



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

**Propagación y análisis de oleaje para el  
desembarcadero pesquero artesanal San Andrés,  
provincia de Pisco, región Ica**

**MONOGRAFÍA TÉCNICA**

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Mecánico de Fluidos

**AUTOR**

Hilmer Eduardo NAVARRETE JIMENEZ

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

---

Navarrete, H. (2022). *Propagación y análisis de oleaje para el desembarcadero pesquero artesanal San Andrés, provincia de Pisco, región Ica*. [Monografía técnica 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

<b>Datos de autor</b>	
Nombres y apellidos	Hilmer Eduardo Navarrete Jimenez
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	47230306
URL de ORCID	<a href="https://orcid.org/0000-0001-8753-0167">https://orcid.org/0000-0001-8753-0167</a>
<b>Datos de asesor</b>	
Nombres y apellidos	GUIDO AMERICO ROZAS OLIVERA
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	07209368
URL de ORCID	<a href="https://orcid.org/0000-0002-2168-1146">https://orcid.org/0000-0002-2168-1146</a>
<b>Datos del jurado</b>	
<b>Presidente del jurado</b>	
Nombres y apellidos	GUIDO AMERICO ROZAS OLIVERA
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	07209368
<b>Miembro del jurado 1</b>	
Nombres y apellidos	JULIO JESUS QUIJANO VARGAS
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	43073615
<b>Miembro del jurado 2</b>	
Nombres y apellidos	EMANUEL JESUS GUZMAN ZORRILLA
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	40420005
<b>Miembro del jurado 3</b>	
Nombres y apellidos	NO APLICA
Tipo de documento	DNI

Número de documento de identidad	
<b>Datos de investigación</b>	
Línea de investigación	A.2.5.2. Recursos Hídricos
Grupo de investigación	NO APLICA
Agencia de financiamiento	SIN FINANCIAMIENTO
Ubicación geográfica de la investigación	País: Perú Departamento: Ica Provincia: Pisco Distrito: San Andrés Latitud: -13.73299 Longitud: -76.22541
Año o rango de años en que se realizó la investigación	2021-2022
URL de disciplinas OCDE	Ingeniería mecánica <a href="https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.03.01">https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.03.01</a>



**Universidad Nacional Mayor de San Marcos**  
(Universidad del PERÚ, Decana de América)

**FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS**

**XIII CAP DE LA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA DE FLUIDOS**

**ACTA DE SUSTENTACIÓN VIRTUAL DE LA MONOGRAFÍA TÉCNICA PARA OPTAR EL  
TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO MECANICO DE FLUIDOS, MODALIDAD DE  
TITULACIÓN M-3 – POR SUFICIENCIA PROFESIONAL**

Siendo las 11:00 a.m. del día martes 27 de diciembre de 2022, en la Sala de Sesión Virtual de la Facultad de Ciencias Físicas, bajo la presidencia del Ing. GUIDO AMÉRICO ROZAS OLIVERA y con la asistencia de los miembros Mg. Ing. JULIO JESÚS QUIJANO VARGAS y el Mg. Ing. EMANUEL JESÚS GUZMÁN ZORRILLA, se dio inicio a la Sesión Pública Virtual de Sustentación de la Monografía Técnica para optar el Título Profesional de Ingeniero Mecánico de Fluidos, mediante la Modalidad de Titulación M-3 Por Suficiencia Profesional, del Bachiller:

**HILMER EDUARDO NAVARRETE JIMENEZ**

El Presidente del Jurado Examinador dio lectura del Resumen del Expediente, e invitó al Bachiller HILMER EDUARDO NAVARRETE JIMENEZ, a realizar la Exposición del trabajo de la Monografía Técnica titulada “PROPAGACIÓN Y ANÁLISIS DE OLEAJE PARA EL DESEMBARCADERO PESQUERO ARTESANAL SAN ANDRÉS, PROVINCIA DE PISCO, REGIÓN ICA”.

Concluida la exposición del candidato y luego de las preguntas de rigor por parte del Jurado Examinador, el Presidente invitó al Bachiller a abandonar momentáneamente la sala de sesión para dar paso a la deliberación y calificación por parte del Jurado. Se procedió a promediar la nota final del curso de actualización y la nota de la sustentación para obtener la calificación final.

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

..... DIECISÉIS 16 .....

El Presidente del Jurado Ing. GUIDO AMÉRICO ROZAS OLIVERA, a nombre de la Nación y de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, declaró al Bachiller HILMER EDUARDO NAVARRETE JIMENEZ Ingeniero Mecánico de Fluidos.

Siendo las 11:58 a.m. del mismo día, se levantó la sesión.

**Ing. GUIDO AMÉRICO ROZAS OLIVERA**  
PRESIDENTE DEL JURADO

**Mg. Ing. JULIO JESÚS QUIJANO VARGAS**  
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: 30.12.2022 22:49:27 -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/86917039157?pwd=VHRld3RyNGNEY2ZTZk1hZ28zTWRpZz09>

ID de reunión: 869 1703 9157

Código de acceso: 995965

Grabación archivada en el siguiente enlace:

[https://drive.google.com/file/d/1vzZFKxWgy-ceIgUL0CSEuEgQZCSZnI2l/view?usp=share\\_link](https://drive.google.com/file/d/1vzZFKxWgy-ceIgUL0CSEuEgQZCSZnI2l/view?usp=share_link)

## 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 <sup>(1)</sup>  
"PROPAGACIÓN Y ANÁLISIS DE OLEAJE PARA EL DESEMBARCADERO PESQUERO ARTESANAL SAN ANDRÉS, PROVINCIA DE PISCO, REGIÓN ICA"
7. Autor del documento <sup>(2)</sup>  
HILMER EDUARDO NAVARRETE JIMÉNEZ
8. Fecha de recepción del documento 16/12/22
9. Fecha de aplicación del programa informático de similitudes 17/12/22
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 similitudes<sup>3</sup>  
2%
13. Fuentes originales de las similitudes encontradas<sup>4</sup>
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 30/12/22



Firmado digitalmente por SARANGO  
JULCA Douglas Donal FAU  
20148092282 soft  
Motivo: Soy el autor del documento  
Fecha: 01.01.2023 10:49:15 -05:00

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

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

## Contenido

	<b>CAPÍTULO 1: GENERALIDADES .....</b>	<b>7</b>
1.1.	Introducción.....	7
1.2.	Justificación del tema .....	8
1.3.	Identificación del problema .....	8
1.4.	Objetivos .....	8
	<b>CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>8</b>
2.1.	Olas.....	8
2.2.	Teoría de ola lineal de Airy .....	12
2.3.	Propagación de las olas hacia la costa .....	16
2.4.	Parámetros descriptivos de las olas .....	25
2.5.	Modificación de las olas.....	27
	<b>CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA .....</b>	<b>37</b>
3.1.	Procedimiento general de la investigación.....	37
3.2.	Datos utilizados .....	37
3.3.	Propagación de olas .....	41
3.4.	Metodología de análisis de resultados.....	43
	<b>CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE RESULTADOS .....</b>	<b>46</b>
4.1.	Clima de olas en aguas profundas.....	46
4.2.	Propagación de olas .....	59
4.3.	Clima de olas en aguas someras.....	61
	<b>CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES.....</b>	<b>72</b>
	<b>GLOSARIO DE TÉRMINOS.....</b>	<b>73</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>74</b>



## Lista de figuras

Figura 1.- Desembarcadero Pesquero Artesanal San Andrés - Pisco. ICA - PERÚ. Fuente: Google Earth.....	7
Figura 2.- Clasificación de las olas según su profundidad. Fuente: Triatmodjo 1999 .....	10
Figura 3.- Energía de las olas en función de la frecuencia.....	10
Figura 4.- Movimientos de las partículas de agua al paso de las olas.....	11
Figura 5.- Elementos básicos de una ola. Fuente: Elaboración propia.....	12
Figura 6.- Representación de una onda de Airy.....	16
Figura 7.- Movimiento orbital relacionado a la propagación de la ola.....	16
Figura 8.- Esquema de propagación de las Olas hacia la Costa.....	17
Figura 9.- Gráfica de definición del Run up.....	18
Figura 10. Ejemplo de espectro de oleaje unidimensional. ....	20
Figura 11. Esquema para la definición de los vectores de la ola y las corrientes.....	23
Figura 12. Malla esquemática del STWAVE. ....	25
Figura 13.- Relación entre el coeficiente de asomeramiento y el producto del número de onda por la profundidad. Fuente: Elaboración propia.....	29
Figura 14.- Refracción de olas al acercarse a la costa. Fuente: Google ...	31
Figura 15.- Esquema de dos rayos incidentes y la refracción de onda.....	32
Figura 16.- Grafico de valores $KrKs$ vs ángulos de dirección. ....	34
Figura 17.- Diagramas de difracción de las olas. ....	35
Figura 18.- Difracción en una dársena. ....	36
Figura 19.- Diagrama de difracción de ola. Fuente: Wiegel - SPM.....	37
Figura 20.- Sondajes en el área cercana al DPA San Andrés. Fuente: Navionics.....	38
Figura 21.- Ubicación relativa del nodo NOAA respecto al DPA San Andrés. ....	39
Figura 22.- Ubicación del equipo ADCP.....	40
Figura 23.- ADCP-Flowquest 600. ....	41
Figura 24. Serie de tiempo de la altura significativa del oleaje en el nodo NOAA (1979 – 2021). ....	46
Figura 25.- Rosa del oleaje del nodo NOAA. ....	47
Figura 26.- Altura significativa vs periodo pico del oleaje.....	48
Figura 27.- Porcentaje de excedencia de la altura significativa del oleaje. 49	

Figura 28.- Máximos anuales asociados a sus periodos y direcciones. Dirección Sur-Sureste.....	53
Figura 29- Máximos anuales asociados a sus periodos y direcciones. Dirección Sur.....	54
Figura 30. Máximos anuales asociados a sus periodos y direcciones. Dirección Sur-Suroeste.....	55
Figura 31.- Máximos anuales asociados a sus periodos y direcciones. Dirección Suroeste.....	56
Figura 32- Máximos anuales asociados a sus periodos y direcciones.....	57
Figura 33. Distribución Gumbel para la Hs en aguas profundas.....	58
Figura 35.- Propagación del oleaje con el modelo STWAVE. (Dirección Sur y periodo de 14 segundos).....	59
Figura 36- Propagación del oleaje con el modelo STWAVE. (Dirección Sur- Suroeste y periodo de 14 segundos).....	60
Figura 37. Propagación del oleaje con el modelo STWAVE. (Dirección Suroeste y periodo de 14 segundos).....	60
Figura 38.- Serie de tiempo asociada a la altura significativa de la ola (Hs) registrado por el equipo ADCP.....	61
Figura 39.- Serie de tiempo asociada al periodo pico del oleaje (Tp) registrado por el equipo ADCP.....	61
Figura 40. Serie de tiempo asociada a la dirección de procedencia del oleaje (Dir) registrado por el equipo ADCP.....	61
Figura 41.- Rosa de Oleaje registrada por equipo de medición ADCP.....	63
Figura 42.- Altura significativa vs Período pico del Oleaje medido con equipo ADCP.....	64
Figura 43.- Porcentaje de excedencia de la altura significativa del oleaje.	64
Figura 44. Serie de tiempo de la altura de ola (Hs) en aguas profundas...	65
Figura 45. Serie de tiempo del periodo pico de la ola (Tp) en aguas profundas.....	65
Figura 46. Serie de tiempo de la dirección del oleaje (Dp) en aguas profundas.....	65
Figura 47. Comparación de la serie temporal de la altura significativa del oleaje.....	66
Figura 48. Comparación de la serie temporal de la dirección del oleaje....	67
Figura 49. Comparación del porcentaje de excedencia de la altura de ola. .....	67
Figura 50.- Rosa de olas en aguas someras.....	69

Figura 51.- Altura significativa vs Período pico del oleaje en aguas someras.  
..... 69

Figura 52.- Porcentaje de excedencia de la altura significativa del oleaje. 70

## Lista de tablas

Tabla 1.- Estadísticas generales del nodo NOAA. ....	46
Tabla 2.- Frecuencia relativa del oleaje. ....	48
Tabla 3.- Tabla de ocurrencia para oleaje de procedencia sur-sureste. ....	50
Tabla 4.- Tabla de ocurrencia para oleaje de procedencia sur. ....	50
Tabla 5.- Tabla de ocurrencia para oleaje de procedencia sur-suroeste. ...	51
Tabla 6.- Tabla de ocurrencia para oleaje de procedencia suroeste. ....	52
Tabla 7.- Valores de Hs asociados a diversos periodos de retorno. ....	59
Tabla 8.- Estadística general de olas medidas por equipo ADCP. ....	62
Tabla 9.- Frecuencia relativa del oleaje (Hs) en función de la dirección en el punto de medición. ....	63
Tabla 10. Comparación entre los resultados de oleaje entre el punto de medición ADCP y los resultados del modelo STWAVE. ....	66
Tabla 11.- Estadísticas generales del oleaje frente a San Andrés. ....	68
Tabla 12.- Frecuencia relativa del oleaje en aguas someras. ....	70

## CAPÍTULO 1: GENERALIDADES

### 1.1. Introducción

El distrito de San Andrés basa gran parte de su economía de la pesca artesanal, motivo por el cual resulta muy importante la operatividad idónea del Desembarcadero Pesquero Artesanal para mantener y dar crecimiento a la economía de los pobladores en la zona.

No obstante, conforme los años avanzan se ve un crecimiento en el número de embarcaciones artesanales en el Perú, por ello el Fondo Nacional de Desarrollo Pesquero (FONDEPES) encargado de la administración del DPA de San Andrés está evaluando la ampliación del muelle y/o rompeolas actual, esto con el fin de disponer mayor cantidad de líneas de atraque para las operaciones de atraque y desatraque de material hidrobiológico procedente de las embarcaciones artesanales.

Por ello, surgió la necesidad de hacer un estudio del clima marítimo (oleaje) que permita establecer los datos de olas básicos para ser considerados en los estudios y diseños asociados para la extensión del muelle, extensión o modificación del rompeolas, así como actividades adicionales para las operaciones del DPA.

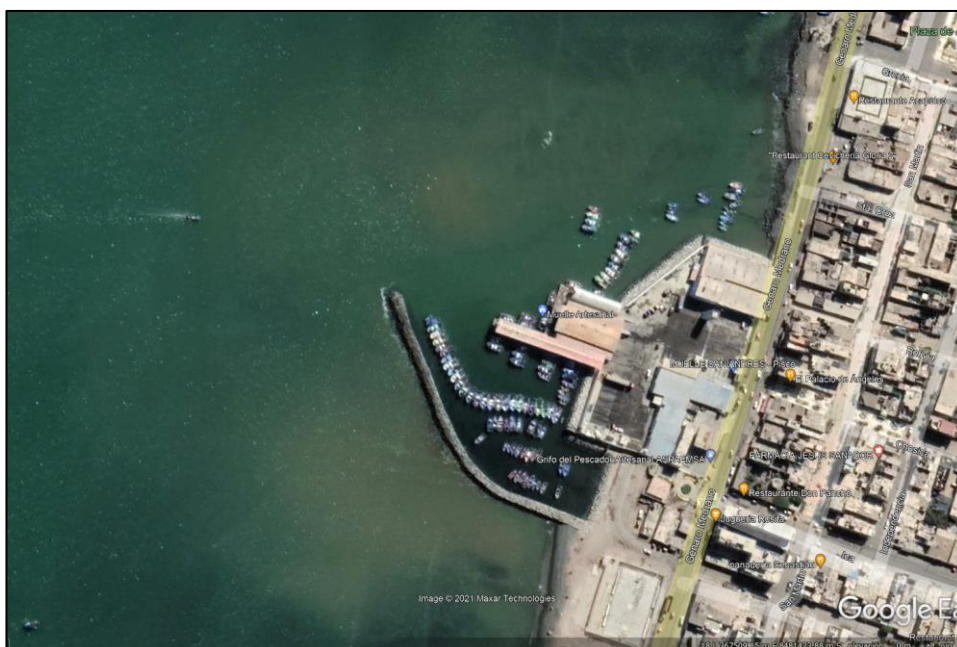


Figura 1.- Desembarcadero Pesquero Artesanal San Andrés - Pisco. ICA - PERÚ. Fuente: Google Earth

## **1.2. Justificación del tema**

El desarrollo de este estudio permitirá establecer las condiciones del oleaje que servirán como base para los estudios y diseños del muelle, rompeolas u otras obras de ingeniería asociadas a la necesidad del proyecto.

## **1.3. Identificación del problema**

El aumento de la demanda en el DPA de San Andrés requiere una ampliación y/o modificación de sus obras actuales (muelle artesanal, obra de abrigo, etc), por ello se requiere de un estudio de oleaje en el frente costero de San Andrés.

## **1.4. Objetivos**

### **1.4.1. Objetivo general**

Definir el régimen del oleaje para la ampliación del Desembarcadero Pesquero Artesanal de San Andrés, Pisco.

### **1.4.2. Objetivo específico**

- Análisis del oleaje en aguas profundas.
- Desarrollar la propagación del oleaje desde aguas profundas hasta aguas someras.
- Análisis del oleaje en aguas someras.

## **CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO**

### **2.1. Olas**

En las aguas del mar existen movimientos ondulatorios que son provocados por diferentes factores. Aquellos movimientos que tienen una periodicidad, un ritmo que se desarrollan en la superficie se denominan olas.

Las olas en el mar representan el fenómeno más importante a considerar entre todas las condiciones ambientales que afectan a las estructuras marítimas, ya que estas ejercen una gran influencia. La presencia de olas hace que los procedimientos de diseño de estructuras marítimas sean diferentes al de las estructuras en tierra. Debido a que las olas son de los más complejos y cambiantes fenómenos en la naturaleza, no es tan fácil lograr un total entendimiento de su comportamiento.

Conforme las olas se van alejando del radio de acción del viento, éstas presentan crestas largas bien definidas, y su movimiento se va volviendo más ordenado y

rítmico, pudiéndose propagar a miles de kilómetros. Al aproximarse a las costas, las olas logran disiparse.

### **2.1.1. Clasificación de las olas**

Las olas se clasifican según los diversos parámetros que las definen

#### **Por su origen**

##### Olas de viento

Estas olas se clasifican también en; Olas Sea o Forzada y Olas Swell u Oleaje Libre.

##### Olas de terremoto o Tsunami

Olas de longitudes de onda bastante largas, que se ocasionan generalmente cuando hay desplazamiento rápido e inesperado de gran volumen de agua, debido a la gran magnitud de los sismos submarinos y focos poco profundos. Este tipo de olas viajan a grandes distancias.

##### Olas internas

Estas olas se originan dentro de la gran masa de agua y se deben a los cambios de temperatura, densidad o salinidad del agua.

#### **Por la profundidad en que se encuentran**

En base a este término, como se muestra en el gráfico (1), las olas podrían clasificarse en:

##### Olas de aguas poco profundas

Son las olas propagadas en áreas en el que la profundidad del agua es menor o equivalente a  $1/25$  de la longitud de la ola ( $h/L \leq 1/25$ ), donde la influencia del fondo perturba la representación de los movimientos orbitales, de formas circulares a elípticas o cercanas a la elíptica.

##### Olas de aguas intermedias

Son las olas propagadas en áreas en el que la profundidad supera el  $1/25$  de la longitud de la ola, asimismo es menor a  $1/2$  de esa longitud ( $1/25 < h/L < 1/2$ ).

##### Olas de aguas profundas

Son las olas propagadas en áreas en el que la profundidad del agua es mayor o equivalente a  $\frac{1}{2}$  de la longitud de la ola ( $h/L \geq 1/2$ ), en donde la profundidad marina no influye significativamente en los movimientos de cada partícula, esto quiere decir sobre las características de las olas.

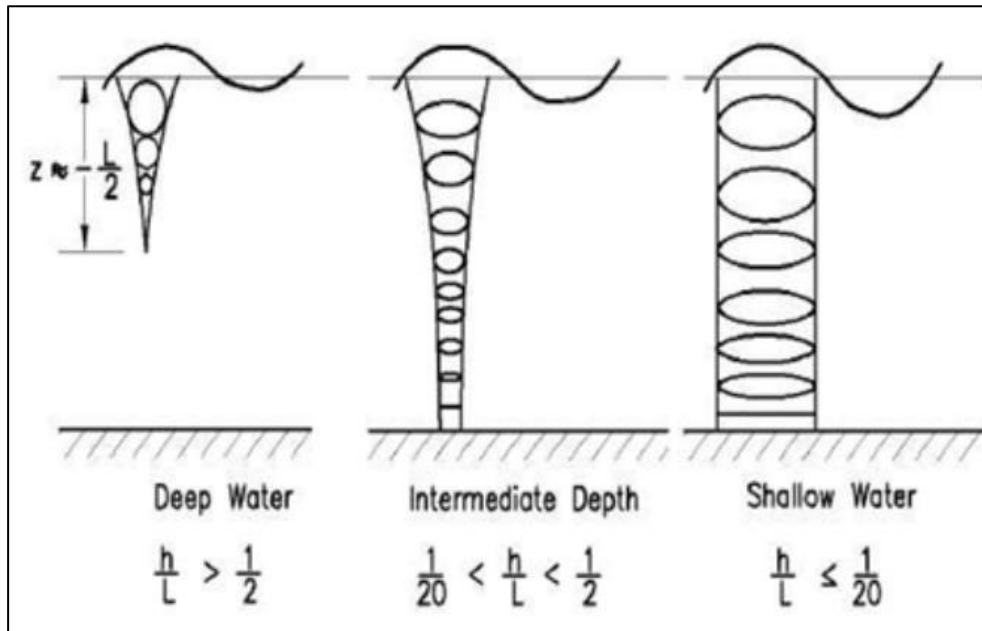


Figura 2.- Clasificación de las olas según su profundidad. Fuente: Triatmodjo 1999

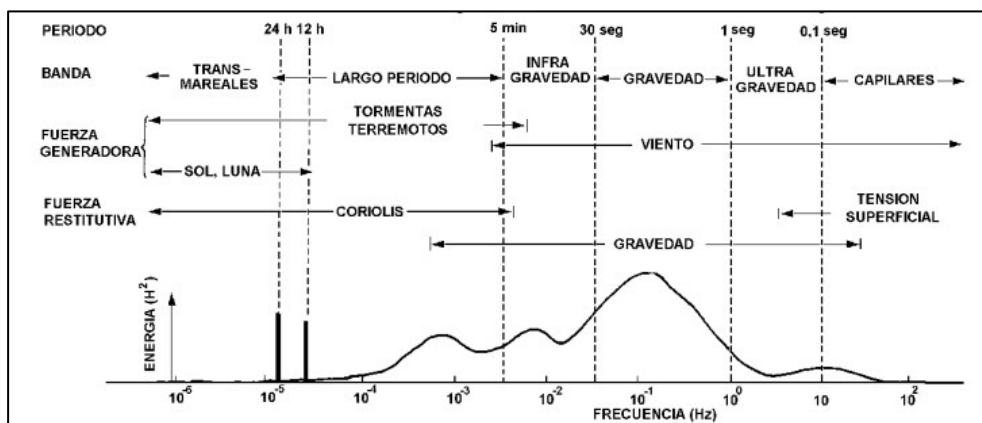


Figura 3.- Energía de las olas en función de la frecuencia.

Fuente: MODELACIÓN FÍSICA DEL RUN-UP POR OLEAJE EN EL TALUD DE LA PRESA JORGE CEPERNIC – UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA

### Movimiento de las partículas de agua al paso de las olas

Se diferencian tres tipos de movimientos de las partículas del agua:

#### Oscilatorias

Cuando los movimientos de cada partícula agua define órbitas cerradas.



### Casi-oscilatorias

Cuando el movimiento de las partículas define órbitas no cerradas, y además se produce un ligero desplazamiento en alguna dirección.

### De traslación

Cuando las partículas del agua se mueven en traslación, como ocurre durante el rompimiento de las olas.

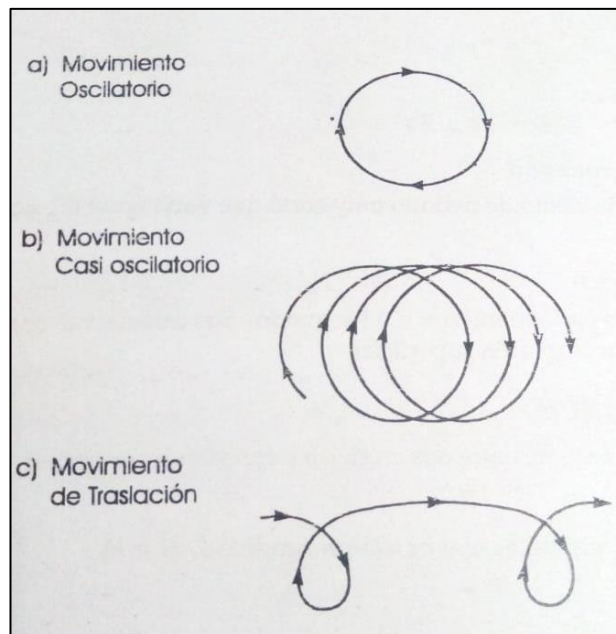


Figura 4.- Movimientos de las partículas de agua al paso de las olas.

Fuente: FUENTES O., C. (2001); "Ingeniería Portuaria"

### **Elementos básicos de una ola**

Debido a la forma ondulatoria que poseen las olas en el mar, se componen de una cresta y un valle. Siendo la cresta el punto máximo que alcanza la ola, mientras que el valle es el punto más bajo.

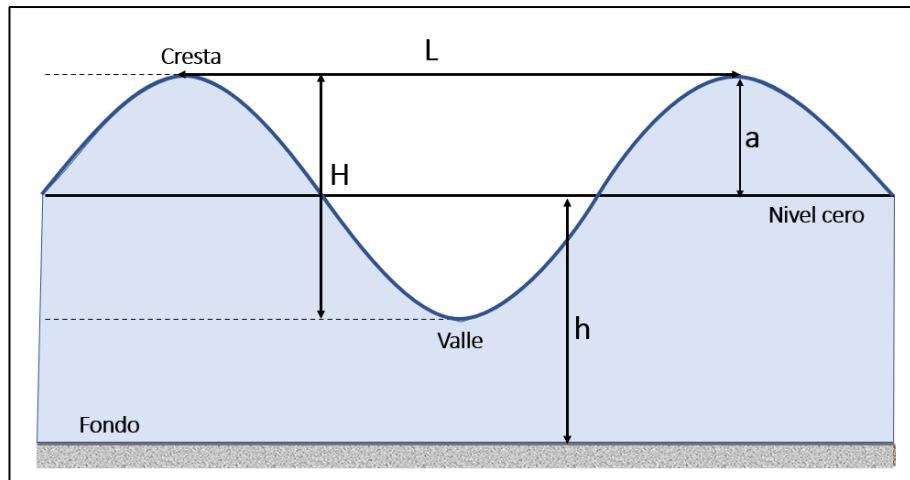


Figura 5.- Elementos básicos de una ola. Fuente: Elaboración propia

El nivel cero representa la línea horizontal que equidista entre crestas y valles de una ola, ésta se encuentra en referencia al nivel medio en movimiento (NMM).

Los elementos básicos necesarios para el estudio analítico de las olas son:

**Altura de la ola (H)**

Es la diferencia de la cresta de una ola con el siguiente valle, esta es numéricamente igual al doble de la amplitud.

**Longitud de ola (L)**

Es el trayecto que separa a dos crestas o valles sucesivos.

**Periodo (T)**

Viene a ser el tiempo que se mide en segundos, que toma dos valles o crestas sucesivas en pasar por un mismo punto.

**Profundidad (h)**

Es la distancia medida verticalmente desde el nivel cero hasta el fondo.

**Celeridad (C)**

Representa la velocidad de propagación de la ola, se define por la relación que se obtiene entre longitud de ola y el periodo. ( $C=L/T$ ).

**2.2. Teoría de ola lineal de Airy**

Matemáticamente, la teoría lineal de Airy puede considerarse como una primera aproximación de una descripción teórica más completa. Se basa sobre la suposición de que la ola se mueve tan levemente que su superficie libre se describe con la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{1}{2} H \cos \left[ 2\pi \left( \frac{x}{L} - \frac{t}{T} \right) \right]$$

$$\eta = \frac{1}{2} H \cos(kx - \omega t)$$

$$\eta = a \cos \left[ 2\pi \left( \frac{x}{L} - \frac{t}{T} \right) \right] = a \cos \theta$$

Donde:

$k$  número de ola =  $2\pi/L$

$\omega$  frecuencia angular =  $2\pi/T$

Las hipótesis básicas sobre los movimientos de las olas para el desarrollo de dicha Teoría Lineal vienen a ser:

- El flujo es considerado homogéneo e incompresible; entonces, la densidad ( $\rho$ ) es constante. Su tensión superficial es despreciable; por lo tanto, no existe gravedad interna o presión de ola que lo altere.
- El efecto de Coriolis se desprecia; es decir, el flujo es irrotacional.
- El flujo viene a ser ideal; es decir, sin viscosidad. No hay esfuerzo de corte en la interfase mar-aire o en la profundidad; así debería existir una velocidad potencial que satisfaga las ecuaciones de Laplace (ecuación de continuidad).
- El fondo del mar es fijo, impermeable y horizontal; por lo tanto, no aumenta ni disminuye la energía del fluido o energía reflejante de la ola. La ola es bidimensional, la cresta de la ola es finita.
- La ola tiene una amplitud pequeña, su forma no varía en el espacio y en el tiempo.
- La presión en toda la ola es pequeña comparada con la longitud y profundidad. La velocidad de la partícula está relacionada con la amplitud, mientras que la

celeridad de la ola, con los profundo y largo de ola. Por lo tanto, la velocidad de la partícula es pequeña comparada con a celeridad de la ola.

De la primera hipótesis, se concluye que la línea de corriente de los fluidos incompresibles son paralelas. Pudiéndose justificar esto mediante la ecuación de conservación de la masa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{u}) = 0$$

Donde:

$\rho$ , es densidad

$\vec{u}$ , vector de velocidad.

Ahora, cuando el fluido sea incomprensible, la densidad será constante y su derivada será cero, en consecuencia, la ecuación anterior podrá escribirse así:

$$\nabla(\rho \vec{u}) = 0$$

Es decir, que la velocidad tendrá una diferencia nula o también que las líneas del flujo serán paralelas, sin embargo, estas no serán necesariamente rectas.

La hipótesis que indica que los flujos son irrotacionales quiere decir que su campo deriva del potencial, esto quiere decir, que podría escribirse para la velocidad tanto horizontal (u) como vertical (v) estas ecuaciones:

$$u = \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad v = \frac{\partial \phi}{\partial z}$$

Las ecuaciones anteriores indican que cuando se conozca el potencial  $\phi(x, z, t)$  en el ámbito general del estudio, podría conocerse también la velocidad de la partícula.

La formulación de la teoría lineal se desarrolla generalmente en término de funciones potenciales  $\phi$ . Según Airy correspondiente a una perturbación del primer orden,  $\phi = \varepsilon \phi_1$ , donde las condiciones de contorno tendrían que cumplirse en  $z = 0$ , resultando así:

- a) El fondo viene a ser impermeable, el agua no se mueve por sí mismo, entonces:

$$v = -\frac{\partial\phi}{\partial z} \quad \text{en } z = -d$$

Siendo  $d$  la profundidad máxima.

El agua normalmente se contiene en su superficie, por ello las partículas van a moverse con igual velocidad con el cual varía la forma de la superficie marina.

$$\frac{\delta y}{\delta t} = -\frac{\partial\phi}{\partial z} = v \quad \text{en } z = y$$

b) En la superficie, la presión ( $p$ ) va a obtenerse mediante la ecuación de Bernoulli:

$$\frac{\partial\phi}{\partial z} = \frac{p}{\rho} + \frac{1}{2}(u^2 + v^2) + gz$$

c) Por último, se sabe que la ola tiene una pendiente pequeña ( $H/L < 1$ ), además que la profundidad de agua supera la altura de la ola ( $d/H \gg 1$ ).

Las soluciones ante este problema se asumen que son armónicas respecto al tiempo y se obtienen cuando se separan las variables. Las soluciones tienen esta forma:

$$\phi(x, z, t) = \frac{1}{2} \frac{Hg}{\omega} \cdot \frac{\cosh(k(z+d))}{\cosh(kd)} \cdot \cos(kx - \omega t)$$

La correspondiente elevación de la superficie es

$$y(t, x) = H_o \cos(kx - \omega t)$$

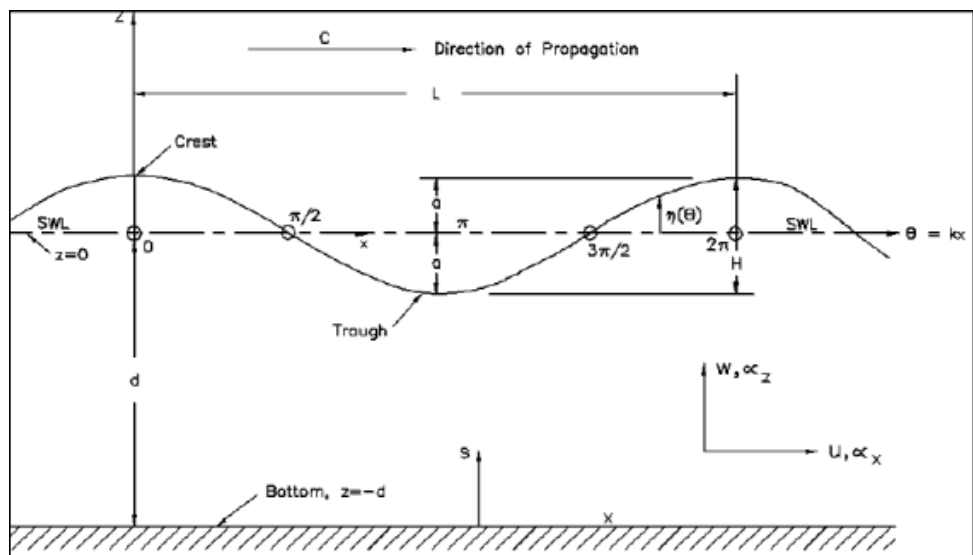


Figura 6.- Representación de una onda de Airy.

Fuente: LOPEZ U., I. (2014); "Ondas Superficiales en el Mar"

### 2.3. Propagación de las olas hacia la costa

Puede parecer que la propagación de las olas, particularmente de la cresta, se debe a un desplazamiento de agua en la dirección del movimiento. En realidad, es la forma de la ola y no el agua la que se mueve sobre la superficie como resultado del movimiento orbital de las partículas de agua, las cuales oscilan hacia atrás y hacia delante pero no avanzan.

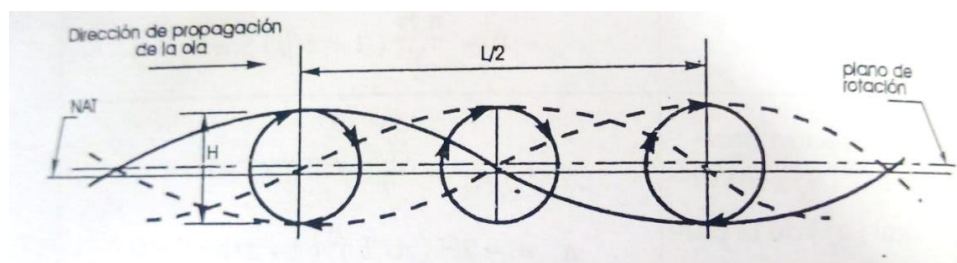


Figura 7.- Movimiento orbital relacionado a la propagación de la ola.

Fuente: FUENTES O., C. (2001); "Ingeniería Portuaria"

El movimiento circular de las partículas superficiales se transmite por fricción a las capas subyacentes; pero la circunferencia que describen disminuye con la profundidad, de modo que a los pocos metros de profundidad las aguas están completamente tranquilas.

El movimiento de las olas no se transmite prácticamente más allá de la profundidad que equivale a  $\frac{1}{2}$  de la longitud de la ola.

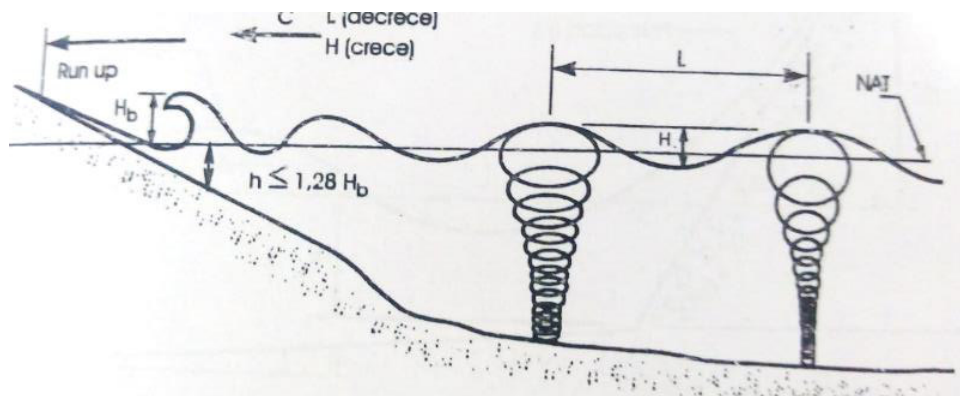


Figura 8.- Esquema de propagación de las Olas hacia la Costa.

Fuente: FUENTES O., C. (2001); "Ingeniería Portuaria"

En la Figura 8 podemos observar que la amplitud de las olas donde hay aguas profundas decrece rápidamente con la profundidad, pero la extensión de la ola permanece constante. Al propagarse las olas hacia aguas poco profundas su movimiento se ve afectado por el fondo del mar. A medida que disminuye la profundidad, la longitud de ola decrece y la altura se incrementa. Al mismo tiempo, el movimiento de las partículas de agua empieza a describir órbitas elípticas, cuya relación eje mayor/eje menor aumenta con la profundidad, pudiéndose observar en el fondo un movimiento orbital prácticamente horizontal.

A diferencia del viaje de "forma" de ola en aguas profundas o poco profundas, el rompimiento de las olas al acercarse a la costa origina un desplazamiento neto de una masa de agua debido a que la velocidad orbital en la superficie del mar ha excedido la velocidad en que se propaga la ola.

La máxima elevación vertical, medida con respecto al nivel de aguas en reposo, que puede ser alcanzada por una masa de agua que sube sobre el talud de una estructura se denomina "run up" o "subida de ola".

La determinación del run up es necesaria para calcular una adecuada elevación de la superficie de un rompeolas, si se quiere prevenir el sobrepaso de agua o para evaluar la magnitud de éste.

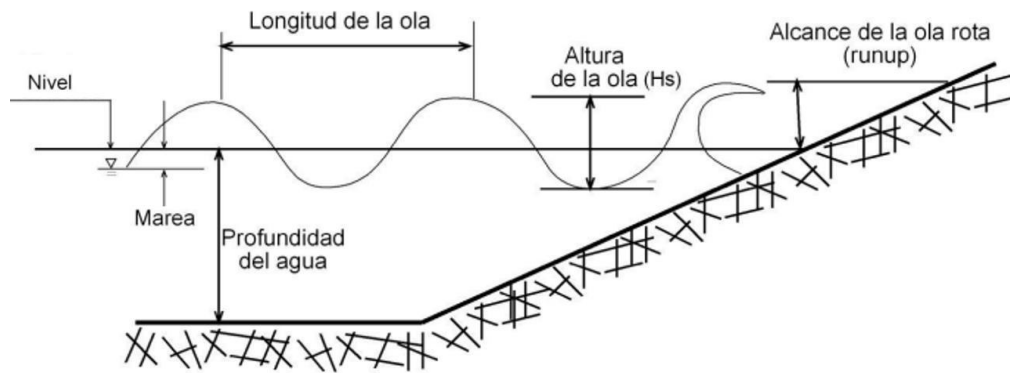


Figura 9.- Gráfica de definición del Run up.

Fuente: Cordo, O. (2020) – “Diseño de rip-rap para un terraplén”

### 2.3.1. Modelo STWAVE

El modelo STWAVE, (*Steady-state spectral WAVE model*) (Resio 1987, 1988a, 1988b; Davis 1992; Smith, Resio, and Zundel 1999), es un modelo espectral promediado en fase, de tipo permanente, que utiliza la técnica de las diferencias finitas para discretizar y resolver las ecuaciones matemáticas que caracterizan el fenómeno y que están basadas en la ecuación del balance de la operación del oleaje. Este modelo incluye además la identificación de las zonas de rompimiento de la ola.

El propósito general de la aplicación de cualquier modelo de propagación del oleaje desde aguas profundas hacia el área costera, es el de describir cuantitativamente los cambios producidos en los parámetros principales de la ola, como la altura, período, dirección y la forma del espectro, entre las condiciones de aguas profundas y la costa (aguas poco profundas).

En aguas profundas, el campo de oleaje es básicamente homogéneo en una escala de kilómetros, pero cerca de la costa, donde el campo de oleaje está fuertemente influenciado por las variaciones de batimetría, nivel del mar y corrientes, el oleaje puede variar significativamente en una escala de decenas de metros.

En particular, los procesos que el modelo STWAVE, simula son:

- Refracción y asomeramiento producido por el fondo.
- Rompimiento por fondo o por esbeltez de la ola.
- Difracción.



El modelo STWAVE, se sustenta bajo la premisa de que cada fase relativa del componente del espectro es aleatoria, y por ello, la información de la fase no es determinada (por esto se llama modelo de fase promedio).

Por otra parte, en términos generales el espectro de oleaje viene a ser una representación estadística del campo de oleaje, teniéndose conceptualmente que un espectro es una superposición lineal de olas monocromáticas, y describe la distribución de energía del oleaje como función de la frecuencia (espectro unidimensional), o como función de la frecuencia y dirección (espectro bidimensional).

La Figura 10 presenta un ejemplo de un espectro unidimensional, teniéndose que el período pico del espectro es el inverso de la frecuencia del pico del espectro, y la altura de la ola (significativa o la altura de ola de momento cero) resulta ser igual a cuatro veces la raíz cuadrada del área bajo el espectro.

Para aplicaciones prácticas, la información de la fase de la ola a través del dominio del modelo es raramente conocida con suficiente precisión como para servir como condición inicial de un modelo de fase conocida, pero esta información sólo se requiere para resolver variaciones de la altura de la ola cerca de estructuras costeras, con el fin de determinar en forma detallada, patrones de reflexión y difracción de la ola.

Es por ello, que para ese tipo de situaciones es necesario aplicar un modelo de fase.

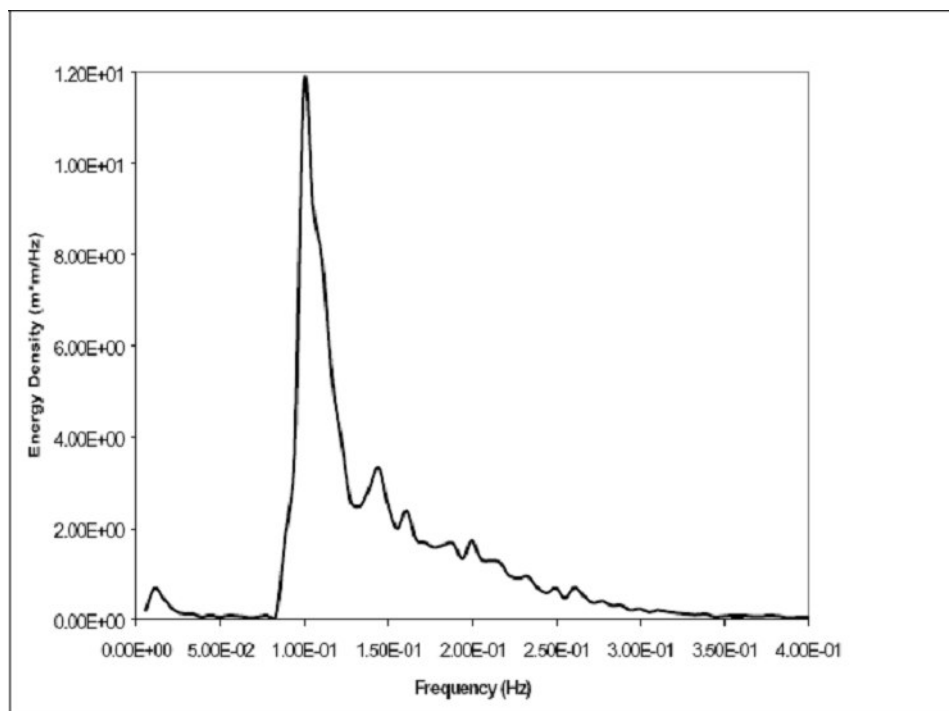


Figura 10. Ejemplo de espectro de oleaje unidimensional.

### 2.3.1.1. Premisas en las que se basa el modelo STWAVE

Las suposiciones en las que está basado el modelo STWAVE, son las siguientes:

La pendiente del fondo es suave y se puede despreciar la reflexión del fondo

Esto en la práctica significa que el modelo STWAVE es un modelo de medio plano, lo que implica que la energía de la ola puede propagarse sólo de aguas profundas hacia la costa ( $\pm 87.5^\circ$  desde el eje X de la malla que representa aproximadamente la dirección perpendicular a la costa), donde las olas reflejadas desde la costa, o las generadas por pendientes fuertes en el fondo, viajan en direcciones que se alejan de la costa hacia fuera del dominio y por ello son despreciadas. Por otra parte, aquellas olas reflejadas por estructuras que viajan en dirección X, también son despreciadas.

Las condiciones de aguas profundas del oleaje son espacialmente homogéneas

La variación del espectro del oleaje a lo largo del borde de aguas profundas del dominio es raramente conocida y para dominios del orden de decenas de kilómetros, la variación esperada debe ser baja. Por ello se impone que el espectro de entrada para el STWAVE, sea constante en todo el contorno.

#### Olas, corrientes y vientos de tipo permanente

El modelo STWAVE, está formulado como un modelo de tipo permanente. La formulación de tipo permanente disminuye el tiempo de cálculo y es conveniente para las condiciones del oleaje que cambian más lentamente que su tránsito por la malla.

Para generación de olas, la suposición de tipo permanente, significa que los vientos permanecen constantes el tiempo suficiente para alcanzar la condición limitada por un "Fetch" totalmente desarrollado. (las olas no están limitadas por tiempo).

#### Refracción y asomeramiento lineal

El modelo STWAVE, incorpora sólo refracción y asomeramiento lineal, razón por la cual no representa la asimetría de la ola.

#### Corrientes uniformes en la vertical

La interacción oleaje-corrientes en el modelo se basa en que las corrientes son verticalmente integradas. En medios fuertemente estratificados, su interacción con los procesos de refracción y asomeramiento, no están bien representados.

#### Esfuerzo radial lineal

El esfuerzo radial se calcula en base a la teoría lineal.

### **2.3.1.2. Ecuaciones caracterizadoras del fenómeno**

La interacción de las olas con las corrientes se considera dentro de un sistema de coordenadas movidas con las corrientes. Los parámetros de la ola dentro de este sistema de coordenadas se presentan con el subíndice "r", siendo relativo a la corriente, mientras que los parámetros son presentados en un sistema de referencia fijo y se escriben con el subíndice "a" de absoluto.

La dispersión de la ola se presenta en el sistema de referencia móvil:

$$\omega^2 = gk \tanh(kd)$$

Donde,

$\omega$  = frecuencia angular.

g= aceleración de gravedad.

k= número de la ola.

d= profundidad.

En el sistema absoluto, la ecuación de dispersión es:

$$\omega_a = \omega_r + kU \cos(\delta - \alpha)$$

Donde:

U= magnitud de la corriente.

$\delta$  = Dirección de la corriente relativa al eje X.

$\alpha$  = Dirección ortogonal a la cresta de la ola.

Por otra parte, las soluciones para refracción y asomeramiento (*Shoaling*), también requieren de la velocidad de la ola, C, y la velocidad de grupo,  $C_{gr}$ , en ambos sistemas de referencia. Para el sistema de referencia relativo a la velocidad se tiene que:

$$C_r = \frac{\omega_r}{k}$$

$$C_{gr} = 0.5C_r \left( 1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right)$$

Mientras que en el sistema absoluto de referencia se tiene que:

$$C_a = C_r + U \cos(\delta - \alpha)$$

$$(C_{ga})_i = (C_{gr})_i + (U)_i$$

donde el subíndice "i" denota el tensor para el componente x e y.

Dado que la dirección absoluta también es una dirección ortogonal de la ola, mientras que la celeridad del grupo absoluta precisa la dirección del rayo de onda, se tiene que la dirección del rayo se define según:

$$\mu = \tan^{-1} \left( \frac{C_{gr} \sin \alpha + U \sin \delta}{C_{gr} \cos \alpha + U \cos \delta} \right)$$

La distinción entre ortogonal a la ola (dirección perpendicular a la cresta de la ola) y el rayo de onda (dirección de propagación de la energía), es fundamental para describir la interacción ola-corrientes.

Sin corrientes, los rayos de onda y las ortogonales son las mismas, pero con corriente, la energía de la ola se mueve en todos los rayos, mientras que la dirección de la ola está definida por las ortogonales.

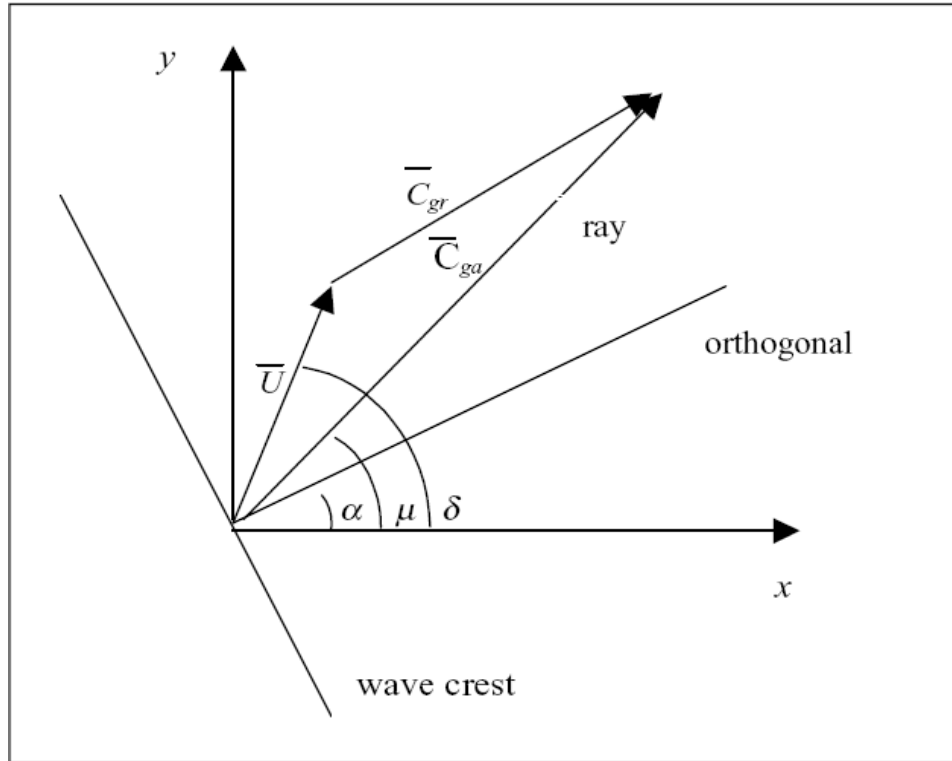


Figura 11. Esquema para la definición de los vectores de la ola y las corrientes.

Por otra parte, la dirección orthogonal a la ola, para estado permanente es dada por (Mei 1989; Jonson 1990):

$$C_{ga} \frac{D\alpha}{DR} = - \frac{C_r k}{\sinh 2kd} \frac{Dd}{Dn} - \frac{k_i}{k} \frac{DU_i}{Dn}$$

Donde:

$D$ = Derivada.

$R$ = Coordenada en la dirección del rayo.

$n$ = Coordenada normal a la orthogonal.

La ecuación representativa para condiciones de estado permanente de la conservación del espectro a lo largo del rayo es dada por Jonson (1990):

$$(C_{ga})_i \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{C_a C_{ga} \cos(\mu - \alpha) E(\omega_a, \alpha)}{\omega_r} = \sum \frac{S}{\omega_r}$$

Donde:

E= densidad de energía de la ola dividido.

S= Términos fuentes y sumideros de energía.

Con la finalidad de realizar la corrida del modelo, se consideraron los siguientes parámetros; dirección de procedencia del oleaje, batimetría, climas de olas para aguas profundas, adicionalmente el desarrollo de otros aspectos destacados a continuación.

#### **2.3.1.3. Refracción y asomeramiento (*Shoaling*)**

La refracción y el asomeramiento son implementados en el STWAVE por medio de la aplicación de la conservación de la acción del oleaje a lo largo de cada rayo de onda trazado hacia atrás. Dichos rayos son trazados en una forma tipo “Piecewise” o a trozos, de una columna de la malla a la siguiente, mientras que el espectro 2D se establece como condición de borde a lo largo de la primera columna de la malla (borde aguas profundas). Para el punto de la segunda columna, el espectro es calculado por el trazado hacia atrás de un rayo para cada componente de dirección y frecuencia del espectro, teniéndose únicamente en cuenta las direcciones de rayos propagándose hacia la costa. Por otra parte, la energía propagándose hacia aguas profundas también es descartada.

#### **2.3.1.4. Difracción**

La difracción será incluida en el STWAVE, de forma simple, mediante el suavizado de la energía de la ola. El modelo va a suavizar la energía en una frecuencia dada y banda direccional haciendo uso de la siguiente función:

$$E_j(\omega_a, \alpha) = 0.55E_j(\omega_a, \alpha) + 0.225[E_{j+1}(\omega_a, \alpha) + E_{j-1}(\omega_a, \alpha)]$$

Donde E, viene a ser la densidad energética en la frecuencia dada y una banda de dirección, mientras que el subíndice “j” muestra el estado de la línea de la malla (paralela a la costa). Esta ecuación suaviza los fuertes gradientes de la altura de ola que ocurren en las zonas de sombra, pero no considera el giro de la ola.

#### **2.3.1.5. Discretización Numérica**

El modelo STWAVE, es un modelo de diferencias finitas formulado en una malla cartesiana, tal como se muestra en la siguiente ilustración. Las celdas son cuadradas, de dimensiones  $\Delta x$  y  $\Delta y$ , pudiéndose obtener una resolución espacial

variable mediante el anidado de las mallas. Igualmente, el modelo permite realizar corridas en una malla gruesa y determinar los espectros resultantes en puntos cercanos a la costa, pudiendo los resultados de estos espectros, ser a su vez utilizados como condición de contorno para otra malla más densa.

STWAVE, funciona en un sistema local de coordenadas donde el eje X se orienta en la dirección perpendicularmente a la costa (con el origen aguas afuera) y el eje Y, orientado paralelo a la costa, formado un sistema de coordenadas cartesiano).

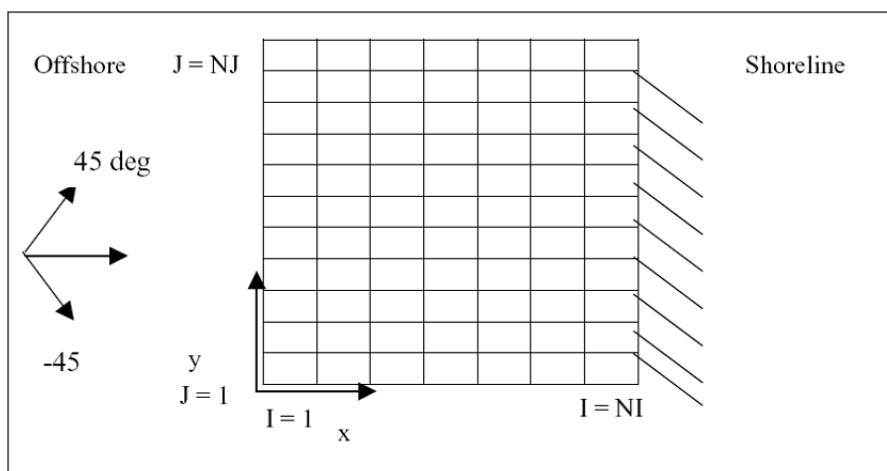


Figura 12. Malla esquemática del STWAVE.

La orientación del eje X, ( $\pm 87.5^\circ$ ) define el medio plano que está representado en el modelo. El eje Y, normalmente está alineado con las isóbatas, mientras que los ángulos de aproximación de las olas se definen con el sentido matemático, que se mide respecto del sentido de cada aguja del reloj a partir del eje X. Los bordes laterales del modelo pueden especificarse como tierra o agua, definiendo celdas con profundidad positiva (agua) o negativa (Tierra), y los bordes de tierra reducen el crecimiento de la ola cerca del borde por el bloqueo de la propagación desde las direcciones provenientes de tierra, mientras que, si los bordes se definen como de agua, se establece un tipo de contorno con gradiente cero para permitir que la energía se propague hacia fuera, o hacia adentro del dominio.

#### 2.4. Parámetros descriptivos de las olas

Para poder realizar el diseño de obras portuarias y la defensa de costas, será indispensable tener información acerca de las olas de mar.

Esta información sirve como base para: el cálculo de transporte de sedimentos que originan las olas, los diseños de rompeolas y espigones que protegen los puertos

frente al oleaje, los alineamientos y cálculos del porcentaje de uso de mulles, el cálculo del tiempo disponible que se usaran los equipos de dragado, entre otros.

Para realizar trabajos de manera analítica con la ola es necesario precisar ciertos parámetros descriptivos, la mayoría de los cuales ya han sido definidos anteriormente, como altura, periodo, longitud y velocidad de la ola. Además de estos parámetros básicos, debemos conocer los siguientes:

#### **Altura de ola media ( $H_m$ ) y periodo medio ( $T_m$ )**

La altura de ola media es el promedio aritmético de cada altura de ola dentro de un grupo o tren de olas consideradas.

$$H_m \equiv \bar{H} = \frac{1}{N} \sum H_i$$

El periodo medio es el promedio aritmético de cada periodo de ola dentro de una agrupación o tren de olas consideradas.

$$T_m \equiv \bar{T} = \frac{1}{N} \sum T_i$$

#### **Altura de ola significativa ( $H_s$ o $H_{1/3}$ ) y periodo significativo ( $T_s$ )**

Se le denomina ola significativa a aquella ola cuya altura resulta del tercio superior de las olas más altas de un grupo de olas.

La altura de ola significativa se obtiene de la siguiente manera:

$$H_s \equiv H_{1/3} = \frac{1}{N/3} \sum_1^{N/3} H_i$$

El periodo significativo es el promedio de los periodos correspondientes al tercio superior de las olas más altas de un grupo de olas.

$$T_s \equiv T_{1/3} = \frac{1}{N/3} \sum_1^{N/3} T_i$$

#### **Altura de la ola – Raíz media cuadrática ( $H_{rms}$ )**

Frecuentemente, para los cálculos de ingeniería en costas, se requiere trabajar con una altura de ola representativa de la energía del espectro de olas.



La energía por unidad de superficie de la ola está dada por:

$$E = \rho g \frac{H^2}{8}$$

Se observa que la energía es proporcional a  $H^2$ , por lo tanto, para un tren de  $N$  olas con diferentes alturas de ola  $H_i$ , la altura representativa de la energía es el promedio de la raíz de la altura al cuadrado, definido por:

$$H_{rms} = \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_i^2 \right)^{1/2}$$

### **Altura máxima de ola ( $H_{max}$ )**

Es la altura de la ola más grande dentro de un grupo de olas.

## **2.5. Modificación de las olas**

A medida que las olas se propagan de las aguas profundas hasta la costa, hacen cambios debido a las condiciones en el borde o el fondo del océano. Dichos cambios de forma de ola, son:

### **2.5.1. Asomeramiento ( $K_s$ )**

Al acercarse un tren de olas hacia la costa, habrá cambios en las alturas de las olas y en su longitud debido a la variación (disminución) de profundidad, este proceso es denominado como asomeramiento.

Para poder desarrollar la solución del fenómeno de asomeramiento, se debe plantear que los procesos son bidimensionales, además se considera que su periodo y energía se mantienen constantes en la dirección de propagación. Adicionalmente, al considerar una nueva variación en la profundidad se puede despreciar tanto el efecto de reflexión como de disipación energética por fricción en lo profundo.

Partimos de la ecuación de conservación de la energía para fondo suavemente variable y sin presencia de corrientes

$$\frac{\partial(E/\omega)}{\partial t} + \nabla \cdot \left( \frac{E}{\omega} \vec{C}_g \right) = 0$$

la cual se reduce a la siguiente expresión al evaluarlo en un movimiento unidireccional

$$\frac{d}{dx}(EC_g) = 0$$

desarrollando

$$EC_g = cte$$

si  $E = \frac{\rho g H^2}{8}$ , entonces

$$H^2 C_g = cte$$

Y por consiguiente se puede plantear la siguiente expresión

$$(H_2)^2 C_{g2} = (H_1)^2 C_{g1}$$

despejando  $H_2$ , para plantearlo como la variable a obtener,

$$H_2 = \sqrt{\frac{C_{g1}}{C_{g2}}} H_1$$

así entonces, lo que requerimos para poder calcular la altura de ola modificada por el asomeramiento es la relación entre celeridades de grupo de olas.

Este grado de modificación de ola se le denomina coeficiente de asomeramiento  $K_s$ .

Teniendo en cuenta lo siguiente:

$$C_{g_o} = \frac{gT}{4\pi}$$

$$C_g = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{2kh}{\text{Senh}(2kh)} \right] \left[ \frac{gT}{2\pi} \text{Tanh}(kh) \right]$$

$$\sqrt{\frac{C_{g_o}}{C_g}} = \sqrt{\frac{\frac{gT}{4\pi}}{\frac{gT}{4\pi} \left[ 1 + \frac{2kh}{\text{Senh}(2kh)} \right] \text{Tanh}(kh)}}$$

$$\sqrt{\frac{C_{g_o}}{C_g}} = \sqrt{\frac{\text{Cosh}(kh)}{\left[ \frac{\text{Senh}(2kh) + 2kh}{2\text{Senh}(kh)\text{Cosh}(kh)} \right] \text{Senh}(kh)}} = \sqrt{\frac{\text{Cosh}(kh)}{\left[ \frac{\text{Senh}(2kh) + 2kh}{2\text{Cosh}(kh)} \right]}}$$

este coeficiente para aguas profundas se expresa de la siguiente manera:

$$K_s = \frac{H}{H_o} = \sqrt{\frac{C_{g_o}}{C_g}} = \sqrt{\frac{2\text{Cosh}^2(kh)}{2kh + \text{Senh}(2kh)}}$$

Se muestra una dependencia del coeficiente de asomeramiento por el valor de  $kh$ , se muestra una gráfica de relación entre ambas variables en el cual podemos precisar que el valor mínimo de  $K_s$  es de 0.913 para  $kh$  igual a 1.2.

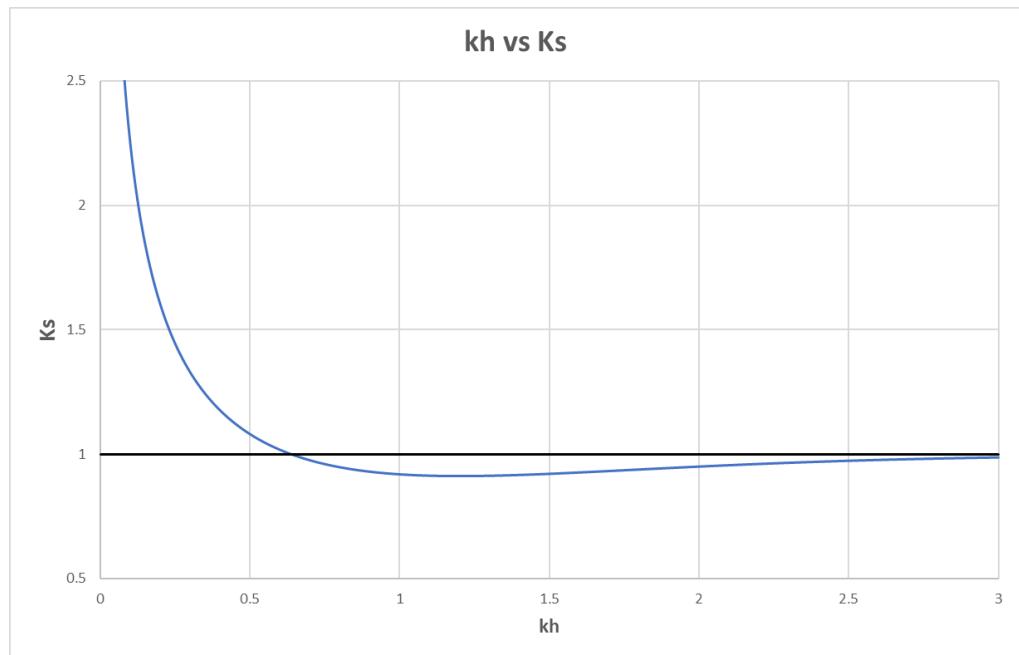


Figura 13.- Relación entre el coeficiente de asomeramiento y el producto del número de onda por la profundidad. Fuente: Elaboración propia.

### 2.5.2. Refracción (Kr)

Una de las modificaciones más importantes en la propagación del oleaje es la variación direccional del oleaje producido por variaciones en la batimetría (configuración del fondo marino), así como también estos cambios de dirección pueden ser producidos por presencia de corrientes en la zona de propagación. A este tipo de modificación de oleaje se le denomina refracción.

Cuando la refracción es producida por efecto del fondo, una porción del frente de ola varía su velocidad con respecto al resto y por consiguiente cambia la dirección de las ortogonales, siendo estas últimas líneas imaginarias perpendiculares a las crestas de las olas.

#### Refracción por efecto del fondo. Aproximación geométrica

Consideramos la propagación de un tren de ondas sobre un fondo suavemente variable,  $h(x,y)$ . Suavemente variable implica que la longitud de onda  $L$  es bastante

menor que la escala  $\Lambda$  sobre la que el fondo varía de forma considerable, es decir,  $L/\Lambda \ll 1$ .

El problema de contorno que gobierna el problema lineal de la propagación del tren de ondas sobre un fondo variable,  $h(x,y)$  está formado por la ecuación de Laplace junto a sus condiciones correspondientes del contorno en lo profundo y en la superficie libre.

La potencial solución de un problema del contorno,  $\Phi$  se puede expresar, así:

$$\Phi = \text{Re}\{\phi(x, y, z)e^{-i\omega t}\}$$

y a su vez

$$\phi(x, y, z) = A'(x, y, z)e^{iS'(x, y, z)}$$

Dónde: la amplitud  $A'$  y la fase  $S'$  son funciones reales.

Sustituyendo dicha expresión en los problemas de contorno y luego de varias operaciones (ver *Dingemans 1997*) se demuestra que:

$$(\nabla S)^2 = k^2(x, y)$$

$$\nabla(C C_g a^2 \nabla S) = 0$$

Irrotacionalidad del número de onda

Hay una aproximación distinta a la antes mencionada, basada en la irrotacionalidad del total de ondas. En la sección anterior, apreciamos que el vector número de onda podría expresarse como el gradiente de una función escalar, fase de la onda. Aplicando el operador rotacional a la ecuación  $k = \nabla S$  y porque el rotacional de gradiente es cero por definición, se concluye que:

$$\nabla \Lambda k = 0$$

Entonces, el vector número de onda es irrotacional. Reemplazando la componente de  $k$  en la anterior se llega a la siguiente expresión

$$\frac{\partial(k \text{Sen} \theta)}{\partial x} - \frac{\partial(k \text{Cos} \theta)}{\partial y} = 0$$

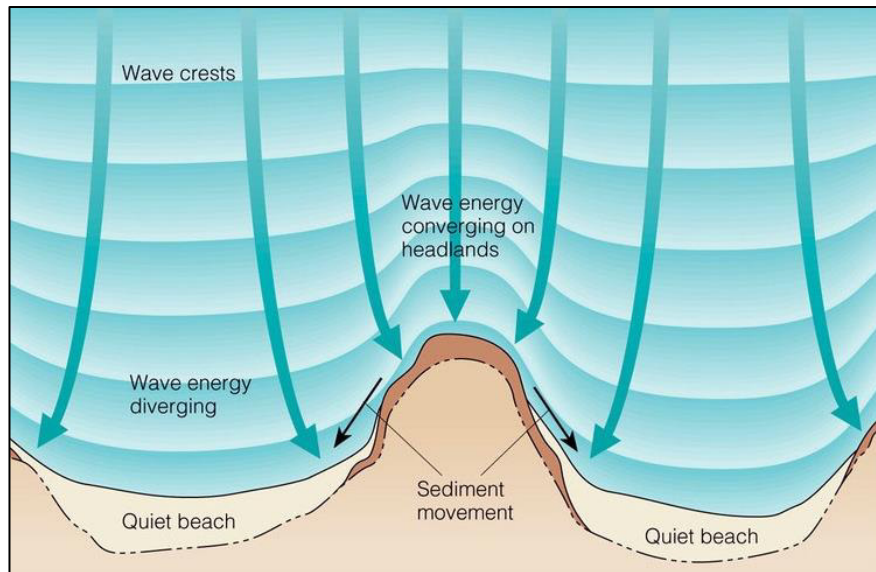


Figura 14.- Refracción de olas al acercarse a la costa. Fuente: Google

### Batimetría recta y paralela

En los casos donde la batimetría de costa presente veriles rectos y paralelos entre sí, se desprecian las variaciones en  $y$ , por consecuencia la expresión anterior quedaría de la siguiente manera:

$$\frac{\partial(k \text{Sen}\theta)}{\partial x} = 0$$

Por lo tanto

$$k \text{Sen}\theta = cte$$

$$\text{Si } C = \omega/k \rightarrow k = \omega/C$$

entonces

$$\frac{\text{Sen}\theta}{C} = cte$$

Para refracción de las aguas profundas hasta aguas no muy profundas, se plantea la siguiente ecuación que corresponde a la ley de Snell.

$$\frac{\text{Sen}\theta}{C} = \frac{\text{Sen}\theta_o}{C_o} \rightarrow \text{Sen}\theta = \frac{C}{C_o} \text{Sen}\theta_o$$

Podemos deducir que, al acercarse a la costa, la celeridad de ola disminuye debido a la reducción de profundidad y eso hace que el ángulo  $\theta$  disminuya y por tanto las ortogonales del tren de olas inciden lo más perpendicular posible sobre la línea costera.

Por conservación de energía, respecto a la onda estacionaria, donde no existe pérdida o ganancia de energía, además se reconoce que no existe flujo de energía a través de los rayos de ola y despreciando los efectos de la reflexión de ondas.

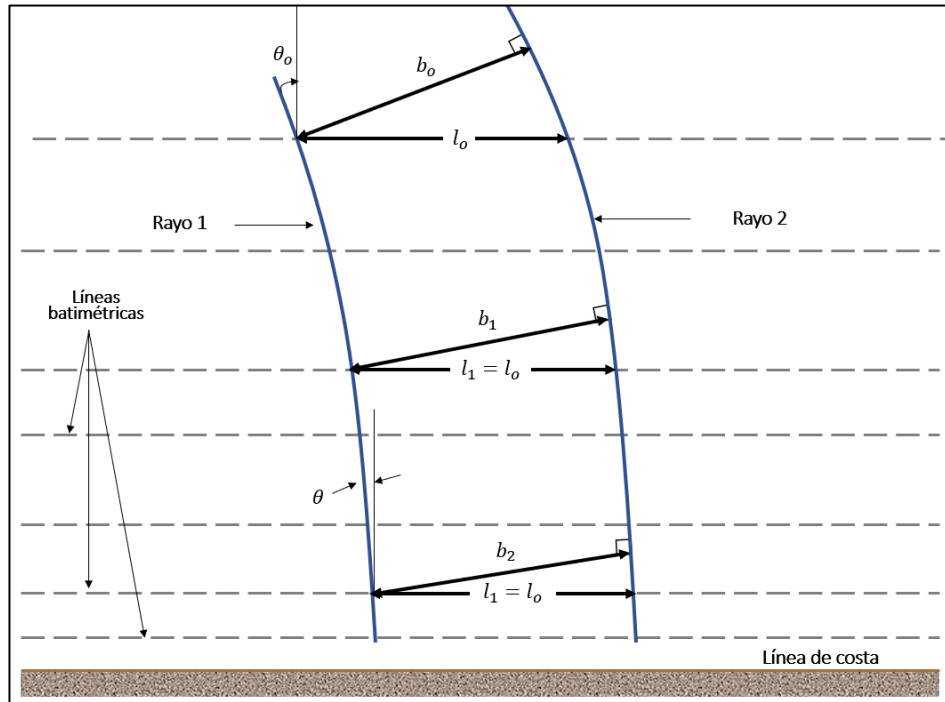


Figura 15.- Esquema de dos rayos incidentes y la refracción de onda.

Fuente: "Documento de referencia Vol 1: Dinámicas" – UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

$$\left(\frac{1}{8}\rho g H^2 n C\right)_o b_o = \left(\frac{1}{8}\rho g H^2 n C\right)_2 b_2 = cte$$

Tomando en cuenta que la sección inicial parte desde aguas profundas y llega a la última sección más cercana a la línea de costa en aguas poco profundas.

$$H_2 = H_o \sqrt{\frac{C_{g_o}}{C_{g_2}}} \sqrt{\frac{b_o}{b_2}} = H_o K_s K_r$$

Cuando se trata de batimetría recta con líneas de contorno paralelas, la separación es constante entre los rayos, para este caso el coeficiente de refracción se puede expresar de la siguiente manera.

$$K_r = \sqrt{\frac{b_o}{b_2}} = \sqrt{\frac{\cos\theta_o}{\cos\theta_2}} = \sqrt[4]{\frac{1 - \text{Sen}^2\theta_o}{1 - \text{Sen}^2\theta_2}}$$

Considerando que la modificación del oleaje se realiza desde aguas profundas hacia aguas poco profundas, y tomando en cuenta que

$$\frac{C}{C_o} = \frac{\frac{gT}{2\pi} \text{Tanh}(kh)}{\frac{gT}{2\pi}} = \text{Tanh}(kh)$$

Reemplazando obtenemos

$$\text{Sen}\theta = \text{Tanh}(kh)\text{Sen}\theta_o$$

Si:

$$K_r = \sqrt[4]{\frac{1 - \text{Sen}^2\theta_o}{1 - \text{Sen}^2\theta_2}} = \sqrt[4]{\frac{\text{Cos}^2\theta_o}{1 - \text{Tanh}^2(kh)\text{Sen}^2\theta_o}}$$

Mientras que el coeficiente de asomeramiento, para aguas poco profundas se cumple

$$K_s = \sqrt{\frac{C_{g_o}}{C_g}} = \left(\frac{16\pi^2 h}{gT^2}\right)^{-1/4}$$

La relación entre alturas de ola,

$$\frac{H}{H_o} = \left[ \left(\frac{16\pi^2 h}{gT^2}\right) \left(\frac{1 - \text{Tanh}^2(kh)\text{Sen}^2\theta_o}{\text{Cos}^2\theta_o}\right) \right]^{-1/4}$$

“Dado que  $K_r$  depende de  $h/(gT^2)$  y de  $\theta_o$  y de que  $K_s$  depende de  $h/(gT^2)$ , es posible representar el producto  $K_r K_s$  en función de ambos parámetros para batimetría recta y paralela.”

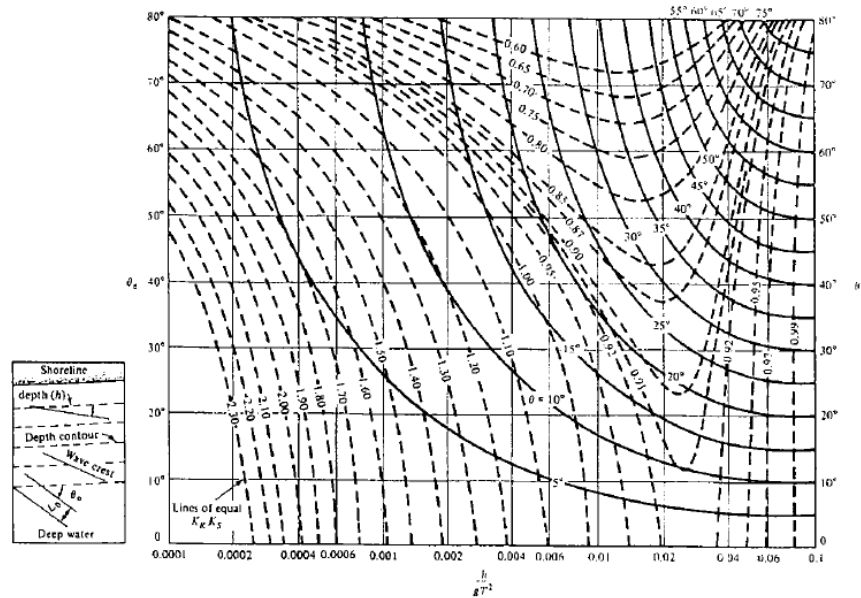


Figura 16.- Grafico de valores  $KrKs$  vs ángulos de dirección.

Fuente: "Wave in shallow water" – Jean-Michel Lefevre M.

### 2.5.3. Difracción (Kd)

El fenómeno de la difracción está caracterizado por la transferencia lateral de energía en toda la longitud de la cresta de la onda, por lo que cuando la amplitud presenta discontinuidades o grandes cambios, la energía se transfiere en una dirección perpendicular a la dirección principal de propagación. Esto sucede cuando la onda encuentra una estructura o efectos de refracción significativos que hacen que la amplitud de la onda sea singular. La mejor manera de entender la difracción es pensar en un tren de ondas que normalmente inciden en una presa semi-infinita impermeable. Sin la transferencia lateral de energía (sin flujo entre las líneas ortogonales), la zona de sotavento del rompeolas permanecería en calma. No obstante, lo suficientemente lejos de la cabecera del rompeolas, la ola incidente se propagará sin modificarse en absoluto. Esto dará como resultado una discontinuidad en la altura de la ola desde la altura de la ola incidente hasta cero o sotavento del rompeolas en la línea que separa las dos áreas que pasa por la punta del rompeolas. Esto hace que la energía se transfiera lateralmente a la región de la sombra, suavizando la discontinuidad.

La difracción es especialmente importante en el diseño portuario, estudios de propagación de olas, especialmente cuando están presentes regiones de gran concentración energética.



Cuando el avance de la ola se ve bloqueado por obstáculos tales como rompeolas, islas y malecones, se manifiesta como un fenómeno de ola típico en el que la energía se transfiere lateralmente a lo largo de la cresta de la ola.

Esta transferencia energética hace que las olas se propaguen dentro del área protegida, que está delimitada por líneas de sombra geométricas y rompeolas.

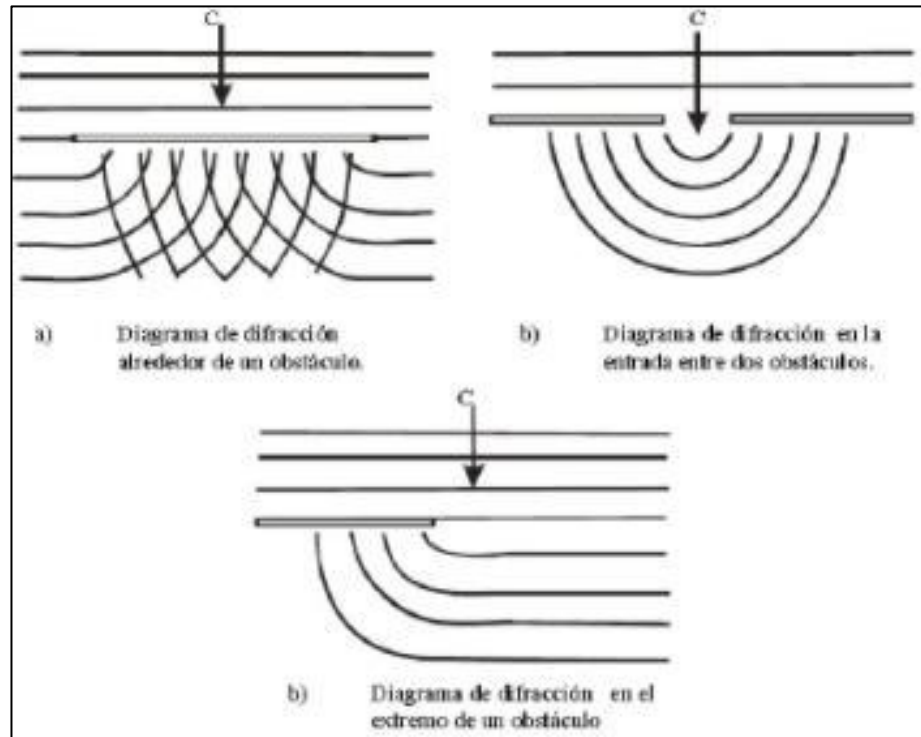


Figura 17.- Diagramas de difracción de las olas.

Fuente: FUENTES O., C. (2001); "Ingeniería Portuaria"

En la Figura 17, se observa que en el área de sombra, las líneas de las crestas de las olas están centradas en el borde o cabezo del rompeolas y que serán circulares si en esta zona la profundidad de agua es constante, de tal manera que no se produzca la refracción de las olas. La línea que pasa por el extremo del cabezo, y en donde empieza el giro de las crestas, se denomina también "línea de sombra".



*Figura 18.- Difracción en una dársena.*

*Fuente: "El fenómeno de las mareas, efectos en el territorio y su gestión" Ing. Manuel García Román. Universidad de La Laguna.*

#### Hipótesis para el desarrollo de la teoría de difracción de las olas

- Las suposiciones que se hacen generalmente para el desarrollo de las teorías de difracción son:
- El agua es un fluido ideal; esto es, no viscoso e incompresible.
- Las olas son de pequeña amplitud, pudiendo ser descritas por la Teoría de la Ola Lineal.
- EL flujo es irrotacional conforme a una función potencial que satisface la Ecuación de Laplace
- La profundidad alrededor del rompeolas es constante.
- El ancho del rompeolas es despreciable con respecto a la longitud de la ola, para considerar que en la zona de sombra la ola difractada está en fase con la ola reflejada, de tal manera que sus amplitudes se puedan sumar.

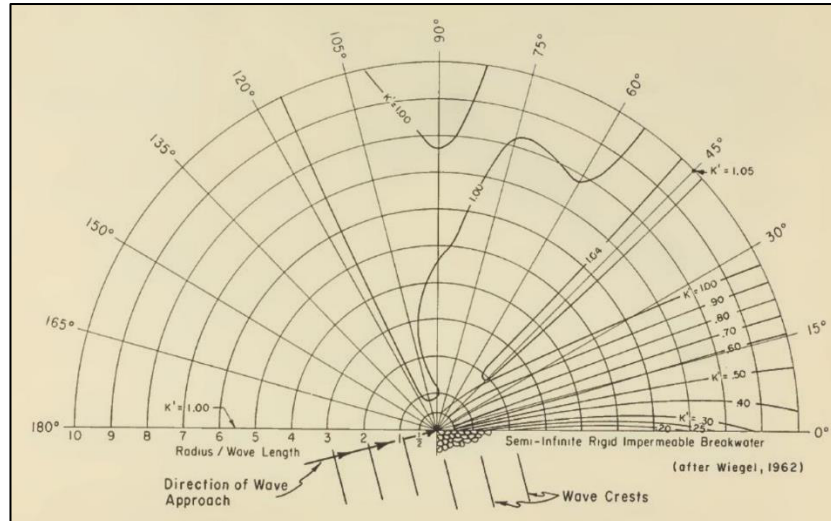


Figura 19.- Diagrama de difracción de ola. Fuente: Wiegel - SPM

## CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA

### 3.1. Procedimiento general de la investigación

Para caracterizar el oleaje que se hace presente en el frente costero de San Andrés se ha realizado el siguiente procedimiento:

- Ubicación de uno o más nodos con datos de olas de aguas profundas que se encuentren lo más próximos a la zona del DPA.
- Análisis del oleaje de aguas profundas, con el fin de establecer los oleajes más influyentes y extremos a ser considerados en la propagación de olas.
- Propagar el oleaje de aguas profundas a aguas someras.
- Validar los resultados de olas procedentes de la propagación del oleaje.
- Caracterizar el oleaje en olas someras.

### 3.2. Datos utilizados

Para desarrollar esta investigación se hizo uso de una base de datos de diversas fuentes de información, las cuales se describen conforme al desarrollo del presente ítem.

#### 3.2.1. Batimetría

Uno de los parámetros que son fundamentales para realizar la propagación de la ola de aguas profundas a aguas someras es la forma del fondo marino, comúnmente denominado como “batimetría”, la cual en este caso fue obtenida de

cartas náuticas digitales, fuentes globales (GEBCO 2021) y el levantamiento batimétrico realizado para el estudio hidro oceanográfico del DPA de San Andrés.

En este estudio se ha identificado que la zona tiene una pendiente suave, donde se puede apreciar que la curva batimétrica de 10 m (referidos al NMBSO) está a más de 1 km de la línea de costa.



Figura 20.- Sondajes en el área cercana al DPA San Andrés. Fuente: Navionics.

### 3.2.2. Olas en aguas profundas

Los datos asociados al clima de oleaje y vientos en el área del pacífico oriental situada en “aguas profundas” que se utilizaron para hacer la propagación del oleaje partiendo de las “aguas profundas” al sitio de emplazamiento del terminal marino, fue descargada de la base de datos de la NOAA <https://polar.ncep.noaa.gov/waves/hindcasts/> (datos entre 1979 y 2010) y [https://pae-paha.pacioos.hawaii.edu/thredds/dodsC/ww3\\_global/WaveWatch\\_III\\_Global\\_Wave\\_Model\\_best.ncd.html](https://pae-paha.pacioos.hawaii.edu/thredds/dodsC/ww3_global/WaveWatch_III_Global_Wave_Model_best.ncd.html) (datos entre 2010 y actualidad menos 3 meses).

Esta base de datos utiliza un modelo de predicción del oleaje de 3<sup>era</sup> generación denominado WaveWatch III, realizado por la Administración Nacional Atmosférica y Oceánica (NOAA) de EUA, siendo un modelo espectral de olas oceánicas que dispone de capacidades de predicción de “Swells” de larga distancia asociados a los métodos numéricos y algoritmos que utiliza para desarrollar la propagación.

Es un modelo ampliamente utilizado y de alta confiabilidad dado que en su calibración se utilizan datos de altímetros satelitales con varios años de registros para todo el océano pacífico.

Para este estudio se ha considerado UN solo nodo, el cual fue ubicado considerando los oleajes más recurrentes en el litoral peruano (sur, sur-suroeste, suroeste y oeste-suroeste), a su vez esta ubicación fue definida de acuerdo a la ubicación del DPA de San Andrés. El nodo con los datos olas en aguas profundas, ahora denominado como nodo NOAA se ubica en las coordenadas Latitud  $-14^{\circ}$  S y Longitud  $-77^{\circ}$  O.

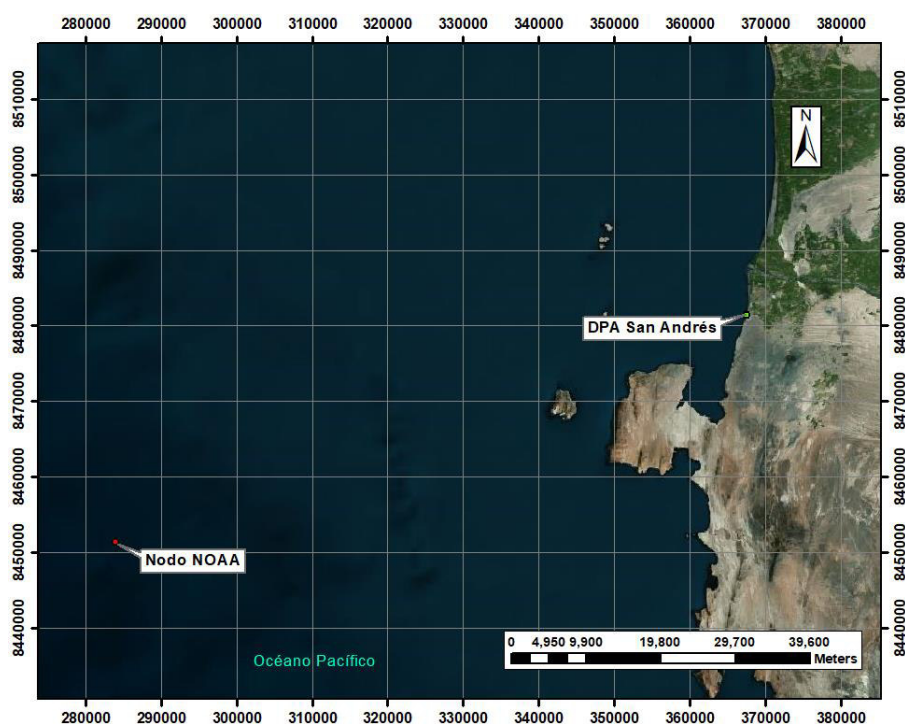


Figura 21.- Ubicación relativa del nodo NOAA respecto al DPA San Andrés.

### 3.2.3. Propagación de olas

### 3.2.4. Oleaje en aguas poco profundas

Con el fin de verificar la propagación del oleaje a partir de las aguas profundas y llegando a aguas someras se requiere de información medida in situ, la cual permita calibrar el método de propagación de olas definido anteriormente.

En este caso se ha recurrido a los datos registrados por el equipo Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) del estudio presentado a FONDEPES para el DPA de San Andrés.

#### Ubicación del equipo de medición

La ubicación del ADCP se encuentra frente al Desembarcadero Pesquero Artesanal de San Andrés a una profundidad aproximada de 10 m.

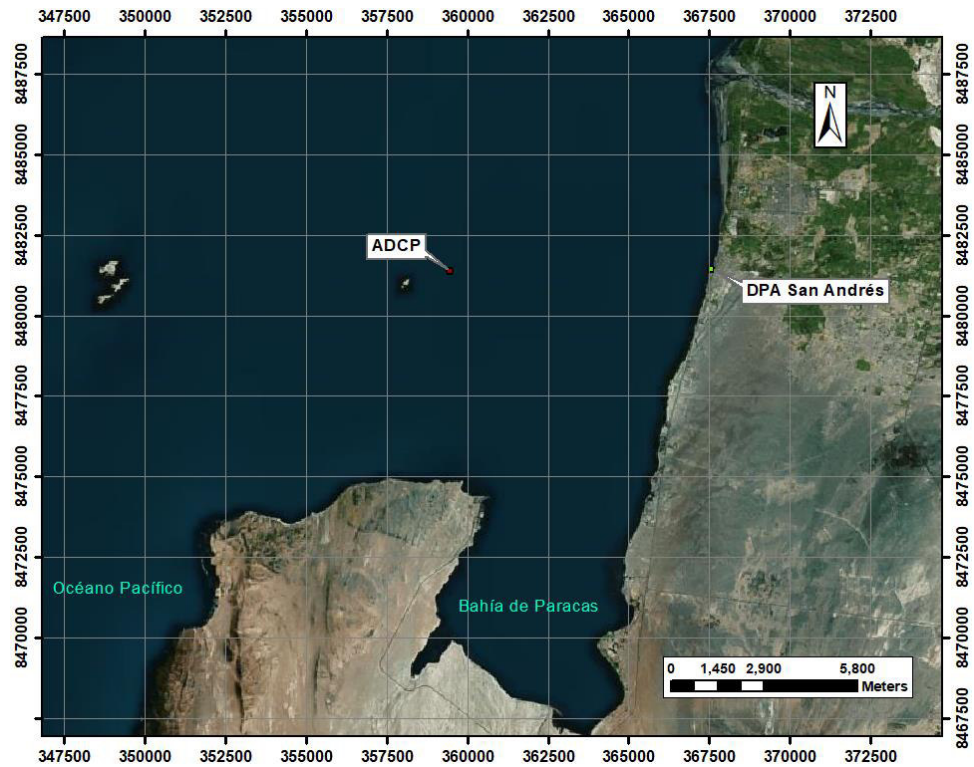


Figura 22.- Ubicación del equipo ADCP.

### **Configuración y descripción del equipo ADCP**

Un ADCP es un dispositivo de medición acústica que aprovecha el efecto Doppler (el cambio observado en la frecuencia de cualquier onda debido al movimiento relativo entre la fuente de sonido y el observador) para medir la velocidad actual. Transmitiendo pulsos sonoros de frecuencia fija y oyendo los ecos que retornan de cada partícula en suspensión (sedimento y plancton).

Por su parte, el ADCP utilizado en el proyecto es de la marca SyQuest y modelo FLOWQUEST 600 el cual tiene un alcance de hasta 100 m, un máximo de 4 m de ancho de celda y un blank distance de 0.7, entre otros parámetros del equipo que permitieron adquirir datos en el punto de despliegue.



Figura 23.- ADCP-Flowquest 600.

Fuente: Estudio Hidro-Oceanográfico del DPA San Andrés.

No obstante, este equipo utilizado para el estudio presentado a FONDEPES fue configurado a fin de mediería la información de olas con una frecuencia de intervalos de muestreo cada una hora de las siguientes características de las olas (altura máxima, significativa, periodo medio y pico, dirección medio y pico), entre otras características. Adicionalmente el equipo permitió la recopilación de información de olas generadas localmente “Sea” y olas de agua profundas “Swell”.

### 3.3. Propagación de olas

En este estudio se consideró realizar la propagación de olas desde aguas profundas hacia aguas someras mediante el modelo matemático de propagación de olas STWAVE del Surface Water Modeling System del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos.

El propósito de la aplicación del modelo de propagación del oleaje de aguas profundas hacia la zona de costa o frente costero es el de determinar cuantitativamente los cambios en los principales parámetros de las olas, como son: altura, período, dirección y la forma del espectro, entre las olas registradas en aguas profundas y el cambio que estas experimentan al llegar a la costa.

STWAVE es un modelo espectral de diferencias finitas, de estado estacionario, en base a la ecuación del equilibrio de acción de ondas. STWAVE es desarrollado por la Estación Experimental de Vías Acuáticas del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EE. UU. (USACE-WES).

STWAVE simula la refracción de ondas inducida de acuerdo a la profundidad, la refracción y asomeramiento inducido por la corriente, la ruptura de las ondas inducida por la profundidad, la difracción, el crecimiento de las olas debido a la

entrada de viento, la interacción onda-onda y el “whitecapping” fenómeno que redistribuye y disipa la energía en la cresta de la ola.

El modelo STWAVE calcula la transformación de onda cerca de la costa (nearshore) incluyendo la refracción y asomeramiento, así como, la generación de ondas de viento. STWAVE tiene dos métodos disponibles; medio plano (half – plane) y plano completo (full – plane).

El modo half – plane permite que la energía se propague solo desde el mar hacia la costa, todas las ondas que viajan en dirección  $x$ , como son los reflejados desde la línea costera, las características del fondo, estructuras, así como aquellas generadas por los vientos en aguas profundas, no son considerados en este modo. Por otro lado, el full – plane permite una generación y transformación de la ola alrededor de 360 grados.

El modo half – plane no pretende ser un reemplazo para la versión del full – plane, pero algo importante destacar de este modo, es que los requisitos de memoria son considerablemente más bajos, se ejecuta más rápido y en líneas generales es apropiado para su aplicación en zonas costeras con la excepción de bahías y lagos semi cerrados, ya que no existe una dirección obvia en el mar, en su defecto se ha considerado aplicar la versión de full – plane.

Por otra parte, es importante destacar que la metodología aplicada en el presente estudio estuvo basada en propagar una ola unitaria con casos de diferentes direcciones y periodos picos del oleaje.

La propagación del oleaje mediante “ola unitaria” es un método que permite optimizar los tiempos de propagación de olas y posterior reconstrucción de datos de olas en aguas someras. En esencia este procedimiento consiste en que, durante la configuración del modelo numérico, específicamente en el espectro de olas, se coloca como  $H_s = 1$ , donde en realidad este dato representa la multiplicación de los coeficientes de refracción, asomeramiento y difracción “krkskd”, los cuales en aguas profundas son iguales a la unidad ya que estos no se encuentran afectados por los diversos aspectos de pérdida de energía, por lo que se debe de cumplir con las siguientes premisas:



- El nodo considerado debe de ser evidentemente de aguas profundas, es decir, donde se cumpla que la profundidad ( $h$ ) sea superior a la mitad de la longitud de onda ( $L_0/2$ ).
- El nodo no se encuentre a sotavento de una isla o estructura de protección cercana, ya que este nodo tendría una altura de olas reducida por el efecto refracción, asomeramiento y/o difracción.

Posteriormente, luego de verificar las condiciones para la mencionada metodología y ejecutado el modelo numérico, se debe de entender que los resultados son el producto de los coeficientes mencionados anteriormente “krkskd”, por lo que se deberá de multiplicar mencionado valor por su correspondiente en aguas profundas según el criterio indicado en el ítem 3.4.3 del presente documento.

### **3.4. Metodología de análisis de resultados**

#### **3.4.1. Análisis de datos de olas en aguas profundas**

Se realizaron los siguientes gráficos y tablas a fin de caracterizar el oleaje en aguas profundas (nodo NOAA):

- Presentación de series de tiempo asociados a altura significativa de la ola, periodo pico del oleaje, periodo medio del oleaje y dirección de procedencia del oleaje, entre otras.
- Estadística descriptiva del oleaje, donde se toma en cuenta valores tales como máximos, mínimo, desviación estándar entre otros parámetros estadísticos.
- Rosas de oleaje: la cual viene siendo la representación gráfica y direccional de la frecuencia para que ocurra el oleaje en función de la dirección característica (pico), que para el caso de este estudio se consideró la dirección media del oleaje.
- Distribuciones conjuntas de la altura significativa ( $H_s$ ) y período pico ( $T_p$ ) del oleaje.
- Gráfico asociado al porcentaje de excedencia de la altura significativa del oleaje.
- Tabla de ocurrencia (%) clasificada según dirección de procedencia de mayor ocurrencia y rangos de alturas significativas con una estimación del periodo de pico mínimo, máximo y promedio.

- Análisis extremal del oleaje, el cual permite establecer los oleajes que se asocian a diversos periodos de retorno y los que son utilizados en las etapas de diseño de diversas obras costeras.

### **3.4.2. Extracción de resultados**

En este estudio se realizó la propagación de olas con el modelo SMS y modulo STWAVE el cual permite extraer los siguientes resultados:

- Para la altura significativa del oleaje tomando en cuenta la metodología considerada en la propagación de olas, se hace la extracción del producto de los coeficientes de refracción, asomeramiento y difracción (krkskd).
- En el caso de la dirección se debe de indicar que el modelo da como resultado la malla con los resultados la dirección de las olas, sin embargo, en este resultado se debe de tener en cuenta cual es la inclinación de la malla en donde se esté extrayendo el resultado.

### **3.4.3. Análisis de datos de olas en aguas poco profundas**

Previamente a establecer las metodologías para el análisis de resultados debo de indicar que se han generado las series de tiempo (Hs, Tp, Dp) con base a los siguientes criterios y/o aspectos considerados:

- El periodo pico del oleaje es igual en aguas profundas que en aguas someras.
- Mediante una hoja de cálculo se hace la identificación del periodo y la dirección del oleaje en aguas profundas, mediante dicha información se identifica en la hoja de cálculo el krkskd que le corresponde al dato que se esté evaluando. Posteriormente con el coeficiente ya definido se procedió a multiplicar mencionado factor por la altura de olas en aguas profundas, con el fin de obtener la altura en aguas someras.
- Respecto a la dirección del oleaje se aplica el mismo aspecto indicado en el párrafo anterior, donde sabiendo la dirección y el periodo en aguas profundas se procede a ubicar en la hoja de cálculo cual es el resultado de la dirección obtenida por el modelo y extraída manualmente.

Posteriormente teniendo la altura de olas en aguas someras, periodo pico (igual que el de aguas profundas) y la dirección de la ola, se procedió a realizar los

siguientes gráficos y tablas con el fin de caracterizar el oleaje en el área de estudio, específicamente en el punto de medición donde fue ubicado el equipo ADCP.

- Presentación de series de tiempo asociados a altura significativa de la ola, periodo pico del oleaje, periodo medio del oleaje y dirección de procedencia del oleaje, entre otras.
- Estadística descriptiva del oleaje, donde se toma en cuenta valores tales como máximos, mínimo, desviación estándar entre otros parámetros estadísticos.
- Rosas de oleaje: la cual viene siendo la representación gráfica y direccional de la frecuencia de ocurrencia del oleaje en función de una dirección característica (pico), que para el caso de este estudio se consideró la dirección media del oleaje.
- Distribuciones conjuntas de la altura significativa ( $H_s$ ) y período pico ( $T_p$ ) del oleaje.
- Gráfico asociado al porcentaje de excedencia de la altura significativa del oleaje.
- Tabla de ocurrencia (%) clasificada según dirección de procedencia de mayor ocurrencia y rangos de alturas significativas con una estimación del periodo de pico mínimo, máximo y promedio.

#### **3.4.4. Validación del modelo**

Con el fin de garantizar la salida del modelo se comparó los resultados obtenidos con la información registrada por el ADCP (gráfico de porcentaje de excedencia vs altura significativa, series de tiempo, correlación directa de  $H_s$ ).

##### Proceso de calibración

En el caso que no se lleguen a resultados eficaces, se modificaran los parámetros incluidos en la interfaz del modelo utilizado (STWAVE):

- Coeficiente de rugosidad de Manning.
- Dimensión de las celdas de cálculo.
- Isobatas de GEBCO (en el caso de que los resultados sean incoherentes).

## CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 4.1. Clima de olas en aguas profundas

#### 4.1.1. Oleaje del nodo NOAA

Se realizó el análisis del oleaje conforme a todos los datos adquiridos en el nodo NOAA comprendidos entre los años 1979 y 2021.

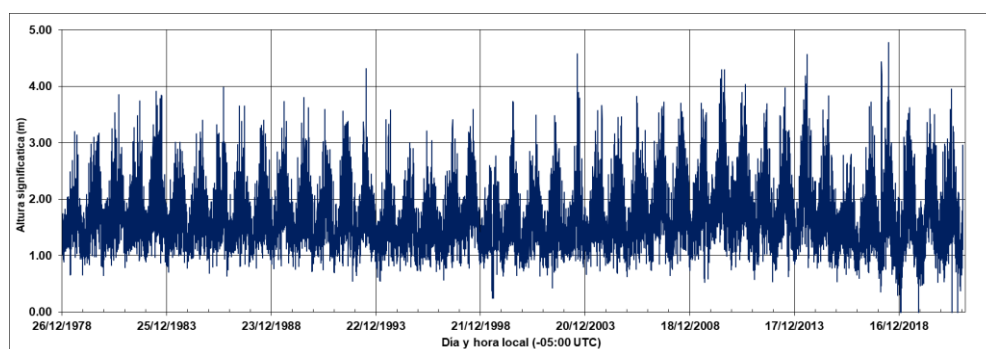


Figura 24. Serie de tiempo de la altura significativa del oleaje en el nodo NOAA (1979 – 2021).

Las estadísticas generales del oleaje en aguas profundas indican el promedio de la altura significativa de 2.42 m, con un valor puntual máximo de 4.71 m y con mínimo registrado de 0.03 m. En lo que respecta a la dirección, se tiene en promedio una dirección de procedencia de 204.41° (sur-suroeste), y un período pico promedio de 13.61 s con un máximo de 23.62 s.

Tabla 1.- Estadísticas generales del nodo NOAA.

	H <sub>s</sub> (m)	T <sub>p</sub> (s)	Dirección (°)
<b>Media</b>	2.42	13.61	204.41
<b>Error típico</b>	0.00	0.01	0.07
<b>Mediana</b>	2.33	13.92	210.37
<b>Desviación estándar</b>	0.62	2.50	25.32
<b>Varianza</b>	0.38	6.27	640.89
<b>Curtosis</b>	0.65	0.52	6.60
<b>Coficiente de asimetría</b>	0.65	-0.59	-1.41
<b>Rango</b>	5.68	22.36	359.87
<b>Mínimo</b>	0.03	1.27	0.09
<b>Máximo</b>	5.71	23.62	359.96

En lo que respecta al análisis direccional presentado a través de la rosa de oleaje, se evidencia que para todos los registros el oleaje en aguas profundas proviene de los rangos direccionales; sur-sureste (5.4%), sur (5.7%), sur-suroeste (46.9%),

suroeste (36.4%), es decir, el 94,42 % del tiempo en promedio el oleaje tiene una dirección de procedencia del sur y oeste a lo largo de los 42 años de registro. (ver Figura 25).

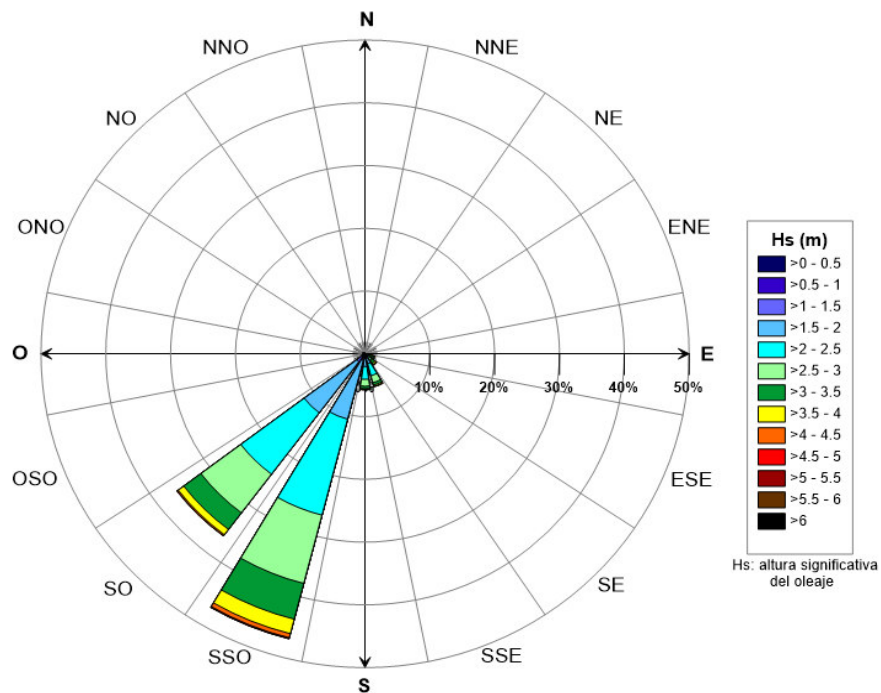


Figura 25.- Rosa del oleaje del nodo NOAA.

Por otra parte, al analizar la distribución conjunta de la altura de ola significativa ( $H_s$ ) y cada periodo pico ( $T_p$ ) se evidencia casi todos los oleajes son de periodos largos que se generan en el océano pacifico sur.

En resumen, se puede establecer que el nodo NOAA considerado para el análisis no representa la zona que genera las olas, esto debido a que el 97.22% de los datos tienen un período comprendido entre los 8 y 24 segundos (ver Figura 26). Dejando así un 2.78% para los oleajes que son generados en la zona del nodo indicado.

No obstante, cabe precisar que esta investigación contempla es realizar el análisis del oleaje en aguas profundas y someras, mas no el de establecer la zona de generación de los oleajes que pueden ser propagados hasta el frente costero de San Andrés.

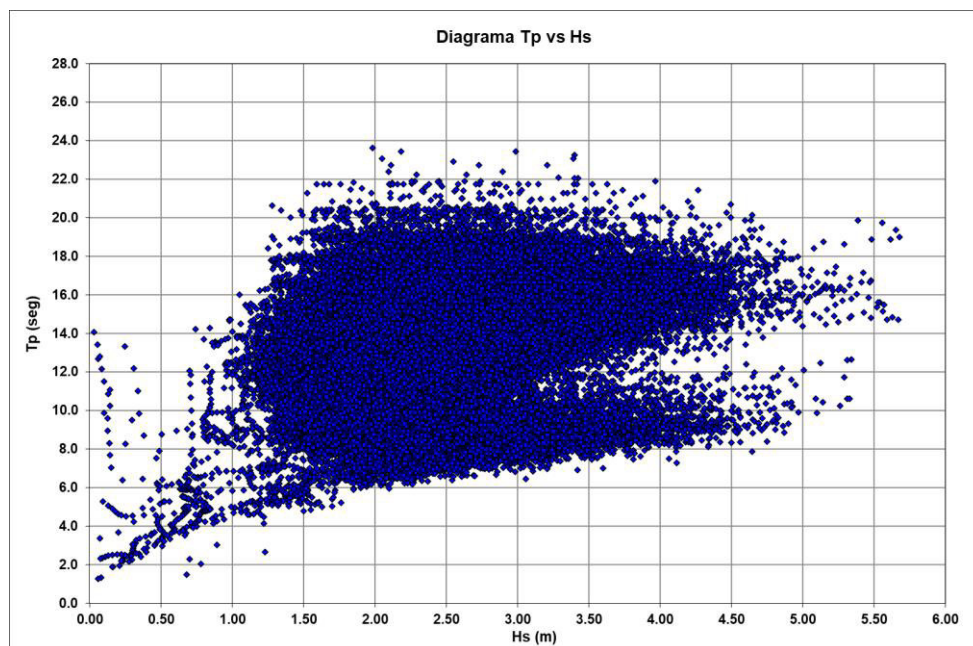


Figura 26.- Altura significativa vs periodo pico del oleaje.

En lo que respecta a la frecuencia de las direcciones del oleaje se observa que su procedencia está influenciada por los oleajes de diversos periodos, pero en donde se puede precisar que el (94.4%) del oleaje es procedente del sur-sureste, sur, sur-suroeste y suroeste, los que responden a olas de periodo largo y corresponden a periodos superiores a los 8 segundos (ver Tabla 2).

Tabla 2.- Frecuencia relativa del oleaje.

Tp (s)		SSE	S	SSO	SO
0.0	2.0	0.00			0.00
2.0	4.0	0.01	0.013		0.02
4.0	6.0	0.03	0.012	0.007	0.07
6.0	8.0	0.62	0.046	0.014	0.70
8.0	10.0	3.57	1.589	0.337	5.61
10.0	12.0	1.15	2.513	4.249	9.06
12.0	14.0	0.05	0.855	18.253	29.96
14.0	16.0	0.01	0.407	17.799	34.52
16.0	18.0	0.00	0.245	5.481	12.43
18.0	20.0		0.035	0.660	1.71
20.0	22.0		0.004	0.067	0.29
22.0	24.0			0.002	0.01
<b>Total (%)</b>		5.4	5.7	46.9	36.4

Conforme al análisis de excedencia del oleaje de la altura significativa de las olas, se observa que el oleaje con altura significativa igual a 3.0 m tiene un porcentaje de excedencia de (18%) tal como se muestra en la Figura 27.

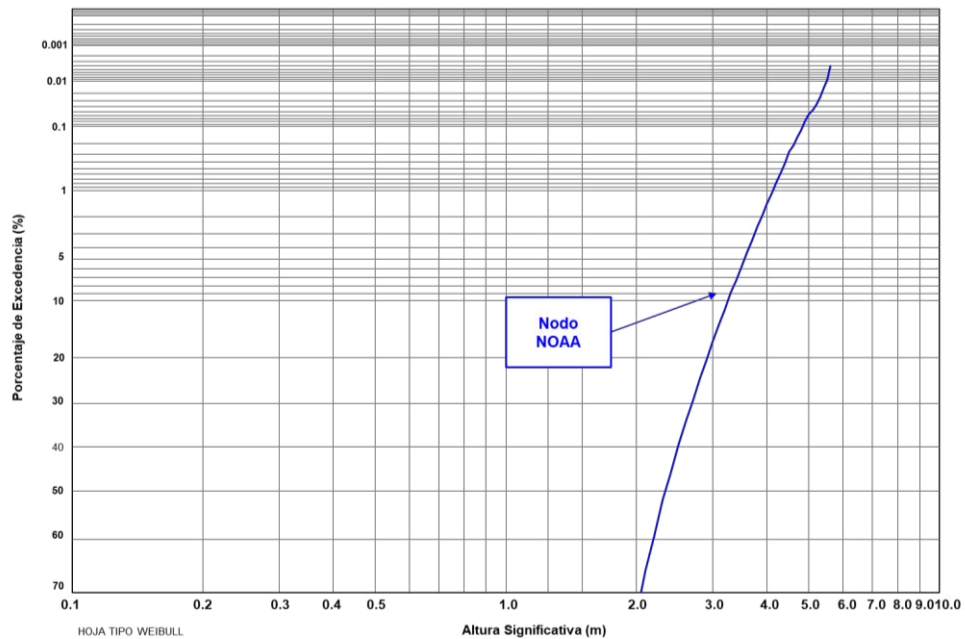


Figura 27.- Porcentaje de excedencia de la altura significativa del oleaje.

Por otra parte, para así realizar un análisis de extremos se han evaluado los oleajes con mayor ocurrencia los que son representados por las direcciones sur-sureste, sur, sur-suroeste y suroeste, ya que los registros comprendidos en estos sectores corresponden con un 94.4% de los datos totales.

Al analizar la ocurrencia del oleaje para la dirección sur-sureste (SSE), el cual corresponde con el 5.4 % del total, podemos establecer que el oleaje de mayor ocurrencia es el que está comprendido entre 1.5 y 3.0 metros de altura significativa (4.56%), donde el periodo pico máximo registrados por dichos oleajes es de 16.58 segundos, con valor mínimo de 5.04 segundos (ver Tabla 3).

Tabla 3.- Tabla de ocurrencia para oleaje de procedencia sur-sureste.

Hs (m)		(%)	T <sub>p</sub> (s)		
			Min	Med	Máx
0.0	0.5	0.01	1.95	6.68	12.15
0.5	1.0	0.04	3.24	5.58	11.86
1.0	1.5	0.14	5.15	8.73	10.59
1.5	2.0	1.45	5.04	9.09	14.18
2.0	2.5	1.99	6.42	9.2	16.58
2.5	3.0	1.13	6.91	9.44	14.28
3.0	3.5	0.40	7.27	9.38	12.82
3.5	4.0	0.20	8.01	9.81	16.95
4.0	4.5	0.06	8.55	10.28	16.04
4.5	5.0	0.02	9.53	10.71	12.39

En lo que respecta a la dirección sur (S), corresponde con el 5.7 %, donde podemos afirmar que el oleaje de mayor ocurrencia ocurrió es comprendido entre 1.5 y 3.0 metros de altura significativa (4.87%), donde el periodo pico máximo registrados por dichos oleajes es 20.55 segundos, y con valor mínimo de 4.85 segundos (ver Tabla 4).

Tabla 4.- Tabla de ocurrencia para oleaje de procedencia sur.

Hs (m)		(%)	T <sub>p</sub> (s)		
			Min	Med	Máx
0.0	0.5	0.022	2.30	5.72	13.43
0.5	1.0	0.022	3.46	7.26	12.37
1.0	1.5	0.244	5.28	9.38	16.73
1.5	2.0	1.734	4.85	10.33	19.48
2.0	2.5	2.060	7.65	11.27	20.55
2.5	3.0	1.081	8.05	12.29	20.41
3.0	3.5	0.377	8.33	13.11	19.12
3.5	4.0	0.136	8.61	13.68	19.87
4.0	4.5	0.038	9.41	13.90	18.69
4.5	5.0	0.003	11.60	12.80	15.98



La dirección sur-suroeste (SSO), corresponde con el 46.9 %, donde podemos afirmar que el oleaje de mayor ocurrencia ocurrió es comprendido entre 1.0 y 4.0 metros de altura significativa (45.97%), donde el periodo pico máximo registrados por dichos oleajes es 22.73 segundos, y con valor mínimo de 4.79 segundos (ver Tabla 5).

Tabla 5.- Tabla de ocurrencia para oleaje de procedencia sur-suroeste.

Hs (m)		(%)	T <sub>p</sub> (s)		
			Min	Med	Máx
0.0	0.5	0.002	12.69	13.38	14.07
0.5	1.0	0.055	8.27	10.21	14.71
1.0	1.5	1.018	5.17	12.20	18.87
1.5	2.0	9.659	4.79	13.95	21.46
2.0	2.5	15.796	8.13	13.83	22.73
2.5	3.0	11.233	7.76	14.52	22.39
3.0	3.5	5.885	8.89	15.09	22.73
3.5	4.0	2.377	9.5	15.58	21.90
4.0	4.5	0.675	10.35	16.01	21.43
4.5	5.0	0.124	13.40	16.33	20.14

Por último, la dirección suroeste (SO) corresponde con el 36.4 %, donde podemos testificar que el oleaje de mayor ocurrencia ocurrió es comprendido entre 1.5 y 3.5 metros de altura significativa (33.48%), donde el periodo pico máximo registrados por dichos oleajes es 23.62 segundos, y con valor mínimo de 5.21 segundos (ver Tabla 6).

Tabla 6.- Tabla de ocurrencia para oleaje de procedencia suroeste.

Hs (m)		(%)	T <sub>p</sub> (s)		
			Min	Med	Máx
0.0	0.5	-	-	-	-
0.5	1.0	0.021	6.55	11.86	14.71
1.0	1.5	1.565	5.34	12.96	20.62
1.5	2.0	10.181	5.21	14.01	23.62
2.0	2.5	12.260	8.27	14.72	23.44
2.5	3.0	7.721	8.11	15.37	23.44
3.0	3.5	3.320	9.37	15.82	23.25
3.5	4.0	1.052	8.97	10.25	21.74
4.0	4.5	0.213	8.87	16.63	20.55
4.5	5.0	0.036	15.15	17.13	19.86

#### 4.1.2. Análisis extremal del oleaje en el nodo NOAA

En el presente trabajo de investigación se consideró la siguiente metodología para el análisis del oleaje extremo que ocurre en aguas profundas, donde se emplearon los denominados regímenes extrémos o extremos, que generalmente son representados a través de gráficas que relacionan la altura significativa del oleaje con el periodo de retorno.

Tomando en cuenta que este estudio tiene 41 años de datos, se ha empleado el método de los máximos anuales el cual consiste en obtener los máximos registros correspondientes a la altura significativa del oleaje para cada año, y dichos valores aplicarles una función de distribución matemática. Siendo en el caso del presente estudio donde se utilizó como distribución matemática la denominada distribución tipo I o distribución Gumbel (utilizados en estudios hidro-oceanográficos, clima marítimos y asociados), para así tener oleajes asociados a distintos periodos de retorno (2,5,10,25,50 y 100 años).

Para definir los oleajes que serán evaluados en el análisis de extremos debemos de recordar lo indicado en los párrafos anteriores, donde se estableció que el oleaje en aguas profundas esta principalmente sectorizado de acuerdo a las siguientes direcciones; sur-sureste (SSE), sur (S), sur-suroeste (SSO) y suroeste (SO).

A continuación, se muestran los siguientes gráficos permiten evaluar el oleaje extremal en aguas profundas; valores máximos anuales de altura significativa, los valores de periodo pico y direcciones medias asociados a los registros máximos sectorizados de acuerdo a las direcciones de procedencia, y en conjunto de las cuatro direcciones.

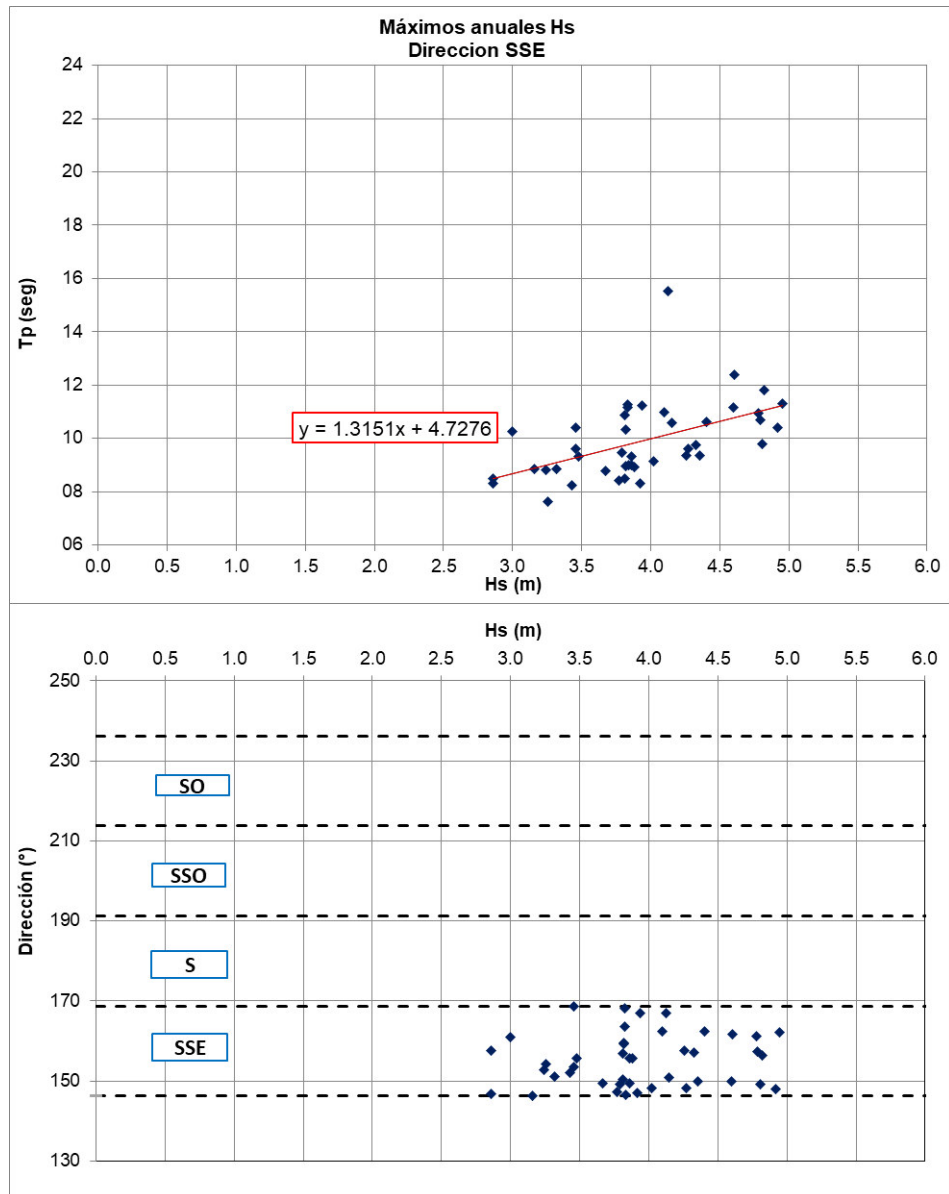


Figura 28.- Máximos anuales asociados a sus periodos y direcciones. Dirección Sur-Sureste.

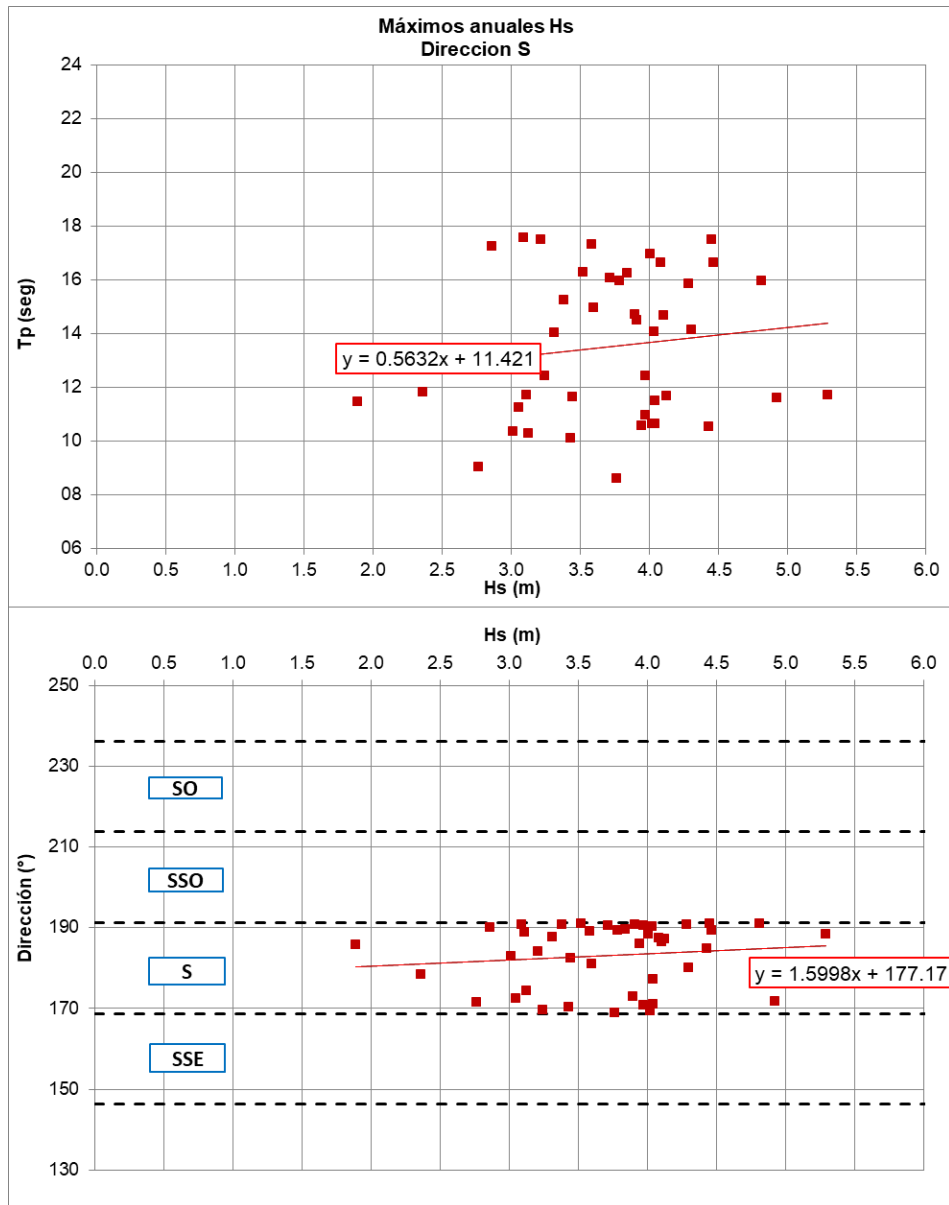


Figura 29- Máximos anuales asociados a sus periodos y direcciones. Dirección Sur.

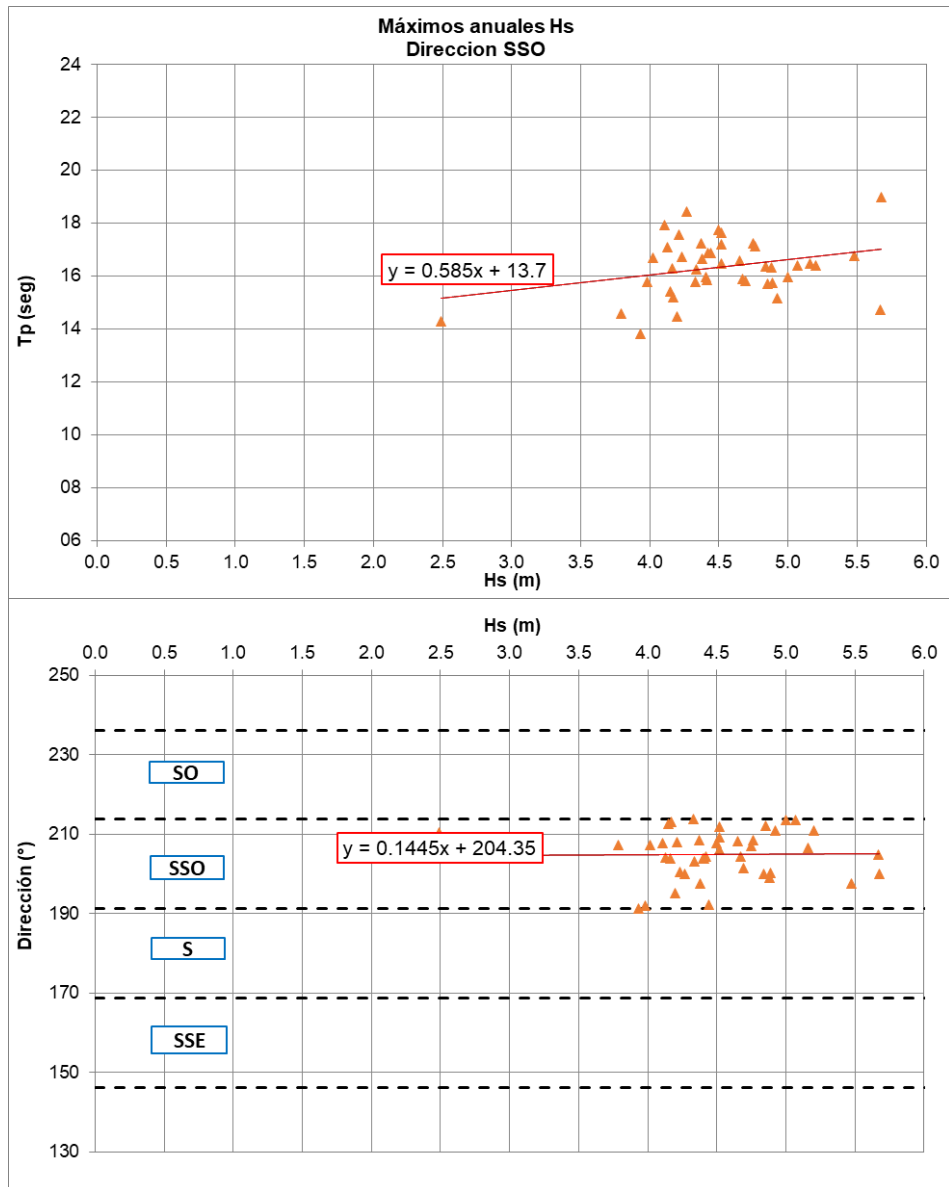


Figura 30. Máximos anuales asociados a sus periodos y direcciones. Dirección Sur-Suroeste.

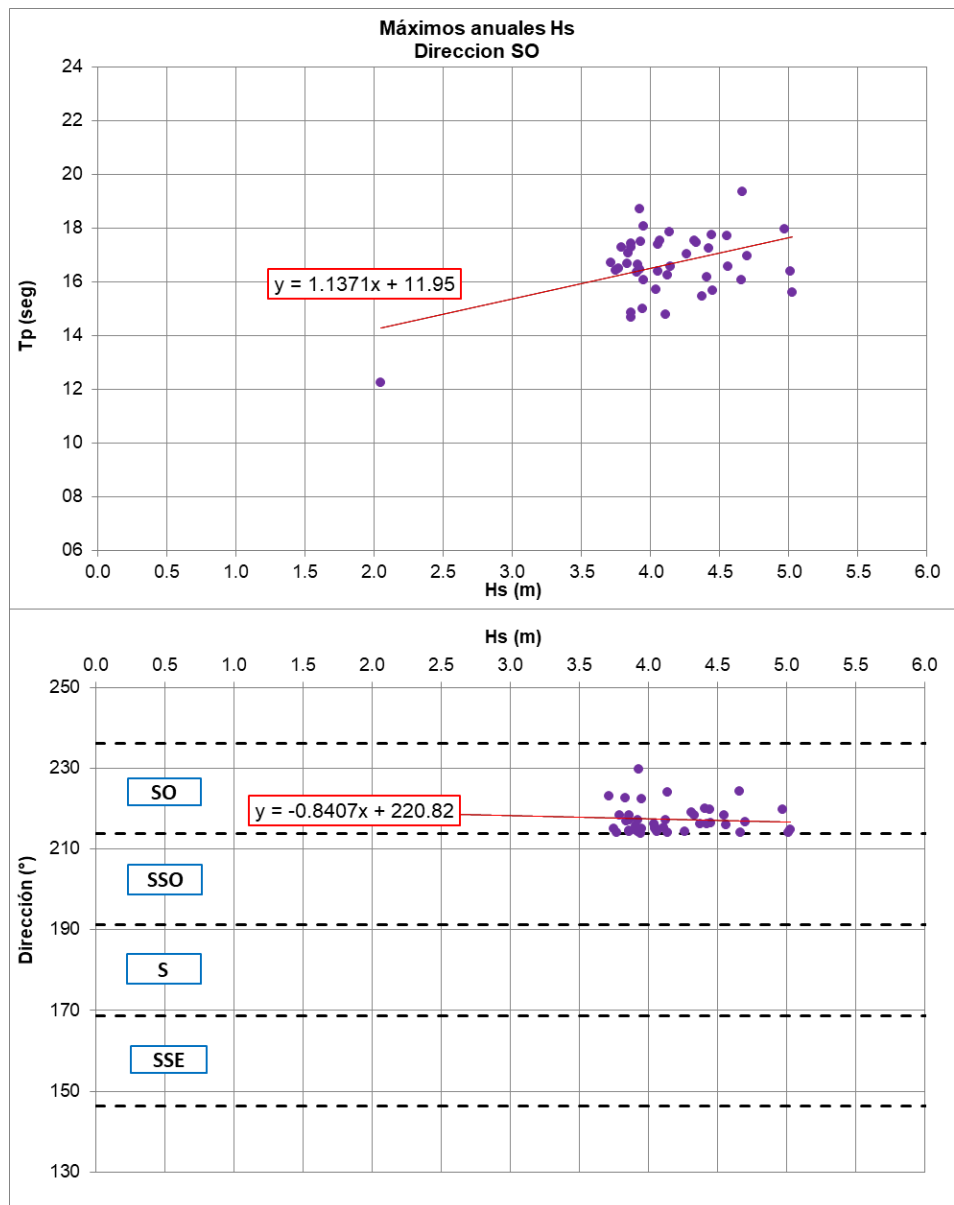


Figura 31.- Máximos anuales asociados a sus periodos y direcciones. Dirección Suroeste.

A continuación, se presenta un gráfico que permiten comparar los máximos anuales de las diferentes direcciones de procedencia.

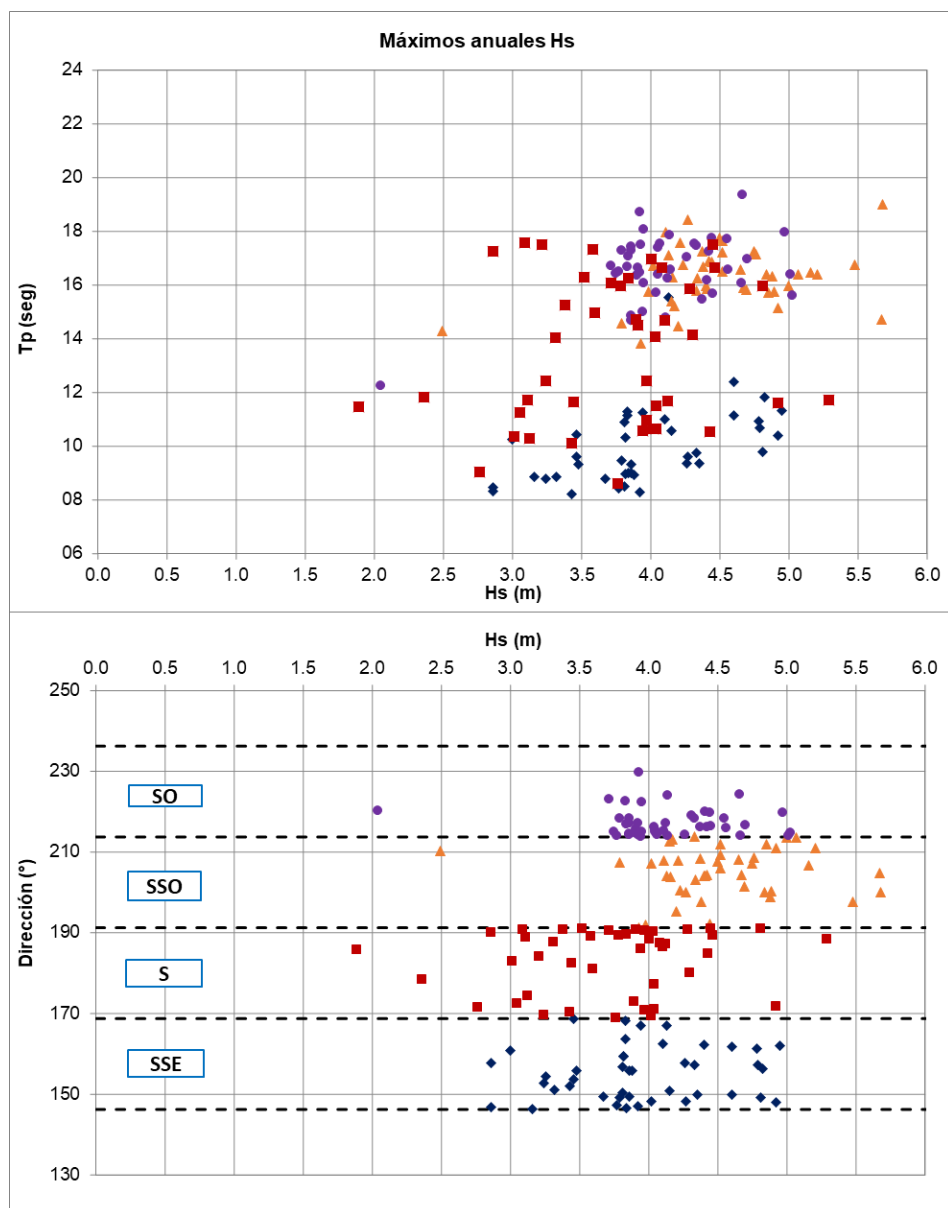


Figura 32- Máximos anuales asociados a sus periodos y direcciones.

Nomenclatura:

*Oleajes máximos anuales procedentes del suroeste (SO): círculos morados*

*Oleajes máximos anuales procedentes del sur-suroeste (SSO): triángulos naranjas*

*Oleajes máximos anuales procedentes del sur (S): cuadrados rojos*

*Oleajes máximos anuales procedentes del sur-sureste (SSE): rombos azules*

Los valores máximos fueron ajustados a la función de distribución de Gumbel Gumbel (utilizado en estudios hidro-oceanográficos, clima marítimos y asociados) para hacer el análisis extremal y representado en papel probabilístico de Gumbel, se presentan a continuación (ver Figura 33). En resumen, el siguiente gráfico nos permite establecer el oleaje asociado a un periodo de retorno (2 a 100 años) y de acuerdo a una dirección considerada.

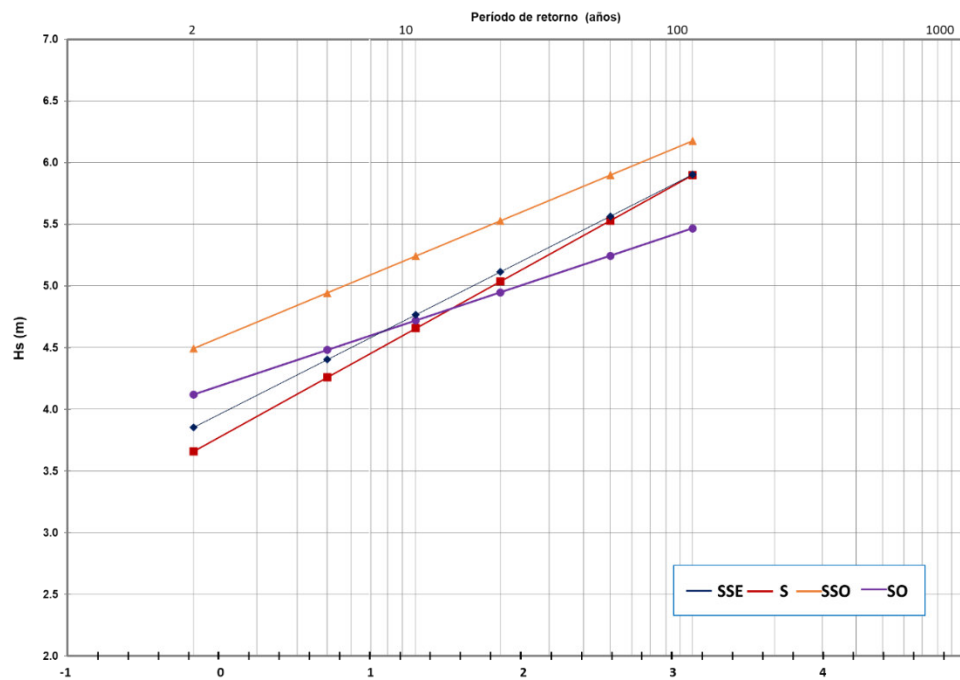


Figura 33. Distribución Gumbel para la Hs en aguas profundas.

En la Tabla 7 se muestran los valores de altura significativa del oleaje (en metros) que se asocian a diversos periodos de retorno para las cinco direcciones de procedencia que fueron analizadas junto a su periodo pico asociado (en segundos). Dicho periodo pico fue obtenido por medio de las ecuaciones de correlación anteriormente presentadas en los gráficos de altura significativas vs el periodo pico.



Tabla 7.- Valores de Hs asociados a diversos periodos de retorno.

Tr	SSE		S		SSO		SO	
	H <sub>s</sub>	T <sub>p</sub>	H <sub>s</sub>	T <sub>p</sub>	H <sub>s</sub>	T <sub>p</sub>	H <sub>s</sub>	T <sub>p</sub>
2	3.86	9.80	3.78	13.48	3.57	16.33	2.50	16.63
5	4.40	10.52	4.19	13.82	3.99	16.59	2.77	17.05
10	4.77	11.00	4.46	14.04	4.27	16.77	2.96	17.32
25	5.11	11.45	4.72	14.26	4.53	16.93	3.13	17.58
50	5.57	12.05	5.06	14.54	4.87	17.15	3.36	17.91
100	5.90	12.49	5.31	14.74	5.13	17.31	3.53	18.17

#### 4.2. Propagación de olas

A continuación, se presentan algunos mapas de los resultados de la propagación del oleaje con el modelo STWAVE ejecutado para el trabajo, donde se representa el producto de los coeficientes “krkskd” que permiten afectar los oleajes procedentes de aguas profundas, tal como se indicó en la metodología del presente informe.

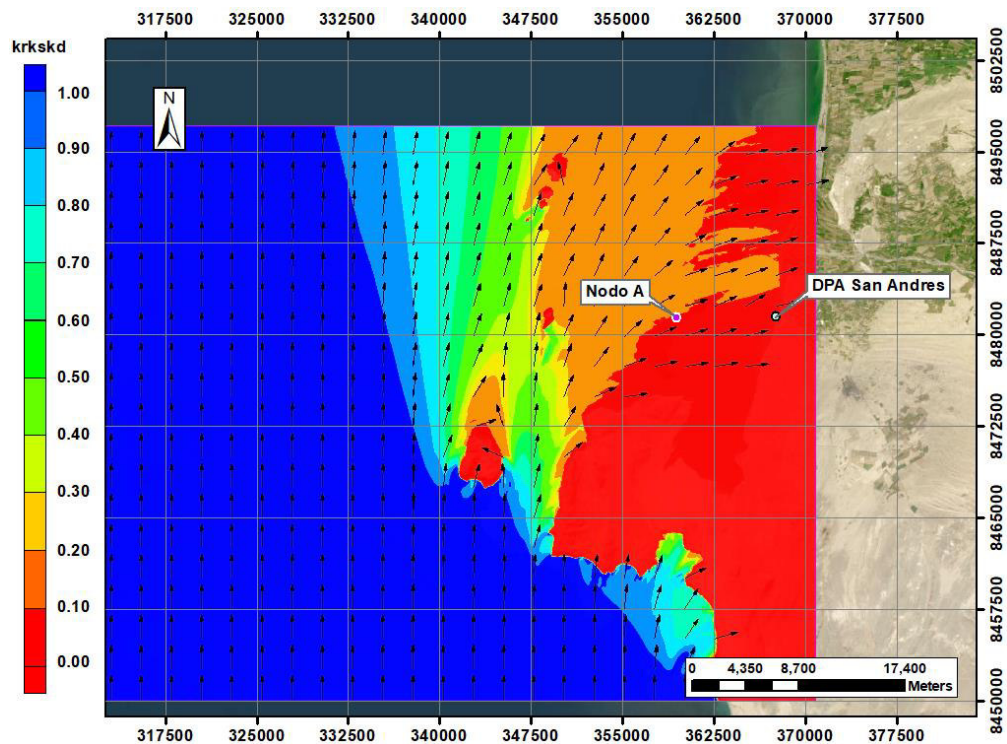


Figura 34.- Propagación del oleaje con el modelo STWAVE. (Dirección Sur y periodo de 14 segundos).

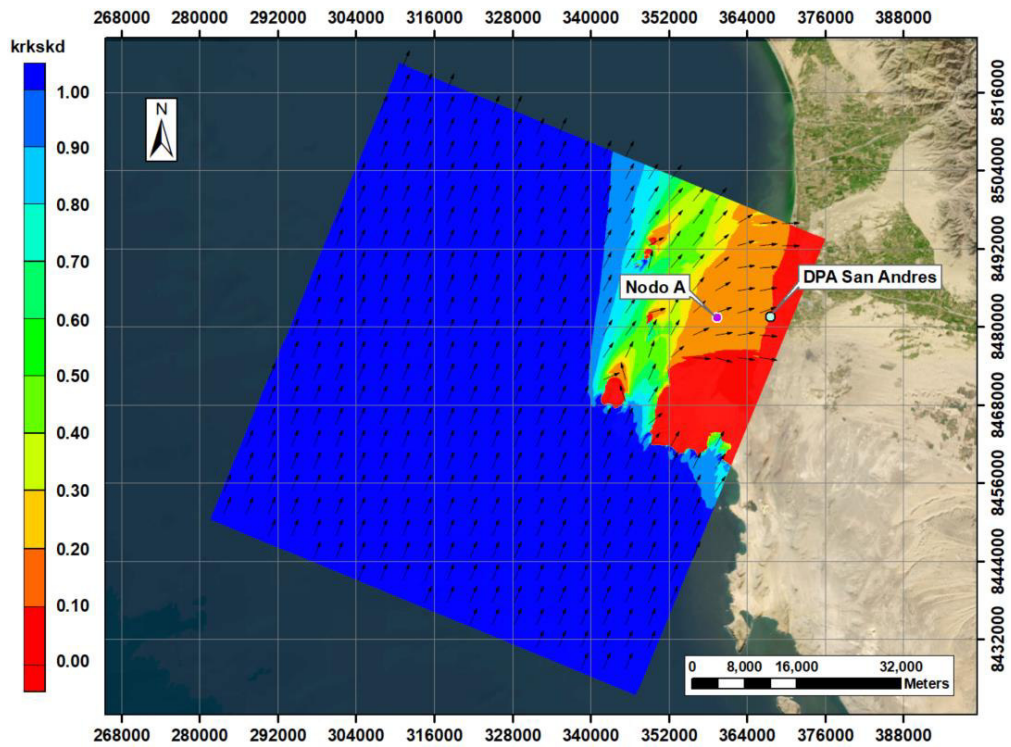


Figura 35- Propagación del oleaje con el modelo STWAVE. (Dirección Sur-Suroeste y periodo de 14 segundos).

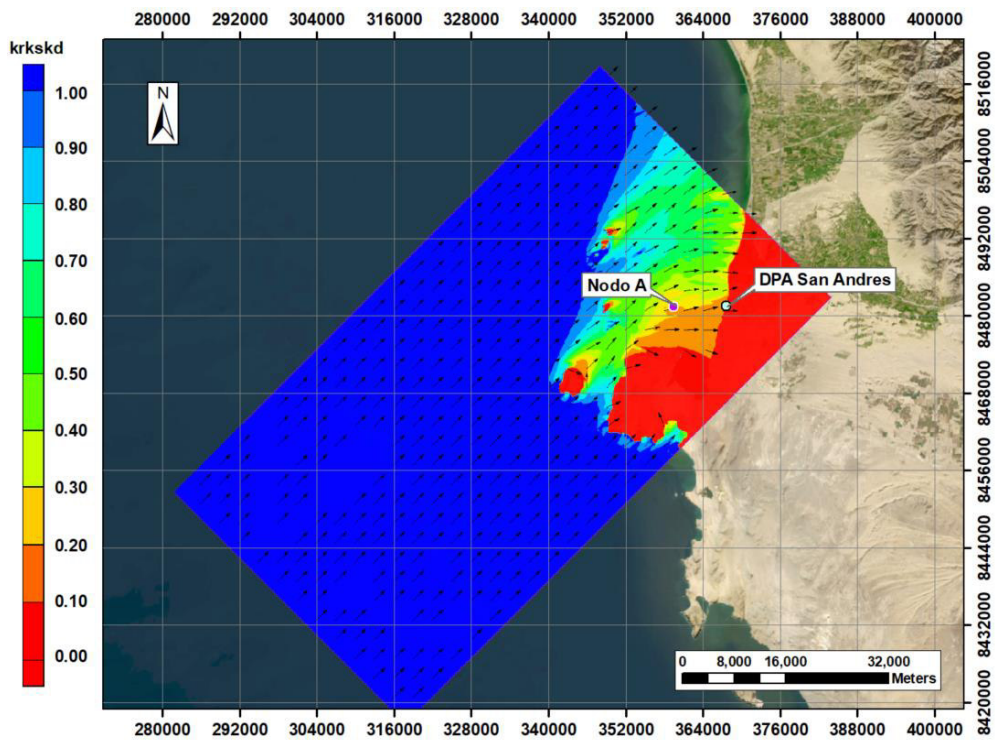


Figura 36. Propagación del oleaje con el modelo STWAVE. (Dirección Suroeste y periodo de 14 segundos).

En líneas generales podemos apreciar que el oleaje proveniente desde aguas profundas redujo su energía conforme a este se acercó a las diferentes islas frente a la bahía de paracas y la propia península, en donde se generaron los siguientes

aspectos que minimizaron la altura de la ola y su energía conforme a este llegaba a la zona de San Andrés (refracción, difracción y asomeramiento).

### 4.3. Clima de olas en aguas someras

#### 4.3.1. Oleaje en la ubicación del ADCP

Con base a los datos registrados por el equipo ADCP cada hora en el punto de ubicación se presentan los siguientes resultados generales:

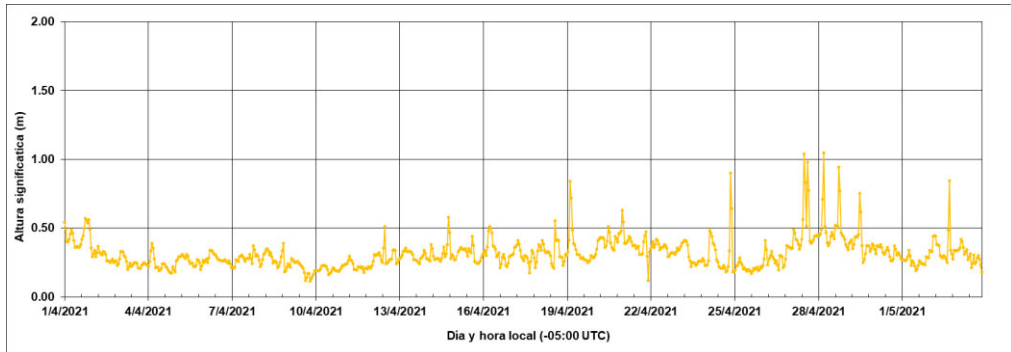


Figura 37.- Serie de tiempo asociada a la altura significativa de la ola ( $H_s$ ) registrado por el equipo ADCP.

En líneas generales podemos destacar la baja altura de las olas que se hacen presentes en el punto de ubicación del ADCP y aún más serán en la zona del DPA.

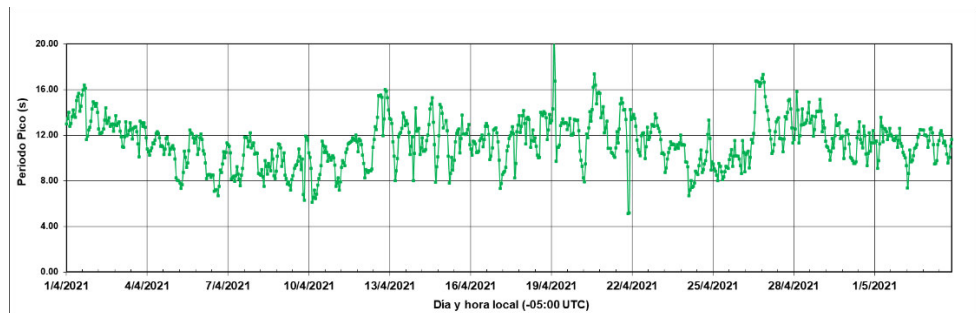


Figura 38.- Serie de tiempo asociada al periodo pico del oleaje ( $T_p$ ) registrado por el equipo ADCP.

Podemos apreciar que los oleajes registrados por el ADCP tienen cierta variabilidad en cuanto se refieren a los periodos pico.

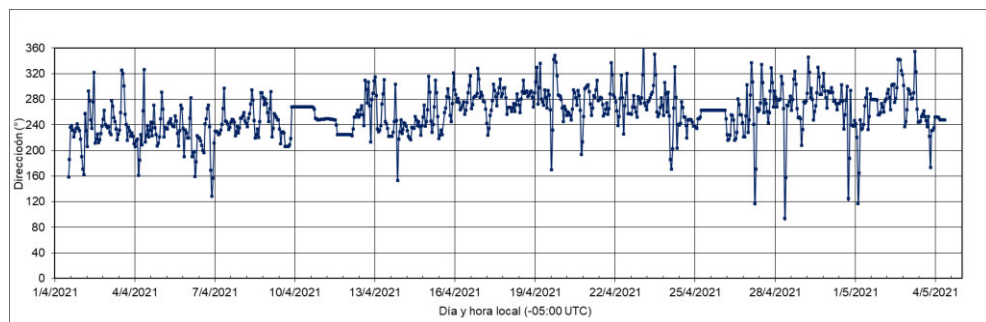


Figura 39. Serie de tiempo asociada a la dirección de procedencia del oleaje ( $Dir$ ) registrado por el equipo ADCP.

En cuanto a la dirección del oleaje podemos hacer un análisis similar al caso de los periodos picos, en donde podemos destacar oleajes que se generan de forma local y de procedencia del norte, sureste, entre otros. Sin embargo, los oleajes que son procedentes desde aguas profundas son mayormente los que tiene direcciones del oeste y oeste-suroeste.

A continuación, se presentan la interpretación detallada del oleaje medido por el equipo ADCP.

Las olas medidas en el frente costero del área de estudio registraron olas que no superaron los 1.10 m de altura significativa y con un promedio de 0.31 m, de igual manera nos permitió definir que mencionadas olas son de procedencia de aguas profundas y eventos locales ya que sus periodos picos en promedio son variables.

*Tabla 8.- Estadística general de olas medidas por equipo ADCP.*

	H <sub>s</sub> (m)	T <sub>p</sub> (s)	Dir (°)
<b>Media</b>	0.31	11.38	257.90
<b>Error típico</b>	0.00	0.07	1.24
<b>Mediana</b>	0.29	11.46	259.06
<b>Moda</b>	0.25	11.97	262.89
<b>Desviación estándar</b>	0.11	2.10	34.70
<b>Varianza</b>	0.01	4.40	1204.42
<b>Curtosis</b>	10.37	0.35	1.76
<b>Coefficiente de asimetría</b>	2.41	0.14	-0.42
<b>Rango</b>	1.05	15.59	277.60
<b>Mínimo</b>	0.00	5.14	94.40
<b>Máximo</b>	1.05	20.73	372.00

En lo que respecta al análisis direccional presentado a través de las rosas de oleaje, se evidencia que para todos los registros el oleaje proviene de los rangos direccionales oeste-suroeste (27,52 %) y oeste (71,51%), lo que significa que el 99,03 % del tiempo en promedio a lo largo del periodo de medición, el oleaje proviene tan solo de estas dos direcciones, lo que nos permitió establecer una orientación de incidencia de las olas dentro del área hacia el norte.(ver Tabla 9).

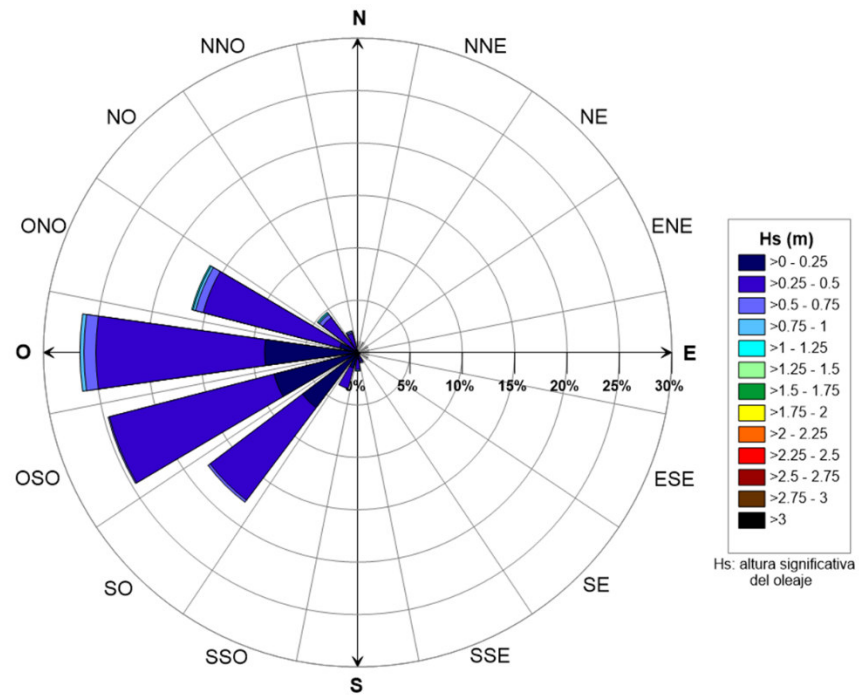


Figura 40.- Rosa de Oleaje registrada por equipo de medición ADCP.

Tabla 9.- Frecuencia relativa del oleaje (Hs) en función de la dirección en el punto de medición.

Hs (m)		SSO	SO	OSO	O	ONO	(%)
0.00						0,00	0.00
0.00	0.25	1.525	6.607	8.26	8.89	1.525	27.06
0.25	0.50	2.033	11.055	16.26	16.14	2.033	58.96
0.50	0.75		0.254	0.13	1.14		2.29
0.75	1.00				0.38		0.64
1.00	1.25						0.13
1.25	1.50						
Total (%)		3.6	17.9	24.7	26.6	16.4	89.1

Al analizar la distribución conjunta de las alturas de ola significativas ( $H_s$ ) y los períodos pico ( $T_p$ ) donde se evidencian que casi todos los oleajes son de periodo extensos generados en aguas profundas. Lo que permite identificar que el oleaje en la zona del proyecto no responde a un oleaje local.

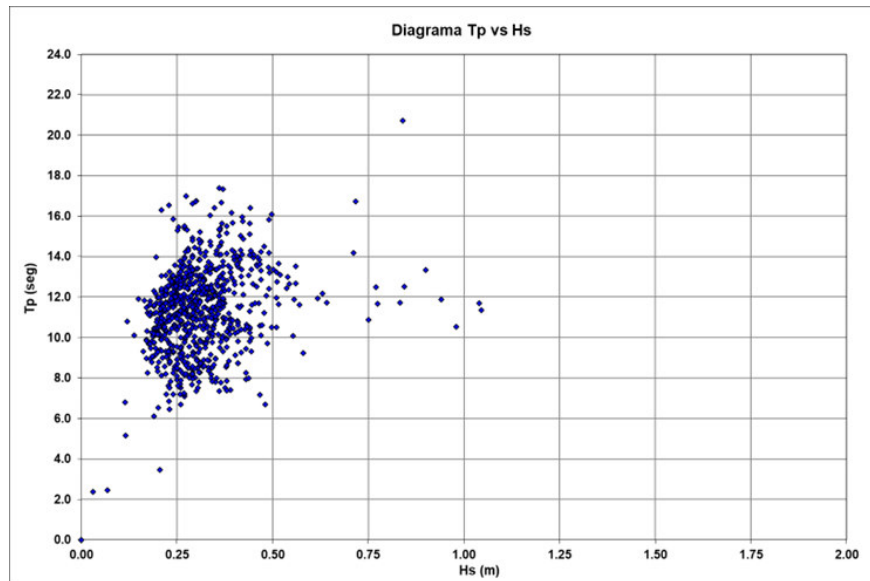


Figura 41.- Altura significativa vs Período pico del Oleaje medido con equipo ADCP.

Por otra parte, de acuerdo al análisis de excedencia del oleaje de la altura significativa de las olas, se muestra que el oleaje con altura significativa igual a 0.50 m tiene un porcentaje de excedencia o probabilidad de que esta sea excedida del 5%) tal como se muestra en la Figura 42, lo que es realmente bajo y permite definir que la zona de estudio es caracterizada por olas de baja altura.

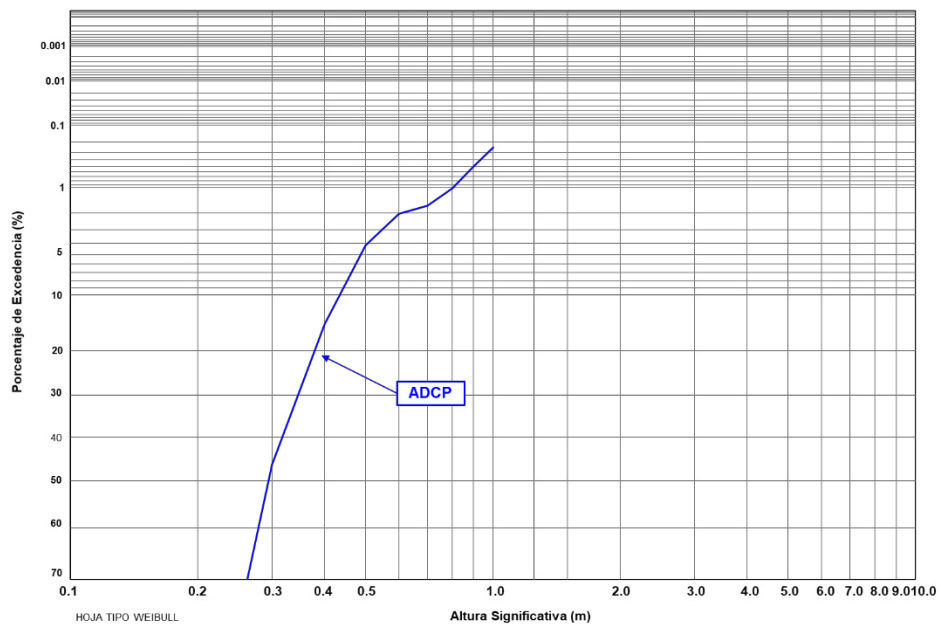


Figura 42.- Porcentaje de excedencia de la altura significativa del oleaje.

### 4.3.2. Validación de la propagación del oleaje

Previamente a indicar los resultados de la validación del modelo se hace presente los datos de olas ( $H_s$ ,  $T_p$  y  $D_p$ ) en aguas profundas, durante el periodo de adquisición de los datos para la validación ADCP.

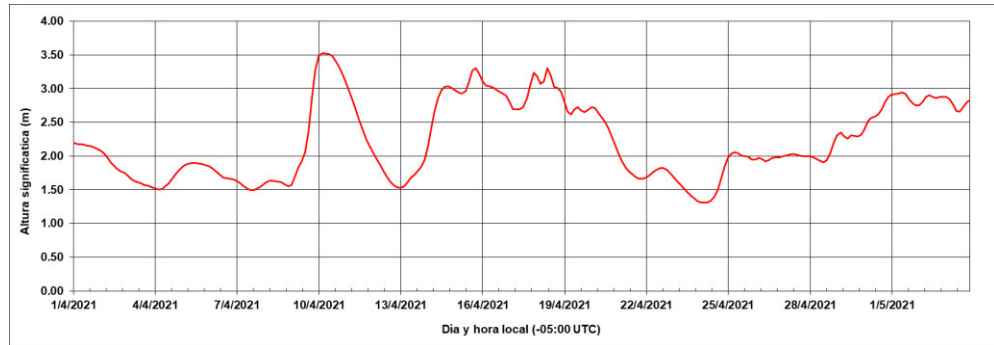


Figura 43. Serie de tiempo de la altura de ola ( $H_s$ ) en aguas profundas.

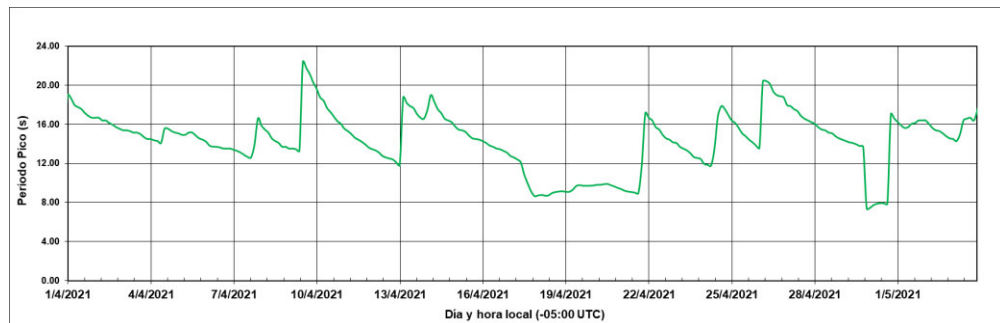


Figura 44. Serie de tiempo del periodo pico de la ola ( $T_p$ ) en aguas profundas.

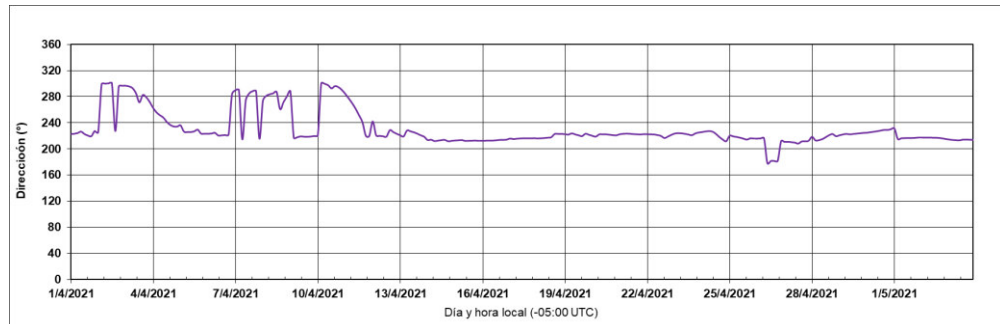


Figura 45. Serie de tiempo de la dirección del oleaje ( $D_p$ ) en aguas profundas.

Para validar la ejecución del modelo STWAVE y sus resultados obtenidos, se ha realizado la comparación de los registros adquiridos en campo con el equipo ADCP Flowquest 600 y los obtenidos por el modelo STWAVE (punto de comparación; la ubicación del ADCP), luego de disponer de ambas series de tiempo en el mismo periodo de medición del ADCP se realizaron las verificaciones de los datos de olas mediante los siguientes gráficos y tablas.

Tabla 10. Comparación entre los resultados de oleaje entre el punto de medición ADCP y los resultados del modelo STWAVE.

Estadística	Modelo STWAVE		ADCP 2021		Comparación	
	Hs (m)	Tp (seg)	Hs (m)	Tp (seg)	Hs (m)	Tp (seg)
<b>Promedio</b>	0.30	14.42	0.31	11.34	-0.01	+3.08
<b>Máximo</b>	0.96	22.39	1.05	20.73	-0.09	+1.66
<b>Mínimo</b>	0.18	7.31	0.11	5.14	+0.07	+2.17

En líneas generales con base en los resultados de la Tabla 10 se puede indicar que el modelo en promedio responde acorde a la altura media del oleaje, mientras que los datos máximos son subestimados.

Respecto a la altura significativa de oleaje (ver Figura 46) se puede observar que el modelo tiene cierta similitud con los datos del ADCP, sin embargo, los datos del equipo tienen ciertos picos que no permiten verificar de mejor manera los resultados del modelo.

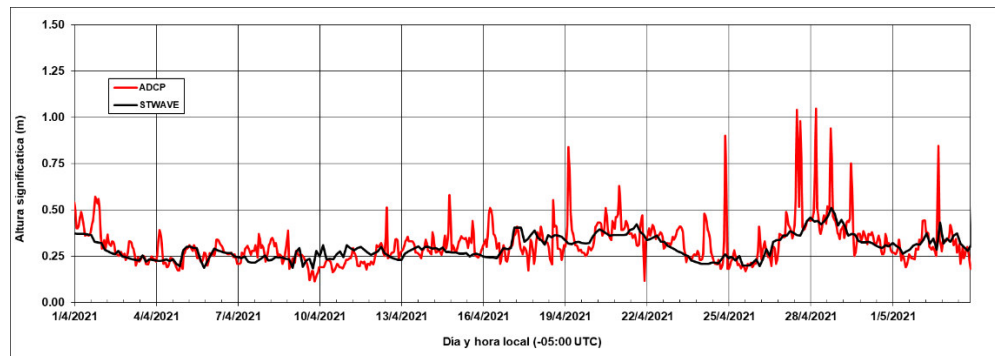


Figura 46. Comparación de la serie temporal de la altura significativa del oleaje.

No obstante, en la comparación de la dirección (ver Figura 47) se puede apreciar que, si hay diferencia entre las series temporales de ambas fuentes de datos. En este caso se ha consultado con la empresa la cual adquirió la información correspondiente, la que indicó que los datos de dirección provienen de un espectro direccional y que no hay un dato fijo para la dirección en el momento de extraer estos parámetros del ADCP. Adicionalmente se me ha indicado que durante su etapa de procesamiento se hacen diversos ajustes, medias o filtros para así definir la dirección de una altura de olas en un tiempo definido.



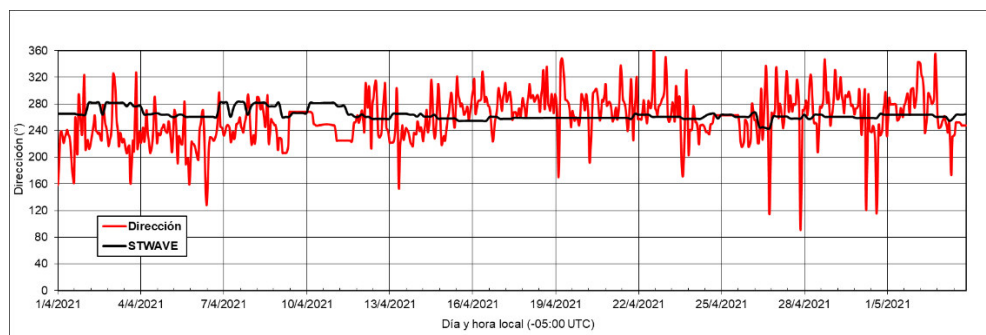


Figura 47. Comparación de la serie temporal de la dirección del oleaje.

Ahora respecto al porcentaje de excedencia (ver Figura 48) podemos indicar que el modelo responde acorde con los datos obtenidos por el ADCP, donde podemos verificar que las alturas iguales a 0.40 m tienen un 20% de excedencia para el modelo STWAVE, mientras que en el ADCP es de 15% aproximadamente.

Por otra parte, para altura iguales a 1.0 m tenemos una diferencia del 0.2% aproximadamente.

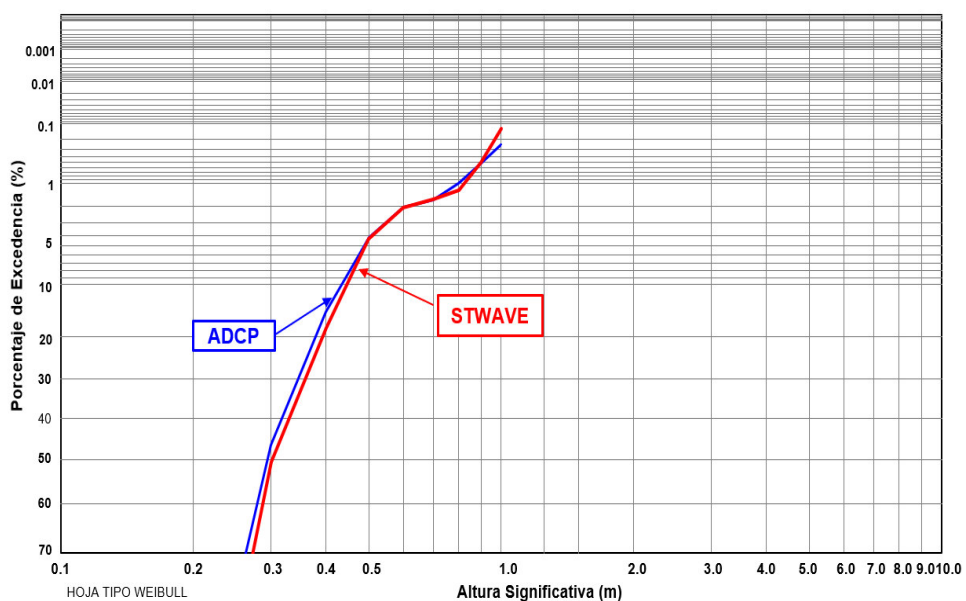


Figura 48. Comparación del porcentaje de excedencia de la altura de ola.

En conclusión, luego de verificar los diferentes gráficos podemos establecer que el modelo STWAVE responde de manera eficiente ante la propagación de olas partiendo de las aguas profundas hasta las aguas someras. No obstante, si se recomienda que la data del ADCP debería de ser un poco más procesada para así verificar de mejor manera los resultados del modelo.

#### 4.3.3. Oleaje en el frente costero de San Andrés

En el presente ítem se ha considerado el análisis nodo en aguas someras (nodo A) en donde se ubicó el ADCP.

Las estadísticas generales del oleaje indican un promedio global de altura significativa de 0.28 m, con un valor puntual máximo de 2.49 m y con mínimo registrado de 0.00 m. En lo que respecta a la dirección, se tiene en promedio una dirección de procedencia de 253.69 (oeste-suroeste), y un período pico promedio de 13.96 seg con un máximo de 23.63 seg.

Tabla 11.- Estadísticas generales del oleaje frente a San Andrés

	<b>H<sub>s</sub> (m)</b>	<b>T<sub>p</sub> (s)</b>	<b>Dir (º)</b>
<b>Media</b>	0.28	13.96	253.69
<b>Error típico</b>	0.00	0.01	0.11
<b>Mediana</b>	0.25	14.13	258.05
<b>Desviación estándar</b>	0.16	2.28	38.77
<b>Varianza</b>	0.02	5.18	1503.13
<b>Curtosis</b>	20.52	1.42	36.74
<b>Coficiente de asimetría</b>	3.52	-0.54	-6.03
<b>Rango</b>	2.49	22.36	304.48
<b>Mínimo</b>	0.00	1.27	0.00
<b>Máximo</b>	2.49	23.63	304.48

En lo que respecta al análisis direccional presentado a través de la rosa de oleaje, se evidencia que para todos los registros el oleaje en aguas someras proviene del oeste-suroeste y oeste en los datos correspondientes a los 42 años de datos (ver Figura 49).

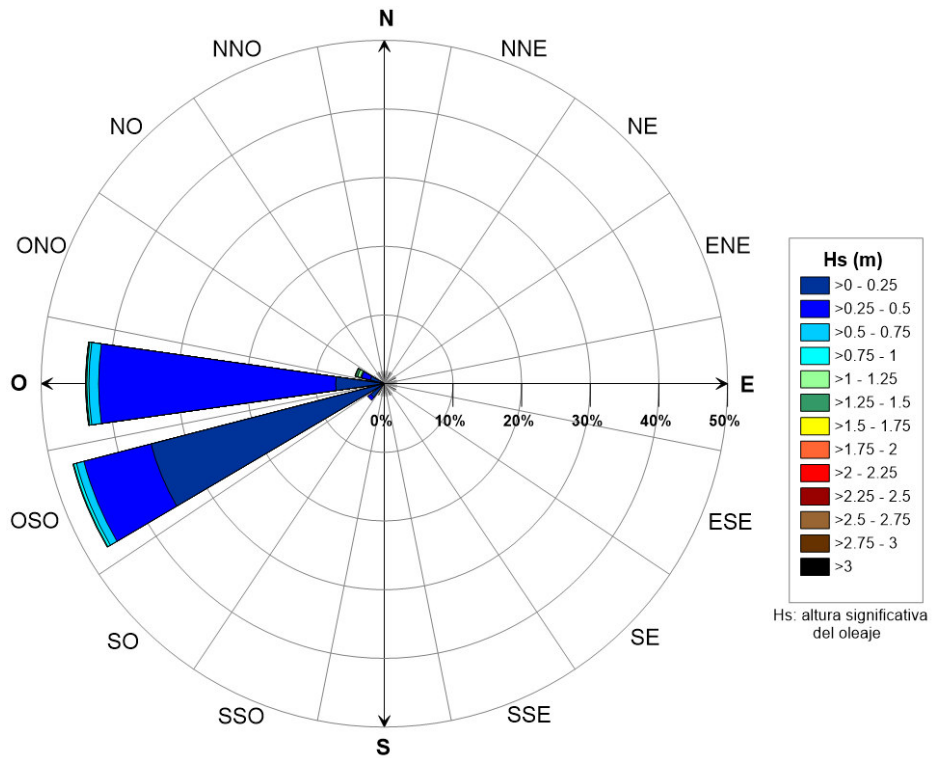


Figura 49.- Rosa de olas en aguas someras.

Al analizar la distribución conjunta de las  $H_s$  y  $T_p$  se evidencia que casi todos los registros corresponden a oleajes de períodos largos que se generaron en el océano pacífico sur, lo cual nuevamente denota que estos no son comúnmente generados en la zona cerca al proyecto.

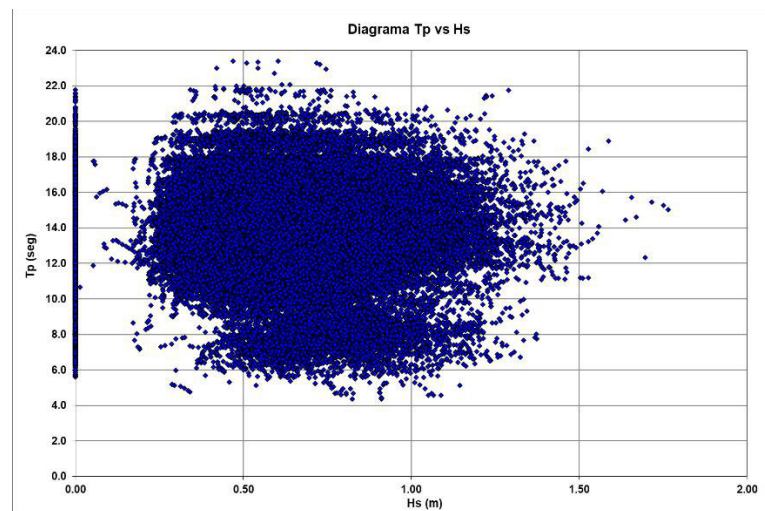


Figura 50.- Altura significativa vs Período pico del oleaje en aguas someras.

Tabla 12.- Frecuencia relativa del oleaje en aguas someras.

Tp(seg)		SO	OSO	O	ONO	NO	Total (%)
0.0	2.0	0.001	0.00				0.00
2.0	4.0	0.001	0.01				0.01
4.0	6.0	0.006	0.02	0.05	0.01		0.09
6.0	8.0	0.594	0.08	0.20	0.01		0.88
8.0	10.0	1.721	0.49	0.31	0.01	0.00	2.53
10.0	12.0	0.800	7.93	0.69	0.06	0.01	9.49
12.0	14.0		22.06	11.49	0.38		33.94
14.0	16.0		14.26	20.23	2.18		36.66
16.0	18.0		3.03	9.08	1.64		13.75
18.0	20.0		0.02	2.06	0.15		2.23
20.0	22.0		0.00	0.34	0.06		0.40
22.0	24.0			0.01	0.00		0.01
24.0	26.0						0.00
<b>Total (%)</b>		<b>3.1</b>	<b>47.9</b>	<b>44.5</b>	<b>4.5</b>	<b>0.0</b>	<b>100.0</b>

Conforme al análisis de excedencia del oleaje de la altura significativa de las olas, se observa que el oleaje con altura significativa igual a 0.5 m tiene un porcentaje de excedencia de 3% tal como se muestra en la Figura 51.

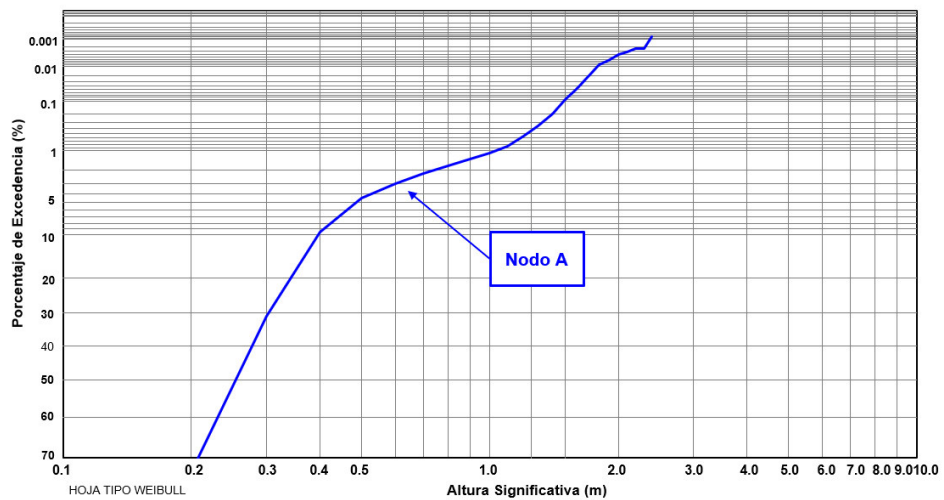


Figura 51.- Porcentaje de excedencia de la altura significativa del oleaje.

Lima, 24 de noviembre del 2022

**CARTA H&O-124-22-GC-JCV**

Señor

**HILMER EDUARDO NAVARRETE JIMENEZ**

Av. Ferrocarril Mz I, Lt. 26, Urb. Las Praderas de Santa Anita, El Agustino - Lima

Presente. -

**Asunto: Autorización del uso de datos de batimetría, olas, corrientes y mareas medidas con equipo ADCP en San Andrés, Pisco**

De nuestra mayor consideración. -

Por medio de la presente, nos es grato saludarlo y a la vez dar expresa autorización al Bachiller en Ingeniería Mecánica de Fluidos, Sr. Hilmer Eduardo Navarrete Jiménez, identificado con DNI N° 47230306, para el uso, únicamente con fines académicos de trabajo en la Monografía Técnica denominada "PROPAGACIÓN Y ANÁLISIS DE OLEAJE EN EL DESEMBARCADERO PESQUERO ARTESANAL SAN ANDRÉS, PROVINCIA DE PISCO, REGIÓN ICA - 2021", a ser presentada en el Décimo Tercer Curso de Actualización Profesional de la E.P. de Ingeniería Mecánica de Fluidos de la UNMSM, para optar por el correspondiente Título Profesional, de los datos de batimetría, olas, corrientes y mareas medidas con los equipos correspondientes (ecosonda monohaz, ecosonda multihaz y ADCP) en San Andrés, Pisco, durante el desarrollo de nuestros trabajos de campo de ingeniería de base en el Desembarcadero Pesquero Artesanal operado por el Fondo Nacional de Desarrollo Pesquero (FONDEPES).

Dejamos constancia con el presente documento de la entrega de la información solicitada.

Sin otro particular, nos suscribimos de Ustedes no sin antes expresarles nuestros sentimientos de consideración y estima.

Atentamente,



**Ing. Fernando Lévano Mendoza**  
Gerente General / Representante Legal  
H&O Ingenieros Consultores S.A.

## CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES

- Los oleajes procedentes de aguas profundas se ven afectados por el fondo marino, lo que hacen que estos disminuyan su altura de una manera considerable a estos acercarse a la costa. Pero si bien el efecto del fondo marino es un parámetro que afecta a las olas que provienen desde aguas profundas, el caso de mayor relevancia es notado por el efecto de una obstrucción, teóricamente denominado como la difracción. Esta si bien sucede cuando una ola detecta un obstáculo en su camino y cambia su dirección, o la "rodea". En las olas del mar o de aguas profundas notamos que esto sucede cuando la ola se encuentra con un objeto como un rompeolas y la ola gira alrededor de él (a veces también cuando la ola entra entre pequeñas aberturas en un rompeolas o entre dos islas se producirá difracción). Cuanto mayor sea la posibilidad de "enrollar" o cambiar la dirección de la onda, mayor será la longitud de onda (podría ser el período). Este es el motivo por el cual las olas de período largo generadas por Swell de período largo hacen que las olas giren 180 grados alrededor del muelle, mientras que las Swell de viento de período corto se disipan más rápidamente.
- Podemos destacar como el efecto de la difracción y de asomeramiento afectan notablemente a las olas que son propagadas desde aguas profundas hasta aguas someras, en donde estas se amortiguan por la obstrucción de las islas baldestas, la propia península de paracas, así como las demás islas que se encuentran la zona y por el fondo marino lo que hacen que al llegar al área de estudio se vean realmente bajas (Hs promedio = 0.20 m) en comparación al momento de su registro en aguas profundas (Hs promedio = 2.42 m). Este aspecto de difracción no se puede identificar rápidamente en las zonas donde no se encuentra ninguna obstrucción, dado que las olas únicamente se ven dañadas es por el fondo.
- En lo que respecta al clima de olas en aguas someras, podemos resaltar que los oleajes tienen una procedencia predominante del oeste y oeste-suroeste.
- Las alturas de olas más elevadas son generadas en la temporada de invierno donde se ven aumentados e influenciados por las condiciones de vientos en zona de aguas profundas.

## GLOSARIO DE TÉRMINOS

<b>Hs</b>	Altura significativa del oleaje
<b>Tp</b>	Periodo pico del oleaje
<b>Dir</b>	Dirección de procedencia del oleaje
<b>N</b>	Norte
<b>NNE</b>	Nor-Noreste
<b>NE</b>	Noreste
<b>ENE</b>	Este-Noreste
<b>E</b>	Este
<b>ESE</b>	Este-Sureste
<b>SE</b>	Sureste
<b>SSE</b>	Sur-Sureste
<b>S</b>	Sur
<b>SSO</b>	Sur-Suroeste
<b>SO</b>	Suroeste
<b>OSO</b>	Oeste-Suroeste
<b>O</b>	Oeste
<b>ONO</b>	Oeste-Noroeste
<b>NO</b>	Noroeste
<b>NNO</b>	Nor-Noroeste
<b>m</b>	metros
<b>“s” o “seg”</b>	segundos
<b>“o”</b>	Azimut medido en grados
<b>T<sub>r</sub></b>	Periodo de retorno
<b>Min</b>	Mínimo
<b>Med</b>	Medio
<b>Max</b>	Máximo

<b>Series de tiempo</b>	Es una serie de observaciones medidas en un momento específico, dispuestas en orden cronológico..
<b>Estadística descriptiva o general</b>	Es la tabla que permite definir las estadísticas básicas dentro de una serie de tiempo.
<b>Rosa de oleaje</b>	Es la representación gráfica en formato de 16 puntas, la cual relaciona la dirección de procedencia del oleaje con la altura significativa.
<b>Distribución conjunta</b>	Es el grafico de dispersión que relaciona la altura significativa del oleaje con el periodo pico del oleaje.
<b>Gráfico de porcentaje de excedencia</b>	Es el grafico asociado a las probabilidades de que una cierta variable pueda ser igualada o excedida.
<b>Tabla de ocurrencia</b>	Son aquellas que permiten identificar que tanto una cierta variable ocurre durante una serie de tiempo.

## BIBLIOGRAFÍA

- [0] SHAMES, I. H. (1998); *“Mecánica de Fluidos” (3ra Ed.)*; MCGRAW-HILL INTERAMERICANA.
- [1] Boccotti, P. (2000). *Wave Mechanics for Ocean Engineering*.
- [2] Boccotti, P. (2015). *Wave Mechanics and Wave Loads on Marine Structures*.
- [3] Dean, R., & Dalrymple, R. (1984). *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*.
- [4] Flores, J. (2008). *Propagación y caracterización de oleaje*.
- [5] Goda, Y. (2000). *Random Seas and Design of Maritime Structures*.
- [6] Sonrensen, R. (2006). *Basic Coastal Engineering*.
- [7] UC, & Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas (2000). *Documento de referencia. Volumen I. Dinámicas*.
- [8] USACE, & U.S. Army Corps of Engineers. (2002). *Coastal Engineering Manual*.
- [9] FUENTES O., C. (2001); *“Ingeniería Portuaria”*; LIMA-PERÚ
- [10] Fondo Nacional de Desarrollo Pesquero (FONDEPES), Estudio hidro-oceanográfico del DPA San Andrés.
- [11] Fondo Nacional de Desarrollo Pesquero (FONDEPES), Estudio hidro-oceanográfico del DPA Yacila.
- [12] Fondo Nacional de Desarrollo Pesquero (FONDEPES), Estudio hidro-oceanográfico del DPA San José.
- [13] Fondo Nacional de Desarrollo Pesquero (FONDEPES), Estudio hidro-oceanográfico del DPA La Cruz.
- [14] Fondo Nacional de Desarrollo Pesquero (FONDEPES), Estudio hidro-oceanográfico del DPA San Juan de Marcona.
- [15] Fondo Nacional de Desarrollo Pesquero (FONDEPES), Estudio hidro-oceanográfico del DPA Las Conchitas.
- [16] Fondo Nacional de Desarrollo Pesquero (FONDEPES), Estudio hidro-oceanográfico del DPA Cerro Azul.
- [17] Estudio hidro-oceanográfico para el Terminal Multipropósito de Salaverry.
- [18] Estudio hidro-oceanográfico para el Terminal portuario general San Martín / Pisco.
- [19] Estudio hidro-oceanográfico para la creación de una marina deportiva en San Clemente / Pisco.



[19] Estudio hidro-oceanográfico para la creación de una marina deportiva en San Clemente / Pisco.

[20] Carta H&O-124-22-GC-JCV / Autorización del uso de datos de batimetría, olas, corrientes y mareas medidas con equipo ADCP en San Andrés, Pisco