeneralInfo/COEManuals/coe_beach_fills.pdf

APÉNDICE A. FOTOGRAMETRÍA AÉREA EN RINCÓN, PUERTO RICO

Durante los días 17 y 18 de septiembre de 2016 se realizó un proyecto fotogramétrico subvencionado por el programa Sea Grant de la Universidad de Puerto Rico, Recinto Universitario de Mayagüez. El proyecto consistió en tomar fotografías aéreas mediante un Vehículo Aéreo No Tripulado (UAV por sus siglas en inglés) con el fin de crear un orto mosaico y un modelo tridimensional de los ocho kilómetros lineales de la costa oeste de Rincón. Para georreferenciar las fotografías aéreas se colocaron controles fotogramétricos los cuales se pintaron sobre el asfalto con dimensiones de 20 centímetros por 1 metro (ver Figura 41). Las marcas utilizadas como controles de posición tridimensional fueron observados con un receptor GPS por un periodo de no menos de 15 minutos con el fin de determinar su localización con una precisión al menos 2 centímetros (0.020m). La resolución promedio de las fotografías de la fotogrametría son 10.53 cm/píxel por Rodríguez (2016), la resolución de está directamente relacionado al costo del proyecto. Es decir que a menor tamaño de cada píxel mayor será el costo de la fotogrametría.



Figura 41: Control fotogramétrico frente al Faro de Rincón (Fuente: Global Matrix Engineering)

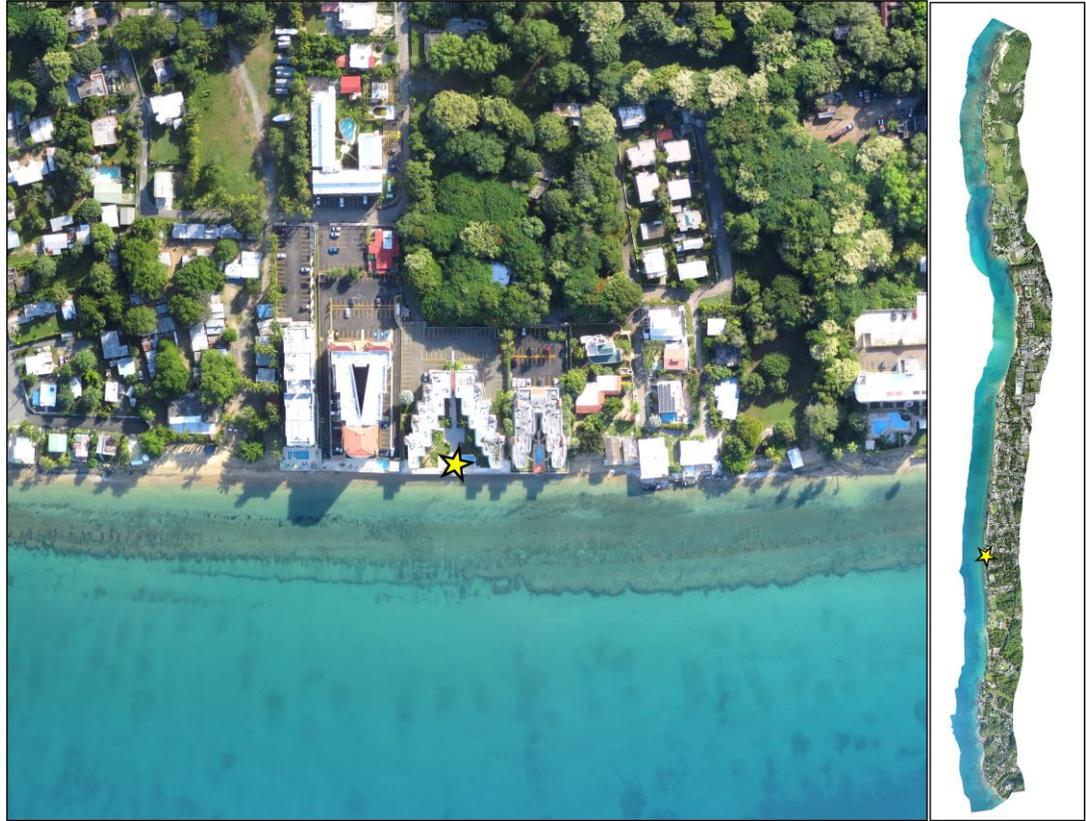


Figura 42: Orto mosaico del proyecto fotogramétrico, el trabajo fue realizado por la compañía Global Matrix Engineering. La estrella está localiza sobre el complejo de apartamentos Rincón Ocean Club 1.

APÉNDICE B. Pasos para el diseño de berma propuesta

1. Establecer la posición de la línea costera más reciente, la costa fue posicionada utilizando la técnica de fotointerpretación de la línea seco mojada de la orto fotografía preparada por la compañía Global Matrix Engineering (Rodríguez, 2016).
2. Establecer el límite de la berma propuesta, se delimitó basado en los criterios propuestos por Salas (2014) y Rojas (2016) de una berma de 35 metros. En las áreas donde la línea costera del 1936 (Thieler et al., 2007) se encuentra a menos de 35 metros de la línea costera del 2016 se utiliza la posición de la costa del 1936.
3. La berma propuesta se encuentra a 1 metro de elevación sobre el contorno de 0 metros y se extiende desde la posición de la línea costera del 2016 hasta el límite de la berma propuesta en el paso 2. El datum vertical en el que se encuentran todas las elevaciones presentadas es el Puerto Rico Vertical Datum del 2002 (PRV02).
4. Según determinado por Salas (2014) la profundidad de cierre basado en los datos granulométricos de Chardón (2012) es -2.5 m, en eventos de marejadas pudiera estar más profundo, es por esto que sugirió utilizar -3 m.
5. Para crear la berma entre la posición de la berma propuesta y la profundidad de cierre se utilizó la siguiente ecuación:
$$h = A * y^{2/3}$$
; donde h es la profundidad, A es función de la granulometría (0.129 m^{1/3}), y es la distancia desde el contorno de 0 metros. Para sobre estimar y compensar por posibles errores en los batimétricos se restó -0.31 metros a los datos de elevación. 0.31 metros es la diferencia estimada por Salas (2014) (se usaron los datos de los mareógrafos de Mayagüez y Aguadilla) entre MHW (mean high water) y MLW (mean low water).
6. El perfil propuesto presentado como original corresponde a la elevación resultante de la ecuación $h=A*y^{2/3}$ y el ajustado a los que se les restó los -0.31 metros para llevarlos de MLW a MHW (resultados conservadores).
7. Cómputo de volumen con la herramienta de ArcMap *Surface Difference*, corte y relleno entre la superficie de berma diseñada y la batimetría del 2016 por el USACE.