



Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América
Facultad de Ciencias Físicas
Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica de Fluidos

**Análisis estacional del régimen de oleaje de la Bahía
del Callao**

INFORME PROFESIONAL

Para optar el Título Profesional de Ingeniera Mecánico de Fluidos

AUTOR

Nataly Marisol CHIRINOS HERRERA

Lima, Perú

2022



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Chirinos, N. (2022). *Análisis estacional del régimen de oleaje de la Bahía del Callao*. [Informe profesional de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ciencias Físicas, Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica de Fluidos]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	NATALY MARISOL CHIRINOS HERRERA
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	47196177
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0002-5161-1341
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	-
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	-
URL de ORCID	-
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	CARLOS AUGUSTO ANTONIO CARBONEL HUAMÁN
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	08772534
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	GUIDO AMÉRICO ROZAS OLIVERA
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	07209368
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	EMANUEL JESÚS GUZMÁN ZORRILLA
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	40420005
Miembro del jurado 3	
Nombres y apellidos	
Tipo de documento	DNI

Número de documento de identidad	
Datos de investigación	
Línea de investigación	A.2.5.2. Recursos Hídricos
Grupo de investigación	
Agencia de financiamiento	PROPIA
Ubicación geográfica de la investigación	País: Perú Departamento: - Provincia: Provincia Constitucional del Callao Distrito: Callao Latitud: -12°00'03.7190" Longitud: -77°08'26.1363"
Año o rango de años en que se realizó la investigación	2021-2022
URL de disciplinas OCDE	Ingeniería mecánica https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.03.01



Universidad Nacional Mayor de San Marcos
(Universidad del PERÚ, Decana de América)
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA DE FLUIDOS

SUSTENTACIÓN VIRTUAL DEL INFORME PROFESIONAL PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO MECANICO DE FLUIDOS, MODALIDAD DE TITULACIÓN M-4 – POR EXPERIENCIA PROFESIONAL

Siendo las 16:00 horas del día viernes 9 de diciembre de 2022, en la Sala de Sesión Virtual de la Facultad de Ciencias Físicas, bajo la presidencia del Dr. Ing. CARLOS AUGUSTO ANTONIO CARBONEL HUAMÁN y con la asistencia de los miembros Ing. GUIDO AMÉRICO ROZAS OLIVERA y el Mg. Ing. EMANUEL JESÚS GUZMÁN ZORRILLA, se dio inicio a la Sesión Pública Virtual de Sustentación del Informe Profesional para optar el Título Profesional de Ingeniero Mecánico de Fluidos, mediante la Modalidad de Titulación M-4 Por Experiencia Profesional, de la Bachiller:

NATALY MARISOL CHIRINOS HERRERA

El Presidente del Jurado Examinador dio lectura del Resumen del Expediente, e invitó a la Bachiller NATALY MARISOL CHIRINOS HERRERA, a realizar la Exposición del Informe Profesional titulado “ANÁLISIS ESTACIONAL DEL RÉGIMEN DE OLEAJE DE LA BAHÍA DEL CALLAO”.

Concluida la exposición de la candidata y luego de las preguntas de rigor por parte del Jurado Examinador, el Presidente invitó a la Bachiller abandonar momentáneamente la sala de sesión para dar paso a la deliberación y calificación por parte del Jurado.

Al término de la deliberación del Jurado, se invitó a la candidata a regresar a la sala de sesión para dar lectura a la calificación final obtenida por la Bachiller, la misma que fue:

-----Dieciocho----- (18)

El Presidente del Jurado Dr. Ing. CARLOS AUGUSTO ANTONIO CARBONEL HUAMÁN, a nombre de la Nación y de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, declaró a la Bachiller NATALY MARISOL CHIRINOS HERRERA Ingeniero Mecánico de Fluidos.

Siendo las 17:12 horas del mismo día, se levantó la sesión.

Dr. Ing. CARLOS A. A. CARBONEL HUAMÁN
PRESIDENTE DEL JURADO

Ing. GUIDO AMÉRICO ROZAS OLIVERA
MIEMBRO DEL JURADO

Mg. Ing. EMANUEL JESÚS GUZMÁN ZORRILLA
MIEMBRO DEL JURADO



UNMSM

Firmado digitalmente por LOZANO
BARTRA Whualkuer Enrique FAU
20148092282 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 21.12.2022 21:47:23 -05:00

DR. WHUALKUER ENRIQUE LOZANO BARTRA
VICEDECANO ACADÉMICO FCF

Datos de la plataforma virtual institucional del acto de sustentación:

<https://us06web.zoom.us/j/84278757032?pwd=WGpDTmpBYksvZGF5NjNjZlYwO5TIRkQT09>

ID de reunión: 842 7875 7032

Código de acceso: 381045

Grabación archivada en el siguiente enlace:

<https://drive.google.com/file/d/1ryejxvs9WjigM-O5iAtTG3NIXgg7VCtB/view?usp=sharing>

Anexo 1

Informe de evaluación de Originalidad

1. Facultad de Ciencias Físicas
2. Escuela/Unidad de Posgrado
Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica de Fluidos
3. Autoridad Académica que emite el informe de originalidad
El Director de la EPIMF
4. Apellidos y nombres de la autoridad académica
Sarango Julca Douglas Donal
5. Operador del programa Informático de similitudes
Dr. Ing. Douglas Sarango Julca
6. Documento evaluado (1)
“ANÁLISIS ESTACIONAL DEL RÉGIMEN DEL OLEAJE DE LA BAHÍA DEL CALLAO”
7. Autor del documento (2)
NATALY MARISOL CHIRINOS HERRERA
8. Fecha de recepción del documento 1°/12/22
9. Fecha de aplicación del programa informático de similitudes 2/12/22
10. Software utilizado
 - Turnitin (X)
 - Ithenticate
 - Otro (especificar)
11. Configuración del programa detector de similitudes
 - Excluye textos entrecomillados
 - Incluye Bibliografía
 - Excluye cadenas menores a 40 palabras
12. Porcentaje de similitudes según programa detector de similitudes³
4%
13. Fuentes originales de las similitudes encontradas⁴
14. Observaciones
Ninguna
15. Calificación de originalidad
 - Documento cumple criterios de originalidad, sin observaciones (X)
 - Documento cumple criterios de originalidad, con observaciones
 - Documento no cumple criterios de originalidad
16. Fecha del Informe 23 /12 /22



Firmado digitalmente por SARANGO
JULCA Douglas Donal FAU
20148092282 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 27.12.2022 11:00:28 -05:00

DR. ING. Douglas Sarango Julca
DIRECTOR (e) DE LA EPIMF

-
- 1 Otro (especificar) Informe Profesional Modalidad de Titulación M-4
 - 2 Apellidos y Nombres completos
 - 3 En letras y números
 - 4 Indicarlas en orden decreciente y su respectivo porcentaje

Índice

I.	INTRODUCCIÓN.....	9
II.	INFORMACIÓN DEL LUGAR DONDE SE DESARROLLÓ LA ACTIVIDAD	10
II.1	Empresa donde se desarrolló la actividad	10
II.2	Periodo de duración de la actividad	10
II.3	Finalidad y objetivo de la empresa	10
II.4	Razón social.....	11
II.5	Dirección postal.....	11
II.6	Dirección de correo electrónico del profesional a cargo	11
III.	DESCRIPCIÓN DE LA ACTIVIDAD.....	11
III.1	Organización de la actividad	11
III.2	Finalidad y objetivos de la actividad	12
III.2.1	Objetivo principal.....	12
III.2.2	Objetivos específicos.....	12
III.3	Problemática	12
III.4	Metodología.....	13
III.5	Procedimientos	13
III.5.1	Fuentes de información	13
III.5.2	Unidad de observación.....	14
III.5.3	Procedimiento de recolección de datos	15

IV.	RESULTADOS DE LA ACTIVIDAD	16
IV.1	Sustento teórico	16
IV.1.1	Olas.....	16
IV.1.2	Espectro de la ola.....	17
IV.1.3	Descripción estadística de una ola.....	20
IV.1.4	Tipo y características de olas.....	20
IV.1.5	Patrones de interferencia de las olas.....	22
IV.1.6	Modificación de la energía de las olas	23
IV.1.7	Modelo Numérico.....	26
IV.2	Caracterización de olas en aguas profundas	31
IV.3	Caracterización de olas medidas en campo.....	38
IV.4	Análisis del espectro del oleaje	49
IV.5	Modelación numérica	52
IV.5.1	Configuración del modelo.....	52
IV.5.2	Calibración del modelo.....	58
IV.5.3	Validación del modelo.....	62
IV.5.4	Puntos de control.....	66
IV.5.5	Construcción de series de tiempo	67
IV.5.6	Construcción de series de tiempo	73
IV.5.7	Análisis estacional del régimen de olas	80

V.	CONCLUSIONES.....	89
VI.	RECOMENDACIONES.....	91
VII.	BIBLIOGRAFÍA.....	92

Índice de Figuras

Figura 1	Esquema de la organización del proyecto.....	11
Figura 2	Muelle de Liguria en la bahía del Callao	15
Figura 3	Clasificación de las olas marinas según Munk (1951) y Kinsman (1965).	18
Figura 4	Espectro de dirección de frecuencia bidimensional y su ancho direccional [Holthuijsen 2007]	19
Figura 5	Zona Fetch y generación de olas tipo Swell y Sea	21
Figura 6	Zona de generación de oleajes en el Océano Pacífico Sur	22
Figura 7	Patrón de interferencia mixta.....	23
Figura 8	Ejemplo de la refracción de olas	25
Figura 9	Ejemplo de la difracción de olas.....	25
Figura 10	Ubicación del nodo de CSIRO y el área de estudio	33
Figura 11	Serie de tiempo de la altura de olas (H_s), periodo pico (T_p), dirección media (D_m) y dirección pico (D_p).....	34
Figura 12	Histogramas de altura de olas (H_s) y dirección media (D_m).	35
Figura 13	Rosas de la altura de olas (H_s) respecto a la dirección media (D_m) y pico (D_p), y Distribución porcentual de altura de olas (H_s) y periodo pico (T_p).	35
Figura 14	Función de distribución de probabilidad acumulativa de (a) altura significativa, (b) periodo pico, (c) dirección media y (d) dirección pico.	36
Figura 15	Ubicación los puntos ADCP1, ADCP2 y ADCP3.....	39
Figura 16	Ubicación de los puntos ADCP1, ADCP2 y ADCP3 en mapa de sondajes.....	40

Figura 17 Gráficas estadísticas de olas en aguas poco profundas en el punto ADCP1.	41
Figura 18 Gráficas estadísticas de olas en aguas poco profundas en el punto ADCP2.	44
Figura 19 Gráficas estadísticas de olas en aguas poco profundas en el punto ADCP3.	47
Figura 20 Espectro de oleaje bidimensional y frecuencial correspondiente a los registros en los puntos ADCP1, ADCP2 y ADCP3	51
Figura 21 (a) Extensión del área delimitada para la malla externa, y (b) Grillas empleadas en el modelo numérico.	53
Figura 22 Área del levantamiento batimétrico (batimetría de detalle).	54
Figura 23 Sondajes de la batimetría a detalle delimitados en azul	54
Figura 24 a) Curvas de nivel y b) Modelo digital de terreno (Batimetría en aguas profundas y batimetría de detalle).....	55
Figura 25 Fronteras por orientación para el modelamiento numérico.	56
Figura 26 Correlación de Pearson entre datos modelados con coeficiente de fricción de (a) 0.020, (b) 0.035, (c) 0.070, (d) 0.50 y (e) 0.80 y datos registrados	59
Figura 27 Serie de tiempo de los periodos pico y dirección media registrada versus la modelada correspondiente al punto (a) ADCP1, (b) ADCP 2 y (c) ADCP 3.	65
Figura 28 Ubicación de los puntos de control.....	66
Figura 29 Rosas de oleaje de altura de ola (m) con dirección media de los puntos reconstruidos.	67
Figura 30 Rosas de oleaje de altura de ola (m) con dirección media de los puntos reconstruidos ubicados en mapa.....	68
Figura 31 Salida gráfica de caso medio modelado: Hs 2.33 m, Tp 9.62 s y Dm: 180°	73
Figura 32 Salida gráfica de caso máximo anual modelado: Hs 4.19 m, Tp 17.10 s y Dm: 202.5°	74
Figura 33 Salida gráfica de caso extremal modelado: Hs 5.21 m, Tp 18.7 s y Dm: 225°	75
Figura 34 Salida gráfica de caso medio modelado: Hs 1.80 m, Tp 14.71 s y Dm: 247.5°	76
Figura 35 Salida gráfica de caso medio modelado: Hs 2.93 m, Tp 19.23 s y Dm: 270°	77

Figura 36 Salida gráfica de caso medio modelado: Hs 2.70 m, Tp 19.60 s y Dm: 315°	78
Figura 37 Rosas de oleaje e histogramas de dirección media de aguas profundas por estación	81
Figura 38 Rosas de altura de ola por estaciones del punto P1 y P2	83
Figura 39 Rosas de altura de ola por estaciones del punto P3 y P4	84
Figura 40 Rosas de altura de ola por estaciones del punto P5 y P6	85
Figura 41 Rosas de altura de ola por estaciones del punto P7 y P8	86

Índice de Tablas

Tabla 1 Coordenadas de ubicación del nodo de datos de olas globales de CSIRO	32
Tabla 2 Estadística descriptiva de altura significativa, periodo pico, dirección media y dirección pico	36
Tabla 3 Coordenadas del punto ADCP1 – Proyecto Liguria	38
Tabla 4 Coordenadas del punto ADCP2 – Proyecto Liguria y ADCP3 – Proyecto Sacramento	39
Tabla 5 Estadística descriptiva de altura significativa, periodo pico, dirección media y dirección pico	42
Tabla 6 Estadística descriptiva de altura significativa, periodo pico, dirección media y dirección pico.	45
Tabla 7 Estadística descriptiva de altura significativa, periodo pico, dirección media y dirección pico del punto ADCP3.....	48
Tabla 8 Características de las mallas elaboradas	52
Tabla 9 Casos paramétricos modelados	56
Tabla 10 Parámetros físicos analizados para la calibración	58
Tabla 11 Factor y pendiente de correlación de Pearson	60
Tabla 12 Estadística descriptiva y percentiles de las alturas de olas registradas por el ADCP1 y datos modelados con diferentes coeficientes de fricción.	60
Tabla 13 Estadística descriptiva y percentiles de las alturas de olas registradas por el ADCP2 y datos modelados con diferentes coeficientes de fricción.	61

Tabla 14 Estadística descriptiva y percentiles de las alturas de olas registradas por el ADCP3 y datos modelados con diferentes coeficientes de fricción.....	61
Tabla 15 Error medio cuadrático RMSE	62
Tabla 16 Error medio cuadrático BIAS.....	62
Tabla 17 Comparación de las alturas de olas registradas y modeladas en el punto ADCP1	63
Tabla 18 Comparación de las alturas de olas registradas y modeladas en el punto ADCP2	63
Tabla 19 Comparación de las alturas de olas registradas y modeladas en el punto ADCP3	64
Tabla 20 Alturas de olas de los puntos de control obtenidos del modelamiento de los casos paramétricos. ...	79
Tabla 21 Dirección de olas de los puntos de control obtenidos del modelamiento de los casos paramétricos	80
Tabla 22 Distribución porcentual de las direcciones de oleaje de aguas profundas por estación	82
Tabla 23 Estadística descriptiva de las alturas de oleaje de agua profundas por estación	82
Tabla 24 Resumen de percentiles de verano para los puntos de control	87
Tabla 25 Resumen de percentiles de otoño para los puntos de control	87
Tabla 26 Resumen de percentiles de invierno para los puntos de control.....	87
Tabla 27 Resumen de percentiles de primavera para los puntos de control	88

Índice de Ecuaciones

Ecuación (1)	17
Ecuación (2)	18
Ecuación (3)	19
Ecuación (4)	19
Ecuación (5)	19
Ecuación (6)	19
Ecuación (7)	20
Ecuación (8)	20

Ecuación (9)	27
Ecuación (10).....	27
Ecuación (11).....	27
Ecuación (12).....	28
Ecuación (13).....	29
Ecuación (14).....	30
Ecuación (15).....	30
Ecuación (16).....	30
Ecuación (17).....	30
Ecuación (18).....	30
Ecuación (19).....	30
Ecuación (20).....	31

I. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de suficiencia profesional ha sido desarrollado en la bahía del Callao con el fin de obtener el régimen estacional del oleaje, a través del empleo de datos de olas registradas pertenecientes a la empresa Gapash Consultoría Integral EIRL quien cuenta con un proyecto elaborado para Liguria Inversiones Pesqueras ubicado en la zona sur de la bahía, cuyo estudio se originó por la pérdida de profundidad cerca de las áreas y alrededor del muelle de concreto armado.

Tomando como base la información registrada del proyecto mencionado y de otro proyecto adicional ubicado dentro del área de interés, se analizará el régimen del oleaje total y de forma estacional de la Bahía Callao. Dicha información analizada brindará un panorama general del clima marítimo que puede ser empleada posteriormente para el desarrollo de diferentes tipos de proyectos.

Parte del análisis del oleaje consistirá en el estudio de su espectro registrado por equipos ADCP, donde las alturas de olas serán filtradas evitando sobre elevación producida por reflexión de la costa, que posteriormente será empleada para la calibración del modelo numérico a desarrollar.

La elaboración del modelo numérico en Delft 3D consistirá en la configuración y calibración de este mediante información registrada en tres puntos diferentes a lo largo de la bahía, así mismo se empleará como información de entrada las alturas de olas, periodo pico y dirección del oleaje en aguas profundas (información de datos globales), cuya información será propagada hacia aguas someras resultando en oleajes transformados cerca a costa. Para una mejor visión panorámica se establecerán puntos de control donde se realizarán las reconstrucciones de serie de tiempo y gráficas estadísticas.

Finalmente, se realizará el modelamiento para los casos medios, máximos anuales y extremales con tiempo de retorno (TR) igual a 100 años, con el fin de identificar las alturas máximas y oleajes incidente en cada caso.

II. INFORMACIÓN DEL LUGAR DONDE SE DESARROLLÓ LA ACTIVIDAD

II.1 Empresa donde se desarrolló la actividad

El proyecto técnico del cual se tomaron los registros fue desarrollado por la consultora Gapash Consultoría Integral (en adelante Gapash) para la empresa Inversiones Pesqueras Liguria SAC (en adelante Liguria), ubicada en la provincia constitucional del Callao.

En cuanto a la participación de la bachillera, es preciso indicar que fue la responsable directa del desarrollo del proyecto, participando en la supervisión y control de calidad de la información recolectada en campo (data batimétrica y topográfica, y data de olas y corrientes), así como de elaborar el modelo numérico de propagación de olas mediante el software Delft 3D, en base a su cargo dentro de la empresa Gapash (área de estudios del medio y estudios hidro-oceanográficos). Para el desarrollo del presente trabajo de suficiencia profesional, se ha tomado como base la información de campo del proyecto mencionado construyendo una malla extensa que abarque toda la zona de análisis, agregando puntos de control a lo largo de la bahía y realizando la calibración del modelo con tres puntos de datos de olas registrados y ubicados alrededor de la bahía de tal manera que garantice la fiabilidad del modelo.

II.2 Periodo de duración de la actividad

El periodo de duración del proyecto fue de 86 días considerando el levantamiento de información en campo, proceso y desarrollo del modelo. El proyecto se desarrolló desde junio a septiembre del 2021.

II.3 Finalidad y objetivo de la empresa

Misión: El compromiso constante con nuestros clientes para que nuestros servicios alcancen los objetivos que nos encomienden, con un análisis integral del proyecto, y una alta calidad del servicio con cumplimiento de plazos.

Visión: Ser una empresa de consultoría integral que opera rentabilizando con sostenibilidad para nuestros clientes, nosotros y el entorno; a través de nuestros servicios de formulación de estudios ambientales y oceanográficos, asesoría ambiental, y permisos.

II.4 Razón social

Gapash Consultoría Integral EIRL – RUC: 20562956311

II.5 Dirección postal

Centro Empresarial Plexus, Oficina 101, Calle Martin de Murua 150, San Miguel - Lima – Perú.

II.6 Dirección de correo electrónico del profesional a cargo

Javier Velásquez Maratuetch

Correo: Javier.Velasquez@gapash.com.pe

III. DESCRIPCIÓN DE LA ACTIVIDAD

III.1 Organización de la actividad

La organización de la actividad fue esquematizada de la siguiente manera:

Figura 1

Esquema de la organización del proyecto.



Nota: Elaboración propia

III.2 Finalidad y objetivos de la actividad

III.2.1 Objetivo principal

Analizar las condiciones o régimen de la dinámica del oleaje en la bahía del Callao con el propósito de brindar información a la empresa Liguria respecto a las condiciones del medio donde se ubica el muelle de concreto armado.

III.2.2 Objetivos específicos

- Desarrollar una modelación numérica de propagación de olas desde aguas profundas a poco profundas (área de estudio) mediante el software Delft 3D.
- Analizar la información de olas de datos globales para el empleo como información de condición de frontera para el modelo.
- Calibrar y validar el modelo numérico de olas con información de campo referente a alturas de olas.
- Analizar el espectro de las olas registradas en campo.
- Analizar las condiciones más energéticas que afectan al área de estudio.
- Analizar estacionalmente las series de tiempos generadas a partir de la modelación.

III.3 Problemática

El desarrollo del presente estudio se genera debido a la que la zona sur de la bahía del Callao, donde se ubica la planta de Liguria, viene presentando una disminución de profundidades (avance de la playa) lo que implica un arenamiento o sedimentación en las estructuras marítimas instaladas afectando principalmente al muelle de Liguria (Figura 2). Consecuentemente se tiene la necesidad de caracterizar el oleaje y su dinámica en la bahía del Callao para posteriormente (dentro del desarrollo del proyecto de la empresa) estimar la tasa de transporte de sedimentos con formulaciones empíricas o modelos numéricos que brinden más información del comportamiento sedimentológico en la zona de estudio a corto, mediano o largo plazo. La presente monografía se centra en el estudio del clima marítimo en la bahía del

Callao implementando un modelamiento de propagación de oleaje que analizará el clima de olas en 8 puntos distribuidos a lo largo del tramo de estudio elaborando un análisis estadístico de los parámetros de oleaje (Hs, Tp y Dir) que sirven de partida para diferentes estudios.

III.4 Metodología

La determinación del régimen y dinámica de oleaje en la bahía del Callao se realizará considerando los siguientes pasos:

- Se recopilará datos de olas en aguas profundas de base de datos globales.
- Se determinará los casos prevalecientes, medios y máximos anuales de los eventos de olas en aguas profundas mediante información global.
- Se configurará el modelo numérico mediante la elaboración de mallas, determinación de los bordes de entrada, configuración de los parámetros físicos y parámetros numéricos del modelo.
- Se analizará el espectro de olas registradas en aguas poco profundas.
- Se calibrará el modelo mediante la determinación del coeficiente de fricción que permita representar de mejor manera la dinámica del oleaje.
- Se validará el modelo mediante registro de olas ubicadas en la zona de la actividad.
- Se construirán las series de tiempo para diferentes puntos de control ubicados a lo largo de la costa dentro de la bahía del Callao.
- Se analizará el régimen de oleaje para cada punto de control

III.5 Procedimientos

III.5.1 Fuentes de información

Las fuentes de información empleadas son las siguientes:

- Análisis y Modelamiento del transporte de sedimentos del muelle pesquero Liguria ubicado en la provincia constitucional del Callao – Inversiones Pesqueras Liguria S.A. (LIGURIA). Desarrollado por GAPASH. (2021)
- Acondicionamiento Muelle Sacramento como cargadero de piedra para ganguiles ubicado en Oquendo, distrito de Ventanilla – departamento de Lima. Desarrollado por INMAR. (2020)

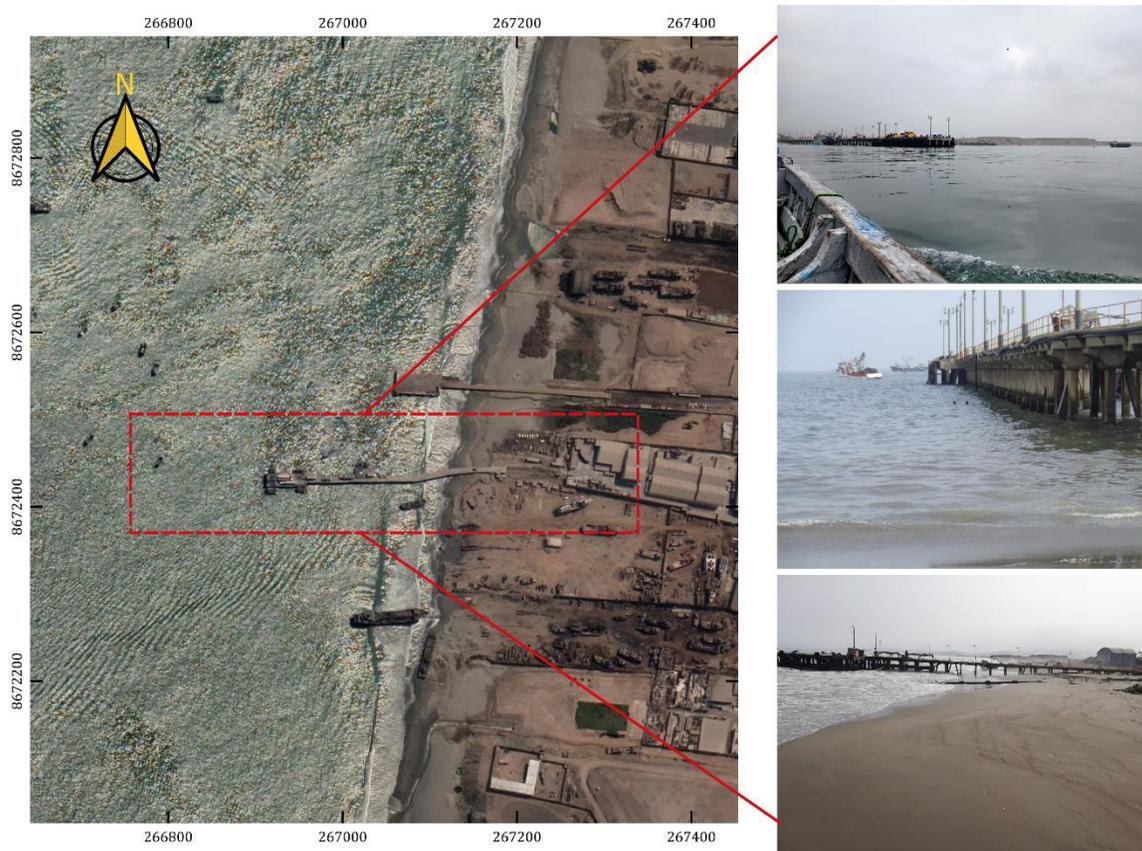
Es importante señalar que para el empleo de la fuente de información de cada proyecto se cuenta con el permiso correspondiente tanto de GAPASH como de INMAR.

III.5.2 Unidad de observación

Las unidades de observación son las alturas, periodos y su procedencia de las olas hasta la bahía del Callao, y en específico la zona de ubicación del muelle de concreto armado de Liguria.

FIGURA 2

Muelle de Liguria en la bahía del Callao



Nota: Elaboración propia

III.5.3 Procedimiento de recolección de datos

Para la elaboración del presente estudio se emplearon los siguientes datos:

1. Datos globales de oleaje de Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO).

La información de datos globales de olas del viento oceánico basada en el modelo de olas WaveWatch III en sus diferentes versiones, tienen una resolución de grilla de información de 4° , y las salidas empleadas son tiempo, estación, longitud, latitud, frecuencia, dirección, altura, periodo pico, dirección pico, dirección media, etc. El periodo de datos usado para el presente estudio fue de enero de 1979 a abril del 2022 (43 años). El uso de datos de CISRO se justifica en el hecho de proporcionar

información de olas en forma horaria, así como brindar datos de direcciones medias y picos que favorecen a una mejor calibración del modelo.

2. Datos de oleaje registrados en la bahía de Callao.

El registro de la información se realizó mediante la instalación de equipos perfiladores de corriente acústico Doppler (ADCP) de 600 kHz, los cuales registran el oleaje mediante la detección acústica de la superficie por un transductor vertical. Por medio de la función AST (Acoustic Surface Tracking) se determina el estado de mar y se estiman los parámetros de oleaje basados en el análisis de series temporales.

3. Batimetría de cartas Náuticas HIDRONAV

Se emplearon las cartas náuticas de la zona del Callao pertenecientes a la Dirección de Hidrografía y Navegación y que según la entidad dicha información ha sido elaborada bajo las normas y procedimientos internacionales, describiendo informaciones hidrográficas, ayudas a la navegación, normas de señalización náutica, etc.

4. Levantamientos batimétricos de detalle

Se realizaron levantamientos batimétricos del tipo monohaz abarcando la zona de estudio de Liguria, la metodología se basa en realizar transectos perpendiculares a la costa y distanciados entre sí a criterio en base a la escala del estudio, interrelacionando las profundidades que registra la ecosonda con el posicionamiento medido por el GPS mediante un software hidrográfico.

IV. RESULTADOS DE LA ACTIVIDAD

IV.1 Sustento teórico

IV.1.1 Olas

Definiendo de la manera más simple qué es una ola, podemos decir que es una onda generada en mar y como toda onda posee características ligadas a su periodo, frecuencia y longitud. Si hablamos de su proceso, podemos indicar que una ola es generada en una zona ventosa en aguas profundas, que recorre

grandes extensiones de mar abierto, que se acerca a costa y que rompe en la orilla. Sin embargo, la mejor definición encontrada en el desarrollo de este estudio es la indicada por De La Peña (2007) "El oleaje es el principal agente climático de la dinámica litoral". Se entiende por dinámica litoral a la variación que pueden tener las costas a lo largo del tiempo debido a la acción del oleaje que con la energía que posee, es capaz de generar el transporte sedimentos que luego se traduce en sedimentación o erosión de las playas.

Una forma de clasificar las olas es en base a su periodo y frecuencia, como lo realizado por Munk (1951), que las clasificó en olas de capilaridad (olas crestas en forma de V y longitudes inferiores a 1.74 cm), olas de gravedad (olas desarrolladas, simétricas, con longitudes superiores a 1.74cm que alcanzan magnitudes entre 15 a 35 veces su altura), olas de periodo largo (olas con periodos entre 1 a 20 minutos) y olas de marea (olas con periodos de 12.25 horas en promedio para mareas semidiurna y 24.5 horas en promedio para mareas diurnas).

IV.1.2 Espectro de la ola

El oleaje puede ser estudiado de dos formas, la primera de forma estadística, y la segunda de forma espectral. En esta sección se mencionará y explicará brevemente la descripción del oleaje como un fenómeno energético, donde el registro de un estado de mar puede descomponerse en base a las diferentes direcciones y frecuencias de cada una de las olas mediante el análisis armónico de Fourier:

$$\eta(x, y, t) = \sum a_j \cos[\omega_j t - \phi_j - k_j(x \cos \theta_j + y \sin \theta_j)] \quad \text{Ecuación (1)}$$

Donde:

$\eta(x, y, t)$ = Elevación de la superficie en función del tiempo t

a_j = la amplitud

$\omega = 2\pi f = 2\pi / T$ = frecuencia angular de la ola

$T = \text{periodo de la ola} = 1 / f$

$\phi = \text{ángulo de fase del grupo } j \text{ cuando } t = 0$

$\theta = \text{ángulo formado entre el eje } x \text{ y la dirección de propagación}$

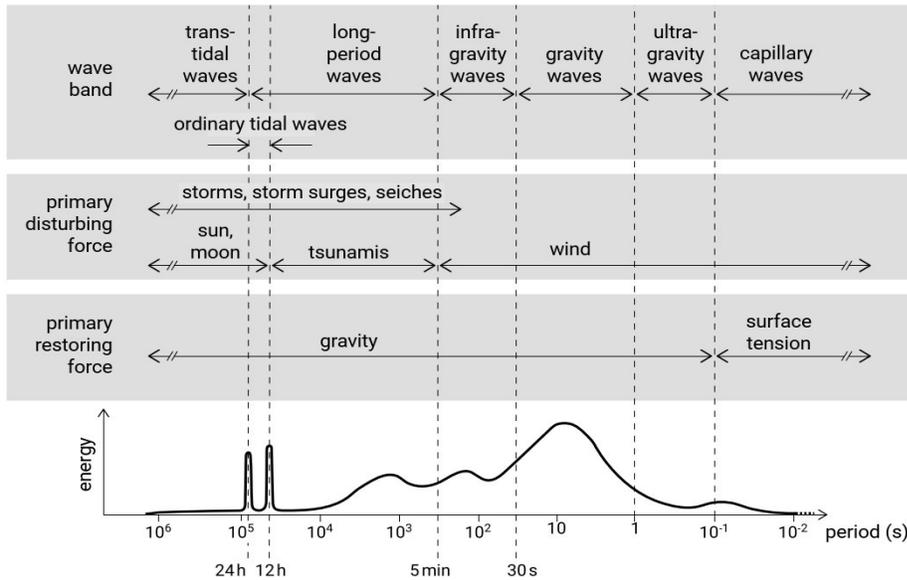
En la ecuación anterior se representa el espectro total de la ola denominado espectro de oleaje, espectro completo o espectro de oleaje direccional.

Si despreciamos las direcciones de propagación, entonces la ecuación anterior se simplifica denominándose espectro de oleaje o espectro escalar, cuya expresión es la siguiente:

$$\eta(t) = \sum a_j \cos(\omega_j t - \phi_j) \tag{Ecuación (2)}$$

Figura 3

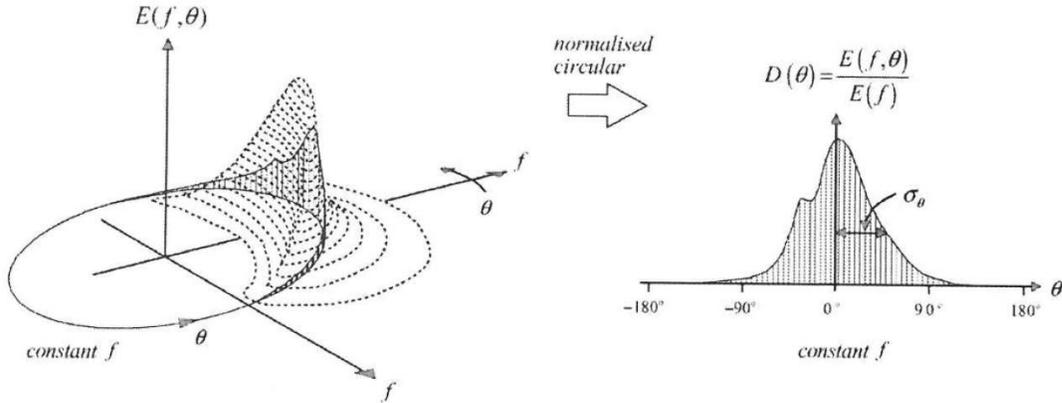
Clasificación de las olas marinas según Munk (1951) y Kinsman (1965).



Nota: Adaptado del libro "Coastal Dynamics" de Bosboom, J.; Stive, M.J.F. publicado en el 2021 en Delft University of Technology.

Figura 4

Espectro de dirección de frecuencia bidimensional y su ancho direccional [Holthuijsen 2007]



Nota: Adaptado de "Process-based modelling of morphological response to submerged breakwaters" de Roland Justin Vlijm. publicado en el 2011 en Delft University of Technology.

A partir del espectro del oleaje se pueden calcular los parámetros estadísticos que describen un estado de mar, iniciando con la definición del momento de orden n del espectro:

$$m_n = \int_0^{\infty} f^n S(f) df \quad \text{Ecuación (3)}$$

Que puede transformarse en:

$$m_n = \sum f_i^n \frac{1}{2} a_i^2 \quad \text{Ecuación (4)}$$

De esta última ecuación podemos expresar el momento de orden 0 o m_0 :

$$m_0 = \sum \frac{1}{2} a_i^2 = \frac{1}{2} a^2 \quad \text{Ecuación (5)}$$

Así mismo, la altura cuadrática media se expresa:

$$H_{ms} = (8E / \rho g)^{1/2} \quad \text{Ecuación (6)}$$

Y la altura deducida del espectro que corresponde al mismo o similar valor que la altura significativa se obtiene:

$$H_{m0} = (16E / \rho g)^{1/2} = 4m_0^{1/2} \quad \text{Ecuación (7)}$$

Con respecto a la frecuencia media, esta se llega a calcular a partir del momento de orden 0 y momento de orden 1:

$$T_{m01} = m_0 / m_1 \quad \text{Ecuación (8)}$$

IV.1.3 Descripción estadística de una ola

Para el análisis del oleaje por métodos estadísticos se emplean parámetros representativos que son incluidos en las funciones de distribución teóricas y que permiten la descripción probabilística de los mismos, a continuación, se definirán los parámetros representativos:

- Altura media (Hm): Es la media aritmética de todas las olas de un registro.
- Altura significativa (Hs o H1/3): Corresponde a la media de 1/3 de olas más altas en un registro.
- Altura máxima (Hmax): Es la altura máxima registrada.
- Periodo pico (Tp): Es el periodo de olas correspondientes a la frecuencia máxima del espectro de olas.

IV.1.4 Tipo y características de olas

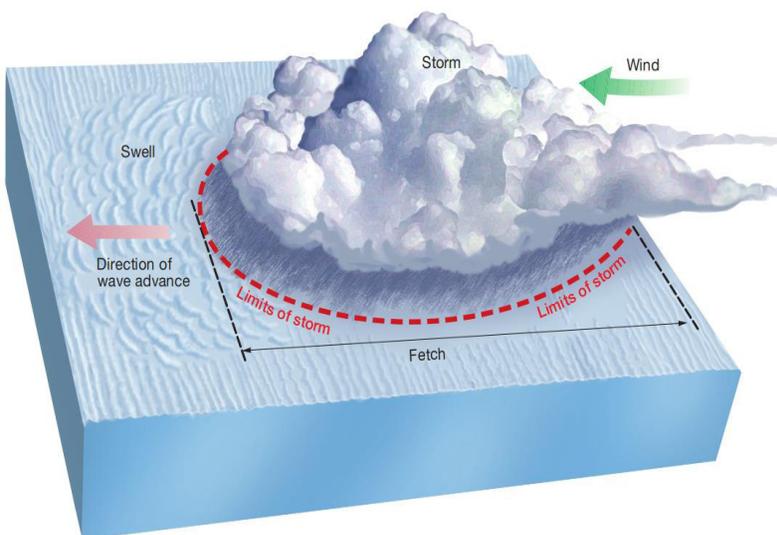
Las olas son generadas por la interacción del viento con la masa de agua (mar), cuando el viento sopla se produce una transmisión de energía de la superficie al mar. Según De La Peña (2007) "Las velocidades de fluctuación originan sobre la superficie del mar, inicialmente en reposo, fluctuaciones de presión y esfuerzo cortante que provocan una onda, u ola marina, que la velocidad del viento se encarga de transportar". Gracias a este fenómeno llegan a generarse distintos grupos de olas con características diferentes en cuanto al periodo, altura y dirección. El área donde el viento interactúa con el mar se

denomina zona fetch, y las olas generadas por los vientos son denominadas mar de viento o Sea cuya característica está en la aparente heterogeneidad de sus condiciones, así mismo, las olas que recorren grandes distancias fuera de su zona de generación y que se encuentran desarrolladas con mayor homogeneidad y simetría (dirección y periodo de olas más uniforme) son denominadas mar de fondo o Swell.

Con respecto a las olas que llegan a nuestras costas, éstas son generadas en aguas profundas bajo la presión del viento, en específico son generadas por el Anticiclón del Pacífico Sur Oriental (APSO) cuyos vientos bordean las costas chilenas y peruanas rumbo hacia las zonas ecuatoriales. La zona donde el oleaje se genera se sitúa aproximadamente entre las latitudes 35° y 40° Sur, mientras que la longitud Oeste del centro de generación varía con mayor amplitud; es en esta área donde se produce la mayor subsidencia atmosférica y consecuentemente divergencia del viento en superficie.

Figura 5

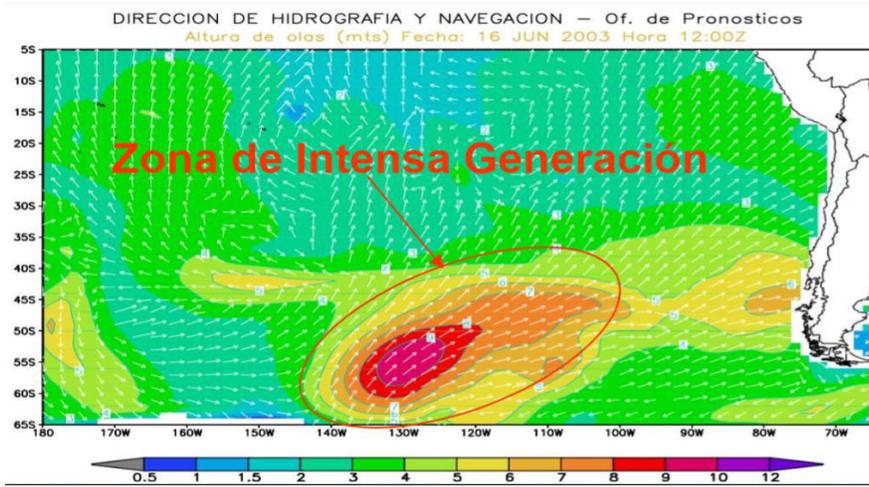
Zona Fetch y generación de olas tipo Swell y Sea



Nota: Adaptado del libro “Essentials of Oceanography” de Trujillo y Thurman. Décima Edición. publicado en el 2011 en Pearson.

Figura 6

Zona de generación de oleajes en el Océano Pacífico Sur



Nota: Adaptado de la presentación “Peligros Marinos, Oleajes anómalos y su impacto en zonas costeras” desarrollado por la Dirección de Hidrografía y Navegación del Perú – DHN del 2016.

IV.1.5 Patrones de interferencia de las olas

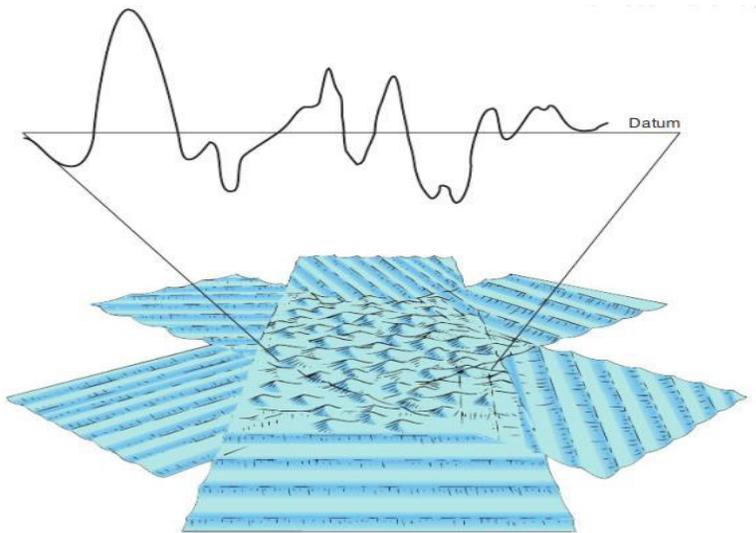
Los grupos o sistema de olas con características diferentes pueden juntarse entre sí generando “patrones de interferencia”, los cuales son una suma de la perturbación que cada grupo de olas produce individualmente. Para ello, se presentan los siguientes tipos de interferencia:

- Interferencia Constructiva: Se presenta de la agrupación de olas con la misma longitud de onda de tal manera que se juntan en la fase de cresta a cresta y de valle a valle, traduciéndose en la suma de las alturas de olas de cada grupo.
- Interferencia Destructiva: Se presenta de la agrupación de olas con la misma de longitud de onda pero fuera de fase de tal manera que la cresta de un grupo de olas coincide con el valle del segundo grupo de olas traduciéndose en la disminución o anulación (si poseen la misma magnitud de altura) de las alturas de olas.

- Interferencia Mixta: Se presenta de la agrupación de los patrones de interferencia constructiva y destructiva, creando patrones complejos que son los que normalmente se observan en el océano.

Figura 7

Patrón de interferencia mixta



Nota: Adaptado del libro “Essentials of Oceanography” de Trujillo y Thurman. Décima Edición. publicado en el 2011 en Pearson.

IV.1.6 Modificación de la energía de las olas

Conforme las olas van trasladándose hacia costa empiezan a sufrir distorsiones o modificación en su energía ya sea por la variación de las profundidades, o por la presencia de obstáculos naturales o artificiales en la batimetría, a continuación, se definirá cada fenómeno:

IV.1.6.1 Refracción

Cuando las olas se acercan hacia costa con un ángulo, los frentes se trasladan con mayor velocidad en las zonas más profundas que en comparación a la zona de menor profundidad. Esta condición origina que los frentes giren hacia las áreas de menor profundidad, este efecto es denominado refracción.

En la siguiente figura se puede observar cómo los frentes de olas que se van acercando a costa convergen donde las curvas de nivel son convexas, a lo contrario de las curvas de nivel que son cóncavas, donde los frentes de olas divergen.

IV.1.6.2 Difracción

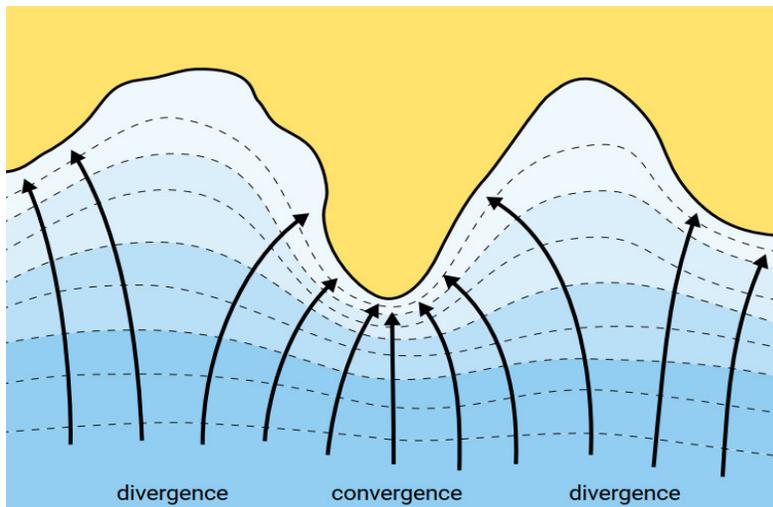
La difracción es el proceso en donde la energía de la ola se propaga perpendicularmente a la dirección dominante antes de sufrir el cambio. Este fenómeno se presenta cuando en el trayecto de las olas existe un obstáculo como una punta natural o rompeolas de igual o menor magnitud que la longitud de ola originando un nuevo sistema con longitud y altura de olas menores a las presentadas (zona sombra de la difracción).

IV.1.6.3 Reflexión

Este fenómeno se produce cuando las olas se encuentran con un obstáculo vertical que al reflejar en este, se genera un nuevo sistema de olas que se extienden hacia afuera del obstáculo hasta volverse más pequeñas y desaparecer. El efecto de la reflexión se traduce en el aumento de la altura de ola y a que las olas incidentes y las reflejadas lleguen a encontrarse anulando los movimientos horizontales dejando únicamente los movimientos verticales (asumiendo que las olas son regulares).

Figura 8

Ejemplo de la refracción de olas



Nota: Adaptado del libro "Coastal Dynamics" de Bosboom, J.; Stive, M.J.F. publicado en el 2021 en Delft University of Technology.

Figura 9

Ejemplo de la difracción de olas



Nota: Elaboración propia.

IV.1.7 Modelo Numérico

IV.1.7.1 Delft 3D

Para comprender el funcionamiento dinámico de la Bahía y la zona comprendida en el muelle de Liguria se realizó la propagación de olas mediante el modelo DELFT 3D, que con su módulo Wave simula la evolución de las olas generadas por el viento en las aguas costeras. El módulo Wave está basado en el modelo SWAN (Simulating Waves Nearshore) de tercera generación que es completamente espectral en frecuencias y direcciones, los cálculos de ondas son incondicionalmente estables debido a sus esquemas implícitos. Se describiré el modelo SWAN con mayor detalle en el siguiente punto.

IV.1.7.1.1 Acoplamiento con otros módulos

Como lo mencionado en el punto anterior, el módulo Wave puede ser acoplado a otros módulos del mismo software ya que la resultante sirve como información de entrada.

- Módulo Delft3D-Flow: Corrientes impulsadas por olas, turbulencia mejorada y esfuerzo cortante del fondo.
- Módulo Delft3D-Flow 3DMOR: Agitación por rompimiento de olas

IV.1.7.1.2 Características especiales

El módulo wave puede ser acoplado con el módulo Flow del mismo programa, generando una interacción de corriente de olas bidireccional, es decir, se considera el efecto de las olas sobre las corrientes mediante el forzamiento, la turbulencia mejorada y el esfuerzo cortante del fondo marino actualizado en cada paso de tiempo, y el efecto del flujo sobre las olas mediante la refracción de las corrientes y la fricción del fondo actualizado en cada paso de tiempo.

IV.1.7.2 Modelo SWAN

La variación de la superficie del mar o también denominado estado de mar puede representarse mediante el espectro de la densidad de energía (energy density spectrum) cuya fórmula matemática depende de la frecuencia y dirección de la ola:

$$E = (\sigma, \theta) \quad \text{Ecuación (9)}$$

El espectro que se considera en el modelo SWAN es el espectro de densidad de acción de las olas $N = (\sigma, \theta)$ en lugar del espectro de densidad de energía $E = (\sigma, \theta)$ ya que, en presencia de corrientes, la densidad de acción se conserva mientras que la densidad de energía no, por lo que la densidad de acción de las olas se considera un invariable adiabática.

La densidad de la acción de las olas (action density spectrum), N , depende de la energía de las olas y la frecuencia relativa según la siguiente ecuación:

$$N(\sigma, \theta) = E(\sigma, \theta) / \sigma \quad \text{Ecuación (10)}$$

Donde:

E : Energía total de un grupo de olas

σ : Frecuencia angular relativa

θ : Ángulo de la ola incidente

Así mismo la ecuación de la acción de las olas (action balance equation) aplicado en un punto en el espacio se da de la siguiente forma:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla \vec{x} \cdot [(\vec{C}_g + \vec{U})N] + \frac{\partial C_\sigma N}{\partial \sigma} + \frac{\partial C_\theta N}{\partial \theta} = \frac{S_{tot}}{\sigma} \quad \text{Ecuación (11)}$$

Donde:

- $\frac{\partial N}{\partial t}$: representa la evolución temporal de la densidad de la acción de las olas N .

- $\nabla_{\vec{x}} \cdot [(\vec{C}_g + \vec{U})N]$: representa la propagación de la energía de las olas en 2D, donde la velocidad del grupo $\vec{C}_g = \frac{\partial \sigma}{\partial \vec{k}}$ se deriva de la dispersión $\sigma^2 = g|\vec{k}|d$ y la velocidad \vec{U} se asume uniforme en la dirección vertical¹.
- $\frac{\partial C_\sigma N}{\partial \sigma}$: representa el efecto del desplazamiento de la frecuencia en radianes debido a las variaciones en las corrientes medias.
- $\frac{\partial C\theta N}{\partial \theta}$: representa la refracción inducida por profundidad y por corriente.
- $\frac{S_{tot}}{\sigma}$: representa los cambios espectrales de todas las fuentes.

Es posible incluir varios procesos físicos por medio de los términos fuentes al lado derecho de la Ecuación (11), considerando lo siguiente:

$$S_{tot} = S_{in} + S_{nl3} + S_{nl4} + S_{ds,w} + S_{ds,b} + S_{ds,br} \quad \text{Ecuación (12)}$$

Donde:

S_{in} : Representa el crecimiento de las olas por el viento

S_{nl3} : Representa la transferencia no lineal de energía de las olas

$S_{ds,w}$: Representa el decaimiento de la ola debido al “whitecapping”

$S_{ds,br}$: Representa la ruptura de la ola inducida por la profundidad

Por último, el modelo SWAN resuelve considerando los siguientes fenómenos físicos:

- Refracción de la ola sobre un fondo con profundidades variables

¹ Para el presente trabajo, se desarrolló netamente el modelamiento de olas por lo que el término $\nabla_{\vec{x}} \cdot [(\vec{C}_g + \vec{U})N]$ que describe la celeridad de grupo y la velocidad de corrientes son iguales a cero.

- Profundidad y corrientes inducidas por asomeramiento
- Generación de olas por vientos
- Disipación por “whitecapping”
- Disipación de rotura de ola inducida por profundidad
- Disipación por fricción del fondo
- Interacción onda-onda no lineales
- Bloqueo de onda por flujo
- Difracción

IV.1.7.3 Disipación de energía por la fricción del fondo

La fricción del fondo tiene un efecto importante en la propagación de las olas ya que llegan a transformarse en su recorrido desde aguas profundas a poco profundas (a costa) debido a que la profundidad disminuye progresivamente, lo que provoca que el fondo transforme las órbitas del oleaje de circular a elípticas, transfiriendo energía al movimiento turbulento en la capa límite del fondo (la disipación de energía de las olas depende de las características del fondo y el campo de olas). El carácter disipativo que determina cuánto es la pérdida de energía está representado por el coeficiente de fricción el que está basado en pruebas empíricas. (Es por ello que es importante la calibración del modelo numérico con información registrada en la zona de estudio).

La estimación del coeficiente de fricción en SWAN está determinado por tres modelos:

1. Modelo empírico Jonswap - 1973
2. Modelo de ley de arrastre Collins - 1972
3. Modelo de viscosidad de remolino de Madsen et al. - 1988

El coeficiente de fricción del fondo de los modelos se expresa de la siguiente manera:

$$S_{ds,b} = -C_b \frac{\sigma^2}{g^2 \sinh^2 kd} E(\sigma, \theta) \quad \text{Ecuación (13)}$$

Donde:

σ : frecuencia

C_b : Coeficiente de fricción del fondo, que depende de la velocidad orbital del fondo representado por la velocidad orbital media cuadrática U_{rms} :

$$U_{rms}^2 = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \frac{\sigma^2}{g^2 \sinh^2 kd} E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta \quad \text{Ecuación (14)}$$

IV.1.7.4 Espectro del oleaje

El espectro del oleaje es una forma de representar el aspecto aleatorio y complejo de un estado de mar, la cual se representa a través de:

$$E(f, \theta) \quad \text{Ecuación (15)}$$

A su vez, el espectro total puede dividirse en espectro frecuencial $E(f)$ y espectro direccional $E(\theta)$, considerando las siguientes ecuaciones:

$$E(f) = \int_0^{2\pi} E(f, \theta) d\theta \quad \text{Ecuación (16)}$$

$$E(\theta) = \int_0^{\infty} E(f, \theta) df \quad \text{Ecuación (17)}$$

y los parámetros del oleaje pueden ser calculados mediante los momentos espectrales de orden i :

$$m_i = \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} E(f, \theta) f^i d\theta df \quad \text{Ecuación (18)}$$

IV.1.7.5 Espectro teórico del oleaje

La forma general del espectro teórico está dada por la siguiente ecuación:

$$S(\omega) = A\omega^{-p} e^{-B\omega^{-q}} \quad \text{Ecuación (19)}$$

Donde:

A, B, p y q: parámetros libres.

ω : Frecuencia local

El modelo numérico Delft 3D emplea tres formas de espectro teórico del oleaje para la propagación de olas: Espectro Jonswap, Espectro Pierson-Moskowitz y el Espectro de Gauss. Para el presente trabajo se realizó el modelamiento considerando el espectro teórico de Jonswap expresado como:

$$S(\omega)_{JONSWAP} = \int_0^{\infty} \alpha g^2 \omega^{-5} e^{-1.25(\omega/\omega_p)^4} \gamma^{\delta} d\omega \quad \text{Ecuación (20)}$$

Donde:

$$\delta = e^{-((\omega - \omega_p)^2 / 2\sigma_{(a,b)}^2 \omega_p^2)}$$

$$\sigma_{(a,b)} = \begin{cases} \sigma_a = 0.07 \text{ cuando, } \omega \leq \omega_p \\ \sigma_a = 0.09 \text{ cuando, } \omega > \omega_p \end{cases}$$

α : Coeficiente de escala de energía

g : Gravedad de la tierra (m/s^2)

ω : Frecuencia (rad/s)

ω_p : Frecuencia de pico (rad/s)

γ^{δ} : Factor de acentuamiento del pico añadido al espectro P-M para representar las formas espectrales y puntiagudas que se presentan en los oleajes parcialmente desarrollados.

γ : Coeficiente de apuntamiento del espectro

δ : Anchura de la región cercana al pico

$\sigma_{(a,b)}$: Parámetros de forma

IV.2 Caracterización de olas en aguas profundas

La principal información de entrada para el modelamiento son los datos de olas en “aguas profundas”, es decir, datos o series de tiempo de oleaje que se encuentra a grandes profundidades donde las olas no llegan a ser afectados por el cambio del fondo o disminución de profundidades como lo

ocurrido en el fenómeno de asomeramiento, ni por la variación de la costa (fenómeno de refracción), ni por la presencia de islas, puntas o estructuras que difracten los frentes de olas.

Para la presente monografía se emplearon datos globales publicados por la Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO) la cual es una institución del gobierno australiano encargado de la investigación científica.

Los datos globales empleados poseen altura, periodo pico, dirección media y dirección pico del oleaje desde enero de 1979 hasta abril del 2022 en un nodo ubicado en las siguientes coordenadas:

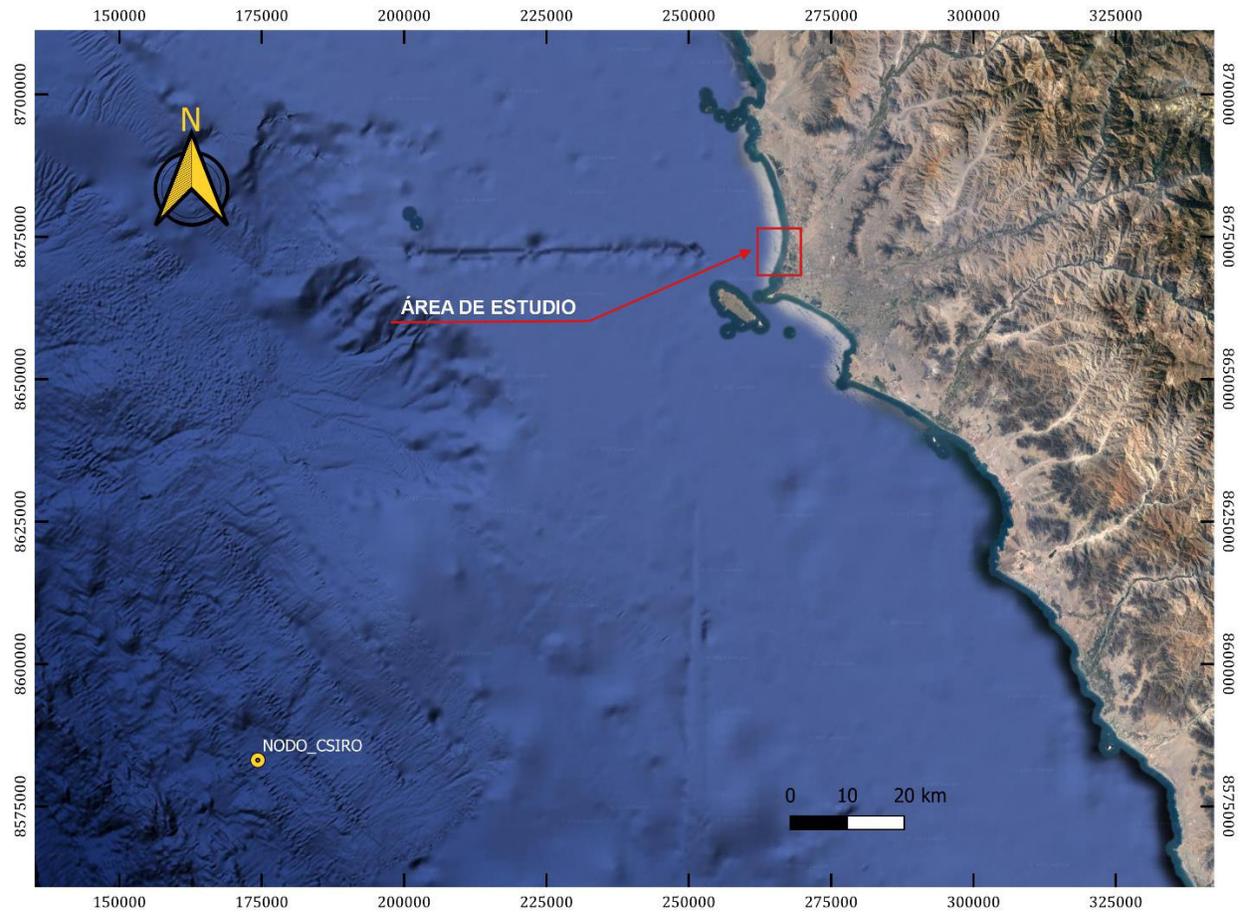
Tabla 1

Coordenadas de ubicación del nodo de datos de olas globales de CSIRO

DESC.	COORDENADAS UTM 18S		COORDENADAS GEOGRÁFICAS WGS84		PROFUNDIDAD (NMBSO)
	ESTE	NORTE	LATITUD	LONGITUD	
NODO	174282.230 m	8583090.880 m	12°48'0.00" S	78°00'00.00" W	2,500 m

Figura 10

Ubicación del nodo de CSIRO y el área de estudio



A continuación, se presentarán los gráficos y tablas inherentes al régimen de olas en aguas profundas, cuya información será empleada como datos de entrada para el modelo numérico:

Figura 11

Serie de tiempo de la altura de olas (H_s), periodo pico (T_p), dirección media (D_m) y dirección pico (D_p).

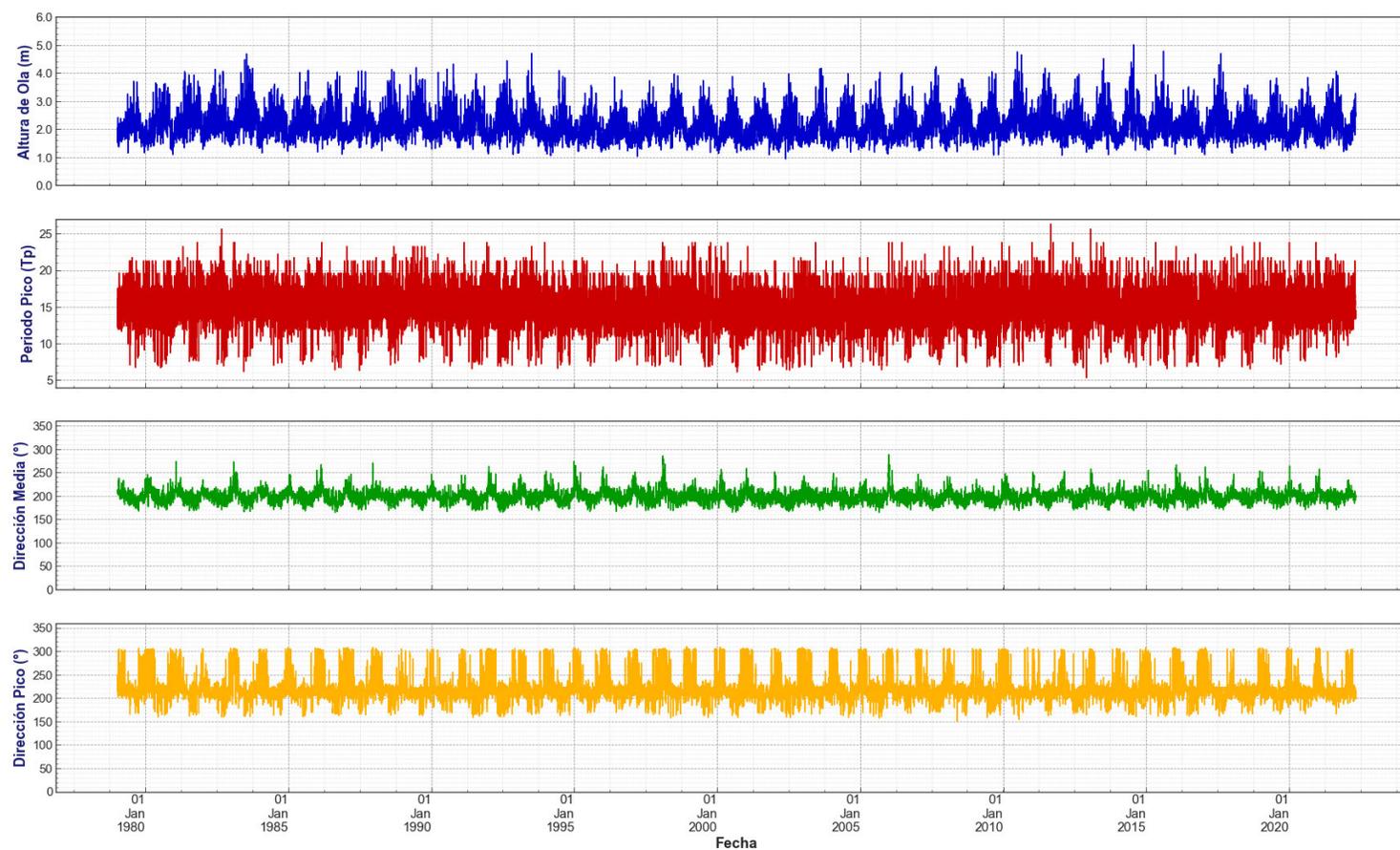


Figura 12

Histogramas de altura de olas (Hs) y dirección media (Dm).

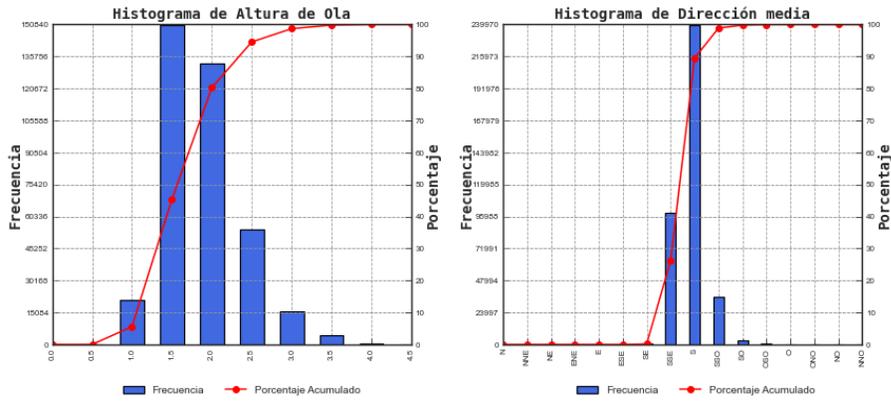


Figura 13

Rosas de la altura de olas (Hs) respecto a la dirección media (Dm) y pico (Dp), y Distribución porcentual de altura de olas (Hs) y periodo pico (Tp).

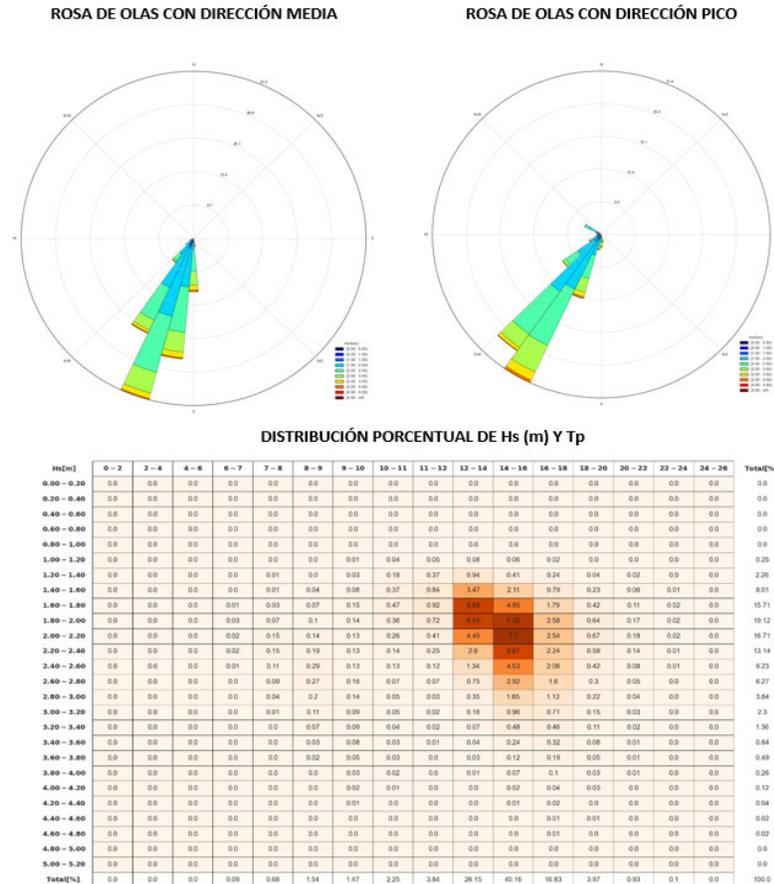


Figura 14

Función de distribución de probabilidad acumulativa de (a) altura significativa, (b) periodo pico, (c) dirección media y (d) dirección pico.

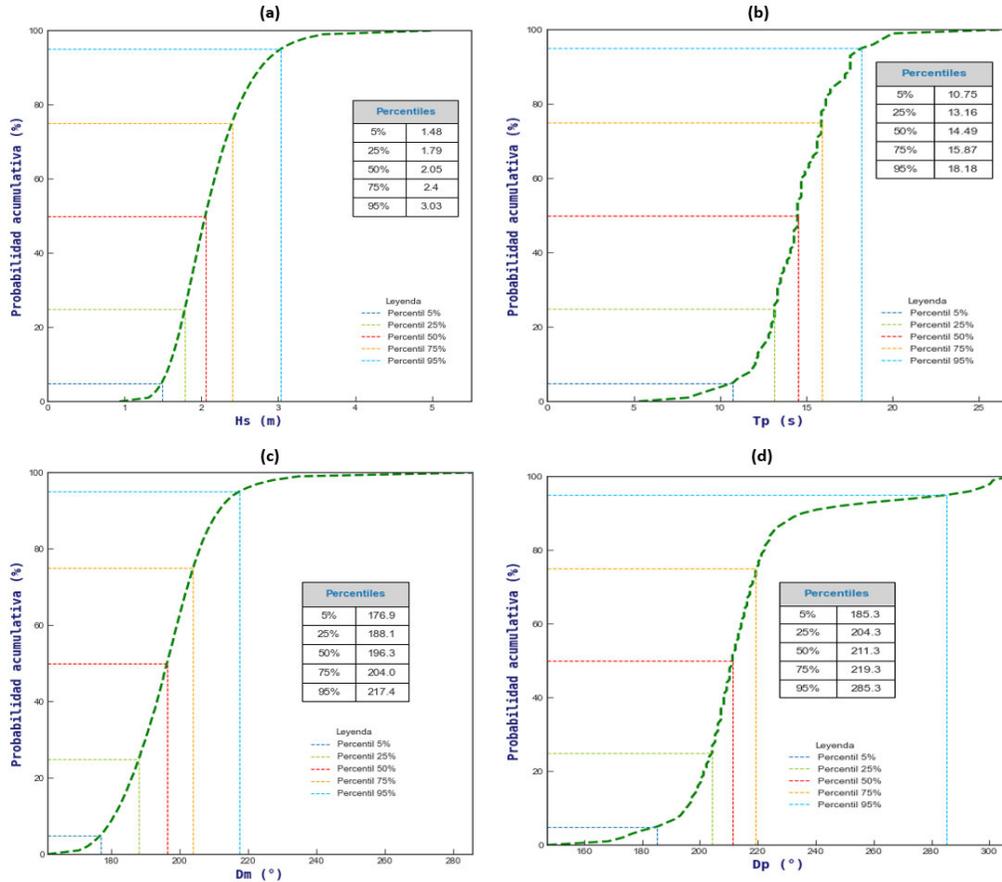


Tabla 2

Estadística descriptiva de altura significativa, periodo pico, dirección media y dirección pico

Descripción	Hs (m)	Tp (s)	Dm (°)	Dp (°)
Media	2.129	14.514	199.322	218.102
Mediana	2.052	14.493	199.000	214.000
Moda	1.970	14.493	201.600	212.000
Desv. Estándar	0.481	2.295	12.807	24.804
Varianza	0.226	0.158	0.064	0.114
Curtosis	1.194	1.023	2.180	4.322
Rango	4.072	21.025	123.900	160.000
Mínimo	0.936	5.291	164.200	150.000
Máximo	5.008	26.316	288.100	310.000

Al analizar la distribución de las alturas de olas significativas con los periodos pico, se encuentra que de la totalidad de los datos analizados (desde 1979 al 2022), la mayoría (99.23%) poseen periodos pico (T_p) superiores a los 8s, relacionado a oleajes de periodo largo (tipo swell) con un 0.76% de datos relacionados a oleajes de periodos bajo (tipo sea), lo que resulta lógico de esperar considerando que para aguas profundas normalmente presentan un dominio de oleaje tipo swell. Así mismo se presentan las siguientes distribuciones por periodo:

- El 0.76% de los datos son menores a periodos de 8s.
- El 3.00% de los datos se encuentran entre periodos de 8 a 10s.
- El 34.23% de los datos se encuentran entre periodos de 10 a 14s.
- El 40.16% de los datos se encuentran entre periodos de 14 a 16s, considerándose este como el rango predominante.
- El 16.83% de los datos se encuentran entre periodos de 16 a 18s.
- El 5.01% de los datos se encuentran entre periodos mayores a 18s.

Del análisis direccional medio presentado a través de las rosas de oleaje, evidencian que en términos generales el oleaje que incide en el área de estudio proviene de los rangos direccionales Sur Sureste (SSE) al Oeste Noroeste (ONO), con mayor incidencia en las direcciones Sur suroeste (SSO) con un 63.24%, Sur (S) con un 26.09%, y Suroeste (SO) con un 9.41%. Con respecto al análisis direccional pico presentado, se evidencia que el oleaje que incide en el área de estudio proviene de los mismos rangos direccionales que en la dirección media, con mayor incidencia en las direcciones Sur Suroeste (SSO) con 42.55%, Suroeste (SO) con 40.96% y Sur Sureste (SSE) con 5.43%. En resumen, las direcciones de mayor predominancia tanto para dirección medio como dirección pico es el Sur Suroeste.

Relacionando los periodos con la dirección media y pico, se observa que el mayor porcentaje de datos correspondientes a los periodos de 14s a 16s poseen un 28.08% y un 17.61% de incidencia en la dirección predominante.

Por otro lado, la estadística descriptiva del oleaje indica una altura significativa mínima, promedio y máxima de 0.936m, 2.13 m y 5.01 m respectivamente. De los percentiles se observa que el 25% de las alturas son inferiores a 1.79 m, que el 75% de las alturas son inferiores al 2.40 m y que el 95% de las alturas son inferiores a 3.03 m.

IV.3 Caracterización de olas medidas en campo

Para el proyecto de Liguria se realizó el registro de parámetros oceanográficos in situ mediante la instalación de un perfilador de corriente acústico Doppler (ADCP), el cual mediante la emisión de pulsos acústicos y de su sensor de presión registran los parámetros característicos del oleaje (altura significativa, altura media, altura máxima, periodo pico, periodo medio, dirección media, dirección pico, etc.). La información registrada posee una duración de 29 días que corresponde al 10/06/2021 al 09/07/2021, con un periodo de registro de cada 2 horas.

Tabla 3

Coordenadas del punto ADCP1 – Proyecto Liguria

DESC.	COORDENADAS UTM 18S		COORDENADAS GEOGRÁFICAS WGS84		PROFUNDIDAD (NMBSO)
	ESTE	NORTE	LATITUD	LONGITUD	
ADCP 1	266259.000 m	8672454.000 m	12° 0'2.66" S	77° 8'48.24" W	6.70 m

Nota: Periodo de registro desde 10/06/2021 al 09/07/2021

Para que la obtención de resultados posea calidad, es necesario emplear la mayor información in situ que se conozca de la zona de estudio, es por ello que para la validación del modelo se han usado los datos de olas registradas de los proyectos mencionados anteriormente (Ítem III.5.1 Fuentes de información), en los que se cuentan con los siguientes periodos de medición:

Tabla 4

Coordenadas del punto ADCP2 – Proyecto Liguria y ADCP3 – Proyecto Sacramento

DESC.	COORDENADAS UTM 18S		COORDENADAS GEOGRÁFICAS WGS84		PROFUNDIDAD (NMBSO)
	ESTE	NORTE	LATITUD	LONGITUD	
ADCP 2	261705.000 m	8675757.000 m	11°58'14.04" S	77°11'17.86" W	26.50 m
ADCP 3	266966.000 m	8677293.000 m	11°57'25.41" S	77° 8'23.63" W	8.80 m

Nota: Periodo de registro de Liguria desde 26/07/2020 al 15/08/2020, y periodo de registro de Sacramento desde 12/02/2021 al 12/05/2021.

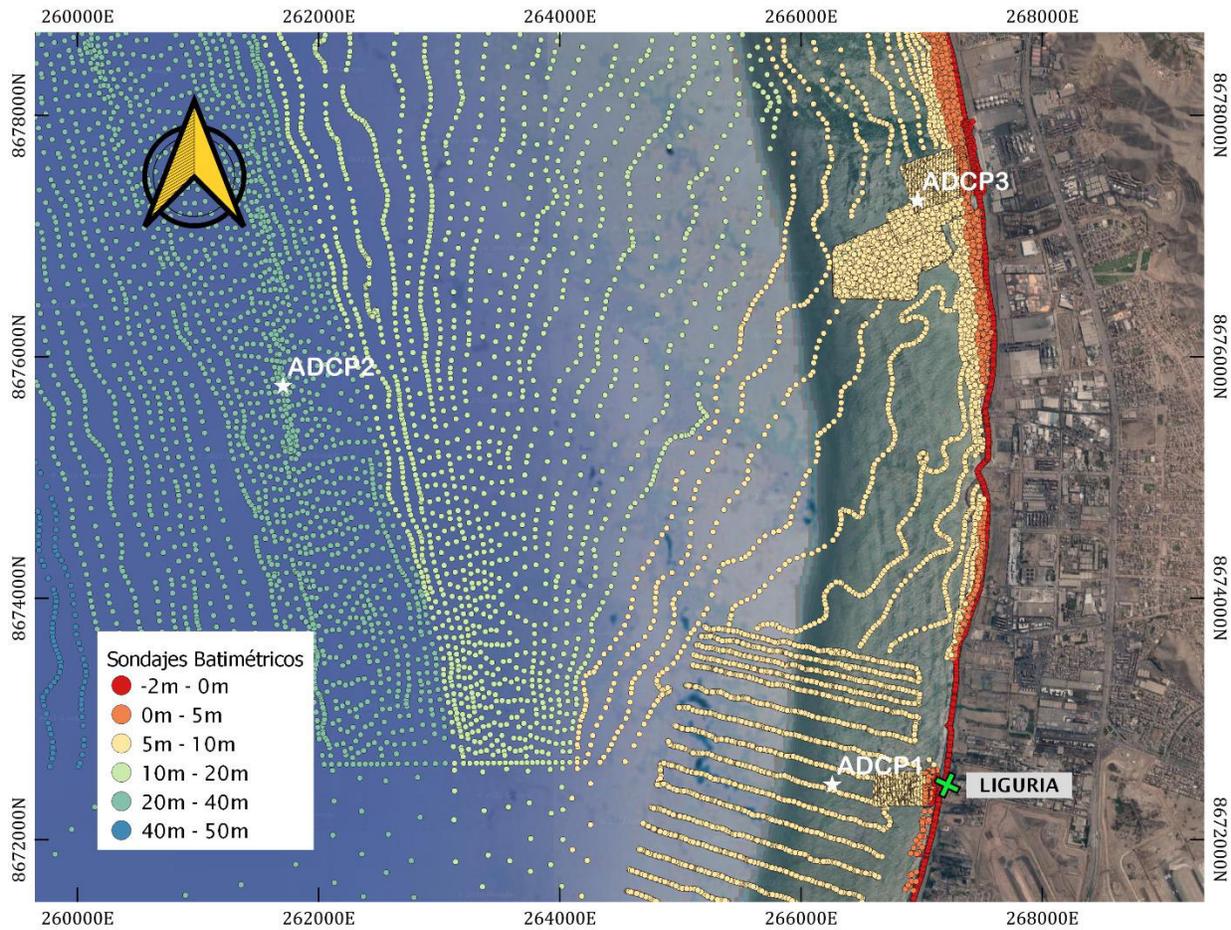
Figura 15

Ubicación los puntos ADCP1, ADCP2 y ADCP3



Figura 16

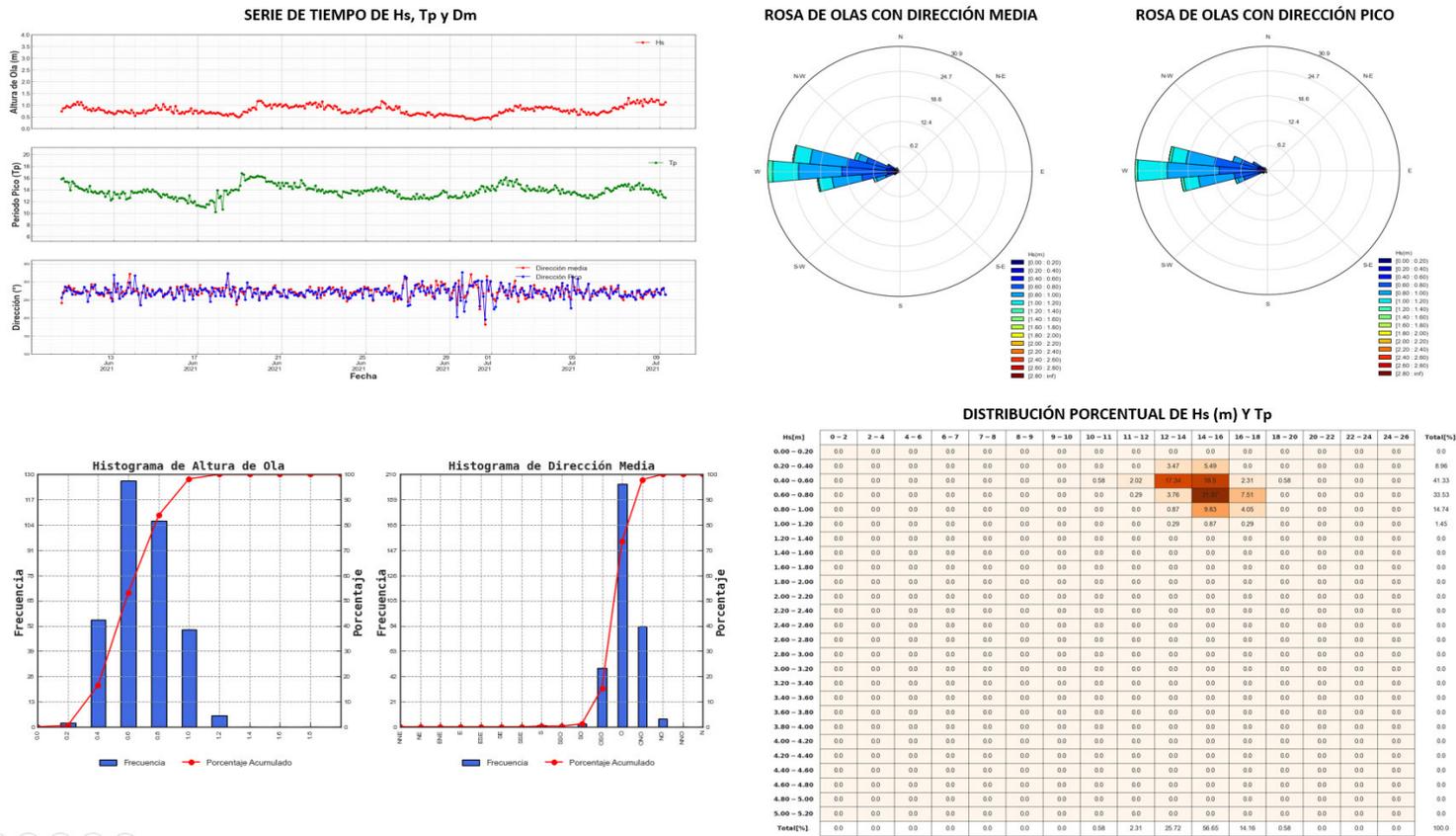
Ubicación de los puntos ADCP1, ADCP2 y ADCP3 en mapa de sondajes



A continuación, se presentarán los gráficos y tablas inherentes al régimen de olas en aguas poco profundas, cuya información será empleada para la validación del modelo numérico.

Figura 17

Gráficas estadísticas de olas en aguas poco profundas en el punto ADCP1.



Nota: Elaboración propia

Tabla 5

Estadística descriptiva de altura significativa, periodo pico, dirección media y dirección pico

Descripción	Hs (m)	Tp (s)	Dm (°)	Dp (°)
Media	0.795	14.680	272.659	271.166
Mediana	0.780	14.660	272.515	271.125
Moda	0.600	14.860	258.820	250.510
Desv. Estándar	0.189	1.334	14.945	15.990
Varianza	0.238	0.091	0.055	0.059
Curtosis	-0.438	0.506	4.261	3.215
Rango	0.940	8.260	140.050	131.090
Mínimo	0.370	10.250	181.440	195.230
Percentil 5%	0.510	12.690	251.830	248.320
Percentil 25%	0.660	13.860	264.110	263.100
Percentil 50%	0.780	14.660	272.520	271.120
Percentil 75%	0.930	15.310	281.480	279.770
Percentil 95%	1.140	17.090	295.170	297.580
Máximo	1.310	18.510	321.490	326.320

Al analizar la distribución de las alturas de olas significativas registradas con los periodos pico, se encuentra que la totalidad de los datos analizados poseen periodos pico (Tp) superiores a los 10s, relacionado a oleajes de periodo largo (tipo swell) lo que resulta lógico de esperar considerando que para la fecha de medición (temporada de invierno) el litoral peruano presenta mayor intensidad del oleaje del tipo swell. Así mismo se presentan las siguientes distribuciones por periodo:

- El 2.89% de los datos se encuentran entre periodos de 10 a 12s.
- El 25.72% de los datos se encuentran entre periodos de 12 a 14s.
- El 56.65% de los datos se encuentran entre periodos de 14 a 16s, considerándose este como el rango predominante.
- El 14.16% de los datos se encuentran entre periodos de 16 a 18s.
- El 0.58% de los datos se encuentran entre periodos mayores a 18s.

Del análisis direccional medio presentado a través de las rosas de oleaje, se evidencian que en términos generales el oleaje que incide en el punto ADCP 1 proviene de los rangos direccionales Sur (S) al

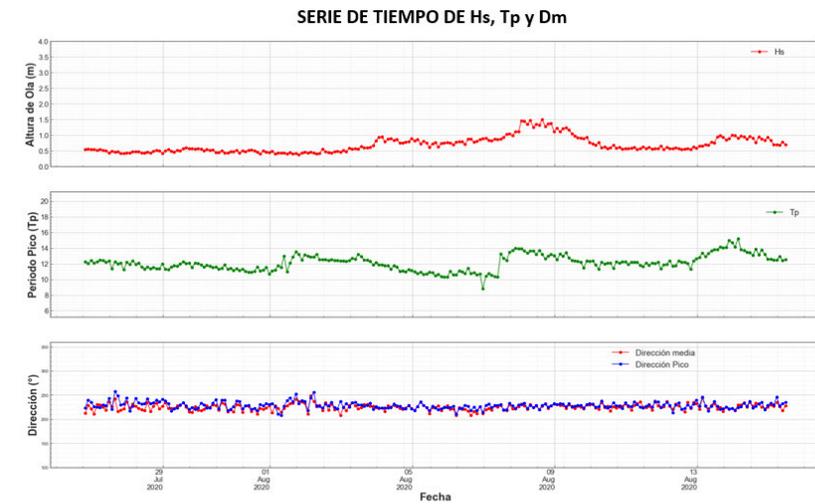
Noroeste (NO), con mayor incidencia en las direcciones Oeste (O) con un 58.38%, Oeste Noroeste (ONO) con un 24.28%, y Oeste Suroeste (OSO) con un 14.16%. Con respecto al análisis direccional pico presentado, se evidencia que el oleaje que incide en el área de estudio proviene de los rangos direccionales Sur Suroeste (SSO) al Nor Noroeste (NNO), con mayor incidencia en las direcciones Oeste (O) con 63.29%, Oeste Noroeste (ONO) con 17.34% y Oeste Suroeste (OSO) con 13.58%. En resumen, las direcciones de mayor predominancia tanto para dirección medio como dirección pico es la dirección Oeste.

Relacionando los periodos con la dirección media y pico, se observa que el mayor porcentaje de datos correspondientes a los periodos de 14s a 16s, poseen un 34.68% y un 38.72% de incidencia en la dirección predominante.

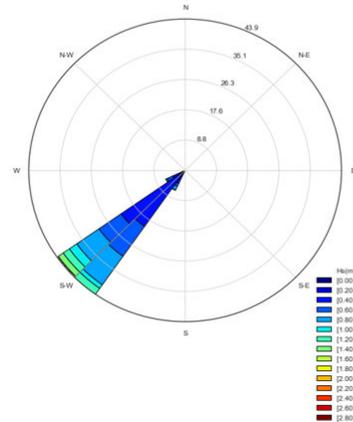
Por otro lado, la estadística descriptiva del oleaje indica una altura significativa mínima, promedio y máxima de 0.37 m, 0.79 m y 1.31 m respectivamente. De los percentiles se observa que el 25% de las alturas son inferiores a 0.66 m, que el 75% de las alturas son inferiores al 0.93 m y que el 95% de las alturas son inferiores a 1.14 m.

Figura 18

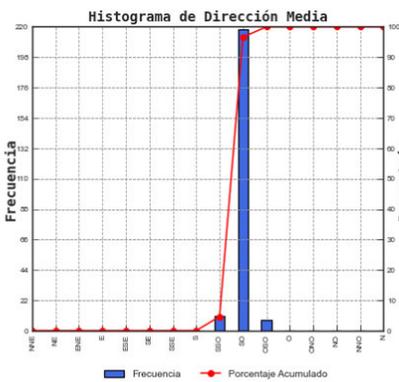
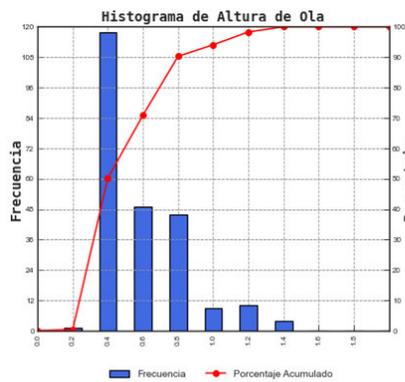
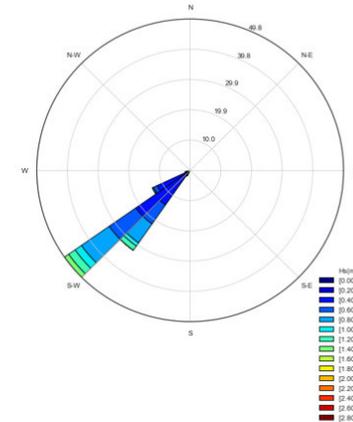
Gráficas estadísticas de olas en aguas poco profundas en el punto ADCP2.



ROSA DE OLAS CON DIRECCIÓN MEDIA



ROSA DE OLAS CON DIRECCIÓN PICO



DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL DE Hs (m) Y Tp

Hs(m)	0-2	2-4	4-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24	24-26	Total(%)
0.00-0.20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.20-0.40	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.42	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.42
0.40-0.60	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.42	15.19	1.27	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	49.79
0.60-0.80	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.8	5.91	8.86	2.11	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	20.68
0.80-1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.42	0.0	4.22	2.53	6.33	5.06	0.84	0.0	0.0	0.0	0.0	19.41
1.00-1.20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.69	2.11	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.8
1.20-1.40	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.11	2.11	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.22
1.40-1.60	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.69	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.69
1.60-1.80	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1.80-2.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2.00-2.20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2.20-2.40	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2.40-2.60	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2.60-2.80	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2.80-3.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3.00-3.20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3.20-3.40	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3.40-3.60	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3.60-3.80	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3.80-4.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4.00-4.20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4.20-4.40	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4.40-4.60	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4.60-4.80	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4.80-5.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5.00-5.20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Total(%)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.42	0.0	8.44	23.63	52.32	14.35	0.84	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0



Tabla 6

Estadística descriptiva de altura significativa, periodo pico, dirección media y dirección pico.

Descripción	Hs (m)	Tp (s)	Dm (°)	Dp (°)
Media	0.695	12.637	225.050	228.421
Mediana	0.600	12.600	224.990	227.700
Moda	0.430	12.590	224.910	224.200
Desv. Estándar	0.247	1.230	6.658	7.341
Varianza	0.355	0.097	0.030	0.032
Curtosis	0.949	0.228	0.391	1.596
Rango	1.130	8.010	40.490	49.000
Mínimo	0.380	8.500	207.580	208.290
Percentil 5%	0.430	10.81	214.260	217.920
Percentil 25%	0.510	11.72	220.900	223.630
Percentil 50%	0.600	12.60	224.990	227.700
Percentil 75%	0.850	13.26	228.870	232.100
Percentil 95%	1.22	14.78	235.420	241.400
Máximo	1.510	16.510	248.070	257.290

Al analizar la distribución de las alturas de olas significativas registradas con los periodos pico en el punto ADCP2, se encuentra que la totalidad de los datos analizados poseen periodos pico (T_p) superiores a los 8s, relacionado a oleajes de periodo largo (tipo swell) lo que resulta lógico de esperar considerando que para la fecha de medición (temporada de invierno) el litoral peruano presenta mayor intensidad del oleaje del tipo swell. Así mismo se presentan las siguientes distribuciones por periodo:

- El 0.42% de los datos se encuentran entre periodos de 08 a 10s.
- El 32.07% de los datos se encuentran entre periodos de 10 a 12s.
- El 52.32% de los datos se encuentran entre periodos de 12 a 14s, considerándose este como el rango predominante.
- El 14.34% de los datos se encuentran entre periodos de 14 a 16s.
- El 0.84% de los datos se encuentran entre periodos de 16 a 18s.

Del análisis direccional medio presentado a través de las rosas de oleaje, se evidencian que en términos generales el oleaje que incide en el punto ADCP 2 proviene de los rangos direccionales Sur

Suroeste (SSO) al Oeste Suroeste (OSO), con mayor incidencia en la dirección Suroeste (SO) con un 91.98%, y en menor alcance en las direcciones Sur Suroeste (SSO) con un 4.64%, y Oeste Suroeste (OSO) con un 3.38%. Con respecto al análisis direccional pico presentado, se evidencia que el oleaje que incide en el área de estudio proviene de los mismos rangos direccionales que la dirección media, con un mayor alcance en la dirección Suroeste (SO) con un 86.08% y en menor incidencia en Sur Suroeste (SSO) con un 1.69%, y Oeste Suroeste (OSO) con un 12.24%. En resumen, las direcciones de mayor predominancia tanto para dirección medio como dirección pico es la Suroeste.

Relacionando los periodos con la dirección media y pico, se observa que el mayor porcentaje de datos correspondientes a los periodos de 12s a 14s, poseen un 48.10% y un 43.88% de incidencia en la dirección predominante.

Por otro lado, la estadística descriptiva del oleaje indica una altura significativa mínima, promedio y máxima de 0.38 m, 0.69 m y 1.51 m respectivamente. De los percentiles se observa que el 25% de las alturas son inferiores a 0.51 m, que el 75% de las alturas son inferiores al 0.85 m y que el 95% de las alturas son inferiores a 1.22 m.

Figura 19

Gráficas estadísticas de olas en aguas poco profundas en el punto ADCP3.

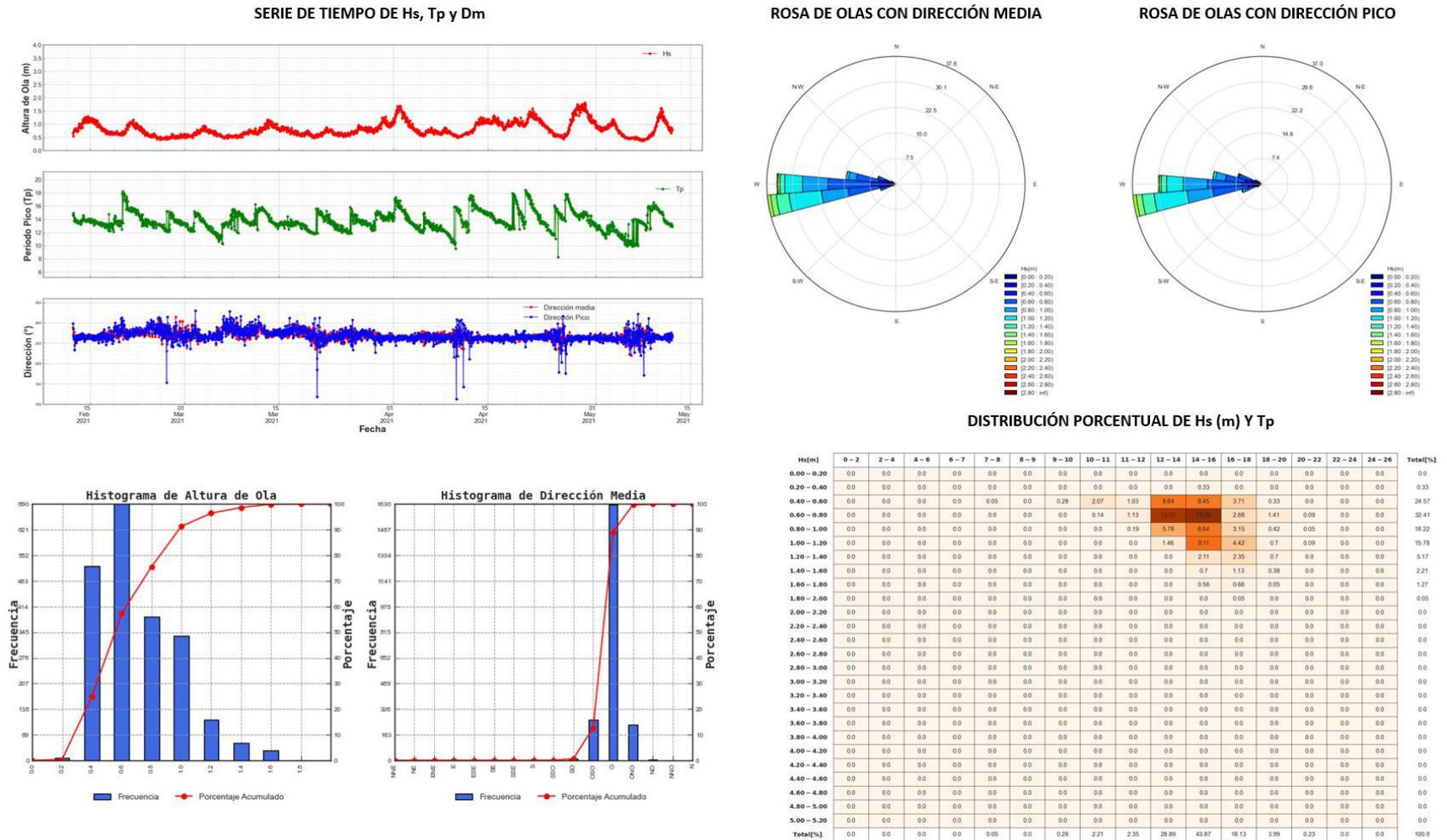


Tabla 7

Estadística descriptiva de altura significativa, periodo pico, dirección media y dirección pico del punto ADCP3.

Descripción	Hs (m)	 Tp (s)	 Dm (°)	 Dp (°)
Media	0.809	14.643	268.011	268.017
Mediana	0.740	14.390	266.310	265.850
Moda	0.630	14.000	261.660	266.990
Desv. Estándar	0.269	1.790	10.660	14.885
Varianza	0.333	0.122	0.040	0.056
Curtosis	0.550	0.621	2.020	17.427
Rango	1.440	12.720	102.210	217.690
Mínimo	0.370	7.810	211.950	112.430
Percentil 5%	0.480	12.020	253.850	250.920
Percentil 25%	0.610	13.670	261.800	260.870
Percentil 50%	0.740	14.390	266.310	265.850
Percentil 75%	0.980	15.830	273.650	274.750
Percentil 95%	1.330	17.610	287.580	292.590
Máximo	1.810	20.530	314.160	330.120

Al analizar la distribución de las alturas de olas significativas registradas con los periodos pico en el punto ADCP3, se encuentra que en su mayoría (99.95%) los datos analizados poseen periodos pico (T_p) superiores a los 8s, relacionado a oleajes de periodo largo (tipo swell) lo que resulta lógico de esperar considerando que el litoral peruano presenta mayor intensidad del oleaje del tipo swell. Así mismo se presentan las siguientes distribuciones por periodo:

- El 0.05% de los datos son menores a periodos de 8s.
- El 0.28% de los datos se encuentran entre periodos de 08 a 10s.
- El 4.56% de los datos se encuentran entre periodos de 10 a 12s.
- El 28.88% de los datos se encuentran entre periodos de 12 a 14s.
- El 43.87% de los datos se encuentran entre periodos de 14 a 16s, considerándose este como el rango predominante.

- El 18.13% de los datos se encuentran entre periodos de 16 a 18s.
- El 4.22% de los datos son superiores a periodos de 18s.

Del análisis direccional medio presentado a través de las rosas de oleaje, se evidencian que en términos generales el oleaje que incide en el punto ADCP 3 proviene de los rangos direccionales Sur Suroeste (SSO) al Noroeste (NO), con mayor incidencia en la dirección Oeste (O) con un 76.37%, y en menor alcance en las direcciones Oeste Suroeste (OSO) con un 12.17%, y Oeste Noroeste (ONO) con un 10.57%. Con respecto al análisis direccional pico presentado, se evidencia que el oleaje que incide en el área de estudio proviene de los mismos rangos direccionales que la dirección media, con un mayor alcance en la dirección Oeste (O) con un 68.81%, en Oeste Suroeste (OSO) con un 14.84% y Oeste Noroeste (ONO) con un 13.52%. En resumen, las direcciones de mayor predominancia tanto para dirección medio como dirección pico es el Oeste.

Relacionando los periodos con la dirección media y pico, se observa que el mayor porcentaje de datos correspondientes a los periodos de 14s a 16s, poseen un 48.10% y un 34.29% de incidencia en la dirección predominante. Por otro lado, la estadística descriptiva del oleaje indica una altura significativa mínima, promedio y máxima de 0.37 m, 0.81 m y 1.81 m respectivamente. De los percentiles se observa que el 25% de las alturas son inferiores a 0.61 m, que el 75% de las alturas son inferiores al 0.98 m y que el 95% de las alturas son inferiores a 1.33 m.

IV.4 Análisis del espectro del oleaje

De la información registrada del oleaje, se realizó un análisis del espectro con el fin de filtrar la energía generada por la reflexión de los frentes de olas en costa y la proveniente netamente de aguas profundas ya que el modelo no contempla el fenómeno de la reflexión dentro de sus cálculos de manera que proporcione una correcta calibración y validación de los datos modelados fue realizada empleando solo las alturas de olas provenientes de mar de viento.

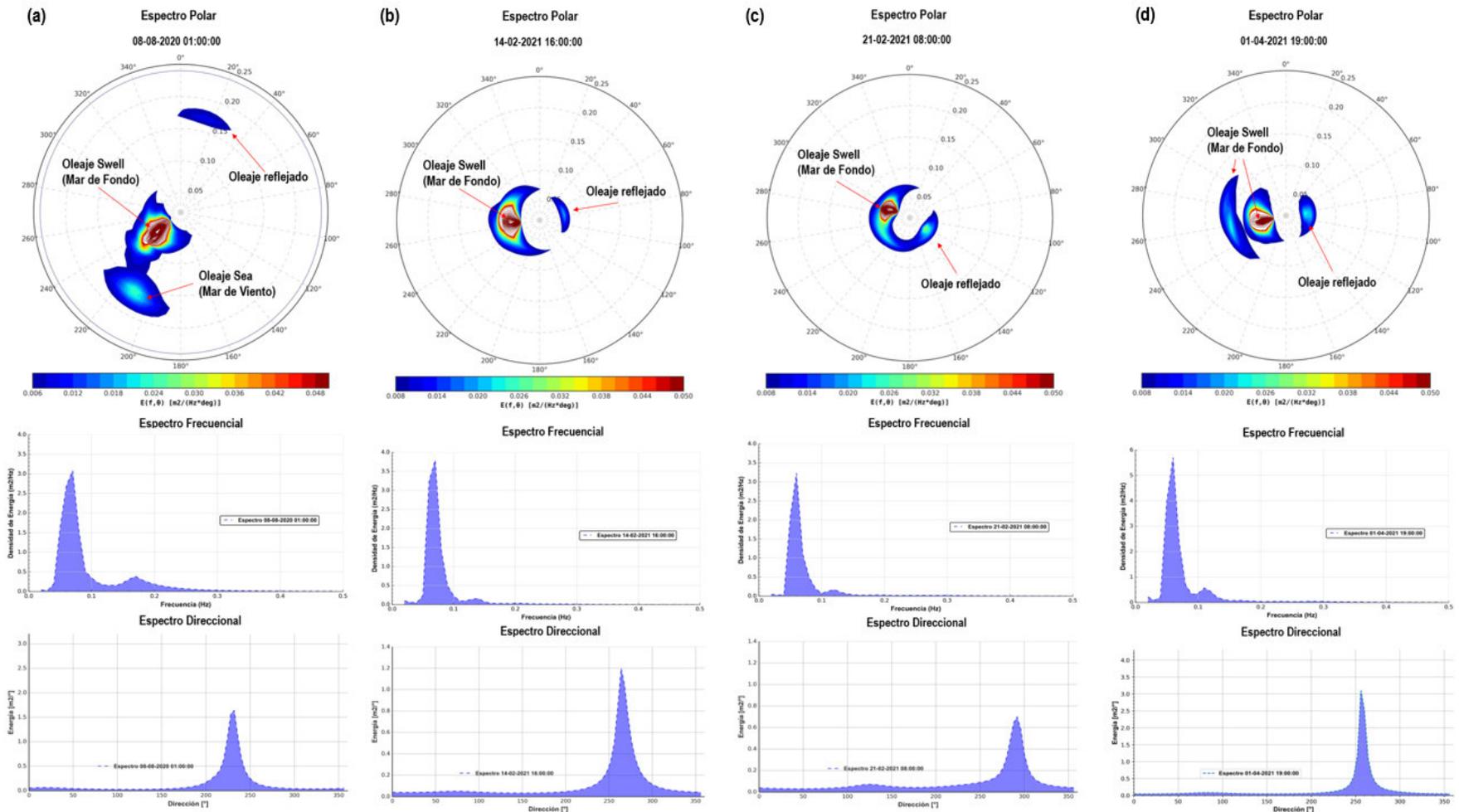
La siguiente figura muestra que existen dos rangos de olas provenientes en dos direcciones diferentes, como lo visto en el literal a correspondiente al punto ADCP 2, donde existe oleaje de mar de fondo y oleaje de viento proveniente del Sur Suroeste y un oleaje reflejado proveniente de Nor-Noreste. El oleaje con mayor energía (oleaje de mar de fondo) se sitúa en un rango de frecuencia entre 0.05 y 0.10 Hz que corresponde a un periodo entre 10s y 20s.

En el literal c, se muestran los espectros registrados en el punto ADCP 3, en los cuales existe oleaje de mar de fondo proveniente del Oeste-Noroeste y un oleaje reflejado proveniente del Este-Sureste. El que posee mayor energía es del tipo mar de fondo que se sitúa en un rango de frecuencia entre 0.05 Hz y 0.10 Hz que corresponden a un periodo entre 10s y 20s como los oleajes registrados por el ADCP 2. Por otro lado, en esta medición existen eventos energéticos provenientes del Norte lo cual es de esperarse ya que en la estación de verano los oleajes del Norte llegan con mayor energía en las costas peruanas por lo que su análisis es de importancia ante estudios de la dinámica del oleaje para cualquier proyecto. Con respecto a la figura 20 (d) correspondiente al registro del mismo punto, se observa dos grupos de oleaje que llegan bajo la misma dirección (Oeste Suroeste) pero con diferentes periodos, el primer grupo llega con un periodo entre 10s y 20s (frecuencias entre 0.05 Hz y 0.10 Hz) y el segundo llega con un periodo entre 8s y 10s (frecuencias entre 0.10 Hz y 0.12 Hz).

La superposición de los grupos de oleajes identificados en el espectro incluyendo el oleaje reflejado se traduce en un aumento de la altura de olas final que registra el equipo. El filtrado de la altura reflejada es importante para temas de diseño costero, sin embargo, fue realizado para el presente estudio con el fin de tener mayor exactitud en cuento a los resultados del modelo.

Figura 20

Espectro de oleaje bidimensional y frecuencial correspondiente a los registros en los puntos ADCP1, ADCP2 y ADCP3



Nota: Elaboración propia

IV.5 Modelación numérica

Para la comprensión del régimen de oleaje en la bahía del Callao, y zona de Liguria, se realizó un modelo que tomó en cuenta la información histórica de aguas profundas con el fin de ser recreadas o propagadas hacia zonas más costeras. Es por ello que en los siguientes puntos del sub capítulo se mencionarán la configuración del modelo, consideraciones asumidas, validación del modelo, identificación de puntos de control y la construcción de las series de tiempos:

IV.5.1 Configuración del modelo

IV.5.1.1 Grilla Computacional

La grilla computacional fue creada abarcando el área suficiente para enmarcar la zona de estudio con el fin de que la onda se propague adecuadamente desde aguas profundas hacia la zona de estudio. La resolución de la grilla debe tener en cuenta el detalle de las islas y morfología costera para modelar correctamente sus efectos en los frentes de olas. En el presente proyecto se realizó una grilla con las siguientes características:

Tabla 8

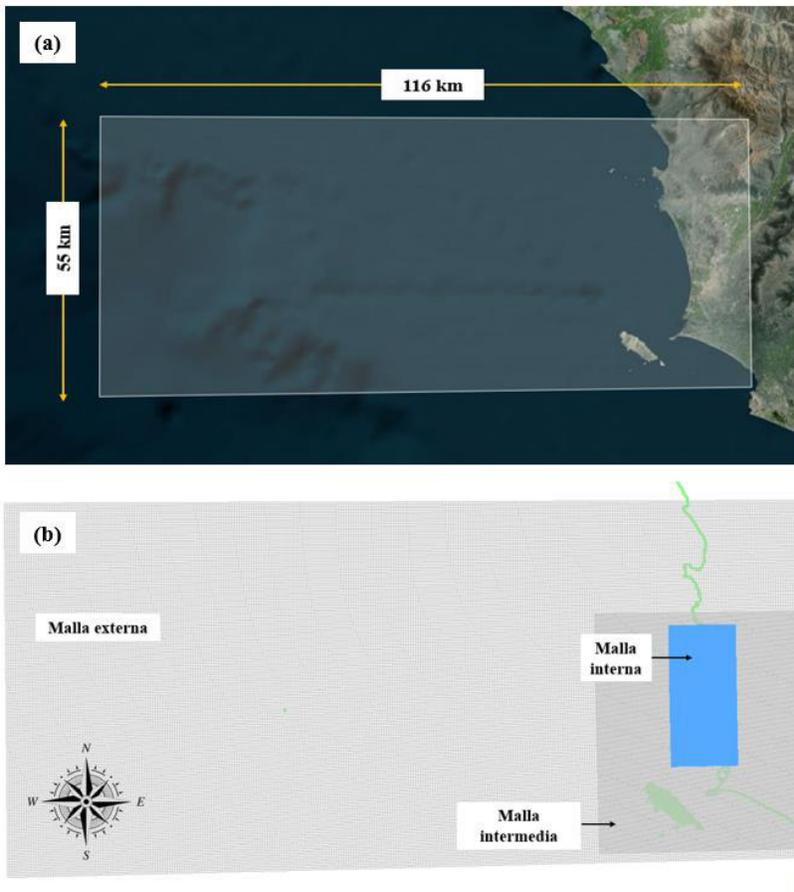
Características de las mallas elaboradas

Descripción	Malla Externa Course Grill	Malla Intermedia	Malla Interna Fine Grill
Extensión en x	116 km	30.50 km	10 km
Extensión en y	55 km	35.50 km	21 km
Δx	350 m	175 m	40 m
Δy	350 m	160 m	40 m

Nota: Elaboración Propia

Figura 21

(a) Extensión del área delimitada para la malla externa, y (b) Grillas empleadas en el modelo numérico.



Nota: Grillas empleadas con dos etapas de anidamiento correspondiente al tamaño de grilla secuencial.

IV.5.1.2 Batimetría

Posterior a la elaboración de las mallas, se genera el modelo de terreno en base a la interpolación de sondajes o profundidades que abarquen la misma o mayor área de la malla externa. Para cada malla se realiza una interpolación separada, teniendo mejor detalle en la malla interna por tener una mayor resolución en Δx y Δy .

Las fuentes de batimetría empleadas fueron:

1. Batimetría en aguas profundas: Obtención de las cartas náutica HIDRONAV 223 Bahía Ancón hasta Pachacamac e HIDRONAV 2235 Puerto del Callao.

2. Batimetría de detalle: Levantamiento batimétrico monohaz en una extensión de 1072 Ha con el fin de tener actualizada las profundidades del área de estudio.

Figura 22

Área del levantamiento batimétrico (batimetría de detalle).



Nota: Elaboración propia.

Figura 23

Sondajes de la batimetría a detalle delimitados en azul

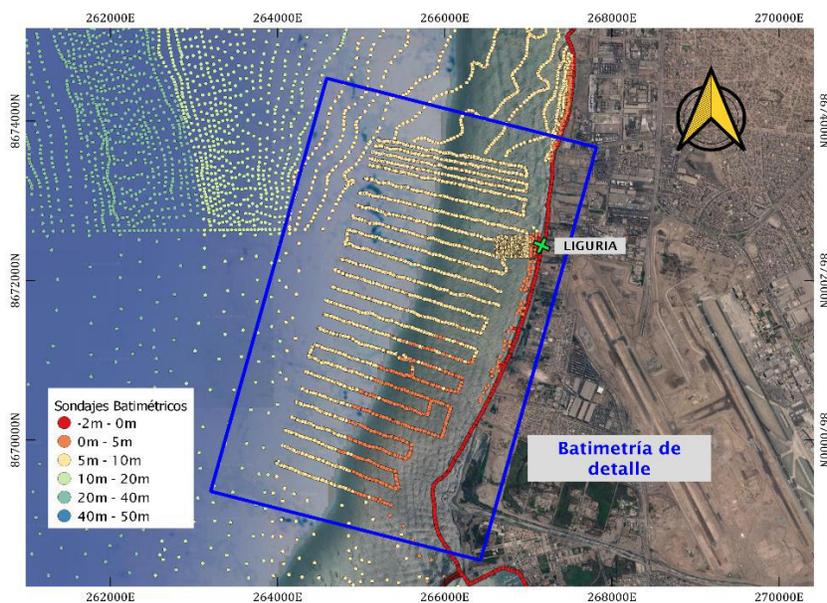
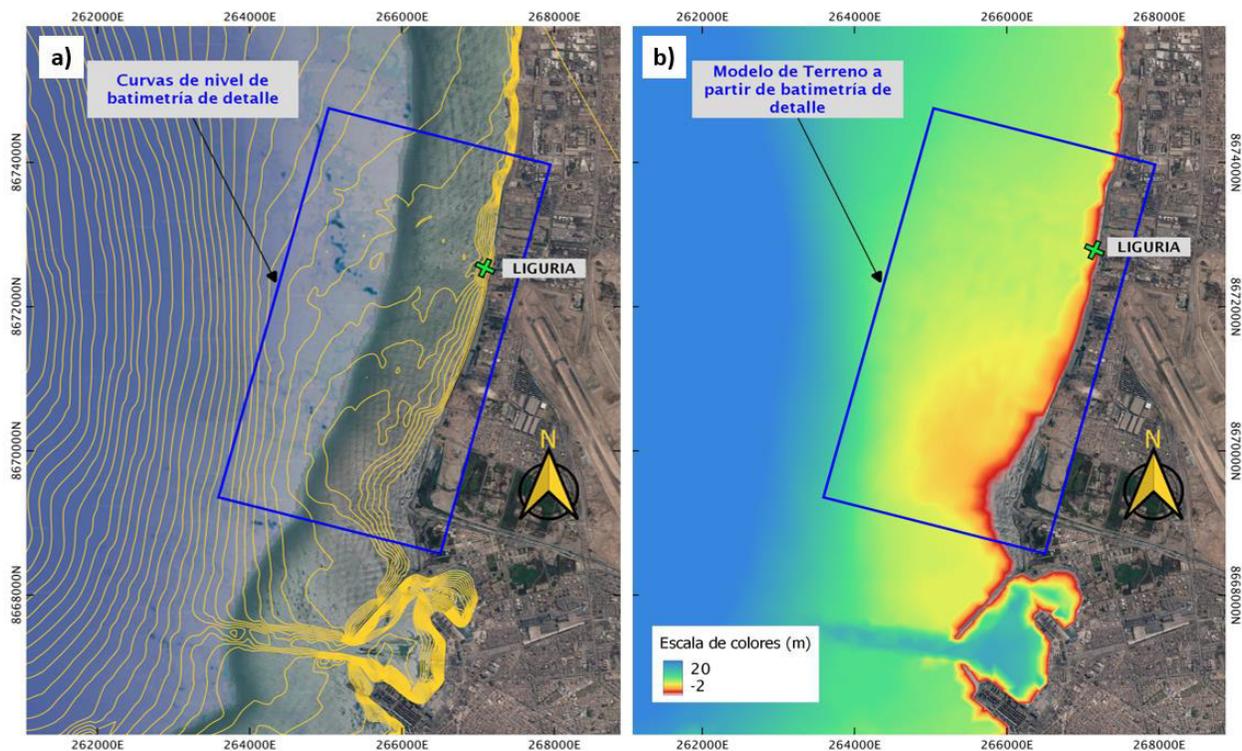


Figura 24

a) Curvas de nivel y b) Modelo digital de terreno (Batimetría en aguas profundas y batimetría de detalle)



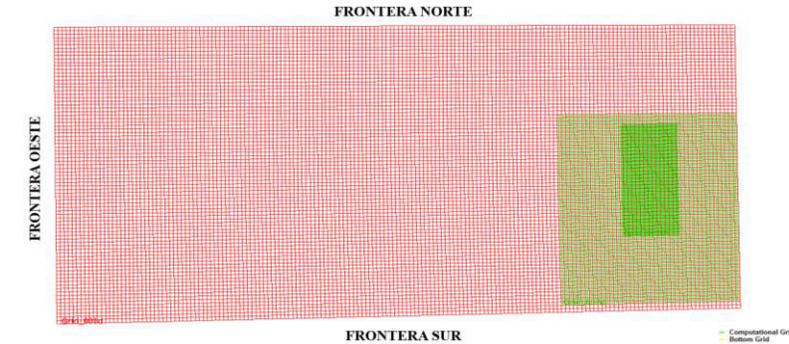
Nota: Escala de colores en base a la profundidad.

IV.5.1.3 Condiciones de frontera

Las condiciones de frontera en el modelo numérico empleado pueden especificarse mediante tres formas, por orientación, por coordenadas de la grilla y por coordenadas. En el presente proyecto se han especificado las condiciones mediante orientación como se observa en la siguiente figura:

Figura 25

Fronteras por orientación para el modelamiento numérico.



Posterior a la especificación de las fronteras, se determinaron las condiciones a lo largo de cada una de ellas agregando los casos a propagar que fueron determinados mediante el análisis de datos globales en aguas profundas.

IV.5.1.4 Casos paramétricos a propagar

Para comprender el comportamiento del oleaje en la bahía del Callao se modelaron casos medios (Hs50%), máximos anuales (Hs12) y extremos (con periodo de retorno de 100 años empleando la distribución generalizada de extremos – Distribución de GEV):

Tabla 9

Casos paramétricos modelados

DIRECCIÓN		Casos medios		Casos máximos anuales		Casos extremos	
		Hs50%	Tp	Hs12	Tp	Hs (TR=100)	Tp
S	180.0	2.33	9.62	4.36	10.98	5.05	11.11
SSO	202.5	2.18	14.29	4.19	17.10	5.17	16.35
SO	225.0	1.99	14.49	3.73	17.51	5.21	18.70
OSO	247.5	1.80	14.71	3.28	18.23	3.62	17.39
O	270.0	1.79	15.62	2.93	19.23	3.38	17.99
ONO	295.5	1.76	16.13	2.89	19.30	3.39	17.85
NO	315.0	1.80	17.86	2.59	18.86	2.70	19.60

Nota: Casos por dirección, altura y periodo pico del oleaje.

IV.5.1.5 Casos para reconstrucción del clima

Para el desarrollo de la calibración y validación del modelo, así como del análisis estacional de la dinámica del oleaje es necesario obtener la serie de tiempo total modelada (1979 – 2022), sin embargo, el modelamiento de la serie completa de datos requiere de la inversión de tiempo y recursos computacionales mayores por lo que se optó por identificar y modelar los casos más representativos para posteriormente generar la serie de tiempo completa gracias al empleo de la interpolación bicúbica (método de interpolación multivariante en una cuadrícula regular tridimensional). A continuación, se detalla las características de los casos modelados:

- Número de casos: 1188
- Rango de dirección: Desde 135° a 315°, con intervalos cada 22.5°.
- Rango de alturas: Desde 0.5 m a 5.5 m, con intervalos cada 0.5 m.
- Rango de periodos: Desde 3s a 25s. con intervalos cada 2s.

IV.5.1.6 Parámetros físicos y numéricos

Los parámetros físicos y numéricos empleados para el modelamiento fueron los siguientes:

- Modelo de computación: No estacionario
- Intervalo de tiempo: 360 min
- Paso de tiempo: 360 min
- Gravedad: 9.81 m/s^2
- Densidad del agua: 1025 kg/m^3
- Modo de generación para física: 3era generación
- Rotura inducida por profundidad: Modelo Battjes and Janssen (1978)
- Fricción del fondo marino: Tipo Jonswap
- Coeficiente de fricción: 0.035
- Difracción: Si

- Disipación de olas: Komen et al. (1984)
- Refracción: Si

IV.5.2 Calibración del modelo

La calibración del modelo numérico consistió en ajustar parámetros físicos del propio modelo, realizando comparaciones entre los resultados obtenidos en cada variación y los datos registrados con el fin de encontrar la mayor semejanza (correlación) entre ambas informaciones. Para la calibración se evaluaron los siguientes parámetros:

Tabla 10

Parámetros físicos analizados para la calibración

N°	Parámetros	Signo	Unidad
1	Dispersión direccional	$\Delta\theta$	°
2	Rotura inducida por profundidad	γ α	- -
3	Fricción del fondo marino	-	m^2/s^3

Nota: Elaboración Propia.

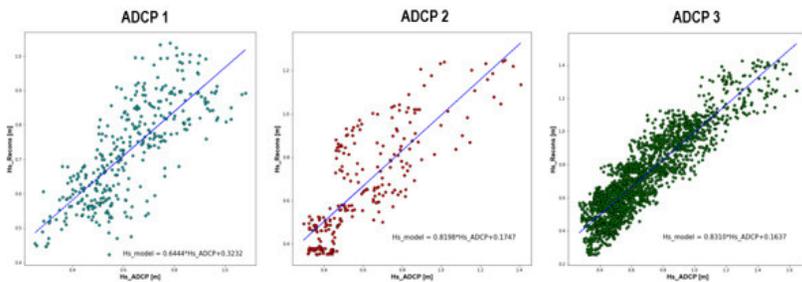
Se realizaron variaciones en los valores de la dispersión direccional y los coeficientes de la rotura inducida por profundidad produciéndose cambios no significativos en la serie de tiempo modelada. Sin embargo, se observaron variaciones resaltantes en las alturas de olas en cuanto a la variación del coeficiente de fricción del fondo, para dicho análisis se analizaron los valores de **0.020, 0.035, 0.070, 0.50, y 0.80** como coeficientes de fricción para el modelo.

Considerando los diferentes valores de coeficiente de fricción empleados en la modelación numérica se obtuvieron las siguientes gráficas de correlación para cada serie de tiempo registrada.

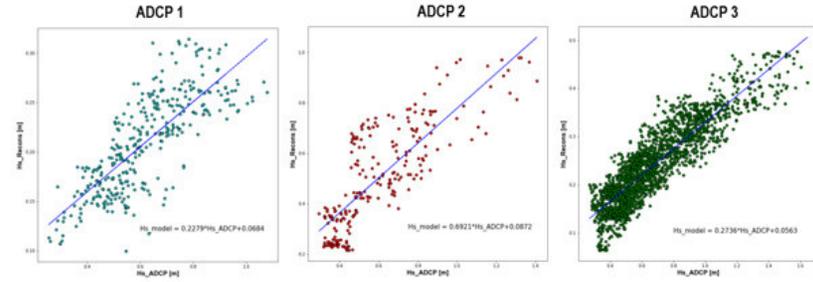
Figura 26

Correlación de Pearson entre datos modelados con coeficiente de fricción de (a) 0.020, (b) 0.035, (c) 0.070, (d) 0.50 y (e) 0.80 y datos registrados

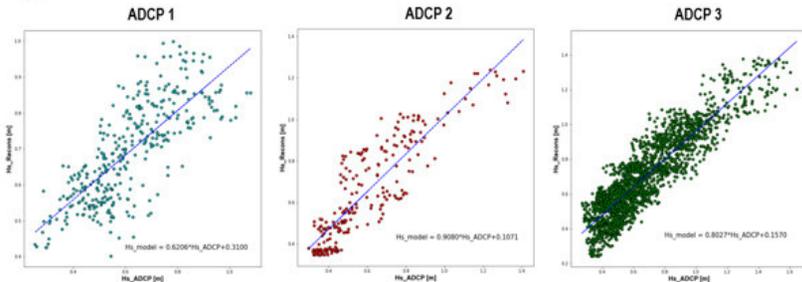
(a) Coeficiente de 0.020



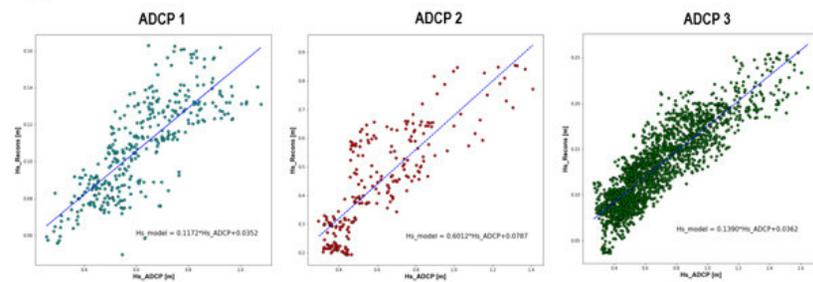
(d) Coeficiente de 0.50



(b) Coeficiente de 0.035



(e) Coeficiente de 0.80



(c) Coeficiente de 0.070

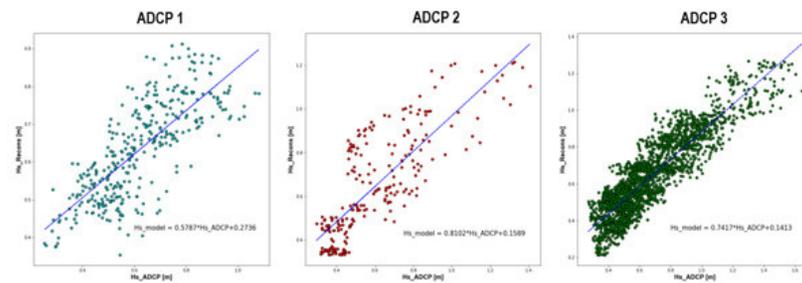


Tabla 11

Factor y pendiente de correlación de Pearson

	Coef. Fricción		Coef. Fricción		Coef. Fricción		Coef. Fricción		Coef. Fricción	
	0.020		0.035		0.07		0.5		0.8	
	r	a	r	a	r	a	r	a	r	a
ADCP1	0.767	0.644	0.767	0.621	0.767	0.579	0.786	0.228	0.785	0.117
ADCP2	0.810	0.820	0.887	0.908	0.812	0.810	0.821	0.692	0.830	0.601
ADCP3	0.897	0.831	0.897	0.803	0.897	0.742	0.889	0.274	0.876	0.139

La correlación de Pearson nos muestra que los datos registrados guardan mayor relación con los datos modelados mediante los valores de coeficiente de fricción de 0.020 y 0.035; para la selección final del coeficiente de fricción se tomará en cuenta la descripción estadística y el análisis de los percentiles.

Tabla 12

Estadística descriptiva y percentiles de las alturas de olas registradas por el ADCP1 y datos modelados con diferentes coeficientes de fricción.

	Hs (m) registrados por ADCP 1 vs modelados con coeficiente de rugosidad diferente										
	ADCP	0.020	$\Delta\%$	0.035	$\Delta\%$	0.07	$\Delta\%$	0.5	$\Delta\%$	0.8	$\Delta\%$
Conteo	346.00	346.00		346.00		346.00		346.00		346.00	
Prom.	0.62	0.72		0.69		0.63		0.21		0.11	
Desv.	0.17	0.14		0.14		0.13		0.05		0.03	
Min.	0.25	0.42	66.51	0.40	57.92	0.35	39.14	0.10	60.93	0.05	80.47
25%	0.50	0.60	19.82	0.57	15.31	0.52	4.59	0.17	66.45	0.09	82.68
50%	0.60	0.72	19.83	0.69	15.28	0.63	5.46	0.21	64.76	0.11	81.84
75%	0.74	0.83	12.94	0.80	8.40	0.73	1.07	0.25	66.38	0.13	82.70
Max.	1.08	1.04	3.77	1.00	7.40	0.91	15.38	0.31	70.88	0.16	84.90

Nota: $\Delta\%$ se refiere al error porcentual.

Tabla 13

Estadística descriptiva y percentiles de las alturas de olas registradas por el ADCP2 y datos modelados con diferentes coeficientes de fricción.

Hs (m) registrados por ADCP 2 vs modelados con coeficiente de rugosidad diferente											
	ADCP	0.020	Δ%	0.035	Δ%	0.07	Δ%	0.5	Δ%	0.8	Δ%
Conteo	237.00	237.00		237.00		237.00		237.00		237.00	
Prom.	0.60	0.67		0.65		0.65		0.50		0.44	
Desv.	0.24	0.24		0.24		0.24		0.20		0.18	
Min.	0.30	0.35	18.59	0.34	16.61	0.33	12.43	0.22	26.96	0.19	34.30
25%	0.42	0.48	13.09	0.47	11.76	0.46	8.61	0.34	18.31	0.30	29.20
50%	0.52	0.63	20.82	0.62	19.97	0.61	17.80	0.48	6.62	0.43	17.29
75%	0.75	0.85	13.20	0.84	12.47	0.83	10.79	0.67	11.36	0.58	22.65
Max.	1.41	1.25	11.28	1.24	11.99	1.22	13.56	0.98	30.34	0.86	39.20

Nota: Δ% se refiere al error porcentual.

Tabla 14

Estadística descriptiva y percentiles de las alturas de olas registradas por el ADCP3 y datos modelados con diferentes coeficientes de fricción.

Hs (m) registrados por ADCP 3 vs modelados con diferentes coeficientes de rugosidad											
	ADCP	0.020	Δ%	0.035	Δ%	0.07	Δ%	0.5	Δ%	0.8	Δ%
Conteo	2129.00	2129.00		2129.00		2129.00		2129.00		2129.00	
Prom.	0.67	0.72		0.70		0.64		0.24		0.13	
Desv.	0.26	0.24		0.23		0.22		0.08		0.04	
Min.	0.27	0.26	5.17	0.24	10.24	0.21	20.67	0.06	76.22	0.04	86.51
25%	0.47	0.54	15.43	0.52	11.33	0.48	1.86	0.18	61.64	0.10	79.40
50%	0.60	0.67	11.48	0.65	7.61	0.59	1.07	0.23	61.99	0.12	79.29
75%	0.84	0.90	7.37	0.87	3.54	0.80	4.66	0.30	64.65	0.16	81.11
Max.	1.64	1.43	12.93	1.38	16.01	1.27	22.74	0.48	71.01	0.26	84.43

Nota: Δ% se refiere al error porcentual.

De las tablas 12, 13 y 14, se determina que el mejor valor de coeficiente de fricción para el modelamiento numérico es 0.035, ya que presenta mayor similitud entre los percentiles de 25%, 50% y 75% con las alturas de olas registradas. (Figura 26).

Adicionalmente, se calculó los índices de error medio cuadrático RMSE (Tabla 15) y BIAS (Tabla 16) para los datos modelados con coeficiente de fricción de 0.020 y 0.035, resultando que el menor error medio cuadrático se presenta en la serie de datos modelados con 0.035 reforzando el valor escogido.

Tabla 15

Error medio cuadrático RMSE

RMSE	Coef. de fricción 0.020	Coef. de fricción 0.035
ADCP 1	0.150	0.132
ADCP 2	0.164	0.160
ADCP 3	0.126	0.118

La tabla 15, muestra el error medio cuadrático RMSE, es decir, calcula el error entre lo modelado y lo observado, elevándolo al cuadrado y obteniendo un promedio en cada punto (ADCP1, ADCP2 y ADCP3) para el coeficiente de fricción de 0.020 y 0.035 empleado en el modelo numérico.

Tabla 16

Error medio cuadrático BIAS

BIAS	Coef. de fricción 0.020	Coef. de fricción 0.035
ADCP 1	0.10	0.07
ADCP 2	0.06	0.06
ADCP 3	0.05	0.02

La tabla 16, muestra el sesgo BIAS, es decir, calcula el sesgo negativo, neutro o positivo que existe entre los datos observados (registrados) y lo modelado en cada punto (ADCP1, ADCP2 y ADCP3) para el coeficiente de fricción de 0.020 y 0.035. Es importante señalar que en ambos coeficientes de fricción el BIAS ha resultado con un sesgo positivo menor a 0.05.

IV.5.3 Validación del modelo

Se realizó la validación del modelo realizando una comparativa entre datos registrados en los tres puntos ADCP1, ADCP2 y ADCP3, y la serie de tiempo modelada en los siguientes periodos:

- Periodo 26/07/2020 al 15/08/2020
- Periodo 12/02/2021 al 12/05/2021
- Periodo 10/06/2021 al 09/07/2021

Para el primer y segundo periodo se usaron datos registrados del mes de julio a agosto del 2020, y junio a julio del 2021, donde se observa una buena tendencia entre la serie de alturas de olas modelada con respecto a la serie registrada. Por otro lado, los eventos menos energéticos de toda la serie no llegan a ser totalmente representados en la simulación en comparación a los eventos más energéticos que en su mayoría son representados de mejor manera en el modelo. (Figura 27).

Tabla 17

Comparación de las alturas de olas registradas y modeladas en el punto ADCP1

Parámetro	Registrado (m)	Modelado (m)	Diferencia (m)	%Error
Promedio	0.62	0.69	0.08	12.24
Min.	0.25	0.40	0.15	57.92
25%	0.50	0.57	0.08	15.31
50%	0.60	0.69	0.09	15.28
75%	0.74	0.80	0.06	8.40
Max.	1.08	1.00	-0.08	7.40

Tabla 18

Comparación de las alturas de olas registradas y modeladas en el punto ADCP2

Parámetro	Registrado (m)	Modelado (m)	Diferencia (m)	%Error
Promedio	0.60	0.66	0.06	9.86
Min.	0.30	0.34	0.05	16.61
25%	0.42	0.47	0.05	11.76
50%	0.52	0.62	0.10	19.97
75%	0.75	0.84	0.09	12.47
Max.	1.41	1.24	-0.17	11.99

Tabla 19

Comparación de las alturas de olas registradas y modeladas en el punto ADCP3

Parámetro	Registrado (m)	Modelado (m)	Diferencia (m)	%Error
Promedio	0.67	0.70	0.02	3.69
Min.	0.27	0.24	-0.03	10.24
25%	0.47	0.52	0.05	11.33
50%	0.60	0.65	0.05	7.61
75%	0.84	0.87	0.03	3.54
Max.	1.64	1.38	-0.26	16.01

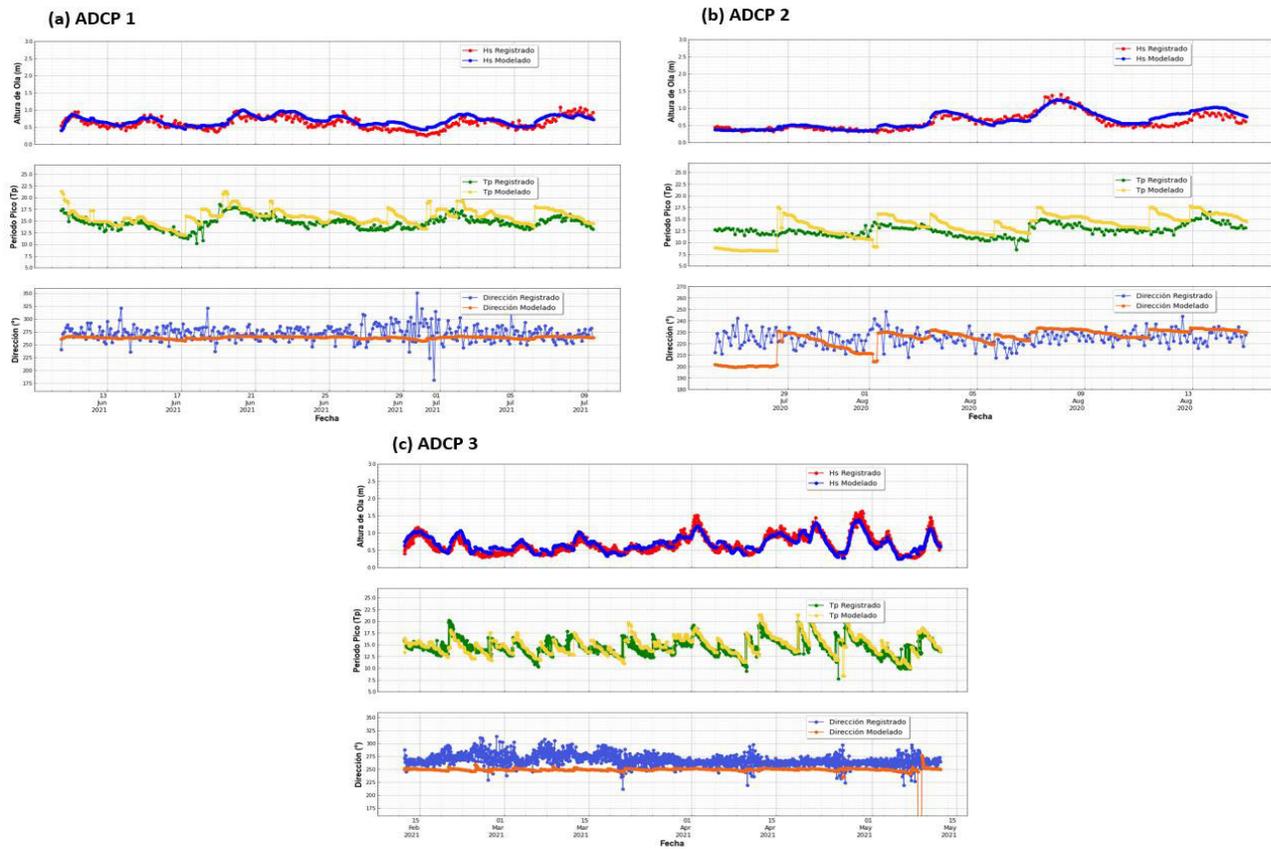
En resumen, la comparación de las alturas de olas registradas y modeladas resultante es que ambas series de tiempo poseen tendencias similares y que, si bien existen diferencias en los eventos con mayor energía, éstos son de orden menores a 26 cm como lo muestra las tablas comparativas 20 y 21.

Es importante indicar que se tomaron en cuenta como información de entrada las direcciones medias de los datos de olas en aguas profundas para el desarrollo del modelamiento debido a que se obtiene una mejor tendencia de las alturas de olas modeladas con las direcciones medias en comparación con las direcciones pico.

Consecuentemente se realizó una comparativa de las direcciones medias y periodos pico registrados con las modeladas obteniendo las siguientes gráficas donde se puede visualizar la tendencia que existe entre ambas:

Figura 27

Serie de tiempo de los periodos pico y dirección media registrada versus la modelada correspondiente al punto (a) ADCP1, (b) ADCP 2 y (c) ADCP 3.



IV.5.4 Puntos de control

Los puntos de control escogidos para la reconstrucción de las series temporales de los parámetros de estado de mar fueron ubicados con el fin de abarcar toda la bahía y analizar el régimen de olas en cada sector para un mejor detalle ante variaciones de dirección y alturas al acercarse a costa.

Figura 28

Ubicación de los puntos de control.



IV.5.5 Construcción de series de tiempo

Se realizaron la reconstrucción de la serie temporal (1979 a 2022) de cada punto de control mediante el método de interpolación bicúbica obteniendo las siguientes rosas de oleaje:

Figura 29

Rosas de oleaje de altura de ola (m) con dirección media de los puntos reconstruidos.

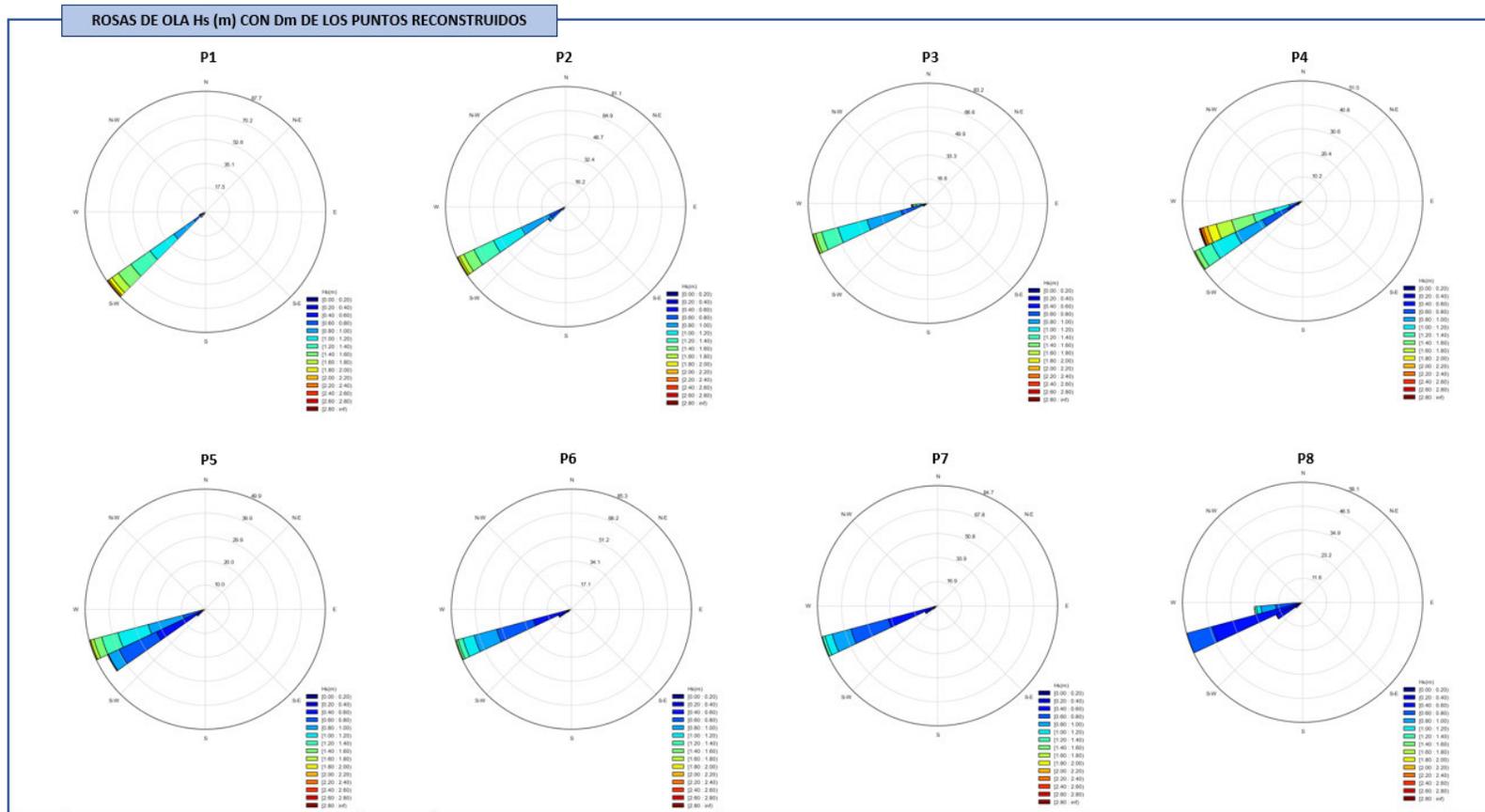
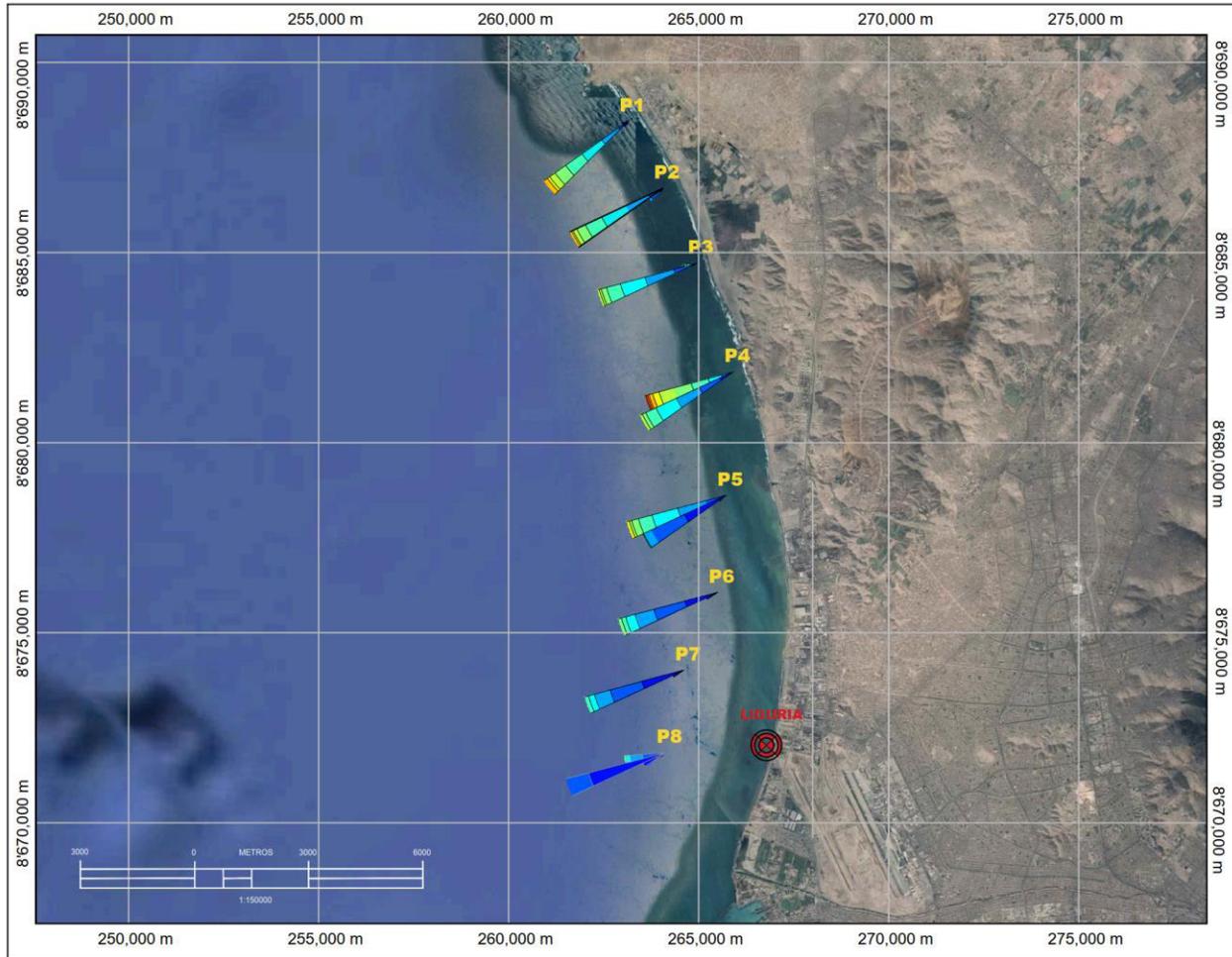


Figura 30

Rosas de oleaje de altura de ola (m) con dirección media de los puntos reconstruidos ubicados en mapa



Para P1: Del análisis direccional medio presentado a través de las rosas de oleaje, se evidencian que en términos generales el oleaje que incide en el punto P1 proviene de los rangos direccionales Sur Suroeste (SSO) al Oeste Suroeste (OSO), con mayor incidencia en la dirección Suroeste (SO) con un 95.00%, y en menor alcance en las direcciones Sur Suroeste (SSO) con un 1.62%, y Oeste Suroeste (OSO) con un 3.39%.

Relacionando los periodos con la dirección media, se observa que el mayor porcentaje de datos correspondientes a los periodos de 14s a 16s, poseen un 39.13% de incidencia en la dirección predominante.

Por otro lado, la estadística descriptiva del oleaje indica una altura significativa mínima, promedio y máxima de 0.27 m, 1.15 m y 3.23 m respectivamente. De los percentiles se observa que el 25% de las alturas son inferiores a 0.90 m, que el 75% de las alturas son inferiores al 1.39 m y que el 95% de las alturas son inferiores a 1.80 m.

Para P2: Del análisis direccional medio presentado a través de las rosas de oleaje, se evidencian que en términos generales el oleaje que incide en el punto P2 proviene de los rangos direccionales Sur Suroeste (SSO) al Oeste (O), con mayor incidencia en la dirección Oeste Suroeste (OSO) con un 66.93% y en la dirección Suroeste (SO) con un 32.67%, y en menor alcance en las direcciones Sur Suroeste (SSO) con un 0.38%, y Oeste (O) con un 0.020%.

Relacionando los periodos con la dirección media, se observa que el mayor porcentaje de datos correspondientes a los periodos de 14s a 16s, poseen un 39.87% de incidencia en la dirección predominante (Oeste Suroeste).

Por otro lado, la estadística descriptiva del oleaje indica una altura significativa mínima, promedio y máxima de 0.25 m, 1.02 m y 2.97 m respectivamente. De los percentiles se observa que el 25% de las alturas son inferiores a 0.78 m, que el 75% de las alturas son inferiores al 1.24 m y que el 95% de las alturas son inferiores a 1.62 m.

Para P3: Del análisis direccional medio presentado a través de las rosas de oleaje, se evidencian que en términos generales el oleaje que incide en el punto P3 proviene de los rangos direccionales Sur Suroeste (SSO) al Oeste (O), con mayor incidencia en la dirección Oeste Suroeste (OSO) con un 95.95% y en menor alcance en las direcciones Sur Suroeste (SSO) con un 0.001%, (SO) con un 1.93%, y Oeste (O) con un 2.11%.

Relacionando los periodos con la dirección media, se observa que el mayor porcentaje de datos correspondientes a los periodos de 14s a 16s, poseen un 39.68% de incidencia en la dirección predominante (Oeste Suroeste).

Por otro lado, la estadística descriptiva del oleaje indica una altura significativa mínima, promedio y máxima de 0.23 m, 1.02 m y 2.97 m respectivamente. De los percentiles se observa que el 25% de las alturas son inferiores a 0.80 m, que el 75% de las alturas son inferiores al 1.20 m y que el 95% de las alturas son inferiores a 1.54 m.

Para P4: Del análisis direccional medio presentado a través de las rosas de oleaje, se evidencian que en términos generales el oleaje que incide en el punto P4 proviene de los rangos direccionales Sur Suroeste (SSO) al Oeste (O), con mayor incidencia en la dirección Oeste Suroeste (OSO) con un 96.16% y en menor alcance en las direcciones Sur Suroeste (SSO) con un 0.002%, Suroeste (SO) con un 3.57% y Oeste (O) con un 0.27%.

Relacionando los periodos con la dirección media, se observa que el mayor porcentaje de datos correspondientes a los periodos de 14s a 16s, poseen un 40.11% de incidencia en la dirección predominante (Oeste Suroeste).

Por otro lado, la estadística descriptiva del oleaje indica una altura significativa mínima, promedio y máxima de 0.19 m, 1.14 m y 3.64 m respectivamente. De los percentiles se observa que el 25% de las alturas son inferiores a 0.82 m, que el 75% de las alturas son inferiores al 1.43 m y que el 95% de las alturas son inferiores a 1.92 m.

Para P5: Del análisis direccional medio presentado a través de las rosas de oleaje, se evidencian que en términos generales el oleaje que incide en el punto P5 proviene de los rangos direccionales Sur Suroeste (SSO) al Oeste (O), con mayor incidencia en la dirección Oeste Suroeste (OSO) con un 94.29% y en menor alcance en las direcciones Sur Suroeste (SSO) con un 0.001%, Suroeste (SO) con un 5.38%, Oeste (O) con un 0.34%.

Relacionando los periodos con la dirección media, se observa que el mayor porcentaje de datos correspondientes a los periodos de 14s a 16s, poseen un 40.11% de incidencia en la dirección predominante (Oeste Suroeste).

Por otro lado, la estadística descriptiva del oleaje indica una altura significativa mínima, promedio y máxima de 0.20 m, 0.82 m y 2.80 m respectivamente. De los percentiles se observa que el 25% de las alturas son inferiores a 0.46 m, que el 75% de las alturas son inferiores al 0.66 m y que el 95% de las alturas son inferiores a 0.93 m.

Para P6: Del análisis direccional medio presentado a través de las rosas de oleaje, se evidencian que en términos generales el oleaje que incide en el punto P6 proviene de los rangos direccionales Suroeste (SO) al Oeste (O), con mayor incidencia en la dirección Oeste Suroeste (OSO) con un 95.83% y en menor alcance en las direcciones Suroeste (SO) con un 3.73%, Oeste (O) con un 0.44%.

Relacionando los periodos con la dirección media, se observa que el mayor porcentaje de datos correspondientes a los periodos de 14s a 16s, poseen un 40.09% de incidencia en la dirección predominante (Oeste Suroeste).

Por otro lado, la estadística descriptiva del oleaje indica una altura significativa mínima, promedio y máxima de 0.20 m, 0.71 m y 2.47 m respectivamente. De los percentiles se observa que el 25% de las alturas son inferiores a 0.50 m, que el 75% de las alturas son inferiores al 0.87 m y que el 95% de las alturas son inferiores a 1.27 m.

Para P7: Del análisis direccional medio presentado a través de las rosas de oleaje, se evidencian que en términos generales el oleaje que incide en el punto P7 proviene de los rangos direccionales Sur Suroeste (SSO) al Oeste (O), con mayor incidencia en la dirección Oeste Suroeste (OSO) con un 95.47% y en menor alcance en las direcciones Suroeste (SO) con un 4.04% y Oeste (O) con un 0.48%.

Relacionando los periodos con la dirección media, se observa que el mayor porcentaje de datos correspondientes a los periodos de 14s a 16s, poseen un 40.09% de incidencia en la dirección predominante (Oeste Suroeste).

Por otro lado, la estadística descriptiva del oleaje indica una altura significativa mínima, promedio y máxima de 0.22 m, 0.66 m y 2.37 m respectivamente. De los percentiles se observa que el 25% de las

alturas son inferiores a 0.53 m, que el 75% de las alturas son inferiores al 1.37 m y que el 95% de las alturas son inferiores a 2.03 m.

Para P8: Del análisis direccional medio presentado a través de las rosas de oleaje, se evidencian que en términos generales el oleaje que incide en el punto P8 proviene de los rangos direccionales Sur Suroeste (SSO) al Oeste (O), con mayor incidencia en la dirección Oeste Suroeste (OSO) con un 92.34%, y en menor alcance en las direcciones Suroeste (SO) con un 4.85% y Oeste (O) con un 2.81%.

Relacionando los periodos con la dirección media, se observa que el mayor porcentaje de datos correspondientes a los periodos de 14s a 16s, poseen un 39.70% de incidencia en la dirección predominante (Oeste Suroeste).

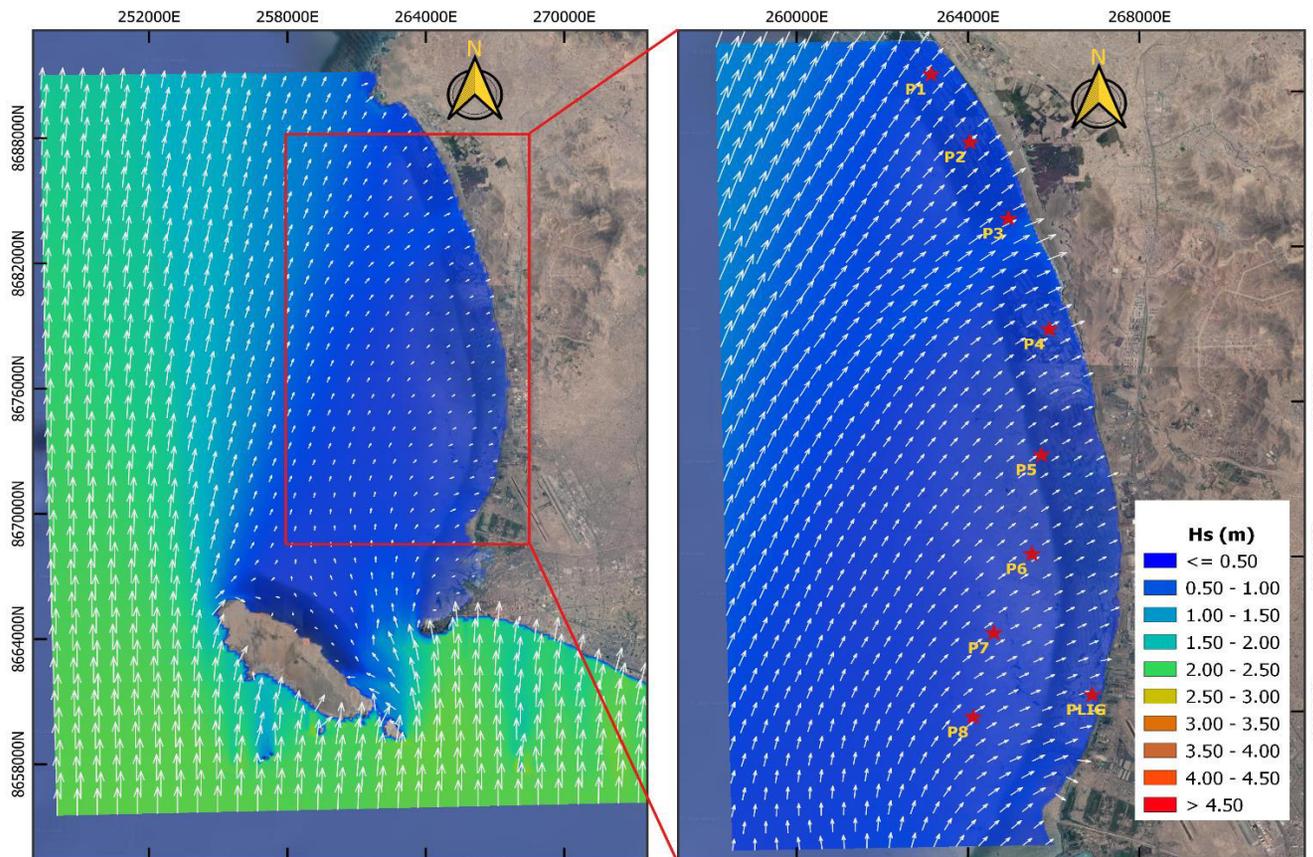
Por otro lado, la estadística descriptiva del oleaje indica una altura significativa mínima, promedio y máxima de 0.26 m, 0.58 m y 2.13 m respectivamente. De los percentiles se observa que el 25% de las alturas son inferiores a 0.46 m, que el 75% de las alturas son inferiores al 0.66 m y que el 95% de las alturas son inferiores a 0.93 m.

IV.5.6 Construcción de series de tiempo

A continuación, se presentan las salidas gráficas de los casos paramétricos modelados, que darán información sobre el comportamiento del oleaje incidente en la bahía del Callao:

Figura 31

Salida gráfica de caso medio modelado: Hs 2.33 m, Tp 9.62 s y Dm: 180°



Analizando la dirección Sur (S), de la figura 31, podemos observar que existe un abrigo completo (desde el punto de control P1 al P8) de la bahía del Callao generada por la presencia de la isla San Lorenzo y la punta Callao que se comportan como una protección costera que reduce la energía de las olas, lo que se traduce en una reducción de las alturas en contraposición a las ubicadas por fuera de la bahía.

Figura 32

Salida gráfica de caso máximo anual modelado: **Hs 4.19 m, Tp 17.10 s y Dm: 202.5°**

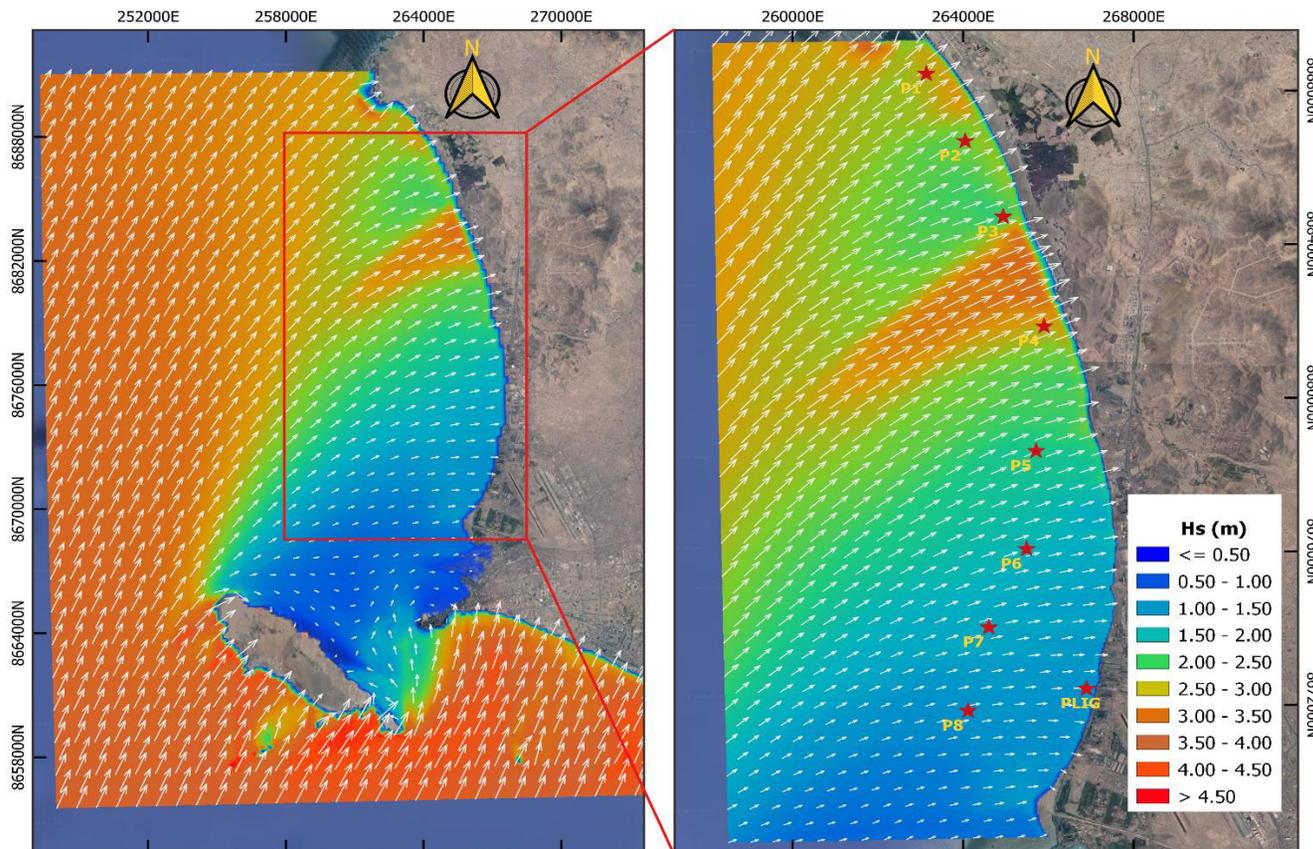


Figura 33

Salida gráfica de caso extremal modelado: H_s 5.21 m, T_p 18.7 s y D_m : 225°

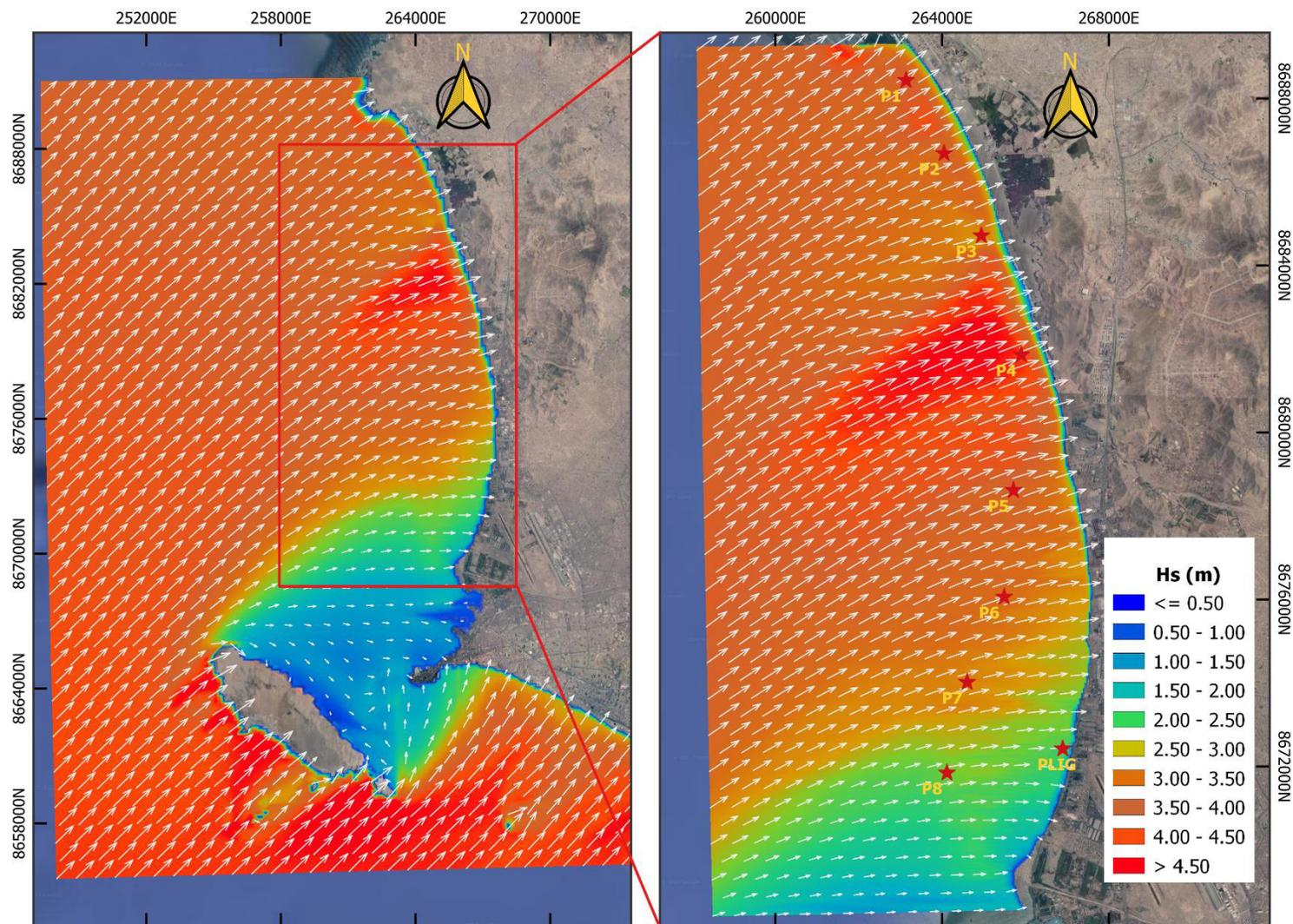


Figura 34

Salida gráfica de caso medio modelado: Hs 1.80 m, Tp 14.71 s y Dm: 247.5°

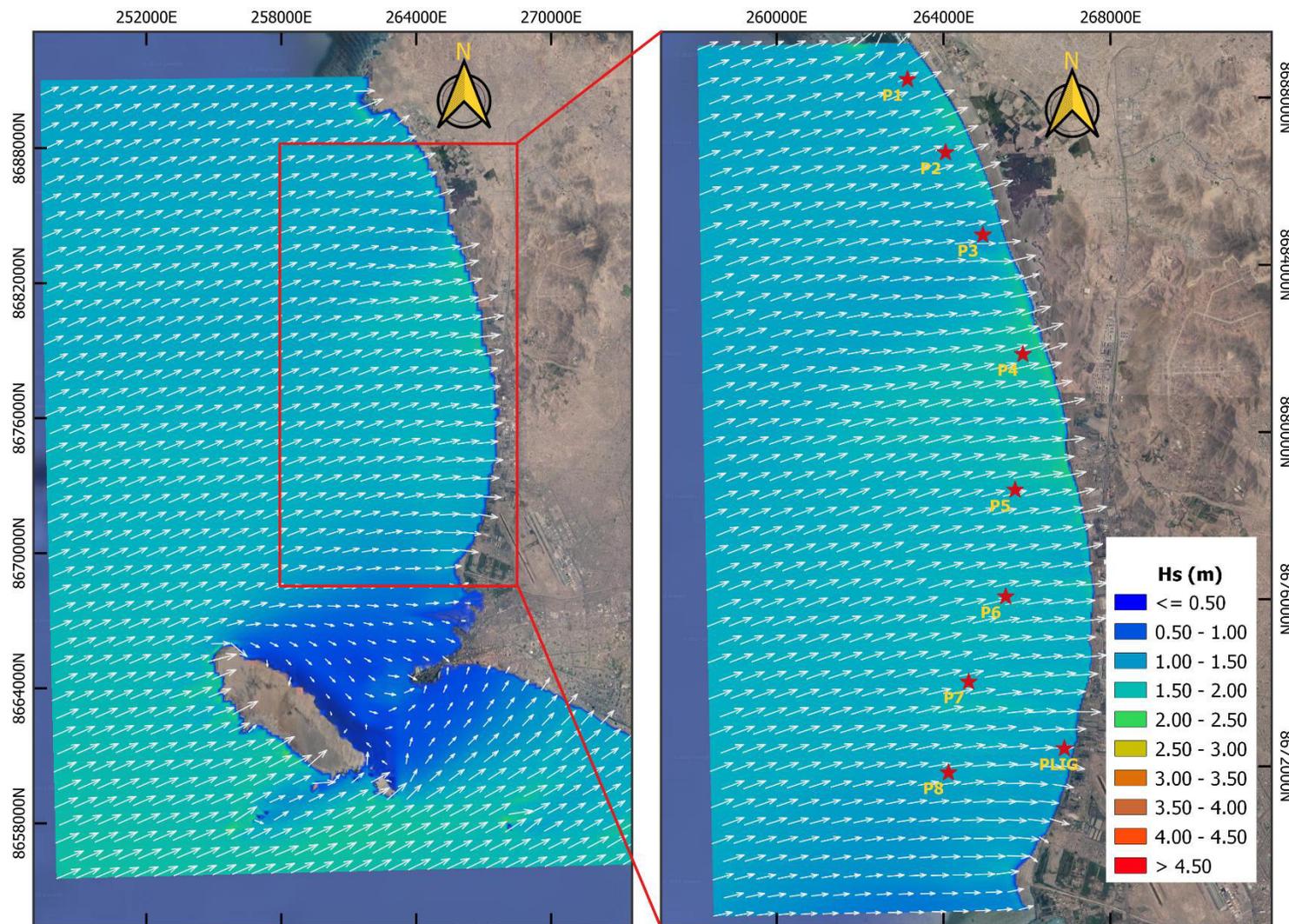


Figura 35

Salida gráfica de caso medio modelado: **Hs 2.93 m, Tp 19.23 s y Dm: 270°**

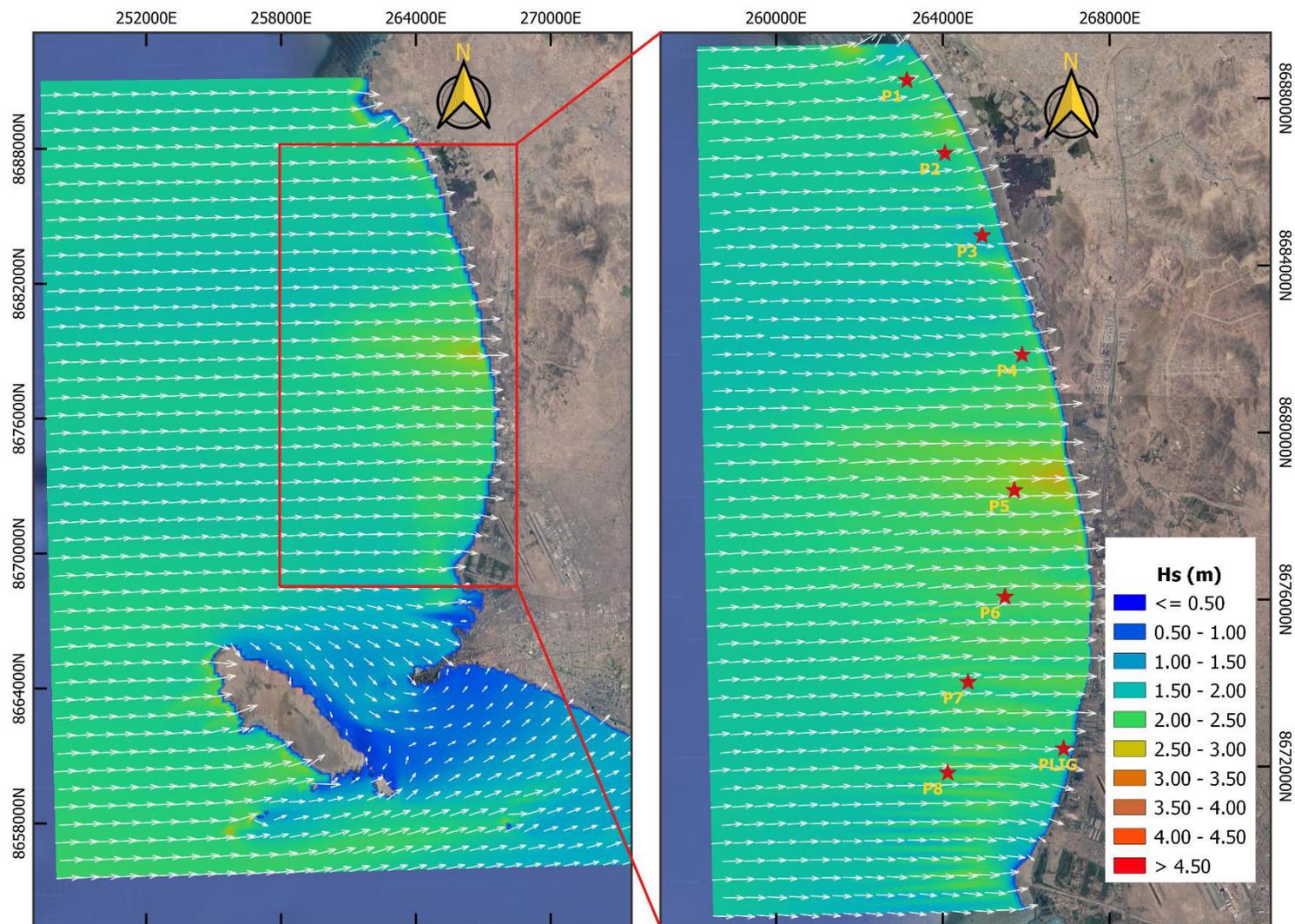
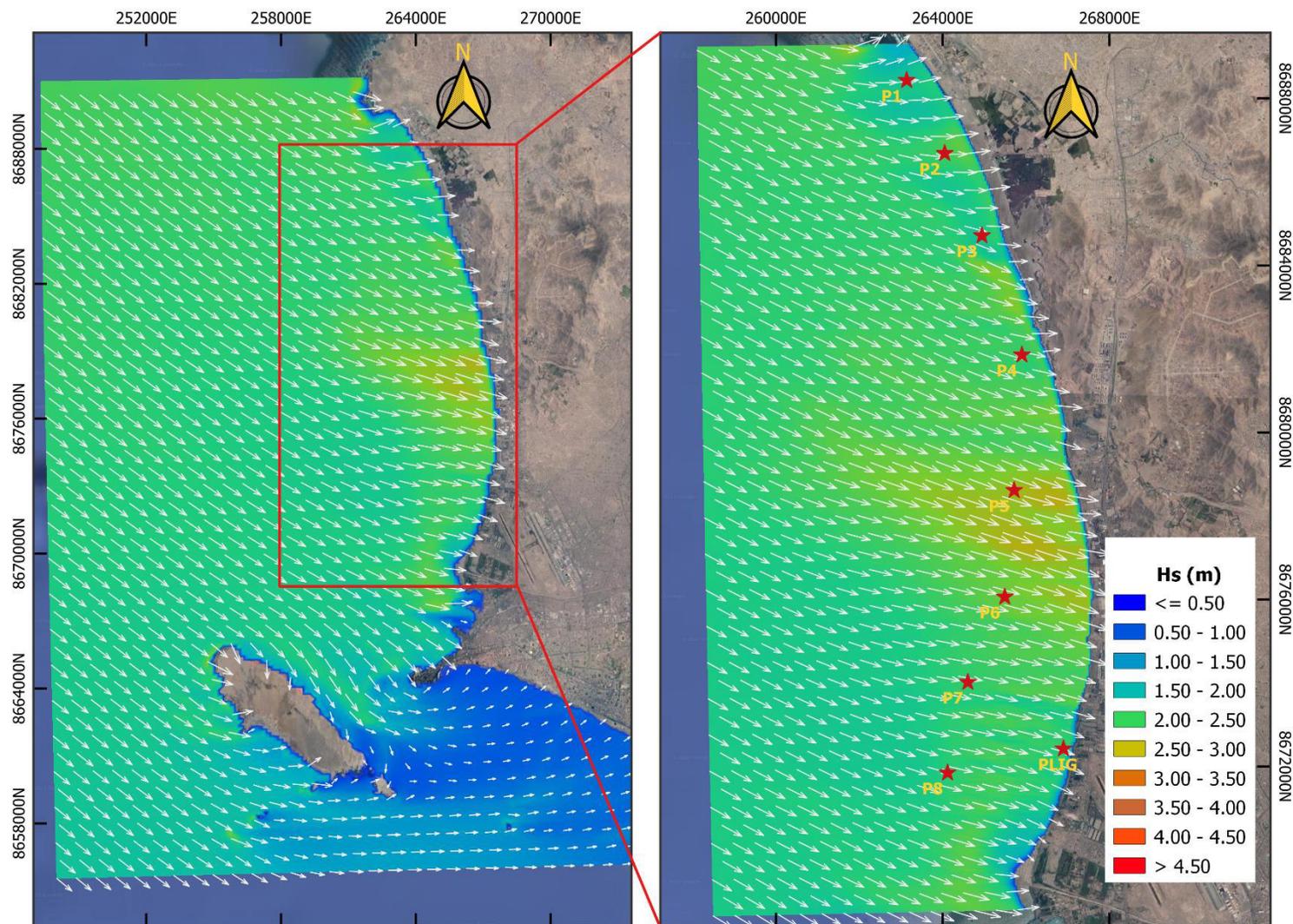


Figura 36

Salida gráfica de caso medio modelado: H_s 2.70 m, T_p 19.60 s y D_m : 315°



Por otro lado, mientras las direcciones provenientes del oleaje van tornándose hacia el norte, en las figuras 32, 33 y 34 se observa que el abrigo que brinda la Isla San Lorenzo y la punta Callao a la bahía se reduce progresivamente, así se tiene que para la dirección proveniente del Sur Suroeste (SSO) existe una protección parcial, únicamente en los puntos de control de P5 a P8, para la dirección proveniente del Suroeste (SO) solo los puntos P7 y P8 reciben protección de la isla, y para la dirección proveniente del Oeste Suroeste (OSO) el único punto que recibe protección parcialmente es el punto P8.

La Isla San Lorenzo pierde importancia en cuanto a protección cuando los oleajes son provenientes del Oeste, donde las olas inciden directamente a la bahía entre los puntos P3 a P8 (figura 35), así mismo los oleajes provenientes del Oeste Suroeste inciden directamente entre los puntos P1 y P2 (figura 34). Sin embargo, cuando el oleaje proviene del norte (Oeste Noroeste y Noroeste), aparece una protección o sombra en la zona norte de la bahía generada por la punta Cancha (figura 36).

A continuación, se muestran los resultados de las alturas de olas y direcciones en los puntos modelados con casos paramétricos:

Tabla 20

Alturas de olas de los puntos de control obtenidos del modelamiento de los casos paramétricos.

Casos	Altura de ola - Hs (m)							
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
	0.437	0.364	0.392	0.305	0.309	0.236	0.234	0.264
	1.348	1.156	1.051	1.255	0.522	0.849	0.696	0.627
	1.546	1.433	1.203	1.828	0.927	1.444	1.319	1.204
Medios	1.354	1.373	1.178	1.650	1.338	1.503	1.503	1.485
	1.337	1.331	1.158	1.313	1.310	1.662	1.436	1.345
	1.338	1.512	1.320	1.453	1.339	1.834	1.460	1.340
	1.327	1.575	1.403	1.551	1.471	1.925	1.745	1.507
	0.935	0.773	0.818	0.678	0.524	0.485	0.456	0.491
	2.799	2.424	2.107	2.824	1.085	1.891	1.558	1.379
Máximos	3.051	2.861	2.364	3.762	1.878	2.942	2.699	2.459
Anuales	2.488	2.547	2.179	3.099	2.467	2.834	2.839	2.768
	2.004	1.959	1.665	1.962	1.879	2.481	2.163	2.124
	2.104	2.332	2.036	2.228	2.021	2.846	2.192	2.001

	1.825	2.161	1.923	2.125	2.015	2.649	2.378	2.057
	1.091	0.902	0.947	0.785	0.593	0.566	0.530	0.562
	3.377	2.917	2.558	3.341	1.270	2.243	1.841	1.624
	3.998	3.769	3.114	4.542	2.472	3.860	3.541	3.247
Extremos (TR=100)	2.827	2.892	2.461	3.505	2.804	3.202	3.191	3.108
	2.496	2.438	2.103	2.436	2.403	3.093	2.686	2.528
	2.496	2.438	2.103	2.436	2.403	3.093	2.686	2.528
	1.850	2.187	1.943	2.146	2.037	2.688	2.394	2.075

Tabla 21

Dirección de olas de los puntos de control obtenidos del modelamiento de los casos paramétricos

Casos	Dirección (°)							
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
Medios	219.687	225.868	241.673	238.991	232.597	233.125	235.01	235.298
	229.499	236.24	250.398	243.817	254.998	245.527	249.726	252.64
	235.342	241.24	255.409	247.299	258.039	248.252	251.833	253.487
	244.179	249.131	262.098	254.815	261.957	256.764	257.844	258.176
	252.657	258.114	269.038	267.063	268.724	270.158	268.206	266.953
	258.092	266.288	276.161	277.203	279.073	280.751	278.936	277.183
	260.425	269.574	280.264	282.436	283.973	287.834	285.959	281.769
Máximos Anuales	223.505	230.87	245.554	241.821	244.016	239.784	242.709	245.393
	231.691	238.555	253.471	245.627	258.247	247.166	251.507	254.358
	236.771	242.792	257.876	248.911	259.408	249.914	253.397	254.711
	244.282	249.608	262.866	255.511	262.786	257.275	258.537	258.76
	251.765	257.035	268.753	266.155	267.888	269.274	267.338	266.138
	256.829	264.797	275.015	276.007	277.800	279.389	277.523	275.987
	260.193	269.264	279.943	282.084	283.593	287.315	285.509	281.42
Extremos (TR=100)	223.800	231.2	245.644	241.166	243.975	240.097	243.083	245.428
	231.200	237.982	252.68	245.093	258.404	246.692	251.024	254.018
	236.950	242.935	258.15	248.887	259.608	250.095	253.556	254.803
	244.278	249.525	262.717	255.413	262.699	257.197	258.328	258.509
	251.971	257.262	268.676	266.405	267.278	269.499	267.564	266.314
	251.971	257.262	268.676	266.405	267.278	269.499	267.564	266.314
	259.975	269.009	279.682	281.801	283.275	286.881	285.11	281.114

IV.5.7 Análisis estacional del régimen de olas

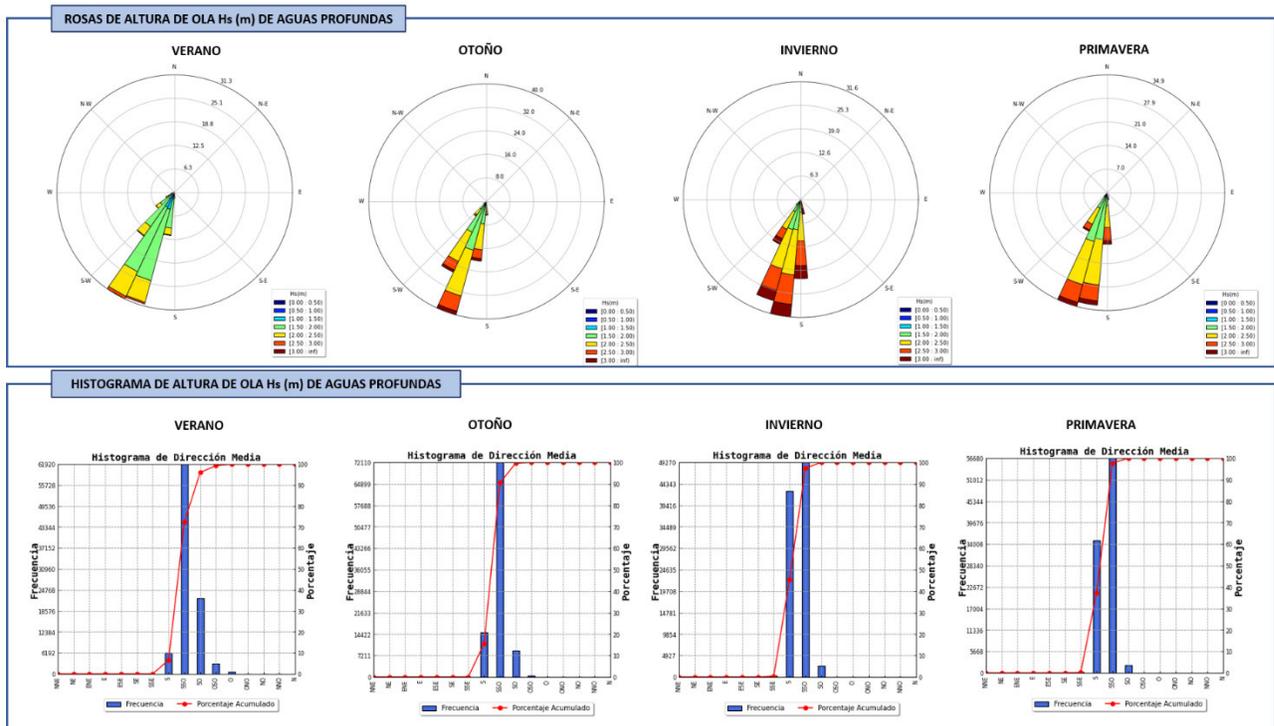
Para una mejor comprensión del comportamiento del oleaje en la bahía del Callao, se analizó la información de aguas profundas y la data de aguas someras reconstruida en cada punto de control por

estaciones del año. El análisis desarrollado fue enfocado en primer lugar en las alturas de olas, y en segundo lugar en sus direcciones.

A continuación, se muestran las rosas de oleaje e histogramas de dirección de los datos de aguas profundas por estación, con el fin de estimar porcentualmente la dirección proveniente del oleaje:

Figura 37

Rosas de oleaje e histogramas de dirección media de aguas profundas por estación



De los histogramas de dirección podemos observar que las direcciones con mayor predominancia en todas las estaciones son las provenientes del Sur (S) y Sur Suroeste (SSO), sin embargo, los porcentajes frecuenciales disminuyen para verano y otoño, donde existe presencia de oleajes en el rango de Sur a Oeste Noroeste (ONO). Es importante indicar que los oleajes con direcciones de Oeste (O) son presentados en las estaciones de verano y otoño, y la dirección Oeste Noroeste (ONO) se presenta únicamente en la estación de verano. Adicionalmente, de las rosas de oleaje se observa que las menores alturas de olas se presentan en la estación de verano (media de 1.80 m), y que en otoño empiezan a

elevarse progresivamente (media de 2.13 m) hasta presentar las alturas de olas máximas en la estación de invierno (media de 2.40 m), y en primavera, las alturas vuelven a disminuir (media de 2.18 m).

Tabla 22

Distribución porcentual de las direcciones de oleaje de aguas profundas por estación

	SSE	S	SSO	SO	OSO	O	ONO	Suma
Verano	0.00%	6.60%	65.75%	23.63%	3.29%	0.70%	0.03%	100%
otoño	0.04%	15.62%	74.79%	9.15%	0.37%	0.04%	0.00%	100%
invierno	0.36%	45.05%	51.89%	2.69%	0.00%	0.00%	0.00%	100%
primavera	0.20%	37.22%	60.35%	2.22%	0.01%	0.00%	0.00%	100%

Tabla 23

Estadística descriptiva de las alturas de oleaje de agua profundas por estación

Descripción	Verano	Otoño	Invierno	Primavera
Media	1.800	2.131	2.402	2.180
Mediana	1.780	2.084	2.332	2.122
Moda	1.752	1.958	2.184	1.970
Desviación estándar	0.284	0.414	0.528	0.457
Varianza	0.158	0.194	0.220	0.210
Curtosis	0.438	1.100	0.555	0.898
Rango	2.066	3.156	3.936	3.238
Mínimo	1.068	0.936	1.072	1.082
Máximo	3.134	4.092	5.008	4.320

Por otro lado, se muestran las rosas de olas por estación y los percentiles de las alturas de olas en cada punto de control ubicados en aguas someras con el fin de analizar las variaciones que sufre la altura de ola por el cambio de estación.

Figura 38

Rosas de altura de ola por estaciones del punto P1 y P2

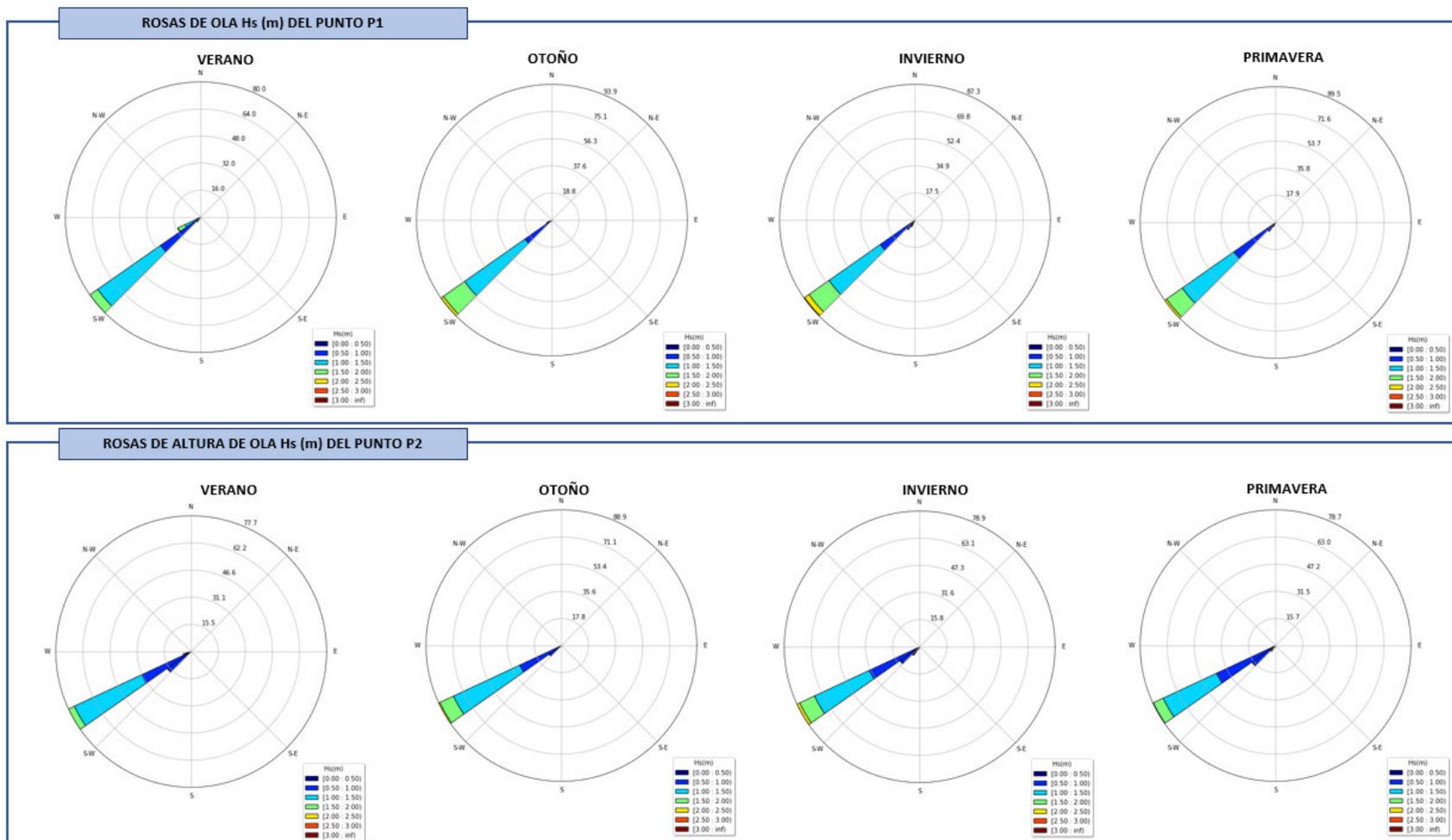


Figura 39

Rosas de altura de ola por estaciones del punto P3 y P4

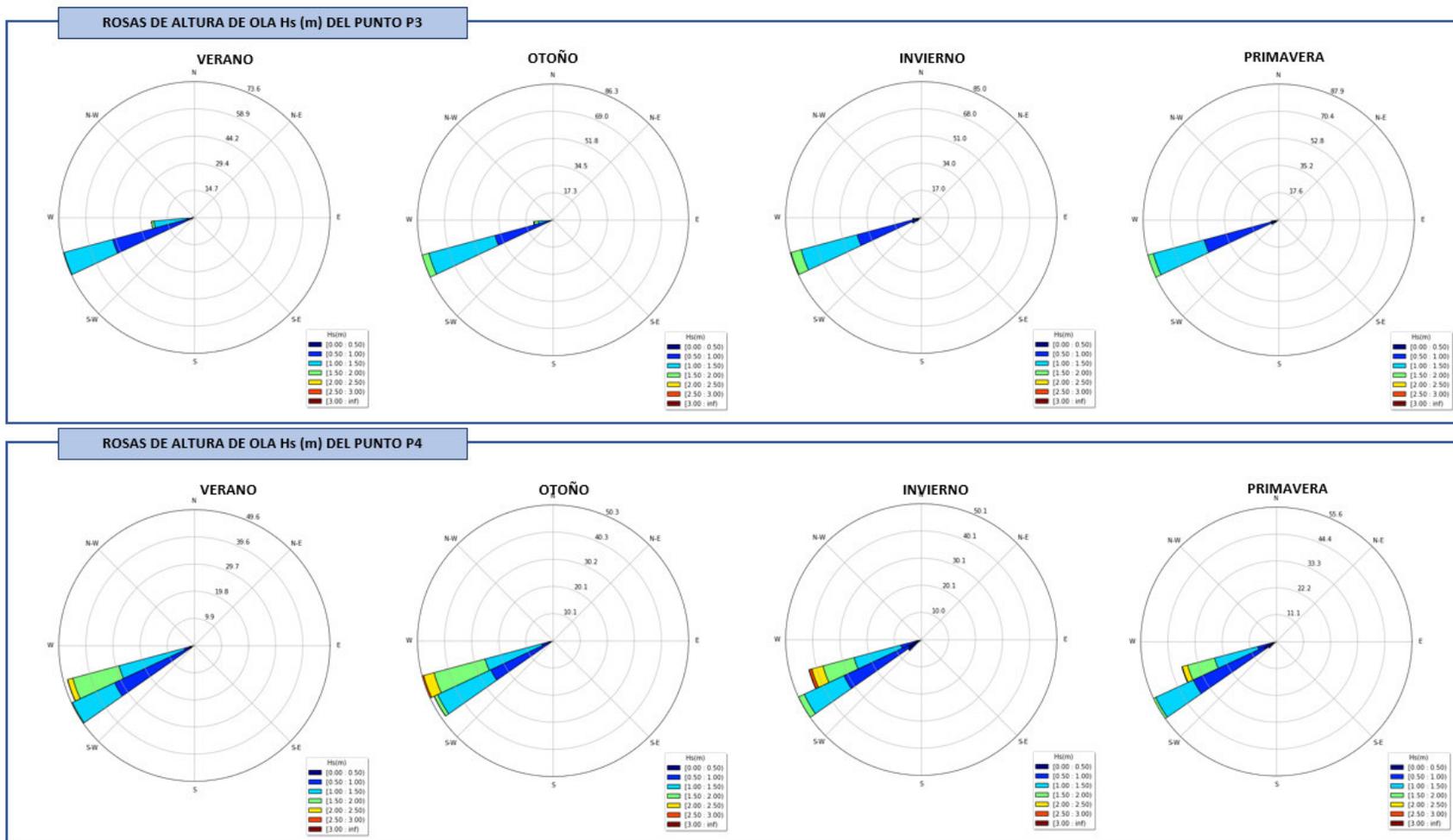


Figura 40

Rosas de altura de ola por estaciones del punto P5 y P6

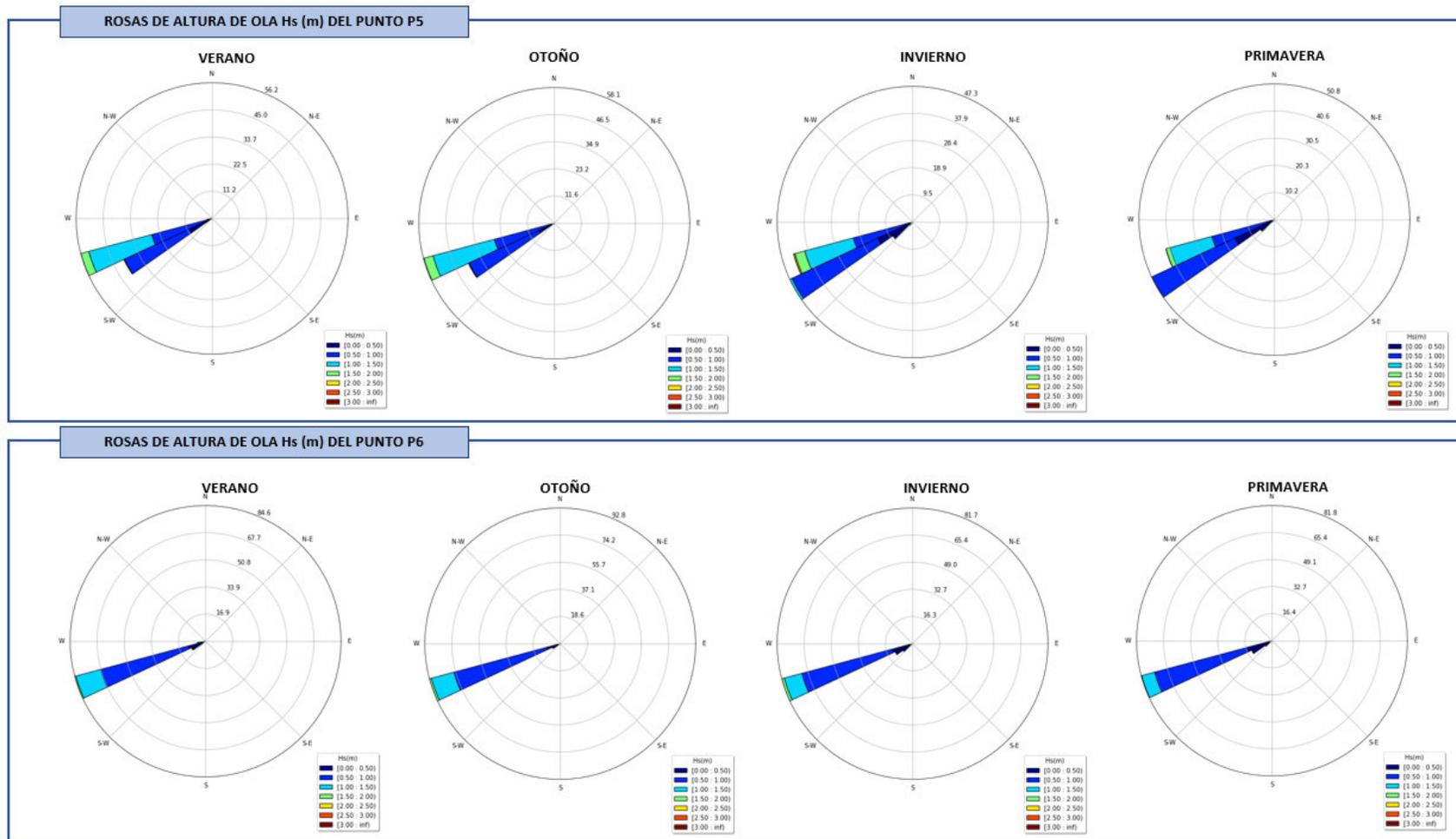


Figura 41

Rosas de altura de ola por estaciones del punto P7 y P8

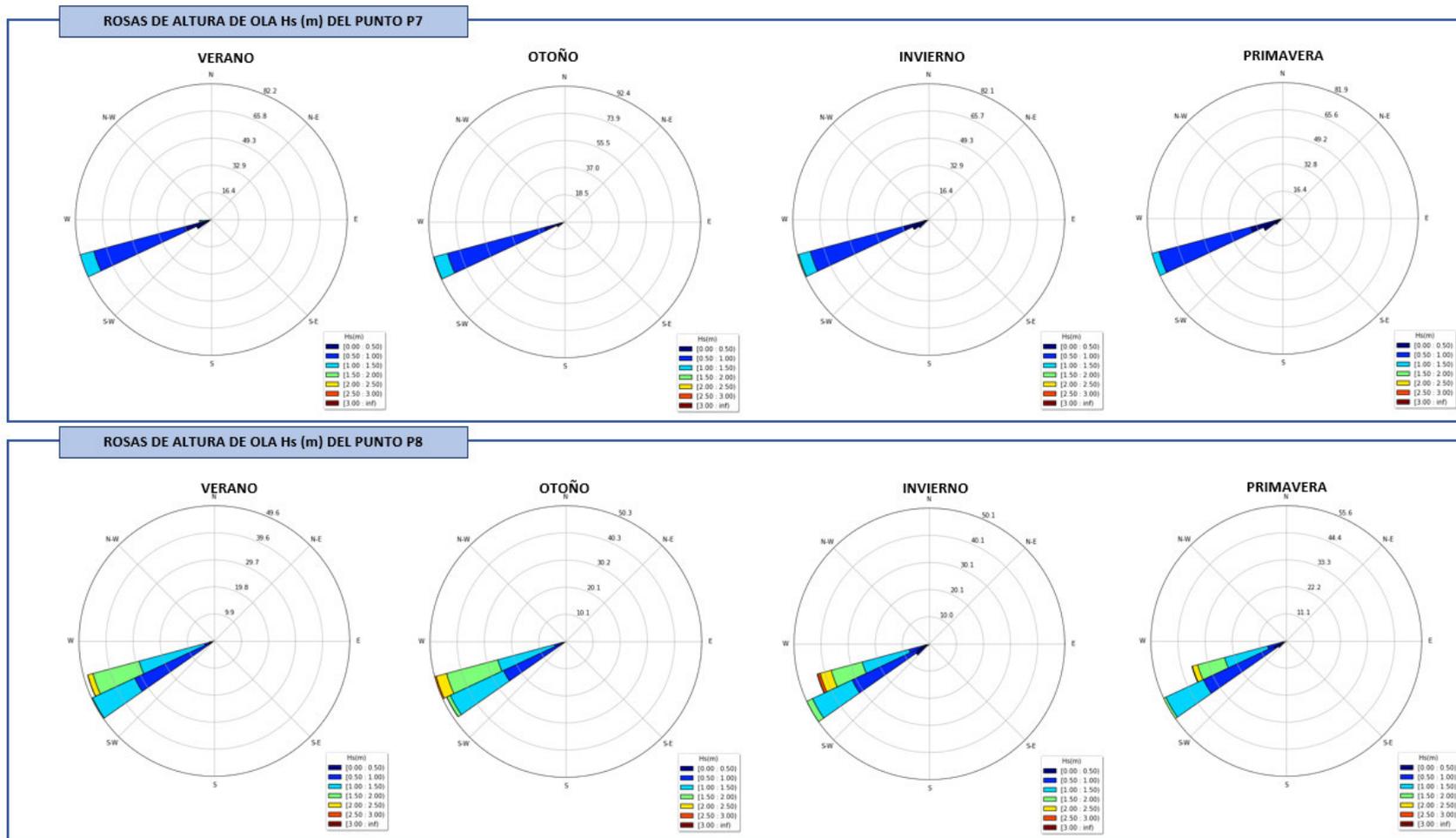


Tabla 24

Resumen de percentiles de verano para los puntos de control

Parámetro	P8	P7	P6	P5	P4	P3	P2	P1
	Sur 						Norte	
5%	0.37	0.36	0.37	0.42	0.58	0.62	0.58	0.67
25%	0.45	0.49	0.53	0.62	0.88	0.83	0.82	0.93
50%	0.55	0.64	0.71	0.83	1.14	0.99	1.01	1.13
75%	0.72	0.87	0.96	1.09	1.45	1.15	1.22	1.33
95%	1.08	1.28	1.38	1.49	1.84	1.38	1.51	1.62
Max.	1.87	2.08	2.17	2.25	2.71	1.88	2.14	2.23

Tabla 25

Resumen de percentiles de otoño para los puntos de control

Parámetro	P8	P7	P6	P5	P4	P3	P2	P1
	Sur 						Norte	
5%	0.40	0.40	0.40	0.45	0.63	0.66	0.62	0.72
25%	0.48	0.52	0.56	0.65	0.94	0.89	0.87	1.0
50%	0.57	0.65	0.72	0.84	1.20	1.07	1.08	1.22
75%	0.69	0.82	0.92	1.07	1.51	1.26	1.31	1.47
95%	0.94	1.17	1.30	1.47	1.98	1.57	1.66	1.84
Max.	2.13	2.37	2.44	2.46	3.22	2.40	2.62	2.87

Tabla 26

Resumen de percentiles de invierno para los puntos de control

Parámetro	P8	P7	P6	P5	P4	P3	P2	P1
	Sur 						Norte	
5%	0.39	0.35	0.31	0.31	0.34	0.44	0.40	0.45
25%	0.46	0.46	0.46	0.52	0.74	0.75	0.72	0.82
50%	0.53	0.58	0.62	0.72	1.05	0.99	0.97	1.11
75%	0.64	0.75	0.82	0.97	1.40	1.24	1.25	1.43
95%	0.90	1.10	1.24	1.45	2.03	1.67	1.74	1.95
Max.	1.73	2.21	2.47	2.80	3.66	2.68	2.97	3.23

Tabla 27

Resumen de percentiles de primavera para los puntos de control

Parámetro	P8	P7	P6	P5	P4	P3	P2	P1
	Sur	→ Norte						
5%	0.38	0.34	0.31	0.31	0.37	0.46	0.42	0.48
25%	0.44	0.44	0.45	0.51	0.73	0.74	0.70	0.81
50%	0.51	0.56	0.59	0.69	1.0	0.94	0.93	1.06
75%	0.61	0.70	0.77	0.91	1.31	1.16	1.17	1.33
95%	0.80	0.98	1.10	1.28	1.82	1.50	1.56	1.76
Max.	1.33	1.67	1.85	2.08	3.47	2.27	2.43	2.71

De las figuras anteriores y lo analizado en el ítem IV.5.6 Construcción de series de tiempo, podemos indicar que el punto P8 se encuentra protegido de las direcciones provenientes del Sur y Suroeste correspondiente a las direcciones predominantes de aguas profundas en temporada de invierno. Esto se refleja en la distribución porcentual de alturas de olas con respecto a la dirección, donde el mayor oleaje que incide en el punto P8 proviene del Oeste Suroeste (OSO). Analizando las alturas de olas máximas y percentil 95%, estas poseen valores de 1.73 m y 0.90 m respectivamente (Tabla 26), que son menores a las alturas encontradas en la estación de verano, donde la altura máxima y percentil 95% poseen valores de 1.87 m y 1.08 m respectivamente (Tabla 24). Como el tramo de estudio no se encuentra abrigado por el lado Oeste – Noroeste tiene concordancia que en la época de verano las alturas sean mayores con respecto a las demás estaciones, además, que los oleajes provenientes del norte tienen mayor presencia en esta época.

A medida que nos alejamos hacia el norte del punto P8, el abrigo que produce la Isla San Lorenzo y la Punta Callao disminuye notando que en los puntos P4 a P1 (de sur a norte) los oleajes provenientes del Suroeste inciden directamente, en la Tabla 26 podemos apreciar que para este tramo (P4 a P1) las alturas de ola son mayores en temporada de invierno con respecto a las demás estaciones.

V. CONCLUSIONES

- De la dirección media de la base de datos de oleaje en aguas profundas, la dirección predominante Sur Suroeste (SSO) tiene un porcentaje de ocurrencia de 63.24%, seguido de la dirección Sur (S) con un 26.09%. En cuanto al análisis estacional, podemos indicar que los rangos direccionales y sus ocurrencias son variables en cada temporada, teniendo que en verano el rango direccional del oleaje es de Sur a Oeste Noroeste (S a ONO), en otoño es de Sur Sureste a Oeste (SSE a O), en invierno es de Sur Sureste a Suroeste (SSE a SO), y en primavera de Sur Sureste a Oeste Suroeste (SSE a OSO). Si bien para todas las temporadas la dirección Sur Suroeste es la predominante, en la temporada de verano se observa que la dirección Suroeste (SO) es la segunda predominante, mientras que para las demás temporadas es la Sur Suroeste (SSO). Es decir que para la temporada de verano existe mayor predominancia en el norte.
- Respecto al análisis espectral del oleaje, en la figura 20, literal d correspondiente al día 01 de abril del 2021 podemos observar dos estados de mar superpuestos de tipo Swell o mar de fondo que llegan hacia el punto ADCP 3, y de la misma manera, en la figura 20, literal a correspondiente al día 8 de agosto del 2020 se observa dos estados de mar que llegan hacia el punto ADCP 2 con diferente frecuencia y dirección. Este comportamiento refleja un oleaje bimodal característico en las costas peruanas.
- Respecto al modelamiento, se encuentran menores diferencias entre las alturas de olas registradas (observado) y las modeladas debido a que se han introducido parámetros representativos del estado de mar (altura, periodo y dirección). Para la obtención de un mejor ajuste es necesario modelar empleando espectros de energía registrados en aguas profundas. Sin embargo, la obtención de esta información es difícil.
- Según las salidas gráficas resultantes de los casos medios, máximos anuales y extremos con tiempo de retorno de 100 años, los oleajes provenientes del Sur, Sur Suroeste y Suroeste llegan

con mayor energía en el punto P1 correspondiente al norte de la playa de Ventanilla, cerca de la punta Cancha. En cuanto a los oleajes provenientes de direcciones Oeste Suroeste (OSO) y Oeste (O) llegan con mayor energía en los puntos P4 correspondiente a playa Pampilla, al sur de la punta Bernal y P6 correspondiente a la playa Oquendo, y finalmente el oleaje proveniente al Oeste Noroeste (ONO) y Noroeste (NO) llegan con mayor incidencia en los puntos P6, y P7 correspondiente a la playa Taboada.

- Es importante mencionar que en el área de ubicación entre el punto P4 y P3 se encuentra una variación en la distribución de profundidades de la bahía siendo que desde el norte del punto P4 empieza a aumentar la pendiente perdiendo profundidad con mayor rapidez que en lado sur del punto P4, lo que se traduce en un aumento de energía de la ola transformada en la zona.
- En términos generales podemos indicar que las alturas de olas entre el tramo P8 a P4 son mayores en época de verano mientras que en el tramo comprendido entre P4 a P1 las máximas alturas se presentan en invierno.
- El análisis de toda la bahía del Callao fue fundamental para obtener información del régimen de oleaje en la zona de Liguria ya que la ubicación de la empresa se encuentra en el sur de la bahía, entre los puntos P8 y P7, y como hemos mencionado anteriormente, los oleajes con mayor incidencia se encuentran entre los rangos Oeste – Oeste Noroeste.
- De la calibración del modelo, se colige que el parámetro que mayor sensibilidad posee respecto a los resultados de las alturas de olas modeladas es el coeficiente de fricción del fondo. Asimismo, es importante evaluar los indicadores estadísticos como es la correlación de Pearson, y el cálculo del error medio cuadrático y el sesgo BIAS para la determinación de un buen ajuste entre lo modelado y registrado, llegando a la conclusión que el valor de 0.035 para el coeficiente de rugosidad es el que mejor se ajusta a las alturas de olas registradas.

- En cuanto a la validación del modelo, se encontró que, para las alturas máximas de olas, la mayor diferencia entre los valores modelados y los registrados no supera los 26 cm, traducándose en un 16.01% de error porcentual presentado en el punto ADCP3.

VI. RECOMENDACIONES

- Como lo indicado en las conclusiones, es importante la medición de información para la calibración de cualquier modelo que se realice en la bahía del Callao, por lo tanto, se recomienda tener la mayor cantidad de información registrada u observada en el área de estudio, de preferencia un año de registro con el fin de identificar cambios en la dinámica del oleaje por estaciones, sin embargo, se entiende que por cuestiones de costo puede ser complicado, por lo que se recomienda registrar al menos 1 mes en época de verano y en invierno ya que es en estas estaciones donde existen mayores cambios tanto en dirección incidente como en altura de olas.
- Así mismo, para la información de campo, se recomienda recolectar batimetrías actualizadas y periódicas cada 06 meses en las mismas temporadas de registro de olas indicadas en el punto anterior, especialmente en las zonas que se identifiquen cambios variables a lo largo de los años con el fin de determinar los posibles efectos que el oleaje incidente genere en la zona.

VII. BIBLIOGRAFÍA

- Shore Protection Manual (1984). Departamento de la Armada
- Alan P. Trujillo y Harold V. Thurman (2011). Essentials of Oceanography. Pearson
- José M. De La Peña Olivas (2007). Guía técnica de estudios litorales. Colegio de Ingenieros de Caminos y Puertos.
- Documento de referencia, Volumen I. Dinámicas (2000). Universidad de Cantabria.
- Carmela Ramos (2017). Simulación de transporte de sedimentos en la bahía Ferrol, Chimbote. [Tesis de Maestría, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]
- Delft3D-Wave, User Manual (2014). Deltares
- Recomendaciones del diseño y ejecución de las obras de abrigo (Parte 1°. Bases y factores para el proyecto. Agentes climáticos). (2009). Gobierno de España.
- User's manual for the simulating waves nearshore model (SWAN). (2002). Naval Research Laboratory of EEUU.