

Evaluation of Alternatives for Coastal Protection, a Traditional Engineering Infrastructure and a Nature-Based Solution, using numerical models. Case Study: San Pedro, Ecuador

Iván Saltos-Andrade, MSc.¹; Gabriela Andrade-Bowen, Ing.¹; Bianca Maquilón-Muñoz, Ing.¹; Carlos Martillo-Bustamante, Ph.D.¹; Gina Andrade-García, MSc.¹; Jonathan Cedeño-Oviedo, MSc.¹; Eduardo Cervantes-Bernabe, MSc.¹

¹ Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Grupo de Investigación en Geociencias Marinas y Costeras (GEMAC)- Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar, Guayaquil, Ecuador, jsaltos@espol.edu.ec, gsandrad@espol.edu.ec, bmaquilo@espol.edu.ec, cmartill@espol.edu.ec, gandrade@espol.edu.ec, jcedeno@espol.edu.ec, ecervan@espol.edu.ec

Abstract— This article presents an analysis of coastal morphodynamics based on both methods of remote sensing and numerical modelling. The study indicates how coastal processes models can be used to explore plausible scenarios on how the coastline responds based on natural conditions and the construction of possible engineering solutions to the erosion problem.

To address that, the model was calibrated and validated with field measurements data. Then, two possible engineering solutions were tested such as a breakwater and a nature-based solution such as artificial coral reef.

The site selected was San Pedro beach, located in Santa Elena Province, Ecuador. The results show an erosion tendency with an average of 68 cm per year using remote sensing and 58 cm per year using numerical modelling. Even though breakwaters give an adequate coastal protection for the erosion issue, better results were found using artificial coral reef over time.

Keywords—Coastal erosion, coastal processes modelling, remote sensing, coastal protection, nature-based solutions, coral reef.

Digital Object Identifier (DOI):
<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2020.1.1.310>
ISBN: 978-958-52071-4-1 ISSN: 2414-6390

Evaluación de Alternativas de Protección Costera Clásicas y de Ingeniería Verde, utilizando Modelos Numéricos. Caso de Estudio: San Pedro, Ecuador.

Iván Saltos-Andrade, MSc.¹; Gabriela Andrade-Bowen, Ing.¹; Bianca Maquilón-Muñoz, Ing.¹; Carlos Martillo-Bustamante, Ph.D.¹; Gina Andrade-García, MSc.¹; Jonathan Cedeño-Oviedo, MSc.¹; Eduardo Cervantes-Bernabe, MSc.¹

¹ Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Grupo de Investigación en Geociencias Marinas y Costeras (GEMAC)- Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar, Guayaquil, Ecuador, jsaltos@espol.edu.ec, gsandrad@espol.edu.ec, bmaquilo@espol.edu.ec, cmartill@espol.edu.ec, gandrade@espol.edu.ec, jcedeno@espol.edu.ec, ecervan@espol.edu.ec

Resumen- El presente artículo presenta un análisis de la dinámica litoral, a partir de métodos tradicionales como son el uso de las imágenes de sensores remotos, pero también mediante el uso de herramientas tecnológicas como es el modelamiento numérico. El estudio muestra la potencialidad que tiene el uso de los modelos, para que una vez ajustados a la realidad, poder predecir el comportamiento de una playa después de algunos años, en condiciones normales o ante la intervención de protección costera.

Una vez calibrado el modelo se realizó una evaluación de dos alternativas ingenieriles para la protección de la playa i.e. con métodos clásicos de rompeolas o con métodos de ingeniería verde como son los corales.

Los resultados muestran que la playa de San Pedro, localizada en Ecuador, y que se tomó como referencia para el presente análisis, tiene una tendencia a la erosión con un promedio de 68 cm por año utilizando sensores remotos y 58 cm utilizando modelos numéricos.

Los resultados nos muestran que la protección costera con rompeolas no da una solución adecuada al problema de erosión y que más bien la solución con arrecifes de corales presenta mejores resultados para la protección costera.

Palabras claves: Erosión costera, modelos numéricos para erosión costera, sensores remotos, protección costera, ingeniería verde, arrecifes de corales.

Abstract- This article presents an analysis of coastal morphodynamics based on both methods of remote sensing and numerical modelling. The study indicates how coastal processes models can be used to explore plausible scenarios on how the coastline responds based on natural conditions and the construction of possible engineering solutions to the erosion problem.

To address that, the model was calibrated and validated with field measurements data. Then, two possible engineering solutions were tested such as a breakwater and a nature-based solution such as artificial coral reef.

The site selected was San Pedro beach, located in Santa Elena Province, Ecuador. The results show an erosion tendency with an average of 68 cm per year using remote sensing and 58 cm per year using numerical modelling. Even though breakwaters give an adequate coastal protection for the erosion issue, better results were found using artificial coral reef over time.

Keywords: Coastal erosion, coastal processes modelling, remote sensing, coastal protection, nature-based solutions, coral reef.

Digital Object Identifier (DOI):
<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2020.1.1.312>
ISBN: 978-958-52071-4-1 ISSN: 2414-6390

I. INTRODUCCIÓN

Las zonas costeras están expuestas a procesos naturales hidrodinámicos y morfodinámicos, que generan erosión o acreción, los mismos que tienen un impacto directo sobre las comunidades que ahí habitan. El cambio de posición de la línea de costa es causado por la influencia de parámetros locales (vientos, corrientes, oleaje) o globales (aumento del nivel medio del mar o El Fenómeno El Niño), los cuales pueden causar efectos erosivos de corto a largo plazo [1].

El método de detección del cambio de línea de costa automatizada por [2] de un periodo de 33 años determinó que el 24% de las playas del mundo se están erosionando a tasas mayores a 0.5 m/año. Las razones de la erosión de las playas son varias y también se vinculan estrechamente con el crecimiento demográfico debido a su intervención con obras costeras, dragados, ocupación física, etc [3]. Los efectos de un mal manejo ambiental de las costas pueden ser desde la pérdida de vidas humanas hasta grandes perjuicios económicos [4].

El proceso erosivo en las costas ecuatorianas es cada vez más notorio [5] lo que representa una amenaza para los pobladores, sus actividades y la infraestructura que está expuesta. Ante esta problemática, tradicionalmente, en la costa ecuatoriana se han usado infraestructuras ingenieriles como rompeolas y muros de protección que de cierta forma mitigan estos impactos en el corto plazo, pero que su funcionalidad se ve comprometida en el tiempo.

Basados en este escenario, este trabajo busca explorar posibles alternativas de protección costeras que podrían implementarse en la costa ecuatoriana, como pueden ser los arrecifes de corales artificiales y adicionalmente comparar el posible impacto sobre la línea de costa en versus la implementación de una infraestructura clásica como es el rompeolas.

El desarrollo de este trabajo ha tenido algunos desafíos y limitaciones como es la falta de mediciones continuas temporales y espaciales a lo largo de la costa ecuatoriana y en específico en zonas muy pequeñas como la zona de estudio. Sin embargo, siguiendo una metodología que permite determinar

una tasa de cambio de línea de costa, a través del uso de imágenes de sensores remotos, para luego ajustar modelos numéricos construidos con datos de campo y de base de datos de boyas virtuales, han sido de gran utilidad para la evaluación de dos tipos de alternativas de protección costera. La zona seleccionada para este trabajo de investigación de aplicación ingenieril fue la playa de la comuna de San Pedro ubicada en la Provincia de Santa Elena en Ecuador, donde se evaluaron las alternativas de ingeniería clásica y la alternativa más amigable con el ambiente, para lo cual se usó el modelo numérico computacional que en este caso fueron MIKE 21SW y LITPACK de la compañía DHI.

A. Descripción General del Área de Estudio

La comuna de San Pedro se localiza en el margen activo en subducción del Ecuador continental, en la zona correspondiente la parroquia Manglaralto de la provincia de Santa Elena (Fig. 1a).

Esta localidad cuenta con una longitud de playa de más de 2000 metros (Fig. 1b), cuya evolución morfodinámica está dominada por principalmente por el oleaje y mareas. Su forma es resultado de los procesos marino-costeros: las olas, vientos y corrientes influyen con el transporte de sedimentos, erosión y acreción [6].

B. Características Morfológicas

Al sur de la zona de estudio se encuentra al acantilado de San Antonio, formación que llega a una elevación de 40 metros. Este acantilado está compuesto por la formación tablarzo del Cuaternario con conglomerados y areniscas, los cuales se erosionan principalmente debido a la acción de las olas [7]. Según [6], el acantilado aporta sedimentos a la playa debido a que se ha contemplado en ciertos periodos del año la aparición de rocas de dicho origen. Esta saliente además aporta con una formación de circulación de viento local ya que cumple con la función de un muro u obstáculo (Fig. 1b).



Fig. 1. (a) Ubicación regional de la zona de estudio. (b) Mapa del área de estudio de la playa de la comuna San Pedro, Santa Elena. Las fotos muestran algunos de los problemas de erosión que tiene la zona.

C. Características Meteorológicas

El clima de la zona es árido, teniendo entre 26.5°C y 21.4°C de temperatura, siendo la máxima en el mes de abril y la mínima entre julio y septiembre. La precipitación promedio fluctúa entre 125 y 250 mm [8], el 96% del valor total anual se concentra entre enero y abril. Según la serie temporal de vientos presentada por el INOCAR desde 1945 a 1977, existe un patrón con valores entre 2.9 – 4.2 m/s con direcciones predominantes en el cuadrante suroeste. La velocidad máxima es de 16 m/s con un 0.2% de ocurrencia en diciembre. La velocidad media anual es de 4.1 m/s [9].

D. Características Hidrodinámicas

El régimen de oleaje, las corrientes y las mareas son procesos hidrodinámicos que gobiernan la dinámica del área de estudio. Según [10], la playa de San Pedro se encuentra sujeta a la alta energía del oleaje procedente del SO, O y NO, en donde el oleaje del SO es dominante en esta zona.

Debido a la batimetría del área, las olas experimentan un proceso de refracción particular, siendo con mayor energía en la saliente de la formación del acantilado de San Antonio. El tipo de marea presente en nuestras costas es semidiurno de aproximadamente 2.5 m de rango. La mayor velocidad que alcanzan las corrientes fue de 31.38 m/s durante sicigia y la menor de 9.26 m/s, con promedio de 11.32 m/s a 131° [11].

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).

II. MÉTODOS Y DATOS

A. ETAPA 1 - Análisis Temporal y Espacial del Cambio de la Línea de Costa usando Sensores Remotos.

Para determinar la dinámica de la línea de costa en la zona de estudio, durante los últimos 20 años, se adquirieron fotografías aéreas de los años 1999, 2008 y 2012 del Instituto Geográfico Militar del Ecuador (IGM). Adicionalmente se generó un mosaico de ortofotos levantadas en campo con Dron y GPS diferencial, para el año del 2019 (Fig. 2).

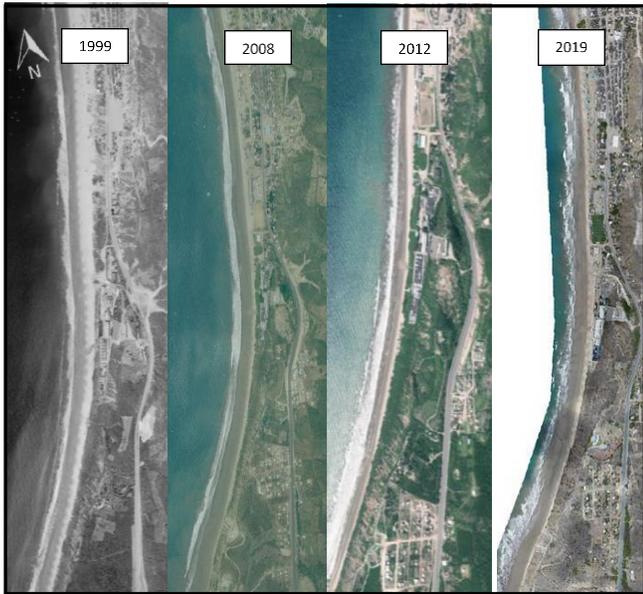


Fig. 2. Fotografías aéreas y ortofoto de la playa de la comuna San Pedro.

Una vez obtenida las imágenes se procedió a georreferenciarlas, tomando como referencia la más actual (ortofoto de 2019), para a partir de ella ubicar espacialmente las demás. Se considerando al menos 10 puntos de control buscando los elementos que se han mantenido estables en su posición durante los años de estudio, sobre todo considerando las infraestructuras de la población.

Una vez que las imágenes fueron georreferenciadas, se procedió a vectorizar manualmente la línea de costa en cada imagen. Para evitar confusiones de la posición de la marea en el momento en que fue tomada cada imagen, se tomó como referencia de la línea de costa, la línea de vegetación, que fue considerada como la zona hasta donde ha llegado la influencia del oleaje al tiempo de la fotografía. Este proceso se lo desarrolló haciendo uso del software QGIS.

Para evaluar las zonas de erosión y acreción que se ha dado durante los últimos 20 años en la playa de San Pedro se usó el software RStudio. A través de este análisis que involucró características espaciales y estadísticas se determinó la tasa anual de erosión-acreción para diferentes sitios de la playa.

B. ETAPA 2 - Análisis Temporal y Espacial del Cambio de la Línea de Costa con Modelos Numéricos.

La segunda etapa del trabajo consistió en poder operar modelos numéricos computacionales para observar la variación de la línea de costa. Para ello se utilizaron dos módulos del software MIKE ZERO como son MIKE 21SW y LITPACK. El primero permitió transformar el oleaje de aguas profundas a someras, y el segundo con sus sub-módulos: LITDRIFT facilitó obtener el transporte de sedimentos y LITLINE se generó la proyección de la línea de costa. Los datos utilizados para las iteraciones del modelo tuvieron dos fuentes de entrada: a) levantamiento en campo, y b) colección de base de datos de parámetros oceanográficos mundiales.

B.1. Los datos de campo fueron colectados mediante dos salidas a la playa de San Pedro, la primera fue en Sicigia el 26 de octubre del 2019 y la segunda en Cuadratura el 16 de noviembre del 2019. Previamente se establecieron 4 estaciones de muestreo, ubicadas de Norte a Sur, con un espaciamiento promedio de 450 metros (Fig. 3). Los datos colectados en campo fueron: perfiles de playa, batimetría, topografía, carta náutica y características litorales, sedimentos.

B.2. Los parámetros oceanográficos fueron obtenidos de la página Asia-Pacific Data Research Center, en el WaveWatch- III (WWIII), se obtuvieron datos de altura, periodo y dirección del oleaje desde el año 1999 hasta el 2012, los cuales fueron descargados de la boya más cercana a la zona de estudio.

Los valores obtenidos se ingresaron en el módulo MIKE 21SW para transformar el oleaje desde aguas profundas en 1500m de profundidad hasta aguas someras al veril de 20m. Estos resultados fueron comparados con los de campo para el proceso de calibración del modelo. Los mismos que resultaron coherentes a pesar de que estaban los del modelo al veril de 20 m y los de campo en la zona de rompiente (Tabla II).

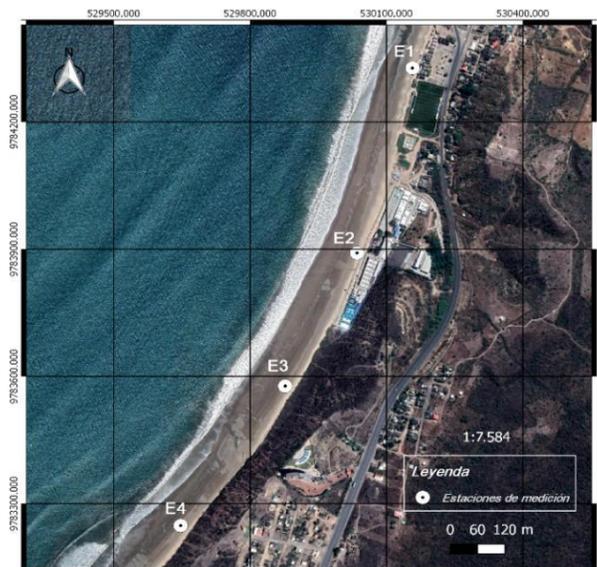


Fig. 3. Estaciones de campo para mediciones litorales.

Con los resultados obtenidos con el MIKE 21SW, i.e. una climatología mensual de 1999 al 2012 y considerando los parámetros medidos en campo, i.e. perfiles de playa, batimetría, rugosidad, diámetro medio de grano, velocidad de caída y dispersión geométrica (Tabla I) se ingresaron en el sub-módulo LITDRIFT para calcular el transporte litoral. Los resultados obtenidos en el LITDRIFT se compararon con los resultados de transporte calculados manualmente con las fórmulas propuestas por el Shore Protección Manual [12], del Coastal Engineering Research Center (CERC). Una vez que se verificó su coherencia se usó el sub-módulo LITLINE, para determinar la posición de la línea de costa en el periodo de tiempo analizado.

TABLA I
PARÁMETROS DE LOS PERFILES DE PLAYA DE “SAN PEDRO”
PARA INGRESAR AL SUB-MÓDULO LITDRIFT

Ítem	E1	E2	E3	E4	Unidades
Batimetría	-20 a 4	-20 a 4	-20 a 4	-20 a 4	[m]
Rugosidad	0.04	0.04	0.04	0.04	[m]
Diámetro medio del grano	0.31	0.25	0.35	0.21	[mm]
Velocidad de caída	0.042	0.029	0.045	0.025	[m]/s
Dispersión geométrica	1.459	1.5	1.748	1.485	()

C. ETAPA 3 - Evaluación de los diseños de ingeniería para la protección costera en la zona de estudio.

La tercera etapa consistió en modelar el cambio de la línea de costa de la playa San Pedro bajo la presencia de obras ingenieriles para protección costeras. Se escogió como estructura tradicional un rompeolas costa afuera y como diseño ingenieril verde, un diseño de arrecife de coral artificial. Se realizó un diseño de cada una de las alternativas para luego ingresarlas al modelo y evaluar los resultados.

C.1. Diseño de rompeolas

Para el diseño de un rompeolas se siguió la metodología del Shore Protection Manual (SPM, 1984), en donde definen el largo de los rompeolas como “Ls”, el espaciamiento entre las estructuras también conocida como “gaps” se lo denomina “Lg” y la distancia de las estructuras a la línea de costa se lo asigna como “x” (Fig. 4).

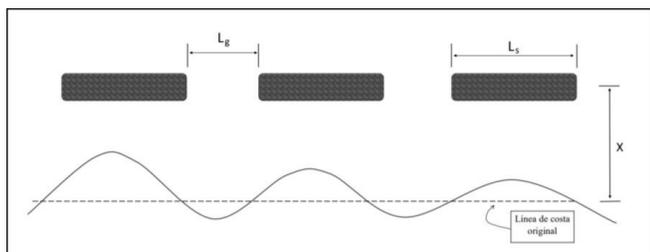


Fig. 4. Parámetros utilizados en formulaciones empíricas para diseñar un rompeolas costa afuera [13] Fuente: Cansing y Mena 2018

Se realizó un diseño de una configuración de 4 rompeolas ubicados en el veril de 3 metros, espaciados a 80 metros con una longitud de 120 metros cada uno como se puede observar en la Fig. 5.

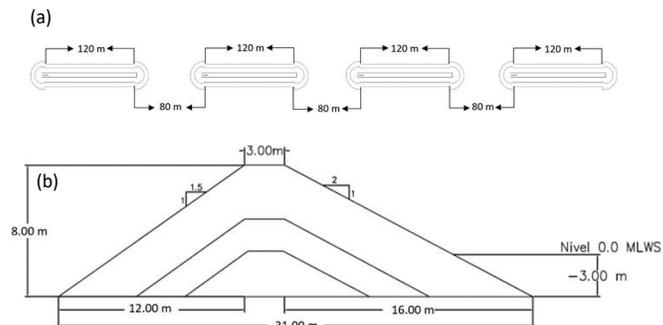


Fig 5. Dimensiones del rompeolas que se ingresó al modelo numérico. (a) vista superior de las dimensiones y b) vista sección transversal de la estructura con sus dimensiones.

C.2. Diseño de arrecife de corales artificiales

En las costas ecuatorianas podemos encontrar arrecifes de corales de manera natural. [14] indica cuales son las especies que se encuentran tanto en las costas continentales del Ecuador y de las Islas Galápagos. Por otra parte, actualmente, existen alternativas de estructuras ingenieriles ecológicas para la protección costera que se colocan en el fondo marino y estos permiten que en su superficie crezca vegetación o arrecifes de corales [15].

Basados en estos conceptos, se diseñó una estructura eco-amigable, que permita cambiar la pendiente y la rugosidad del fondo marino como se puede observar en las Figs. 6 y 7.

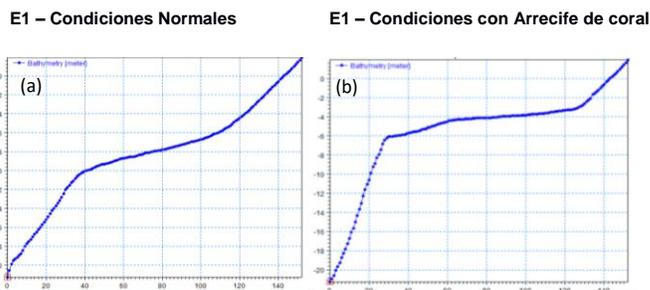


Fig. 6. Perfiles ingresados en el modelo (a) Perfil de la estación E1 sin estructura y (b) Perfil de la estación E1 si existiera un arrecife de coral según el diseño. El eje horizontal (x) en la indica el número de datos, los cuales se distanciaron cada 12 metros y el eje vertical (y) refleja la profundidad en metros.

En la Fig. 7, se muestra el diseño conceptual de estas estructuras en bloque y cómo se modifica la pendiente de la playa de San Pedro. Adicionalmente, la presencia del arrecife de coral incrementaría la rugosidad del fondo, estando en buenas condiciones de 0.04 m a 0.2 m [16].



Fig. 7. Cambio de la pendiente mediante estructuras eco amigables que permiten el crecimiento del arrecife de coral.

III. RESULTADOS

Analizando los resultados de la ETAPA 1, mediante el uso de imágenes satelitales, SIG y RStudio observamos que la línea de costa en la Playa de San Pedro presenta una tendencia general a la erosión (Fig. 8), la misma que tiene un promedio de 68 cm. anuales. Sin embargo, también se determinó que la tasa de erosión ha variado en diferentes periodos de tiempo y por zonas, lo cual se muestra en la Fig. 9.

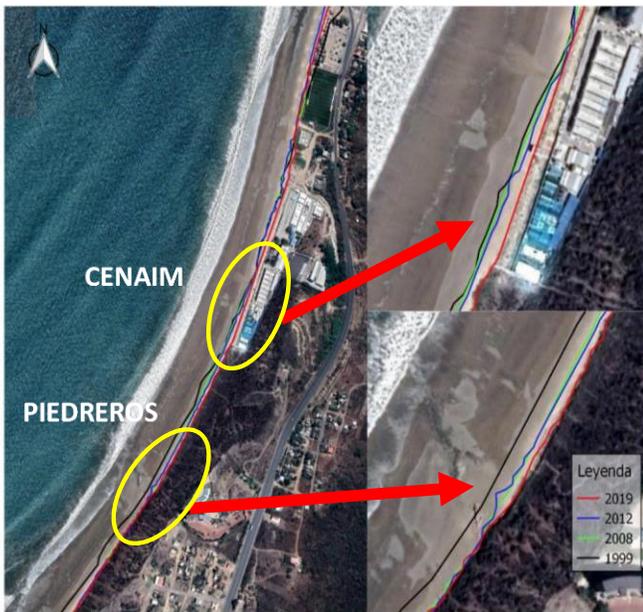


Fig. 8. Cambio de las líneas de costa de San Pedro para los años 1999, 2008, 2012 y 2019 sobre un mismo lienzo.

Los resultados obtenidos de la transformación del oleaje con MIKE 21SW se muestran en la Tabla II. De ahí podemos resaltar que la Altura Significativa (H_s) tuvo un valor de 1.31 metros, el Periodo Significativo (T_s) un valor de 13.11 segundos y la Dirección predominante de 285 grados. En la Tabla II podemos observar que los valores obtenidos con MIKE 21SW poseen una muy buena correlación con los datos de campo.

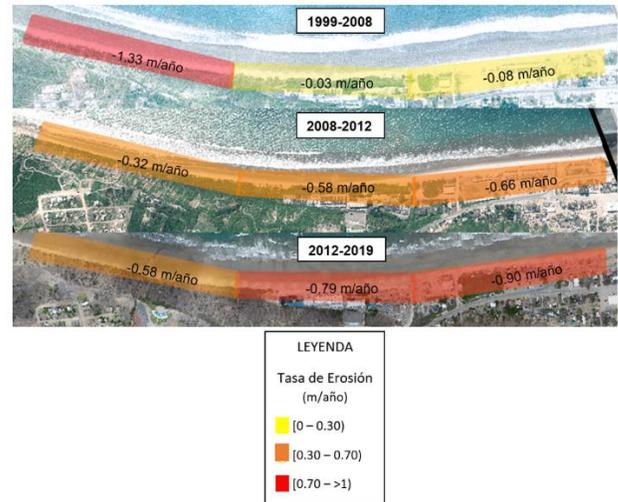


Fig. 9. Zonas y tasas de erosión calculadas para diferentes periodos de tiempo. Se puede observar que en la zona central y Norte se intensifica con el tiempo.

TABLA II
RESULTADOS DE LA TRANSFORMACIÓN DEL OLEAJE DE AGUAS PROFUNDAS HACÍAS AGUAS SOMERAS USANDO MIKE 21SW VERSUS MEDICIONES DE CAMPO. PODEMOS OBSERVAR ALTURA, PERIODO Y DIRECCIÓN DE OLAS.

ALTURA DE OLA [metros]		
Parámetro	MIKE 21 SW	Medición de Campo
$H_{1/3}$	1.31	0.82
$H_{1/10}$	1.57	1.07
H_{prom}	0.94	0.55
PERIODO [segundos]		
Parámetro	MIKE 21 SW	Medición de Campo
$T_{1/3}$	13.11	14.68
$T_{1/10}$	14.49	16.38
T_{prom}	10.84	11.76
DIRECCIÓN [grados]		
Profundidad	MIKE 21 SW	Medición de Campo
20 [m]	230	/
6 [m]	285-320	280

Del mismo modo, se compararon los resultados obtenidos con LITPACK y se compararon con los datos de mediciones de campo obteniendo valores de transporte de sedimentos como se muestra en la Tabla III. Los números muestran que en los datos de campo el transporte calculado es menor que en comparación a los datos del WWIII y del modelo, lo cual tiene sentido debido a que este valor es calculado con datos visualizados cerca de la playa, mientras que el valor del WWIII se ajusta bastante bien

a los valores que generó el modelo numérico, lo que satisface el uso del programa.

TABLA III
RESULTADOS DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

Tipo de Transporte	Medición Campo (CERC)	WWIII	LITPACK	Unidades
Transporte Neto	3.73E+05	5.31E+06	4.92E+06	m ³ /año
Transporte Bruto	4.31E+05		5.20E+06	m ³ /año

En la Tabla IV se puede comparar el resultado de cuanto se ha erosionado la playa durante el periodo 1999 y 2012 obtenidas con las imágenes satelitales (ETAPA 1) y el modelo numérico (ETAPA 2). A pesar de la diferencia el resultado obtenido por el modelo numérico puede ofrecer confiabilidad para los resultados posteriores.

TABLA IV
RESULTADOS DE EROSIÓN COSTERA PARA EL PERIODO 1999-2012

EROSIÓN 1999 - 2012	
Imágenes Aéreas	Modelo Numérico
8.96 [m]	7.59 [m]

Adicionalmente, se comparó el cambio de la línea de costa desde el año 1999 hacia el 2019 de los resultados generados con el modelo numérico y las imágenes aéreas (Fig. 10). Se observó, que existía una tendencia muy similar, dando confianza a este proceso de calibración y validación para generar posibles escenarios hacia el 2026 en condiciones naturales (sin estructuras de protección) y con la presencia de estructuras (rompeolas y arrecife de corales artificiales).

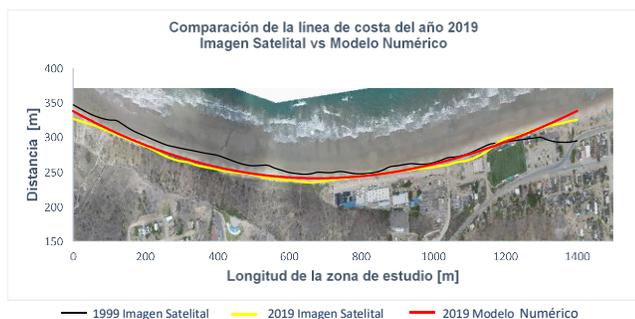


Fig. 10. Comparación del cambio de la línea de costa desde 1999 hasta 2019 usando imágenes satelitales y un modelo numérico.

Los resultados usando LITPACK para conocer el cambio de la línea de costa en presencia de estructuras de protección costeras como son los rompeolas y los arrecifes de corales hacia el año 2026 se muestran en la Fig. 11.

Para el caso del rompeolas, observamos que en zona sur del sitio de estudio existiría sedimentación de 30 metros aproximadamente, lugar donde se forma el primer tómbolo que se encuentra frente a la primera estructura, seguida por una zona erosiva donde la línea de costa retrocede alrededor de 8.5 metros. Del mismo modo, con los siguientes rompeolas el programa refleja el comportamiento natural de estas estructuras, donde se forman tómbolos en la sombra de los rompeolas y erosión frente a los espaciamientos. También se observa que en la zona norte de la erosión es más pronunciada de hasta casi 40 metros. En el modelamiento del arrecife de coral se observa una respuesta de la costa un poco más uniforme frente a la erosión. En el norte y el sur de la playa, se presentan zonas donde hay sedimentación de hasta alrededor de 35 metros, y las zonas erosivas, en el centro del área de estudio son significativamente menores.

Con los resultados obtenidos con el modelaje se puede observar que la alternativa del uso de arrecifes de corales daría una estabilidad a la playa, hasta el año 2026, mientras que los rompeolas generarían pequeñas zonas de acreción, justo frente a los rompeolas, pero seguida de erosión. Considerando que los arrecifes brindan una protección más estable y que podrían aportar con otros servicios como lo es el turismo, mayor biodiversidad, recreación, aumento del servicio ecosistémico, lo más recomendable sería hacer uso de ingeniería verde para la protección costera de esta zona.

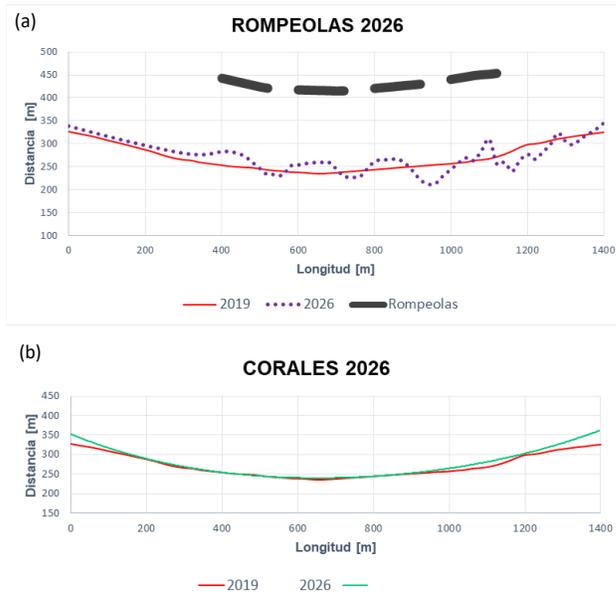


Fig. 11. Resultados obtenidos de la generación de posibles escenarios del cambio de la línea de costa hacia el año 2026 en presencia de (a) rompeolas y (b) arrecifes de corales artificiales.

IV. CONCLUSIONES

El uso de modelos numéricos computacionales nos permite evaluar las tendencias de la variación de la línea de costa y su dinámica en las playas. Esto nos permite entre otras cosas analizar su comportamiento frente a estructuras ingenieriles en función del tiempo. Esto desde el punto de vista de ingeniería nos permite explorar opciones basados en posibles diseños y entender como el sistema se comportaría. A pesar de la ventaja que implica el uso de estas tecnologías para la toma de decisiones, es importante acotar que los modelos numéricos computacionales también poseen limitaciones y que la calidad de los datos juega un papel importante para la correcta calibración y validación del modelo.

Los resultados de las imágenes satelitales para la playa de San Pedro nos indican que la playa se erosiona en una tasa de alrededor de 68 cm anuales. Del mismo modo, los resultados del modelo numérico computacional nos muestran una tasa de erosión de 58 cm anuales, con lo cual se validó el resultado. Ambos resultados son coherentes con las tasas de erosión que se han encontrado en algunos lugares de la costa ecuatoriana durante los últimos 20 años [2].

La generación de posibles escenarios hacia el año 2026 en condiciones naturales, muestra cómo la playa sigue retrocediendo. En contraste, observamos que con la implantación de rompeolas existiría una acreción al sur la playa y también acreción en forma de tómbolos (típicos de estas estructuras), pero que, sin embargo, entre los espacios que no son protegidos por el rompeolas existiría mayor erosión. Del mismo modo, también se puede observar que con la implantación ingenieril de arrecifes de corales artificiales la tasa de erosión disminuiría en comparación a la tendencia natural y con la ventaja de que la variación de la línea de costa sería más uniforme en comparación que los rompeolas.

El uso de estructuras ingenieriles convencionales (e.j. rompeolas, espigones, entre otros) ha ayudado a la protección costera, sobre todo frente a procesos erosivos de playas, sin embargo, los resultados obtenidos en este trabajo nos indican que pueden existir otras alternativas ingenieriles que podrían brindar una mejor solución en función del tiempo y al mismo tiempo brindar soluciones muchas más amigables con el ambiente. Sin embargo, este tema merece ser profundizado y analizado para seguir explorando ventajas y desventajas frente a los diseños de protección costeras tradicionales.

Los arrecifes de coral sirven de protección costera ya que atenúan la energía del oleaje, además brindan otros servicios como lo es el turismo, mayor biodiversidad, recreación, alimento.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al proyecto de Vinculación con la Sociedad de la FIMCM-ESPOL denominado “Potenciación de capacidades comunitarias para mejorar la capacidad de resiliencia ante eventos extremos de origen marino y antropogénico con afectación en la zona costera”, por la ayuda logística para el levantamiento de datos en campo, por el financiamiento del levantamiento de datos batimétricos de la zona de estudio, pero sobre todo por habernos propuesto desarrollar el presente proyecto que aportaría al desarrollo sostenible de la población de San Pedro.

REFERENCIAS

- [1] Santana, E., Dumont, J., & King, A. (2001). Los efectos del fenómeno El Niño en la ocurrencia de una alta tasa de erosión costera en el sector de Punta Gorda, Esmeraldas. 11(1), 1–8.
- [2] Luijendijk, A., Hagenaars, G., Ranasinghe, R., Baart, F., Donchyts, G., & Aarminkhof, S. (2018). The State of the World’s Beaches. *Scientific Reports*, 8(1), 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-24630-6>
- [3] Sardá, R., Conde, R., Casadesús, M., Sánchez, A., & Pablo, J. (2013). Erosión en las playas y gestión desintegrada: la problemática actual de la playa de S’Abanell. *Hacia Un Nuevo Modelo Integral de Gestión de Playas*, September, 51–71.
- [4] Yáñez, A. (2010). Impactos del cambio climático sobre la zona costera. México: Instituto Nacional de Ecología INE-SEMARNAT e Instituto de Ecología AC INECOL.
- [5] Caiza, R., & Nativi, S. (2019). Evaluación y Modelamiento del Cambio de Línea de Costa en Condiciones Naturales y bajo Influencia de Obras de Protección Costera. Caso de Estudio: Libertador Bolívar, Santa Elena-Ecuador. 1–230.
- [6] Ruiz, V. (2002). "Estudio preliminar de la variación anual del hiperbentos intermareal de una playa arenosa de la provincia del Guayas (CENAIM-SAN PEDRO)". ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL.
- [7] Piedra, J. (1990). Procesos Litorales en San Pedro-Valdivia. Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- [8] Sánchez, E., Chang, J., Villalba, P., Andrade, G., Piedra, J., Santos, E., Solórzano, I., & Orta, F. (1995). Características litorales en el sector comprendido entre San Pedro y Manglaralto.
- [9] Sambito. (2019). Estudio de impacto ambiental por la construcción, operación y mantenimiento de la planta de refinación de sal de la empresa ecuatoriana de sal y productos QUIMICOS ECUASAL.
- [10] Allauca, S. (1985). Estudio del Oleaje en la zona de Valdivia. *Acta Oceanográfica*.
- [11] Paredes R. (1984). Estudio de Corrientes Marinas en la zona Valdivia - San Pedro. Tesis de Grado ESPOL.
- [12] Coastal Engineering Research Center (US). (1984). Shore protection manual US Army Coastal Engineering Research Center.
- [13] Cansing, S., & Mena, G. (2018). “Diseño de una estructura de protección costera para playa bruja, ubicada en la comunidad libertador bolívar-provincia de Santa Elena.”

[14] Glynn, P. W. (2003). Coral communities and coral reefs of Ecuador. *Latin American Coral Reefs*, 1988, 449–472. <https://doi.org/10.1016/B978-044451388-5/50020-5>.

[15] EConcrete. (2019). Products - EConcrete. <https://econcretetech.com/>

[16] Golshani, A., Baldock, T. E., Mumby, P. J., Callaghan, D. P., Nielsen, P., & Phinn, S. (2012). Climate impacts on hydrodynamics and sediment dynamics at reef islands. *Proc 12th Int Coral Reef Sym*, Cairns, Australia, July, 10–13.