



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**



DISEÑO DE UNA PISTA DE REMO EN LA LAGUNA GRANDE

POR

Joaquín Alberto Mascaró Müller

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para optar al título de Ingeniero Civil

Profesor Guía
Oscar Link
Maricarmen Guerra

Abril 2022
Concepción (Chile)

© 2020 Joaquín Alberto Mascaró Müller

© 2019 Joaquín Alberto Mascaró Müller

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

DEDICATORIA

Agradezco a mi familia, en especial a mi mamá Karin Muller, mi abuelo Nelson Muller y mi abuela María Eugenia Reyes por estar siempre presentes, apoyarme en todas mis decisiones y darme ánimo y cariño en todo momento

Agradezco también a mis amigos de la carrera especialmente a Nicolás López y Ariana Acosta ya que sin ustedes estos 6 años de estudios hubieran sido mucho más difíciles y siempre recordaré todos los momentos que pasamos en la universidad. También agradecer a mis amigos desde el colegio Andrés de la Fuente, Martin Marín y Tomas Ward por estar siempre presentes y ser parte importante en este camino. Finalmente agradecer a mi pareja Isidora Vásquez por su apoyo incondicional en todo momento y levantarme cuando más lo necesité.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a cada persona que formó parte de esta memoria en distintos aspectos, especialmente a los profesores Oscar Link y Maricarmen Guerra por patrocinar esta memoria y al profesor Alex Schwarz por ser parte de la comisión y el tiempo que me otorgaron, también a Don René Iribarren, del laboratorio de Hidráulica, por su enorme disposición a ayudarme en todo ámbito en el cual necesité junto a Don Marco Román, encargado del recinto del Serviu en San Pedro donde permitieron la instalación del sensor de viento de forma segura y por ultimo a la asociación de remo en general por su apoyo y en particular a la Srta. Paula Urzúa, Sr. Christian Rondanelli y Sr. Alejandro Castro.

RESUMEN

Chile tiene una única pista de remo que cumple con los criterios impuestos por la Fédération Internationales des Sociétés d' Aviron (FISA), ubicada en la laguna Curauma, la que presenta serios problemas de sequía que motivan a buscar nuevas pistas que permitan albergar competencias internacionales. El remo se practica desde el año 1953 en la comuna de San Pedro de la Paz en la Laguna Chica. Sin embargo, la actual pista ubicada en la Laguna Chica no cumple con las medidas impuestas por la FISA. No obstante, la Laguna Grande de la misma comuna, figura como una posibilidad para generar una pista de remo con estándares FISA, aunque la presencia de viento en ella genera oleaje perjudicial para el desarrollo de regatas ya que desestabiliza a los deportistas, perjudica su desempeño y puede poner en riesgo su integridad física. El objetivo de este trabajo es diseñar una estructura disipadora de oleaje que otorgue funcionalidad a una pista de remo con estándar FISA en la Laguna Grande de San Pedro.

Para cumplir con el objetivo, se realizaron mediciones de velocidad y dirección viento en la ribera norte de la Laguna Grande desde el 15/10/2021 hasta el 04/01/2022 mediante un sensor de viento Young modelo 05103. Los datos se compararon con los registrados por la estación meteorológica Carriel Sur observándose una buena correlación entre ambas series medidas. Las direcciones principales de viento provienen del suroeste y las velocidades máximas son de hasta 11,5 [m/s].

A partir de la información de viento recolectada se caracterizó el oleaje generado por viento en la Laguna Grande mediante el modelo paramétrico JONSWAP. Se encontró que la altura de ola significativa máxima es de 0,68 m y periodo de hasta 3,36 s

Finalmente, se dimensionó un rompeolas tipo pontón-caja de poliestireno expandido con una capa de 2 cm de hormigón de medidas 1 x 1,2m el cual transmitirá olas no mayores a 0,17 m.

ABSTRACT

Chile has only one rowing track that meets the criteria imposed by the Fédération Internationale des Sociétés d' Aviron (FISA), located in the Curauma lagoon, which has serious drought problems that motivate the search for new tracks to host international competitions. Rowing has been practiced since 1953 in the commune of San Pedro de la Paz in the Laguna Chica. However, the current track located in the Laguna Chica does not comply with the measures imposed by FISA. Nevertheless, the Laguna Grande of the same commune, appears as a possibility to generate a rowing track with FISA standards, although the presence of wind in it generates harmful waves for the development of regattas since it destabilizes the athletes, harms their performance and can put their physical integrity at risk. The objective of this work is to design a wave dissipating structure that provides functionality to a rowing track with FISA standard in the Laguna Grande de San Pedro.

To meet this objective, wind speed and direction measurements were taken on the north shore of Laguna Grande from 10/15/2021 to 01/04/2022 using a Young model 05103 wind sensor. The data were compared with those recorded by the Carriel Sur meteorological station, showing a good correlation between the two series of measurements. The main wind directions are from the southwest and the maximum wind speeds are up to 11.5 [m/s].

From the wind data collected, the wind-generated waves in the Laguna Grande were characterized using the parametric model JONSWAP. The maximum significant wave height was found to be 0.68 m and period of up to 3.36 s.

Finally, an expanded polystyrene pontoon-box type breakwater was dimensioned with a 2 cm concrete layer measuring 1 x 1,2 m, which will transmit waves of no more than 0.17 m.

Índice

| | |
|---|-----------|
| CAPÍTULO 1 : INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1 Motivación..... | 1 |
| 1.2 Objetivos..... | 3 |
| 1.2.1 Objetivo general | 3 |
| 1.2.2 Objetivos secundarios..... | 3 |
| 1.3 Plan de trabajo | 3 |
| 1.4 Principales resultados | 4 |
| 1.5 Organización del documento..... | 4 |
| CAPÍTULO 2 : INFORMACIÓN RELEVANTE PARA EL DISEÑO DE UNA PISTA DE REMO | 5 |
| 2.1 Introducción..... | 5 |
| 2.2 Interacción embarcación-oleaje..... | 5 |
| 2.3 Oleaje..... | 6 |
| 2.3.1 Conceptos básicos | 6 |
| 2.3.2 Modelos de generación de oleaje | 9 |
| 2.4 Estructuras disipadoras de oleaje..... | 11 |
| 2.5 Diseño de rompeolas flotantes..... | 16 |
| 2.6 Conclusiones..... | 17 |
| CAPÍTULO 3 : METODOLOGÍA..... | 18 |
| 3.1 Introducción..... | 18 |
| 3.2 Levantamiento y procesamiento de datos de viento..... | 18 |
| 3.3 Extensión serie de tiempo velocidad de viento | 20 |
| 3.4 Estimación del oleaje en la Laguna Grande | 21 |
| 3.5 Física de la interacción bote – oleaje..... | 22 |
| 3.6 Diseño del dispositivo reductor de oleaje..... | 24 |
| 3.7 Conclusiones..... | 26 |
| CAPÍTULO 4 : RESULTADOS | 27 |
| 4.1 Introducción..... | 27 |
| 4.2 Caracterización del viento | 27 |
| 4.3 Extensión serie de tiempo velocidad de viento | 32 |
| 4.4 Caracterización y generación de oleaje | 33 |

| | |
|--|-----------|
| 4.4.1 Cálculo del <i>fetch</i> | 33 |
| 4.4.2 Generación de oleaje | 34 |
| 4.5 Estabilidad del bote | 36 |
| 4.6 Diseño preliminar rompeolas..... | 36 |
| 4.7 Selección rompeolas | 38 |
| 4.8 Trazado de pista..... | 39 |
| 4.9 Conclusiones..... | 40 |
| CAPÍTULO 5 : DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES | 41 |
| REFERENCIAS | 43 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 2.1 Casos estudio experimental nuevo tipo de rompeolas | 15 |
| Tabla 4.1 Fetch efectivo para cada dirección en Laguna Grande | 34 |
| Tabla 4.2 Parámetros Hs, Tp, L y k utilizando modelo JONSWAP | 35 |
| Tabla 4.3 Parámetros Hs, Tp, L y k utilizando modelo SMB | 35 |
| Tabla 4.4 Parámetros Hs, Tp, L y k utilizando modelo JONSWAP para serie extendida | 35 |
| Tabla 4.5 Parámetros Hs, Tp, L y k utilizando modelo SMB para serie extendida | 35 |
| Tabla 4.6 Resultados equilibrio de fuerzas para “ θ ” = 1° | 36 |
| Tabla 4.7 Resultados diseño rompeolas con ht = 0,1 m | 37 |
| Tabla 4.8 Resultados diseño rompeolas con ht = 0,2 m | 37 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 2.1 Diagrama sistema bote-remero | 6 |
| Figura 2.2 Representación fetch efectivo en Laguna Grande | 8 |
| Figura 2.3 Ejemplo rompeolas tipo pontón | 13 |
| Figura 2.4 Ejemplo rompeolas flotante tipo cadena de llantas | 13 |
| Figura 2.5 Modelo de rompeolas experimental | 14 |
| Figura 2.6 Resultados estudio experimental con ($T=1s$) | 15 |
| Figura 2.7 Resultados estudio experimental con ($h=0,15m$) | 15 |
| Figura 2.8 Resultados estudio experimental con ($h=0,2m$) | 16 |
| Figura 2.9 Esquema rompeolas tipo pontón-caja para su diseño | 16 |
| Figura 3.1 Ubicación sensor de viento en Laguna Grande | 18 |
| Figura 3.2 Sensor Young modelo 05103 | 19 |
| Figura 3.3 Clasificación de rugosidad de Davenport | 20 |
| Figura 3.4 Simplificación conjunto bote-remero | 22 |
| Figura 3.5 Diagrama de cuerpo libre conjunto bote-remero | 23 |
| Figura 3.6 Relación ángulo de inclinación y altura límite | 24 |
| Figura 4.1 Serie de tiempo de velocidad de viento Laguna Grande desde 15/10/2021 hasta 04/01/2022 | 27 |
| Figura 4.2 Serie de tiempo de dirección de viento Laguna Grande desde 15/10/2021 hasta 04/01/2022 | 27 |
| Figura 4.3 Rosa de vientos Laguna Grande desde 01/11/2020 hasta 04/01/2022 | 28 |
| Figura 4.4 Serie de tiempo de velocidad de viento Carrier Sur desde 15/10/2021 hasta 04/01/2022 | 28 |
| Figura 4.5 Serie de tiempo de dirección de viento Carrier Sur desde 15/10/2021 hasta 04/01/2022 | 29 |
| Figura 4.6 Rosa de vientos Carrier Sur desde 01/11/2020 hasta 04/01/2022 | 29 |
| Figura 4.7 Serie de tiempo de velocidad de viento Carrier Sur desde 01/11/2020 hasta 04/01/2022 | 29 |
| Figura 4.8 Serie de tiempo de dirección de viento Carrier Sur desde 01/11/2020 hasta 04/01/2022 | 30 |
| Figura 4.9 Rosa de vientos Carrier Sur desde 01/11/2020 hasta 04/01/2022 | 30 |
| Figura 4.10 Comparación velocidad de viento Laguna Grande / Carrier Sur | 31 |
| Figura 4.11 Velocidad promedio para cada hora Laguna Grande | 31 |
| Figura 4.12 Velocidad promedio para cada hora Carrier Sur | 31 |
| Figura 4.13 Desviación estándar para cada hora Laguna Grande | 32 |
| Figura 4.14 Desviación estándar para cada hora Carrier Sur | 32 |

| | |
|--|----|
| Figura 4.15 Serie de tiempo de velocidad de viento generada para Laguna Grande desde 01/11/2020 hasta 04/01/2022 | 32 |
| Figura 4.16 Comparación datos modelados con datos medidos para set de validación | 33 |
| Figura 4.17 Direcciones principales de viento en la Laguna Grande | 34 |
| Figura 4.18 Diseño de rompeolas para $ht = 0,1$ m | 37 |
| Figura 4.19 Diseño de rompeolas para $ht = 0,2$ m | 37 |
| Figura 4.20 Diseño rompeolas para el 100 % de los casos con $ht = 0,1$ m | 38 |
| Figura 4.21 Diseño rompeolas para el 100 % de los casos con $ht = 0,2$ m | 38 |
| Figura 4.22 Diseño final rompeolas | 39 |
| Figura 4.23 Trazado pista de remo (opción 1) | 39 |
| Figura 4.24 Trazado pista de remo (opción 2) | 40 |

CAPÍTULO 1 : INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

El remo es una disciplina deportiva que consiste en la propulsión de una embarcación sobre el agua mediante fuerza muscular de 1 o varios remeros, cada uno de ellos utilizando uno o dos remos como palancas simples de segundo grado y sentados de espaldas a la dirección de avance.

En Concepción el remo se ha practicado desde 1953 en la Laguna Chica de San Pedro de la Paz, dando origen a la fundación del Club Llacolén, por los clubes Alemán, Español e Italiano, sumándose la Asociación local. Posteriormente se integraron los clubes de remo San Pedro y Llacolén, lo que aumentó la cantidad de botes y remeros.

Esto hizo que la Laguna Chica dejara de cumplir con las necesidades de espacio requeridas, haciéndose especialmente notorio en campeonatos nacionales en que la cantidad de clubes y botes en la laguna aumenten considerablemente.

Campeonatos internacionales como Sudamericanos o Panamericanos no son posibles de realizar en la Laguna Chica, porque no cumple con el requerimiento FISA que establece que las pistas deben tener un largo de 2.000 m más 100 m mínimo para el frenado de botes totalizando 2.100 m y se deben considerar seis pistas para competir y dos adicionales una para circulación, una para lanchas y la segunda para tránsito de botes, con un ancho mínimo de 12,5 m cada una, lo que resulta un ancho mínimo total de 100 m.

La Laguna Chica, con un largo máximo de 1.850 m, no cumple con estas condiciones por lo que se imposibilita recibir una regata con estándar FISA. Debido a esto, es que ha sido una aspiración para la federación de remo local tener una pista de remo que cumpla con estos requisitos. La Laguna Grande de San Pedro tiene las dimensiones, y además presenta ventajas como su cercanía con el centro de Concepción con servicios de hotelería y atractivos turístico, por lo que surge como una buena opción para la creación de un centro deportivo.

Actualmente una pista de remo con estándar internacional debe cumplir los siguientes requisitos de acuerdo con el reglamento de la FISA (FISA, 2006) y a las condiciones necesarias para la seguridad de los y las deportistas.

- Las dimensiones mínimas para una pista de competencia internacional son de 2.100 x 100 m

- Control de viento y olas. Los botes de remo, al ser de dimensiones reducidas, pueden desestabilizarse fácilmente y no están preparados para resistir oleaje principalmente perpendicular a la dirección de avance. Las competencias requieren que en las pistas exista ausencia de oleaje o uno muy reducido.
- Igualdad de condiciones en las pistas. Necesario para una competencia justa se debe procurar que las condiciones de cada carril de la regata sean iguales para cada competidor para evitar ventaja inducida por el terreno de un equipo sobre otro.

Estas condiciones son difíciles de cumplir, a nivel mundial existen muy pocas pistas de carácter natural o artificial, algunos ejemplos de estas son: Laguna Sarnensee (Lucerna, Suiza), Lago Malta (Poznan, Polonia), Lago Pie di Luco (Italia), Lago di Varese (Italia) para los casos naturales y Canal Sea Forest (Tokio, China), Rowing Canal (Plovdiv, Bulgaria), Racice (Racice, Republica Checa). La gran mayoría de las pistas que albergan campeonatos mundiales son de carácter artificial debido a la complejidad de condiciones requeridas, siendo su construcción altamente costosa.

Actualmente en Chile se utilizan tres pistas principales para torneos nacionales oficiales:

- Río Calle Calle, Valdivia
- Laguna Chica, San Pedro de la Paz, Concepción
- Curauma, Curauma, Valparaíso

De estas tres pistas, la única con estándar internacional es Curauma, la cual ha albergado campeonatos internacionales tales como ODESUR (2014) y Sudamericanos (2016, 2018). Sin embargo, esta laguna ubicada en el tranque La Luz, perteneciente a la empresa Esval, sufre problemas de sequía debido principalmente a la alta frecuencia de incendios en la zona. Estudios realizados por la misma empresa dan cuenta que para el año 2023 únicamente contaría con cuatro carriles de los ocho necesarios.

Si bien la FISA no establece límites a la velocidad de viento ni altura de ola para la realización de la competencia, si le otorga la atribución al árbitro de evaluar dichas variables quedando a su criterio si se suspende o desarrolla una regata.

Concepción ha sido, sobre todo en los últimos años, potencia a nivel nacional en el entrenamiento de nuevos remeros representantes de la selección nacional obteniendo importantes títulos a nivel internacional como, por ejemplo, el de Melita y Antonia Abraham, medalla de oro en campeonato mundial U-23 (Plovdiv, Bulgaria, 2017). Melita y Antonia Abraham, medalla de oro en juegos

panamericanos en Dos sin timonel y cuádruple par damas (Lima, Perú, 2019) o el de Yoselin Cárcamo, 4to lugar en campeonato mundial sub-23 (2021).

Adicionalmente para diseñar una pista en la Laguna Grande de San Pedro de la Paz, se debe considerar la calidad de Santuario de la Naturaleza. Esto debido a sus características ecológicas particulares dado que corresponde a una de las escasas zonas, a nivel comunal, con vegetación nativa debido al desplazamiento de esta motivado por la urbanización y plantaciones forestales. Este punto restringe cualquier intervención a la Laguna por lo que se debe considerar una solución amigable con el medio ambiente y transitoria o removible.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Diseñar un dispositivo que permita disminuir los efectos del oleaje en la Laguna Grande de San Pedro la Paz para que otorgue funcionalidad a una pista de remo con estándar FISA.

1.2.2 Objetivos secundarios

- Caracterizar el viento sobre la Laguna Grande de San Pedro de la Paz
- Caracterizar el oleaje en la Laguna Grande
- Definir el diseño de un dispositivo reductor de oleaje para facilitar la práctica de remo en la Laguna Grande

1.3 Plan de trabajo

El trabajo realizado para el desarrollo de este trabajo, se resumen en las siguientes cinco etapas.

- Revisión de antecedentes: Se realizó una revisión bibliográfica de los temas competentes a la memoria de título, los cuales se dividen en: Pistas y reglamento del remo, relación entre el bote y el oleaje, modelos de generación de oleaje y estructuras disipadoras de oleaje
- Levantamiento de información: Se obtuvieron datos mediante la instalación de un sensor de viento en la Laguna Grande de San Pedro, el cual mide y almacena datos de velocidad y dirección de viento. Adicionalmente se utilizaron datos de la estación meteorológica Carrier Sur para extender la serie medida.
- Procesamiento datos de viento: Con los datos de viento obtenidos se procede a caracterizar el comportamiento de este observando direcciones predominantes, existencia de estacionalidad y distribución de velocidades mediante series de tiempo y una rosa de los

vientos para el periodo de medición. Adicionalmente se analizó si existe correlación con los datos de Carrier Sur a modo de obtener un análisis anual

- Generación de oleaje: Mediante métodos empíricos de generación de oleaje basados en velocidad de viento y *fetch*, se utilizaron los datos obtenidos en el punto anterior para caracterizar el oleaje en la zona de estudio.
- Diseño preliminar del dispositivo disipador de oleaje: Se analizaron diferentes opciones de rompeolas considerando las condiciones de oleaje y se seleccionó la mejor para la realización del remo.

1.4 Principales resultados

Se encontró que existe una marcada tendencia de vientos provenientes desde el Suroeste entre los 205° y 265° con respecto al Norte de velocidad máxima 11,5 m/s. El oleaje generado por viento se caracterizó, obteniendo alturas significativas de ola de hasta 0,68 metros y periodos máximos de 3,36 segundos.

El análisis de estabilidad del bote muestra que este es inestable ante cualquier inclinación a la que se pueda ver afectado sin que el remero realice algún esfuerzo por permanecer en equilibrio estable. Para el diseño del rompeolas se consideraron alturas de olas máximas transmitidas de 0,2 y 0,1 metros. Debido a la condición de santuario de la naturaleza otorgado a la laguna, se consideró la opción de un rompeolas flotante para reducir el oleaje diseñando uno de tipo pontón-caja.

Finalmente se dimensionó un rompeolas de poliestireno expandido con una capa de 2 cm de hormigón de medidas 1 x 1,2m el cual transmitirá olas no mayores a 0,17 m.

1.5 Organización del documento

El presente documento cuenta con cinco capítulos, donde se ordenarán de la siguiente manera: en el Capítulo 2 se encuentra toda la información teórica necesaria para la realización de este trabajo, subdividido en 4 secciones que representan los pasos más importantes, en el Capítulo 3 se explica paso a paso como se procedió a lo largo de este trabajo, subdividiendo cada sección la metodología para lograr cada objetivo específico propuesto, en el Capítulo 4 se presentan los resultados obtenidos siguiendo la metodología propuesta, en el Capítulo 5 se presentan las conclusiones pertinentes a modo de dar respuesta al problema planteado, adicionalmente se realizaron comentarios de acuerdo con posibles otras soluciones y recomendaciones que se estimaron convenientes.

CAPÍTULO 2 : INFORMACIÓN RELEVANTE PARA EL DISEÑO DE UNA PISTA DE REMO

2.1 Introducción

En el presente capítulo se presentará la información obtenida a partir de la revisión bibliográfica necesaria para realizar el diseño de una pista de remo.

Se revisó la relación de una embarcación con el oleaje y los efectos que este produce. Se estudió el oleaje causado por el viento y los modelos empíricos para estimar su altura y periodo significativos.

Finalmente se estudió las alternativas existentes de estructuras disipadoras de oleaje flotantes, tales como rompeolas tipo pontón y cadenas de llantas.

2.2 Interacción embarcación-oleaje

Una embarcación que tiene un periodo de balance bajo en comparación con el periodo de una ola que llega en dirección perpendicular a la del bote, comenzará a oscilar de lado a lado siguiendo la superficie libre del agua. Es lo que usualmente les sucede a los botes de remo.

En el diagrama de cuerpo libre mostrado en la Figura 2.1, se identifican tres puntos importantes donde se aplican 2 fuerzas principales: El centro de gravedad del cuerpo completo (CG), el Metacentro (MC) es el centro geométrico del cuerpo completo y el Centro de Flotabilidad (CF) es el centro de gravedad de la sección sumergida del bote (Pulman, 2005).

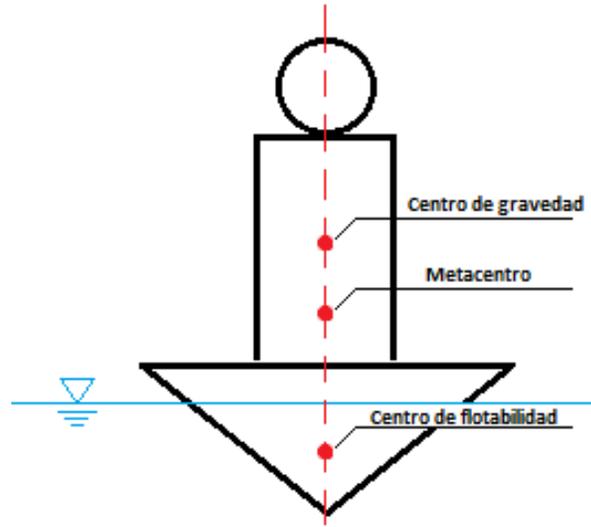


Figura 2.1 Diagrama sistema bote-remero

Pulman (2005) propone un límite de estabilidad que depende de la relación entre el momento de inercia de la sección sumergida del bote con el volumen de agua desplazado por este obteniendo la distancia máxima a la que puede estar el CF del CG para que el bote sea estable, presentada como Ecuación 2.1.

$$z = \frac{I}{V} \quad (2.1)$$

Por otro lado, se debe considerar que un bote en movimiento, a medida que aumenta su velocidad, también lo hace con el volumen de agua desplazado. Sin embargo, a pesar de que la mayor parte de este volumen se aleja como oleaje, se generan fuerzas normales hacia el bote que ayudan a su estabilidad (Pulman, 2005).

2.3 Oleaje

2.3.1 Conceptos básicos

Cuando el viento sopla sobre un cuerpo de agua, en la superficie libre las moléculas de aire interactúan con moléculas de agua generando pequeños rizos llamados ondas de capilaridad, esto da lugar a una mayor superficie de contacto entre el agua y el aire lo que permite un crecimiento de estas ondas. Una ola describe una forma aproximadamente sinusoidal, por lo que periódicamente se tienen crestas y valles que pueden ser descritos según ciertos parámetros.

Los parámetros más importantes para caracterizar el oleaje son:

- Longitud de onda: Es la distancia entre 2 picos consecutivos

- Periodo: Tiempo que tarda un pico o valle en recorrer su longitud de onda
- Altura de ola: Diferencia de cota entre un valle y una cresta

El movimiento de la ola representa un movimiento de energía, similar a la oscilación de una cuerda. Las moléculas de agua se mueven en forma de elipse con amplitud igual a la altura de la ola, pero el movimiento de partículas producido por el oleaje disminuye exponencialmente con la profundidad haciéndose imperceptible por debajo de $\frac{1}{2}$ de la longitud de onda.

El *fetch* es la distancia en línea recta donde el viento sopla con la misma dirección e intensidad sobre cuerpo de agua. Ante la presencia de un cuerpo de agua con longitud acotada, como una laguna, se utiliza el concepto de *fetch* efectivo, que considera el efecto de la costa en la generación de oleaje, para ello se trazan siete líneas rectas (rayos) equiespaciadas por 6° a cada lado de la línea central que sigue la dirección del viento y se calcula mediante la Ecuación 2.2

$$F = \frac{\sum L_i \cdot \cos(\theta)^2}{\sum \cos(\theta)} \quad (2.2)$$

Donde F es el *fetch* efectivo, L_i es la distancia medida para cada rayo y θ el ángulo del rayo “i” con respecto a la línea central.

La Figura 2.2 Representa el *fetch* efectivo de una forma gráfica donde la línea de mayor grosor representa la línea central y el resto de las líneas los rayos trazados.

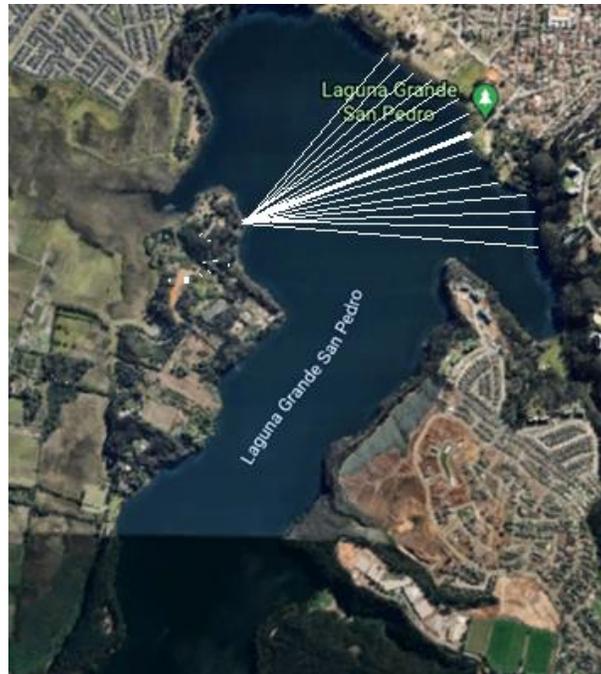


Figura 2.2 Representación *fetch* efectivo en Laguna Grande

Otro concepto útil para el entendimiento de esta memoria es el de mar completamente desarrollado, el cual se da cuando la energía que adquiere el agua debido al viento se equilibra con la que se pierde, principalmente por rompimiento de la cresta de la ola (whitecapping). Por esto que el oleaje puede estar limitado por el *fetch* o por la duración, es decir que, dada una velocidad de viento, requiere una duración y un alcance mínimos para lograr un mar completamente desarrollado.

A pesar de que el oleaje tiene un comportamiento irregular, puede caracterizarse mediante una altura y un periodo promedio o significativo representativo de un estado particular del mar (Sverdrup y Munk, 1947). Estos conceptos corresponden al promedio, de la altura y periodo respectivamente, considerando tercio con mayor altura de ola en un registro de oleaje.

De acuerdo con la relación entre la longitud de onda y profundidad del medio se puede clasificar el régimen de propagación del oleaje en tres categorías: aguas someras, aguas intermedias y aguas profundas de la siguiente manera, dónde h es la profundidad y L es la longitud de onda.

1. Aguas someras $\frac{h}{L} \geq \frac{1}{2}$
2. Aguas intermedias $\frac{1}{20} < \frac{h}{L} < \frac{1}{2}$
3. Aguas profundas $\frac{h}{L} \leq \frac{1}{20}$

Generalmente, el oleaje generado por viento en condiciones limitadas por *fetch*, como el caso de una laguna, el oleaje se propaga bajo condición de aguas profundas, en donde su longitud es corta comparada con la profundidad.

2.3.2 Modelos de generación de oleaje

Debido a la nula información existente en la Laguna Grande en cuanto a su oleaje, se requiere utilizar modelos de generación de oleaje paramétricos que permitan obtener la aproximación más exacta con la información que fue posible recolectar, en particular datos de velocidad y dirección de viento.

Las primeras técnicas de pronóstico y generación de oleaje fueron desarrolladas durante y después de la segunda guerra mundial, donde utilizando modelos simples basados en relaciones empíricas entre variables dependientes se puede obtener una aproximación local de los parámetros de oleaje. Con el pasar de los años, estas técnicas han ido evolucionando, y los esfuerzos se concentraron en resolver matemáticamente el comportamiento completo del oleaje generándose así modelos físicos, de acuerdo con su nivel de simplificación se subdividen en modelos de primera, segunda y tercera generación los cuales permiten una predicción más detallada del comportamiento del oleaje en la zona (Ramirez, 2007).

Los últimos avances en generación de oleaje se han destinado a la creación de redes neuronales, los cuales mediante un input se programan las “neuronas” permitiendo una retroalimentación entre ellas lo cual genera resultados aún más precisos (Ramirez, 2007).

Los modelos empíricos tienen como ventaja la poca necesidad de datos para obtener una aproximación de la altura y periodo significativo del oleaje generado por viento. Sin embargo, la principal desventaja es que solo permiten obtener pronósticos locales o puntuales de estos parámetros para condiciones constantes y en solo una dimensión.

A continuación, se presentarán los dos principales modelos paramétricos que utilizan parámetros de velocidad de viento y *fetch*.

El método SMB se basa en la predicción de oleaje en aguas profundas basándose en el concepto de “altura significativa” considerando una dirección y velocidad constante de viento. Este método permite relacionar la altura y el periodo significativo con la velocidad del viento en la superficie del agua, el *fetch* y la profundidad del agua.

Para la realización de este método, Bretschneider (1952) utiliza los datos obtenidos por Sverdrup y Munk (1947) junto con otro set de datos recolectados por la Universidad de California a modo de calibración generando una serie de gráficos adimensionales para obtener la altura de periodo significativo los cuales fueron calibrados y expresados en las Ecuaciones mostradas a continuación.

En este método la altura de se calcula de acuerdo con la Ecuación 2.3.

$$H_s = \frac{U_s^2}{g} \cdot H_{inf} \cdot \tanh\left(K_3 \cdot \left(\frac{d \cdot g}{U_s^2}\right)^{m_3}\right) \cdot \tanh\left[\frac{K_1 \cdot \left(\frac{F \cdot g}{U_s^2}\right)^{m_1}}{\tanh\left(K_3 \cdot \left(\frac{d \cdot g}{U_s^2}\right)^{m_3}\right)}\right] \quad (2.3)$$

Donde H_s es la altura significativa (m), U_s es la velocidad del viento en la superficie del agua (m/s), g es la aceleración de gravedad ($\frac{m}{s^2}$), d es la profundidad del agua (m), F es el fetch y H_{inf} , K_1 , K_3 , m_1 , m_3 son coeficientes adimensionales iguales a 0,283, 0,0125, 0,53, 0,42, 0,75 respectivamente.

Por su lado el periodo significativo se calcula de acuerdo con la Ecuación 2.4.

$$T_s = \frac{U_s^2}{g} \cdot T_{inf} \cdot \tanh\left(K_4 \cdot \left(\frac{d \cdot g}{U_s^2}\right)^{m_4}\right) \cdot \tanh\left[\frac{K_2 \cdot \left(\frac{F \cdot g}{U_s^2}\right)^{m_2}}{\tanh\left(K_4 \cdot \left(\frac{d \cdot g}{U_s^2}\right)^{m_4}\right)}\right] \quad (2.4)$$

Donde T_s es el periodo significativo (s), U_s es la velocidad del viento en la superficie del agua (m/s), g es la aceleración de gravedad ($\frac{m}{s^2}$), d es la profundidad del agua (m), F es el fetch y T_{inf} , K_2 , K_4 , m_2 , m_4 son coeficientes adimensionales iguales a 7,54, 0,077, 0,833, 0,25, 0,375 respectivamente.

Por otro lado, el proyecto “The Joint North Sea Wave Project” (JONSWAP) se concibió como una empresa cooperativa por varios científicos en Inglaterra, Holanda, EEUU y Alemania para obtener datos espectrales de oleaje de suficiente extensión y densidad con los cuales se pudiera generar un modelo empírico de generación de oleaje.

Para su realización se utilizaron una serie de sensores operando cuasi-continuamente en un periodo de cuatro semanas en el mes de Julio de 1969 en una extensión de 160 km desde la isla Sylt hasta el Mar del Norte obteniendo más de 2000 espectros de oleaje medidos, de los cuales 121 correspondieron a condiciones de viento estacionarias y homogéneas.

El resultado de esta investigación es un modelo que permite obtener la altura y periodo significativo en el cual se proponen parámetros adimensionales de la velocidad de viento presentados en la Ecuación 2.5 y Ecuación 2.6 y del oleaje presentados en la Ecuación 2.7 y Ecuación 2.8

$$F^* = \frac{g \cdot F}{U_{10}^2} \quad (2.5)$$

$$t_d^* = \frac{g \cdot t_d}{U_{10}} \quad (2.6)$$

$$H_s^* = \frac{g \cdot H_s}{U_{10}^2} \quad (2.7)$$

$$T_p^* = \frac{g \cdot T_p}{U_{10}} \quad (2.8)$$

Donde U_{10} es la velocidad de viento medida a 10 metros sobre la superficie libre ($\frac{m}{s}$), g es la aceleración de gravedad ($\frac{m}{s^2}$), t_d es el tiempo de duración de la tormenta (s), F es el fetch (m), T_p es periodo significativo (s), H_s es la altura significativa (m) y el uso de “*” indica su símil adimensional.

Luego, define que existen dos casos en cuanto a la altura de la ola generada para una velocidad de viento y *fetch* dados.

El primero en el cual el mar está completamente desarrollado, H_s y T_p dependen únicamente de U_{10} . H_s^* y T_p^* son constantes (Pierson-Moskowitz, 1964) iguales a 0,243 y 7,65 respectivamente.

En el segundo caso considera que la altura de ola está limitada por *fetch*, en este caso los parámetros adimensionales de H_s^* , T_p^* y t_d^* están definidos por la Ecuación 2.9, Ecuación 2.10 y Ecuación 2.11 respectivamente

$$H_s^* = 0,0016 \cdot (F^*)^{1/2} \quad (2.9)$$

$$T_p^* = 0,286 \cdot (F^*)^{1/3} \quad (2.10)$$

$$t_d^* = 68,8 \cdot (F^*)^{2/3} \quad (2.11)$$

2.4 Estructuras disipadoras de oleaje

Las estructuras disipadoras de oleaje tienen por función reducir el oleaje transmitido en función de la reflexión, difracción, atenuación, interferencia y transmisión de su energía en un movimiento oscilatorio.

Existen diferentes tipos de rompeolas como lo pueden ser muros, diques, espigones, etc. Sin embargo, para efectos de este estudio se debe considerar la condición de Santuario de la Naturaleza de Laguna Grande por lo que la estructura a seleccionar debe permitir ser desinstalada y trasladada, siendo los rompeolas flotantes la principal opción.

Según United State, U.S Army Corps of Engineers (2002), existen once diferentes tipos de rompeolas flotantes clasificados de la siguiente manera:

- 1.- Con pontones flotantes
- 2.- Con inclinación frontal
- 3.- De cadenas de llantas
- 4.- Con pivote vertical central tipo “A”
- 5.- Conformado por cubos flotantes
- 6.- Con paredes porosas
- 7.- Con mecanismos mecánicos hidráulicos
- 8.- De membranas flotantes
- 9.- Con accesorios generadores de turbulencia
- 10.- Con generador de oleaje artificial
- 11.- Sistemas de almacenamiento flotante

El uso de los rompeolas flotantes, si bien es relativamente común en el mundo, pocos de ellos han sido registrados en documentos en cuanto a su diseño y desempeño (Rueda, 2012). Sin embargo, existen estudios que analizan los desempeños de distintos tipos de rompeolas a nivel mundial que han sido documentados.

Como factor común de estos estudios se ha definido que los rompeolas con pontones flotantes, presentado en la Figura 2.3, son ampliamente aceptados como mejor opción a nivel mundial debido a la relación entre su desempeño, simplicidad de diseño y mantención (Hales, 1981). Este buen desempeño puede ser mejorado aún más, ya que al utilizar pontones dobles se aumenta su inercia sin aumentar su masa lo cual mejora las propiedades hidrodinámicas y genera turbulencia en el espacio existente entre cada pontón (Koutandos *et al.*, 2005).

Por otro lado, los rompeolas de cadenas de llantas, presentado en la Figura 2.4, son considerados como buena opción por su bajo costo, facilidad de traslación y su bajo nivel de especialidad en la mano de

obra y maquinaria necesaria para la instalación. No obstante, tiene una serie de desventajas que se deben considerar (McCartney, 1985):

- 1.- Menor vida útil
- 2.- Acumulación de sedimentos, vida marina o basura
- 3.- Mayor impacto visual
- 4.- Eficaz con oleaje hasta 3 pies de altura y 4 segundos de periodo



Figura 2.3 Ejemplo rompeolas tipo pontón



Figura 2.4 Ejemplo rompeolas flotante tipo cadena de llantas

Actualmente en el agua marina no se han obtenido resultados de efectos nocivos en la vida marina ante la presencia de llantas como por ejemplo en arrecifes de llantas. Sin embargo, Hartwell *et al.* (1998) realizaron un experimento con pececillos y camarones de lixiviación y bioensayos utilizando tanques de agua corriente con llantas donde encontró que el nivel de toxicidad disminuye con el nivel de salinidad. Adicionalmente, es necesario señalar que las llantas desechadas en el mar al degradarse aportan una gran cantidad de micro plásticos en el mar.

Por otro lado, la inclusión de una rejilla con esferas en su interior mejora notoriamente el rendimiento de un rompeolas de pontón doble (Chun-Yan, 2015). Este estudio experimental plantea esta nueva configuración de rompeolas evaluando su desempeño con otros tres modelos en las mismas condiciones variando la altura de ola incidente y su periodo. La Figura 2.5 presenta el nuevo tipo de rompeolas utilizado en los experimentos



Figura 2.5 Modelo de rompeolas experimental

En este estudio, el Modelo 1 presenta un rompeolas tipo pontón doble sin rejilla ni esferas, el Modelo 2 incluye la rejilla, pero sin esferas, el Modelo 3 incluye rejilla y esferas y el Modelo 4 presenta un rompeolas tipo pontón-caja.

Los tres casos probados en este estudio serán presentados en la Tabla 2.1 y sus resultados en la Figura 2.6, Figura 2.7 y Figura 2.8

| Caso | H [m] | T [s] |
|------|--------------------------|----------------------|
| 1 | Variable [0,075 - 0,225] | Fijo = 1 |
| 2 | Fija = 0,15 | Variable [0,8 - 1,5] |
| 3 | Fija = 0,2 | Variable [0,9 - 1,5] |

Tabla 2.1 Casos estudio experimental nuevo tipo de rompeolas

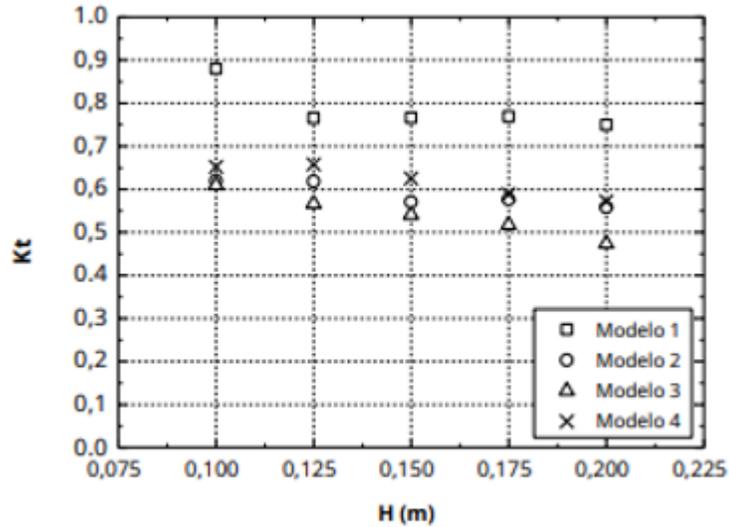


Figura 2.6 Resultados estudio experimental con (T=1s)

Fuente: Chun-Yan (2015)

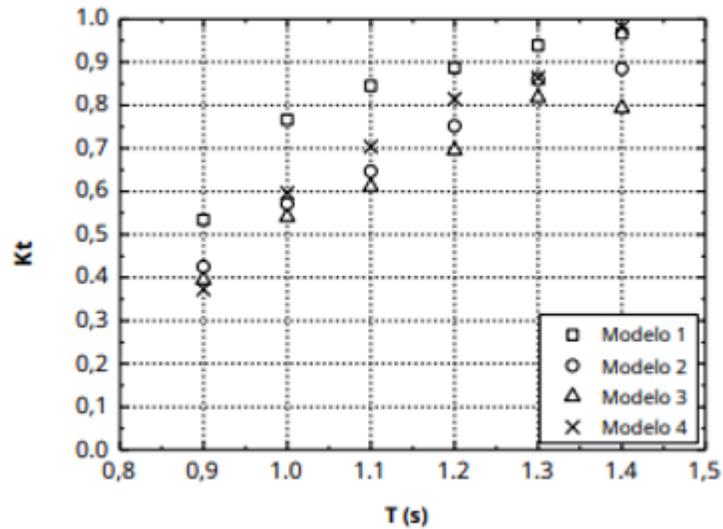


Figura 2.7 Resultados estudio experimental con (h=0,15m)

Fuente: Chun-Yan (2015)

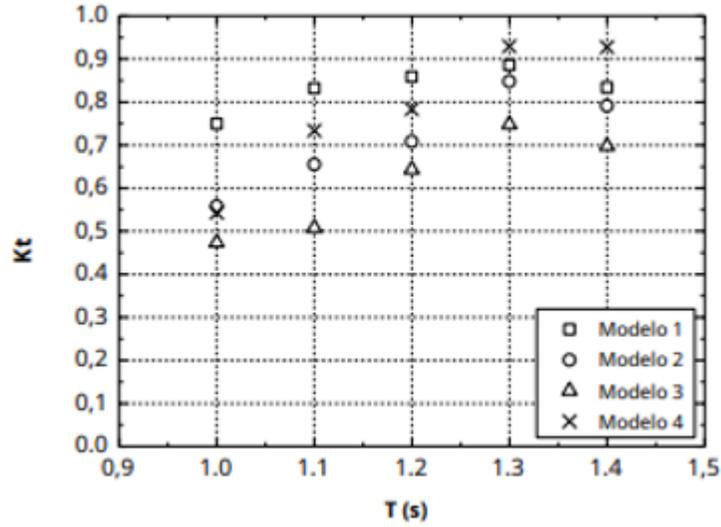


Figura 2.8 Resultados estudio experimental con (h=0,2m)

Fuente: Chun-Yan (2015)

2.5 Diseño de rompeolas flotantes

Para definir el desempeño de un rompeolas se utiliza el coeficiente de transmisibilidad (C_f) que relaciona la altura de ola transmitida con la altura de ola incidente mostrada en la Ecuación 2.12.

$$C_f = \frac{h_t}{h_i} \tag{2.12}$$

El diseño de un rompeolas tipo pontón-caja, se realiza considerando una estructura en forma de paralelepípedo de dimensiones finitas representado en la Figura 2.9. Adicionalmente se asume que la ola no sobrepasa nunca la altura del rompeolas (Hales, 1981).

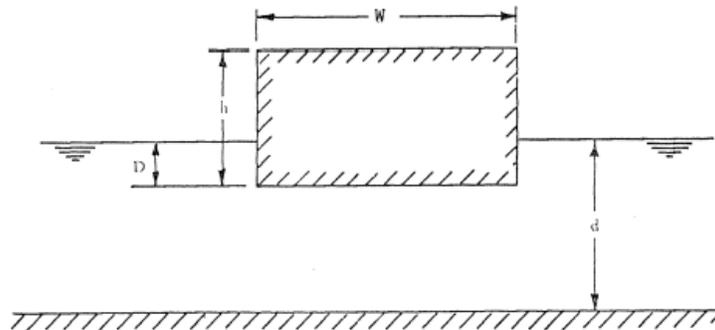


Figura 2.9 Esquema rompeolas tipo pontón-caja para su diseño

Donde “W” es el ancho de rompeolas, d es la profundidad del agua, “D” es la profundidad a la que está sumergido el rompeolas y “h” es la altura del rompeolas.

En Merlevede (2012) se realiza una comparación entre las ecuaciones presentadas por Macagno (1953), Jones (1971), Stoker (1957) y Wagner (2011) revisándose mediante los estudios experimentales realizados por Tolba (1999), Nakamura *et al.* (2003) y Koutandos *et al.* (2005). Como resultado se obtiene que la ecuación de Wagner se acerca de mejor forma a los resultados obtenidos de forma experimental.

2.6 Conclusiones

En este capítulo se habló de la relación del viento con el oleaje, la cual permite obtener una caracterización del oleaje en la laguna mediante modelos empíricos de generación de oleaje destacando los modelos JONSWAP y SMB. Adicionalmente se explicó el cómo se desestabiliza el bote ante la presencia de una ola.

Por otra parte, los rompeolas flotantes figuran como una buena opción considerando la condición de santuario de la naturaleza otorgado a la laguna grande, ya que es una de las formas menos invasivas de reducir el oleaje. Para su diseño Wagner (2011) presenta los mejores resultados de acuerdo con lo propuesto por Merlevede (2005).

CAPÍTULO 3 : METODOLOGÍA

3.1 Introducción

En la primera parte del presente capítulo se realizará la descripción del área de estudio, caracterizando la zona, junto a los antecedentes disponibles al momento de realizar el trabajo. En la segunda parte se describe el trabajo realizado tanto en el procesamiento de la información, como en la obtención de ésta, considerando la revisión bibliográfica presentada en el capítulo anterior.

3.2 Levantamiento y procesamiento de datos de viento

Para realizar el levantamiento de información, el día 15 de octubre de 2021 se instaló un sensor Young modelo 05103 a 4,5 metros de altura sobre la superficie del agua en la ribera norte de la Laguna Grande, específicamente en las coordenadas $36^{\circ} 50' 56''$ S, $73^{\circ}06'11'$ W. Este sensor registra información de velocidad y dirección de viento cada 15 segundos entregando un promedio cada 15 minutos, estos datos son almacenados en un logger modelo CR1000 el cual se mantuvo en funcionamiento durante la duración de este trabajo.

En la Figura 3.1 se muestra la ubicación de la estación instalada en la laguna desde una imagen obtenida por Google Earth orientada hacia el norte y representado por un punto de color rojo. Por otro lado, en la Figura 3.2 se muestra una foto de la estación instalada.

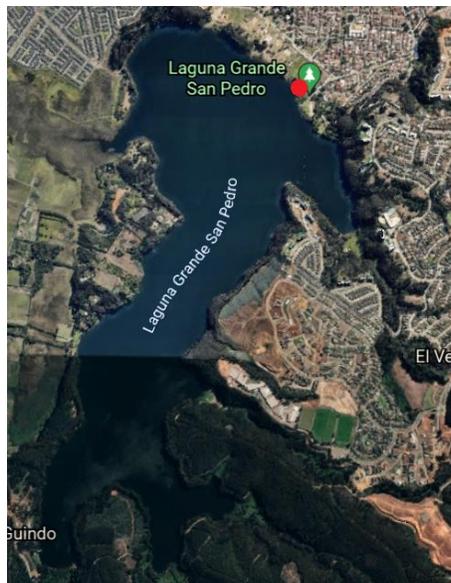


Figura 3.1 Ubicación sensor de viento en Laguna Grande



Figura 3.2 Sensor Young modelo 05103

Adicionalmente, se obtuvieron datos de velocidad y dirección de viento del año 2021 de la estación meteorológica Carriel Sur, con los cuales se buscará una relación entre datos obtenidos por el sensor instalado y la estación antes mencionada.

Los datos de viento, usualmente se deben medir a 10 metros de altura sobre el nivel de la superficie del agua, sin embargo, debido a que el sensor instalado en la laguna está ubicado a una altura 4,5 metros se debe escalar mediante un perfil logarítmico siguiendo la Ecuación 3.1.

$$V_z = V_{ref} \cdot \frac{\ln(Z/Z_0)}{\ln(Z_{ref}/Z_0)} \quad (3.1)$$

Donde “ V_z ” es la velocidad a la altura requerida [m/s], “ V_{ref} ” es la velocidad en el punto de referencia [m/s], “ Z ” es la cota de interés sobre la superficie, “ Z_{ref} ” es la cota de referencia y “ Z_0 ” es la altura de rugosidad tabulada y presentada en la Figura 3.3, la clasificación de rugosidad de Davenport obtenida de Diaz (2013).

| Clases | Rugosidad Zo. m | Rasgos del paisaje |
|----------------|--------------------|---|
| Sup. acuáticas | 0.0002 | Aguas abiertas (mar, lago, embalse, nieve sobre terreno plano, desiertos, concreto. Varios km sin obstáculos desde el sitio de medición del viento) |
| Suave | 0.005 | Superficie sin obstáculo notable y sin vegetación: playas, hielo, pantanos |
| Abierto | 0.03 | Terreno llano con gramíneas o muy poca vegetación. Obstáculos aislados con separación de al menos 50 veces la altura, h |
| Aprox. abierto | 0.10 | Área cultivada o natural con cobertura vegetal baja. Obstáculos ocasionales (edificaciones o árboles) con distancia de al menos 20 h el obstáculo |
| Rugoso | 0.25 | Área natural o cultivada con cultivos altos, obstáculos porosos escasos separados por 12h o 15 h, o con objetos sólidos, (edificaciones) distancia de 8 h a 12 h |
| Muy rugoso | 0.5 | Zona de cultivos intensos con obstáculos en grupos (granjas, bosque) etc., separados por 8 h: Plantaciones, frutales, bosques jóvenes, zonas urbanas de baja altura con separación de 3 a 4 edificaciones y sin árboles altos |
| Skimming | 1.0 | Zonas con obstáculos altos de altura similar y separación de igual distancia que la altura, como bosques adultos y zonas urbanas densas |
| Caótico | - 2.0 | Centros de las ciudades con mezcla de edificaciones de alturas diversas, bosques de altura irregular con zonas deforestadas |

Figura 3.3 Clasificación de rugosidad de Davenport

Se procede a realizar las series de tiempo de dirección y velocidad de viento con los datos obtenidos. Para ello se utilizará el software Matlab R2021b donde se importarán los datos escalados a 10 metros de altura desde una planilla en Excel y se realizarán los gráficos respectivos con respecto al tiempo, de esta forma se podrá observar el comportamiento del viento a lo largo del tiempo.

Se realizará una rosa de vientos, esta permite ver en un mismo grafico la dirección, frecuencia y velocidad del viento para definir las direcciones principales en las que este sopla. Esta se realizará mediante una función programada en el software Matlab R2021b que requiere como input las mediciones de velocidad y dirección viento en formato vector.

Se obtendrán las velocidades máximas y medias junto con la frecuencia de datos que hay por cada una, de esta forma se espera tener una idea visual de cómo se comportará el oleaje en la laguna

3.3 Extensión serie de tiempo velocidad de viento

La serie de datos obtenida consta de un periodo de tiempo desde el 15/10/2021 hasta el 04/01/2022 debido a que fue el periodo de estudio de la memoria y no se tenían registros anteriores. Esto implica que existen meses del año en los cuales no se tiene información de las condiciones presentes en la laguna.

Considerando la corta duración del registro de datos en Laguna Grande se extiende la serie de tiempo de velocidad de viento, para ello se utilizará la aplicación System Identification del software Matlab R2021b.

Esta aplicación requiere ingresar como “input” la serie de datos de la estación Carrier Sur y como “output” la serie de datos de Laguna Grande, este set se divide en 2 generando una serie de estimación y una serie de validación. La serie de estimación permite calibrar un modelo matemático permitiendo que los datos ingresados como “input” se asemejen lo más posible a los ingresados como “output”, mientras que en los datos in de validación se utilizan para obtener el porcentaje de fiabilidad del modelo.

Para efectos de este trabajo se utilizó una función de transferencia, ésta se define como la respuesta de un sistema ante una entrada dada. Se obtiene mediante el cociente entre 2 polinomios correspondientes a la transformada de Laplace de la función que modela los datos de salida dividida por la función de entrada. Para identificar los modelos asociados a los datos de entrada y salida, se realizan aproximaciones utilizando un modelo no lineal de mínimos cuadrados.

En la Ecuación 3.2 se presenta el modelo generado con este proceso

$$\frac{0,397 \cdot v_c^2 - 0,00109 \cdot v_c + 0,02688}{v_c + 0,0311} \quad (3.2)$$

Donde v_c es la velocidad de viento medida por la estación Carriel Sur.

3.4 Estimación del oleaje en la Laguna Grande

Utilizando el software Matlab R2021b se generaron vectores para las direcciones principales en las que sopla el viento divididas en intervalos de 10° obteniendo la frecuencia de datos, velocidad máxima y velocidad media para cada intervalo.

El *fetch* efectivo se calculará midiendo en línea recta de costa a costa pasando por el punto medio cada intervalo y se trazarán líneas equiespaciadas a cada lado por 6° cada una midiendo su longitud. Estos datos serán traspasados a una tabla en Excel donde se calculará el *fetch* efectivo mediante la Ecuación 2.2.

Se codificarán funciones en el software Matlab R2021b las cuales tendrán por objetivo calcular los parámetros H_s y T_p mediante los modelos JONSWAP y SMB, para ello se asumirá que la altura de ola será limitada únicamente por *fetch*, debido a que es el caso más desfavorable. El modelo JONSWAP utiliza como input el *fetch* efectivo y la velocidad máxima de viento medida a 10 metros sobre la superficie del agua, mientras que para el segundo modelo se le agregará la profundidad de la laguna. Estos datos serán procesados utilizando las ecuaciones presentadas en la Sección 2.3.2 obteniendo como resultado los parámetros requeridos de H_s y T_p .

Se calculará la longitud de onda para cada una de las direcciones mediante el mismo software utilizando una función que permite realizar un proceso iterativo en el cual se utilizará la ecuación de dispersión presentada como Ecuación 3.3.

$$\omega^2 = g \cdot k \cdot \tanh(h \cdot k) \quad (3.3)$$

Donde “ ω ” es la frecuencia angular de la onda, “ k ” es el número de onda y “ h ” es la profundidad de la laguna. Considerando que “ ω ” se relaciona con el periodo “ T ” mediante la Ecuación 3.4. se programará la función de modo que varíe “ k ” desde 0 en adelante hasta que la diferencia entre la “ w ” calculada mediante 3.3 y la calculada por la función sea menor a $1 \cdot 10^{-5}$.

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi}{T} \quad (3.4)$$

La longitud de onda se obtiene mediante la Ecuación 3.5 utilizando el valor de “ k ” obtenido.

$$L = \frac{g \cdot T^2 \cdot \tanh(k \cdot h)}{2 \cdot \pi} \quad (3.5)$$

3.5 Física de la interacción bote – oleaje

Para plantear el problema físico de inestabilidad se simplifican las formas del bote y cuerpo del remero a formas geométricas representadas en la Figura 3.4 donde se especifica el peso de cada sección y su altura

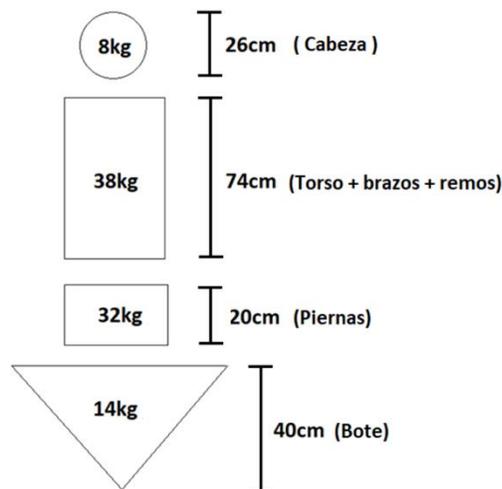


Figura 3.4 Simplificación conjunto bote-remero

Se calculará el centro de gravedad del cuerpo completo (CG) y el centro de flotabilidad (CF), puntos en los cuales serán aplicadas las fuerzas de peso propio (P) y empuje (F) respectivamente. En la Figura 3.5 se muestra el diagrama de cuerpo libre.

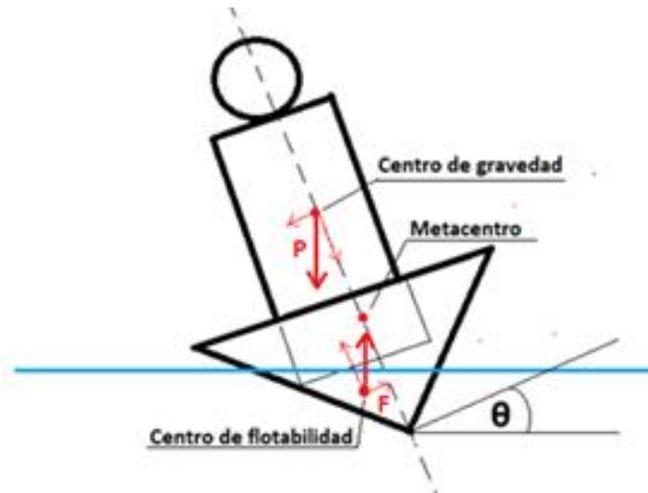


Figura 3.5 Diagrama de cuerpo libre conjunto bote-remero

Se asume que existe un ángulo “ θ ” de inclinación con respecto al plano horizontal. Los componentes de cada fuerza en los ejes variarán dependiendo del valor de este ángulo, siguiendo la Ecuación 3.6, Ecuación 3.7, Ecuación 3.8 y Ecuación 3.9, generando momento volcante con respecto al metacentro (MC). La posición del CF varía también debido al cambio de la sección hundida del bote.

$$P_x = P \cdot \cos(\theta) \quad (3.6)$$

$$P_y = P \cdot \sin(\theta) \quad (3.7)$$

$$F_x = F \cdot \cos(\theta) \quad (3.8)$$

$$F_y = F \cdot \sin(\theta) \quad (3.9)$$

El momento volcante ejercido por cada fuerza se calculará mediante la Ecuación 3.10.

$$M = F \cdot d \quad (3.10)$$

Donde M es el momento volcante ejercido por la fuerza F [N-m] y d es la distancia en el eje perpendicular a la dirección de la fuerza entre esta y el MC [m].

Se hará variar “ θ ” a modo de encontrar el punto de equilibrio donde la sumatoria de momento es igual al cero definiéndolo como ángulo límite de inclinación. Este ángulo dependerá de la altura de ola y su longitud de onda representado en la Figura 3.6. Debido a que la longitud de onda es constante, se obtiene la altura de ola límite utilizando la Ecuación 3.11.

$$h_{lim} = \tan(\theta) \cdot \frac{L}{2} \quad (3.11)$$

Donde “ h_{lim} ” es la altura límite de la ola [m] y “ L ” es la longitud de onda de la ola [m].

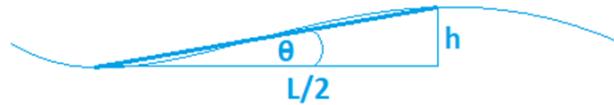


Figura 3.6 Relación ángulo de inclinación y altura límite

3.6 Diseño del dispositivo reductor de oleaje

El diseño del dispositivo se realizará mediante un rompeolas tipo pontón - caja tal como se menciona en la Sección 2.5.1, necesiéndose como input la altura de ola incidente (h_i), la altura de ola que se desea transmitir (h_t) y longitud de onda de la ola (L). El primer término se obtiene de la altura máxima de ola generada por viento en la Sección 3.4 junto con la longitud de onda L , mientras que h_t se definirá según tres casos:

1. Altura h_{lim} obtenida mediante diagrama de cuerpo libre.
2. Consideración de altura umbral de 0,1 m
3. Considerando la mitad de la altura del bote (0,2 m)

De esta forma utilizando la Ecuación 2.12 se obtendrán coeficientes de transmisibilidad para los cuales se realizará el diseño.

Uno de los supuestos realizados por Hales (1981) en su metodología, es que la ola no debe sobrepasar al rompeolas. Por lo que altura del rompeolas sobre la superficie del agua será considerada igual a “ h_i ” adicionando una revancha de 0,2 metros, común en proyectos hidráulicos.

Para el diseño se seleccionó la ecuación propuesta por Wagner (2011) debido a su buen ajuste ante los métodos experimentales en comparación a las otras ecuaciones propuestas. Para ello se hará variar

de forma iterativa mediante una planilla Excel el ancho del rompeolas “W” con lo cual se obtendrá el valor de la altura de ola transmitida “ h_t ” que permita obtener el “ C_t ” requerido.

La Ecuación 3.12 presenta la ecuación de Wagner utilizada.

$$C_t = \frac{g \cdot T^2 \cdot \sinh(k \cdot (d-D))}{2 \cdot \pi^2 + (W+d \cdot \tanh(3,5 \frac{D}{d})) \cdot \cosh(k \cdot d)} \quad (3.12)$$

Donde “T” es el periodo de la ola incidente [s], “k” es el número de onda de la ola incidente y “g” es la aceleración de gravedad [m/s²]

De acuerdo con lo planteado en Hales (1981) el hormigón presenta una buena respuesta ante las condiciones de oleaje. La materialidad del rompeolas será considerada de poliestireno expandido para asegurar la flotabilidad, recubierta con una capa de hormigón de 2 cm. La masa total del dispositivo será calculada mediante la Ecuación 3.13.

$$M = (W - 0,02) \cdot (h - 0,02) \cdot A \cdot \rho_{pol} + 2 \cdot (W \cdot A + h \cdot A + W \cdot h) \cdot 0,02 \cdot \rho_{hor} \quad (3.13)$$

Donde “M” es la masa del rompeolas [kg], “ ρ_{pol} ” es la densidad del poliestireno expandido igual a 10 [kg/m³], “ ρ_{hor} ” es la densidad del hormigón considerada igual a 2.400 [kg/m³] y “A” es la longitud del rompeolas la cual será considerada unitaria.

La altura sumergida del rompeolas “d” se obtiene mediante un equilibrio de fuerzas, donde el peso propio (P) y empuje (F) son de igual magnitud y sentido contrario. La Ecuación 3.14 y Ecuación 3.15 presentan el cálculo de cada una de estas fuerzas.

$$P = M \cdot g \quad (3.14)$$

$$F = W \cdot d \cdot A \cdot \rho_a \cdot g \quad (3.15)$$

Donde “g” es la aceleración de gravedad [m/s²], “V” es el volumen sumergido [m³], “ ρ_a ” es la densidad del agua igual a 1000 [kg/m³]

Se realizará el diseño considerando las olas generadas para cada dirección de viento con los datos medidos en Laguna Grande, la velocidad de viento se considerará como la velocidad máxima medida en cada dirección y se seleccionará el caso más desfavorable. En segundo lugar, se realizará el diseño para dos casos más, utilizando la serie de tiempo desde el 01/11/2021 hasta el 04/01/2022 generada, explicada en la Sección 3.4, que asegure el funcionamiento del rompeolas para el 100 % y 80 % del tiempo.

3.7 Conclusiones

Debido a la poca cantidad de datos medidos es necesario extender la serie de tiempo para tener una aproximación de lo que ocurre en el resto del año, se propone evaluar la relación con los datos obtenidos por la estación meteorológica Carriel Sur. Se determinarán las direcciones principales en las que sopla el viento y caracterizará el oleaje mediante su altura y periodo significativo donde se definirá el escenario más desfavorable con el que se diseñará el rompeolas.

Para el diseño de un rompeolas flotante tipo pontón-caja se utilizará la ecuación presentada por Wagner (2011) para diferentes casos donde se variará la altura de ola incidente y transmitida donde finalmente se decidirá por el más eficiente de acuerdo con lo solicitado.

CAPÍTULO 4 : RESULTADOS

4.1 Introducción

En este capítulo se presentarán los resultados de las diferentes etapas descritas en el capítulo anterior, comenzando por la caracterización del viento en la zona, posteriormente la caracterización de oleaje en la laguna y por último el diseño del rompeolas. Adicionalmente presentarán dos diferentes posibilidades de orientación de la pista de acuerdo con el oleaje generado.

4.2 Caracterización del viento

Se generaron las series de tiempo de dirección y velocidad de viento presentadas en la Figura 4.1 y Figura 4.2. con lo que posteriormente se obtuvo la rosa de vientos presentada en la Figura 4.3.

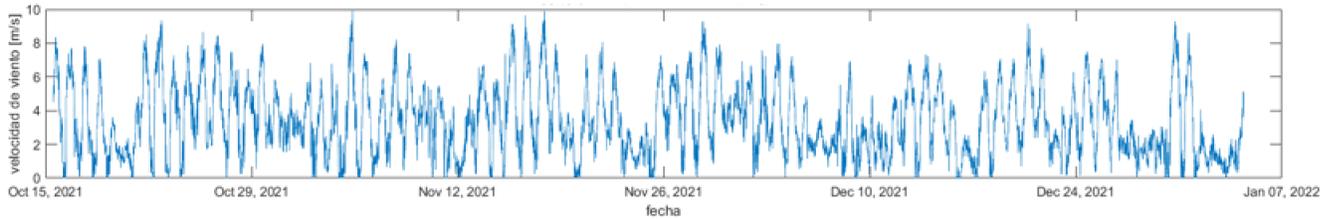


Figura 4.1 Serie de tiempo de velocidad de viento Laguna Grande desde 15/10/2021 hasta 04/01/2022

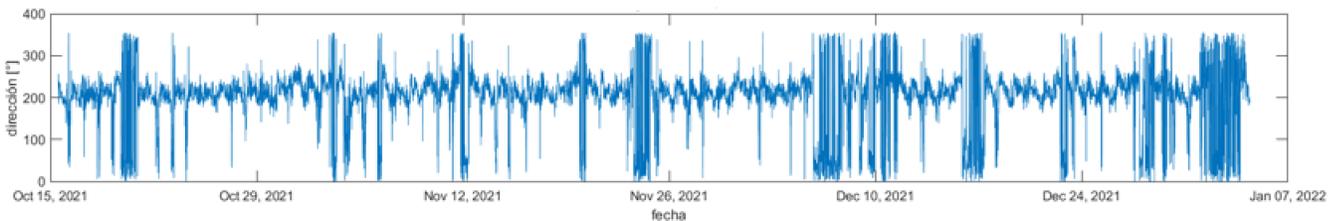


Figura 4.2 Serie de tiempo de dirección de viento Laguna Grande desde 15/10/2021 hasta 04/01/2022

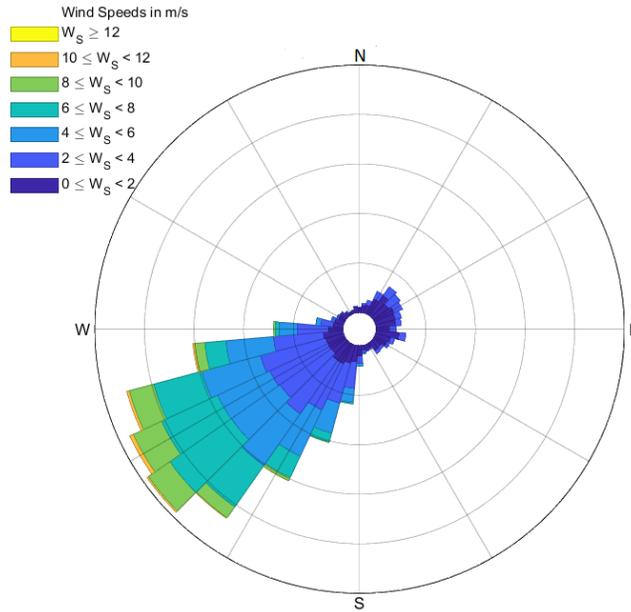


Figura 4.3 Rosa de vientos Laguna Grande desde 01/11/2020 hasta 04/01/2022

En cuanto a la velocidad de viento se deduce que a medida que avanza el verano, esta tiende a reducir levemente su valor (finales de diciembre a principios de enero), acentuándose levemente en las mismas fechas la frecuencia en dirección Norte.

Por lo tanto, se observa que el viento en la Laguna Grande proviene principalmente desde dirección Suroeste entre los 205° y 206° con respecto al Norte con velocidades de hasta 10,45 [m/s]. La rosa de los vientos representa de manera más clara este comportamiento graficando la frecuencia de velocidades clasificadas en su dirección y velocidad.

Para la estación meteorológica Carrier Sur, se realizaron las series de tiempo para el mismo periodo que en la laguna mostradas en la Figura 4.4, Figura 4.5 y Figura 4.6, también se realizaron las series para un año calendario desde el 1/11/2020 hasta el 04/01/2022 presentadas en la Figura 4.7, Figura 4.8 y Figura 4.9.

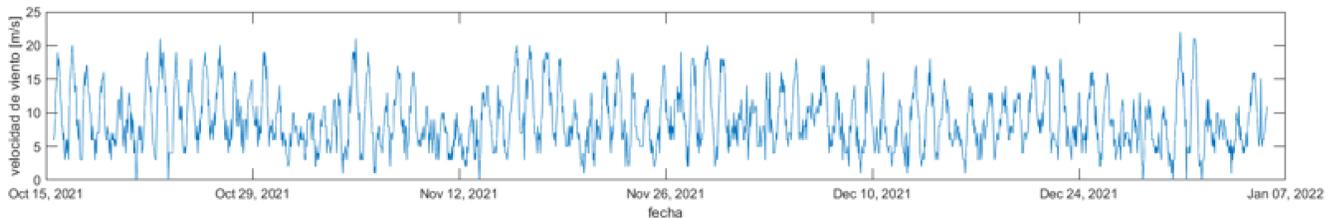


Figura 4.4 Serie de tiempo de velocidad de viento Carrier Sur desde 15/10/2021 hasta 04/01/2022

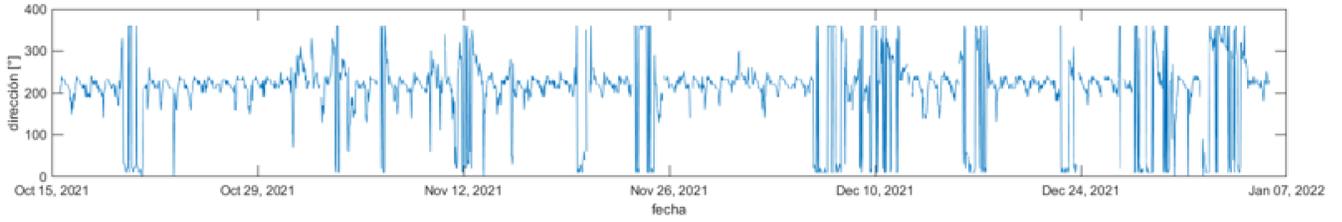


Figura 4.5 Serie de tiempo de dirección de viento Carrier Sur desde 15/10/2021 hasta 04/01/2022

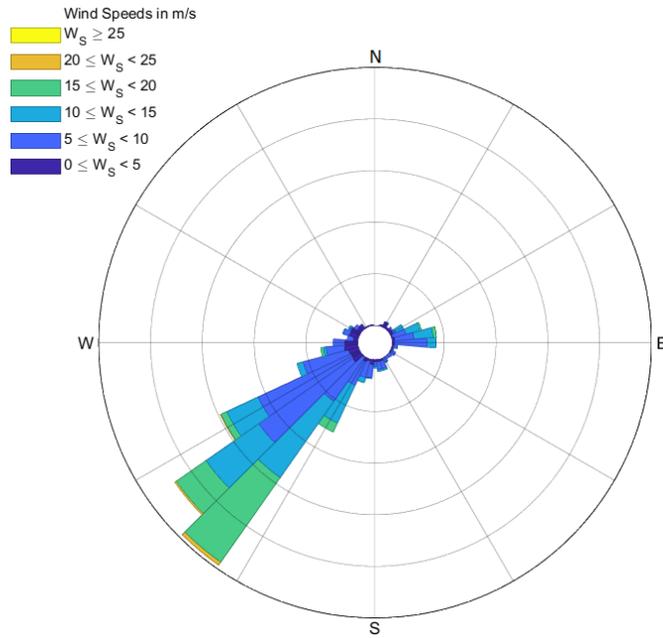


Figura 4.6 Rosa de vientos Carriel Sur desde 01/11/2020 hasta 04/01/2022

La estación de Carriel Sur muestra un comportamiento similar a lo obtenido en la Laguna Grande, sus principales diferencias son que en este caso se aprecian direcciones desde el Este y velocidades considerablemente mayores.

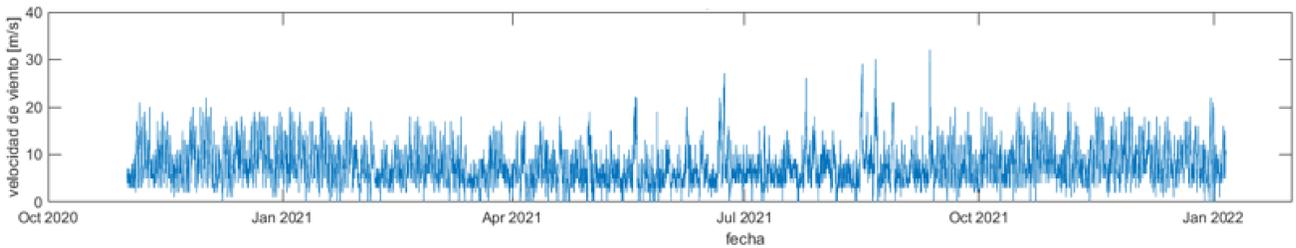


Figura 4.7 Serie de tiempo de velocidad de viento Carrier Sur desde 01/11/2020 hasta 04/01/2022

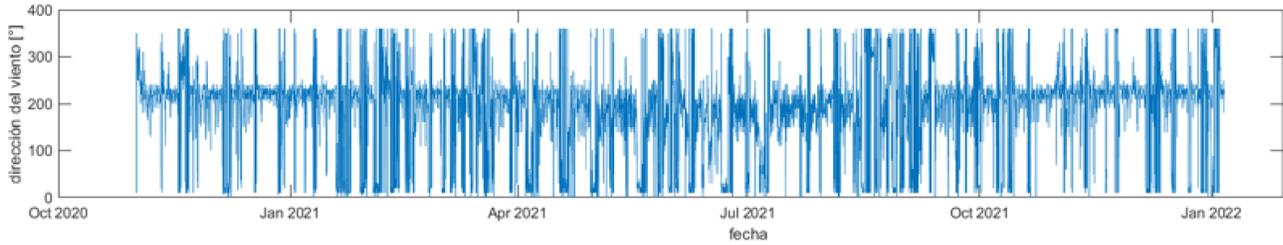


Figura 4.8 Serie de tiempo de dirección de viento Carrier Sur desde 01/11/2020 hasta 04/01/2022

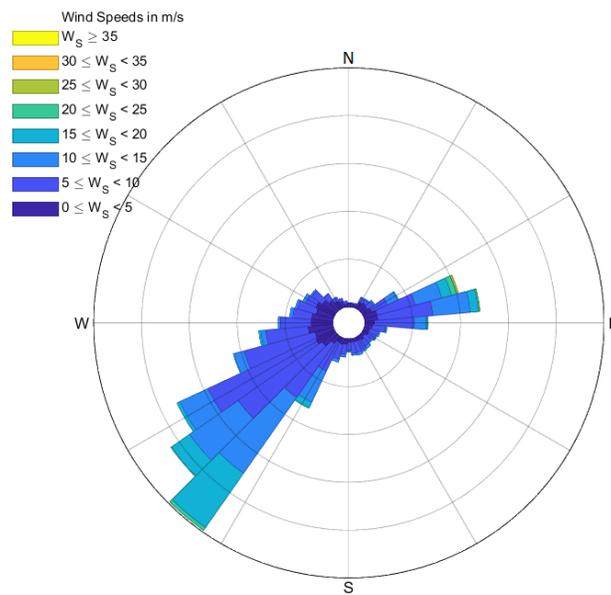


Figura 4.9 Rosa de vientos Carrier Sur desde 01/11/2020 hasta 04/01/2022

Al ver la serie de tiempo de un año calendario completo para Carriel Sur se observa que el comportamiento se mantiene relativamente constante a lo largo del año. Sin embargo, las velocidades provenientes del Este aumentan considerablemente su frecuencia y entre los meses de junio y septiembre aumentan notoriamente los valores *peak* de velocidades.

El viento proveniente desde el Este no se evidencia en la Laguna Grande, esto asume que se debe a la presencia del cerro donde se ubica el barrio de Andalué en San Pedro de la Paz actuando como barrera natural para vientos provenientes de esa dirección.

La Figura 4.10 representa una superposición de las series de tiempo de velocidad de viento entre los días 01/12/2021 y 08/12/2021 a modo de comparar el comportamiento del viento en ambas estaciones de una forma más gráfica

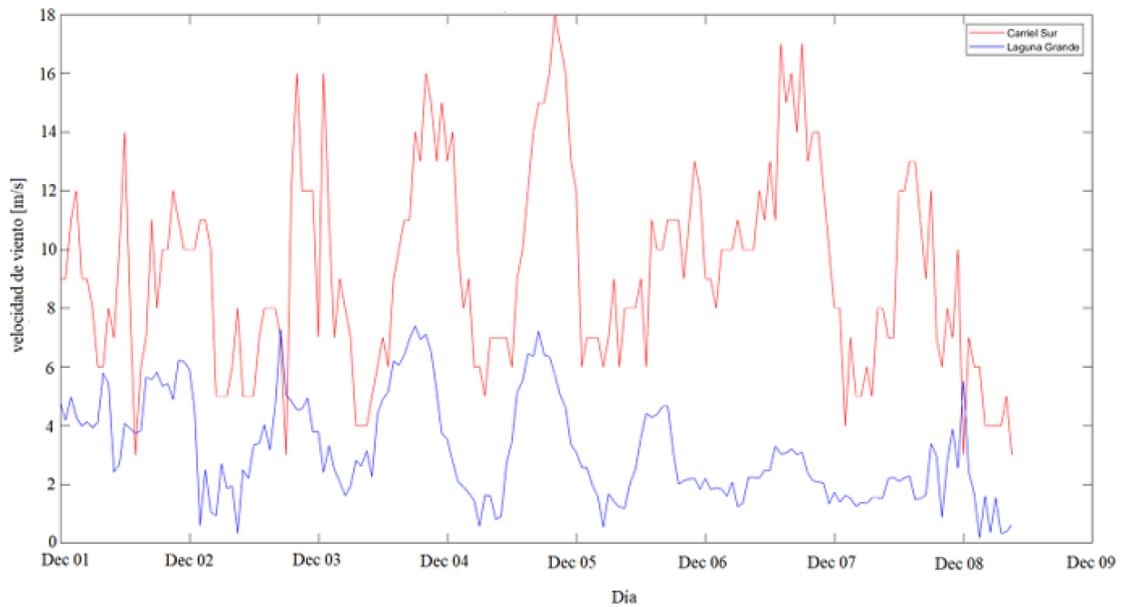


Figura 4.10 Comparación velocidad de viento Laguna Grande / Carrier Sur

Se graficaron las velocidades promedio para cada hora del día tanto para la laguna grande como para Carrier Sur, presentados en la Figura 4.11 y Figura 4.12 respectivamente, mientras que en la Figura 4.13 y Figura 4.14 se presenta las desviaciones estándar para cada una de estas velocidades.

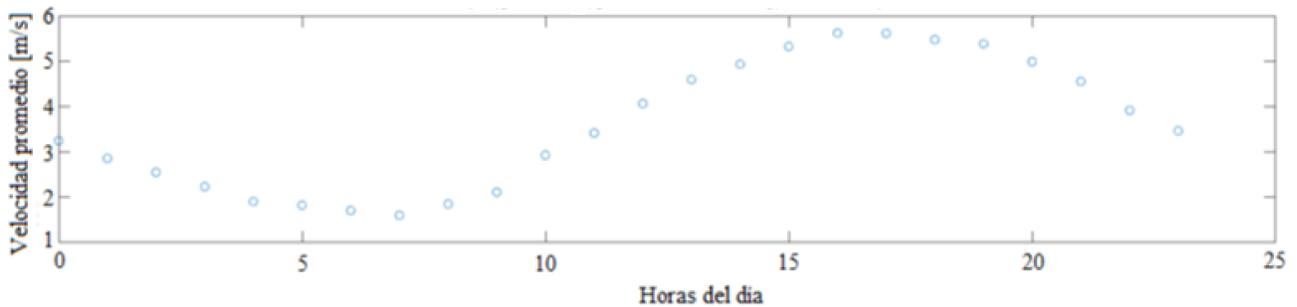


Figura 4.11 Velocidad promedio para cada hora Laguna Grande

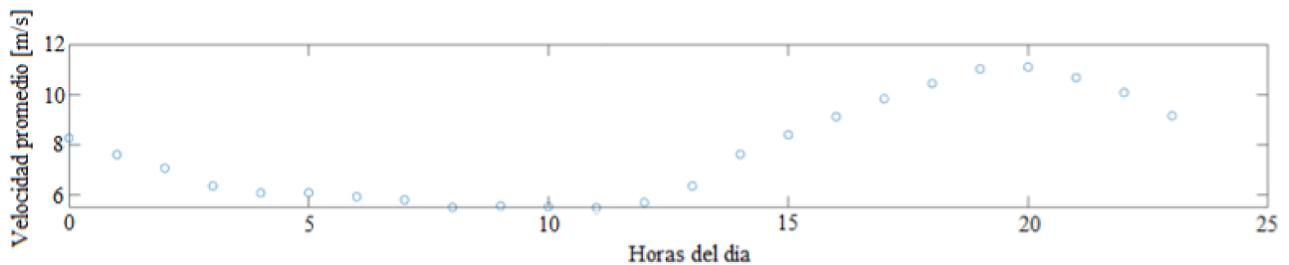


Figura 4.12 Velocidad promedio para cada hora Carrier Sur

De estas figuras se interpreta el comportamiento del viento en ambas zonas evidenciando que en la mañana, entre las 3:00 y 9:00 horas, se presentan en promedio las velocidades más bajas de viento.

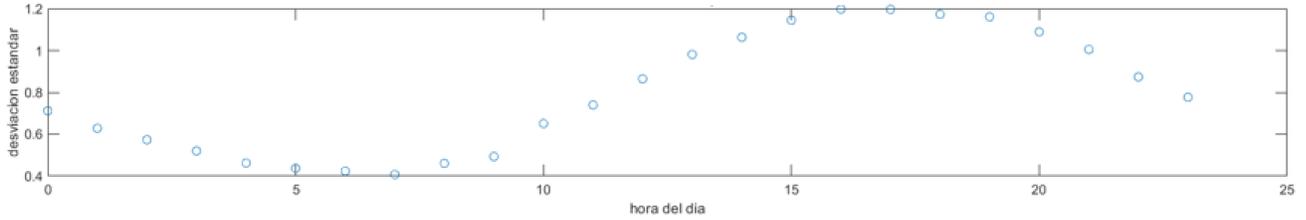


Figura 4.13 Desviación estándar para cada hora Laguna Grande

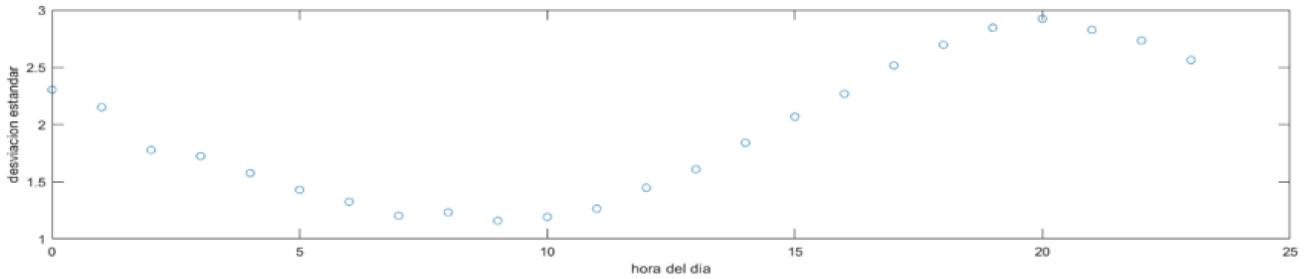


Figura 4.14 Desviación estándar para cada hora Carrier Sur

4.3 Extensión serie de tiempo velocidad de viento

Utilizando la metodología y el modelo presentado en la Sección 3.4, se obtiene una serie de tiempo desde el día 01/11/2020 hasta el 04/01/2022 para los datos de la velocidad de viento presentada en la Figura 4.14 donde el modelo tiene un ajuste de 29,55 % con respecto a los datos medidos. En la Figura 4.16 se presenta la comparación del modelo con los datos reales para los datos de validación donde la línea negra representa los datos reales y la línea azul los datos generados.

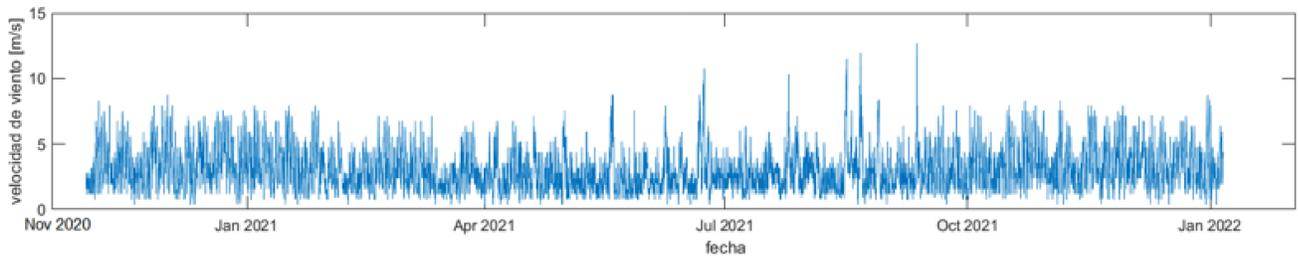


Figura 4.15 Serie de tiempo de velocidad de viento generada para Laguna Grande desde 01/11/2020 hasta 04/01/2022

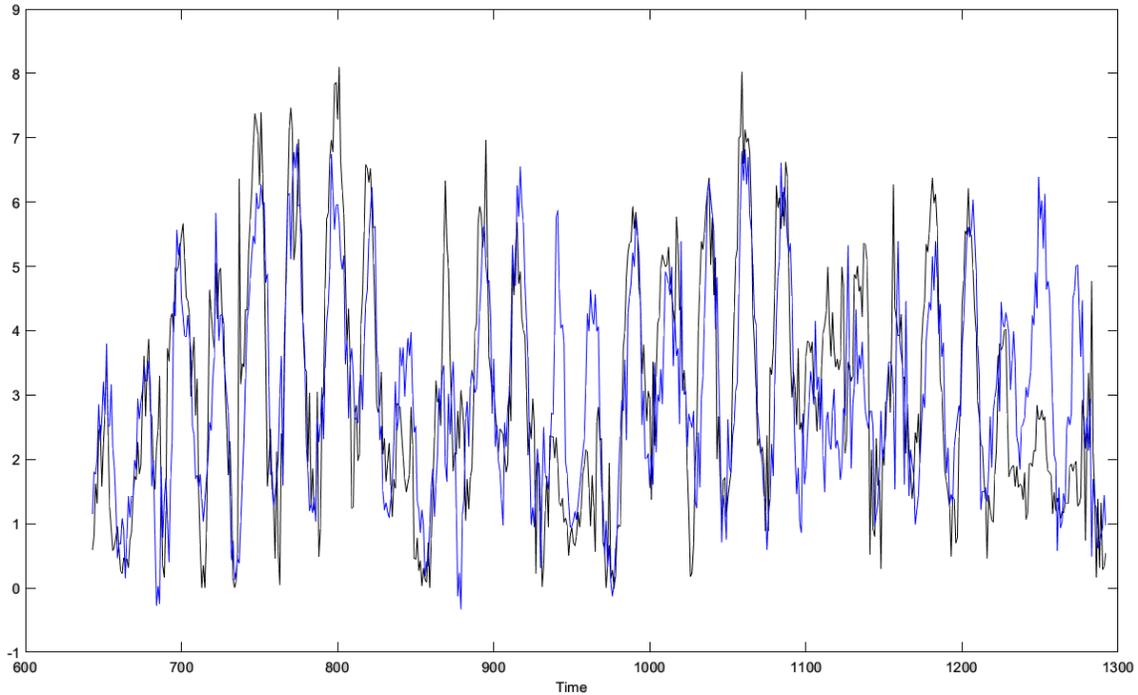


Figura 4.16 Comparación datos modelados con datos medidos para set de validación

De acuerdo con esta figura se observa que el modelo tiende a fallar para los mínimos y máximos locales de la función.

4.4 Caracterización y generación de oleaje

4.4.1 Cálculo del *fetch*

Se obtuvieron los *fetch* efectivos para las seis direcciones principales en las que sopla el viento reconocidas gracias a la rosa de los vientos presentada en la Figura 4.3. Las direcciones específicas son: 210°, 220°, 230°, 240°, 250° y 260° con respecto al norte, las cuales se pueden observar en la Figura 4.17 que superpone la rosa de vientos en el lugar de instalación del sensor.

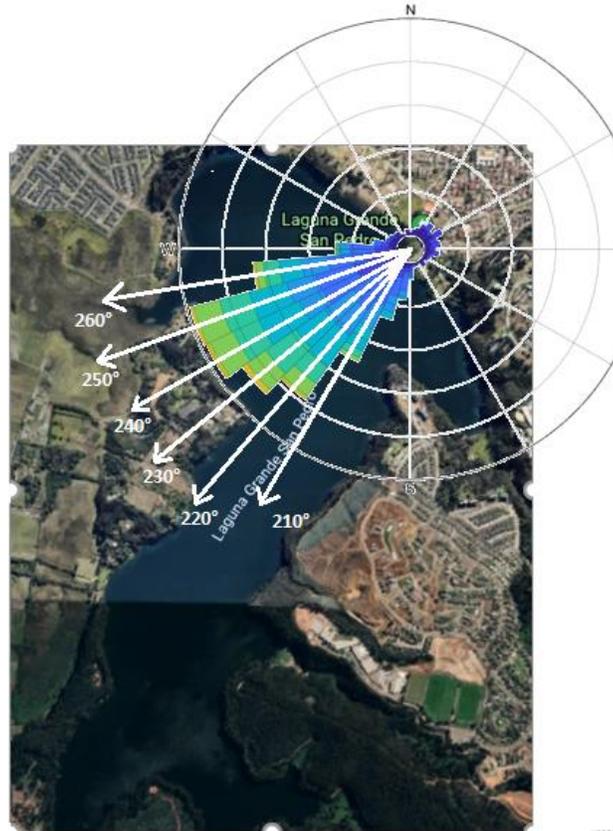


Figura 4.17 Direcciones principales de viento en la Laguna Grande

Se calcularon las medidas de *fetch* efectivo para cada una de las direcciones, siguiendo la metodología presentada en la Sección 3.4. Los resultados se presentan en la Tabla 4.1.

| Intervalo [°] | Línea central [°] | <i>Fetch</i> efectivo [m] |
|---------------|-------------------|---------------------------|
| 205 – 215 | 210 | 920,8 |
| 215 – 225 | 220 | 953,7 |
| 225-235 | 230 | 1.006,9 |
| 235-245 | 240 | 957,2 |
| 245-255 | 250 | 921,5 |
| 255-265 | 260 | 831,9 |

Tabla 4.1 *Fetch* efectivo para cada dirección en Laguna Grande

4.4.2 Generación de oleaje

Utilizando los resultados anteriores, junto a la metodología explicada en la Sección 3.4 se obtuvieron los parámetros de altura y periodo significativo mediante los métodos JONSWAP y SMB junto con

las respectivas longitudes de onda. Estos parámetros serán presentados en la Tabla 4.2. y Tabla 4.3 respectivamente

| Dirección [°] | H_s [m] | T_p [s] | L [m] | k |
|---------------|-----------|-----------|-------|------|
| 210 | 0,50 | 2,85 | 12,39 | 0,49 |
| 220 | 0,49 | 2,82 | 12,40 | 0,50 |
| 230 | 0,56 | 3,03 | 14,31 | 0,44 |
| 240 | 0,34 | 2,37 | 8,77 | 0,72 |
| 250 | 0,33 | 2,32 | 8,40 | 0,75 |
| 260 | 0,24 | 1,96 | 6,00 | 1,04 |

Tabla 4.2 Parámetros H_s , T_p , L y k utilizando modelo JONSWAP

| Dirección [°] | H_s [m] | T_p [s] | L [m] | K |
|---------------|-----------|-----------|--------|------|
| 210 | 0,24 | 17,61 | 153,30 | 0,04 |
| 220 | 0,23 | 17,10 | 148,70 | 0,04 |
| 230 | 0,25 | 18,78 | 163,83 | 0,03 |
| 240 | 0,19 | 13,15 | 112,87 | 0,05 |
| 250 | 0,19 | 12,93 | 110,86 | 0,05 |
| 260 | 0,15 | 10,31 | 86,70 | 0,07 |

Tabla 4.3 Parámetros H_s , T_p , L y k utilizando modelo SMB

Considerando la serie de tiempo de velocidad de viento extendida de Laguna Grande se obtienen los siguientes parámetros de altura máxima de ola presente el 100 % y 80 % del tiempo. Los resultados son presentados en la Tabla 4.4 y Tabla 4.5

| % del tiempo | H_s [m] | T_p [s] | L [m] | k |
|--------------|-----------|-----------|-------|------|
| 100 | 0,68 | 3,36 | 17,51 | 0,36 |
| 80 | 0,098 | 1,28 | 2,56 | 2,46 |

Tabla 4.4 Parámetros H_s , T_p , L y k utilizando modelo JONSWAP para serie extendida

| % del tiempo | H_s [m] | T_p [s] | L [m] | k |
|--------------|-----------|-----------|--------|-------|
| 100 | 0,287 | 21,73 | 190,30 | 0,033 |
| 80 | 0,094 | 5,10 | 35,94 | 0,17 |

Tabla 4.5 Parámetros H_s , T_p , L y k utilizando modelo SMB para serie extendida

Cabe señalar que de acuerdo con la altura y longitud de onda calculada con el modelo JONSWAP, el oleaje presente en la Laguna Grande, cuando su altura y periodo son máximos, corresponde a aguas profundas según las relaciones presentadas en la Sección 2.3.1.

4.5 Estabilidad del bote

Siguiendo la metodología planteada en la Sección 3.6, se realiza una planilla en Excel donde se varía el ángulo de inclinación desde los 1° con respecto a la horizontal obteniendo como resultado un momento volcante positivo indicando la caída del remero de su bote. Los resultados se presentan en la Tabla 4.6

| | | |
|----------------------|--------|-----|
| Peso (P) | 892,71 | N |
| Empuje (F) | 892,10 | N |
| P_x | 15,58 | N |
| P_y | 892,57 | N |
| F_x | 15,58 | N |
| F_y | 892,57 | N |
| Momento P_x | 9,04 | N-m |
| Momento P_x | 0 | N-m |
| Momento P_x | 0,46 | N-m |
| Momento P_x | -1,49 | N-m |
| Sumatoria de momento | 8,01 | N-m |

Tabla 4.6 Resultados equilibrio de fuerzas para “ θ ” = 1°

Donde P_x y P_y son las componentes en los ejes coordenados ejercidos por la fuerza peso producto de la inclinación, F_x y F_y son las componentes en los ejes coordenados producto de la fuerza ejercida por el empuje del agua.

4.6 Diseño preliminar rompeolas

El diseño se realizó mediante la metodología presentada en la Sección 3.7 considerando altura de ola transmitida de 0,2 m y 0,1 m. Se obtuvieron resultados para cada uno de los casos en cada una de las direcciones de ola generadas en la Sección 3.5. Los resultados se presentan en la Tabla 4.7 y Tabla 4.8 respectivamente.

| Dirección [°] | hi [m] | ht [m] | Ct | d [m] | W [m] | h [m] | D [m] | Ct real |
|---------------|--------|--------|------|-------|-------|-------|-------|---------|
| 210 | 0,5 | 0,1 | 0,20 | 8 | 1,3 | 1 | 0,25 | 0,2 |
| 220 | 0,49 | 0,1 | 0,20 | 8 | 1,3 | 1 | 0,25 | 0,2 |
| 230 | 0,56 | 0,1 | 0,18 | 8 | 1,4 | 1 | 0,27 | 0,18 |
| 240 | 0,34 | 0,1 | 0,29 | 8 | 1 | 1 | 0,3 | 0,27 |
| 250 | 0,33 | 0,1 | 0,30 | 8 | 1 | 1 | 0,3 | 0,27 |
| 260 | 0,24 | 0,1 | 0,42 | 8 | 0,7 | 1 | 0,34 | 0,37 |

Tabla 4.7 Resultados diseño rompeolas con ht = 0,1 m

| Dirección [°] | hi [m] | ht [m] | Ct | d [m] | W [m] | h [m] | D [m] | Ct real |
|---------------|--------|--------|------|-------|-------|-------|-------|---------|
| 210 | 0,5 | 0,2 | 0,40 | 8 | 0,7 | 1 | 0,34 | 0,37 |
| 220 | 0,49 | 0,2 | 0,41 | 8 | 0,7 | 1 | 0,34 | 0,37 |
| 230 | 0,56 | 0,2 | 0,36 | 8 | 0,7 | 1 | 0,34 | 0,37 |
| 240 | 0,34 | 0,2 | 0,59 | 8 | 0,5 | 1 | 0,39 | 0,50 |
| 250 | 0,33 | 0,2 | 0,61 | 8 | 0,5 | 1 | 0,39 | 0,50 |
| 260 | 0,24 | 0,2 | 0,83 | 8 | 0,5 | 1 | 0,39 | 0,50 |

Tabla 4.8 Resultados diseño rompeolas con ht = 0,2 m

Considerando el caso más desfavorable de $h_i = 0,56\text{m}$ se tienen 2 posibles diseños de rompeolas esquematizados en la Figura 4.18 y Figura 4.19.

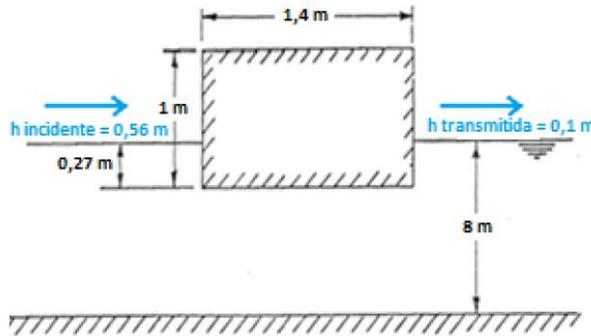


Figura 4.18 Diseño de rompeolas para ht = 0,1 m

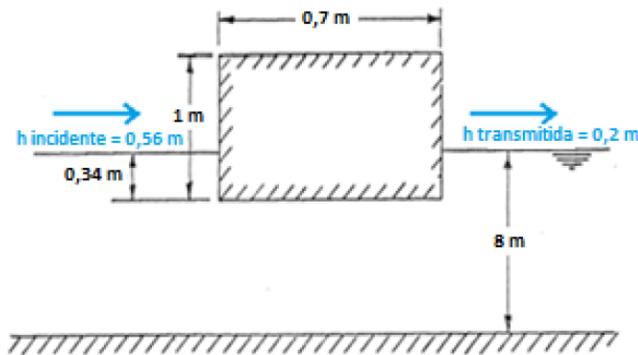


Figura 4.19 Diseño de rompeolas para ht = 0,2 m

Considerando el oleaje máximo presente el 80 % y 100 % del tiempo en la Laguna Grande, mostrado en la Tabla 4.4. Se realiza un diseño de rompeolas únicamente para el caso del 100 % del tiempo debido a que el 80 % del tiempo las olas no superan los 0,1 [m] definido como altura mínima. Los diseños se muestran en la Figura 4.20 y Figura 4.21 para altura de ola igual a 0,1 y 0,2 metros respectivamente.

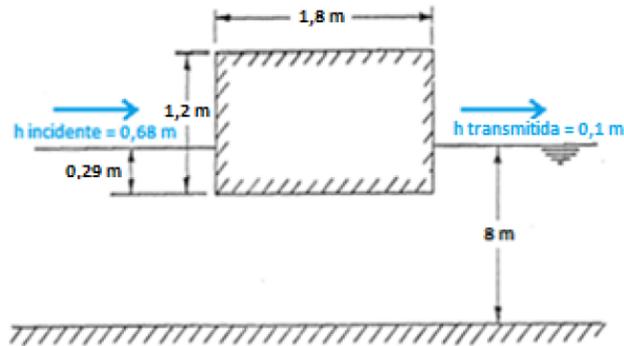


Figura 4.20 Diseño rompeolas para el 100 % de los casos con $h_t = 0,1$ m

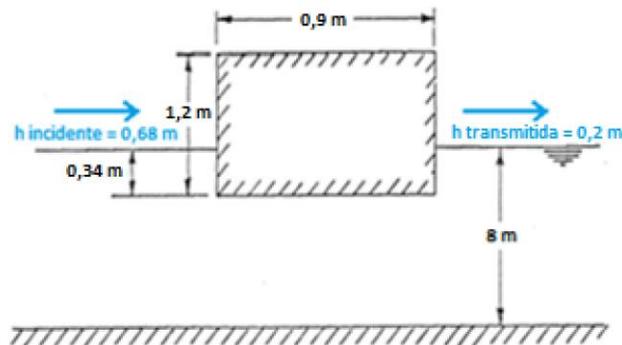


Figura 4.21 Diseño rompeolas para el 100 % de los casos con $h_t = 0,2$ m

4.7 Selección rompeolas

De los diseños presentados se selecciona un diseño que asegure la condición para el 100 % del tiempo presentado en la Figura 4.21. Sin embargo, se le realizan modificaciones para facilitar el proceso constructivo en cuanto a sus medidas obteniendo un rompeolas de dimensiones 1 m x 1,2 m el cual transmitiría olas no mayores a 0,17 m.

En la Figura 4.22 se muestra el rompeolas seleccionado

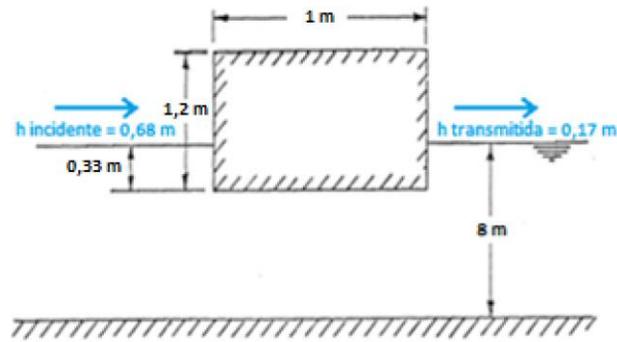


Figura 4.22 Diseño final rompeolas

4.8 Trazado de pista

Se presentan 2 posibles trazados para definir la pista de acuerdo con la geometría de la laguna y medidas impuestas por la FISA, en la Figura 4.23 y Figura 4.24 se presentan estas opciones junto a la rosa de vientos a modo de representar gráficamente las direcciones en las que llegaría el viento y oleaje.

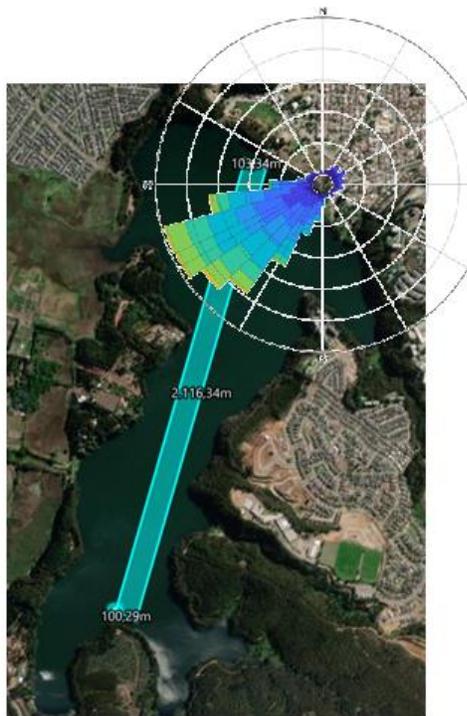


Figura 4.23 Trazado pista de remo (opción 1)

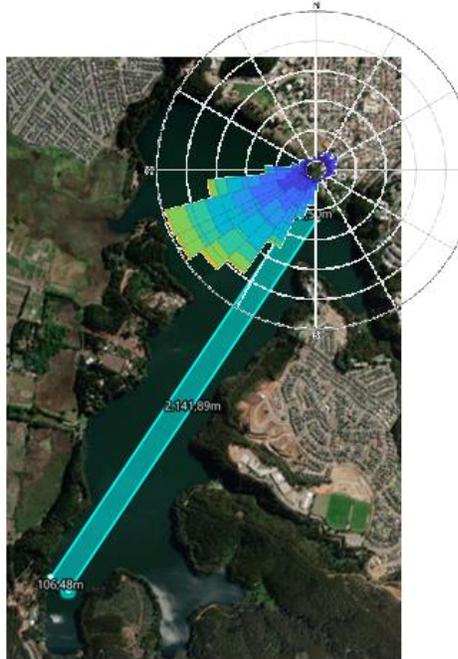


Figura 4.24 Trazado pista de remo (opción 2)

La opción 1 se propone como mejor opción ya que el viento y oleaje llega en forma más perpendicular a la pista que en la opción 2 haciendo que el rompeolas funcione de mejor manera.

4.9 Conclusiones

La relación entre Carriel Sur y los datos obtenidos en la laguna permite extender la serie de tiempo desde el 01/11/2020 hasta el 04/01/2022, dando una aproximación de las velocidades de viento presentes en las distintas épocas del año.

En cuanto a la caracterización de oleaje el modelo JONSWAP presenta resultados esperables de acuerdo con las condiciones de la laguna, por otro lado, el modelo SMB presenta resultados característicos de oleaje lejano o tipo SWELL, lo cual no puede ocurrir en una laguna.

Finalmente se opta por un diseño de rompeolas tipo pontón-caja de 1 x 1,2m el cual transmitiría olas no mayores a 0,17 m durante todo el año permitiendo que las regatas se realicen con normalidad.

CAPÍTULO 5 : DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

De acuerdo con la información obtenida en la Laguna Grande de San Pedro se concluyó que las direcciones principales en las que sopla van en las direcciones suroeste entre los 205° y 265° con respecto al norte con velocidades máximas calculadas de hasta de 11,5 m/s. También se deduce que el mejor horario para realizar la actividad es entre las 3:00 y las 9:00 horas debido a las bajas velocidades de viento entre esas horas, con velocidades entre 1 y 2 [m/s] promedio, entre las 9:00 y 12:00 se encuentran velocidades relativamente bajas fluctuando entre 2 y 4 [m/s] promedio y entre las 12:00 y las 20:00 horas se presentan las velocidades del viento más fuertes con velocidades entre 4 y 6 [m/s].

En el cálculo de *Fetch* efectivo se observa que el hecho de que la laguna sea limitada en todas sus dimensiones afecta en gran medida a la longitud de este. La mayor distancia se produce en dirección de los 230° con respecto al norte con 1.007 metros, siendo menos de la mitad de la longitud de la pista.

Para la generación de oleaje se obtuvieron 2 resultados distintos de acuerdo con los métodos utilizados, sin embargo, el modelo JONSWAP presenta una mejor aproximación con valores que se pueden observar en terreno. Mediante el modelo SMB se obtienen periodos de más de 17 segundos que no puede suceder en la realidad ya que esos periodos son característicos de un oleaje lejano o de tipo SWELL, razón por la cual únicamente se considera el primer modelo. Por otro lado, el modelo JONSWAP presenta altura de ola, periodo y longitud de onda máxima de 0,68 m, 3,36 s y 17,51 m respectivamente lo cual se podría ver en una tormenta muy fuerte y solo unos momentos, en la mayor parte del tiempo sus parámetros no debieran superar los 0,1 m de altura, periodo de 1,26 s y longitud de onda de 2,56 m, lo cual es bastante mas probable de ver en terreno.

Adicionalmente, se recomienda para un trabajo posterior, poder realizar mediciones en terreno que validen los resultados obtenidos. Esto se puede realizar utilizando boyas u otro instrumento adecuado para la tarea.

Debido a la poca información existente para diseños de rompeolas de manera empírica se seleccionó el rompeolas tipo pontón-caja, ya que se encontraron diversas ecuaciones que permiten su diseño entre las cuales se seleccionó la ecuación de Wagner que se acerca más a la realidad según (Merlevede, 2012).

Para la construcción del rompeolas se recomienda la utilización de un rompeolas de 1m x 1,2 m que permite el funcionamiento de la pista el 100 % del tiempo con olas no mayores a 0,17 m. Esto debido a que las competencias internacionales deben poder ser realizadas cualquier día del año, considerando la gran cantidad de deportistas que viajan de todo el mundo, no es recomendable posponer una regata.

Por otro lado, una estructura recubierta en hormigón de grandes dimensiones es poco amigable con el medio ambiente, sin embargo, existe un nuevo tipo de rompeolas flotante experimental que presenta una mayor eficiencia principalmente a medida en la que aumenta el periodo de la ola y podría ser analizado en laboratorio como nueva opción más amigable con el medio ambiente.

Una tercera opción es el uso de rompeolas tipo cadena de llantas, esta cuenta con ventajas respecto al costo y facilidad de instalación y traslación. No obstante, este tipo de estructura genera mayor impacto visual y se deben realizar estudios en agua dulce para evaluar el nivel de toxicidad que produce, ya que actualmente se tienen estudios para agua salada únicamente.

Se debe considerar que el uso de rompeolas se limita únicamente a las competencias, por lo que no permanecerán mucho tiempo continuo dentro del agua lo que disminuye los efectos nocivos para el ecosistema.

Considerando los 2 trazados posibles en la laguna, se recomienda la opción número 1, orientada en dirección sur principalmente, debido a que el viento llega principalmente en direcciones transversales a la pista por lo que los rompeolas cumplirían su función reduciendo las olas en esa zona. Por el contrario, la opción 2, orientada en dirección suroeste, al tener la misma orientación que las direcciones principales de viento, generaría que el oleaje vaya en esa misma dirección donde los rompeolas no cumplirían la función a cabalidad.

REFERENCIAS

- Bretschneider, C. (1952). *Revised wave forecasting relationships. Proceeding of the 2nd Coastal Engineering Conference*. American Society of Civil Engineers, EEUU. <https://doi.org/10.9753/icce.v2.1>
- Chun- Yan, J., Chen, X., Cui, J., Yuan, Z., y Incecik, A. (2015). *Experimental study of a new type of floating breakwater*. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.06.046>
- Díaz, J. M. G. (2013). *Cuantificación del perfil del viento hasta 100 m de altura desde la superficie y su incidencia en la climatología eólica*. Terra. Nueva Etapa, 29(46), 81-101.
- Fédération Internationale des Sociétés d’Aviron. (2006). *Código de regata*.
- Hales, L.Z., (1981). *Floating Breakwaters—State of the Art Literature Review*. Coastal Engineering Research Centre, Fort Belvoir. Technical Report no. 81–1.
- Hartwell, S. I., Jordahl, D. M., Dawson, C. E. O., y Ives, A. S. (1998). *Toxicity of scrap tyre leachates in estuarine salinities: are tires acceptable for artificial reefs?* Transactions of the American Fisheries Society. [https://doi.org/10.1577/15488659\(1998\)127<0796:TOSTLI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1577/15488659(1998)127<0796:TOSTLI>2.0.CO;2)
- Jones, D. B. (1971). *Transportable Breakwaters--A Survey of Concepts*. Naval Civil Engineering Laboratory Port Hueneme California.
- Koutandos, E. Prinos, P. y Gironella, X. (2005) *Floating breakwaters under regular and irregular forcing: Reflection and transmission characteristics*. Journal of Hydraulic Research, pages 174–188, <https://doi.org/10.1080/00221686.2005.9641234>
- Macagno, E.O. (1953) *Experimental study of the effects of the passage of a wave beneath an obstacle*. Proceedings of Académie des Sciences, Paris, France.
- McCartney, B. L. (1985). *Floating breakwater design*. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 111(2), 304-318. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(1985\)111:2\(304\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(1985)111:2(304))
- Merlevede, K. (2012). *Study of the functional design of a floating offshore breakwater*. Ghent University.

- Nakamura, T., Mizutani, N., Hur, D. S., y Kim, D. S. (2003, May). *Study On The Layout Of Floating Breakwater Units*. In The Thirteenth International Offshore and Polar Engineering Conference. OnePetro.
- Pulman, C. (2005). *The physics of rowing*. University of Cambridge, 1-7.
- Ramírez, R. D. M., y Arias, A. O. (2007). *Los modelos de generación de oleaje de viento: características, evolución y futuras aplicaciones en Colombia*. Avances en Recursos Hidráulicos, (15).
- Rueda, A. y Lonin, S. (2012). *Rompeolas flotantes: revisión histórica y académica*. Boletín Científico C.I.O.H (30): 43-52. http://doi.org/10.26640/01200542.30.43_52
- Stoker, J.J. (1957) *Water waves. The mathematical theory with applications*. Interscience Publishers New York, EEUU.
- Sverdrup, H. y Munk, W., (1947). *Wind, sea and swell: theory of relation for forecasting*. H. O. Publication 601. U. S. Naval Oceanographic Office. Washington, D. C, EEUU
- Tolba, E.(1999) *Behaviour of Floating Breakwaters under Wave Action*. PhD thesis, Bergische Unversitat.
- U.S Army Corps of Engineers. (2002) *Coastal Engineering Manual*. EM 1110-2- 1100, 3, pp. 1-36
- Wagner, H. Götz, A. Reinsch, R. y Kaiser, H (2011). *Schwimmende wellenbrecher im einsatz in einem tagenbaurestsee mitteldeutschlands*. Binnenschiffahrt ZfB.

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN – FACULTAD DE INGENIERÍA
RESUMEN DE MEMORIA DE TÍTULO

Departamento : Departamento de Ingeniería Civil
Carrera : Ingeniería Civil
Nombre del memorista : Joaquín Alberto Mascaró Müller
Título de la memoria : Diseño de una pista de remo en la Laguna Grande
Fecha de la presentación oral : **0 8 - 0 4 - 2 0 2 2**

Profesor(es) Guía : Oscar Link Lazo y Maricarmen Guerra Paris
Profesor(es) Revisor(es) : Alex Schwarz Kusch
Concepto :
Calificación :

Resumen

Chile tiene una única pista de remo que cumple con los criterios impuestos por la FISA que presenta serios problemas de sequía. No obstante, la Laguna Grande de San Pedro de la Paz, figura como una posibilidad para generar una pista de remo con estándares FISA, aunque el oleaje presente en ella es perjudicial para el desarrollo de regatas.

El objetivo de este trabajo es diseñar una estructura disipadora de oleaje que otorgue funcionalidad a una pista de remo con estándar FISA en la Laguna Grande de San Pedro.

Los resultados de caracterización del oleaje son consistentes con lo esperado para la zona de estudio. Finalmente se dimensionó un rompeolas tipo pontón-caja de poliestireno expandido con una capa de 2 cm de hormigón de medidas 1 x 1,2m el cual transmitirá olas no mayores a 0,17 m.