

Modelado y análisis de la transformación del oleaje en la Bahía de Santa Elena- Ecuador en el período 2016-2020



Modelling and analysis of the wave transformation in the Bay of Santa Elena-Ecuador in the period 2016-2020.

Espinoza Villacís, Elvis; González Muñoz, Rafael; Martillo Bustamante, Carlos; Saltos Andrade, Iván

 **Elvis Espinoza Villacís** eaespino@espol.edu.ec
ESPOL, Ecuador

 **Rafael González Muñoz** rafdgonz@espol.edu.ec
ESPOL, Ecuador

 **Carlos Martillo Bustamante**
cmartill@espol.edu.ec
ESPOL, Ecuador

 **Iván Saltos Andrade** jsaltos@espol.edu.ec
ESPOL, Ecuador

ACTA OCEANOGRÁFICA DEL PACÍFICO

Instituto Oceanográfico y Antártico de la Armada, Ecuador

ISSN: 1390-129X

ISSN-e: 2806-5522

Periodicidad: Semestral

vol. 5, núm. 1, 2023

acta.oceanografica@inocar.mil

Recepción: 19 Noviembre 2022

Aprobación: 01 Diciembre 2022

URL: <http://portal.amelica.org/ameli/journal/648/6483742002/>

DOI: <https://doi.org/10.54140/raop.v3i1.55>

Resumen: El oleaje es uno de los parámetros fundamentales en la evolución de una línea de costera. El conocimiento de su comportamiento detallado, al depender de diferentes variables estocásticas, es muy complejo. Sin embargo, mediante el análisis de series temporales es posible tener una idea de las condiciones de oleaje en una zona costera. En el presente trabajo se describen y analizan las condiciones de oleaje en la Bahía de Santa Elena, en el sector comprendido entre las playas de Salinas y Salango, en el lapso 2016-2020. Se simularon distintas condiciones de oleaje para cada mes del período de estudio, considerando las variables altura significativa de ola, período y dirección de oleaje, mediante el uso del modelo DELFT3D, módulo WAVE. Los resultados fueron comparados con la simulación Global Ocean Physics Reanalysis, a partir de dos boyas virtuales cercanas a la costa. De acuerdo con los resultados, cerca de las costas de la bahía de Santa Elena se encuentran condiciones de oleaje con alturas de 0.60 m a 0.93 m, dirección de aproximación de 221.1° a 270.1° y períodos de 11.5 s a 16.0 s. Los resultados obtenidos permiten tener una malla espacial continua de referencia sobre el comportamiento del oleaje en Santa Elena, la misma que podría ser mejorada con datos de campo a lo largo del tiempo.

Palabras clave: Modelación, Altura Significativa del Oleaje, Período de Oleaje, Dirección de Oleaje, DELFT-3D.

Abstract: The waves are one of the fundamental parameters in the evolution of a coastline. Knowing its detailed behavior, as it depends on different stochastic variables, is very complex. However, through the analysis of time series, it is possible to have an idea of the wave conditions in a coastal area. In the present work, the wave conditions of the Bay of Santa Elena are described, in the sector between the beaches of Salinas and Salango, in the period 2016-2020. Different wave conditions were simulated for each month of the study period, considering the variables: significant wave height, period, and wave direction by using the DELFT-3D model, WAVE module. The results were compared with the Global Ocean Physics Reanalysis model, from two virtual buoys near the coast. In general, near the shores of the Bay of Santa Elena there are wave conditions with heights from 0.60 m to 0.93 m, approach direction from 221.1° to 270.1° and periods from

11.5 s to 16.0 s. The results obtained allow us to have a continuous spatial reference grid on the behavior of the waves in Santa Elena, which could be improved with field data over time.

Keywords: Modelling, Significant Wave Height, Wave Period, Wave Direction, DELFT-3D.

Introducción

Desde hace varios años atrás, se ha reconocido la importancia de obtener datos del oleaje en las zonas costeras. Esta información es crítica para la elaboración de planes de mitigación de la erosión de costas, diseño de obras ingenieriles y, en general, para la gestión y manejo de las playas. Por estos motivos, las condiciones de estados de mar para caracterizar la incidencia del oleaje dentro de las costas son de gran relevancia en el desarrollo marítimo, territorial costero, productivo, turístico y ecológico. (Hubertz, 1995) (Thoresen, 2003) (Ariza, Jiménez, & Sardá, 2008) (Jiménez, Tejeida, Rojas, & Coria, 2021)

Para obtener registros de las características básicas de oleaje, comúnmente se utilizan equipos como boyas u olígrafos, no obstante, existen limitaciones, ya que no pueden cubrir áreas extensas. Adicionalmente, su uso representa altos costos de instalación y mantenimiento. Una alternativa frente a estos problemas es la utilización de modelos computacionales, mediante los cuales es posible obtener información del oleaje en alta resolución a lo largo de una zona costera, y en menor costo y tiempo, (Cavaleri, Barbariol, & Benetazzo, 2020)

Como parte del proyecto “Registro de amenazas naturales en la costa del Ecuador como apoyo a la toma de decisiones para el ordenamiento y gestión del riesgo” (RECORD) del grupo de investigación Geociencias Marinas y Costeras (GEMAC) de ESPOL, el cual comprende varios trabajos de investigación y trabajos de graduación, se ha registrado en campo la información de parámetros básicos del oleaje que arriba a las playas de Santa Elena.

Por mencionar algunos de estos trabajos: Nativí, et al. (2021) registra en la comunidad de Libertador Bolívar una altura significativa de ola de 0.7 m, períodos de 13.0 s - 16.0 s y dirección de 243°. Saltos, et al. (2020) reporta en la comuna de San Pedro una altura significativa de ola de 0.82 m, período 11.76 s y dirección de 280°, en promedio. Ramos, et al. (2020) refiere en la comuna La Entrada, al norte de Santa Elena, un oleaje de altura significativa de 1.5 m, período de 12 s y dirección de 220°, en promedio.

Por otro lado, a pesar de los esfuerzos realizados para la recolección de esta información, no ha sido posible obtener datos continuos de manera espacial y temporal en toda la Bahía de Santa Elena.

Bajo esta necesidad, el presente estudio emplea un modelo computacional espectral, como es DELFT3D-WAVE, para simular la transformación del oleaje desde aguas profundas hacia aguas someras, con el objetivo de obtener datos mensuales sobre la altura significativa, período y dirección del oleaje en la bahía de Santa Elena, en el periodo de tiempo entre 2016-2020.

Área de estudio

La provincia de Santa Elena posee un área aproximada de 3.762 km., ubicada geográficamente al occidente el país limitado, al norte con Prov. Manabí, al este y sur con Prov. Guayas y franqueada por el Océano Pacífico. (Pino, 2022).

El área de estudio se encuentra delimitada entre las playas de Salinas y Salango con una longitud aproximada de 150 km (Figura 1) Esta zona costera presenta un relieve diverso, compuesto por playas de barrera, acantilado altos y bajos, planicies litorales y prolongaciones arenales. (Cedeño & Mendez, 2022)

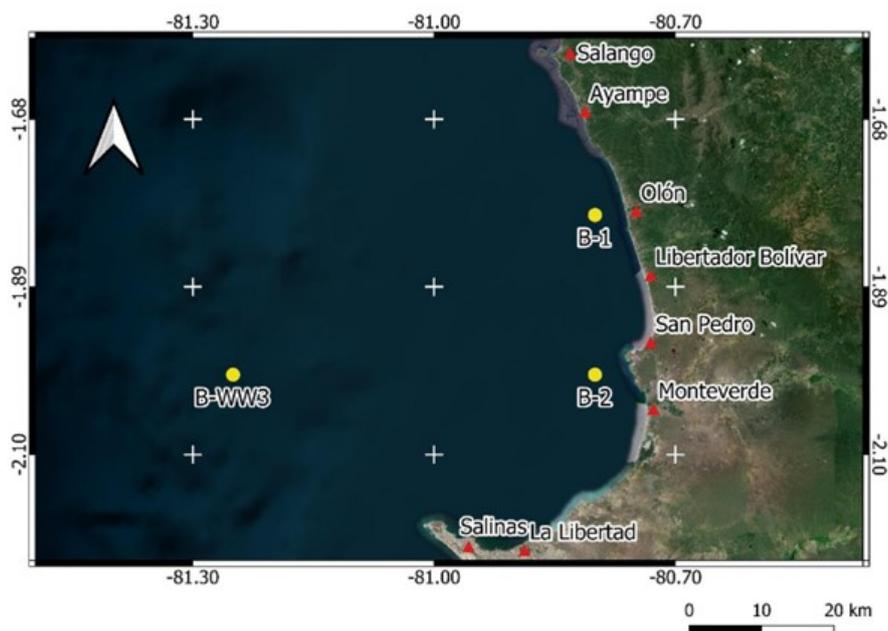


Figura 1

Área de estudio. Bahía de Santa Elena, Ecuador. B1 Boya virtual 1 de estudio (-1.8°, -80.8°), B2 Boya virtual 2 de estudio (-2.0°, -80.8°). BWW. Boya virtual modelo WAVEWATCH (-2.0°, -81.25°)

Datos

Oleaje

Para dar una descripción general del oleaje que se propaga hacia las costas de Santa Elena, se usaron datos del modelo WAVEWATCH III para la década del 2011-2020. (NWS, 2009), obtenidos desde la ubicación de la boya virtual B-WW3, la cual se puede apreciar en la Figura 1 y en la Tabla 1.

Como se muestra en la Figura 2. El oleaje en la zona de Santa Elena proviene mayoritariamente del sur-suroeste, con rango de direcciones de 180°-215°. Aunque también proviene oleaje desde el oeste, en dirección de 270° Las alturas varían en un rango de 0.9 m a 2.7 m.

Considerando la misma década, el período de oleaje varía en un rango de 10.0 s a 18.0 s, tal como se muestra en la Figura 3.

Tabla 1

Ubicaciones geográficas de las boyas virtuales de WAVERYS Coordenadas UTM Zona 17S

	Latitude (°)	Length (°)
Buoy B-1	-1.8°	-80.80°
Buoy B-2	-2.0°	-80.80°
Buoy WW3	-2.0°	-81.25°

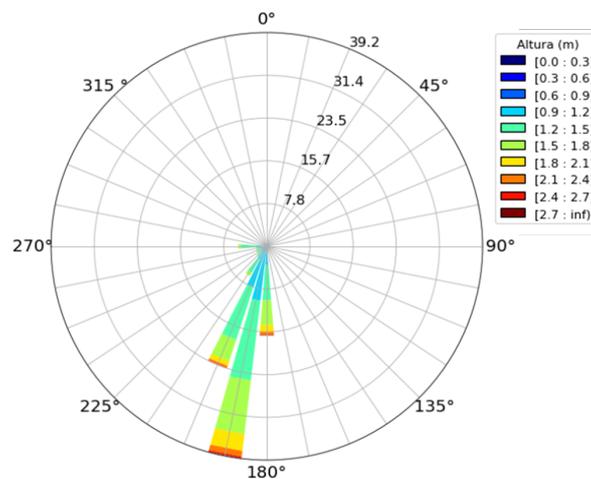


Figura 2

Rosa de oleaje (altura significativa y dirección) en aguas profundas para el período 2011-2020. Datos obtenidos del modelo WAVEWATCH III en la ubicación [-2.0°, -81.25°]

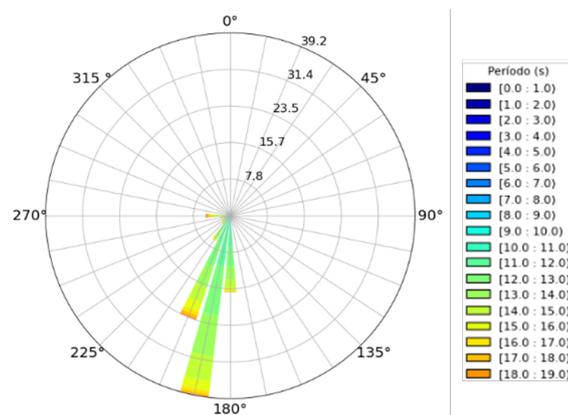


Figura 3

Rosa de oleaje (período y dirección) en aguas profundas para el período 2011-2020. Datos obtenidos del modelo WAVEWATCH III en la ubicación [-2.0°, -81.25°].

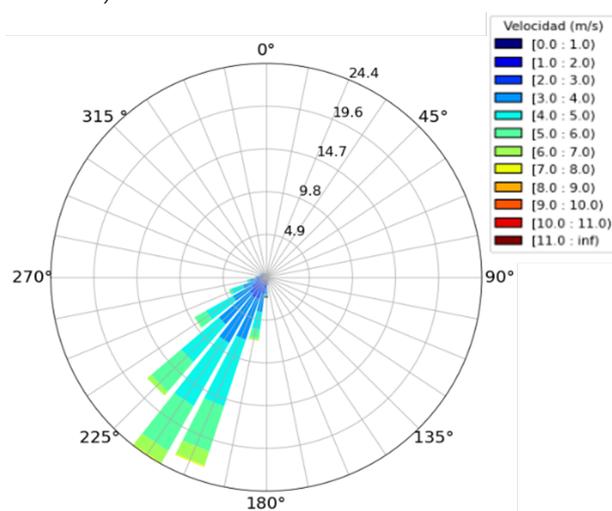
Vientos

Para dar una descripción general del viento frente a las costas de Santa Elena, se tomaron datos del portal Prediction of Worldwide Energy Resources (POWER) de NASA. Se utilizaron datos de velocidad y dirección de viento a 10 m en la década 2011-2020, los cuales son derivados del modelo MERRA-II (Gelaro, et al., 2017). Los datos fueron obtenidos desde la ubicación de la boya virtual B-WW3.

Los vientos frente a Santa Elena provienen de sur a oeste, en el rango de direcciones de 180° a 270°. Las velocidades pueden alcanzar alrededor de 7m/s, tal como se aprecia en la Figura 4.

Figura 4

Rosa de vientos (velocidad y dirección). Datos obtenidos del modelo MERRA-II en la ubicación [-2.0°, -81.25°]



Nivel del mar

La zona de estudio puede considerarse de régimen mesomareal (<3.0 m de rango de marea) y de variaciones de pleamar y bajamar tipo semidiurnas. La costa ecuatoriana posee 2 estaciones definidas: la estación seca, de diciembre a mayo, y la estación lluviosa, de junio a noviembre.) (Hernández, 2006) Sin embargo, esta variación estacional no representa mayor cambio en los rangos de mareas.

En la Figura 5 y la Figura 6, se muestran a modo de ejemplo registros del nivel del mar para los meses de febrero y noviembre de 2016.

Los datos fueron recopilados mediante el software DELFT DashBoard (Ormondt, Nederhoff, & Dongeren, 2020), el cual utiliza los datos del modelo de mareas inversas TPXO (6.2, 7.2 y 8.0) para la previsión global y European Shelf (2008) para la previsión local. La estación de la cual se obtuvieron los datos está ubicada en La Libertad, denominada en el software como Port Liberty IHO:

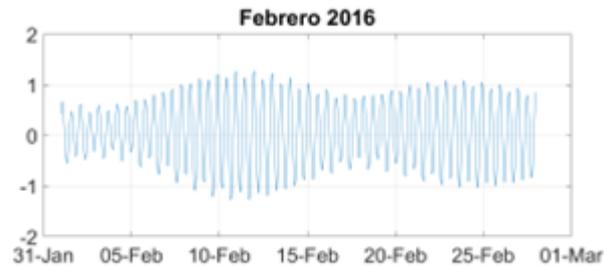


Figura 5

Registros de nivel del mar - Febrero. Estación PORT LIBERTY IHO. Obtenido de Delft Dashboard. (Ormond, Nederhoff, & Dongeren, 2020)

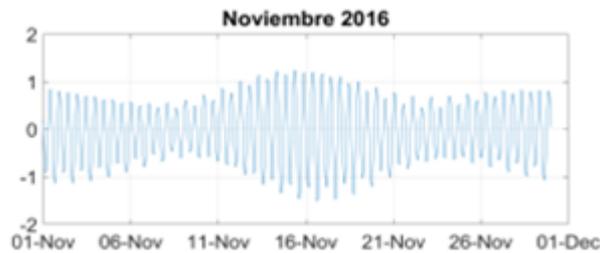


Figura 6

Registros de nivel del mar – Noviembre. Estación PORT LIBERTY IHO. Obtenido de Delft Dashboard. (Ormond, Nederhoff, & Dongeren, 2020)

Materiales y métodos

La metodología de investigación aplicada a este proyecto se estructura con énfasis a la implementación y validación del modelo de propagación de olas DELFT3D-WAVE con malla de fina resolución (450 m) en la zona costera de Santa Elena.

Modelo computacional numérico

El proceso de modelación se estructura fundamentalmente en el planteamiento de escenarios para meses de época seca y época húmeda considerando el comportamiento del clima en la costa ecuatoriana. Para establecer el procesamiento de cada uno de estos escenarios se aplicó el modelo numérico computacional DELFT3D Wave Module (Delft3D-Wave Module, 2022) para cada escenario planteado.

DELFT3D es un sistema de modelación hidrodinámica que posee varios módulos. El módulo WAVE es utilizado para propagación del oleaje, generación del oleaje por viento, interacciones no lineales onda-onda y disipación. Es un software libre y utilizado a nivel mundial. Este módulo utiliza el modelo de propagación de oleaje de tercera generación SWAN. (Deltares., 2019)

SWAN es un modelo espectral en su totalidad y representa el oleaje a partir de la ecuación de onda que equilibra la acción con fuentes y sumideros. El modelo es capaz de calcular la evolución del oleaje en zonas costeras tanto en aguas profundas como conjunto de someras, teniendo en cuenta procesos como asomeramiento, refracción, generación de olas por viento, interacciones

no lineales onda-onda, disipación por whitecapping, fricción de fondo y rotura. (Deltares., 2019) (Tomazin & Re, 2019)

La metodología de configuración utilizada para modelar los escenarios está comprendida por el dominio del oleaje, incluyendo mallas, límites, parámetros condiciones de frontera y variables de ajuste representativas para las características del Pacífico ecuatorial. (Hsu, D, Allard, & Kaihatu, 2016). Como parte inicial de la metodología, se recopilaron, publicaciones, informes técnicos y datos sin procesar, todo lo cual fue analizado, ordenado y depurado hasta obtener una caracterización general de la zona escogida.

El desarrollo del estudio se basa en determinar los parámetros básicos de oleaje incidente en la bahía de Santa Elena: altura significativa, período y dirección del oleaje, considerando la transformación del oleaje desde aguas profundas hacia aguas someras. Este proceso depende en gran medida de las condiciones hidrodinámicas y morfología de la zona costera.

Para esto, al modelo DELFT3D-WAVE se ingresaron datos de oleaje en aguas profundas en el océano Pacífico. Estos datos son los parámetros oceanográficos básicos, los cuales se utilizaron como valores de contorno. En este caso, la información de oleaje de aguas profundas proviene del modelo WAVEWATCH III (WWIII). (NWS, 2009; NWS, 2009). El conjunto de datos posee una resolución temporal de 1 hora y fue obtenido del repositorio del Pacific Islands Ocean Observing System (PacIOOS). Un factor de gran relevancia son las condiciones de fronteras determinados por los resultados por incertidumbre de ocurrencia estadística de las condiciones espectrales de contorno de WAVEWATCH III. Siguiendo la recomendación de (Gil & Pires-Silva, 2015), se escogió el punto más cercano a la zona de estudio para la obtención de datos.

La forma del espectro escogida es de tipo JONSWAP como parámetro de procesamiento con coeficiente de fricción de fondo de 0.067, valor recomendado por (Bows & Komen, 1983) para condiciones de oleaje totalmente desarrollado en aguas someras. Las demás condiciones de contorno del modelo se describen en la Tabla 2.

Tabla 2
Parámetros de configuración del modelo DELFT3D

Parameter	Value
Breaking	$\alpha = 1$
	$\beta = 0.7$
Spectrum	JONSWAP 3.3
Water density	1024 kg/m ³
Gravitational ac.	9.8100 m/s ²
Min Water depth	0.05 m
Direction	nautical

La generación de batimetría se obtuvo del repositorio General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO, 2019) versión 2019 con una resolución de 450 m o 0.005 grados, generando un archivo en formato ASCII y con la herramienta DELFT3D QUICKIN (Delft3D-Quickin, 2022) para generar los archivos relacionados como archivos de ingreso al modelo (Figura 7). (Haddad, Kadioğlu, & Erciyas, 2022).

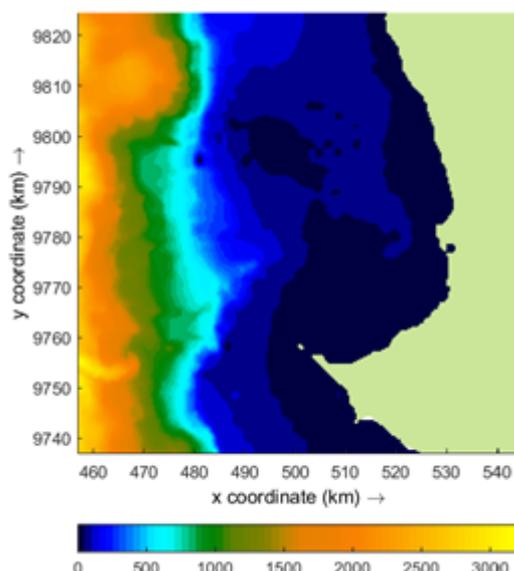


Figura 7
Batimetría generada a partir de GEBCO 2019 Bahía de Santa Elena Ecuador

Análisis del registro histórico

Para este estudio, se ha considerado evaluar el lustro entre los años 2016 al 2020.

Se han escogido los años mencionados para la configuración del modelo estableciendo valores por meses, completando los 12 meses durante todo un año. A partir de esta selección se condicionará el modelo para simular las condiciones de oleaje en los meses del mismo período 2016-2020 en que se hayan presentado.

La información recopilada del WWIII contiene un dato cada tres horas, por lo que se obtiene en un mes alrededor de 240 datos. Para caracterizar cada mes, fue esencial establecer un valor representativo de cada variable a analizar. Se determinó mediante contrastes preliminares y estadística los valores más frecuentes de altura, dirección y período de oleaje para cada mes en el rango de tiempo a analizar. A manera de ejemplo, en la Figura 8 se observan los valores más frecuentes de altura y dirección del oleaje en los meses de febrero (estación húmeda) y noviembre (estación seca) del 2016.

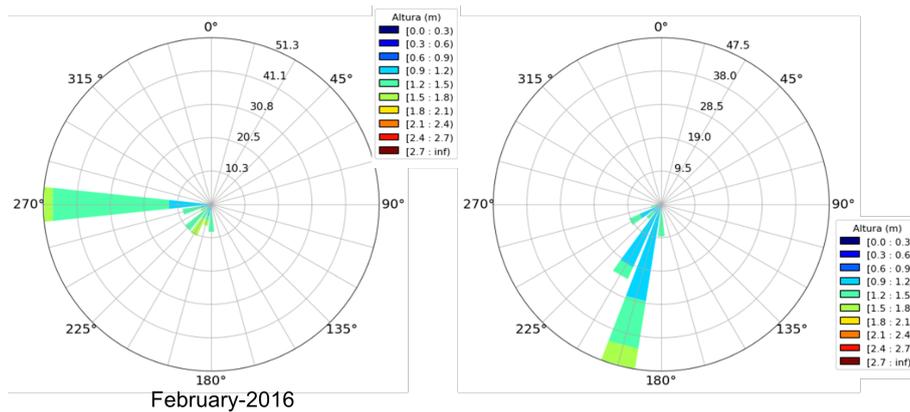


figura 8

Rosa de oleaje (altura significativa y dirección) en aguas profundas para los meses de febrero (época húmeda) y noviembre (época seca) de 2016. Datos obtenidos el modelo WAVEWATCH III en la ubicación $[-2.0^{\circ}, -81.25^{\circ}]$.

Los valores de cada variable, que posean la mayor frecuencia, serían ingresados al modelo como condiciones de contorno y procesamiento, así también como rangos de aplicación.

El mismo proceso se llevó a cabo para el análisis de los datos de velocidad y dirección de viento. Estos datos fueron obtenidos del portal Prediction of Worldwide Energy Resources (POWER) de NASA. Se utilizaron datos de velocidad y dirección de viento a 10 m, los cuales son derivados del modelo MERRA-II (Gelaro, et al., 2017).

En la Figura 9 se pueden apreciar rosas de vientos de febrero y noviembre de 2016.

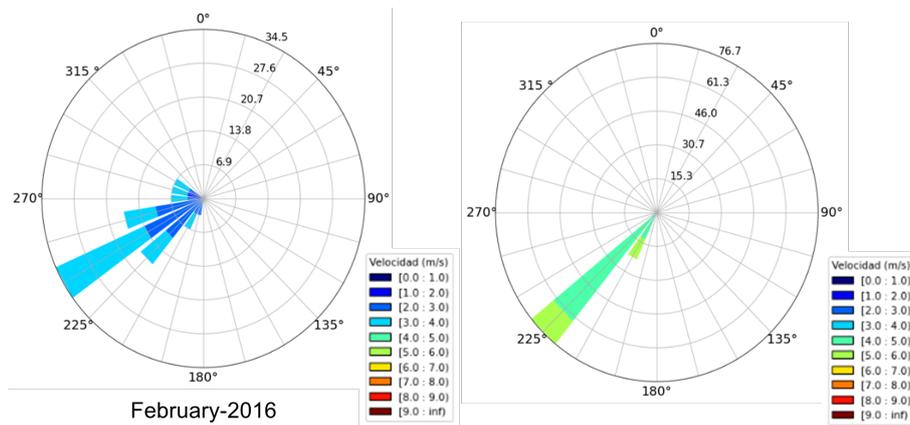


Figura 9

Rosa de viento (velocidad y dirección) en la bahía de Santa Elena para los meses de febrero (época húmeda) y noviembre (época seca) de 2016. Datos obtenidos del modelo MERRA II en la ubicación $[-2.0^{\circ}, -81.25^{\circ}]$

Validación de resultados

Los resultados del modelamiento numérico de cada escenario fueron validados y contrastados de forma de estadística-comparativa con el Global Ocean Waves

Reanalysis WAVERYS de E.U. Copernicus Marine Service Information (Law-Chune, et al., 2021)

WAVERYS es un sistema actual de previsión global con resolución espacial de 0.2 grados. El componente del modelo es la plataforma NEMO, impulsada en superficie por las reanálisis ERA-Interim y ERA5 del ECMWF de los últimos años. Estos se encuentran calibrados como observaciones satélites JASON I y JASON III además de otros satélites como Sentinel 2 y Copernicus.

La validación se basó en la comparación de dos boyas virtuales de WAVERYS. Las posiciones de estas boyas se encuentran en la Tabla 1 y en la Figura 1. De estos puntos se extraen las variables de altura, dirección y período de oleaje para cada mes y de forma paralela, se aplicó la misma metodología para los registros del modelo WAVERYS.

Considerando la resolución de cada uno de los modelos se prioriza un punto lo más aproximado en distancia al sitio de ubicación de la boya virtual.

Los valores generados para cada escenario serán comparados con los resultados WAVERYS en mismo lapso para establecer su grado de correlación entre sí y determinar su nivel de afinidad a la realidad con su nivel de exactitud.

Resultados

El modelo fue aplicado y comparado considerando la serie de tiempo 2016-2020, obteniéndose un dato promedio por mes de altura significativa, dirección y período de oleaje.

Análisis del comportamiento temporal del modelado

Altura Significativa de la Ola

En el caso de la boya virtual B-1, las alturas de las olas se registraron en el rango de 0,60 m - 0,93 m, y para la boya B2, de 0,61 m - 0,89 m. Generalmente, se puede observar en la Figura 10 y la Tabla 3 que la altura significativa de las olas disminuye en los meses de la estación húmeda y aumenta en la estación seca.

Para la boya B-1, las mayores alturas de ola se presentaron en los meses de marzo de 2016 y junio de 2020 con valores de 0,89 m y 0,93 m, respectivamente. Para boya B-2, 0,88 m y 0,89 m, en los meses de mayo de 2019 y junio de 2020.

Para la boya B-1, las mayores alturas de ola se presentaron en los meses de marzo de 2016 y junio de 2020 con valores de 0,89 m y 0,93 m, respectivamente. Para boya B-2, 0,88 m y 0,89 m, en los meses de mayo de 2019 y junio de 2020.

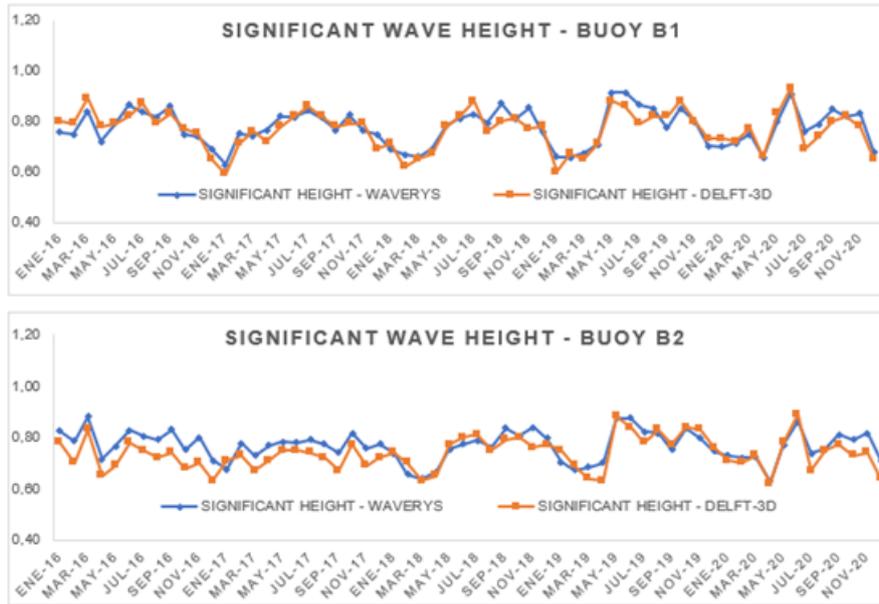


Figura 10
Comparación entre resultados de altura significativa de ola con DELFT3D y WEVERYS para las boyas 1 y 2.

Tabla 3.

Altura de ola significativa para las boyas virtuales B1 y B2 en el período 2016-2020.

DIRECTION WAVERYS B2						DIRECTION DELFT-3D B2					
	2016	2017	2018	2019	2020		2016	2017	2018	2019	2020
JAN	254	255.34	251.8	248.14	244.95	JAN	262.1	258.4	251.2	248.2	237.18
FEB	251.8	243.26	231.53	244.15	240.83	FEB	263.3	246.3	235.5	241.4	239.45
MAR	244.56	232.11	225.93	239.76	232.25	MAR	258.5	235.3	230.1	235.6	230.78
APR	230.07	234.02	224.25	230.76	226.38	ABR	237.8	237.9	228	232.6	223.2
MAY	228.05	224.21	225.99	223.70	228.21	MAY	234.9	227.9	231.6	227	222.1
JUN	224.07	222.34	223.78	223.28	220.67	JUN	226	224.7	224.7	228.2	224.8
JUL	224.35	218.8	220.91	220.43	223.13	JUL	226.8	224.3	227.5	226.2	221.18
AUG	223.77	218.64	220.57	224.09	221.09	AGO	229.3	225.1	226.3	228.2	225.8
SEP	223.78	222.61	221.84	226.56	222.12	SEP	227.8	223.8	228.8	228.2	227.9
OCT	231.18	229.62	230.1	227.43	225.29	OCT	232.1	230.4	229.1	230.1	226.7
NOV	247.08	229.05	225.73	229.26	228.9	NOV	250.6	230.1	228.3	231	231.3
DEC	236.43	237.27	247.08	246.19	241.25	DEC	243.5	247.2	246.4	250.2	245
DIRECTION WAVERYS B2						DIRECTION DELFT-3D B2					
	2016	2017	2018	2019	2020		2016	2017	2018	2019	
JAN	265.62	266.17	262.75	260.44	256.5	JAN	265	270.1	260.4	264.2	250.2
FEB	265.58	255.24	240.39	255.1	252.15	FEB	266.8	265.2	241.3	249.3	247.1
MAR	255.88	239.34	234.73	250.03	239.6	MAR	255.7	245.3	239.6	245.7	237
APR	239.83	243.70	232.27	239.16	233.09	ABR	241.6	246.7	236.2	243.8	235
MAY	232.96	229.33	231.51	227.32	233.81	MAY	235.7	236.8	235.3	234.8	230.1
JUN	227.49	225.59	228.2	226.27	224.15	JUN	233.2	230.1	234.1	236.3	230.1
JUL	227.68	221.31	223.68	223.34	226.59	JUL	234.1	229.1	231.6	235.9	233.5
AUG	227.01	221.26	223.45	227.24	224.38	AGO	236.5	228.7	233.1	235.6	236.3
SEP	227.33	226.69	225.15	230.72	225.51	SEP	236.3	233.4	234.7	233	235.1
OCT	238.49	235.55	235.86	232.26	230.24	OCT	236	236.8	237.6	237.8	235.2
NOV	259.68	235.41	231.19	236.01	235.42	NOV	260.1	237.2	239.1	240.5	237.8
DEC	246.06	246.99	253.01	257.63	253.49	DEC	252.4	250.1	251.4	254.9	250.4

Dirección de aproximación del oleaje

El rango de direcciones correspondientes a la boya virtual B1 es 221,1° - 263,3°, y a la boya B2, 228,7° - 270,1°. Como se puede observar en la Figura 11 y Cuadro

4, en los meses de estación seca la dirección de aproximación del oleaje tiende a variar hacia el suroeste, mientras que en los meses de estación húmeda cambia hacia el oeste.

En el caso de la boya B-1, los valores más altos corresponden a los meses de enero y febrero de 2016, con valores de 262,1° y 263,3°. Para la boya B-2, en los meses de febrero de 2016 y enero de 2017 se presentaron valores de 266,8 y 270,1.

Los valores direccionales más bajos para la boya B-1 fueron 221,1° y 221,2° en mayo y julio de 2020.

En el caso de la boya B-2, para los meses de julio y agosto de 2017 se presentaron valores de 229,1° y 228,7°.

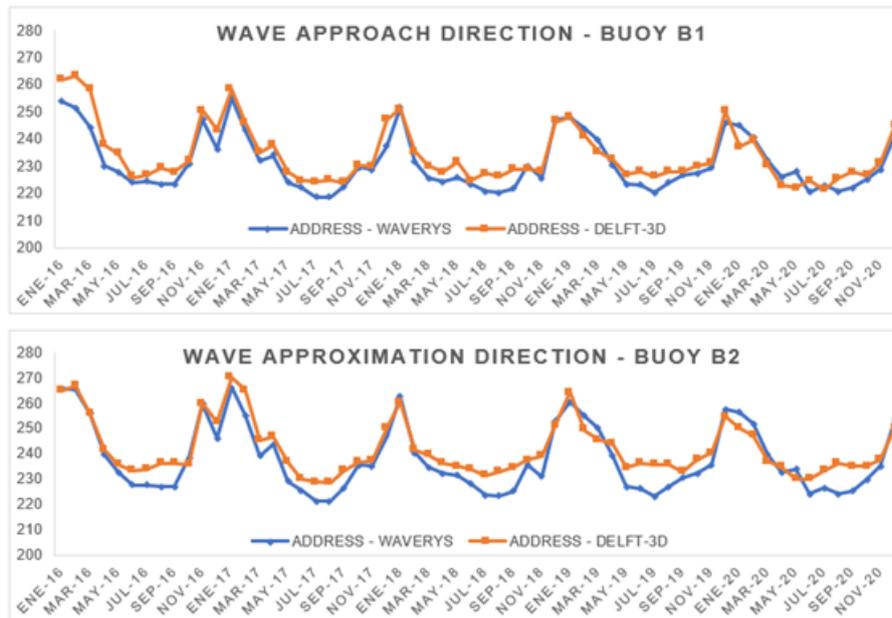


Figura 11.
Comparación entre resultados de altura significativa de ola con DELFT-3D y WAVERYS para las boyas 1 y 2

Tabla 4.

Dirección de aproximación del oleaje para las boyas virtuales B1 y B2 en el período 2016-2020.

PERIOD WAVERYS B1						PERIOD DELFT-3D B1					
	2016	2017	2018	2019	2020		2016	2017	2018	2019	2020
JAN	12.53	12.53	12.72	13.05	12.74	JAN	12.12	12.04	12.85	12.78	12.1
FEB	13.05	13.11	13.22	12.59	13.09	FEB	12.85	12.85	12	12.15	13
MAR	14	13.67	13.54	13.59	13.9	MAR	13.5	13.3	13.13	13.44	13.5
APR	13.51	14.62	13.49	13.35	14.12	ABR	13.2	14.3	13.12	13.5	13.67
MAY	13.61	13.73	13.94	15.4	14.25	MAY	13.3	13.4	13.67	14.97	13.8
JUN	15.14	13.17	14.44	13.7	15.75	JUN	14.76	12.67	14.27	13	15.2
JUL	13.06	14.49	13.23	13.86	13.07	JUL	12.64	14	13	13.24	12.89
AUG	13.49	13.1	13.56	13.32	14.32	AGO	13	12.87	13.12	12.89	14
SEP	13.67	12.47	14.42	13.26	15.48	SEP	13.2	12.2	14.06	12.93	15.2
OCT	12.14	13.95	13.75	12.72	14.09	OCT	11.5	13.56	13.51	12.57	14.15
NOV	12.58	12.98	13.06	12.3	13.41	NOV	12	12.86	12.7	12	13.1
DEC	12.27	13.02	13.51	12.59	13.59	DEC	12.1	12.98	13.2	11.98	13.26

PERIOD WAVERYS B2						PERIOD DELFT-3D B2					
	2016	2017	2018	2019	2020		2016	2017	2018	2019	2020
JAN	14.8	14.25	14.47	15.11	15.25	JAN	14	13.89	14.17	14.7	14.95
FEB	15.12	14.68	14.09	13.92	14.65	FEB	14.87	14.33	13.79	13.6	14.2
MAR	15.24	14.81	14.47	14.84	14.56	MAR	15	14.76	14	14.65	13.89
APR	14.63	15.4	14.63	14.29	14.8	ABR	14.23	15.21	14.12	13.9	14.35
MAY	14.22	14.5	14.6	15.77	14.87	MAY	13.97	14.15	14.23	15.21	14.23
JUN	15.4	13.77	15.34	14.32	16.21	JUN	15.12	13.22	15	14	16
JUL	13.08	14.58	13.74	14.17	13.87	JUL	12.89	14.38	13.6	13.78	13.46
AUG	14.18	13.49	14.04	14.07	14.92	AGO	13.89	13.1	13.67	13.59	14.24
SEP	13.82	12.72	14.65	13.89	15.83	SEP	13.23	12.65	14.21	13.2	15.43
OCT	14.05	14.8	14.96	13.77	14.52	OCT	13.56	14.5	14.69	13.2	14.1
NOV	14.8	14.19	13.61	13.43	14.26	NOV	14.2	13.87	13.2	13.1	13.89
DEC	13.9	14.09	15.56	14.4	14.9	DEC	13.76	13.9	15	14	14.65

Período del oleaje

Como se muestra en la Figura 12 y la Tabla 5, la boya B-1 tiene un rango de períodos de 11,5 sa 15,2 s, y la boya B-2 tiene un rango de 12,6 sa 16,0

s. A diferencia de las variables anteriores, no existe un patrón claro en su comportamiento.

Para la boya B-1 el valor más alto presentado es de 15,2 s para los meses de junio y septiembre 2020. Para la boya 2 también se presentaron valores de 16 s y 15,43 s para los meses de junio y septiembre de 2020.

De los valores más bajos del periodo para la boya B-1, se presentaron en los meses de octubre de 2016 y diciembre de 2019, 11,5 s y 11,98 s- Para la boya B-2, en julio de 2016 y septiembre de 2017, valores de 12,65 s y 12,89 s fueron presentados.

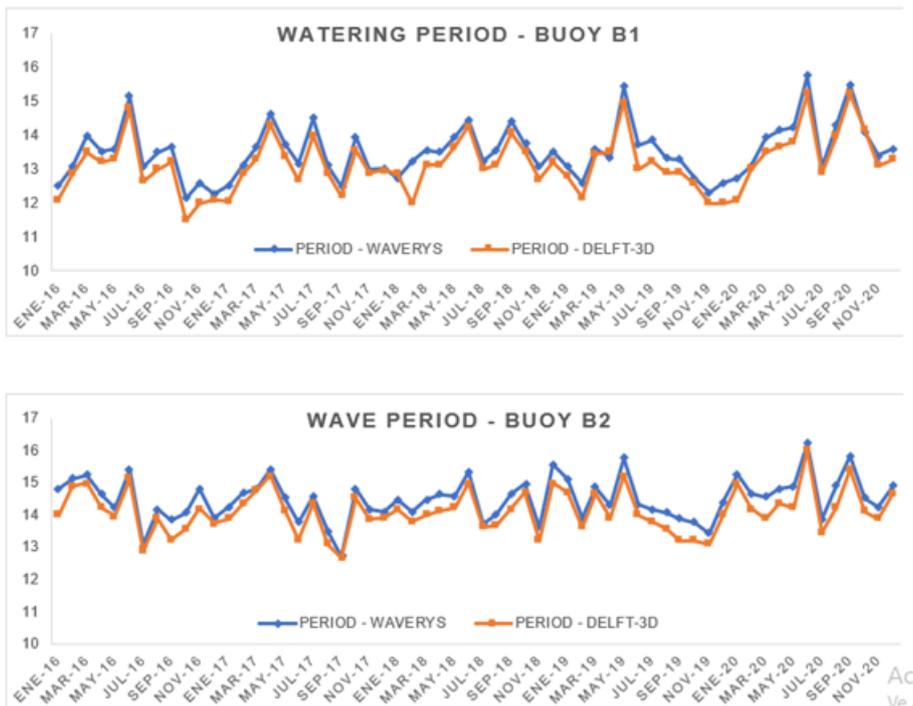


Figura 12.
Comparación entre resultados de altura significativa de ola con DELFT-3D y WAVERYS para las boyas 1 y 2.

Tabla 5.
Período del oleaje para las boyas virtuales B1 y B2 en el período 2016-2020.

HEIGHT WAVERYS B1						HEIGHT DELFT-3D B1					
	2016	2017	2018	2019	2020		2016	2017	2018	2019	2020
JAN	0.76	0.63	0.69	0.66	0.70	JAN	0.8	0.59	0.71	0.6	0.73
FEB	0.75	0.75	0.67	0.66	0.71	FEB	0.79	0.71	0.62	0.67	0.72
MAR	0.84	0.74	0.66	0.67	0.75	MAR	0.89	0.76	0.65	0.65	0.77
APR	0.72	0.76	0.69	0.71	0.66	ABR	0.78	0.72	0.67	0.71	0.66
MAY	0.79	0.82	0.78	0.91	0.80	MAY	0.79	0.78	0.78	0.88	0.83
JUN	0.87	0.82	0.81	0.91	0.91	JUN	0.82	0.82	0.82	0.86	0.93
JUL	0.84	0.84	0.83	0.86	0.76	JUL	0.87	0.86	0.88	0.79	0.69
AUG	0.82	0.81	0.79	0.85	0.79	AGO	0.79	0.82	0.76	0.82	0.74
SEP	0.86	0.77	0.87	0.77	0.85	SEP	0.83	0.78	0.8	0.82	0.8
OCT	0.75	0.82	0.81	0.85	0.82	OCT	0.77	0.79	0.81	0.88	0.82
NOV	0.74	0.76	0.85	0.80	0.83	NOV	0.75	0.79	0.77	0.8	0.78
DEC	0.69	0.75	0.76	0.70	0.68	DEC	0.65	0.69	0.78	0.73	0.65

HEIGHT WAVERYS B2						HEIGHT DELFT-3D B2					
	2016	2017	2018	2019	2020		2016	2017	2018	2019	2020
JAN	0.83	0.67	0.74	0.70	0.73	JAN	0.78	0.71	0.74	0.75	0.71
FEB	0.79	0.78	0.66	0.67	0.72	FEB	0.7	0.73	0.7	0.69	0.7
MAR	0.88	0.73	0.64	0.68	0.725	MAR	0.83	0.67	0.63	0.64	0.73
APR	0.71	0.77	0.66	0.70	0.629	ABR	0.65	0.71	0.65	0.63	0.62
MAY	0.77	0.78	0.76	0.88	0.77	MAY	0.69	0.75	0.77	0.88	0.78
JUN	0.83	0.78	0.78	0.88	0.86	JUN	0.78	0.75	0.8	0.84	0.89
JUL	0.81	0.79	0.79	0.82	0.737	JUL	0.75	0.74	0.81	0.78	0.67
AUG	0.79	0.77	0.76	0.82	0.754	AGO	0.72	0.72	0.75	0.83	0.75
SEP	0.83	0.74	0.84	0.75	0.81	SEP	0.74	0.67	0.79	0.77	0.77
OCT	0.75	0.82	0.81	0.84	0.79	OCT	0.68	0.77	0.8	0.84	0.73
NOV	0.80	0.76	0.84	0.80	0.816	NOV	0.7	0.69	0.76	0.83	0.74
DEC	0.71	0.78	0.80	0.75	0.71	DEC	0.63	0.72	0.77	0.76	0.64

Análisis del comportamiento espacial del modelado

En la Figura 13, se muestra que los resultados de febrero y noviembre de 2016 representan el oleaje en Santa Elena en las estaciones húmedas y secas, respectivamente.

Las Figuras 13a y 13b muestran la distribución espacial de la altura significativa de ola en la Bahía de Santa Elena para febrero y noviembre de 2016. Febrero y noviembre de 2016. Diferencias notables en la altura de ola se encuentran en la zona de aguas profundas. Los valores de altura en esta zona varían de 0,9 m a 1,1 m para la Figura 13a y de 1,1 m a 1,4 m para la Figura 13b.

Cerca de la costa, la altura significativa de las olas disminuye cerca del área de Salinas. En la Figura 13a, entre Salinas y La Libertad, en las alturas oscilan entre 0,10 m y 0,60 m. Al norte de La Libertad las alturas aumentan en un rango de 0,60 m a 0,90 m. En la Figura 13b, entre Salinas y Monteverde las alturas varían de 0,10 m a 0,60 m, y alrededor de San Pedro y hacia el norte, de 0,60 m a 1,0 m.

En las Figuras 13c y 13e se muestra el período de oleaje en los meses de febrero y noviembre de 2016, respectivamente. Los valores en la Figura 13c varían de 12,0 s a 12,2 s y en la Figura 13d, de 12,0 s a 12,1 s.

En las Figuras 13e y 13f, el oleaje predominante proviene del oeste y suroeste, respectivamente. Cerca de la costa, en ambos casos, el oleaje llega en un rango de direcciones de 240° a 330°. Los valores más altos se encuentran cerca del área entre Salinas-Monteverde y San Pedro.

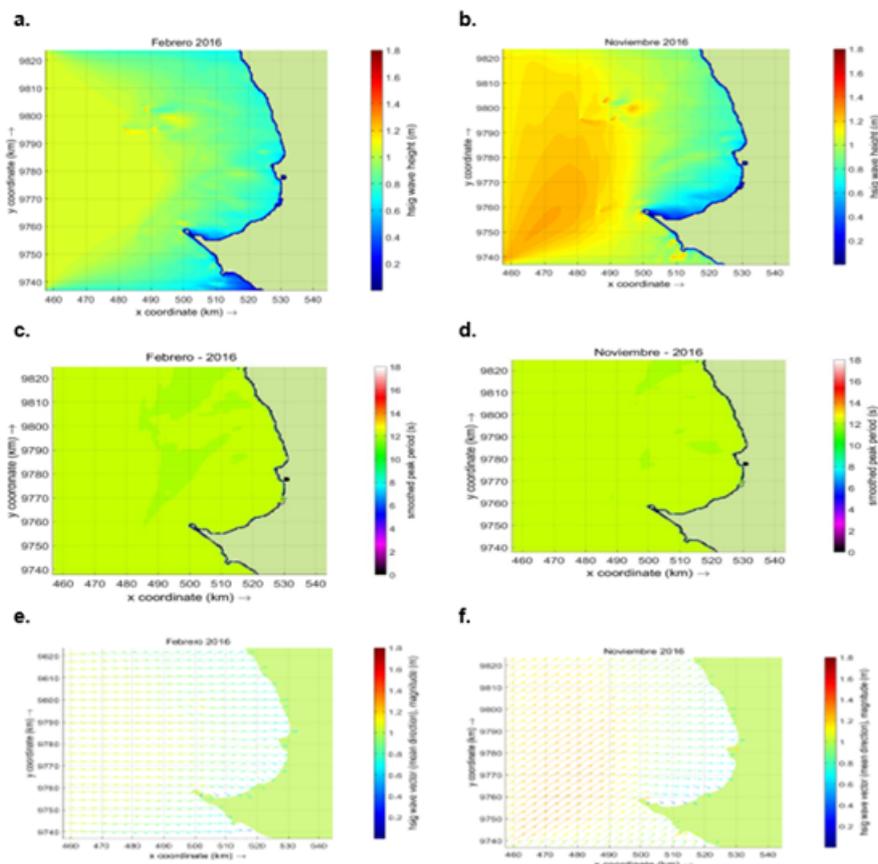


Figura 13. Resultados del modelo DELFT3D-WAVE para febrero de 2016 (estación húmeda) y noviembre de 2016 (estación seca). Febrero: Altura significativa (a), período (b) y dirección de oleaje (c). Octubre: Altura significativa (d), período (e) y dirección de oleaje (f).

Comparación de resultados

La comparación de los resultados de cada variable, entre los valores obtenidos en el modelo y los valores registrados en las boyas, se realizó a partir del cálculo del coeficiente de correlación. Por otro lado, también se estimó el error cuadrático medio (RMSE) para comparar el error entre las dos boyas virtuales. Los resultados de la comparación se muestran en la Tabla 6 y la Tabla 7.

Tabla 6. Coeficiente de correlación entre variables del modelo y las boyas B-1 y B-2

Coef. Corr.	Buoy B-1	Buoy B-2
Height	0.87	0.87
Address	0.93	0.94
Period	0.97	0.97

Tabla 7.

Error cuadrático medio de cada variable entre las boyas B-1 y B-2.

RMSE.	Buoy B-1	Buoy B-2
Height (m)	0.04	0.03
Direction (°)	4,90	5.92
Period (s)	0.41	0.41

Discusión

Validación de resultados

Al ser los coeficientes cercanos a 1, se demuestra que los resultados obtenidos con el modelo son consistentes con los valores indicados en las boyas virtuales. Los valores más altos de altura de ola se observan en los meses de temporada seca, meses en los que predomina el oleaje con dirección sur-suroeste según el registro obtenido. En comparación, durante la temporada de lluvias, el oleaje predominante proviene del sentido suroeste-oeste y los valores de altura de ola son reducidos.

Análisis del comportamiento temporal del modelado

Los resultados obtenidos para cada variable (Figuras 10, 11 y 12) muestran un ajuste similar entre la simulación realizada con DELFT3D y los datos obtenidos de WAVERYS, considerando los coeficientes de correlación de la Tabla 6 que son cercanos a 1. La raíz del error cuadrático medio (RMSE) los resultados en la Tabla 7 muestran la similitud de los resultados entre cada boya. Sin embargo, con respecto a la dirección del oleaje, se observa un error medio de aproximadamente 5°-6° considerando ambas boyas. Esto se puede observar en la Figura 11. Cabe señalar que el desplazamiento es mayor para el caso de la boya B2.

Análisis del comportamiento espacial del modelado

Coincidiendo con lo mencionado en el Capítulo 1 del Atlas Marino Costero del Ecuador, las mayores alturas de olas en el mar ecuatoriano ocurren en los meses de estación seca de julio y agosto, debido a las condiciones del viento en el Pacífico Sur, cuya intensidad aumenta durante la estación seca. temporada en la región costera del Ecuador. Sin embargo, también puede haber otros meses del año en los que los vientos se intensifiquen (INOCAR, 2015).

Las Figuras 13a y 13b muestran la importancia de la cornisa de Salinas al producir un área resguardada al sur de la Bahía de Santa Elena, por lo que los valores de altura de ola se reducen en esta área, incluso cuando el oleaje proviene del oeste. Sin embargo, en el caso de las olas provenientes del oeste, llegan casi sin refracción hacia la costa (Figura 13e) y con valores de altura de ola

significativamente mayores alrededor de esta zona, como se muestra en la Figura 13a, respectivamente.

También vale la pena señalar que, si bien para noviembre de 2016 el oleaje vino del suroeste (Figura 13f) con mayor altura que en el caso de febrero (Figuras 13a y 13b), la altura de ola es menor en la zona de Salinas - Monteverde. Además, al norte de Monteverde, el rango de alturas de olas cerca de la costa es similar en ambos casos. Por tanto, la dirección de donde venga el oleaje influye de manera importante en la altura que tendrá al llegar a tierra. Con respecto al período del oleaje, se puede observar que en ambos casos se mantiene constante en toda el área de estudio (Figuras 13c y 13d). Las variaciones en determinadas zonas son mínimas ($<0,2$ s).

En cuanto a la dirección en la que llegan las olas a la costa, los valores de dirección aumentan especialmente en playas cuya orientación es paralela a la dirección de donde vienen las olas. Por tanto, al acercarse a la costa, el oleaje debe refractarse más, lo que explica el cambio de dirección en estas zonas.

Conclusiones

Considerando los resultados de las boyas B-1 y B-2, se obtuvieron valores significativos de altura de ola de 0,6 m a 0,93 m, períodos de 11,5 s a 16 s y direcciones de $221,1^\circ$ a $270,1^\circ$.

Existen diferencias notables según la estación en el comportamiento de los parámetros del oleaje. En general, los resultados de altura de ola significativa muestran valores mayores en los meses de estación seca, en los que también predomina el oleaje proveniente del sur-suroeste. El ajuste entre los datos de WAVERYS y la simulación DELFT-3D fue aceptable ya que mostró una alta correlación. Sin embargo, el error cuadrático medio de la dirección muestra diferencias cercanas al rango de 5° - 6° entre la simulación DELFT3D-WAVE y WAVERYS.

Los resultados de este estudio se obtuvieron con el fin de apoyar el manejo costero integrado y la planificación del diseño de estructuras en la zona costera de la provincia de Santa Elena. Para futuros trabajos se sugiere disponer de información instrumental in situ como mareógrafos u oleajes que permitan un registro más detallado para mejorar la calibración del modelo y obtener resultados más precisos. Además, se puede considerar que el acoplamiento con el módulo FLOW tiene en cuenta los efectos del flujo sobre las olas (refracción de la corriente, configuración de las olas y fricción del fondo).

Referencias

- Ariza, E., Jiménez, J., & Sardá, R. (2008). A critical assessment of beach management on the Catalan coast. *Ocean & Coastal Management*, 51, 141-160. doi:10.1016/j.ocecoaman.2007.02.009
- Bows, E., & Komen, G. (1983). On the Balance Between Growth and Dissipation in a Extreme Depth-Limited Wind-Sea in the Southern North Sea. *Journal of Physical Oceanography*, 13, 1653-1658. doi:10.1175/1520-0485

- Cavaleri, L., Barbariol, F., & Benetazzo, A. (2020). Wind-Wave modeling: Where we are, Where to go. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(4):260. Obtenido de <https://doi.org/10.3390/jmse8040260>
- Cedeño, F., & Mendez, W. (2022). Acantilados Litorales del Pacífico Sur de Ecuador Como Marcadores Geomorfologicos de Susceotibilidad a la Erosión Litoral. *Revista Geociencias*, 255-272. Obtenido de: <https://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/geociencias/article/view/16317/12357>
- Delft3D-Quickin. (2022). QUICKIN : Generation and manipulation of grid-related parameters such as bathymetry, initial conditions and roughness. Delft: Deltares. User Manual.
- Delft3D-Wave Module. (2022). Delft3D-WAVE: Simulation of short-crested waves with SWAN.
- Deltares. (2019). DELFT3D - WAVE. User Manual. Hydro-Morphodynamics. Version 3.05.
- GEBCO. (2019). General Bathymetric Chart of the Oceans. Obtenido de <https://download.gebco.net/>
- Gil, J., & Pires-Silva, A. A. (2015). Application of the Delft3D System in the Modelling of Laboratory and Field Longshore Currents.
- Haddad, B., Kadioğlu, A., & Erciyas, B. (2022). WAVE MODEL OF BLACK SEA KARASU: APPLICATION OF DELFT3D. Obtenido de: https://www.researchgate.net/publication/361924782_WAVE_MODEL_OF_BLACK_SEA_KARASU_APPLICATION_OF_DELF3D
- Hernández, F. (2006). Análisis de la variabilidad climática de la costa ecuatoriana. *Acta Oceanográfica del Pacífico*. 13.
- Hsu, Y. L., D, J., Allard, R. A., & Kaihatu, J. M. (2016). Evaluation of Delft3D Performance in Nearshore Flows. Obtenido de: https://www.researchgate.net/publication/235190792_Evaluation_of_Delft3D_Performance_in_Nearshore_Flows
- Hubertz, J. (1995). Coastal wave climate by numerical modeling. *WIT Transactions on the Built Environment*. doi:10.2495/CE950461.
- IHO, I. H. (2 de 05 de 2022). International Hydrographic Organization. Obtenido de <https://iho.int/>
- INOCAR. (2015). Capítulo 1- Oceanografía y Clima. En *Atlas Marino Costero del Ecuador*.
- Law-Chune, Aouf, Dalphinnet, Levier, Drillet, & Drevillom. (2021). WAVERYS: a CMEMS global wave reanalysis during the altimetry period. *Ocean Dynamics*, 71. doi:10.1007/s10236-020-01433-w
- Nativí, S., Caiza, R., Saltos, I., Martillo, C., Andrade, G., Quiñónez, M., & Cedeño, J. (2021). Coastal erosion assessment using remote sensing and computational numerical model. Case of study: Libertador Bolívar, Ecuador. *Ocean & Coastal Management*. Obtenido de: <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2021.105894>.
- NWS, N. W. (2009). WAVEWATCH III Model Description. Obtenido de <https://polar.ncep.noaa.gov/waves/wavewatch/>
- Thoresen, C. (2003). *Port Designer's Handbook: Recommendations and Guidelines*. London: Thomas Telford.
- Tomazin, N., & Re, M. (2019). Herramientas de modelación para la gestión costera de la provincia de Buenos Aires. UNIDO/CTCN RFX 7000002437.