



FACULTAD DE INGENIERÍA

Memoria del proyecto para optar al Título de
Ingeniero Civil Oceánico

**CARACTERIZACIÓN OCEANOGRÁFICA PARA EL DISEÑO
DE MEJORAMIENTO DE LA CONECTIVIDAD MARÍTIMA DE
FANDANGO, CHAITÉN, REGIÓN DE LOS LAGOS**

CRISTIAN IGNACIO ESPEJO BRIGNARDELLO

Junio 2014

CARACTERIZACIÓN OCEANOGRÁFICA PARA EL DISEÑO DE MEJORAMIENTO DE LA CONECTIVIDAD MARÍTIMA DE FANDANGO, CHAITÉN, REGIÓN DE LOS LAGOS.

CRISTIAN IGNACIO ESPEJO BRIGNARDELLO

COMISIÓN EVALUADORA	CALIFICACIONES Nota	Firma
PROFESOR GUÍA SR. MARIO CACERES	_____	_____
PROFESOR INTEGRANTE SR. MATIAS QUEZADA	_____	_____
PROFESOR INTEGRANTE SR. CRISTIAN FLORES	_____	_____

DECLARACIÓN

Este trabajo o alguna de sus partes no ha sido presentado anteriormente en la Universidad de Valparaíso, institución universitaria chilena o extranjera u organismo de carácter estatal, para evaluación, comercialización u otros propósitos. Salvo las referencias citadas en el texto, confirmo que el contenido intelectual de este Proyecto de Título es resultado de mis esfuerzos personales.

La Universidad de Valparaíso reconoce expresamente la propiedad intelectual del autor sobre esta Memoria de Titulación. Sin embargo, en caso de ser sometida a evaluación para propósitos de obtención del Título Profesional de Ingeniero Civil Oceánico, el autor renuncia a sus derechos legales sobre la misma y los cede a la Universidad de Valparaíso, la que estará facultada para utilizarla con fines exclusivamente académicos.

Mario Cáceres
Profesor Guía

Cristian Ignacio Espejo Brignardello
Alumno Memorista

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar agradecer a mis padres, por su apoyo incondicional en todo ámbito de la vida, esto es para ellos, ya que, confiaron en mí, lucharon día a día para darme lo mejor, y sufrieron con esta larga espera. A mi señora y tres hijos, por la paciencia, tolerancia y ayuda. También quiero agradecer a HIDROTOP la empresa en la cual trabajo hoy en día y di mis primeros pasos, a todos ellos que sin duda aportaron con toda la experiencia que hoy en día tengo, a mi Profesor guía Sr. Mario Cáceres, por todo el profesionalismo y dedicación en este proyecto.

Agradecer a todos aquellos que me acompañaron y ayudaron en este largo camino, familia Nuñez Lauckner, a todos mis amigos, que de alguna u otra forma son partícipes de este nuevo escalón que subo. Nunca dude que llegaría al final de este camino, costo pero llegue, gracias infinitas a todos aquellos que caminaron junto a mi.

*Dedicado a mis padres, José Espejo y Angélica Brignardello,
muchísimas gracias por todo, los amo...*

ÍNDICE GENERAL

1	INTRODUCCIÓN	1
2	MARCO TEORICO	3
2.1	MAREAS	3
2.2	VIENTO	6
2.3	CORRIENTE	6
2.4	OLAS	7
2.4.1	DEFINICIONES ESTADÍSTICAS DE LOS PARÁMETROS DEL OLEAJE	8
2.4.2	CARACTERÍSTICAS DEL VIENTO GENERADOR	9
2.4.2.1	PROFUNDIDAD DEL AGUA	9
2.4.2.2	GENERACIÓN DE OLEAJE EN AGUAS SOMERAS	10
2.4.3	ESFUERZOS DEL OLEAJE SOBRE EL BUQUE	10
2.5	TRANSPORTE DE SEDIMENTO	12
3	OBJETIVOS	13
3.1	OBJETIVOS ESPECIFICOS	13
4	METODOLOGIA	14
4.1	BATIMETRIA	14
4.2	MAREAS	17
4.3	VIENTOS	18
4.4	CORRIENTES	19
4.5	OLAS	22
4.6	SEDIMENTOS	23
5	CARACTERIZACIÓN OCEANOGRÁFICA	25
5.1	BATIMETRIA DE PRECISIÓN	25
5.1.1	RESULTADOS	25
5.2	MAREAS	25
5.2.1	RESULTADOS	25
5.2.2	ANÁLISIS ARMÓNICO	26
5.2.3	ANÁLISIS NO-ARMÓNICO	29
5.2.4	RÉGIMEN DE MAREA	29
5.2.5	NIVEL DE REDUCCIÓN DE SONDA	30
5.3	VIENTOS	31
5.3.1	RESULTADOS	31
5.3.1.1	VIENTOS LOCALES EN FANDANGO	31
5.3.1.2	ANÁLISIS MENSUAL	32
5.3.2	ANÁLISIS HORARIO	35
5.3.3	VIENTOS LOCALES EN CHAITÉN	36
5.3.4	ANÁLISIS MENSUAL	37
5.3.5	COMPARACIÓN ENTRE ESTACIONES METEOROLÓGICAS	40
5.3.5.1	ANÁLISIS DE DATOS: FANDANGO V/S CHAITÉN	40
5.3.6	ANÁLISIS DE VALORES EXTREMOS	43
5.3.7	ANÁLISIS DE VALORES EXTREMOS PARA EL VIENTO EN CHAITEN	45
5.4	CORRIENTES EN VERANO	47
5.4.1	CORRELACIONES CRUZADAS	51
5.4.2	CORRENTOMETRÍA LAGRANGIANA (DERIVADORES)	53
5.4.3	ANÁLISIS DE VALORES EXTREMOS DE CORRIENTES	56
5.5	CORRIENTES CAMPAÑA DE INVIERNO	58
5.5.1	CORRELACIÓN CRUZADA	60
5.5.2	CORRENTOMETRÍA LAGRANGIANA (DERIVADORES)	62
5.5.3	ANÁLISIS DE VALORES EXTREMOS DE CORRIENTES	65
5.6	OLAS	67
5.6.1	OLAS OPERACIONALES	67
5.6.2	OLEAJE DE GENERACION LOCAL	70

5.6.3	FETCH CONSIDERADOS	71
5.6.4	OLEAJE DE DISEÑO	72
5.6.5	VALIDACION DEL MODELO	73
5.7	SEDIMENTOS.....	76
5.7.1.1	GRANULOMETRÍA.....	76
5.7.1.2	PARÁMETROS ESTADÍSTICOS	77
5.7.1.3	DISTRIBUCIÓN ESPACIAL	81
5.8	DISCUSION	83
6	DISEÑO CONCEPTUAL RAMPA.....	87
6.1	NAVE DE DISEÑO.....	87
6.2	VIDA ÚTIL	87
6.3	RIESGO (E).....	87
6.4	PERÍODO DE RETORNO.....	87
6.5	DISEÑO EN PLANTA	88
6.5.1	EXPLANADA	88
6.5.2	RAMPA.....	88
6.5.2.1	LARGO DE LA RAMPA	88
6.5.2.2	ANCHO DE LA RAMPA.....	89
6.5.2.3	ORIENTACIÓN DE LA OBRA	89
6.6	DISEÑO EN ALZADO	90
6.6.1	COTA DE CORONAMIENTO.....	90
6.6.2	SECCIONES TIPO	90
7	CONCLUSIONES	91
7.1	CONCLUSIONES DE LA CARACTERIZACIÓN OCEANOGRÁFICA.....	91
7.2	CONCLUSIONES DEL DISEÑO.....	92
8	RECOMENDACIONES	93
9	BIBLIOGRAFÍA	94

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Área de Estudio	1
Figura 2: Esquema de la predicción de la serie temporal de marea astronómica mediante suma de componentes armónicas.	4
Figura 3: Constituyentes armónicas principales.	5
Figura 4: Acción del oleaje sobre un buque.	12
Figura 5: Tipos de movimientos de los sedimentos	12
Figura 6: Área de batimetría.	14
Figura 7: Prueba de Plancha.	15
Figura 8: Equipo de control de líneas planificadas.	15
Figura 9: Ecosondista.....	16
Figura 10 : Vértice Geodésico D-33 ubicado en la Capitanía de Puerto de Chaitén.	16
Figura 11: Sistema de fondeo de mareógrafo.	17
Figura 12: Ubicación geográfica instalación de mareógrafo.....	17
Figura 13: Esquema de vinculación vertical	18
Figura 14: Ubicación geográfica estación meteorológica.	18
Figura 15: Estación Meteorológica Instalada en Fandango.	19
Figura 16: Ubicación geográfica de instalación de ADCP y Correntometro.	20
Figura 17: A la izquierda equipo ADCP y a la derecha Correntometro SensorData.	21
Figura 18 : Area de experimento con derivadores.	22
Figura 19: Equipo ADCP fondeado para medir oleaje y corrientes.	22
Figura 20: Sacatestigos para la extracción de sedimentos	23
Figura 21: Posiciones del muestreo.	24
Figura 22: Batimetría de precisión área de estudio.	25
Figura 23: Serie original de nivel del mar medido cada 10 minutos.	26
Figura 24: Correlación entre los valores de nivel de la marea observada y pronosticada para Fandango, entre 18 de Diciembre del 2010 al 19 de Enero del 2011.	28
Figura 25: Espectrograma de las constituyentes del nivel del mar con un nivel de significancia del 95%.	28
Figura 26: Serie de nivel del mar horaria para Fandango, Chaitén, Región de Los Lagos, observada entre 3 de Septiembre 2011 y 5 de Octubre del 2011.	30
Figura 27: Componentes u (este - oeste) y v (norte -sur) de la velocidad del viento	31
Figura 28: Rosa de viento de la distribución de frecuencia de la magnitud y dirección de los vientos medidos en Fandango.....	32
Figura 29: Rosas de viento mensuales con frecuencia de direcciones y magnitudes observadas en Fandango.	33
Figura 30: Continuación Figura 29.....	34
Figura 31: Distribución horaria de frecuencia de la dirección de los vientos observados en Fandango.	35
Figura 32: Continuación Figura 31.....	36
Figura 33: Componentes u (este - oeste) y v (norte - sur) de la velocidad del viento en Chaitén.	36
Figura 34: Rosa de viento de la distribución de frecuencia de la magnitud (barra de colores) y dirección de los vientos medidos en Chaitén, entre el 1 de enero de 1998 y el 31 de diciembre del 2007.....	37
Figura 35: Distribución mensual de frecuencia de la dirección de los vientos observados en Chaitén.	38
Figura 36: Continuation Figura 35.....	39
Figura 37: Histograma de frecuencia direccional de estación meteorológica en Fandango y Chaitén.....	40
Figura 38: Histogramas de frecuencia de magnitud entre estación meteorológica de Fandango y Chaitén.	40
Figura 39: Rosas de direcciones, a la izquierda Fandango a la derecha Chaitén.	41

Figura 40: Comparacion de componentes ortogonales u , para Chaiten y Fandango	42
Figura 41: Comparación de componentes ortogonales v , para Chaitén y Fandango	42
Figura 42: Distribución lineal Weibull	44
Figura 43: Distribución de valores extremos de magnitud de vientos asociados a distintos periodos de retorno.	45
Figura 44: Rosa de corrientes para las capas de 3 m, 8 m, 14 m y 16 m.	47
Figura 45: Diagrama de vector progresivo para todas las capas de la serie de tiempo observada entre 18 de Diciembre 2010 y 19 de Enero 2011.	50
Figura 46: Correlación cruzada entre las componentes ortogonales de la corriente y viento, para la capa de 3 m., mediciones realizadas entre el 18 de Diciembre 2010 y 19 de Enero de 2011, 95% de confianza.	51
Figura 47: Correlación cruzada entre las componentes ortogonales de la corriente y viento, para la capa de 8 m., mediciones realizadas entre el 18 de Diciembre 2010 y 19 de Enero de 2011, 95% de confianza.	52
Figura 48: Correlación cruzada entre las componentes ortogonales de la corriente y viento, para la capa de 14 m., mediciones realizadas entre el 18 de Diciembre 2010 y 19 de Enero de 2011, 95% de confianza.	52
Figura 49: Correlación cruzada entre las componentes ortogonales de la corriente y viento, para la capa de 16 m., mediciones realizadas entre el 18 de Diciembre 2010 y 19 de Enero de 2011, 95% de confianza.	53
Figura 50: Trayectoria de derivadores en marea llenante, durante sicigia el 18 de Enero del 2011. Derivador verde 5m de prof., amarillo 1 m de prof.	53
Figura 51: Trayectoria de derivadores en marea vaciante, durante sicigia el 18 de Enero del 2011. Derivador Verde 5m de prof.; Amarillo 1 m de prof.	54
Figura 52: Trayectoria de derivadores en marea llenante, durante cuadratura el 11 de Enero del 2011. Derivador Verde 5m de prof.; Amarillo 1 m de prof.	55
Figura 53: Trayectoria de derivadores durante marea vaciante, en cuadratura el 11 de Enero del 2011. Derivador Verde 5m de prof.; Amarillo 1 m de prof.	56
Figura 54: Distribución lineal Weibull	57
Figura 55: Distribución de valores extremos de magnitud de vientos asociados a distintos periodos de retorno.	58
Figura 56: Rosa de corriente con la distribución de frecuencia de la dirección y magnitud de la corriente a 10 m de profundidad.	59
Figura 57: Diagrama de vector progresivo en la capa de 10 m de profundidad.....	60
Figura 58: Correlación cruzada entre las componentes ortogonales del viento y la corriente, para la capa de 10 m.....	61
Figura 59: Trayectoria de derivadores en marea llenante, durante sicigia el 27 de Septiembre del 2011.	62
Figura 60: Trayectoria de derivadores en marea vaciante durante sicigias el 27 de Septiembre del 2011.....	63
Figura 61: Trayectoria de derivadores en marea llenante en cuadratura, el 5 de Octubre del 2011. ..	64
Figura 62: Trayectoria de derivadores en marea vaciante en cuadratura el 5 de Octubre del 2011. ..	65
Figura 63: Distribución lineal Weibull	66
Figura 64: Periodos de Retorno	67
Figura 65: Rosa de oleaje. Altura Significativa H_s	69
Figura 66: Rosa de oleaje. Periodo Peak T_p	69
Figura 67: Distribución de los Fetch.....	72
Figura 68: Zoom del area de Estudio.....	72
Figura 69: Medición de oleaje vs. modelo de generación. Probabilidad de Ocurrencia de la altura significativa H_s (m).	74
Figura 70: Medición de oleaje vs modelo de generación. Probabilidad de Ocurrencia del Periodo pico T_p (s).....	74

Figura 71: Medición de oleaje vs modelo de generación. Probabilidad de Ocurrencia de la Dirección Peak (DPK°).....	75
Figura 72: Distribución de los sedimentos según fracción.....	78
Figura 73: Distribución porcentual de frecuencias granulométricas para sedimentos marinos (estaciones 7 a 10).....	79
Figura 74: Distribución espacial de los sedimentos (%), fracción arenas.....	81
Figura 75: Distribución espacial de los sedimentos (%), fracción gravas.....	82
Figura 76: Distribución espacial de los sedimentos (%), fracción fangos.....	83
Figura 77: Amplitud de las constituyentes por capa y velocidad media de la componente u	84
Figura 78 : Amplitud de las constituyentes por capa y velocidad media de la componente v	84
Figura 79: Escombros de la erupción del volcán Chaitén en las costas de Fandango.	86
Figura 80: Orientación propuesta.....	89
Figura 81: Sección tipo de la rampa.....	90

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Resumen de Parámetros de Instalación.....	20
Tabla 2: Coordenadas UTM de posiciones de muestreo.....	24
Tabla 3: Resumen de los valores armónicos de la marea.....	27
Tabla 4: Valores no armónicos de la marea.....	29
Tabla 5: Distribución de frecuencia de la dirección y magnitud del viento (m/s) en Fandango.....	32
Tabla 6: Distribución de frecuencia de la dirección y magnitud del viento (m/s) en Chaitén.....	37
Tabla 7: Comparación estadística de las velocidades para ambas estaciones.....	43
Tabla 8: Valores máximos de magnitud de los vientos en Fandango.....	43
Tabla 9: Resumen de los resultados obtenidos aplicando la distribución de Weibull para el cálculo de la magnitud de los vientos extremos en función de los periodos de retorno.....	44
Tabla 10: Valores Máximos (m/s) Anuales-Chaitén.....	45
Tabla 11: Periodos de retorno por dirección.....	46
Tabla 12: Distribución de incidencia de la magnitud y dirección de la corriente para las distintas capas, medida entre 18 de Diciembre 2010 y 19 de Enero del 2011.....	48
Tabla 13: Analisis estadístico por direcciones.....	49
Tabla 14: Porcentaje de varabilidad explicado por el ajuste de armónicos mareales a los datos de corrientes.....	51
Tabla 15: Valores máximos de corriente para la capa de 8 metros.....	57
Tabla 16: Resumen de la magnitud de las corrientes externos en función de los periodos de retorno 1, 2, 3, 4, 5 y 6 meses, usando la distribución de weibull.....	58
Tabla 17: Distribución de incidencia de la magnitud y dirección de la corriente en la capa superficial de 10 m de profundidad.....	59
Tabla 18: Análisis estadístico por direcciones.....	59
Tabla 19: Análisis de la varianza entre la marea y las componentes ortogonales de la corriente.....	60
Tabla 20: Valores máximos de corriente para la capa medida.....	66
Tabla 21: Resumen de los resultados obtenidos aplicando la distribución de Weibull para el cálculo de la magnitud de las corrientes extremas en función de los periodos de retorno 1, 2, 3, 4, 5 y 6 meses.....	67
Tabla 22: Distribución de frecuencia de altura de ola Hs(m) y Dirección.....	68
Tabla 23: Distribución de frecuencias Periodo Máximo Tp(s) y Dirección de oleaje.....	68
Tabla 24: Estadística descriptiva de Olas Operacionales.....	69
Tabla 25: Factores Zo recomendados para cada tipo de superficie.....	70
Tabla 26: Fetch considerados.....	71
Tabla 27: Oleaje de diseño según periodo de retorno.....	73
Tabla 28: Comparación estadística de las alturas Hs (m).....	75
Tabla 29: Comparación estadística de los periodos Tp (s).....	75
Tabla 30: Comparación estadística de las direcciones Dir (°).....	76
Tabla 31: Distribución porcentual de los sedimentos según rango textural.....	76
Tabla 32: Distribución de los sedimentos según fracción.....	77
Tabla 33: Parámetros estadísticos de la frecuencia de la distribución granulométrica de los sedimentos marinos.....	80
Tabla 34: Dimensiones de la Nave de Diseño.....	87

RESUMEN

El presente proyecto caracteriza las condiciones oceanográficas en la localidad de Fandango, el nuevo sitio propuesto para la instalación de la ciudad de Chaitén, y entrega un diseño conceptual de la rampa de pasajeros que permitirá dar continuidad al tránsito multimodal entre Puerto Montt, Chiloé, Palena y hacia otras localidades ubicadas más al sur. Este proyecto se origina a partir de la necesidad de reubicar la ciudad de Chaitén luego de la erupción volcánica de mayo del 2008, considerando que la ubicación original no presta las condiciones adecuadas para su seguridad y desarrollo. Es por esto que se eligió Fandango como un lugar óptimo para el emplazamiento de la rampa de pasajeros, debido a que reúne las condiciones naturales y oceanográficas para dicha obra, otorgando la mayor cantidad de días operativos.

Para analizar y determinar las condiciones oceanográficas, se realizaron mediciones de vientos, mareas, corrientes, olas y sedimentos, además de una batimetría de precisión en el área. Los antecedentes analizados determinaron que Fandango, por su configuración geográfica natural, es un lugar apto para la construcción de una rampa de pasajeros debido a lo siguiente:

- 1) Está protegido de los vientos del norte, noroeste y sur, la dirección más frecuente y la de mayor magnitud en el área fue la dirección del oeste.
- 2) Las magnitudes del viento típicas son menores a 4 m/s y los períodos de calma se dan el 42% del tiempo durante el año.
- 3) Las corrientes observadas con un instrumento ADCP fijo, muestran dominancia de las direcciones hacia el oeste en todas las capas verticales, excepto la capa superficial que presenta una dominancia hacia el sur. Sus magnitudes no superan los 40 cm/s en registros de aproximadamente 60 días. Estas direcciones y magnitudes son también observadas en mediciones lagrangianas.
- 4) La dirección dominante del oleaje local es del oeste y las alturas significativas no superan 1 m de altura.

La zona de rompiente es de alta energía, como lo corroboran los patrones de sedimentación costera, donde los tamaños más grandes de grano, asociados a gravillas, se observan en la franja costera.

Considerando todos estos antecedentes se realizó una proposición de diseño conceptual de la rampa, el cual le permitiría estar operativa la mayor cantidad de días durante el año.