

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN

Alternativas de solución para la mitigación del fenómeno erosivo en Playa Salguero, Caribe colombiano

Solution Alternatives for the Mitigation of the Erosive Phenomena at Playa Salguero, Colombian Caribbean

DOI: <https://doi.org/10.26640/22159045.2025.650>

Fecha de recepción: 2024-10-10 / **Fecha de evaluación:** xxxxxxxx / **Fecha de aceptación:** 2025-09-26

Pablo Andrés Avendaño Castro¹, José Andrés Díaz Ruiz², Fernando Afanador Franco³

CITAR COMO:

Avendaño Castro, P. A., Díaz Ruiz, J. A. y Afanador Franco, F. (2025). Alternativas de solución para la mitigación del fenómeno erosivo en Playa Salguero, Caribe colombiano. *Boletín Científico CIOH*, 44(2), 25-41. <https://doi.org/10.26640/22159045.2025.650>.

RESUMEN

En promedio ha retrocedido 15.16 metros (1.17 m/año) la línea de costa en el balneario de Playa Salguero (sur de la bahía de Gaira, Magdalena, Caribe colombiano) entre 2008 y 2021, basado en un análisis multitemporal de línea de costa, el cual determinó que la misma se encuentra en estado de erosión. Esto es comprobado numéricamente determinando tasas de transporte de sedimento, tanto transversal (0.97 m³/m.l. por hora de tormenta) como longitudinal (orden de 97820 m³/año), en el sector más crítico de erosión, justificando líneas de actuación orientadas a mitigar la problemática. Se proponen configuraciones de diseño de dique exento y tómbolo de playa conformado de relleno hidráulico de sedimento compatible, que permite reducir la pérdida neta de sedimento, añadiendo resiliencia a la playa.

PALABRAS CLAVES: zona costera, hidrodinámica, erosión, sedimentación, protección costera.

ABSTRACT

Playa Salguero (south of Gaira Bay, Magdalena, Colombian Caribbean) coastline has experienced an average retreat of 15.16 meters (1.17m/year) between 2008 and 2021, based on a multitemporal shoreline analysis which determines its current erosion state. This is numerically proven by determining sediment transport rates, cross-shore (0.97m³/m.l. per hour of storm) as well as along-shore (order of 97820m³/year), at the most critical erosion sector, justifying some line of action orientated in mitigating the problematic. Offshore breakwater design configurations and beach tombolo conformed of hydraulic fill of compatible sediment are proposed, which allows to effectively reduce sediment net loss, adding resilience to the beach.

KEYWORDS: Coastal zones, hydrodynamics, erosion, sedimentation, coastal protection.

¹ Orcid: 0009-0007-0271-732X. Investigador. Correo electrónico: pavendancast@hotmail.com

² Orcid: 0009-0006-0681-0268. Subdirector de Marina Mercante. Dirección General Marítima. Correo electrónico: jefsubmerc@dimar.mil.co

³ Orcid: 0000-0003-4708-3280. Jefe de Sección Manejo Integrado de Zona Costera. Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH). Correo electrónico: Fernando.Afanador@dimar.mil.co



Publicado por la Dimar

INTRODUCCIÓN

La erosión costera es un fenómeno natural que supone el desequilibrio en el balance sedimentario de un litoral determinado; dependiendo de la incidencia e interacción de algunos factores como son el aumento relativo del nivel del mar, intervenciones antrópicas, eventos climáticos extremos, grado de exposición a la dinámica marina, entre otros. Las costas colombianas se encuentran, permanentemente, sometidas a la erosión costera, la cual puede variar teniendo en cuenta las características de los litorales en donde se observa el fenómeno (Dimar-CIOH, 2013); (Ricaurte-Villota *et al.*, 2018).

Desde la década de 1960, el departamento del Magdalena ha registrado un incremento sostenido en la urbanización de su zona costera, evidenciado hoy en edificaciones y complejos multifamiliares ubicados a menos de 10 metros de la línea de la más alta marea, o en contacto directo con esta en áreas críticas como Playa Salguero. Antes de los años 50 esta playa mantenía un equilibrio dinámico influenciado por procesos naturales de acumulación y erosión, con aporte sólido del río Gaira, dunas en el supralitoral con vegetación trasera y de playa, y libre transporte eólico y litoral (INVEMAR, 2021). Según Invemar y Corpamag (2015), entre 2014 y 2015 se evidenció un retroceso de 22 metros en la línea de costa, con significativa pérdida de la playa trasera. En 2023, mediante el Decreto 092 del 03 de abril, la alcaldesa del distrito de Santa Marta declaró calamidad pública por erosión costera en el sector, suspendiendo la expedición de nuevas licencias de construcción hasta atender y corregir la problemática (Decreto 092 del 03 de abril, 2023).

El fenómeno de la erosión costera presente en dicho litoral es abordado mediante un estudio técnico investigativo, para conocer puntualmente las causas que han llevado a la calamidad pública, y ofrecer alternativas de solución que lo mitiguen.

La problemática se aborda desde grande a pequeña escala, realizando la caracterización y diagnóstico de la zona de estudio, apoyada en registros tanto históricos como actuales, información primaria y secundaria de climatología marina, entre otras fuentes de información, para la conformación de un modelo digital de elevación

(MDE) representativo, que alimente unas etapas sucesivas de modelación numérica computacional. Se efectuó un análisis multitemporal de línea de costa en donde se analizaron los avances y retrocesos de la posición de esta desde el año 1944 hasta el 2021. Adicionalmente, se estimaron tasas de transporte litoral tanto longitudinal como transversal, que permitieron dimensionar la erosión costera y orientar las obras propuestas para contrarrestar la afectación del borde costero.

ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se encuentra en el litoral del departamento del Magdalena, el cual se extiende desde Bocas de Ceniza hasta la desembocadura del río Palomino, con 170 km de longitud. En concreto se estudia a detalle el sector de Playa Salguero (Fig. 1), ubicado entre la desembocadura del río Gaira (al norte) y las estribaciones del cerro La Gloria (al sur), abarcando 1640 metros de línea de costa. Cuenta con cuatro unidades geomorfológicas: 1) Playas con fuerte pendiente y arenas medias a gruesas; 2) Llanura costera al oeste, con un escarpe de 2 a 4 metros de altura que desciende hasta el límite con la playa y cuyo sedimento proviene, principalmente, del cerro La Gloria, con contribuciones de material del río Gaira; 3) Llanura aluvial de extensión baja en inmediaciones del curso del río Gaira hasta llegar al mar en donde se estrecha; 4) Lomas y colinas entre las cuales se destacan el cerro La Gloria, con alturas desde los 10 a 143 msnm y con pendientes superiores al 15 % (Dimar-CIOH, 2013).

A nivel regional se destaca la cercanía a la desembocadura del río Magdalena, a 68 km y al complejo lagunar costero más grande de Colombia, la ciénaga Grande de Santa Marta, a 20 km. La morfología del borde costero entre ambos elementos genera una forma parabólica hacia el este, que se vuelve rectilíneo en dirección al oeste. La Sierra Nevada de Santa Marta (pico máximo a 5700 msnm) toma un rol de regulador climático y condensador de agua, que alimenta los principales cauces que drenan hacia sus alrededores (por ejemplo, el río Gaira) y que desvía vientos que inciden sobre la misma, generando incluso flujo turbulento en épocas dominadas por los intensos vientos Alisios (Ingeominas/Ecopetrol ICP/Invemar, 2008). A su vez, las rocosas costas del

macizo montañoso incluyen rocas ígneas y metamórficas, altamente resistentes a la acción del oleaje, albergando ensenadas protegidas (Dimar-CIOH, 2013).

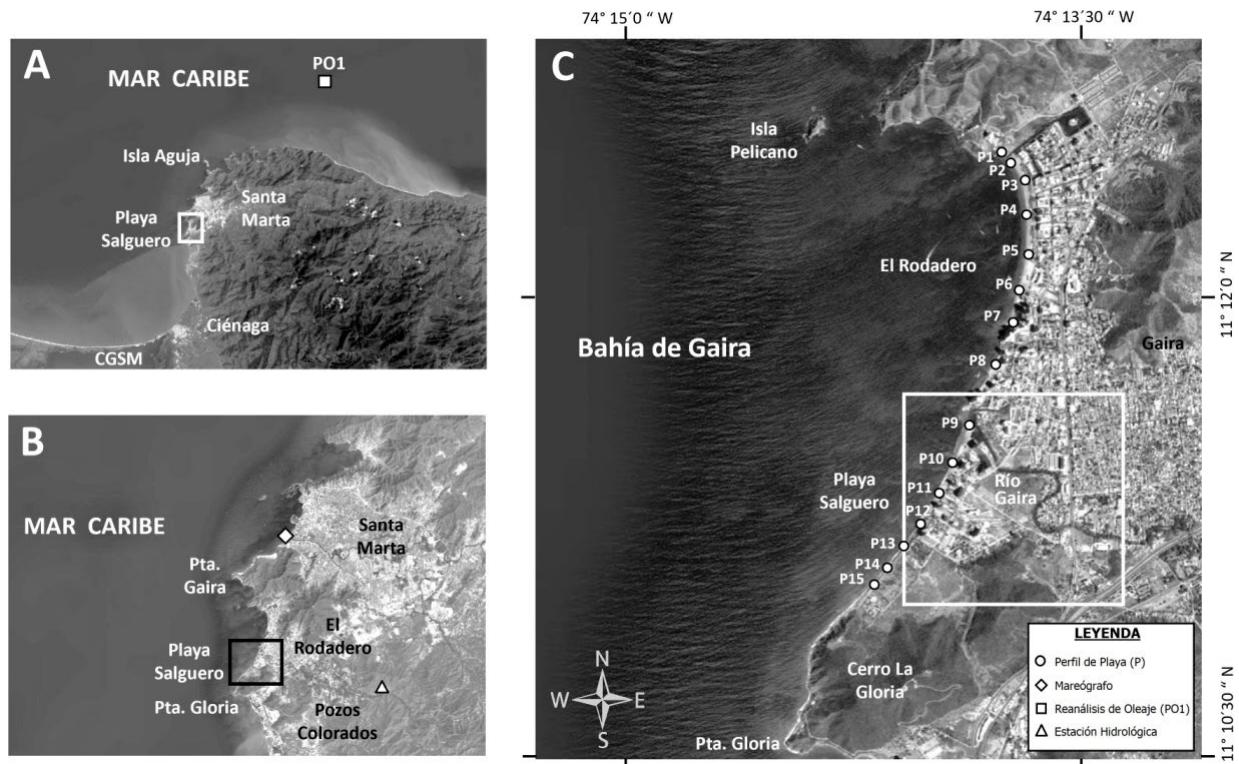


Figura 1. Localización regional (A), local (B) y detallada (C) del área de estudio.

En la escala local se observan los distanciamientos de Playa Salguero respecto a algunas zonas de interés como son el Distrito Turístico, Cultural e Histórico de Santa Marta a 5 km al norte, lugar donde se encuentra la estación mareográfica (Fig. 1) que provee datos a la investigación. Por otra parte, a 14 km al norte de la zona de estudio se tiene también la isla de la Aguja, primer punto de difracción importante del oleaje en su propagación hacia Playa Salguero. Es en dicho punto donde el oleaje experimenta buena parte de su transformación, al aproximarse al promontorio rocoso sobre el mar Caribe, separado aproximadamente 600 m del continente.

A medida que el oleaje continúa su tránsito por el mar Caribe, superado el obstáculo de isla de la Aguja, este interactúa con tres bahías (Taganga, Santa Marta e Inca), antes de llegar a bahía de Gaira, donde se ubica el balneario de Playa Salguero. Es importante considerar el efecto de estas bahías, ya que el oleaje incidente

se refracta hacia cada una de ellas, en lo que consiste otro proceso de transformación del oleaje, disminuyendo su energía. En su tránsito por dicha zona, el oleaje también tiene que afrontar nuevos elementos morfológicos que generan difracción, como son: isla El Morro y punta Betín (bahía de Santa Marta), punta de Gaira e isla Pelícano, estas últimas en inmediaciones de la bahía de Gaira. Por su parte, la bahía de Gaira se divide en dos balnearios, separados por la desembocadura del río Gaira: El Rodadero al norte y Playa Salguero al sur.

METODOLOGÍA

La investigación busca comprender, con la ayuda de herramientas de modelación numérica, el comportamiento morfodinámico de la zona de estudio y proponer alternativas de solución técnicamente sustentadas para mitigar el fenómeno de la erosión que se registra. Para lograr lo anterior se recurrió a distintas fuentes de

información, tanto primarias como secundarias (Tabla 1). La información primaria recopilada por instrumentos o sensores remotos, tanto *in situ* como a distancia (por ejemplo, levantamientos topo batimétricos, muestreos, imágenes de satélite, sobrevuelos), fue utilizada para la creación del MDE. Los sondajes batimétricos del fondo

marino y datos topobatimétricos en playa fueron levantados por el Servicio Hidrográfico Nacional (SHN) y la Sección Manejo Integrado de Zona Costera (Smizc), ambas dependencias orgánicas del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH).

Tabla 1. Relación de fuentes de información obtenidas.

Tipo de dato / parámetro	Fuente	Descripción	Ubicación
Batimetría regional	CIOH-SHN	Compilado batimétrico de sondajes históricos.	Departamento del Magdalena: mar territorial y mar interior
Batimetría local	CIOH-SHN	Levantamiento batimétrico monohaz actualizado a septiembre 2021, transectos cada 30 m.	Sector: Playa Salguero, ~500 m offshore
Topografía de playa y línea de costa	CIOH-Smizc	Levantamiento de 15 perfiles de playa y 2 km de línea de costa de referencia a noviembre de 2021.	Borde costero de balnearios El Rodadero y Playa Salguero
Granulometrías de playa	CIOH-Smizc	Toma de 14 muestras granulométricas (meso/infra - litoral)	Borde costero de balnearios El Rodadero y Playa Salguero
Fotografías aéreas históricas	IGAC	Años: 1944 (R-211), 1954 (M-15), 1985 (C-2228), 1987 (C-2289), 1991 (C-2451), 2004 (C-2721)	Bahía de Gaira
Ortofoto-mosaicos	Dimar	Años: 2008, 2021 (resolución espacial 25 y 15 cm, respectivamente)	Bahía de Gaira
Reanálisis de oleaje en aguas profundas (NOAA-WWIII)	NOAA-WWIII	Información secundaria. Altura de ola significante (H_s), periodo pico (T_p) y dirección media de oleaje (θ), [1979-2018], resolución trihoraria.	PO1 [Lat: 11.5000°, Lon: -74.0000°]
Registro de nivel del mar	UHSLC	Nivel del mar preprocesado [2012-2021], resolución horaria	Egsam [Lat: 11.2351°, Lon: -74.2215°]
Registro de estación hidrológica	Ideam	Estación Gaira [15017010]. Caudales medios diarios [1980].	Gaira [Lat: 11.1833°, Lon: -74.1833°]

Nota: Estación de Guardacostas de Santa Marta (Egsam). Instituto Geográfico "Agustín Codazzi" (IGAC). Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA) - WAVEWATCH III (WWIII). Centro del Nivel del Mar de la Universidad de Hawái (UHSLC). Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam).

El compilado batimétrico de sondajes históricos en la zona marina del departamento del Magdalena cuenta con un sondaje multihaz de 2009, que por completo cubre la bahía de Gaira, y más próximo a la zona marina en frente de Playa Salguero, un levantamiento monohaz realizado en 2021 (septiembre).

Para la interfase costera y zona terrestre se realizó, durante noviembre de 2021, el levantamiento de 15 perfiles de playa (cubriendo supralitoral, mesolitoral e infralitoral hasta el veril de 1 m), separados cada 200 m, de forma que cubrieran los balnearios de El Rodadero y Playa Salguero. La línea de costa levantada, con puntos

cada 10 m, abarcó desde el norte del balneario de El Rodadero hasta el sur de Playa Salguero, y sirve para tener referencias verticales a lo largo de todo el borde costero, independientemente del nivel del mar que hubiese en el momento. Se utilizó el ortofoto-mosaico de la zona producido por la Dimar, correspondiente a 2021 y otras imágenes satelitales para digitalizar, ajustar y llenar vacíos de información en la línea de costa, sirviendo este producto como referencia de la misma. Adicionalmente, se tomaron 14 muestras de sedimento sobre los perfiles de playa 1, 4, 7, 9, 11, 13 y 15, una muestra sobre el mesolitoral (línea de costa) y la otra en infralitoral (zona sumergida), los cuales fueron un insumo importante para los cálculos morfodinámicos, a los cuales les fueron realizados ensayos granulométricos por el método de tamizaje en el CIOH.

Otras imágenes de referencia, como lo son sobrevuelos históricos del IGAC y el ortofoto-mosaico de la Dimar de 2008, sirvieron para la elaboración de un diagnóstico y análisis multitemporal de la línea de costa desde 1944 hasta 2021. Para este análisis se utilizó la herramienta *Digital Shoreline Analysis Software (DSAS)* (Himmelstoss *et al.*, 2018) implementada dentro de la plataforma ArcGIS que formó parte integral del diagnóstico de la zona de estudio.

El dominio batimétrico del MDE generado cubrió la zona costa afuera, donde se ubicó el punto de reanálisis de oleaje obtenido (PO1) a 34 km en línea recta desde Playa Salguero, en aguas profundas (935 m). Dicho punto provino del modelo WAVEWATCHIII de la NOAA (WW3DG, 2019), conformando una serie de 39

años de datos trihorarios de oleaje significante y otros parámetros asociados. Se implementó el uso del software de Análisis Matemático y Estadístico de Variables Ambientales (Ameva) (Castellanos *et al.*, 2015) para realizar el análisis estadístico descriptivo de los datos, obteniendo regímenes medios, extremos, análisis direccional y estacional; también fue utilizado para analizar la variable asociada al nivel del mar.

El modelado del terreno se referenció verticalmente de manera que el valor cero fuera igual al nivel *Mean Low Water Springs (MLWS)* o promedio entre dos bajamares de sicigia sucesivas a lo largo del año. Se obtuvo el registro de nivel del mar del mareógrafo de Santa Marta, con nueve años de datos, preprocesados, validados y entregados como producto para investigación por la UHSLC (Caldwell *et al.*, 2015). A este registro se le realizó un análisis y descomposición de sus componentes armónicos que permitió obtener los rangos tanto de marea astronómica como meteorológica necesarios para la modelación mediante la herramienta libre *T_Tide Harmonic Analysis Toolbox* (Pawlowicz *et al.*, 2002). Es de notar que si bien el registro de nivel el mar y, por lo tanto, su componente meteorológico cuenta apenas con nueve años de datos, ha captado huracanes importantes como Matthew, a finales de septiembre de 2016.

La recopilación de información fue utilizada para construir el diagnóstico y caracterización base de la zona de estudio, de manera que quedara planteado el problema y la ruta a seguir para establecer alguna línea de solución, por tanto, se presenta el siguiente esquema metodológico (Fig. 2):

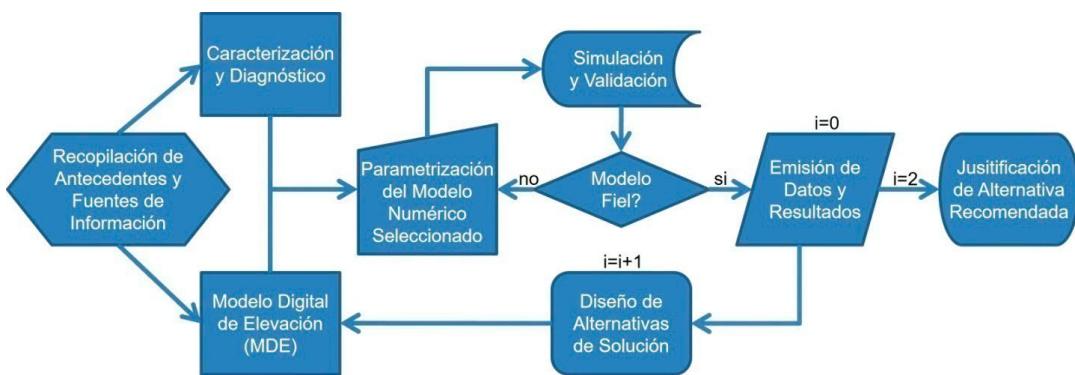


Figura 2. Esquema metodológico. El índice 'i' es un contador de alternativas de solución.

La modelación computacional brinda herramientas basadas en formulaciones empíricas y derivadas que apoyan el diseño en ingeniería costera y portuaria al reproducir procesos hidrodinámicos y morfodinámicos. Para este estudio se utilizó el Sistema de Modelado Costero (SMC), desarrollado en España (GIOC y DGCM, 2002), compuesto por varios módulos y modelos, entre ellos: 1) OLUCA-SP, modelo espectral no dispersivo frecuencialmente, que simula la propagación del oleaje desde aguas profundas hasta la costa, incluyendo refracción, difracción e interacción oleaje-corriente bajo una aproximación parabólica para los componentes de energía (O'Reilly y Guza, 1991); (Kirby, 1986). 2) COPLA-SP, modelo bidimensional que calcula corrientes de rotura, resolviendo ecuaciones de

flujo basadas en Navier-Stokes, promediando la velocidad vertical por cada celda del enmallado. Ambos modelos operan de forma acoplada, usando los datos de salida de OLUCA-SP como entrada para COPLA-SP.

Además del MDE, se definieron mallas de cálculo para simular la propagación del oleaje sobre el dominio topobatimétrico y caracterizar la dinámica marina (oleaje y corrientes). Se utilizó un espectro TMA (Bouws *et al.*, 1985) derivado del JONSWAP, modificado para aguas someras, con disipación por rotura, según Winyu y Tomoya (1998). El modelo incluía ajustes por recomendación para simular corrientes, como rugosidad de fondo (coeficiente de Chézy) y viscosidad de remolino en zonas de rompientes.

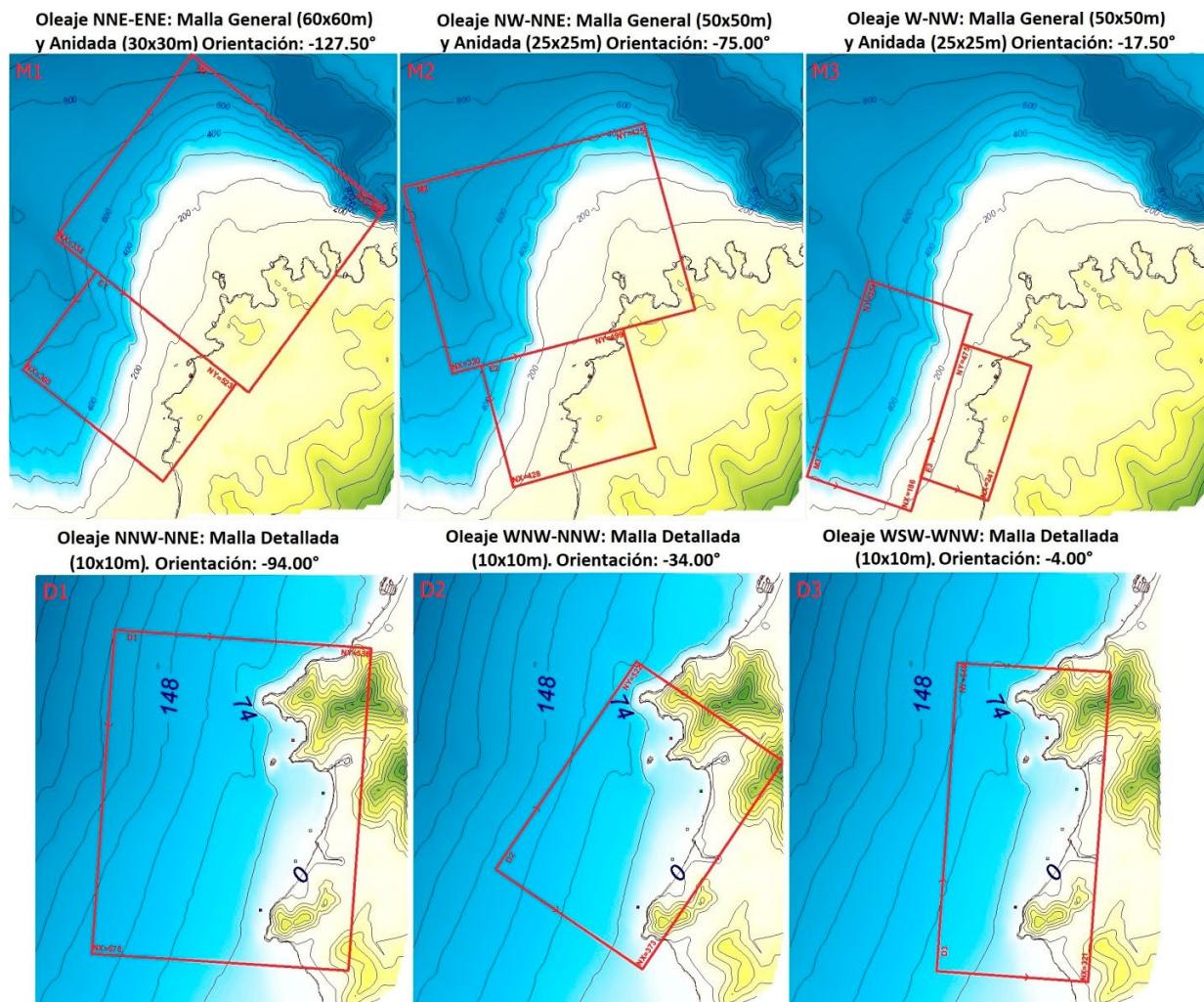


Figura 3. Mallas gruesas (superior) y detalladas (inferior) sobre el MDE. Extraídas de SMC-MOPLA.

La propagación del oleaje desde el punto de reanálisis hasta la bahía de Gaira se realizó mediante tres mallas gruesas (celdas de 60x60m), cada una con una malla anidada de mayor resolución (celdas de 30x30m), sobre el MDE (Fig. 3, superior), reconstruyendo la serie de oleaje en dos puntos objetivo (Lat. 11.2297°, Lon. -74.2471° y Lat. 11.2009°, Lon. 74.2523°) mediante la herramienta Hipercubo-MaxDiss (IHCantabria, 2013), basada en el método de downscaling y el algoritmo de máxima disimilitud (Camus, *et al.*, 2011a); (Camus *et al.*, 2011b).

Posteriormente, se generaron tres mallas adicionales (D1, D2 y D3) con resolución de celdas de 10x10m (Fig. 3, inferior), alineadas en su borde externo con los puntos objetivo reconstruidos, lo que permitió optimizar el gasto computacional y mejorar el detalle de los

resultados hidrodinámicos y morfodinámicos en la costa.

Con estas mallas se propagaron 16 casos de oleaje espectral representativos, de acuerdo con la reconstrucción de clima marítimo efectuado (Tabla 2) con el propósito de producir mapas de isoaltura de ola significante y vectores de corrientes. De acuerdo con la caracterización del oleaje en los puntos objetivo que bordean la bahía de Gaira, los oleajes noreste (NNE) y norte (N) reunieron 18.68 y 78.07 % de las ocurrencias, respectivamente, por ello se dedican 8 de los 16 casos a su estudio; mientras que las direccionalidades noroeste (NW) y oeste (W), aunque son de baja frecuencia (1.5 y 0.5 %, respectivamente), presentan oleajes extremos significativos, que además inciden más directamente sobre las playas al recibir menor transformación.

Tabla 2. Casos de propagación de oleaje a la costa.

Casos de oleaje espectral								
	Dirección	# Caso	Hs (m)	Tp (s)	Fr (Hz)	Gamma (γ)	Sigma (σ)	Carrera de marea (m)
Malla D1	NNE	Caso 01	1.01 *	10.0	0.100	3.3	20.0	0.31
		Caso 02	2.00 **	11.0	0.091	10.0	10.0	0.31
		Caso 03	3.01 ***	12.0	0.083	10.0	10.0	0.00
		Caso 04	3.01 ***	12.0	0.083	10.0	10.0	0.63
	N	Caso 05	0.89 *	10.0	0.100	3.3	20.0	0.31
		Caso 06	1.85 **	10.0	0.100	10.0	10.0	0.31
		Caso 07	3.10 ***	12.0	0.083	10.0	10.0	0.00
		Caso 08	3.10 ***	12.0	0.083	10.0	10.0	0.63
Malla D2	NW	Caso 09	1.46 *	10.0	0.100	3.3	20.0	0.31
		Caso 10	2.52 **	11.0	0.091	10.0	10.0	0.31
		Caso 11	3.19 ***	12.0	0.083	10.0	10.0	0.00
		Caso 12	3.19 ***	12.0	0.083	10.0	10.0	0.63
Malla D3	W	Caso 13	1.03 *	10.0	0.100	3.3	20.0	0.31
		Caso 14	1.93 **	10.5	0.095	10.0	10.0	0.31
		Caso 15	3.19 ***	12.0	0.083	10.0	10.0	0.00
		Caso 16	3.19 ***	12.0	0.083	10.0	10.0	0.63

* Corresponde a oleajes de régimen medio (Hs50 %)

** Corresponde a oleajes extremos anuales (Hs12)

*** Corresponde a oleajes extremos (TR=100 años, Función Peak Over Threshold)

Nota: los niveles de marea corresponden a valor mínimo, medio y máximo del análisis de la distribución de datos del componente astronómico de marea efectuado. Gamma y Sigma (γ , σ) corresponden a dispersión frecuencial y direccional, respectivamente.

Para establecer un correcto análisis de largo plazo en materia de dinámica litoral se aplicó la técnica de *downscaling*, para obtener resultados de clima marítimo en materia de oleaje y corrientes en proximidad al borde costero, de tal manera que estos pudieran servir de insumo para la realización de los cálculos morfodinámicos. Dicho análisis partió de las aproximaciones de perfil y planta de equilibrio en medio y largo plazo, utilizando el módulo Análisis a Largo Plazo de Playas de SMC, sectorizando la playa en cuatro zonas, cada una con un perfil representativo. Al final se obtuvieron resultados de transporte litoral longitudinal neto, representativos de las condiciones medias de 39 años de oleaje, según los datos.

Cada perfil se parametrizó según el ajuste a la fórmula de Dean (1977), ecuación 1, que establece la relación entre la profundidad (h) y la posición respecto a la línea de costa (x), mediante un parámetro de forma (A) que es función de la granulometría (w : velocidad de caída de grano) y solo válida hasta la profundidad de cierre; y un coeficiente adimensional k , el cual se calibra de acuerdo al sitio. La velocidad de caída de grano fue calculada de acuerdo con la formulación de Hallermeier (1978), ecuación 2, tomando como información de entrada el oleaje extremo anual, H_{s12} (oleaje igualado o excedido 12 horas al año), periodo pico asociado en cercanías de la costa (T_s), y la aceleración debido a la gravedad (g). El análisis de planta de equilibrio permitió a su vez obtener las orientaciones de cada sector de playa y flujo medio de energía, datos que también alimentaron el modelo morfodinámico.

$$h = Ax^{\frac{2}{3}}; \quad A = k\omega^{0.44} \quad [1]$$

$$h^* = 2.28H_{s12} - 68.5 \left(\frac{H_{s12}^2}{gT_{s2}^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad [2]$$

Tabla 3. Fuentes de información y datos de hidrosedimentología del río Gaira.

Fuente	Área de cuenca	Precipitación media anual (mm)	Caudal promedio (m ³ /s)	Caudal sólido (x10 ⁴ t/año)	Rendimiento (t/km ² ·año)	Periodo
Restrepo y Kjerfve (2004)	30 km ²	850	2.56	0.14	42	1978-1993
Estación Ideam - Gaira [15017010]	-	-	0.65	-	-	1980

Para obtener tasas de transporte longitudinal de sedimentos se implementó el método de flujo de energía (CERC, 1984), ecuación 3, conociendo la altura de ola en rotura (H_b), ángulo de oleaje en rotura (θ_b), densidades de agua y sedimento (ρ_w, ρ_s , respectivamente), aceleración debido a la gravedad (g), porosidad (p), índice de rotura (λ_b) y un coeficiente empírico de proporcionalidad (K). Para el cálculo de las características del oleaje en rotura se utilizó el código programado por Gabriel Díaz, modificado por Soledad Requejo Landeria (2011) del Instituto de Hidráulica de Cantabria.

$$Q = \frac{k\rho_w g^{\frac{1}{2}}}{16(\rho_s - \rho_w)(1-p)\sqrt{\lambda_b}} H_b^{\frac{5}{2}} \sin\left(2\theta_b\right)^{\frac{1}{2}} \quad [3]$$

Se realizó adicionalmente análisis de corto plazo con el *Modelo de Evolución del Perfil Transversal de Playa* (GIOC, 2001), módulo contenido dentro de SMC. Se diseñó para cada perfil de equilibrio analizado un caso de tormenta representativo, de acuerdo con la reconstrucción del clima marítimo e información derivada del registro de nivel del mar, obteniendo un estimado del transporte transversal al litoral, el cual representó las pérdidas por erosión en corto plazo debido a eventos singulares, tales como tormentas o huracanes. El modelo de propagación empleado por la herramienta fue el recomendado por la misma Thornton y Guza (1983), mientras que, para la estimación de la corriente transversal de fondo, o *undertow*, se utilizó De Vriend y Stive (1987).

En cuanto al aporte sólido proveniente del río Gaira al sistema se utilizó el valor promedio reportado por Restrepo y Kjerfve (2004) de 0.14 x10⁴ t/año (Tabla 3). Asumiendo una densidad de arena de 1500 kg/m³ se deduce un transporte sólido volumétrico anual de 933 m³/año.

Finalmente, para el diseño de alternativas de solución se analizó toda la información previamente mencionada y se elaboraron en SMC. Se aplicaron los conceptos de playa en equilibrio estático y forma en planta parabólica de Hsu y Evans (1989) para bahías naturales y artificiales, y su uso extendido para playas con forma de tóbolo (González y Raúl, 2001), estos ya implementados dentro del software. Las alternativas fueron comprobadas con estados de mar representativos, obtenidos mediante el análisis de propagación de oleaje hacia la zona de estudio. Posteriormente, fueron justificadas y contrastadas de acuerdo con unos criterios funcionales y de diseño mediante técnica de juicio de expertos dentro del CIOH-Smizc.

RESULTADOS

Partiendo del análisis multitemporal de línea de costa efectuado (Fig. 4) entre los años 1944 y 2021 se encontró que el movimiento neto de

Línea de costa fue positivo (acreción), con valor promedio de 3.05 m en todo el litoral de la bahía de Gaira, en general, pero negativo (erosión), con valor promedio de -7.43 m al sur del río Gaira (Playa Salguero).

Se demostró, mediante las imágenes de referencia más antiguas (1944 y 1954) y en relación con la situación actual, que no hay mucha diferencia en posición de línea de costa en general. Se determinó que entre los años 2008 y 202 hubo retroceso de línea de costa en el 98.48 % de los transectos analizados en Playa Salguero, con retroceso máximo de 29.13 m (-2.24 m/año) en la desembocadura del río, zona que presenta mayor variación históricamente. En el mismo periodo de tiempo se destacó que el movimiento neto de línea de costa promedio en Playa Salguero fue de -15.16 m (tasa promedio de -1.17 m/año), indicando el estado actual de erosión que se presenta de acuerdo con el historial de líneas de costa analizadas.

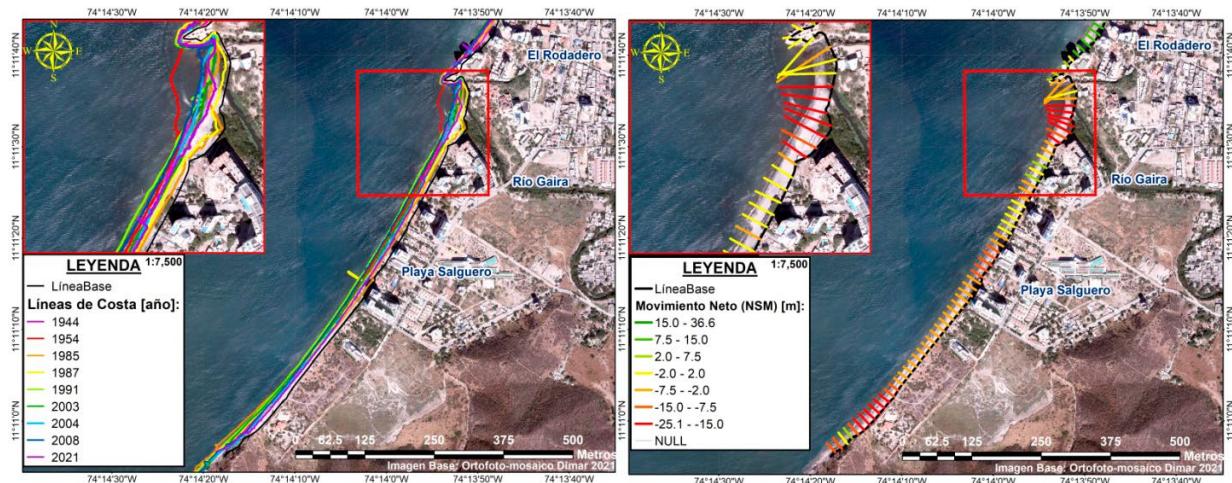


Figura 4. Superposición (superior) y movimiento neto (inferior) de líneas de costa.

Se obtuvieron mapas de isoaltura de ola significante y de vectores de corrientes asociados para cada caso de oleaje espectral presentado en la Tabla 2. En régimen medio y extremo los oleajes provenientes del nornoreste y norte (casos 01-08) presentan una dinámica marina baja, con altura de oleaje significante y corrientes de rotura inferiores a 1 m y 0.10 m/s, respectivamente, en el borde costero de la bahía de Gaira. Lo anterior cobra sentido al ser una bahía protegida naturalmente de estos oleajes,

según su dirección de procedencia, y por la geomorfología y disposición de sus costas. Estas direccionalidades son representativas de régimen medio durante cualquier año, reuniendo el 96.75 % de las ocurrencias del oleaje, aproximadamente. También se analizó la hidrodinámica costera del porcentaje de ocurrencias restante, correspondiente a los oleajes provenientes del noroeste y oeste. La Fig. 5 presenta mapas representativos y ampliados para régimen medio y extremo (casos 05, 10 y 14).

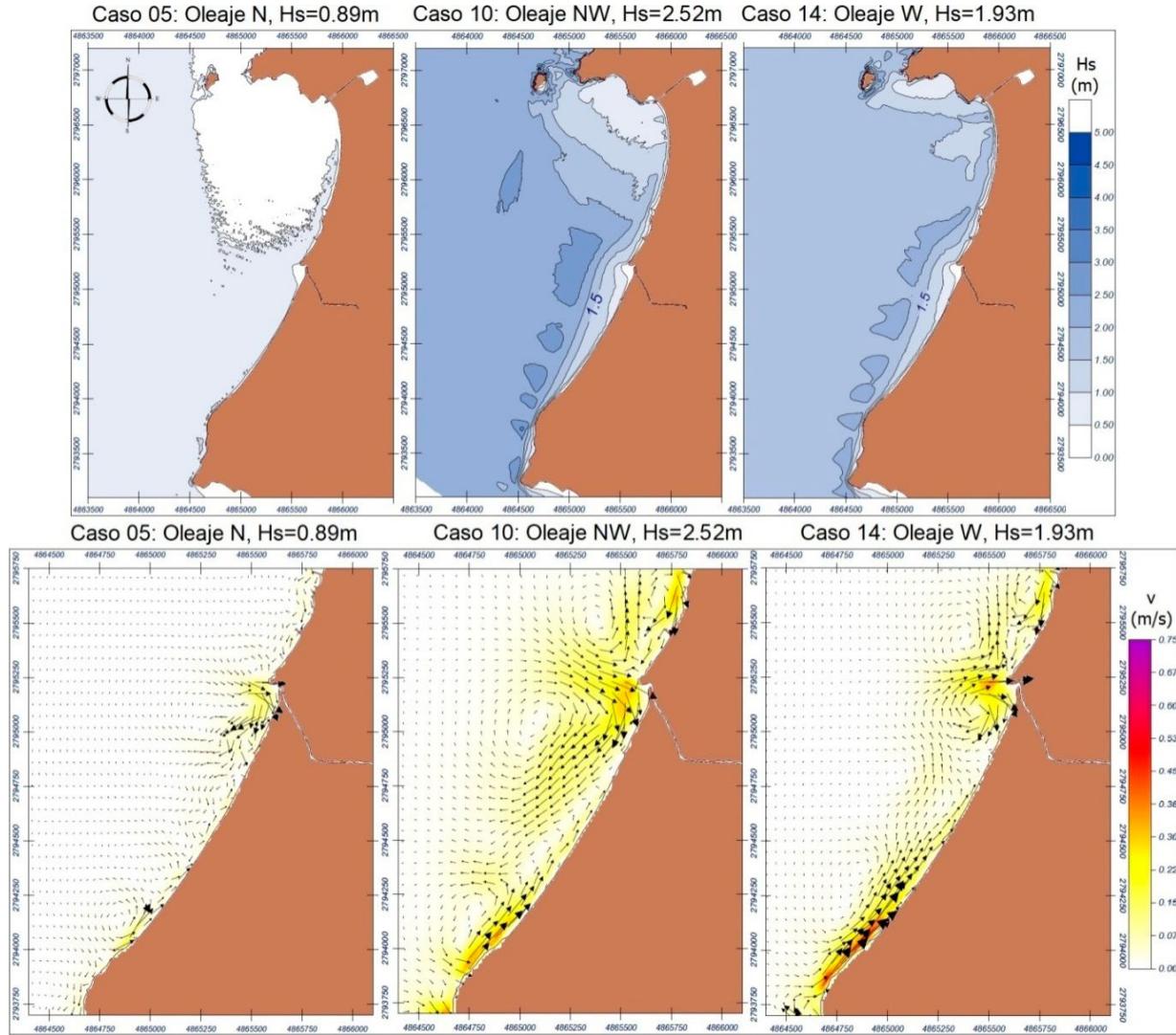


Figura 5. Régimen medio (Caso 05), régimen extremo anual del noroeste (Caso 10) y del oeste (Caso 14), con sistemas circulatorios asociados en gráficos inferiores. Mapas generados con SMC-MOPLA.

La caracterización del clima marítimo del borde costero de Playa Salguero permitió su sectorización y parametrización, aplicando conceptos de perfil y planta de equilibrio (Tabla 4). El perfil de equilibrio 1 (PE1) se incluyó para representar la playa al norte de la desembocadura del río Gaira (Rodadero), mientras que PE2, PE3 y

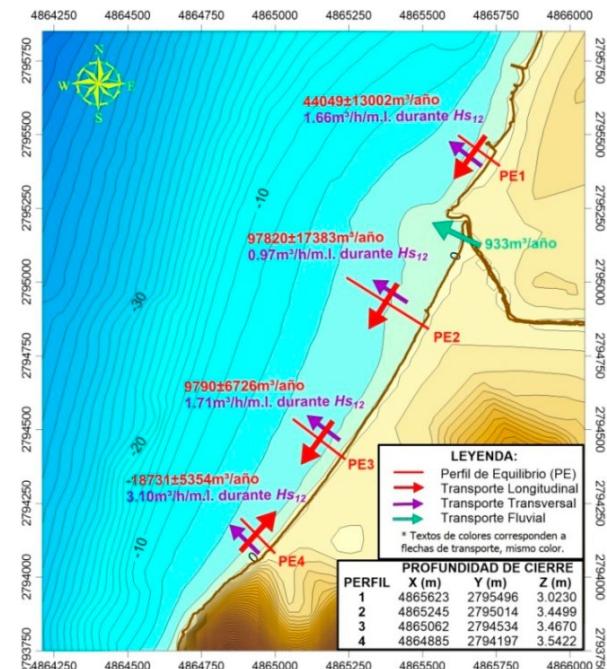
PE4 se localizaron en Playa Salguero. Se identificó y calculó la dirección de procedencia del frente de oleaje incidente a la playa, ángulo de orientación, tipo de rotura del oleaje o parámetro de Iribarren (1949), entre otros datos y parametrizaciones para cada sector.

Tabla 4. Parametrización por sectores de acuerdo con perfil y planta de equilibrio.

	PE1	PE2	PE3	PE4
Hs_{12} [m]	1.40	1.60	1.62	1.65
Ts_{12} [s]	9.00	9.50	9.20	9.30
h^* (Birkemeier) [m]	2.31	2.63	2.64	2.70
h^* (Hallermeier) [m]	3.02	3.45	3.47	3.54
Distancia LC-h^* [m]	123.00	300.00	200.00	104.00
m [°], (m[%])	1.41 (2.46)	0.66 (1.15)	0.99 (1.74)	1.95 (3.40)
D_{50}, (D_{90}) [mm]	0.165 (0.369)	0.166 (0.437)	0.226 (0.449)	0.231 (0.464)
ω[m/s]	0.019	0.019	0.027	0.027
A [$m^{1/3}$]	-	0.077	0.101	0.144
k	-	0.440	0.500	0.700
Frente de oleaje	N52W	N61W	N56W	N48W
θ de playa [°]	218	209	214	222
I_{rb} [%](tipo rotura)	95 (<i>plunging</i>)	99 (<i>spilling</i>)	91 (<i>spilling</i>)	55 (<i>plunging</i>)

Se presenta en la Fig. 6 la sectorización de la zona de estudio, donde se apreciar la ubicación en planta de cada perfil de equilibrio (líneas rojas perpendiculares a la costa). Adicionalmente, se observa en la misma el modelo morfodinámico de funcionamiento de Playa Salguero, el cual asocia valores de órdenes de magnitud relacionados al transporte de sedimentos longitudinal con flechas rojas (deriva litoral), transversal con flechas moradas (pérdidas debido a episodios de tormenta) y aporte fluvial (flecha verde), culminando así la línea base del estudio. De todos los perfiles de equilibrio analizados llama la atención la alta tasa registrada de transporte longitudinal sobre PE2 (97820 m³/año), resultando ser el sitio con mayor grado de erosión. En dirección transversal a la costa es notorio el transporte reportado por PE4 y PE3 (3.10 y 1.71 m³/h/metro lineal de playa, respectivamente).

Se plantearon dos alternativas de solución (1 y 2) de dique exento tipo rompeolas, con relleno de playa en forma de tómbolo (164 818 m³ y 210 363 m³ de arena, respectivamente), conformado por sedimento similar al nativo (D_{50} , color y calidad ambiental). La alternativa 0 (no intervención) es la situación de control para establecer el análisis comparativo con respecto las propuestas (Fig. 7).

**Figura 6.** Sectorización y modelo morfodinámico de funcionamiento de Playa Salguero.

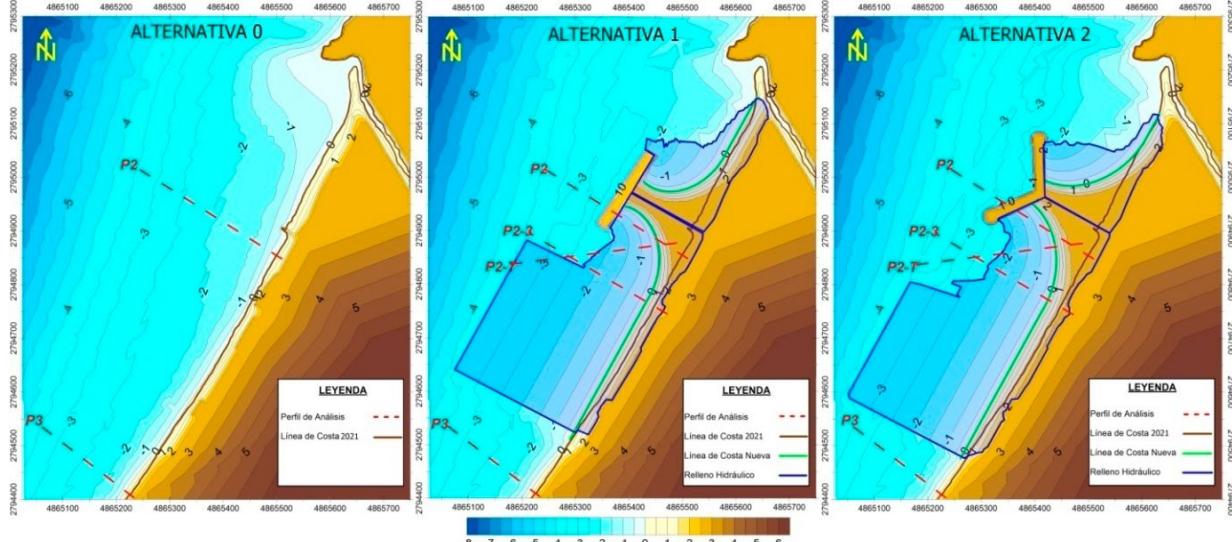


Figura 7. Alternativas de solución propuestas.

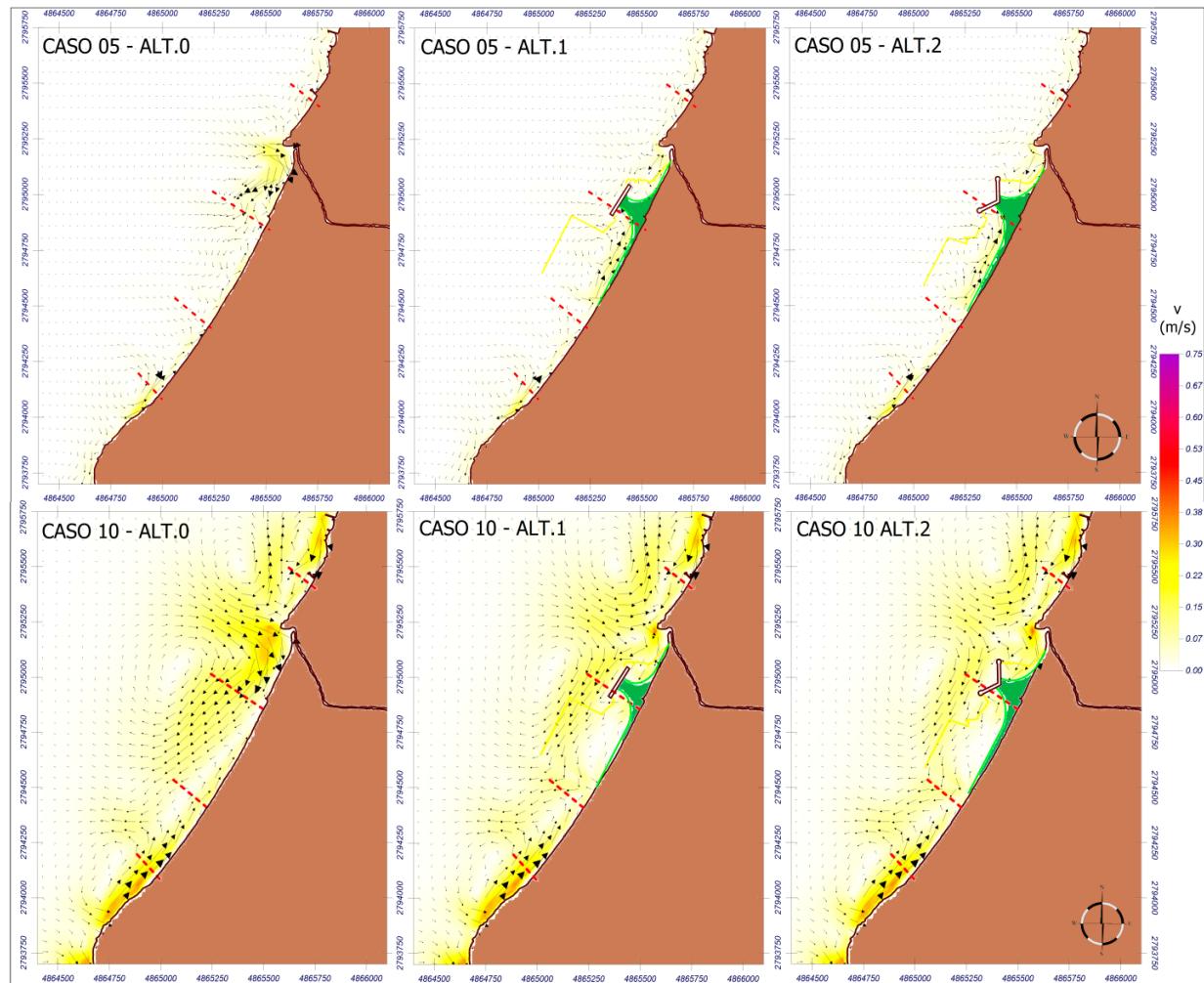


Figura 8. Comprobación hidrodinámica de alternativas de solución respecto a casos los 05 y 10.

Las alternativas de solución son comprobadas hidrodinámicamente de acuerdo con los casos de la Tabla 2. Se presentaron los resultados de vectores de corrientes correspondientes al caso 05, que bien representó el régimen medio de los datos, y el caso 10, el cual representó un evento extremo de periodicidad anual considerable (Fig. 8). Ambos casos coincidieron con la presencia de una corriente longitudinal que bordea la costa de norte a sur entre el río Gaira y el perfil de equilibrio 2 para la situación de control. En el caso extremo se observa como esta corriente adquiere coloración naranja, representativa de magnitudes entre 0.30 - 0.38 m/s, mientras que para el caso de régimen medio este valor se encuentra en torno a 0.07 0.15 m/s.

Las alternativas de solución (1 y 2) buscaron obstaculizar este flujo, imponiendo la estructura de tóbolo sobre su trayectoria, por consiguiente, reduciendo su intensidad y recorrido. Se observa que esto fue logrado, y en el caso del régimen medio incluso se observa una corriente que bordea la costa de sur a norte hacia el perfil de equilibrio 2 (sector del tóbolo) y tiene la capacidad de retornar sedimento al sitio en erosión.

DISCUSIÓN

El análisis multitemporal de línea de costa evidenció tasas de retroceso que confirman la erosión en Playa Salguero, en contraste con la estabilidad observada en el sector norte (balneario El Rodadero). La escasa variación del litoral entre 1944 y la actualidad sugiere un equilibrio dinámico en las playas, con retrocesos no severos.

El estudio se basó en fotografías aéreas históricas del IGAC y ortofoto-mosaicos de la Dimar (Tabla 1), que además permitieron identificar el avance urbanístico hacia el litoral. Los sobrevuelos R-211 (1944) y M-15 (1954) mostraron ausencia de urbanización (el poblado de Gaira, situado a 800 m) y presencia de dunas y su vegetación asociada (INVEMAR, 2021), mientras que desde los vuelos C-2228 (1985), C-2289 (1987) y C-2451 (1991) se observaron edificaciones a 10 y 30 metros de la costa, y un espolón en Playa Salguero. El vuelo C-2721 (2004) reveló cuatro estructuras ortogonales al norte de la boca del río Gaira, y en la ortofoto de la Dimar (2021) se identificó un gran complejo habitacional justo al sur de la misma desembocadura, y un nuevo

espolón un poco más al sur. Estas evidencias oficiales reflejan un impacto por estrangulamiento costero y construcción sobre dunas, producto de la acelerada urbanización.

La selección de casos de oleaje espectral (Tabla 2) se fundamentó en el análisis estadístico de 116881 estados de mar direccionales entre 1979 y 2018, reducidos mediante *downscaling* a 224 estados representativos (0.2 %), optimizando tiempos y recursos computacionales.

Aunque los oleajes del noroeste y oeste representan solo el 3 % de ocurrencia anual, son críticos en diseño por su alta energía y escasa transformación en aguas someras. La circulación litoral en régimen medio y extremo mostró flujo predominante de norte a sur, especialmente cerca de la desembocadura del río Gaira, que se modifica por una contracorriente de sur a norte desde Punta Gloria, la cual cizalla con la predominante, redirigiendo el flujo en sentido offshore durante eventos extremos como tormentas tropicales y huracanes, retornando sedimento.

El perfil de equilibrio PE2 registró un transporte litoral longitudinal elevado (97820 m³/año), explicando la erosión en ese sector y siendo el más largo a su vez (300 m hasta la profundidad de cierre). Se diseñaron dos alternativas para mitigar la tendencia circulatoria norte-sur: la primera consiste de un dique exento recto y paralelo a la costa, mientras que la segunda se conforma de una estructura similar, con forma de V, para restringir aún más las corrientes longitudinales. Ambas cuentan con un relleno hidráulico de playa en forma de tóbolo con sedimento compatible. La selección se realizó mediante una tabla de criterios (Tabla 5), elaborada a través de la técnica de juicio de expertos dentro de CIOH-Smizc, cuantificando la viabilidad de cada opción.

Con relación al requerimiento de adaptación al cambio climático se tomó como referencia la diferencia de valores esperados de ascenso del nivel del mar para las décadas 2020-2040 (percentil de 5 %) en la estación más cercana que cuenta con datos (Cartagena, PSMSL ID 572), vía la Trayectoria Representativa de Concentración 8.5 o SSP5-8.5 (IPCC, 2014), equivalente a 0.116 m (Fox-Kemper *et al.*, 2021); (Kopp *et al.*, 2023); (Garner *et al.*, 2021). La anterior referencia se incluyó para que el diseño final de solución

contemple y asimile la magnitud del ascenso relativo del nivel del mar en la zona para el medio plazo.

Otros valores tenidos en cuenta para el nivel de referencia vertical fueron obtenidos directamente de datos de la presente investigación: oleaje extremal anual Hs_{12} (1.605 m), rango de marea astronómica (0.629 m), y marea meteorológica por encima de nivel medio del mar (0.286 m).

La sumatoria de las cuatro anteriores referencias verticales concedió una cota de 2.636 m sobre el cero del modelo (MLWS), que idealmente debía ser superada por el diseño de la playa dentro de la alternativa de solución. Las alternativas 1 y 2 fueron viables de acuerdo con el análisis de criterios efectuado, y de acuerdo con el presupuesto disponible en el momento se pudiera consolidar una u otra, teniendo en cuenta el aspecto de cantidades de obra.

Tabla 5. Criterios de diseño y evaluación de alternativas.

Criterios de diseño	Descripción	Alternativa		
		0	1	2
Generación de playa emergida/sumergida [0.30]	Avance de línea de costa del orden de 25 m respecto a la situación actual, reconstituyendo y reperfilando la playa tanto emergida como sumergida. Si se cumple se otorga 1.00, de lo contrario 0.00.	0.00	1.00	1.00
Reducción de pérdida neta de sedimento [0.30]	Disminución de corrientes longitudinales que atraviesan sector crítico de playa en erosión (PE2). A la alternativa que cumpla y presente mejor desempeño se otorga 1.00, y 0.90 a la siguiente, de lo contrario 0.00.	0.00	0.90	1.00
Adaptación al cambio climático (SSP5-8.5) al 2040 [0.20]	Asimilación de efectos de ascenso relativo del nivel del mar debido al cambio climático de acuerdo con el escenario SSP5-8.5 del IPCC al año 2040. En dicho sentido, las alturas de bermas de playa de las alternativas de solución se refieren al nivel vertical 2.636 m sobre el cero del modelo (M.L.W.S.), asignando valor de 0.00 a 1.00, de acuerdo con la relación de altura entre cotas.	0.57	0.76	0.76
Afectación paisajística [0.10]	Se produce afectación paisajística en las alternativas si incluyen relleno hidráulico de playa (afectación positiva, valor=+0.75) y/o colocación de estructuras rígidas como rompeolas (afectación negativa, valor=-0.25/estructura). Valor base=0.00.	0.00	0.50	0.50
Viabilidad económica [0.10]	La solución más costosa (Alternativa 2) recibe un valor de 0.00 para este criterio. La más económica (Alternativa 0) recibe un 1.00 para este criterio. La otra (Alternativa 1) se calcula por interpolación lineal.	1.00	0.50	0.00
PUNTUACIÓN	0.3G+0.3R+0.2A+0.1P+0.1V	0.21	0.82	0.80

CONCLUSIONES

Si bien fueron evidentes los retrocesos de línea de costa en los últimos años, no se puede desconocer que existe una permisividad local en favor del desarrollo urbanístico inmediato al mar, que genera estrangulamiento costero. El estudio hidrodinámico y morfodinámico efectuado en la zona permitió establecer hallazgos y resultados

orientados a cuantificar la erosión costera, definiendo órdenes de magnitud y direcciones de transporte litoral.

Dos soluciones modelaron numéricamente y se compararon con un caso control, ambas con valoración positiva, de acuerdo con los criterios de diseño. El tómbolo de playa diseñado permite el avance de línea de costa desde 25 m, en

los extremos, hasta 140 m en el eje central; una obra blanda que interrumpe la corriente longitudinal responsable del mayor transporte litoral identificado. Por su parte, el dique exento o rompeolas funciona para rigidizar la saliente formada por el tóbolo al extremo de su eje central, disminuyendo la energía del oleaje incidente y transversal a la playa, procedente de las direccionalidades N, NW, WNW. Aunque la playa permanece expuesta a oleajes del oeste (W), estos son menos frecuentes y pueden manejarse con un plan de monitoreo y seguimiento, y trasvases de arena, según sea necesario.

Recomendaciones adicionales para agregar resiliencia al borde costero consisten en la conformación de una duna y siembra de vegetación nativa tanto en la playa emergida como sumergida. Las soluciones propuestas ofrecen diversificar el abanico de propuestas que existen para mitigar la erosión costera en Playa Salguero.

AGRADECIMIENTOS Y FUENTE FINANCIADORA

Al Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH) por la financiación y levantamiento de información primaria para esta investigación.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización, F. A.; metodología, P. A. y F. A.; software, P. A.; validación, P. A.; análisis, P. A.; investigación, P. A.; recursos, J. D. y F. A.; curación de datos, P. A.; redacción - preparación del borrador original, P. A.; redacción - revisión y edición, F. A.; visualización, P. A. y F. A.; supervisión, J. D. y F. A.; administración del proyecto, J. D.; consecución de fondos, J. D. y F. A. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bouws, E., Günther, H., Rosenthal, W. & Vincent, C. L. (1985). Similarity of the Wind Wave Spectrum in Finite Depth Water. *Journal of Geophysical Research*, 90, 975-986. <https://doi.org/10.1029/JC090iC01p00975>

Caldwell, P., Merrifield, M. & Thompson, P. (2015). *Sea level measured by tide gauges from global oceans*. Obtenido de The Joint Archive for Sea Level holdings (NCEI Accession 0019568), Version 5.5, NOAA National Centers for Environmental Information, Dataset, doi:10.7289/V5V40S7W: <https://uhslc.soest.hawaii.edu/data>

Camus, P., Méndez, F. J. & Medina, R. (2011a). A hybrid efficient method to downscale wave climate to coastal areas. *Coastal Engineering Journal*, 58(9), 851-862. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.05.007>

Camus, P., Méndez, F. J., Medina, R. & Cofiño, A. S. (2011b). Analysis of clustering and selection algorithms for the study of multivariate wave climate. *Coastal Engineering Journal*, 58(6), 453-462. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.02.003>

Castellanos, O., Mínguez, R., Tomás, A., Méndez, F., Losada, I., Medina, R., Camus, P., Menéndez, M. & Pérez, J. (2015). *Análisis Matemático y Estadístico de Variables Ambientales (AMEVA v.1.4.2)*. Santander, Cantabria, España.

Coastal Engineering Research Center. (1984). *Shore Protection Manual (Vol. I)*. Washington D.C.: U.S. Government Printing Office. Dept. of the Army. Waterways Experiment Station. Corps of Engineers. CERC. Obtenido de <https://usace.contentdm.oclc.org/digital/collection/p16021coll11/id/1932>

De Vriend, H. & Stive, M. (1987). Quasi-3D Modelling of Nearshore Currents. *Coastal Engineering*, 11, 565-601. [https://doi.org/10.1016/0378-3839\(87\)90027-5](https://doi.org/10.1016/0378-3839(87)90027-5)

Dean, R. G. (1977). Equilibrium Beach Profiles: U.S. Atlantic and Gulf Coasts. University of Delaware, Department of Civil Engineering. Newark, Delaware: *Ocean Engineering Report No. 12*. Obtenido de <https://bpb-us-w2.wpmucdn.com/sites.udel.edu/dist/0/7241/files/2018/03/REPORT-12-1fp5sc6.pdf>

Decreto 092 del 03 de abril. (2023). *Por medio del cual se declara la calamidad pública por erosión costera de la zona de Playa Salguero*. Santa Marta. Obtenido de https://www.santamarta.gov.co/sites/default/files/dec_092_de_03_abr_2023.pdf

- Díaz, G., y Requejo Landeira, S. (2011). *Programa para la determinación de las características del oleaje en rotura*. Santander, Cantabria, España.
- Dirección General Marítima-Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe. (2013). *Atlas Geomorfológico del Litoral Caribe Colombiano* (Vol. 8). Dimar-CIOH. Cartagena de Indias: Dimar, Serie Publicaciones Especiales CIOH.
- Fox-Kemper, B., Hewitt, H.T., Xiao, C., Aðalgeirsdóttir, G., Drijfhout, S.S., Edwards, T.L., Golledge, N.R., Hemer, M., Kopp, R.E., Krinner, G., Mix, A., Notz, D., Nowicki, S., Nurhati, I.S., Ruiz, L., Sallée, J.-B., Slanger, A.B.A. & Yu, Y. (2021). *Ocean, Cryosphere and Sea Level Change*. En IPCC, Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (págs. 1211-1362). Cambridge, United Kingdom and New York, USA: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.011>
- Garner, G.G., Hermans, T., Kopp, R.E., Slanger, A.B.A., Edwards, T. L., Levermann, A., Nowicki, S., Palmer, M. D., Smith, C., Fox-Kemper, B., Hewitt, H. T., Xiao, C., Aðalgeirsdóttir, G., Drijfhout, S. S., Golledge, N. R., Hemer, M., Krinner, G., Mix, A., Notz, D., Nurhati, I. S., Ruiz, L., Sallée, J.-B., Yu, Y., Hua, L., Palmer, T. & Pearson, B. (2021). *IPCC AR6 Sea Level Projections*. Version 20210809. Dataset accessed [2023-12-01]. Obtenido de <https://doi.org/10.5281/zenodo.5914709>
- GIOC. (2001). *Manual de Referencia - Petra 2.0*. Universidad de Cantabria, Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas, Santander. Obtenido de <https://smc.ihcantabria.es/SMC25/wp-content/uploads/2015/11/Manual-de-referencia-de-Petra.pdf>
- GIOC y DGCM. (2002). *Sistema de Modelado Costero, Versión 2.5*. Obtenido de SMC-IHCantabria: <https://smc.ihcantabria.es/SMC25/>
- González, M. & Raul, M. (2001). On the application of static equilibrium bay formulations to natural and man-made beaches. *Coastal Engineering Journal*, 43(3-4), 209-225. [https://doi.org/10.1016/S0378-3839\(01\)00014-X](https://doi.org/10.1016/S0378-3839(01)00014-X)
- Hallermeier, R. J. (1978). Uses for a calculated limit depth to beach erosion. Proceedings of the Sixteenth Coastal Engineering Conference. *American Society of Civil Engineers*, 1(16), Ch. 88, pp. 1493-1512. <https://doi.org/10.9753/icce.v16.88>
- Himmelstoss, E., Henderson, R., Kratzmann, M. & Farris, A. (2018). *Digital Shoreline Analysis System (DSAS) Version 5.0 User Guide*. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey. Open-File Report 2018-1179. <https://doi.org/10.3133/ofr20181179>
- Hsu, J. & Evans, C. (1989). Parabolic bay shapes and applications. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 87(4), 557-570. <https://doi.org/10.1680/iicep.1989.3778>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2024). *Consulta y Descarga de Datos Hidrometeorológicos*. Ideam. Obtenido de: <http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>
- IHCantabria. (2013). Hipercubo MAXDISS. Versión 3.0. Santander, España.
- Instituto Colombiano de Geología y Minería / Ecopetrol ICP/Instituto de Investigaciones Marinas "José Benito Vives de Andrés". (2008). *Evolución Geohistórica de la Sierra Nevada de Santa Marta. Geomorfología de la zona costera y piedemonte occidental*. Convenio 006-05 Ingeominas - Ecopetrol ICP - Invemar. Santa Marta: Programa de Geociencias Marinas y Costera-GEO. Obtenido de <https://recordcenter.sgc.gov.co/B12/23008002524327/documento/Pdf/2105243271101000.pdf>
- Instituto de Investigaciones Marinas "José Benito Vives de Andrés" y Corporación Autónoma Regional del Magdalena. (2015). *Primer informe de actividades del convenio especial de cooperación No. 14 de 2014 celebrado entre Corpamag e Invemar, para entender diferentes tipos de emergencias ambientales*. Santa Marta.
- Instituto de Investigaciones Marinas "José Benito Vives de Andrés". (2021). *Concepto técnico*

sobre la problemática de erosión costera en playa Salguero, los daños ambientales causados por un espolón construido a la altura del edificio Playa Linda y las posibilidades de restauración ambiental de la playa. Santa Marta: CPT-GEO-003-21. Invemar. Obtenido de <https://alfresco.invemar.org.co/share/s/rLf7UBwRw--T5i5puWFzA>

IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* IPCC, [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds)], Geneva, Switzerland. Obtenido de <https://archive.ipcc.ch/report/ar5/syr/>

Kirby, J. T. (1986). Higher-Order Approximations in the Parabolic Equation Method for Water Waves. *Journal of Geophysical Research*, 91(C1), 933-952. <https://doi.org/10.1029/JC091iC01p00933>

Kopp, R.E., Garner, G.G., Hermans, T.H.J., Jha, S., Kumar, P., Reedy, A., Slanger, A. B. A., Turilli, M., Edwards, T. L., Gregory, J. M., Koubbe, G., Levermann, A., Merzky, A., Nowicki, S., Palmer, M. D. & Smith, C. (2023). The Framework for Assessing Changes To Sea-Level (FACTS) v1.0: a platform for characterizing parametric and structural uncertainty in future global, relative, and extreme sea-level change. *Geoscientific Model Development*, 16(24), 7461-7489. <https://doi.org/10.5194/gmd-16-7461-2023>

O'Reilly, W. C. & Guza, R. T. (1991). Comparison of Spectral Refraction and Refraction-Diffraction Wave Models. *Journal of Waterway Port, Coastal and Ocean Engineering*, 117(3), 199-215. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(1991\)117:3\(199\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(1991)117:3(199))

Pawlowicz, R., Beardsley, B. & Lentz, S. (2002). Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE. *Computers and Geosciences*, 28(8), 929-937. [https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(02\)00013-4](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(02)00013-4)

Restrepo, J. D. & Kjerfve, B. (2004). The Pacific and Caribbean Rivers of Colombia: Water Discharge, Sediment Transport and Dissolved Loads. In: Drude de Lacerda, L., Santelli, R.E., Duursma, E.K. & Abrão, J.J. (eds) *Environmental Geochemistry in Tropical and Subtropical Environments*. Environmental Science. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-07060-4_14

Ricaurte-Villota, C., Coca-Domínguez, O., González, M.E., Bejarano-Espinosa, M., Morales, D.F., Correa-Rojas, C., Briceño-Zuluaga, F., Legarda, G.A. & Arteaga, M.E. (2018). *Amenaza y vulnerabilidad por erosión costera en Colombia: enfoque regional para la gestión del riesgo*. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras "José Benito Vives de Andrés" - Invemar. Santa Marta, Colombia: Serie de Publicaciones Especiales de Invemar #33. Obtenido de <https://alfresco.invemar.org.co/share/s/vPDPEXpLRe07EsiOFqsq8g>

Thornton, E. B. & Guza, R. (1983). Transformation of Wave Height Distribution. *Journal of Geophysical Research*, 88(C10), 5925-5938. <https://doi.org/10.1029/JC088iC10p05925>

Winyu, R. & Tomoya, S. (1998). Energy Dissipation Model for Irregular Breaking Waves. *Coastal Eng. Journal*, 40(4), 327-346. <https://doi.org/10.1061/9780784404119.007>

WW3DG. (2019). The WAVEWATCH III® Development Group: User manual and system documentation of WAVEWATCH III® version 6.07. NOAA/NWS/NCEP/MMAB. Tech. Note 333, 326 pp. + Appendices. College Park, MD, USA. Obtenido de <https://github.com/NOAA-EMC/WW3/wiki/Manual>