



**FACULTAD DE INGENIERÍA**

Memoria de titulación para optar al Título de  
Ingeniero Civil Oceánico

**Análisis del comportamiento Morfodinámico Histórico del  
Campo Dunar de Ritoque, Quintero, Chile.**

**CRISTIÁN ANDRÉS SANTANDER ESCUDERO**

Mayo 2014

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO MORFODINÁMICO HISTÓRICO DEL CAMPO  
DUNAR DE RITOQUE, QUINTERO, CHILE.**

Cristián Andrés Santander Escudero

**COMISIÓN REVISORA**

**NOTA**

**FIRMA**

Matías Quezada L.  
Profesor guía

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Carlos Cárdenas M.  
Docente

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Hernán Vergara C.  
Docente

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

## **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 exclusivamente 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 los propósitos de obtención del Título Profesional de Ingeniero Civil Oceánico, el autor renuncia a los derechos legales sobre la misma y los cede a la Universidad de Valparaíso, la que estará facultada para utilizarla con fines exclusivamente académicos.*

Matías Quezada L.  
Profesor Guía.

Cristián Santander E.  
Alumno Memorista.

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero agradecer a mi profesor guía Don Matías Quezada Labra, quien me dio la posibilidad de realizar esta memoria de título y por preocuparse de que avanzara. Gracias.

A mis familiares quienes hayan dado apoyo durante mi transcurso de vida. A mi Tía Ana quien siempre me ha dado apoyo y me ha recibido y aconsejado en muchas ocasiones.

A los profesores con quienes he obtenido conocimiento y con quienes pude seguir este camino, a los profesores Patricio Winckler, como también Matías Quezada, también a Mauricio Reyes quien me dio un buen aporte con mi tema de memoria.

Quisiera agradecer a mis compañeros y a amigos, ya que con ellos mi camino fue muy ameno, y así tener muchos gratos momentos. A Mauricio M., Eduardo M., Alejandra R., María José Gangas, Jorge Gómez, Mario Venenciano, Alejandro Vera y al Pato ¡. Entre ellos también a Juan Carlos Mercado, quien no está pasando por buenos momentos y aprovecho por la presente de enviarle un gran saludo y muchas fuerzas ¡.

A quienes me han dado un gran apoyo en los momentos de luto y me daban una buena compañía, como también momentos que siempre guardaré en mí.

Finalmente a mi abuela “Chela” quien me dio las instancias y la oportunidad de realizar mis estudios.

Millones de gracias ¡  
Cristián.

*A mi Madre y a mi Hermana*

*“Quien de verdad sabe de qué habla, no encuentra razones para levantar la voz”*

*Leonardo da Vinci.*

*“Saber que sabemos lo que sabemos y saber que no sabemos lo que no sabemos,  
ese es el verdadero conocimiento”*

*Nicolás Copérnico*

## **CONTENIDOS**

1	INTRODUCCIÓN .....	1
2	OBJETIVOS.....	3
2.1	MOTIVACIÓN.....	3
2.2	OBJETIVO GENERAL .....	3
2.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	3
3	MARCO TEÓRICO .....	4
3.1	MORFOLOGÍA DE DUNAS LITORALES.....	4
3.1.1	FORMAS DUNARES LITORALES.....	4
3.1.2	FORMAS DE SISTEMAS DUNARES COSTEROS VEGETADOS.....	6
3.1.3	DINÁMICA DUNAR .....	7
3.2	VIENTOS.....	8
3.2.1	FUERZAS GOBERNANTES EN EL VIENTO .....	8
3.3	TRANSPORTE EÓLICO DE SEDIMENTOS .....	16
3.3.1	CONDICIÓN INICIAL PARA EL COMIENZO DEL MOVIMIENTO.....	17
3.3.2	OTROS MODELOS DE TRANSPORTE EÓLICO DE SEDIMENTOS.....	23
4	CARACTERIZACIÓN DEL MEDIO.....	27
4.1	CARACTERIZACIÓN GEOMORFOLÓGICA GENERAL.....	27
4.2	CARACTERIZACIÓN DE SEDIMENTOS .....	32
4.3	VIENTOS.....	35
4.3.1	GENERALIDADES.....	35
4.3.2	VIENTOS MEDIDOS EN PUNTA ÁNGELES.....	36
4.3.3	MODELACIÓN DE LOS CAMPOS DE VIENTOS.....	38
4.3.4	VALIDACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO.....	50
5	RESULTADOS.....	54
5.1	VIENTOS EN DUNAS DE RITOQUE.....	54
5.2	CUANTIFICACIÓN DE CAUDALES SÓLIDOS .....	55
5.3	ANÁLISIS HISTÓRICO DE DESPLAZAMIENTOS DE DUNAS .....	66
5.3.1	BASE DE DATOS FOTOGRÁFICOS.....	66
5.3.2	ANÁLISIS HISTÓRICO .....	74
5.4	SUPERFICIE ESTIMADA DE AVANCE.....	77
5.5	PROYECCIONES ESTIMADAS A FUTURO .....	79
5.6	RECOPIACIÓN DE MEDIDAS DE MITIGACIÓN REALIZADAS .....	80
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	84
7	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	86
8	ANEXOS.....	88
8.1	ANEXO A: CAMPOS DE VIENTOS .....	89
8.2	ANEXO B: MODO DE CÁLCULO DE WASP Y WASP ENGINEERING.....	98

**LISTA DE TABLAS**

Tabla 1: Modos de transporte eólico.....	16
Tabla 2: Formulaciones de transporte eólico de sedimentos.....	18
Tabla 3: Ubicaciones punto de muestreo.....	33
Tabla 4: Tabla de Vientos Punta Ángeles.....	36
Tabla 5: Tabla de valores de rugosidades.....	42
Tabla 6: Valores de Rugosidades utilizados en modelación de vientos.....	42
Tabla 7: Áreas en m <sup>2</sup> de sectores del campo dunar.....	73
Tabla 8: Porcentaje de áreas del campo dunar c/r a año base.....	73
Tabla 9: Comparación de resultados, sector norte campo dunar.....	78

## **LISTA DE FIGURAS**

Figura 1: Ubicación de Ritoque.....	1
Figura 2: Sector Norte Campo dunar.....	2
Figura 3: Tipos de dunas litorales.....	5
Figura 4: Anteduna y duna libre transversal.....	7
Figura 5: Fuerza de gradiente de presión.....	8
Figura 6: Giro de distintos puntos de la superficie de la tierra.....	9
Figura 7: Viento Geostrófico (anulación de fuerzas).....	10
Figura 8: Viento resultante con rozamiento terrestre.....	11
Figura 9: Equilibrio de fuerzas en trayectorias curvas.....	12
Figura 10: Espiral de Ekman.....	13
Figura 11: Brisas Costeras.....	15
Figura 12: Velocidad de corte de inicio de movimiento para arenas húmedas.....	21
Figura 13: Variación del perfil de velocidad del viento debido a la presencia de vegetación.....	22
Figura 14: Efectos de ciertos aspectos de la vegetación en el transporte de sedimentos.....	23
Figura 15: Ajuste de transporte adimensional de Sørensen.....	25
Figura 16: Elementos con la misma área lateral y distinto número de elementos.....	25
Figura 17: Campo dunar de Ritoque.....	27
Figura 18: Funcionamiento del río Aconcagua.....	28
Figura 19: Perfil del campo dunar de Ritoque.....	28
Figura 20: Dunas borderas o anteduna. Diciembre 2011.....	31
Figura 21: Fotografía dunas sector sur. Diciembre 2011.....	31
Figura 22: Imagen de tarjeta Sand-gauge.....	32
Figura 23: Mapa ubicaciones muestreo y Observaciones.....	33
Figura 24: Comparación "in situ" de sedimentos, Sector 1.....	34
Figura 25: Esquema general para el desarrollo de vientos.....	35
Figura 26: Ubicación registro de vientos Punta Ángeles.....	36
Figura 27: Rosa de Vientos Punta Ángeles (sin considerar calmas).....	37
Figura 28: Representación de cambios en el terreno, de rugosidad y de obstáculos.....	39
Figura 29: Cambios de perfil por efecto de topografía.....	40
Figura 30: Curvas de Nivel, Restitución Cartografía IGM.....	41
Figura 31: Mapa de rugosidades.....	43
Figura 32: Módulos de calculo Wasp.....	43
Figura 33: Mallas de cálculo de Wasp y Wasp Engineering.....	44
Figura 34: Configuración de Malla.....	45
Figura 35: Campo de Viento medio incidente desde SW.....	46
Figura 36: Acercamiento Valparaíso y Viña del Mar, caso SW.....	47
Figura 37: Acercamiento Concón y Ritoque, caso SW.....	48
Figura 38: Campo de Viento medio incidente desde NW.....	49
Figura 39: Ubicación de mediciones proyecto EOLO.....	50
Figura 40: Comparación de Estadística de vientos a 10 m. Sitio Quintero.....	51
Figura 41: Comparación de Estadística de vientos a 10 m. Sitio Ritoque.....	52
Figura 42: Campo de viento medio SW en campo dunar de Ritoque.....	54
Figura 43: Esquema de cálculo de velocidad umbral a 10 m y de caudal sólido.....	57
Figura 44: Área de cálculo de caudales.....	59
Figura 45: Mapa de valores de rugosidades detallado en campo dunar.....	60
Figura 46: Caudal anual en [m <sup>3</sup> /año/m], Dir NW, Bagnold, Kawamura.....	61
Figura 47: Caudal anual en [m <sup>3</sup> /año/m], Dir NW, Lettau y Lettau, White.....	62

Figura 48: Esquema sistema de caudal.....	64
Figura 49: Análisis espacial de caudal de Bagnold (1941), en sentido NE.....	65
Figura 50: Fotos aéreas campo dunar 1970, 1975.....	66
Figura 51: Fotos aéreas campo dunar 1977, 1996.....	67
Figura 52: Fotos aéreas campo dunar 2007.....	68
Figura 53: Áreas demarcadas campo dunar, año 1970.....	69
Figura 54: Áreas demarcadas campo dunar, año 1975.....	70
Figura 55: Áreas demarcadas campo dunar, año 1996.....	71
Figura 56: Áreas demarcadas campo dunar, año 2007.....	72
Figura 57: Comparación años 1970, 1975 y 1977.....	74
Figura 58: Comparación años 1977, 1996 y 2007.....	75
Figura 59: Sector Norte de campo dunar, años 1977, 1996 y 2007.....	76
Figura 60: Cuantificación de avances y retrocesos, años 1977, 1996 y 2007.....	76
Figura 61: Cambios de la línea del campo dunar.....	77
Figura 62: Determinación de la superficie de avance, sector norte.....	78
Figura 63 : Posibles avances de campo dunar, sector norte.....	79
Figura 64: Trabajos de trampas de arenas.....	80
Figura 65: Empalizadas en dunas borderas. 1980.....	81
Figura 66: Dunas borderas actuales (Diciembre 2011).....	81
Figura 67: Trampas actuales, Sector Norte.....	82
Figura 68: Área propuesta para plantación.....	83
Figura 69: Campo de Vientos Medios, Dirección Norte.....	90
Figura 70: Campo de Vientos Medios, Dirección Noreste.....	91
Figura 71: Campo de Vientos Medios, Dirección Este.....	92
Figura 72: Campo de Vientos Medios, Dirección Sureste.....	93
Figura 73: Campo de Vientos Medios, Dirección Sur.....	94
Figura 74: Campo de Vientos Medios, Dirección Suroeste.....	95
Figura 75: Campo de Vientos Medios, Dirección Oeste.....	96
Figura 76: Campo de Vientos Medios, Dirección Noroeste.....	97

## **RESUMEN**

En el presente documento corresponde al proyecto de título llamado “Análisis del comportamiento Morfodinámico Histórico del Campo Dunar de Ritoque, Quintero, Chile.”, en el cual se aborda cuatro etapas principales: Clima de Vientos, Morfología General del Campo Dunar de Ritoque, Avances del campo dunar y por último Transporte Eólico de Sedimentos, finalmente se da una sugerencia de un sistema de trampas de arenas, para evitar el avance progresivo.

En el primer punto, se caracterizó el campo de vientos medios en el sector de estudio en la dirección principal en que existe el transporte de sedimentos.

En el segundo punto, se describió la geomorfología general del campo dunar de Ritoque, dando a conocer las características de este campo en sectores de norte a sur.

Luego se realizó un mapeo del transporte eólico de los sedimentos, en donde se obtienen los caudales existentes en el sector de estudio. Finalmente se dan a conocer recopilaciones de trabajos realizados en el campo dunar, con propósitos similares.

Del análisis de los vientos se obtuvo que los provenientes del SW son dominantes en el campo dunar, los cuales dan formas y realizan el transporte de los sedimentos. Con estos se obtuvieron mapas teóricos de caudales de sólidos, con los cuales se determinó que en el sector norte las dunas se encuentran en depositación, avanzando en dirección NW.

Se realizó un análisis en base a un set fotográfico histórico del campo dunar, del cual se determinó que éstas se encuentran activas, con sectores de avance y de retrocesos, siempre variando. En el sector norte cercano a la ruta de acceso a Quintero, se tiene que una progradación promedio de 1,12 m/año.

Con lo anterior, se determinó que si se mantienen la condiciones actuales en el sector norte del campo dunar, en aproximadamente 100 años se tendrá un avance importante de este, cubriendo un sector de la carretera de acceso sur a Quintero y áreas aledañas a esta.