

Evaluación del desplazamiento costero y la salud ecosistémica en la Bahía de Tumaco mediante Delft3D, CoastSat y aprendizaje automático

Assessment of Shoreline Displacement and Ecosystem Health in Tumaco Bay Using Delft3D, CoastSat, and Machine Learning

Andrés M. Enríquez-Hidalgo^{a,b,d}, Andrés Vargas-Luna^{a,d}, Marc Mestres^{b,c}, Jorge Escobar-Vargas^{a,d}, Manuel Espino Infantes^{b,c}, Andrés Torres^{a,d,e}

^aDepartamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Pontificia Universidad Javeriana, ^bLaboratori d'Enginyeria Marítima, Universitat Politècnica de Catalunya (LIM/UPC)–Barcelona Tech, ^cCentro Internacional de Investigación de los Recursos Costeros (CIIRC), ^dGrupo de Investigación Ciencia e Ingeniería del agua y el Ambiente, Pontificia Universidad Javeriana, ^eInstituto Javeriano del Agua, Pontificia Universidad Javeriana, Carrera 7ª No. 40-62, Bogotá, Colombia.

 enriquez_andres@javeriana.edu.co;  avargasl@javeriana.edu.co;  marc.mestres@upc.edu;
 jorge-escobar@javeriana.edu.co;  manuel.espino@upc.edu;  andres.torres@javeriana.edu.co

How to cite: Enríquez-Hidalgo, A. M.; Vargas-Luna, A.; Mestres, M.; Escobar-Vargas, J.; Espino Infantes, M. & Torres, A. (2024). Evaluación del desplazamiento costero y la salud ecosistémica en la Bahía de Tumaco mediante Delft3D, CoastSat y aprendizaje automático. Libro de Actas de las Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos, Ibiza, mayo 2024

Abstract

This study investigates coastal dynamics and water health in Tumaco Bay, Colombia, through the integration of numerical models and machine learning techniques in a data-limited environment. To analyze shoreline displacement (SLD), the SWAN and FLOW models coupled in Delft3D were used, complemented by remote sensing data from CoastSat. Using a structured computational grid of 100 m, tidal ranges and wave patterns were identified along the beaches of El Morro and El Bajito. Additionally, the Random Forest model determined that tidal range and wave direction are the key factors influencing SLD variability. Simultaneously, the D-Quality module assessed parameters such as pH, dissolved oxygen, and nutrients, uncovering the impacts of human activities on mangrove ecosystems. The results highlight that, although the beaches experience favorable hydrodynamic and wave conditions, they face significant challenges in ecological sustainability due to environmental degradation in physicochemical and biological aspects. This integrated approach, linking wave dynamics, water quality, and ecosystem health, provides an innovative methodology for advancing sustainable coastal management.

Keywords: Delft3D, Waves, Sea Level, Shoreline Displacement, Coastsat, Machine Learning, Random Forest, Tropical Pacific Coast.

Resumen

Este trabajo investiga las dinámicas costeras y la salud del agua en la Bahía de Tumaco, Colombia, mediante la integración de modelos numéricos y técnicas de aprendizaje automático en un contexto de datos limitados. Para analizar el desplazamiento de la línea costera (SLD), se utilizaron los modelos SWAN y FLOW acoplados en Delft3D, complementados con datos de teledetección obtenidos a través de CoastSat. Usando una malla computacional estructurada de 100 m, se identificaron patrones de mareas y oleaje en las playas de El Morro y El Bajito. Además, el modelo Random Forest permitió determinar que el rango mareal y la dirección del oleaje son los principales factores que influyen en la variabilidad del SLD. Simultáneamente, el módulo D-Quality analizó indicadores como el pH, oxígeno disuelto y nutrientes, revelando los efectos de las actividades humanas en los ecosistemas de manglares. Los resultados muestran que, a pesar de que las playas están sometidas a condiciones hidrodinámicas y de oleaje favorables, enfrentan retos importantes en términos de sostenibilidad ecológica debido a la degradación ambiental en los aspectos fisicoquímicos y biológicos. Este enfoque integral, que relaciona la dinámica del oleaje, la calidad del agua y la salud ecosistémica, constituye una metodología innovadora para avanzar hacia una gestión costera más sostenible.

Palabras clave: *Delft3D, Oleaje, Nivel del Mar, Desplazamiento de la Línea de Costa, Coastsat, Aprendizaje Automático, Bosque Aleatorio, Costa del Pacífico Tropical.*

1. Introducción

Las zonas costeras tropicales enfrentan desafíos continuos derivados del rápido aumento de la población, lo que tiene consecuencias adversas como la degradación de sus costas (Luan et al., 2021). En el contexto de Latinoamérica, las costas son afectadas por importantes factores socioambientales, impulsados por actividades como la extracción de madera y la acuicultura. Según Ruan et al. (2022) estos factores han provocado pérdidas que oscilan entre el 20% y 70% de manglares en todo el continente.

A pesar de los avances significativos en la comprensión del oleaje, la calidad del agua y la desplazamiento de la línea costera, persiste una brecha notable en la integración de estos elementos para evaluar el estado ecosistémico de las costas. Las herramientas de predicción de olas suelen centrarse exclusivamente en la atenuación del oleaje y circulación costera, mientras que los estudios de calidad del agua en las costas a menudo no integran adecuadamente la hidrodinámica (Ammann & Bhaskaran, 2020). Esta falta de enfoque integrado limita nuestra comprensión de cómo el oleaje, la hidrodinámica y la calidad del agua afectan a la estabilidad y salud de los ecosistemas costeros y el desplazamiento de la línea de costa.

Respecto, a el desplazamiento de la línea costera influenciado por las dinámicas de marea y oleaje, es un aspecto clave de las interacciones dentro de las regiones costeras que requiere monitoreo continuo (Idier et al., 2019; Son et al., 2020). Comprender las características de las olas es esencial para evaluar la erosión y acreción, que informan las configuraciones y cambios en la línea costera (Bryant et al., 2022). La aplicación de modelos numéricos, como destacan Martins et al. (2017), es imprescindible para mejorar la precisión en la evaluación de los riesgos costeros. Herramientas como CoastSat, que permiten monitorear los cambios en la línea costera a partir de imágenes satelitales, son fundamentales para capturar la variabilidad espaciotemporal del SLD en regiones donde los datos in situ son limitados. Dicho esto, las regiones en desarrollo, donde la instrumentación marina

es escasa y los registros de oleaje disponibles suelen ser insuficientes para evaluaciones a largo plazo, la creación de registros artificiales de oleaje mediante modelos numéricos es un recurso valioso (Niño P. & Oviedo B., 2018; Mury et al., 2020). Estos registros, generados a partir de modelos de propagación de oleaje y análisis de bases de datos locales de viento, pueden proporcionar información crucial para la gestión del riesgo costero, especialmente en áreas vulnerables a la erosión y las inundaciones (Ortega et al., 2013; Rivas et al., 2019; Cano Calvo, 2021).

Para abordar este problema, el acoplamiento de los módulos FLOW y WAVE de Delft3D con el análisis de calidad del agua (WAQ) proporciona un enfoque novedoso. Además, la integración de herramientas de teledetección como CoastSat, que permite evaluar el desplazamiento de la línea, junto con técnicas de aprendizaje automático como el Random Forest; aporta una perspectiva más robusta de identificación de los factores incidentes en procesos de erosión y la obtención de datos espaciotemporales de los contaminantes fisicoquímicos y microbiológicos. permitiendo una mejor comprensión de la vulnerabilidad de las playas de El Morro y Tumaco.

2. Objetivos

2.1. Objetivo General

Evaluar la relación entre el desplazamiento de la línea costera, la calidad del agua la hidrodinámica y oleaje en la Bahía de Tumaco, Colombia.

2.2. Objetivos específicos

- Caracterizar y depurar la información de entrada para los modelos hidrodinámicos (FLOW), de oleaje (WAVE) y de calidad del agua (WAQ) en Delft3D, así como las imágenes Landsat utilizadas para la aplicación de CoastSat.
- Calibrar y validar resultados para las variables hidrodinámicas, de oleaje, calidad del agua.
- Analizar la relación entre las condiciones hidrodinámicas, el oleaje, la calidad del agua y el desplazamiento de la línea costera, evaluando su impacto en la estabilidad y sostenibilidad de los ecosistemas costeros.

3. Desarrollo de la innovación

3.1. Área de estudio

Este estudio se llevó a cabo en la costa de la Bahía de Tumaco, ubicada en el departamento de Nariño, Colombia. La zona urbana de Tumaco se divide en tres áreas principales: Isla del Morro, Isla de Tumaco y la ciudad de San Andrés de Tumaco, las cuales están conectadas por los puentes Pindo y Morro. En la región desembocan numerosos ríos que drenan el territorio, destacándose dos grandes cuencas: al norte, la del brazo sur del río Patía, y al sur, la desembocadura del río Mira. En la zona central, también existen varios tributarios de microcuencas, como los ríos Tablones, Rosario, Caunapí, Mejicano, Chagüi, Colorado y Curay (Tejada, 2003).

Las características geográficas de esta área han permitido el desarrollo de formaciones críticas como playas, bancos, barras, marismas de alta salinidad y suelos ricos en depósitos orgánicos, con vegetación de manglar, guandal y ribereña. Estas formaciones están expuestas a olas con alturas promedio de entre 0.5 m y 1.5 m, y periodos de 8 a 10 segundos, provenientes del noroeste del océano Pacífico, especialmente durante los meses de invierno boreal. Registros observacionales y estudios previos han evidenciado cambios morfodinámicos significativos en la zona intermareal de la Bahía de Tumaco, con procesos de erosión y acreción en sectores como El Pindo entre 1921 y

1948, la erosión del lado sur de la isla en 1969, y los procesos erosivos generados por el tsunami de 1979 y la marejada de 1982-1983 (Tejada, 2003). La Fig. 1 indica la localización de Tumaco.

3.2. Datos Recolectados

La recolección de datos batimétricos de la Bahía de Tumaco fue realizada por el Servicio Hidrográfico Nacional de la Dirección General Marítima (DIMAR) del Ministerio de Defensa de Colombia. La información se refiere al Nivel Medio de Baja Marea y está proyectada en EPSG:32617 – WGS 84 / UTM zona 17N. Dado que estas mediciones no cubren toda el área de Tumaco, se combinaron con datos satelitales de reflectancia del programa SENTINEL II, procesados mediante Google Earth Engine, para calcular la profundidad en aguas poco profundas (<15 m) (Li et al., 2021).

La recopilación de datos meteorológicos marinos fue realizada por la Red de Medición de Parámetros Oceanográficos y de Meteorología Marina (RedMpomm-DIMAR). Se obtuvieron 31,301 observaciones del nivel del mar (2011-2021), 12,833 observaciones de velocidad y dirección del viento (cada seis horas), Además, se descargaron datos globales sobre la altura significativa de las olas (SWH), periodo y dirección de las mismas desde el Servicio Marino de Copernicus, utilizando el producto WAVERYS, basado en el modelo de olas de tercera generación MFWAM. Finalmente, la tabla 1 presenta los parámetros y constantes utilizados para modelar la calidad del agua en Tumaco. Las concentraciones iniciales fueron derivadas de las estaciones de monitoreo de DIMAR y otras fuentes, distinguiendo entre áreas de intervención alta, moderada y baja, correspondientes a diferentes zonas de manglares alrededor de la bahía (estrellas rojas figura 1).

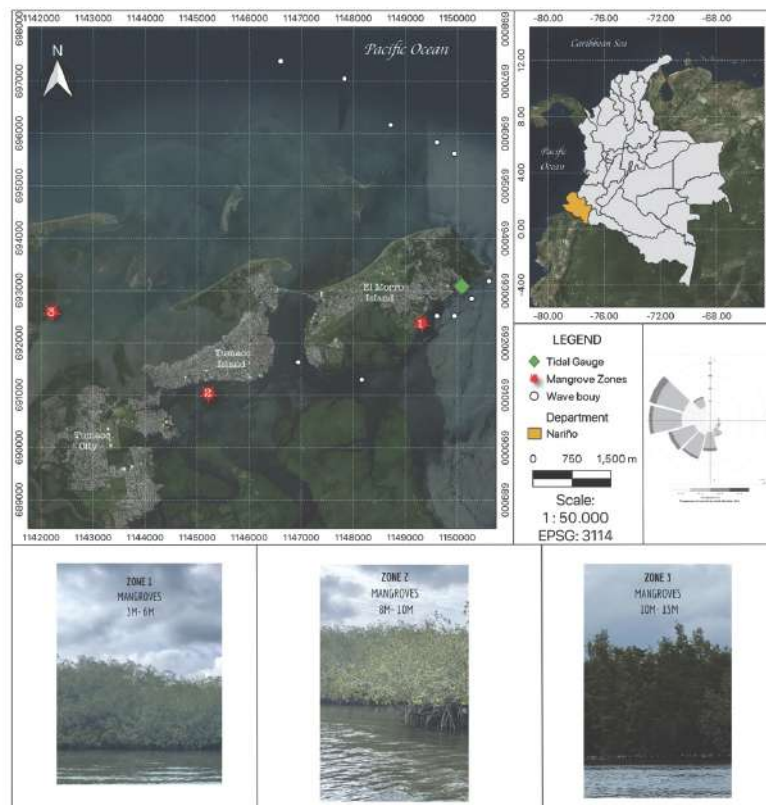


Fig 1. Ubicación del área de estudio y áreas de manglar (estrellas rojas), rosa de los vientos, y ubicación de estación meteorológica y de mareas en Tumaco-Nariño (polígono verde).

Tabla 1. Parámetros fisicoquímicos y biológicos Bahía de Tumaco y constantes de reacción para WAQ quality.

VARIABLE	Condiciones iniciales	Contorno sur (zona 1)	Contorno oeste (zona 2)	Contorno Norte (zona 3)	Constante	Uni- dades	Valor
Temperatura (°C)	27.900	29.200	26.500	27.000	Resultados modelo hidrodinám ico	°C	NA
Salinidad (ups)	26.800	29.000	18.000	31.100	Resultados modelo hidrodinám ico	ppt	NA
Amonio nh4 (mg/L)	0.012	0.034	0.024	0.016	Tasa de nitrificació n a 20°C	gN/m³/ d	0.100
Nitratos no3(mg/L)	0.018	0.016	0.025	0.006	Tasa de nitrificació n a 20°C	gN/m³/ d	0.100
Ortofosfatos PO4 (mg/L)	0.003	0.004	0.002	0.003	Tasa de adsorción	1/d	0.050
Silíce disuelta (mg/L)	0.651	0.189	0.892	0.082	NA	NA	NA
Oxígeno disuelto (mg/L)	6.069	4.485	6.393	6.666	Tasa de reaireación	m/d	1.000
DQO (mg/L)	2.700	2.800	2.900	2.700	Tasa de decaimient o a 20°C	1/d	0.050
DBO (mg/L)	1.100	1.500	2.000	1.100	Tasa de decaimient o	1/d	0.300
Coliformes totales (NMP/100mL)	4.500	4.3.000	4.500	4.6000	Tasa de mortalidad de primer orden	1/d	0.800
E-coli (NMP/100mL)	68.500	20.000	170.000	170.000	Tasa de mortalidad de primer orden	1/d	0.800
Coliformes fecales (NMP/100mL)	6.360	887.000	645.000	1.354	Tasa de mortalidad de primer orden	1/d	0.800
Solidos Suspendidos	32	15	27	25	NA		
Disueltos (mg/L)	8.05	8.13	8.01	8.2			
pH	0.006	0.001	0.001	0.001			
Nitritos NO2(mg/L)	4.871	4.043	3.31	0.529			
Clorofila (mg/m³)	3.154	1.987	2.436	NA			
Materia orgánica total (mg/L)	1.354	1.674	1.385	NA			
Materia orgánica disuelta (mg/L)	Mediana estaciones	Sociedad Portuaria	Isla vaquera, P.bocagrande. El pajal	Arco del Morro			

3.3. Modelado numerico FLOW, SWAN Y WAQ en Delft3D

La modelación de áreas costeras implica simulaciones hidrodinámicas y de olas multidimensionales, utilizando formulaciones de flujo y transporte no permanentes basadas en datos meteorológicos y de mareas (Marsooli et al., 2017). Estas simulaciones requieren el acoplamiento de modelos hidrodinámicos y de olas para comprender de manera integral las dinámicas costeras y sus interacciones bidireccionales (Martos & Isabel, 2022). En este contexto, se empleó el acoplamiento entre el modelo de olas SWAN y el módulo FLOW de Delft3D y la integración de los resultados de FLOW con WAQ para la simulación de la calidad del agua, lo que permite representar fenómenos como la refracción de corrientes, fricción de fondo mejorada y la influencia de las olas sobre las corrientes, mediante la generación de turbulencias y esfuerzos cortantes en el lecho (Paulus et al., 2013). Este acoplamiento e integración ha demostrado ser eficaz para analizar la interacción entre olas y corrientes en ambientes costeros complejos (Deltares, 2014, 2022a, 2022b; Kadigi et al., 2022; Sun et al., 2022). Delft3D, desarrollado por Deltares, es un software de código abierto que permite modelar procesos hidrodinámicos, de olas y de calidad de agua en ambientes costeros y estuarinos. El modelo SWAN, utilizado para la simulación de olas, es completamente espectral y puede acomodar la propagación simultánea de oleajes desde diferentes direcciones, mientras que Delft3D-FLOW resuelve las ecuaciones de aguas someras promediadas en profundidad, lo que incluye la ecuación de continuidad y dos ecuaciones de momento horizontal (Deltares, 2022a). Estos modelos permiten estudiar de manera precisa la evolución de las olas y las interacciones hidrodinámicas en la Bahía de Tumaco.

3.4. Algoritmo Coastsat y Bosque Aleatorio

Para el análisis del desplazamiento de la línea costera (SLD) en las playas de El Bajito y El Morro, se utilizó CoastSat, una herramienta de código abierto disponible en GitHub que permite monitorear las líneas costeras mediante imágenes satelitales (Tamiminia et al., 2020). CoastSat proporciona una resolución temporal aproximada de dos semanas y una precisión horizontal de entre 10 m y 30 m. Dado que la marea puede introducir sesgos en los datos de línea costera, se aplicó una corrección de marea lineal basada en los niveles de agua medidos y la pendiente característica de la playa, ajustando cada línea costera a una elevación de referencia estándar.

Se llevó a cabo un análisis de correlación entre las variables de Waverys y los datos de SLD obtenidos con CoastSat, empleando un modelo de aprendizaje automático Random Forest. Este modelo permite identificar las variables más influyentes sobre el desplazamiento de la línea costera, analizando alturas significativas de olas (SWH), periodos pico de olas (PWP), dirección de olas (WDI), velocidades de deriva de Stokes (SDX y SDY), periodos medios de olas (MWP) y nivel del agua (WL). Los resultados mostraron que las configuraciones óptimas del modelo lograron un equilibrio entre la eficiencia computacional y la precisión predictiva para ambas áreas de estudio, El Bajito y El Morro.

Para la calibración y validación del bosque aleatorio, se utilizaron 1500 árboles de regresión inicialmente, reduciéndose a 1344 árboles para El Bajito y 1291 para El Morro, alcanzando valores de RMSE de 10.94 m y 9.21 m respectivamente, lo que es consistente con los errores encontrados en Billett et al., (2024). Estos resultados reflejan las limitaciones inherentes a la resolución espacial de las imágenes satelitales de Landsat, pero aun así proporcionan una herramienta útil para el monitoreo y predicción del desplazamiento de la línea costera.

4. Resultados

4.1. Resultados Modelo FLOW, SWAN y WAQ

En la Fig. 2, se presenta una serie temporal de un acercamiento específico al mes de octubre, destacando una ligera subestimación del modelo además del grafico de dispersión que ilustra la correlación entre los niveles de agua observados y simulados. Este gráfico está respaldado por un coeficiente de correlación de 0.98, un Error Cuadrático Medio (RMSE) de 4 cm y un sesgo de -0.5 cm, lo que indica que el modelo tiende a subestimar levemente los valores observados.

En cuanto a la calibración y validación de los resultados de los módulos FLOW y SWAN, estudios previos como los de Martos e Isabel (2022) reportan un RMSE de entre 6 y 8 cm y coeficientes de correlación de 0.7 a 0.8 al comparar niveles de agua medidos y simulados, utilizando el modelo de marea global TPX08 como condición de contorno en su estudio alrededor del Golfo de Cádiz. Aunque existe una versión más reciente, el modelo TPX09, los autores destacan que este no siempre ofrece mejores resultados al utilizarse en FLOW. En nuestro estudio, se alcanzó un RMSE de 12.8 cm y un coeficiente de correlación de 0.9. Esta mejora en la correlación se atribuye al acoplamiento de los módulos FLOW y SWAN, así como a la inclusión de vientos en las simulaciones, lo que, según los autores, contribuye significativamente a mejorar la precisión del modelo en Delft3D, como se ha demostrado en esta investigación

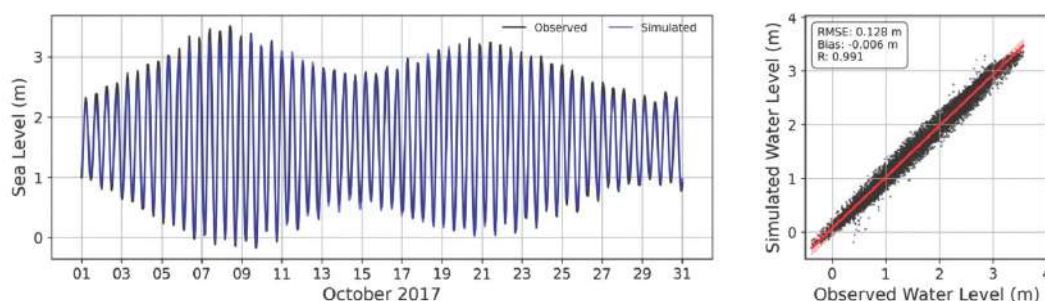


Fig 2. Nivel del mar octubre 2017 y grafico de dispersión de observados vs simulados.

Los resultados de la altura significativa del oleaje (SWH), periodo pico del oleaje (PWP) y dirección del oleaje (WDI) se comparan con los datos de reanálisis del Servicio Marino de Copernicus utilizando el producto WAVEYYS para la validación. Para SWH, el modelo muestra un error cuadrático medio (RMSE) de 0.055 m, un sesgo de -0.045 m, y un coeficiente de correlación (R) de 0.970, lo que indica una subestimación leve en los valores simulados. En cuanto al PWP, el RMSE es de 1.642 s, con un sesgo de -0.786 s, y un coeficiente de correlación de 0.963, reflejando una subestimación del modelo en los valores simulados de PWP. Y para la WDI, el RMSE es de 6.722°, con un sesgo de 5.085°, y un coeficiente de correlación de 0.989, mostrando una ligera sobreestimación en la dirección del oleaje simulada. Respecto a los resultados espacializados de FLOW, SWAN y WAQ la Fig. 3 presenta los mapas que incluyen diversos parámetros.

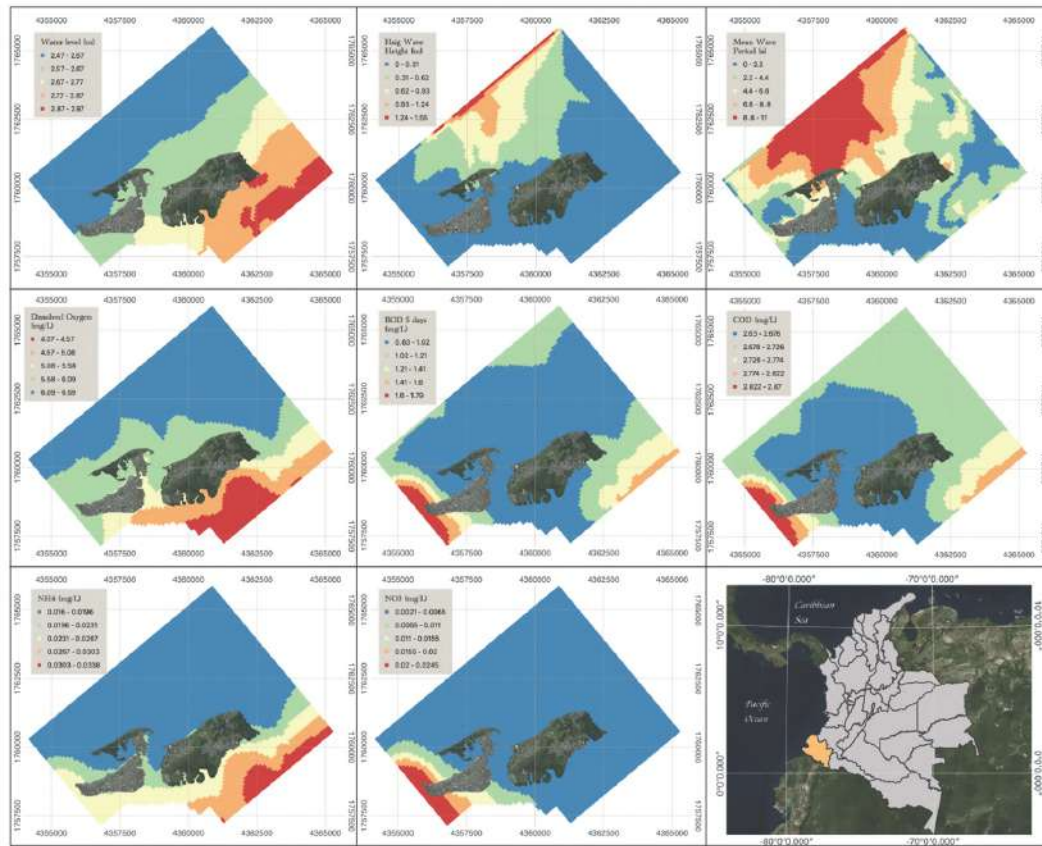


Fig 3. Resultados FLOW, SWAN Y WAQ en dominio computacional en 01 julio del 2018 23:00 horas.

4.2. Desplazamiento de la línea de costa (SLD) en las playas del Bajito y el Morro

Los periodos: 1993-2005 y 2014-2024. Durante el primer periodo, el transecto 4 muestra una acreción de 34.32 m/año, mientras que el transecto 9 presenta erosión a una tasa de -7.84 m/año. En el segundo periodo, la variabilidad entre los transectos disminuye, aunque persisten patrones de acreción y erosión. Se destacan tres transectos clave: el transecto 3, que pasa de erosión en el primer periodo a acreción en el segundo; el transecto 5, que presenta acreción en ambos periodos; y el transecto 9, que experimenta erosión constante en los dos periodos de análisis.

El comportamiento del transecto 3 cambia significativamente entre ambos periodos, pasando de una tendencia erosiva a una de acreción. Este cambio podría estar asociado a la recuperación de la playa debido a las condiciones hidrodinámicas y el aporte de sedimentos del río Mira, junto con la acción de las olas desde el oeste de la Isla de Tumaco, que impacta más fuertemente en la parte suroeste de la isla, donde los transectos 8 a 11 muestran una erosión constante. Por otro lado, los transectos 1 a 7, ubicados más al noreste, tienden a mostrar acreción, especialmente en el periodo más reciente, lo que podría atribuirse a la formación de una barra de sedimentos en el noreste de la Isla de Tumaco. En la playa de El Morro, que tiene una longitud de 3.5 km, se analizaron dos periodos: 1993 - 2000 y 2001 - 2024. En el primer periodo, se observa una mayor variabilidad entre los transectos, siendo el transecto 14 el que muestra la mayor tasa de acreción (30.67 m/año) y el transecto 10 el que presenta la mayor erosión (-13.52 m/año).

En el segundo periodo, las tendencias se estabilizan, destacando que los transectos 1 a 11 muestran una tendencia general hacia la acreción, posiblemente debido a la protección natural proporcionada por la Isla de Tumaco y una barra de arena que se extiende hasta la latitud 1.83° y longitud -78.74° . El transecto 5 mantiene una tendencia constante de acreción en ambos periodos, mientras que el transecto 11, que experimentó una erosión significativa en el primer periodo, se estabiliza en el segundo, probablemente debido a un aumento en la acumulación de sedimentos en los últimos años.

En los transectos 12 a 15, se observa un cambio en la orientación de la playa y una mayor exposición al agua abierta, lo que favorece la erosión, especialmente en el transecto 13, donde la tendencia cambia de acreción a erosión ligera en el segundo periodo. Esto podría deberse a que el aporte de sedimentos de los ríos Mira y Rosario ya no es suficiente para contrarrestar las fuerzas costeras que afectan esta parte de la playa. Los transectos 16 a 18, ubicados en la esquina noreste de la Isla El Morro, muestran un patrón de acreción, aunque de menor magnitud que los transectos más expuestos al agua abierta. El análisis del desplazamiento de la línea costera (SLD) en las playas de El Morro y El Bajito refleja las características únicas de un entorno estuarino con mareas semidiurnas y un rango mesomareal, lo que contrasta con los resultados observados en estudios previos realizados en playas abiertas como las de Mar del Plata, Argentina. En contraste con Mar del Plata, donde las playas abiertas muestran tendencias lineales de SLD de -0.6 a 0.7 m/año (Billet et al., 2024), en Tumaco, la influencia de los ríos y la geomorfología estuarina, junto con la mayor exposición de algunos transectos al agua abierta, generan dinámicas más complejas que varían considerablemente entre los diferentes sectores de las playas. De manera similar, los resultados obtenidos en la costa del Pacífico de México, en Mazatlán, muestran un rango de SLD entre 0 m y 100 m en un entorno de mareas semidiurnas con una amplitud máxima de 1.8 metros (Valderrama-Landeros et al., 2022). Si bien las condiciones de olas y mareas en Mazatlán son comparables a las de Tumaco, los desplazamientos máximos de la línea costera en Mazatlán son menores, lo que se puede atribuir a las características estuarinas de Tumaco, donde la interacción entre las corrientes fluviales, el aporte de sedimentos de los ríos Mira y Rosario, y la dinámica de las olas contribuyen a una mayor variabilidad en los patrones de acreción y erosión.

4.3. Importancia del forcing costero en el desplazamiento de la línea de costa con bosques aleatorios

Los resultados del modelo FLOW & SWAN, que incluyen diversos parámetros oceanográficos, proporcionan información valiosa sobre el SLD. Uno de los factores más importantes es la altura significativa de las olas (SWH). Valores superiores a 1.1 m indican un alto potencial para afectar la costa, mientras que valores por debajo de 0.2 m sugieren un impacto mínimo (Mullick et al., 2019). En este estudio, los valores de SWH se mantuvieron principalmente por debajo de 1 m, lo que sugiere condiciones de oleaje moderadas o bajas, lo que podría explicar la falta de erosión significativa observada en los análisis de CoastSat. El rango de mareas también influye en las dinámicas de SLD, y en este caso, el rango mesomareal de 2 a 4 m indica una influencia moderada en la erosión y sedimentación costera (Pramanik et al., 2019).

Si bien los datos sobre el periodo pico de las olas (PWP) requieren más validación para confirmar su efecto en el SLD, algunos estudios preliminares sugieren que los periodos más largos podrían llevar las olas más tierra adentro durante eventos de tormenta, mientras que los periodos más cortos,

con mayor frecuencia de olas, podrían contribuir a la erosión crónica y alterar la dinámica del transporte de sedimentos (Pollard et al., 2019).

En este estudio, los valores de PWP se mantuvieron dentro de rangos moderados, lo que indica una influencia limitada en la erosión costera. En el modelo de bosque aleatorio aplicado a las playas El Bajito y El Morro, las variables más importantes están relacionadas con las condiciones hidrodinámicas y de oleaje de la zona. La altura significativa de las olas (SWH) oscila entre 0.4 m y 1.1 m, lo que sugiere una acción de oleaje relativamente baja. La variable más importante en el modelo es el nivel del mar (SL), lo cual está en línea con el rango mesomareal de Tumaco, que presenta variaciones de hasta 1.6 m. Las fluctuaciones en el nivel del mar impactan directamente en las dinámicas costeras, especialmente en un entorno estuarino como el de El Bajito y El Morro, donde las variaciones de marea influyen significativamente en la erosión y acreción de la costa.

La dirección de las olas (WDI) y la dirección del viento (WWD) también tienen una alta importancia en el modelo. La dirección predominante de las olas es hacia el oeste, con una recurrencia del 61%, lo que es crucial dado que la orientación de la playa y su exposición a las olas provenientes de esa dirección afectan los procesos de transporte de sedimentos y, por lo tanto, la configuración del desplazamiento de la línea costera (SLD). Aunque las olas no son muy altas, su dirección y la energía acumulada tienen un impacto significativo en la evolución de la costa.

El periodo pico de las olas (PWP) también muestra una importancia considerable, ya que los periodos más largos indican una mayor energía de las olas, lo que afecta su capacidad para transportar sedimentos y modificar la línea costera. Sin embargo, las variables relacionadas con la deriva de Stokes (SDX y SDY) tienen menor importancia en el modelo, lo que sugiere que en El Bajito y El Morro, su impacto directo en el SLD es limitado en comparación con el efecto combinado de las olas y el nivel del mar.

El orden de importancia de las variables es similar para ambas playas, aunque con mayores magnitudes en El Morro. Esto puede deberse a la exposición geográfica diferente de las dos playas: El Morro está más expuesta al mar abierto, lo que amplifica los efectos de las olas y el nivel del mar en el SLD. En contraste, El Bajito está protegido por la Isla Bocagrande, lo que modera el impacto de las olas y mareas en esa área. Esta diferencia en la exposición podría explicar por qué las mismas variables tienen mayor influencia en El Morro, donde las condiciones hidrodinámicas y de oleaje actúan de manera más intensa sobre la línea costera.

5. Conclusiones

En la Bahía de Tumaco, se observa un incremento en la concentración de compuestos (DBO, DQO, nutrientes) en la parte suroriental. Los resultados sugieren que esta contaminación proviene de fuentes terrestres, tanto difusas como puntuales. La detección de contaminación fecal en áreas específicas resalta la necesidad de intervenciones enfocadas para preservar la calidad del agua en estas zonas. Aunque el aumento en los compuestos fisicoquímicos no compromete el estado ecosistémico de la bahía, la presencia de contaminación microbiológica subraya la urgencia de acciones específicas.

El proceso de calibración y validación de los modelos 2D FLOW & SWAN en Delft3D, utilizando datos de reanálisis de WAVEYRS como alternativa a mediciones in situ, mostró que, a pesar de la información limitada, es posible aplicar con éxito un modelo acoplado para simular las condiciones hidrodinámicas y de oleaje en la región de Tumaco. Si bien se

obtuvieron correlaciones altas y errores bajos (RMSE) al comparar los niveles de agua observados y simulados, los resultados de SWH, PWP y WDI mostraron mayores valores de RMSE y sesgo, sugiriendo la necesidad de ajustes adicionales en futuras simulaciones.

Los resultados obtenidos a través de CoastSat indican una tendencia predominante hacia la acreción en las playas de El Morro y El Bajito, lo que podría interpretarse inicialmente como un signo positivo para la estabilidad costera. Sin embargo, el hecho de que algunos transectos aún experimenten erosión resalta la necesidad de medidas de mitigación a largo plazo. En El Bajito, el 36% de los transectos sigue mostrando erosión, mientras que en El Morro, la erosión afecta principalmente a la zona turística, lo que podría tener implicaciones socioeconómicas significativas.

Por último, los resultados del bosque aleatorio sugieren que el nivel del mar (SL) y la dirección de las olas (WDI) son las variables más influyentes en el desplazamiento de la línea costera (SLD) en ambas playas. Esto indica que, en el contexto de Tumaco, las fluctuaciones del nivel del mar y la dirección de las olas tienen un papel más decisivo en la erosión y acreción que otras variables como el periodo pico de las olas (PWP) o la altura significativa de las olas (SWH). La mayor importancia de estas variables en El Morro puede explicarse por su mayor exposición al mar abierto, en contraste con la protección natural que ofrece la Isla Bocagrande en El Bajito.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento al Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico (CCCCP) de la Dirección General Marítima (DIMAR) de Colombia, por proporcionar los datos recolectados durante sus campañas de medición, los cuales fueron esenciales para la configuración del modelo aplicado en este estudio.

Asimismo, agradecen al Fondo Fundación WWB Colombia por su apoyo financiero en las actividades de trabajo de campo en el marco de la tesis doctoral "Sistema de apoyo a la toma de decisiones para la gestión costera en respuesta a inundaciones y erosión costera: Estudio de caso en Tumaco-Nariño", de la cual forma parte este artículo.

Finalmente, agradecen al Instituto Javeriano del Agua y al Programa de la Maestría en Hidrosistemas de la Pontificia Universidad Javeriana, por su valioso aporte en términos de recursos materiales, incluyendo equipos, personal y apoyo económico, que hicieron posible el levantamiento de información primaria para el desarrollo de esta investigación.

Referencias

- Amma, P. K. G., & Bhaskaran, P. K. (2020). Role of mangroves in wind-wave climate modeling – A review. *Journal of Coastal Conservation*, 24(2), 21. <https://doi.org/10.1007/s11852-020-00740-0>
- Billet, C., Alonso, G., Danieli, G., & Dragani, W. (2024). Evaluation of beach nourishment in Mar del plata, Argentina: An application of the CoastSat toolkit. *Coastal Engineering*, 193, 104593. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2024.104593>

- Bryant, M. A., Bryant, D., Provost, L., Hurst, N., McHugh, M., Wargula, A., & Tomiczek, T. (2022). *Wave Attenuation of Coastal Mangroves at a Near-Prototype Scale* (ERDC TR-22-17). US Army Corps of Engineers. <https://apps.dtic.mil/sti/citations/AD1181016>
- Cano Calvo, C. (2021). *Gestión del riesgo en desastres en los procesos de planificación del desarrollo territorial en comunidades del pacifico colombiano. Estudio de Caso Zona urbana, Municipio de Tumaco, Departamento de Nariño* <https://ridum.umanizales.edu.co/handle/20.500.12746/4883>
- Deltares. (2014). *Water quality and aquatic ecology modelling suite D-Water Quality*.
- Deltares. (2022a). *Delft3D-Hydro-Morphodynamics* (Version 4.05).
- Deltares. (2022b). *Delft3D-WAVE User Manual* (Version 4.05).
- Idier, D., Bertin, X., Thompson, P., & Pickering, M. D. (2019). Interactions Between Mean Sea Level, Tide, Surge, Waves and Flooding: Mechanisms and Contributions to Sea Level Variations at the Coast. *Surveys in Geophysics*, 40(6), 1603–1630. <https://doi.org/10.1007/s10712-019-09549-5>
- Kadigi, R. M. J., Robinson, E., Szabo, S., Kangile, J., Mgeni, C. P., De Maria, M., Tsusaka, T., & Nhau, B. (2022). Revisiting the Solow-Swan model of income convergence in the context of coffee producing and re-exporting countries in the world. *Sustainable Futures*, 4. <https://doi.org/10.1016/j.sfr.2022.100082>
- Luan, H. L., Ding, P. X., Yang, S. L., & Wang, Z. B. (2021). Accretion-erosion conversion in the subaqueous Yangtze Delta in response to fluvial sediment decline. *Geomorphology*, 382, 107680. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107680>
- Marsooli, R., Orton, P. M., Mellor, G., Georgas, N., & Blumberg, A. F. (2017). A Coupled Circulation–Wave Model for Numerical Simulation of Storm Tides and Waves. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 34(7), 1449–1467. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-17-0005.1>
- Martins, K. A., Souza Pereira, P. de, Silva-Casarín, R., & Nogueira Neto, A. V. (2017). The Influence of Climate Change on Coastal Erosion Vulnerability in Northeast Brazil. *Coastal Engineering Journal*, 59(02), 1740007. <https://doi.org/10.1142/S0578563417400071>
- Martos, A., & Isabel, A. (2022). *The gulf of cadiz as a natural laboratory for the validation and exploitation of coastal altimetry and model data* [Doctoral thesis]. <https://rodin.uca.es/handle/10498/28930>
- Mullick, Md. R. A., Tanim, A. H., & Islam, S. M. S. (2019). Coastal vulnerability analysis of Bangladesh coast using fuzzy logic based geospatial techniques. *Ocean & Coastal Management*, 174, 154–169. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2019.03.010>
- Mury, A., Collin, A., Houet, T., Alvarez-Vanhard, E., & James, D. (2020). Using Multispectral Drone Imagery for Spatially Explicit Modeling of Wave Attenuation through a Salt Marsh Meadow. *Drones*, 4(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/drones4020025>
- Niño P., D. C., & Oviedo B., F. (2018). *Determinación de la variación morfológica costera de la Bahía de Tumaco, a partir de análisis multitemporal con sensores remotos*. <https://aquadocs.org/handle/1834/15220>

- Ortega, S., Osorio, A. F., & Agudelo, P. (2013). Estimation of the wave power resource in the Caribbean Sea in areas with scarce instrumentation. Case study: Isla Fuerte, Colombia. *Renewable Energy*, 57, 240–248. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.11.038>
- Paulus, R., Dewals, B. J., Erpicum, S., Pirotton, M., & Archambeau, P. (2013). Innovative modelling of 3D unsaturated flow in porous media by coupling independent models for vertical and lateral flows. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 246, 38–51. <https://doi.org/10.1016/j.cam.2012.07.032>
- Pollard, J., Spencer, T., & Brooks, S. (2019). The interactive relationship between coastal erosion and flood risk. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 43(4), 574–585. <https://doi.org/10.1177/0309133318794498>
- Pramanik, S., Mandal, S., Shee, A., Halder, S., & Sil, S. (2019). Tidal Circulation Studies Using Regional Model in the Bay of Bengal. In K. Murali, V. Sriram, A. Samad, & N. Saha (Eds.), *Proceedings of the Fourth International Conference in Ocean Engineering (ICOE2018)* (pp. 829–836). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-13-3119-0_55
- Rivas, M., Luna, P., & Lizarazo, J. (2019). Analytical fragility assessment of structures subjected to earthquake and tsunami loads: A case study on the colombian pacific coast. *Tecnia*, 29(2), 169–173. <https://doi.org/10.21754/tecnia.v29i2.699>
- Ruan, L., Yan, M., Zhang, L., Fan, X., & Yang, H. (2022). Spatial-temporal NDVI pattern of global mangroves: A growing trend during 2000–2018. *Science of The Total Environment*, 844, 157075. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157075>
- Son, S., Lynett, P., & Ayca, A. (2020). Modelling scour and deposition in harbours due to complex tsunami-induced currents. *Earth Surface Processes and Landforms*, 45(4), 978–998. <https://doi.org/10.1002/esp.4791>
- Sun, W., Liang, B., Shao, Z., & Wang, Z. (2022). Analysis of Komen scheme in the SWAN model for the whitecapping dissipation during the tropical cyclone. *Ocean Engineering*, 266, 113060. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.113060>
- Tamiminia, H., Salehi, B., Mahdianpari, M., Quackenbush, L., Adeli, S., & Brisco, B. (2020). Google Earth Engine for geo-big data applications: A meta-analysis and systematic review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 164, 152–170. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.04.001>
- Tejada, C. (2003). *Clima marítimo y dinámica litoral de la bahía de Tumaco, datos básicos para la evaluación de riesgos ambientales marinos*. 10(Boletín Científico CCCP), 83–96.
- Valderrama-Landeros, L., Flores-Verdugo, F., & Flores-de-Santiago, F. (2022). Assessing the Coastal Vulnerability by Combining Field Surveys and the Analytical Potential of CoastSat in a Highly Impacted Tourist Destination. *Geographies*, 2(4), 642–656. <https://doi.org/10.3390/geographies2040039>