



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 j. 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 j.

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 j
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	RECOPILACIÓN 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 ² 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 ³ /año/m], Dir NW, Bagnold, Kawamura.	61
Figura 47: Caudal anual en [m ³ /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.

1 INTRODUCCIÓN

La V Región de Chile tiene 1.734.917 habitantes con una superficie de 16.396,1 km², representando el 2,16% del territorio del país, concentrándose el 42,3% de los habitantes en la provincia de Valparaíso (según censo del año 2012).

Esta región es uno de los principales destinos turísticos nacionales, ejerciendo también atracción sobre los países vecinos, principalmente Argentina y Brasil, lo que hace que se incremente la población en cientos de miles de personas en época de verano y durante los fines de semana. Esta se caracteriza por ser una zona en donde se encuentran diversos balnearios altamente concurridos en época de verano dados por sus grandes distracciones comenzando por su extensa costa, en la cual se encuentran el balneario de Zapallar, Papudo, Algarrobo, Reñaca entre otras. Adicionalmente, pueden ser identificados algunos cordones dunares como el de Concón y Ritoque.

El estudio a realizar se centrará en Ritoque, específicamente en sus dunas ya que análisis preliminares indican que éstas presentan un comportamiento morfodinámico altamente activo, con evolución de largo plazo con una tendencia general a la progradación (Castro, 1987).

El barrio de Ritoque es uno de los más grandes de Quintero, su extensión terrestre tiene un largo y ancho de 20 y 10 km respectivamente. En la Figura 1 se ilustra su ubicación relativa a la capital regional.



Figura 1: Ubicación de Ritoque.
(Fuente: Ministerio de Obras Públicas)

La acción eólica en las dunas de Ritoque es particularmente activa. Desde los años 1945 hay referencias a la invasión de arenas que periódicamente cubrían la línea de ferrocarril que va de San Pedro a Quintero y que pasa por la zona de las dunas borderas de Ritoque (Pascoff y Manriquez, 2004)

Este proyecto de título se centrará en el análisis histórico del campo dunar de Ritoque, específicamente en el sector Norte, dado que existe la probabilidad, debido al avance de este campo dunar, de que sectores de la carretera de acceso a Quintero sean invadidos, ocasionando problemas a futuro (Figura 2).



**Figura 2: Sector Norte Campo dunar.
(Fuente: Google Earth)**

Para cuantificar los avances, se realizará un análisis de fotografías aéreas y de caudales de sedimentos a causa de los vientos del sector.

2 OBJETIVOS

2.1 MOTIVACIÓN

En la Ingeniería Marítima se encuentra el área de Ingeniería de Costas, la cual se pueden utilizar una gran cantidad de temáticas, como procesamiento y análisis de datos, ya sean en hidrodinámica y sus efectos en las costas y playas, y de este modo obtener diseños de obras.

Una de las temáticas que comprende la Ingeniería de Costas es el estudio y análisis de transporte eólico de sedimentos, la cual a diferencia del transporte ocasionado por efectos hidrodinámicos, no ha sido estudiado en profundidad, ni se han realizado investigaciones acabadas en el tema en la carrera de Ingeniería Civil Oceánica de la Universidad de Valparaíso.

Poder conocer y entender los procesos morfodinámicos de dunas costeras, explicar su evolución en el tiempo y proponer medidas de mitigación para contrarrestar sus efectos, es una de las principales motivaciones del presente estudio.

En el presente proyecto de título, se utilizarán conocimientos de esa área de la Ingeniería de Costas, en la cual se emplearán datos y métodos que complementan de una adecuada manera el estudio de la morfología del campo dunar de Ritoque.

2.2 OBJETIVO GENERAL

Caracterizar la evolución morfodinámica el campo dunar de Ritoque, mediante la aplicación de un análisis histórico y modelación numérica del transporte de sedimentos.

2.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Conocer las condiciones de viento en la zona de estudio.
- Determinar las condiciones sedimentológicas y de transporte eólico de los sedimentos superficiales.
- Identificar y cuantificar los sectores de movimiento de las dunas de Ritoque.
- Realizar una proyección a futuro del movimiento de las arenas (duna, sector norte).
- Proponer alternativas de trampas para sedimentos.

3 MARCO TEÓRICO

3.1 MORFOLOGÍA DE DUNAS LITORALES

Las dunas¹ litorales son acumulaciones de sedimentos arenosos secos, no consolidados y aerotransportados cuya formación ocurre por efectos del aporte de sedimentos marinos y terrestres que se acumulan en la línea de playa por acción del viento y del oleaje. Su asentamiento depende de la topografía y vegetación (Peña et al, 2008), esta última es una gran diferencia entre las dunas litorales con respecto a las dunas de desierto.

En algunas escuelas alrededor del mundo en ocasiones se emplea el término dunas para describir formas de fondo de ambientes sub-acuáticos, mientras que para aquellas formaciones expuestas a efectos eólicos se les denomina médano.

Generalmente, el suministro de sedimentos de las dunas litorales proviene desde los ríos, que atraviesan transversalmente el territorio, y sus arenas son depositadas en la playa junto a la duna (Pascoff y Manriquez, 2004).

Los vientos tienen un rol esencial en la formación y evolución de las dunas, ya que acarrear las arenas secas superficiales de la playa. Para que suceda el transporte eólico de los sedimentos, la forzante tiene que alcanzar una velocidad que sea capaz de moverlos, la que depende del tamaño de las partículas a movilizar, en la cual existe una mayor tasa de transporte por saltación en los meses de verano, donde se encuentran las arenas secas. (Pascoff y Manriquez, 2004).

Algunos autores (Perillo, 2003) describen el transporte eólico de sedimentos como un fenómeno altamente dominado por la dinámica vertical, ya que para ponerse en movimiento se requiere que la tensión crítica inducida por el viento sea tal que logre suspender las partículas hasta una altura en donde el perfil de velocidad sea capaz de desplazarlas.

3.1.1 FORMAS DUNARES LITORALES

En las dunas costeras se presentan diversas formas, las cuales son moldeadas por los vientos marinos, así como también algunas de estas son intervenidas por la presencia de vegetación, la erosión a causa de usos de parte del hombre y la posición del nivel freático. Algunas de estas formas dunares son:

- A) Cordón dunar simple.
- B) Duna tabular.
- C) Dunas remontantes o rampantes de alto y bajo grado.
- D) Barjantes.
- E) Dunas parabólicas o en forma de U.

¹ Nótese que algunos geomorfólogos utilizan el termino Médano cuando el agente de transporte del sedimento es el viento (Perillo, 2001). En este proyecto de título se utiliza el término "duna" para el campo dunar de Ritoque.

- F) Depresión o casquete subelíptico de erosión ("blowout"), con ribete sedimentario sobre un fondo plano por implicación de la capa freática.
- G) Depresión o casquete alargado de erosión.
- H) Duna lingüiforme con cresta ligeramente convexa.
- I) Parte de un aklé, en este caso la forma protuberante de un sistema de barjanes coalescentes, también denominados duna barjanoides; los bordes laterales constituyen barjanes verdaderos.

En la Figura 3, se ilustra cada una de las formas clásicas de las dunas litorales.

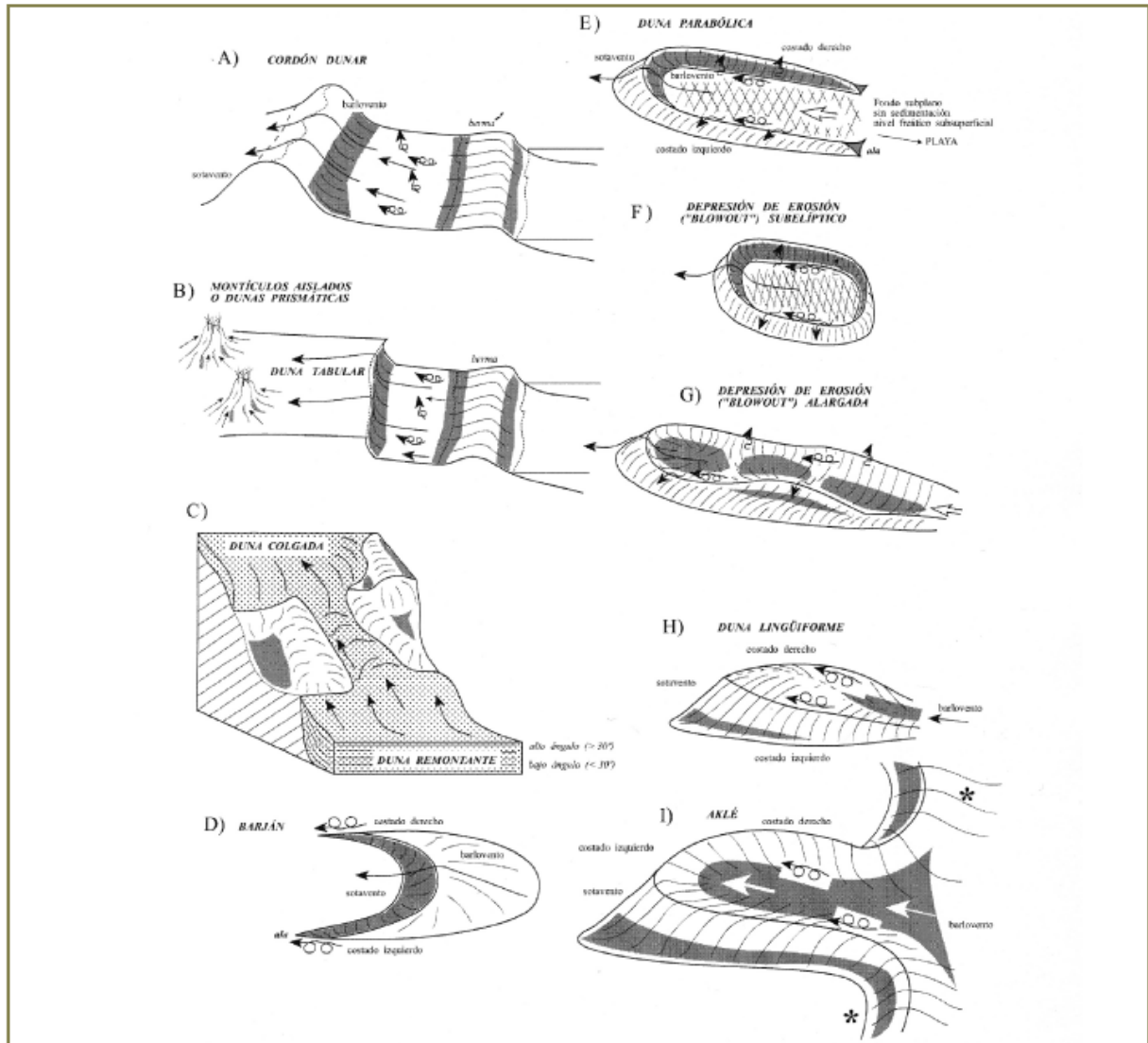


Figura 3: Tipos de dunas litorales
(Fuente: Ministerio del Medio Ambiente, 2007)

3.1.2 FORMAS DE SISTEMAS DUNARES COSTEROS VEGETADOS

Los sistemas dunares costeros dependen esencialmente de la cantidad de arena en movimiento por el viento a partir de la playa y la capacidad de la vegetación de obstaculizar el desplazamiento de estas. De forma secundaria, también influyen las inundaciones y acción del oleaje por parte del mar.

3.1.2.1 Morfologías de Sistemas Dunares Costeros

La Anteduna:

Son las dunas que se forman inmediatamente atrás de las playas por las arenas movidas a través de deflación (o arrastre) desde la playa y son atrapadas por plantas capaces de detenerlas. Estas son paralelas a la playa y están en equilibrio, ya que son parcialmente erosionadas por olas y alimentadas con sedimentos por efecto del viento. Por lo anterior, el estado de las antedunas depende en gran parte del tipo de planta que se presentan en esta área (Pascoff y Manriquez, 2004). Es decir, son parcialmente dominadas por la biología del sector.

Las Dunas Transversales:

Cuando las arenas no son retenidas por las plantas existentes en la anteduna, sea por que las plantas no pueden atraparlas, o porque el volumen de desplazamiento es grande o ambos casos, se forma detrás de éstas dunas transversales que avanzan tierra adentro.

Las Dunas Longitudinales:

Estas dunas tienen la forma de cordones paralelos con plantas, alargados en el sentido de los vientos dominantes en varios centenares de metros, separados por corredores de algunos metros de profundidad.

De forma más frecuente, este tipo de dunas son originadas por dunas parábolas de las cuales su frente móvil ha desaparecido progresivamente durante su movimiento, dejando solamente los brazos.

Las Dunas Remanentes:

Estas dunas no reciben aportes sedimentarios por parte del transporte sedimentario a causa del viento, pero mantienen su forma, sin tener presencia de vegetación. En Chile este tipo de dunas se encuentran en las costas áridas del desierto de Atacama. (Pascoff y Manriquez, 2004).

En el cuadro A) de la Figura 4 las plantas son capaces de retener las arenas transportadas formándose una anteduna, mientras que en el cuadro B) las plantas no retienen las arenas en movimiento, por lo que se forma una duna transversal del tipo barján.

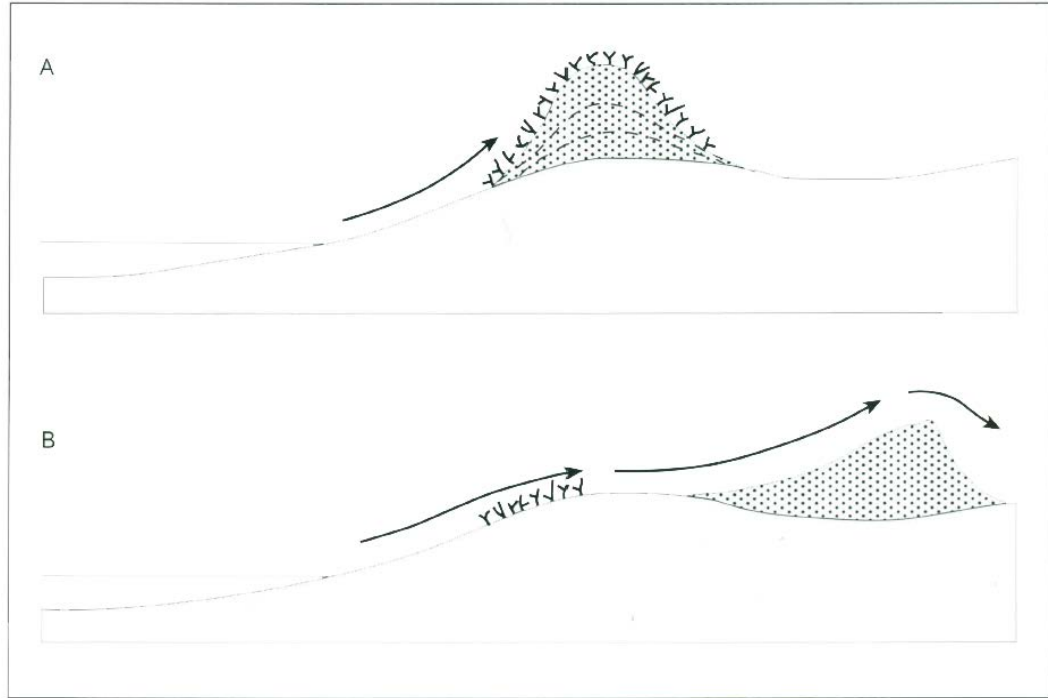


Figura 4: Anteduna y duna libre transversal
(Fuente: Pascoff y Manriquez, 2004)

3.1.3 DINÁMICA DUNAR

El inicio, desarrollo y morfología en equilibrio de las dunas está gobernado por los cambios de las tasas de transporte de los sedimentos en el tiempo y en el espacio, originando los depósitos y erosión de estos. Los esquemas de sedimentación-erosión local son aplicables a todas las dunas y campos dunares, siendo cuantificados por la ecuación de continuidad del sedimento, con el fin de determinar la dinámica en términos de balance sedimentario.

$$\frac{dh}{dt} \propto \frac{dq_{si}}{dx_i} + \frac{dq_{si}}{dt} \quad (1)$$

Donde:

- $h(x_i; t)$ es la elevación de la superficie.
- x_i es la coordenada horizontal en una dirección.
- $q_{si}(x_i, t)$ es la tasa de transporte en la dirección x_i .

3.2 VIENTOS

El viento es definido como el movimiento del aire de forma horizontal, sin incluir la componente vertical, siendo estos los desplazamientos relativos a la superficie de la tierra y no como absolutos. Por lo anterior, no se considera “viento” al movimiento de las masas de aire que pertenecen a la atmósfera y que se mueven del mismo modo en que la tierra tiene su movimiento de rotación en dirección W-E. Por ende, si se tiene un movimiento del aire en dirección W-E a idéntica velocidad que la rotación terrestre, debe ser considerado como calma.

3.2.1 FUERZAS GOBERNANTES EN EL VIENTO

Los vientos son generados por cuatro fuerzas impulsoras fundamentales, siendo éstas la de gradiente de presión, Coriolis, rozamiento terrestre y centrífuga. Cada una de ellas se definen a continuación.

Fuerza Gradiente de Presión:

Esta es la fuerza generada por diferencias de presión en dos sitios distintos, por la cual el aire se dirigirá del lugar con mayor presión a otro con menor, y su velocidad será proporcional al gradiente barométrico existente entre ambos puntos, es decir a la diferencia de presión existente entre los 2 puntos en relación a la distancia horizontal que los separa (Figura 5).

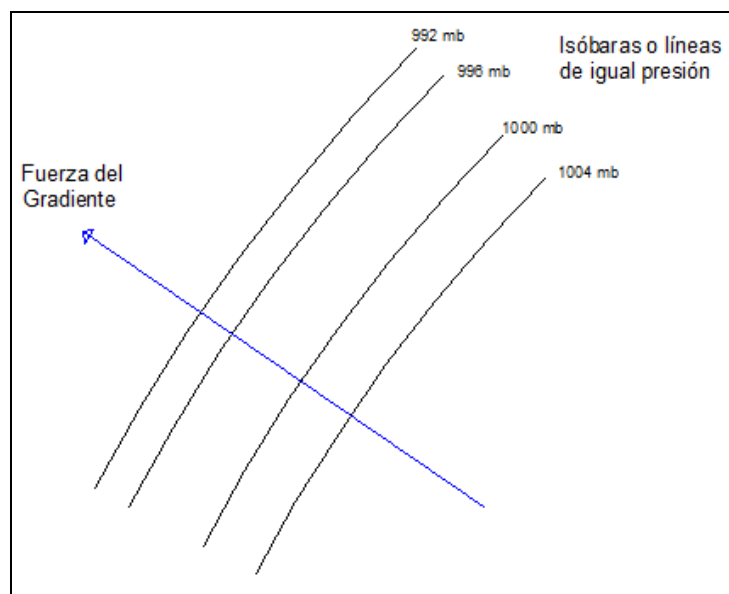


Figura 5: Fuerza de gradiente de presión
(Fuente: elaboración propia)

Lo anterior sugiere que esta fuerza es la primera que mueve los aires que se encuentran en un desequilibrio barométrico en distintos lugares, de donde se hallan altas presiones que tienen una acumulación de masas de estos, hacia lugares con baja presión, las cuales tienen un déficit, de este modo esta fuerza tiende a encontrar un equilibrio entre las presiones con el desplazamiento del aire.

Fuerza de Coriolis:

Esta fuerza actúa modificando la trayectoria de un flujo, el cual fue observado por Coriolis en 1835, y más tarde, en el año 1856, William Ferrer basándose en el enunciado de Coriolis, realiza el siguiente teorema: *“Cualquier fluido que se mueva horizontalmente en el hemisferio Norte tiende a ser desviado hacia la derecha de su trayectoria, independientemente de la orientación que esta tenga. En el hemisferio sur se produce una desviación similar, pero hacia la izquierda”*.

Esta fuerza es originada por el movimiento de rotación de la tierra que tiene alrededor del eje que atraviesa los polos. Cada punto en la superficie de la tierra, a excepción de los sitios en el Ecuador, giran alrededor del eje de los polos, y también giran alrededor de su propio eje vertical, como se muestra en la Figura 6.

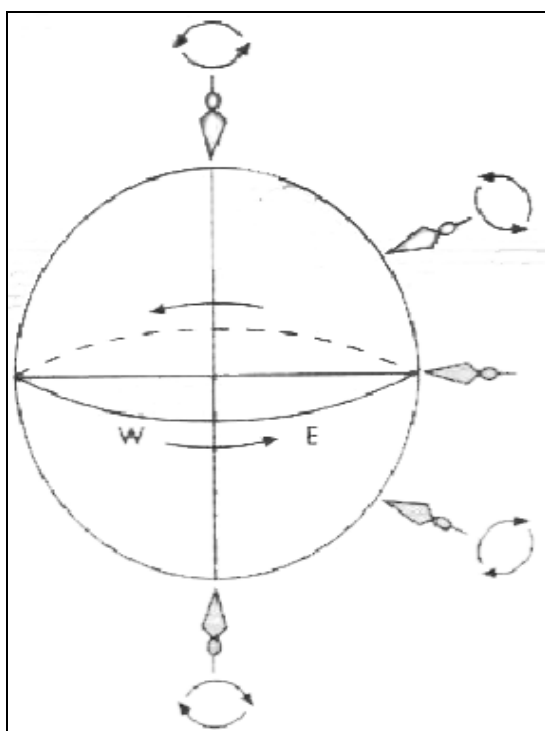


Figura 6: Giro de distintos puntos de la superficie de la tierra.
(Fuente: Cuadrat y Pita, 2000)

La superficie de la tierra es la que gira alrededor del eje polar, mientras que los vientos que tienen una trayectoria inicial por encima de la superficie no lo hacen.

Cuando el viento es impulsado por un gradiente de presiones y se pone en movimiento, la fuerza de Coriolis empieza a actuar inmediatamente. Esto se puede visualizar en la Figura 7, donde parte en la posición 1, con el inicio del movimiento por medio del gradiente de presión, pasando por la posición 2 a la 4 siendo acelerado por el gradiente de presión. El viento se desvía a la derecha a causa de la fuerza de Coriolis, hasta llegar a la posición 5, en donde las fuerzas de Coriolis y del gradiente de presión se anulan. De este modo el flujo de viento se mueve de forma paralela a las isóbaras, sin ser acelerado.

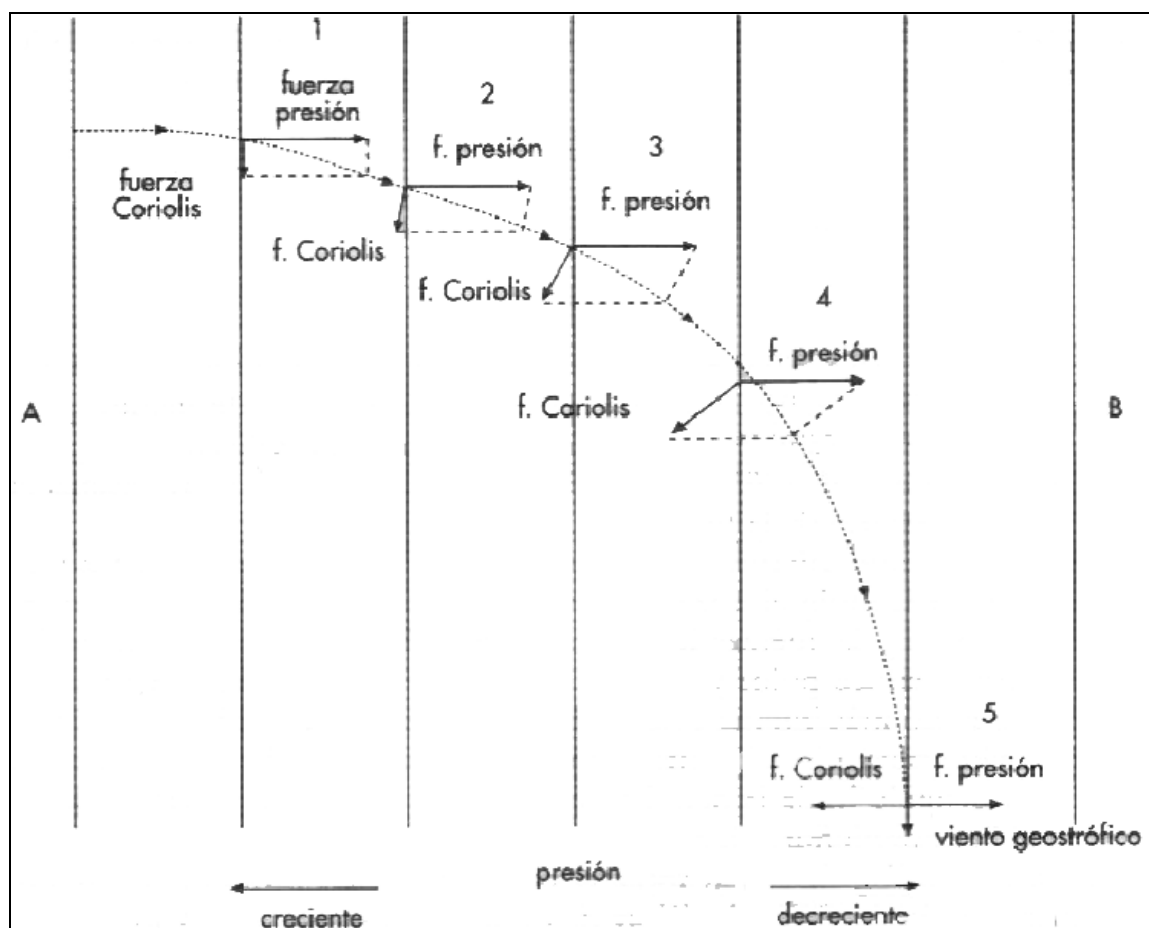


Figura 7: Viento Geostrófico (anulación de fuerzas).
(Fuente: Cuadrat y Pita, 2000)

A este flujo de vientos se le denomina *Vientos Geostróficos*, y se produce siempre que las isóbaras sean rectilíneas y que las fuerzas actuantes en el viento sean la de Coriolis y la del gradiente de presión.

En la realidad este viento nunca suele generarse ya que es muy difícil que se desarrollen isóbaras rectilíneas, pero es una buena aproximación cuando las líneas de igual presión no están muy curvadas y en las capas altas de la atmósfera, en donde no actúa el rozamiento terrestre.

Roce Terrestre:

Los vientos cercanos a la superficie terrestre (o en las capas bajas de la atmósfera) son sometidos a los efectos de rozamiento. En las zonas continentales, donde hay un relieve accidentado y de gran rugosidad, implican que existe una cierta adherencia con el aire que fluye encima de esta.

Esta fuerza debilita el efecto de Coriolis, debido a que este rozamiento implica que existe una cierta adherencia entre la superficie rugosa y el aire que va circulando por encima de ella, debido a esto el aire y la superficie terrestre no son absolutamente independientes.

Efectivamente, el rozamiento terrestre actúa en dirección contraria al movimiento del aire, ralentizando su velocidad. Al sumar de forma vectorial el roce con el gradiente de presiones, se obtiene la fuerza resultante, la cual será anulada por la de Coriolis, lo que genera que el viento tenga una dirección oblicua a las isóbaras y uniformemente acelerado, tal como se puede apreciar en la Figura 8:

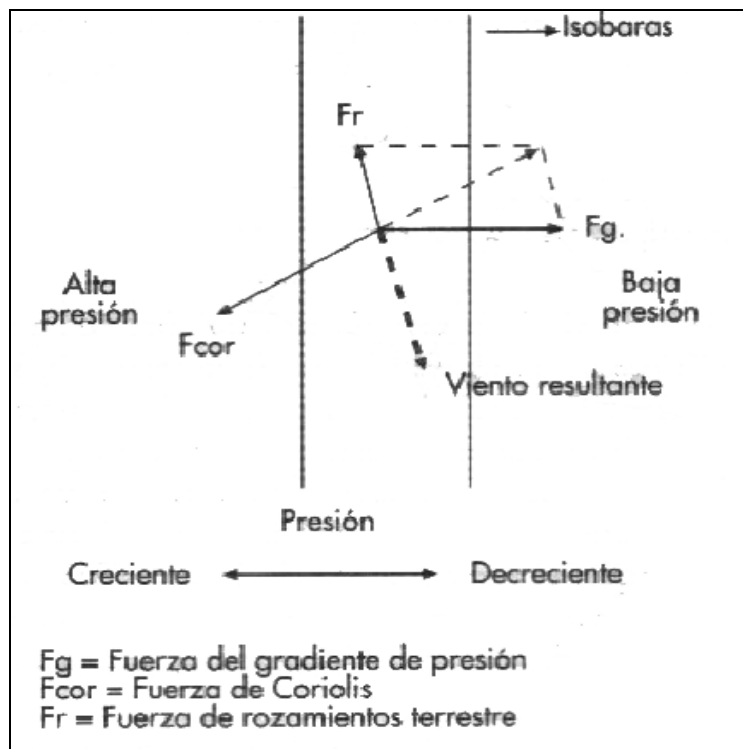


Figura 8: Viento resultante con rozamiento terrestre.
(Fuente: Cuadrat y Pita, 2000)

El grado de oblicuidad del viento con respecto a las isóbaras dependerá del grado de la intensidad de la fuerza de arrastre. Si el roce es máximo, el viento se adhiere por completo a la superficie de la tierra y forma un ángulo de 90° con respecto a las isóbaras, en caso contrario se producen los vientos geostróficos.

Fuerza Centrífuga en Trayectorias Curvas:

Cuando el viento viaja por trayectorias curvas, las partículas de aire tienden a alejarse del centro del giro por causa de la fuerza centrífuga.

Los vientos se mueven con las fuerzas en equilibrio (gradiente, Coriolis y centrífuga), denominándose a este como Viento del Gradiente, en el cual la situación es diferente a los fenómenos de ciclones y de las depresiones (Ver Figura 9).

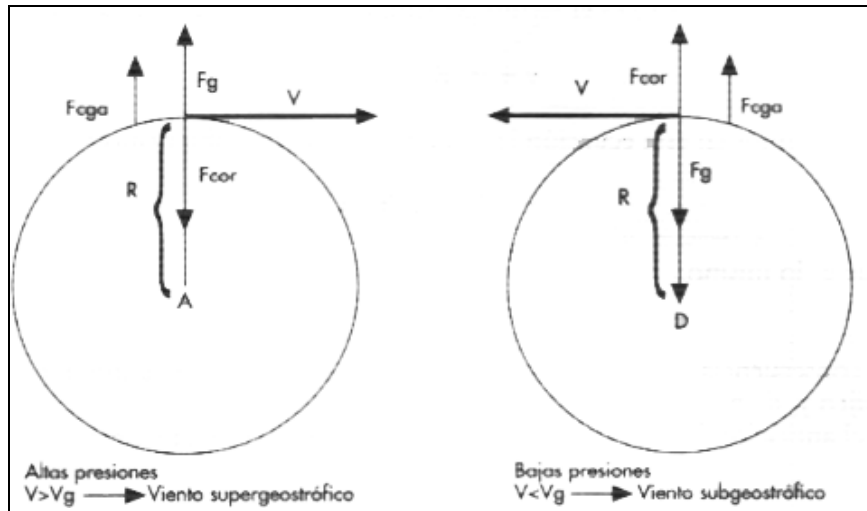


Figura 9: Equilibrio de fuerzas en trayectorias curvas.
(Fuente: Cuadrat y Pita, 2000)

En la atmósfera se encuentran una gran cantidad de casos que hacen que los vientos varíen en su intensidad y dirección, causados también por las fuerzas en distintos equilibrios, pero la mayor variación se hallan en el eje vertical de la atmósfera, donde se tienen cambios de densidad como también de fuerza de rozamiento.

3.2.1.1 Variación Vertical del Viento

En medida que la altura crece, la velocidad del viento se intensifica, lo que ocurre básicamente por dos razones: en primer lugar la densidad del aire disminuye, lo que provoca que la fuerza de gradiente tenga aún mayor efecto, y en segundo lugar es a causa de la disminución de la fuerza de rozamiento terrestre, y con ello también existe un cambio de dirección hacia la derecha en el hemisferio Norte, con respecto a la altura a medida que esta fuerza pierde su magnitud, por ende, a alturas en torno a los 600 – 1000 m. se encuentran vientos geostróficos.

A este cambio de velocidad y de dirección con respecto a la vertical se le llama Espiral de Ekman (Ver Figura 10).

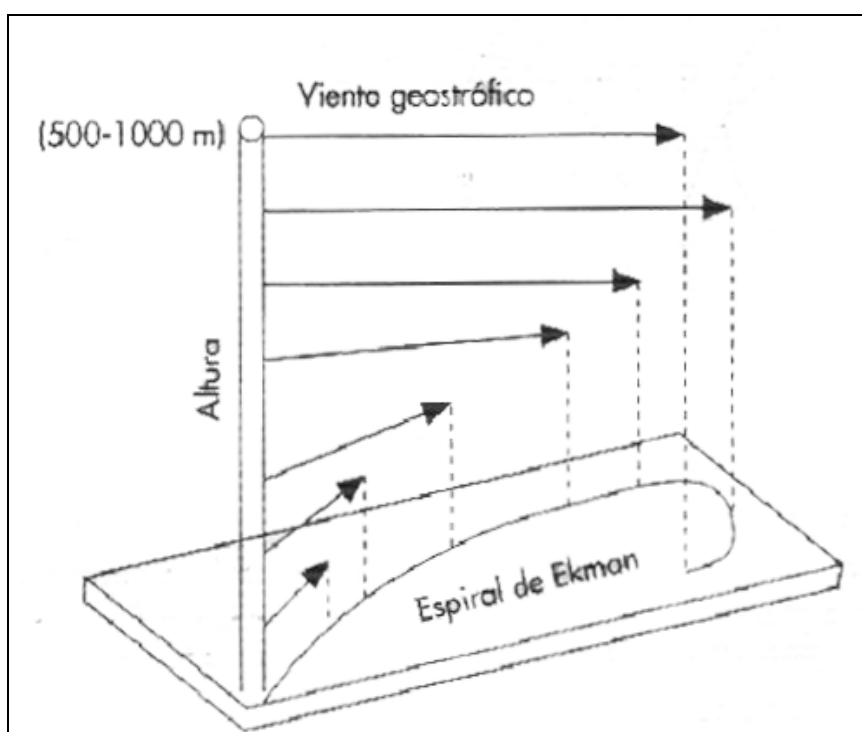


Figura 10: Espiral de Ekman.
(Fuente: Cuadrat y Pita, 2000)

Debido a que las mediciones preliminares generalmente se realizan a 10 m respecto del nivel de terreno, aunque hay casos en que se realizan a menores alturas originalmente con otros fines, la técnica comúnmente usada para estimar velocidades a mayores alturas es extrapolar los valores obtenidos y de esta manera construir el perfil de velocidad del viento del sitio.

Existen diversas expresiones teóricas usadas para determinar el perfil de velocidad del viento, las cuales generalmente describen una distribución logarítmica en función a la altura.

Un parámetro importante en representación es la *velocidad de fricción* definida por:

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho_a}} \quad (2)$$

Donde:

- τ es el esfuerzo cortante límite (fuerza por unidad de área).
- ρ_a es la densidad del aire.

El perfil vertical logarítmico del viento es dado por la siguiente expresión:

$$U_z = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left(\frac{z_0 + z}{z_0} \right) \quad (3)$$

Donde:

- U_z es la velocidad promedio en función de la altura sobre el nivel del terreno.
- z es la altura sobre el nivel de terreno.
- z_0 es la altura de un elemento de rugosidad característico de la superficie donde el viento sopla.
- κ es la constante de Von Karman, generalmente se considera $\kappa = 0,4$.

En este proyecto de título se utilizarán vientos registrados u obtenidos por medio de procesos que se describirán más adelante, los cuales corresponden a la capa inmediata a la superficie de la tierra para el sector del campo dunar de Ritoque, y que son los causantes del transporte eólico de sedimentos.

A continuación se dará una breve descripción de los vientos en zonas inmediatas a la superficie, en especial a los vientos costeros, los cuales serán tratados en este proyecto de título.

Vientos en capas inmediatas a la superficie y de áreas costeras

Estos vientos son afectados por la fuerza de rozamiento terrestre de tal modo que su velocidad es reducida en una gran medida, y fluyen prácticamente de forma perpendicular a las isóbaras, siendo así guiados por la fuerza de gradiente.

Estos vientos son modificados por apariciones de isóbaras específicas locales, producidas por fenómenos térmicos propios de la naturaleza de su superficie, y también por los obstáculos que se presenten en cada sitio.

Brisas Costeras:

El diferente comportamiento térmico existente entre el mar y la tierra originan en la costa las diferencias de temperaturas muy atenuadas. En el día la temperatura del aire sobre la tierra es mucho más elevada que el que está sobre el mar, mientras que en la noche el mar conserva la temperatura en mayor grado que la tierra por lo que es mayor que la temperatura del aire sobre la tierra. Estas diferencias térmicas generan diferencias de densidad, por lo que se originan la aparición de circulaciones de aire a las que se denominan circulaciones térmicas. (Ver Figura 11).

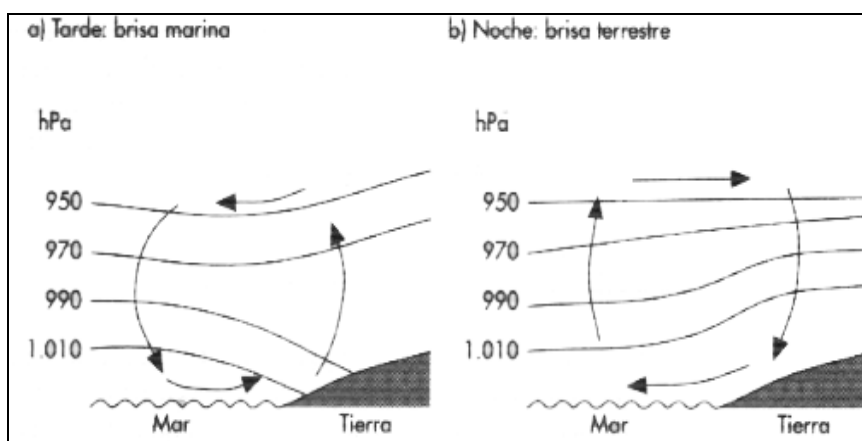


Figura 11: Brisas Costeras.
(Fuente: Cuadrat y Pita, 2000)

Este fenómeno no es fácil de visualizar, dado que el viento costero es combinado por el campo de vientos producido por el gradiente de presiones, por lo que si se tiene un campo de presiones prácticamente constante en el área se pueden apreciar este fenómeno con mayor claridad, y con condiciones de tiempo en que se presenten sin nubosidades en la mayor parte del tiempo.

3.3 TRANSPORTE EÓLICO DE SEDIMENTOS

Los fenómenos espaciales y temporales en las tasas de transporte de sedimentos a causa del viento son los principales modeladores de la morfodinámica de las dunas y campos dunares.

Se pueden identificar tres tipos de transporte eólico de arenas dependiendo del tamaño de grano de la arena disponible, los cuales se describen en la Tabla 1.

Tabla 1: Modos de transporte eólico

MATERIAL	TAMAÑO (μm)	MODO DE TRANSPORTE EÓLICO	DESCRIPCIÓN DEL MOVIMIENTO
Polvo	< 60 - 70	Suspensión	Viajan en suspensión grandes distancias acompañando los remolinos turbulentos de la capa límite atmosférica. Su papel en la dinámica de dunas es insignificante. 
Arena fina media	60 - 500	Saltación y reptación	Saltación: Modo de transporte dominante en los sistemas dunares. Trayectorias parabólicas con fuertes ángulos de salida y ángulo suave de caída. Reptación: movimiento de las partículas adyacentes a las partículas que sufren impacto de los granos en saltación. 
arena gruesa	> 500	Deslizamiento	Las partículas demasiado pesadas para saltar se mueven por deslizamiento o rodadura sobre la superficie debido al impacto de los granos en saltación. También afecta a las partículas menores menos expuestas. 

(Fuente: Ministerio de Medio Ambiente, 2007)

- El modo por suspensión afecta a los granos finos y la velocidad excede a la de caída, tiene lugar cuando éstos son elevados y transportados por el viento sin caer al suelo, asemejándose al movimiento de partículas arrastradas por una corriente de agua.
- La saltación es a cierta tensión del viento donde los sedimentos se mueven realizando largos saltos siguiendo una trayectoria balística, y caen a la superficie produciendo un impacto al alcanzar el suelo que desplaza a los granos de alrededor (granos en reptación). En los impactos los granos de sedimentos pierden parte de su energía cinética pero normalmente rebotan lo suficientemente alto para ser acelerados por el viento otra vez y así continuar con el movimiento de saltación.
- La reptación (deslizamiento) se genera en el momento en que la tensión tangencial crítica es superada con lo cual el grano inicia el movimiento. En este movimiento el grano es suficientemente pesado para no ser elevado del suelo pero lo suficientemente ligero para ser empujado sin perder el contacto con la superficie.

3.3.1 CONDICIÓN INICIAL PARA EL COMIENZO DEL MOVIMIENTO

3.3.1.1 UMBRAL DEL INICIO DEL MOVIMIENTO

El movimiento se inicia cuando las fuerzas ejercidas por el fluido, ya sean de arrastre y sustentación, superan el efecto del peso y de cohesión, las cuales están relacionadas con las propiedades físicas de los sedimentos (tamaño, densidad, mineralogía, forma, empaquetamiento, contenido en humedad y de agentes adhesivos como sales solubles).

Al aumentar la velocidad, también lo hace la fuerza de elevación y de arrastre sobre la partícula, hasta llegar al umbral en el cual la resistencia a salir del reposo es superada y se inicia el movimiento del grano. A esta magnitud se le llama *velocidad de corte de inicio de movimiento* u_{*t} dado por la siguiente ecuación:

$$u_{*t} = A \cdot \sqrt{\frac{(\rho_s - \rho_a)}{\rho_a} \cdot g \cdot D} \quad (4)$$

Donde:

- A es un coeficiente empírico que depende de las características del grano ($A \cong 1$ para partículas del tamaño de las arenas).
- D es el diámetro de las partículas.

En el proceso de transferencia de la energía a través del golpe (reptación) entre partículas en movimiento con otras que no lo están, siendo las últimas que inician el movimiento, se les da un coeficiente A de 0.08, dado que su velocidad de umbral disminuye.

3.3.1.2 ECUACIONES DE TRANSPORTE EÓLICO DE SEDIMENTOS

En 1941, Bagnold realizó un trabajo que relaciona el transporte de arena en relación a la tensión de corte ejercida por el viento, el cual constituye la base teórica para la mayoría de los estudios para determinar la tasa de carga eólica. Por lo anterior, varios investigadores han desarrollado ecuaciones teóricas y empíricas que cuantifican este fenómeno que se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2: Formulaciones de transporte eólico de sedimentos

AUTOR	FORMULACIÓN	
O'Brien and Rindlaub (1936)	$G = 0,036 \cdot u_s^3$ para $(u_s > 13,4 \text{ pies/s})$	G: transporte de sedimentos en libras que pasan por pie de anchura por día. u_s : Velocidad del viento en pies/s a una altura de 5 pies.
Bagnold (1941)	$q = C \cdot \sqrt{\frac{d}{D}} \cdot \frac{\rho_a}{g} \cdot u_*^3$ g/s/cm	d = Tamaño medio de la arena en mm D = 0,25 mm C = 1,5 para arenas uniformes, 1,8 para arenas de duna naturales, 2,8 para arenas mal clasificadas y 3,5 para gravas.
Kawamura (1951)	$q = K \cdot \frac{\rho_a}{g} (u_* + u_{*t})^2 (u_* - u_{*t})$ g/s/cm	K = 2,78 para arena moderadamente bien clasificada con d = 0,25 mm
Zingg (1952) (modificado de Bagnold)	$q = C \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^{3/4} \cdot \frac{\rho_a}{g} \cdot u_*^3$ g/s/cm	C = 0,83, D = 0,25 mm
Lettau and Lettau (1978)	$q = C \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^n \cdot \frac{\rho_a}{g} \cdot u_*^2 \cdot (u_* - u_{*t})$ g/s/cm	C = 4,2; n varía de 0,5 a 0,75
Hsu (1974)	$q = H \cdot \left(\frac{u_*}{\sqrt{g \cdot d}}\right)^3$ g/s/cm	$H = (-0,42 + 4,91 \cdot d) \cdot 10^{-4}$
White (1979)	$q = 2,61 \cdot u_*^3 \left(1 - \frac{u_{*t}}{u_*}\right) \cdot \left(1 + \frac{u_{*t}^2}{u_*^2}\right) \cdot \frac{\rho_a}{g}$ g/s/cm	

(Fuente: Ministerio de Medio Ambiente, 2007)

Cabe indicar que las formulaciones descritas en la Tabla 2 están realizadas para condiciones ideales, las cuales son: a) superficies plana y secas, b) sedimentos inconsolidados y no cohesivos, c) granulometría uniforme.

Históricamente se ha reconocido a Ralph A. Bagnold como el primer investigador en realizar estudios con visión diferente del transporte eólico de arena y dunas a mediados del siglo XX, debido a que los trabajos anteriores del tema han sido meramente descriptivos. Desde entonces, se han generado estudios con experimentos en túneles de viento y observaciones de terreno de transporte de arena, como también de perfil de viento, estableciendo la velocidad crítica a partir de la cual cada partícula inicia el transporte, las relaciones entre la magnitud del transporte de arena, la fricción del viento y otras variables como el tamaño de la arena, su textura, la densidad del aire, la aceleración de gravedad y el efecto de la inclinación del terreno.

Para la adecuada utilización de las formulaciones dadas en la Tabla 2 es fundamental la caracterización de los sedimentos, así como también del régimen de vientos que reinan en el sector de estudio.

Generalmente estas formulaciones constan de una constante que dependen del tipo de sedimento constituyente de la duna, acompañado de un diámetro relativo a uno de 0.25 mm., y como se mencionó anteriormente, incluyen la gravedad y velocidad de corte y de umbral.

3.3.1.3 TRANSPORTE SOBRE SUPERFICIES NO IDEALES

Generalmente, en la naturaleza no se presentan condiciones ideales como las descritas anteriormente, y el transporte eólico de sedimentos no es la excepción. Por este motivo, se hace necesario incluir algunas modificaciones en las formulaciones convencionales, las cuales contemplan los siguientes efectos: pendientes de terreno y geometrías, que corresponden a cambios a escalas mayores en el espacio, cohesión y humedades de sedimentos y la influencia de la vegetación que dependiendo de su tipo implican un cambio a menor o mediana escala espacial. Estas condiciones de terreno modifican la dirección y velocidad local del flujo del viento. Cada condición se discutirán a continuación.

Superficies Geomorfológicamente Complejas:

Se deben tener en cuenta las principales condiciones geomorfológicas sobre las cuales sopla el viento, como la pendiente del terreno, la variabilidad de las superficies adyacentes, la presencia y la geometría de las formas de fondo.

Para el caso de superficies inclinadas como la rampa de una duna, Bagnold en 1956 propone un factor de corrección para las formulaciones de transporte eólico de condiciones ideales:

$$q_c = \frac{q_s}{\cos \beta'} (tg \varphi + tg \beta') \quad (5)$$

Donde:

- q_c es el transporte corregido.
- β' es la pendiente del terreno o duna en la dirección del transporte.
- φ es el ángulo de fricción interna dinámico, se puede aproximar al ángulo de reposo (app. 33° para arenas finas).

Howard, en 1977 indica una corrección a causa de la diferencia entre la pendiente del terreno y a la correspondiente de la dirección del viento.

$$tg \beta' = tg \beta \cdot \cos \chi \quad (6)$$

Con:

χ el ángulo entre la pendiente del terreno y la dirección media del viento.

Hardisty y Whitehouse, en 1980 sugieren una expresión para superficies no planas:

$$q_c = \left[\frac{tg \varphi}{tg \varphi - tg \beta} \right]^7 \quad (7)$$

Cohesión y Humedad del Sedimento:

Anteriormente, se mencionó que la humedad afecta a la velocidad de corte umbral de inicio del movimiento, pero a medida que la magnitud del viento aumenta, el efecto de la humedad disminuye.

El contenido de agua intersticial es un factor determinante en la humedad de las arenas, pero ha sido muy poco probable evaluar sus efectos por laboratorio ya que ha sido dificultoso controlar todos los factores que intervienen en el proceso de transporte eólico.

Aún así, se han propuesto formulaciones para estos casos, como la de Tanaka (1953), según medición de Hotta (1984).

$$u_{*tw} = A \sqrt{\frac{\rho_s - \rho_a}{\rho_a} \cdot g \cdot D + 7,5w_c} \quad (8)$$

Donde w_c es el contenido de agua del material superficial en porcentaje.

La Ecuación 8 determina una nueva velocidad de corte de inicio del movimiento, incluyendo el efecto que pueden producir el contenido de agua en los sedimentos. Esta expresión es válida para $w_c < 8\%$ y para $0,2 < D < 0,8$ mm.

Otro ejemplo es la ecuación de Kawamura (1951) de la Tabla 2, la cual se transforma en:

$$q = K \frac{\rho_s}{g} (u_* + u_{*tw})^2 (u_* - u_{*tw}) \quad (9)$$

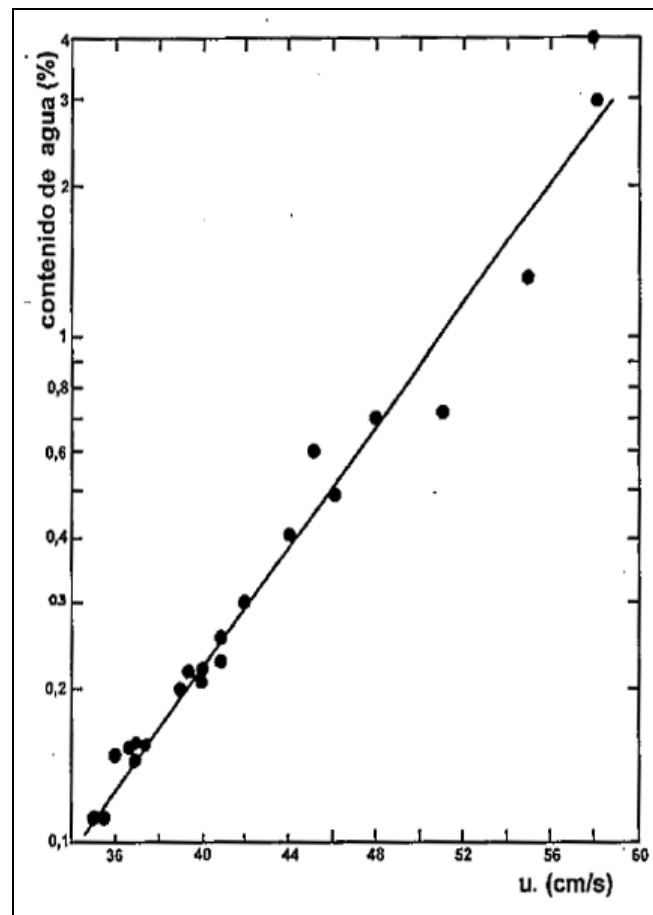


Figura 12: Velocidad de corte de inicio de movimiento para arenas húmedas.
(Fuente: Perillo, 2003)

Influencia de la Vegetación:

La vegetación actúa de manera importante en el transporte de sedimentos, pero sus efectos son aún poco conocidos y estudiados. Su principal influencia radica en modificar el perfil de velocidades del viento a través de la reducción del esfuerzo de corte y aumento de la rugosidad, por lo que atrapa y acumula sedimentos.

La Figura 13 sugiere un aumento en la fuerza de fricción del viento cuando se incluye vegetación, ya que la pendiente de la curva aumenta, pero esto no ocurre debido a que existe un cambio en la altura de suspensión de las partículas puestas en movimiento.

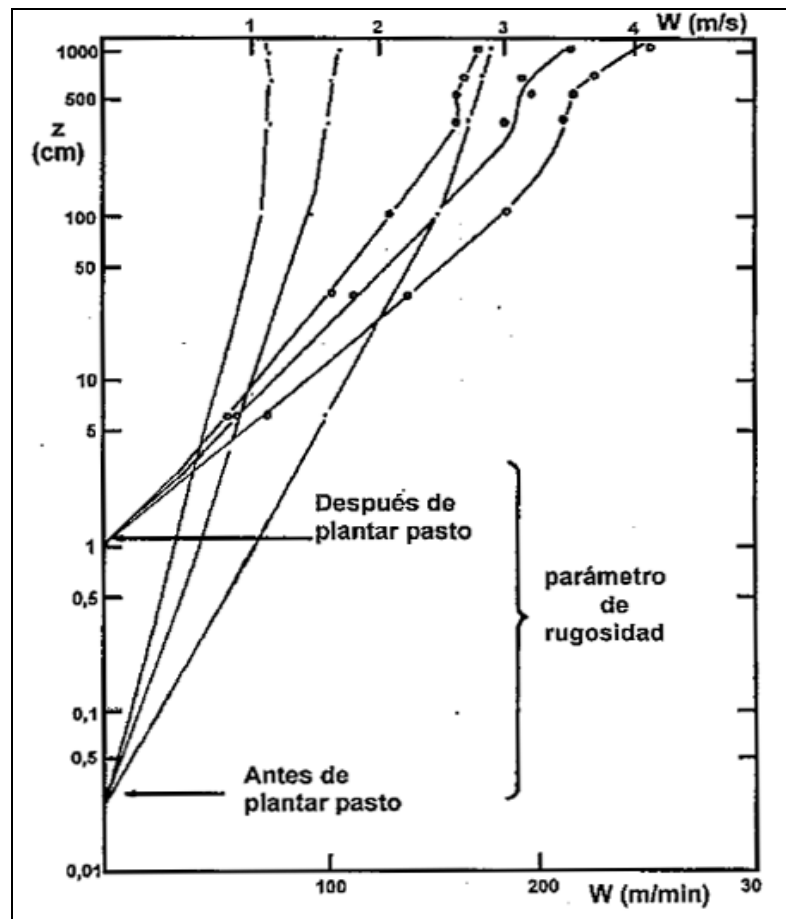


Figura 13: Variación del perfil de velocidad del viento debido a la presencia de vegetación
(Fuente: Perillo, 2003)

Aún así, la vegetación no está relacionada directamente con el efecto de la fuerza de corte y la rugosidad del terreno, sino que en el fenómeno se tienen que considerar al menos tres aspectos esenciales: a) altura, b) flexibilidad y c) densidad. Por ejemplo, el viento dobla las plantas muy flexibles perdiendo efectividad en la retención de los sedimentos, también las plantas erguidas sobrepasan un plano de cero desplazamiento en donde este no tiene efecto de transporte. En el caso de la densidad de vegetación ocurre que éste se encuentra con áreas no vegetadas, en la cual ocurre transporte de los sedimentos, erosionando el área y estos sedimentos en movimiento vuelven a ser depositados en otras áreas con vegetación, en donde comienza a producirse una acreción del área vegetada.

En la Figura 14 se muestra de manera resumida los efectos de la vegetación sobre el viento.

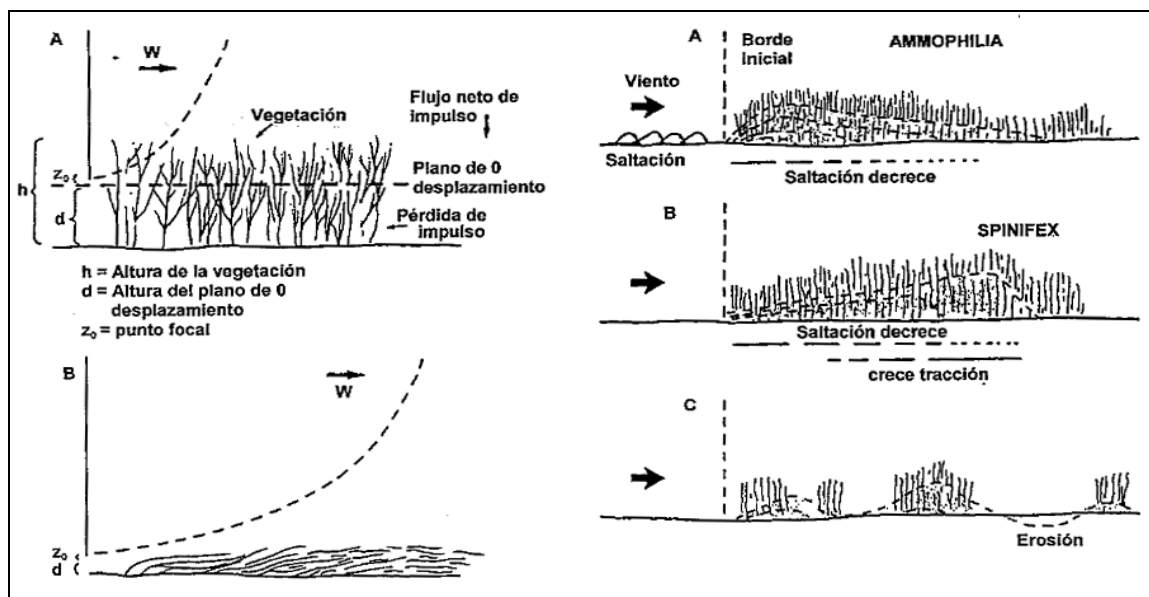


Figura 14: Efectos de ciertos aspectos de la vegetación en el transporte de sedimentos.
(Fuente: Perillo, 2003)

3.3.2 OTROS MODELOS DE TRANSPORTE EÓLICO DE SEDIMENTOS

Las formulaciones descritas anteriormente son las más comunes y utilizadas en distintos estudios, las cuales aparecen en una gama de bibliografía tradicional relacionada con geomorfología y costas en general. En la presente memoria de título solo se utilizarán las que ya han sido nombradas. Sin embargo, a modo de conocimiento particular, se describirán otras formulaciones que se han desarrollado en los últimos 15 años.

Modelo de M. Sørensen.

Sørensen (2004) derivó una expresión explícita para la tasa de transporte eólico basado en razonamiento físico, que se describirá brevemente.

La tasa de transporte Q viene dado por:

$$Q = \Phi \bar{\ell},$$

Donde

Φ es la tasa de sedimento en desalojo por unidad de área y unidad de tiempo.

$\bar{\ell}$ es la longitud de salto medio de un grano (Sørensen 1985, citado en Sørensen 2004).

$\bar{\ell}$ se puede obtener combinando un modelo anterior de saltación de granos (Sørensen 1991, citado en Sørensen 2004) con un perfil de vientos deducida en esta

misma referencia ($U(y)$), se obtiene la expresión de la longitud de salto del grano en el eje vertical denotando el tiempo de salto t_i :

$$x(t_i) = \kappa^{-1} U_* \left[\int_0^{t_i} (1 - e^{-(t_i-s)/t_*}) \ln(y(s)/y_0) ds - (1 - V^{-2}) \int_0^{t_i} (1 - e^{-(t_i-s)/t_*}) b(y(s)) ds \right] + t_* v_1^0 (1 - e^{-t_i/t_*}) \quad (10)$$

Con:

$y(s)$: altura del grano sobre la superficie de arena en tiempo s

v_1^0 es la componente horizontal de la velocidad de despedida del grano

t_* es el tiempo de respuesta del grano a cambios en el viento.

Utilizando una expresión deducida para la distribución de Φ con asunciones de Owen (1964, citado en Sørensen 2004) junto con la expresión de tasa de transporte Q , se obtiene una expresión adimensional de tasa de transporte:

$$\frac{Qg}{\rho U_*^3} = (1 - V^{-2}) [\alpha + \beta V^{-2} + \gamma V^{-1}] \quad (11)$$

Esta es normalizada por la fórmula de transporte de Bagnold. Las cantidades α , β y γ tienen las siguientes interpretaciones: $\alpha \cdot v(0)/g$ es la longitud promedio de un grano que comienza verticalmente en el perfil de vientos $k^{-1}[\ln(y/y_0) - b(y)]$, $\beta \cdot v(0)/g$ es el promedio de la longitud de salto de un grano que comienza verticalmente en el perfil de viento $k^{-1} \cdot b(y)$, mientras que $\gamma \cdot v(0)U_{*c}/g$ es el promedio de la longitud de salto de un grano si este no es acelerado por el viento.

Como se puede apreciar, los coeficientes α , β y γ dependen del tipo de sedimento.

Este modelo ha sido calibrado con datos de experimentos de túnel de vientos realizados por Iversen y Rasmussen (1999, citado en Sørensen 2004). Para el ajuste se calcula la velocidad de corte y de umbral.

Un ejemplo de ajuste se muestra en la Figura 15, con condiciones reguladas en el túnel de viento, el cual tiene una distribución controlada, y sedimento de diámetro homogéneo.

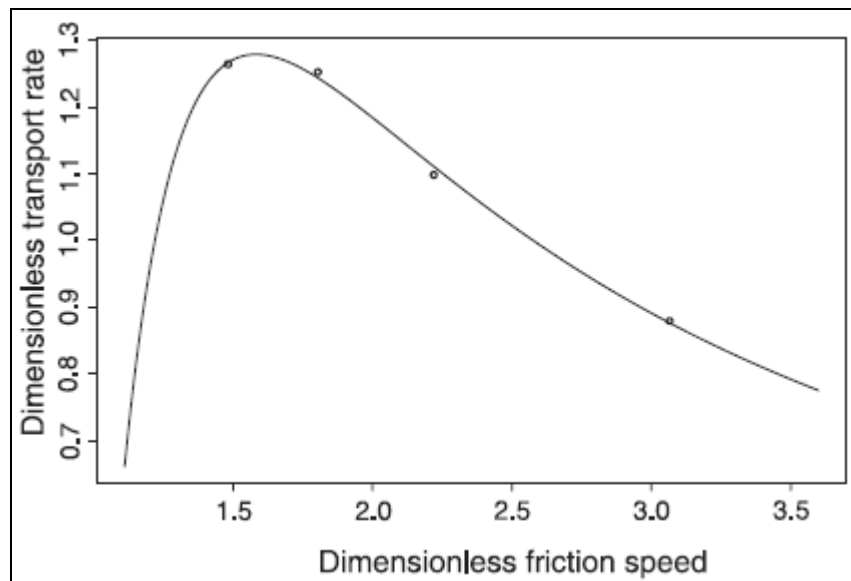


Figura 15: Ajuste de transporte adimensional de Sørensen.
(Fuente: Sørensen, 2004)

Este modelo tiene un alto ajuste a los datos, pero puede ser muy sensible a los diámetros y ser inexacto en aplicaciones en dunas, donde pueden encontrarse tanto variaciones de vientos, como de la curva granulométrica.

Modelo de G. Okin.

Okin (2008) desarrolló un modelo probabilístico, el cual se basa en una distribución de plantas en un área que se representan como elementos porosos.

Para demostrar las bases del modelo, se utiliza como ejemplo la Figura 16, en la cual se muestran 2 áreas de igual tamaño, pero con distintos numero de elementos, en los cuales la suma del área lateral de los elementos en cada base es la misma, por lo que los elementos de la derecha son de altura mayor.

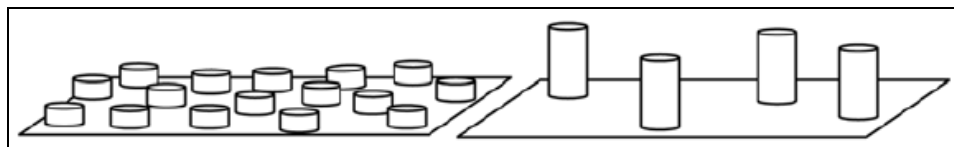


Figura 16: Elementos con la misma área lateral y distinto número de elementos.
(Fuente: Okin, 2008)

Como se ha demostrado en variados estudios (Okin, 2008), teniendo las mismas condiciones de viento en ambos casos, junto con el mismo sedimento, en el caso de la base de la izquierda ocurre un transporte de sedimentos menor que en el caso de la derecha, debiéndose esto principalmente a que la cobertura de los obstáculos es mayor espacialmente en la figura de la izquierda que en la de la derecha.

Basándose en lo anterior, la función de caudal horizontal de sedimentos viene dado por:

$$Q_{Tot} = \int_0^{\infty} P_d(x/h) q_{x/h} d(x/h) \quad (12)$$

Esta formulación utiliza una función de probabilidad en función a la planta que se encuentra más cercana que esté contra el viento.

Donde:

$P_d(x/h)$ es la probabilidad en cualquier punto del área en una cierta distancia de la planta más cercana que está contra el viento expresado en unidades de altura de esa planta (x/h).

$q_{x/h}$ es el flujo horizontal para un punto lejos de la planta más cercana a contraviento.

En principio, el modelo no asume ninguna distribución de vegetación por que el espaciado de la planta en barlovento es especificado explícitamente y probablemente. La función de distribución de probabilidad del tamaño de las brechas sin vegetación entre las plantas, x/h , es especificado como $P_g(g/x)$, lo que es utilizado para calcular la función de probabilidad de que en cualquier punto en el área es una distancia (expresada en unidades de altura de planta) desde la planta más cercana a contraviento (barlovento) $P_d(g/x)$. De modo que se tiene una relación directa entre estas dos funciones:

$$P_g(x/h) v \propto \frac{x}{h} P_d(x/h) \quad (13)$$

4 CARACTERIZACIÓN DEL MEDIO

4.1 CARACTERIZACIÓN GEOMORFOLÓGICA GENERAL

El campo dunar de Ritoque comienza desde aproximadamente 3 Km al norte de la desembocadura del río Aconcagua, y se extiende hasta el balneario Ritoque. El mayor ancho de estas dunas se encuentra en la zona norte de estas de aproximadamente 4.6 Km hacia el NE (Figura 17).



Figura 17: Campo dunar de Ritoque.
(Fuente: Google Earth)

Pascoff y Manriquez (2004) como también Quezada (2007) dan a conocer que la fuente de sedimentos proviene del río Aconcagua, los cuales son acarreados por la corriente litoral generada en la zona en dirección al Norte, depositándose en la playa por efecto del oleaje incidente en el sector, y finalmente, tras la evaporación de su humedad, son levantados y transportados por los vientos dominantes que provienen de la dirección SW hacia tierra (Figura 18), lo que se discutirá en la siguiente sección.



Figura 18: Funcionamiento del río Aconcagua.
(Fuente: Quezada, 2007)

Paskoff y Manriquez (2004) describe el campo dunar de Ritoque identificando distintas unidades geomorfológicas, a través del siguiente perfil transversal obtenido de Castro (1984-85, citado en Pascoff y Manriquez 2004), de Oeste-Suroeste a Este-Noroeste (Figura 19) a partir de la playa.

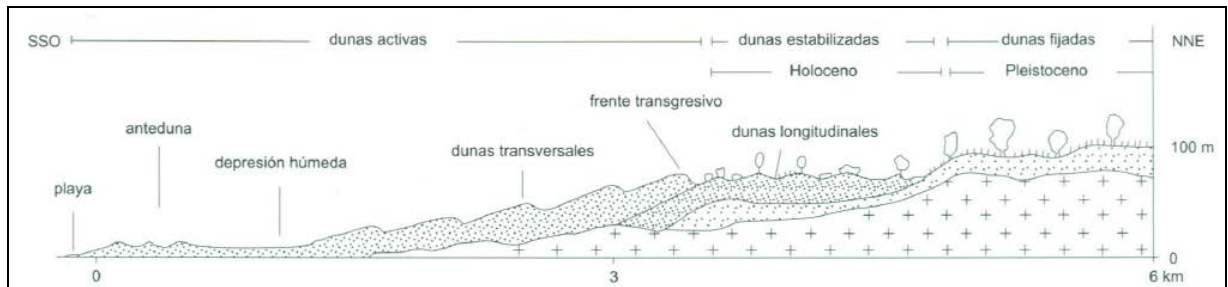


Figura 19: Perfil del campo dunar de Ritoque.
(Fuente: Pascoff y Manriquez, 2004)

De la Figura 19 se tiene la composición del campo dunar de Ritoque, la cual es descrita a continuación:

- una anteduna constituida por una agrupación de montículos de arena retenida por plantas bajas, separados por corredores de deflación paralelos a los vientos dominantes.
- una depresión húmeda estrecha que constituye un espacio de tránsito de las arenas que vienen de la playa y que no se detienen en la anteduna. La napa freática existente se encuentra cercana o sobrepasa la superficie, permitiendo la presencia de vegetación.
- una superficie extensa que alcanza unos 3 Km de ancho, cubierta por dunas altas y coalescentes en formas de olas, con crestas sinuosas y disimétricas, presentando una ladera de pendiente suave en contra del sentido de los vientos predominantes y una pendiente fuerte en sentido del viento dominante, orientadas de forma perpendicular a los vientos. Estas dunas transversales sin presencia de vegetación avanzan tierra adentro, las cuales terminan en un frente transgresivo abrupto.
- dunas con crestas longitudinales, de edad holocénica, naturalmente establecidas por una vegetación de gramineas y de arbustos bajos, que forman una cobertura más o menos densa.
- dunas antiguas, de edad pleistocénicas, que han perdido sus formas originales, presentándose suavemente como colinas boscosas en su estado natural.

La acción eólica en el sector norte del campo dunar es prácticamente activa. Desde los años 1945 existen evidencias de que había invasión de las arenas que cubrían las vías existentes en el sector (Castro, 1987).

También es importante mencionar que existen sectores de las dunas que han sido prácticamente degradadas por parte de la acción del hombre (Castro, 1987), a modo de ejemplo, la actividad con vehículos que se desarrollan y los trabajos anteriores de forestación, los cuales se han extendido en el sector norte de la costa.

Adicionalmente Rojas (2008), brinda una descripción de la morfología del campo dunar de norte a sur en función del relieve de esta, la que se resume a continuación:

- La franja costera del sector de Ritoque tiene una orientación perpendicular a los vientos, lo que reúne las condiciones para la instalación de estas dunas naturales.
- La duna propiamente tal posee alturas máximas que alcanzan los 50 m.s.n.m., no existen rastros de vegetación. La altura de las dunas desde Oeste hacia Noreste, van disminuyendo, hasta alcanzar alturas cercanas a los 12 a 15 m.s.n.m. a un costado de la Ruta F30, Valparaíso – Quintero.
- El cordón litoral posee una altitud promedio de 5 m.s.n.m. y una distancia desde el fin del estrán arenoso hasta el inicio de la depresión de 450 m aproximadamente.
- En el área norte, en los sectores del cordón litoral y depresión, existe una abundante vegetación, debido a que el relieve está impidiendo el paso de arenas hacia el interior. Esto puede ser una causa del deterioro en conjunto con acciones antrópicas, los que es señalado por Rojas (2008). En el sector sur se encuentra una situación diferente, en donde se define claramente la morfología del campo de dunas.
- En el cordón litoral se han ocasionado aperturas de espacios en donde tanto el viento como factores antrópicos han intervenido, junto con un marcado deterioro de las paredes de la anteduna, por lo que esta ha ido perdiendo paulatinamente su función de retener el avance de las arenas, lo que da paso a una gran dinámica interna de las partículas.
- En el área sur del campo de dunas se ha encontrado una descarga de basura debido a la cercanía de la ruta que une a Viña del Mar con Quintero, junto con esto se ha realizado una fuerte extracción de arenas para la construcción en el sector de las dunas activas lo que ha producido un gran cambio en la topografía.

De la campaña realizada en Diciembre del 2011 se pudo apreciar elementos del campo dunar que son descritos por Castro (1987), las cuales son las antedunas (Figura 20) cercanas a la línea de costa, o como dunas borderas mencionadas por Rojas (2008).



Figura 20: Dunas borders o anteduna. Diciembre 2011.
(Fuente: Elaboración propia)

Las dunas propiamente tal descritas por Rojas (2008), al costado de la carretera F-30, no tienen ningún rastro de vegetación y alcanzan las alturas ya descritas. Estas se pueden apreciar en la Figura 21.



Figura 21: Fotografía dunas sector sur. Diciembre 2011.
(Fuente: Elaboración propia)

4.2 CARACTERIZACIÓN DE SEDIMENTOS

En Diciembre del 2011 se realizó una campaña de muestreo² con la finalidad de obtener las propiedades granulométricas del sector de estudio, relevantes para la determinación del transporte de sedimentos eólico.

En esta campaña se utilizó un método de medición directa en campo mediante el uso de una plancheta de tamaños estándar que contiene distintos tipos de arena, clasificándolas según su diámetro medio y la forma que tienen los sedimentos. Cada muestra se comparó de manera directa con el rango que más se asemejaba.

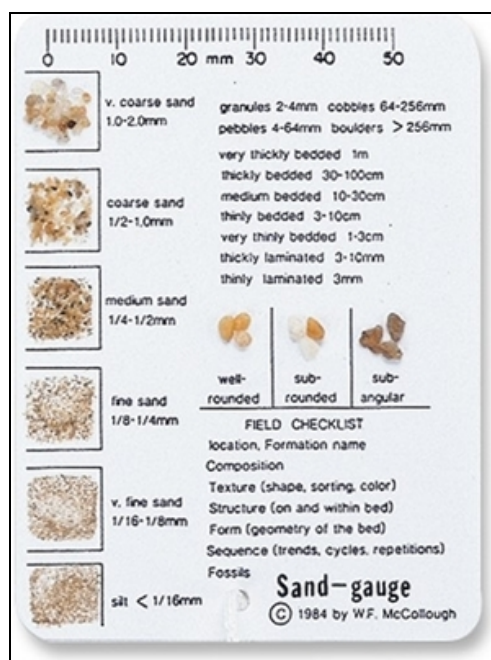


Figura 22: Imagen de tarjeta Sand-gauge.
(Fuente: imagen de Internet, 14/06/2013)

El muestreo se realizó en 4 distintas zonas principales las que representan los vértices del polígono de levantamiento, en donde se obtuvo un testigo en cada punto, y su posición utilizando un GPS, esto debido a la gran similitud espacial de los granos que se detectó en el muestreo.

Los puntos, sus coordenadas y referencia espacial de la ubicación se tabulan a continuación:

² Campaña realizada junto con la Ingeniero Civil Oceánica Srta. María José Gangas R.

Tabla 3: Ubicaciones punto de muestreo.

Punto	Posición Geográfica	Referencia
M1	32° 52' 20.85" S, 71° 29' 52.29" W	Motel Ensueño
M2	32° 49' 38.95" S, 71° 31' 36.00" W	Balneario Ritoque
M3	32° 49' 38.68" S, 71° 31' 36.01" W	Balneario Ritoque
M4	32° 48' 05.01" S, 71° 29' 23.33" W	Acceso a Quintero Sur

(Fuente: Elaboración Propia)



Figura 23: Mapa ubicaciones muestreo y Observaciones.
(Fuente: Elaboración propia)

En la campaña de muestreo se realizó un recorrido extenso de toda la duna, deteniéndose en una decena de puntos sin registro de GPS, en donde se caracterizaron los sedimentos, encontrándose una alta similitud en los granos de sedimentos en todo el campo dunar.

En los 4 puntos de muestreo de sedimentos, se encontró leves diferencias en el color entre los sectores del campo dunar. En el sur los sedimentos tienen tonalidades levemente

obscuras, mientras que al norte tienden a ser más claros debido a una diferencia de concentración de metales de gran densidad como la magnetita, los cuales provienen del río Aconcagua junto con el sedimento. Estos metales son más difíciles de desplazar por la corriente litoral existente en el sector hacia el norte (descrito anteriormente) por lo que son depositados en mayor cantidad en el sector sur de la playa, de igual modo ocurre con el posterior transporte hacia el NE a través del agente del viento (Vergara, 2014). En cuanto al tamaño del sedimento, se identificó una homogeneidad con granos dentro del mismo rango.

Debido a lo anterior no se realizó un segundo muestreo con mayor cantidad de puntos, ya que al analizar los extremos del campo dunar las variaciones fueron poco significativas.

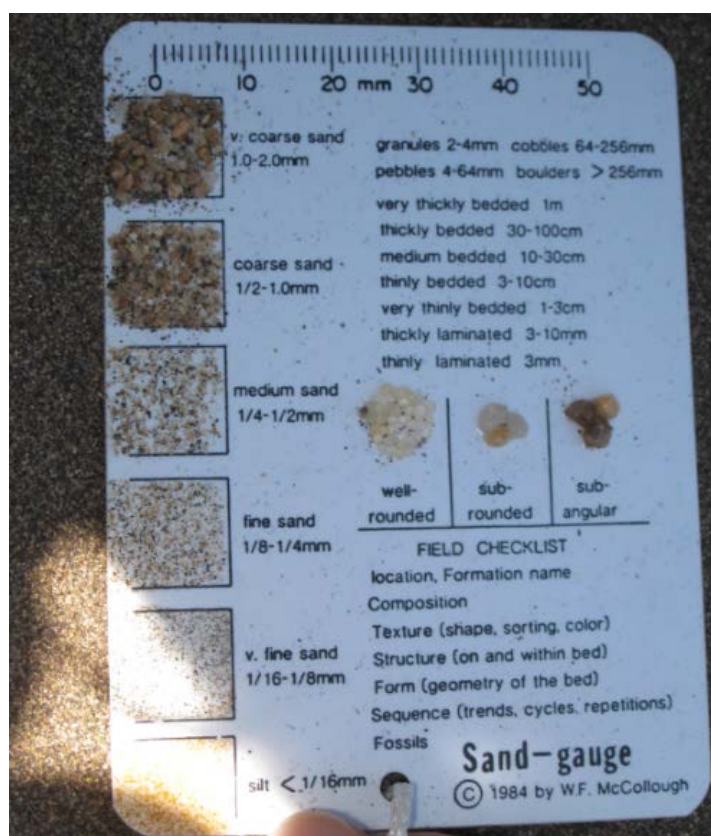


Figura 24: Comparación "in situ" de sedimentos, Sector 1.
(Fuente: Elaboración Propia)

Analizando la Figura 24, se puede concluir que los sedimentos que componen el campo dunar de Ritoque, tienen un diámetro D50 de 1/8 mm, correspondiente entre arenas finas y muy finas. Para este tipo de sedimentos, generalmente se tiene que su porosidad corresponde al 40%, y su densidad es de 2650 [Kg/m³], cuyos valores son utilizados para el desarrollo de este proyecto de título.

El rango de diámetros de sedimentos que se encontraron en los trabajos de campo, resultados ser equivalentes a aquellos que son movilizables por la acción forzante de los vientos.

4.3 VIENTOS

4.3.1 GENERALIDADES

Para caracterizar el sitio de interés, en primera instancia se realizó un análisis estadístico de clima medio correspondiente a los vientos medidos en Punta Ángeles, Valparaíso, los cuales proveen información medida para los años 1990 al 2002. En base al análisis anterior, se procedió a determinar el campo de vientos desde la bahía de Valparaíso hasta el sector de estudio. Estos resultados se contrastaron con mediciones en distintos puntos cercanos al campo dunar de Ritoque, cuyas mediciones fueron realizadas en el marco del proyecto EOLOS (Depto. Geofísica. U. de Chile, 1993), con la finalidad de realizar un mapa del potencial energético en Chile.

Generalmente la caracterización de los vientos se realiza con sólo mediciones en uno o cierta cantidad de puntos en un sector, pero para el presente proyecto de título se abordó el estudio de vientos en dos etapas. En la primera se realizó un análisis estadístico de un set de datos correspondientes a 12 años de mediciones en Punta Ángeles. La segunda parte consiste en la realización de una modelación para la descripción de los vientos en las áreas que comprenden entre Punta Ángeles hasta Quintero, determinando los vientos medios en el campo dunar de Ritoque, siendo presentado los resultados en el Capítulo 5.

En la Figura 25 se muestra un resumen metodológico adoptado para la definición de los vientos en Punta Ángeles.

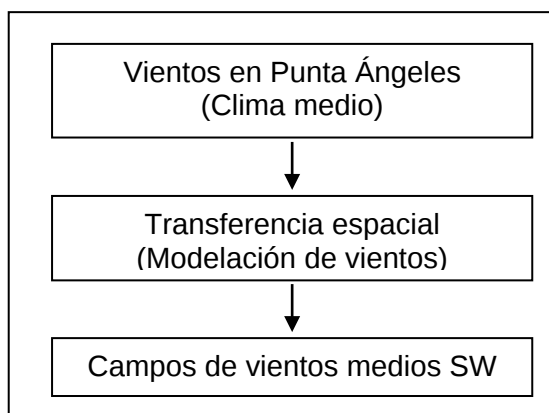


Figura 25: Esquema general para el desarrollo de vientos.
(Fuente: Elaboración Propia)

4.3.2 VIENTOS MEDIDOS EN PUNTA ÁNGELES

Se realizó un análisis de clima medio de la estadística. El instrumento se sitúa en el faro Punta Ángeles a 41 m.s.n.m., y su ubicación se muestra en la Figura 26:

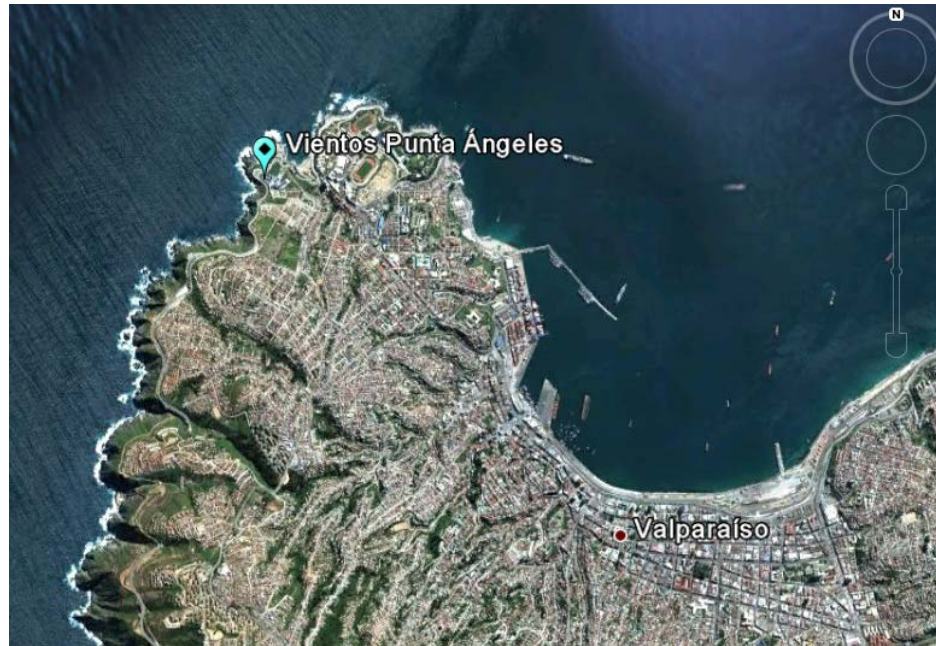


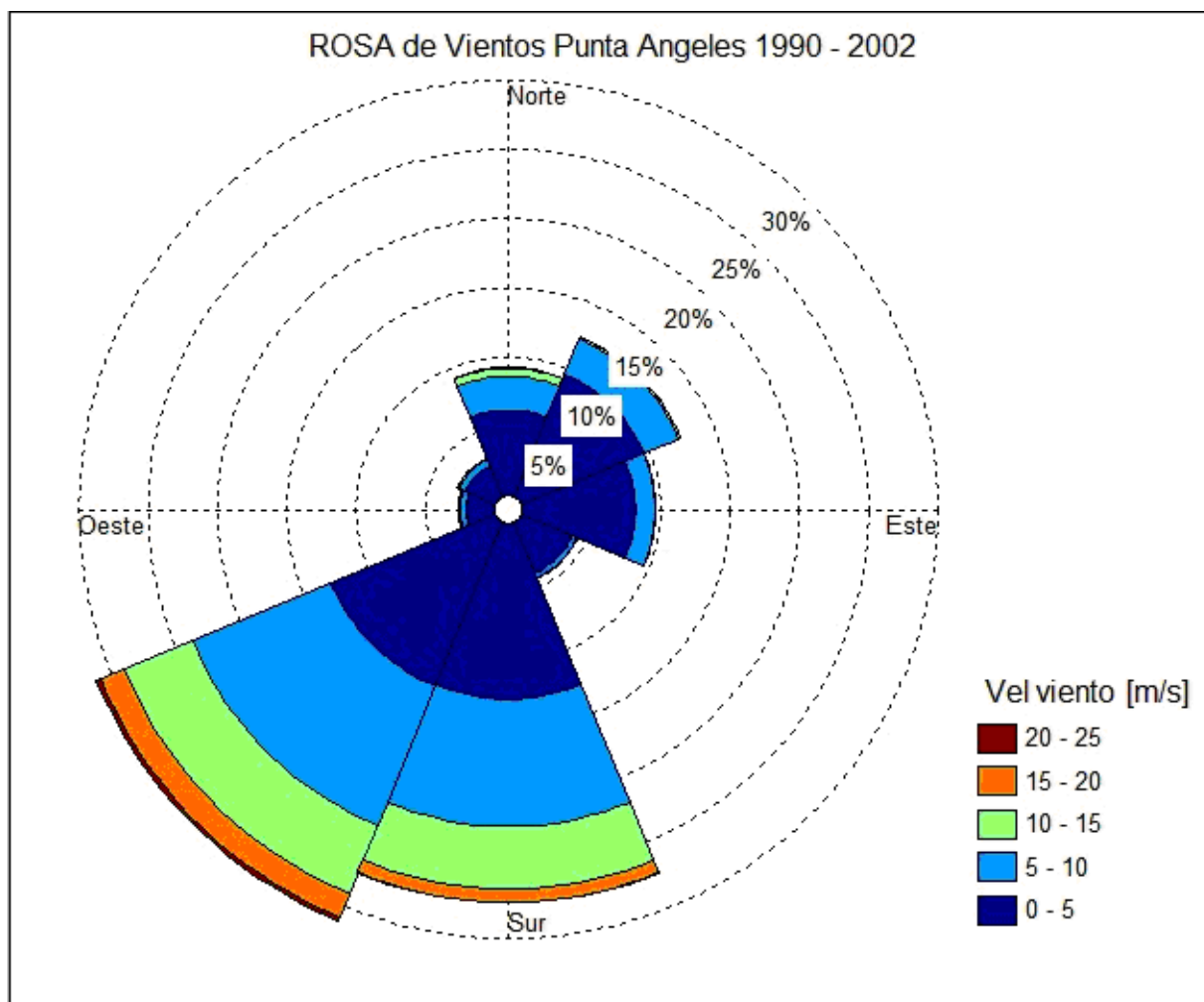
Figura 26: Ubicación registro de vientos Punta Ángeles.
(Fuente: Google Earth)

A continuación se muestran tablas de incidencia y rosas que describen el clima de vientos en el sector de Punta Ángeles:

Tabla 4: Tabla de Vientos Punta Ángeles.

		Dirección								Total
Intervalo		N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	
Velocidad [m/s]	0 3	3.91%	5.83%	5.31%	2.94%	7.72%	7.05%	1.39%	1.68%	35.83%
	3 6	3.29%	5.30%	3.79%	1.27%	7.98%	9.64%	0.85%	0.98%	33.10%
	6 9	1.23%	1.08%	0.45%	0.11%	5.07%	5.65%	0.21%	0.19%	13.98%
	9 12	0.58%	0.23%	0.05%	0.05%	3.89%	4.61%	0.12%	0.10%	9.63%
	12 15	0.18%	0.04%	0.02%	0.02%	1.77%	2.08%	0.04%	0.02%	4.16%
	15 18	0.07%	0.00%	0.01%	0.01%	0.76%	1.33%	0.02%	0.02%	2.22%
	18 21	0.02%		0.00%	0.00%	0.21%	0.73%	0.01%	0.01%	0.98%
	21 24					0.01%	0.09%			0.10%
	24 27						0.01%			0.01%
Total		9.28%	12.49%	9.63%	4.39%	27.39%	31.19%	2.64%	2.99%	100.00%

(Fuente: Elaboración Propia)



**Figura 27: Rosa de Vientos Punta Ángeles (sin considerar calmas).
(Fuente: Elaboración Propia)**

Se observa que el viento reinante en el sector de Punta Ángeles proviene del 3er cuadrante, con intensidades medias entre la calma y a los 12 m/s (0 a 23 nudos), alcanzando velocidades máximas registradas de 24 m/s (47 nudos). La mayor ocurrencia proviene de las direcciones Sur y SurOeste con un 58.6% de la estadística total, siendo mayor ocurrente el SW (31,19%).

En cuanto a las intensidades, el 82,91% de los registros, se identificaron intensidades entre la calma y los 9 m/s. El viento más frecuente ocurre entre los 3 m/s a los 6 m/s proveniente desde el SW, con una ocurrencia de 9,64% de la estadística total.

La velocidad máxima registrada fue de 24,7 m/s (48 nudos), con dirección SW, mientras que la velocidad promedio registrada durante los 11 años, corresponde a 5,2 m/s (10 nudos).

Para la presente memoria de título se considera este clima medio de vientos como base y una de las entradas principales para los análisis a realizar, con la suposición de que éste no varía a escalas grandes de tiempo.

4.3.3 MODELACIÓN DE LOS CAMPOS DE VIENTOS

Utilizando la estadística de clima medio de Punta Ángeles, se procedió a realizar la transferencia espacial a través del modelo WASP (Wind Atlas and Application Program) en un área que abarca desde Punta Ángeles hasta Quintero, el cual se validará con mediciones de vientos obtenidos del proyecto EOLO realizadas dentro del sector los cuales se describirán más adelante. El funcionamiento junto a los parámetros utilizados por este modelo se describen a continuación y sus ecuaciones de gobierno están escritas en el Anexo B (Sección 8.1)

Este modelo realiza predicción de clima de vientos basados en extrapolación vertical y horizontal de una serie de tiempos medida.

Los cálculos se basan en una combinación de modelos aplicados a las capas límites atmosféricas. Estas herramientas representan la variación en la velocidad y dirección del viento debido a 3 cambios de condiciones que se presentan en el área a estudiar, los cuales son:

- Cambio de alturas y la topografía, por ejemplo la subida de la velocidad debido a una colina.
- Cambios en la rugosidad del terreno, el cual se considera el efecto de fricción variable en distintas áreas.
- Efecto del bloqueo de obstáculos.

La utilización del modelo se restringe bajo los supuestos de que el terreno circundante del sitio es liso, sin accidentes que cambien abruptamente la topografía, de manera que la separación de flujo del viento es bajo y es principalmente lineal, y finalmente, los sitios de referencia con los datos a utilizar y el sector a predecir tienen un clima de vientos relativamente similar.

El modelo funciona mediante el cálculo de la estadística media del viento, obtenido desde la tabla de incidencia de la serie de tiempo medida. En primer lugar, los datos de series de tiempo se transforman en representaciones paramétricas por medio de una aproximación Weibull mediante la asignación de los datos correspondientes factores de distribución "A" y "k" para cada dirección. Los datos se extrapolaron a una serie de niveles de usuario definibles por la altura de la "limpieza" de los datos de los efectos de la rugosidad de la superficie, la orografía y obstáculos y a través de la aplicación de la ley de arrastre geostrófico. Este archivo se consideran representativas del viento en esos niveles para el área sin que ninguno de los efectos locales específicos mencionados. Luego se "reinsertan" al sitio de predicción por la reintroducción de los efectos del terreno, rugosidad y obstáculos específicos a ese sitio. Un esquema de este proceso se muestra en la Figura 28.

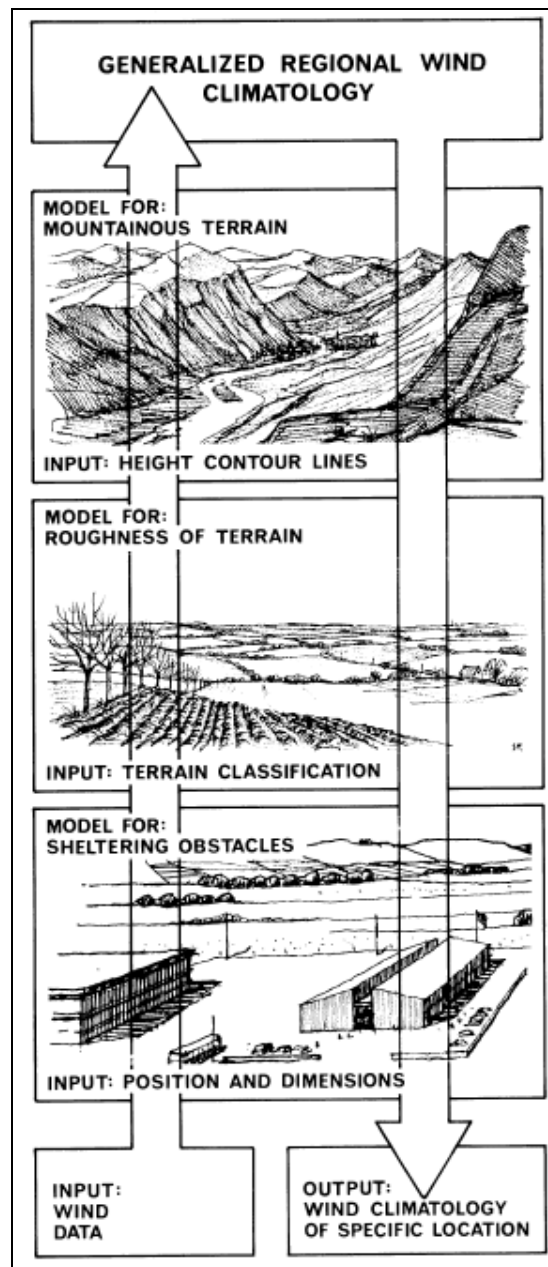


Figura 28: Representación de cambios en el terreno, de rugosidad y de obstáculos.
(Fuente: Petersen et al, 1997)

En este proyecto no se utilizaron elementos de obstáculos ya que el área a estudiar es completamente abierta desde el mar, sin ninguna interferencia como edificios u otro elemento. Además, se torna muy compleja la caracterización de cada edificio u otros obstáculos en todo el dominio del modelo, sin embargo, se empleó una rugosidad equivalente a los efectos de edificaciones en las zonas en que se encuentren estos.

Topografía:

El modelo WAsP tiene un método simple para calcular el efecto en el flujo del viento de las variaciones de altura en el terreno. Se utiliza la información sobre la geometría de este o de una colina como ejemplo para crear un perfil de velocidad del viento, suponiendo que la colina es perpendicular de longitud infinita. Esta velocidad del viento alcanza hasta un máximo a una altura definida, por encima del perfil "normal" del viento que se aplica. (Ver Figura 29).

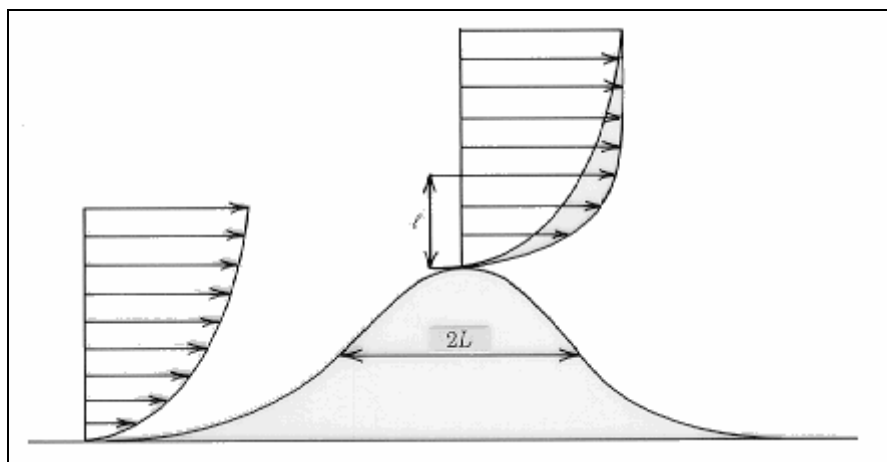
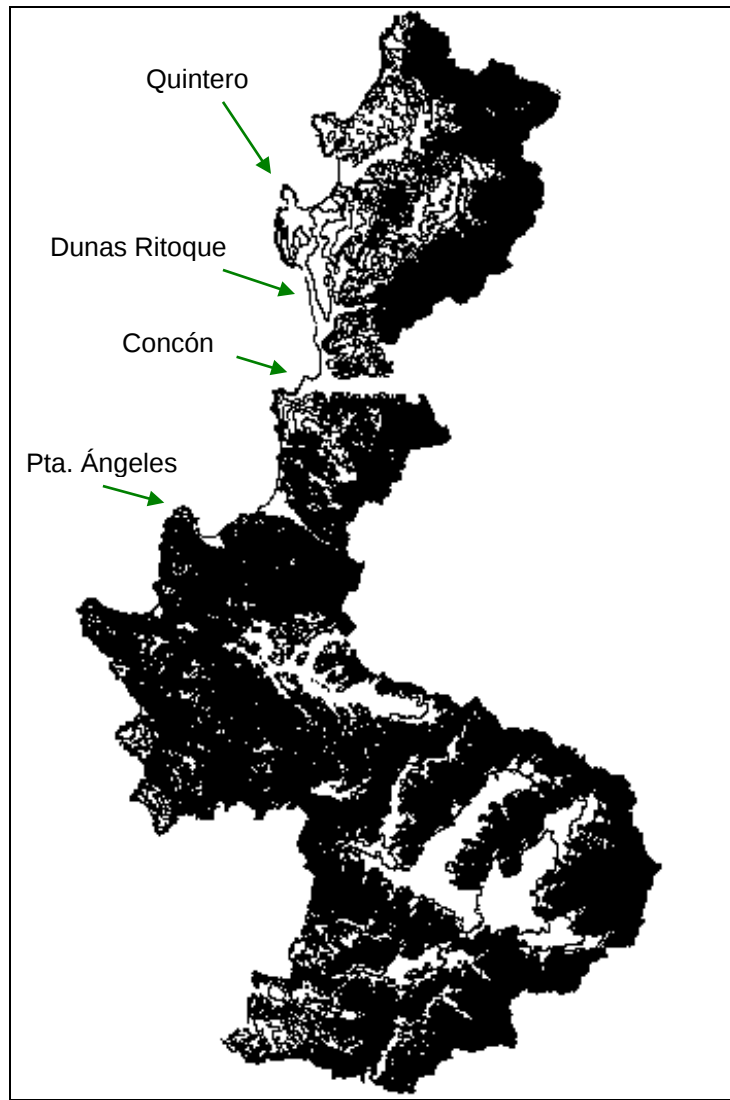


Figura 29: Cambios de perfil por efecto de topografía.
(Fuente: Ayuda software Wasp)

Para este proyecto de título se utilizó una base topográfica que corresponde a data de la Restitución cartográfica realizada por el Instituto Geográfico Militar (IGM), la cual consiste en curvas de nivel a cada 25 m de elevación, en la cual contempla la zona litoral. Estos datos vienen georeferenciados en sistema UTM en Datum WGS-84 y se puede apreciar en la Figura 30.



**Figura 30: Curvas de Nivel, Restitución Cartografía IGM.
(Fuente datos: IGM. Imagen: Elaboración Propia.)**

Mapa de Rugosidad:

Para la realización del mapa de rugosidades, se tuvo en cuenta el tipo de terreno del área a modelar, y los cambios que se encuentran en ella. La rugosidad de una superficie terrestre en particular se determina por el tamaño y la distribución de los elementos rugosos que contiene; que para superficies de tierra son típicamente vegetación, áreas edificadas u otros elementos.

Los cambios de rugosidades en el espacio, como por ejemplo para pasar desde la superficie del mar al campo dunar en este estudio, son modelados mediante la definición de áreas de rugosidad con distintas clases de estas.

En la Tabla 5 se muestran los valores de rugosidad para distintos tipos de superficie de terreno los que son recomendados por el modelo WaSP, y a partir de los cuales se constituyó la grilla de porosidad.

Tabla 5: Tabla de valores de rugosidades.

z_0 [m]	Terrain surface characteristics	Roughness Class
1.00	city	3 (0.40 m)
0.80	forest	
0.50	suburbs	
0.40		
0.30	shelter belts	
0.20	many trees and/or bushes	2 (0.10 m)
0.10	farmland with closed appearance	
0.05	farmland with open appearance	
0.03	farmland with very few buildings/trees	1 (0.03 m)
0.02	airport areas with buildings and trees	
0.01	airport runway areas	0 (0.0002 m)
0.008	mown grass	
0.005	bare soil (smooth)	
0.001	snow surfaces (smooth)	
0.0003	sand surfaces (smooth)	
0.0002		
0.0001	water areas (lakes, fjords, open sea)	

(Fuente: Ayuda software Wasp)

El dominio numérico empleado para el mapa de rugosidades abarca desde la bahía de Valparaíso, contemplando el sector de Punta Ángeles hasta parte de la bahía de Quintero, el cual se puede apreciar en la Figura 31, con la finalidad de describir los sectores con distintas rugosidades que se encuentran en el área de modelado.

Tabla 6: Valores de Rugosidades utilizados en modelación de vientos.

Tabla Valores Rugosidades	
Mar	0.000
Viña del mar - Valparaíso	1.000
Sector playa Las Salinas	0.700
Concón y Quintero	0.500
Árboles - Bosque	0.800
Placilla	0.600
Zonas no habitadas	0.100
Campo Dunar	0.006

(Fuente: Elaboración Propia)

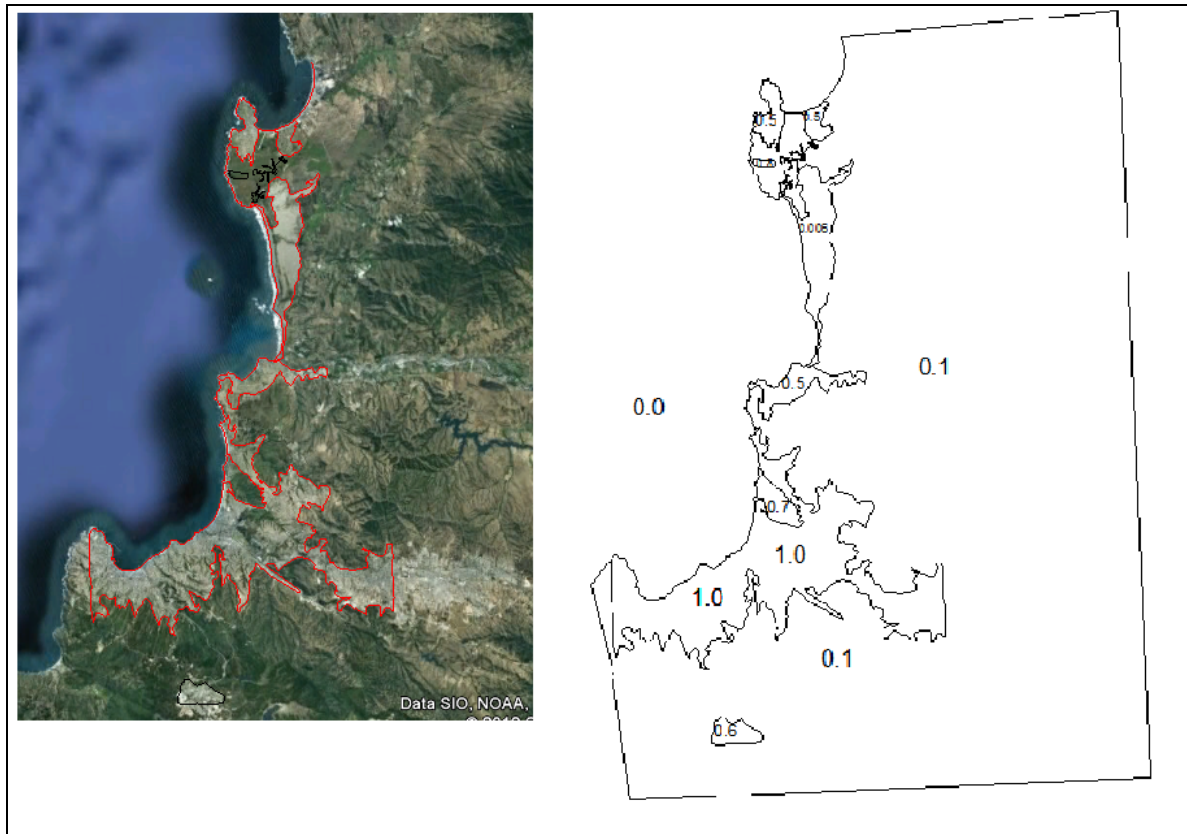


Figura 31: Mapa de rugosidades.
(Fuente: Elaboración Propia)

Modos de cálculo:

Para caracterizar el campo de vientos desde la Bahía de Valparaíso hasta el campo dunar de Ritoque, se utilizó el modelo WASP Engineering, el cual está basado en 3 componentes. El primero de ellos es el módulo LINCOM, un acrónimo para el “LINearized COMputation” (cómputo linealizado) el cual simula el flujo neutral estable (sin separación del flujo) en el terreno con colinas suaves o de baja complejidad. Como se trata de un modelo lineal, que comparte las mismas limitaciones que WASP. Interconectado con este es un modelo de rugosidad, el cual tiene la capacidad de aumentar la rugosidad del océano cuando fuertes vientos interactúan con el tamaño de las olas. El tercer módulo es un simulador de obstáculo que se aplica al modelo LINCOM como un post-proceso, como se muestra en la Figura 32.

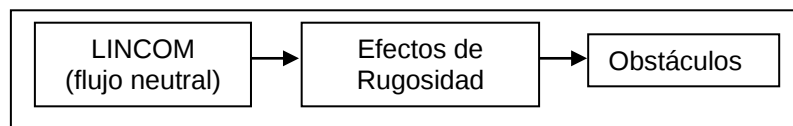


Figura 32: Módulos de calculo Wasp
(Fuente: Elaboración Propia)

Una diferencia notable entre WAsP y WAsP Engineering es la forma en que están configuradas las mallas para el cálculo de campos de flujo. Como se explicó anteriormente, WAsP utiliza una técnica que calcula la información del terreno a partir de curvas de nivel y emplea una rejilla de expansión polar centrada en el punto de interés. El flujo es calculado sólo para un punto o una serie de ellas. WAsP Engineering por su parte, utiliza una malla de rejilla y calcula el campo de flujo en cada punto de esta, como se muestra en la Figura 33.

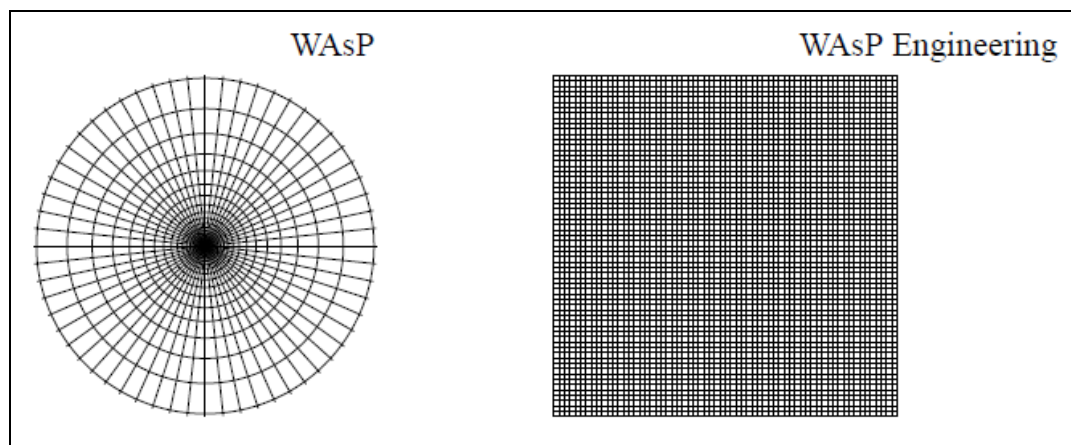


Figura 33: Mallas de cálculo de Wasp y Wasp Engineering.
(Fuente: Mann et al, 2000)

Ambos módulos se encuentran en el software Wasp. El origen y sus modos de cálculo se describen en mayor detalle en la sección 8.2 (Anexo B).

Con los datos de entradas del modelo, se obtienen resultados del campo de vientos.

Para el campo de vientos se realizó una grilla cuadrada con un espaciamiento de cada 100 m. cuya configuración se puede visualizar en la Figura 34.

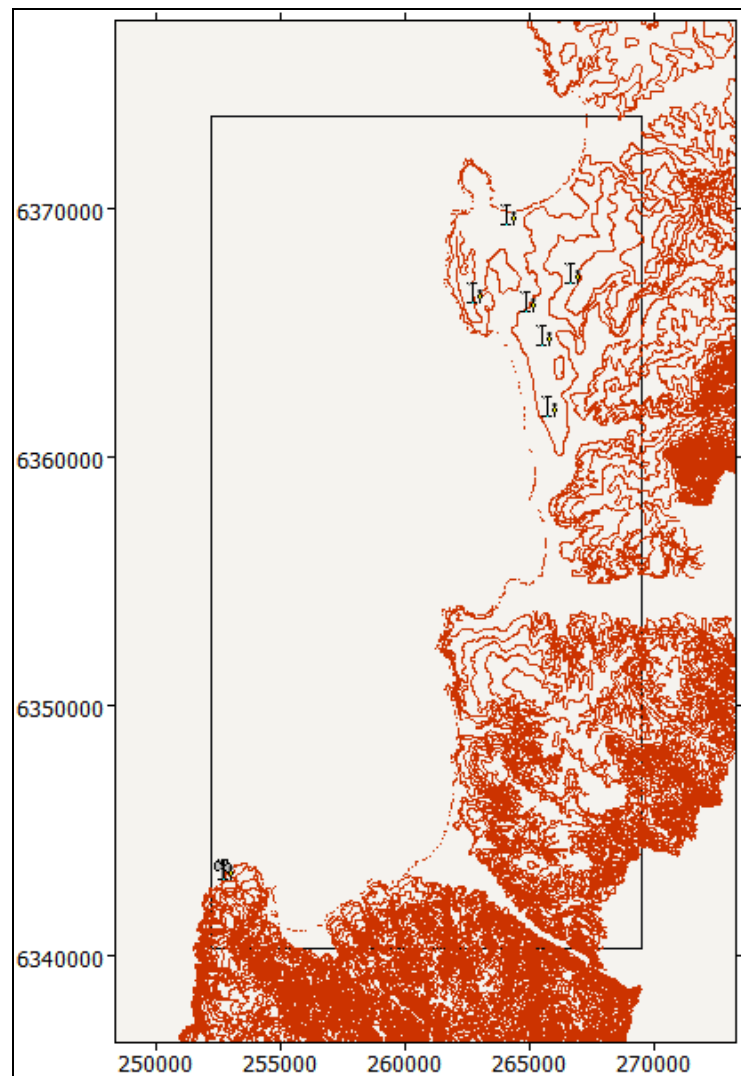


Figura 34: Configuración de Malla.
(Fuente: Elaboración Propia)

De este modo se generaron los campos de vientos para cada una de las 8 direcciones incidentes. En la Figura 35 se muestra, a modo de ejemplo, el campo de vientos de velocidad media que pertenece a la dirección de incidencia SW, mientras que los demás resultados se presentan en la Sección 8.1 (Anexo A), considerando cada una de las direcciones modeladas.

Este es un resultado típico de un campo de vientos siempre a 10 m de altura del terreno, en el cual se muestran las velocidades medias con dirección incidente SW en todo el dominio espacial.

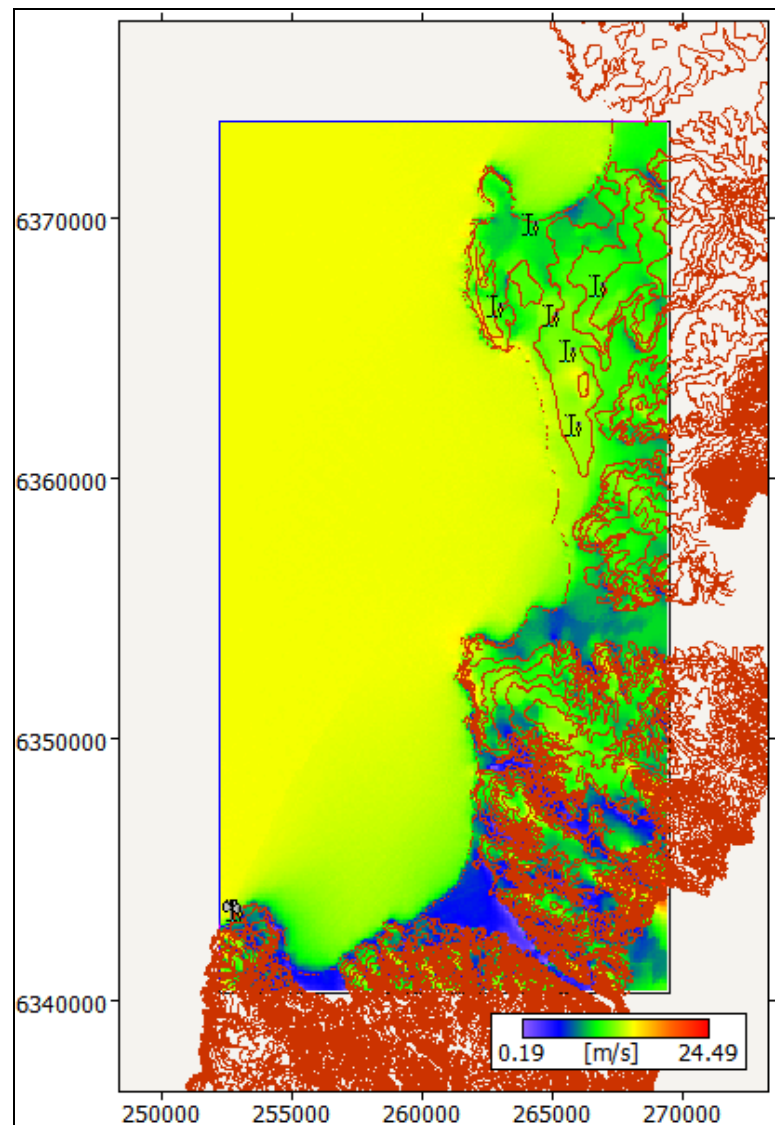


Figura 35: Campo de Viento medio incidente desde SW.
(Fuente: Elaboración Propia)

En la Figura 36 se muestra un acercamiento a la zona de la Bahía de Valparaíso hasta Con Con, de ella se pueden destacar varios efectos dados por la topografía, así como también los cambios de rugosidades. La acción realizada por la Punta Ángeles en los vientos proveniente del SW es inducir una baja en la energía de los flujos en la bahía de Valparaíso la cual afectaría prácticamente hasta Concón.

En el plan de Valparaíso y también los sectores bajos de Viña del Mar se encuentran prácticamente las menores velocidades a causa del efecto de la topografía en primera instancia, ya que estas zonas son protegidas por los cerros aledaños a estas, y la segunda causa corresponde a que estos sectores tienen rugosidades grandes, pertenecientes a los campos con edificios u obstáculos similares relacionadas con sectores urbanos lo que le da al terreno una alta rugosidad, lo que implica un roce mayor y su consecuente disminución en la fuerza generadora.

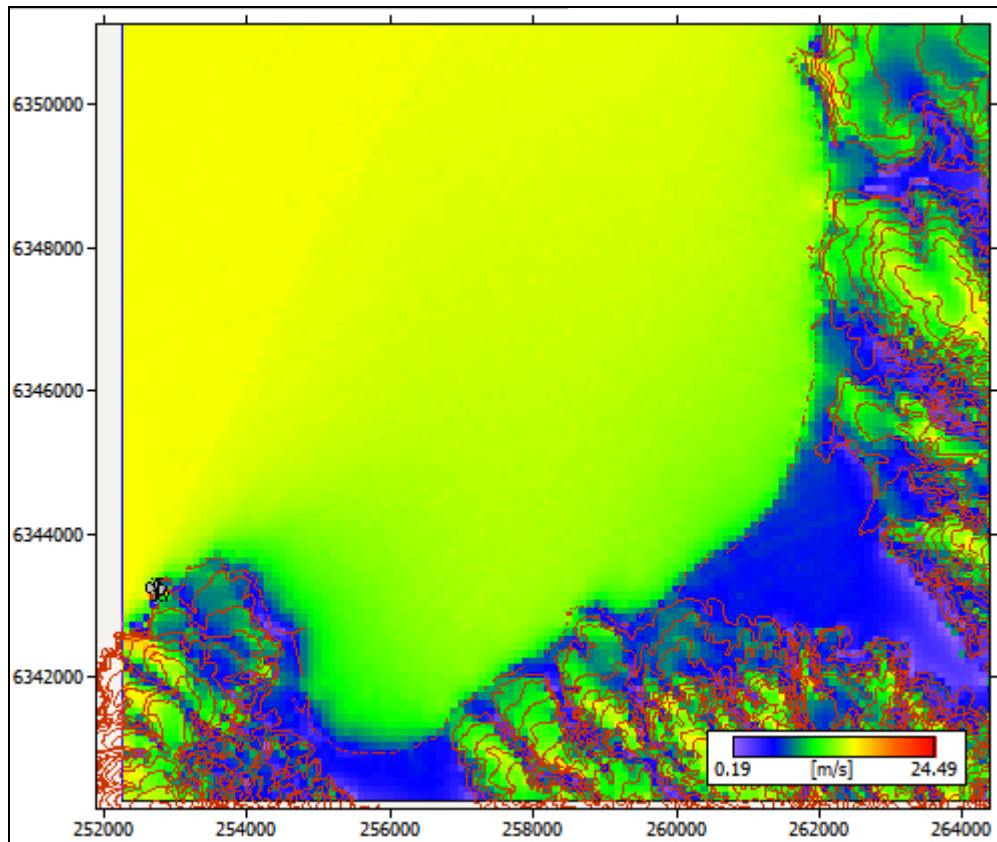


Figura 36: Acercamiento Valparaíso y Viña del Mar, caso SW.
(Fuente: Elaboración Propia)

De modo análogo, se puede deducir que el viento es difractado por la Punta Ángeles, produciendo lo que se describió anteriormente.

Al centrar el análisis en Concón (Figura 37), que corresponde a la zona de estudio del presente proyecto de título, ocurre algo similar con menor magnitud en cuanto a los efectos sobre su bahía, pero no alcanzan grandes extensiones como en el caso de Valparaíso lo que se debería a las características geográficas de las zonas elevadas en el sector de Con – Con, las que no sería comparables con la Punta Ángeles, aún así se encuentran zonas al interior del río Aconcagua con velocidades del viento bajas.

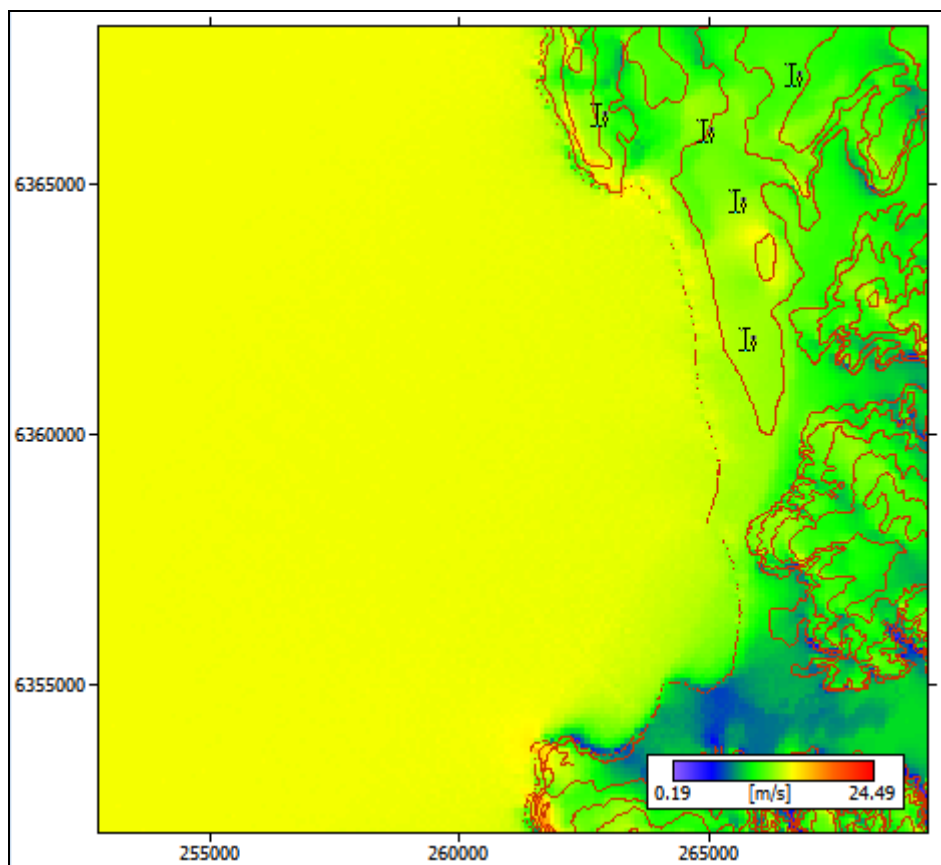
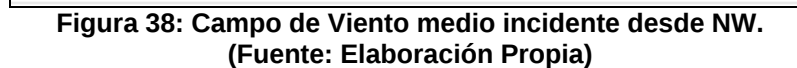


Figura 37: Acercamiento Concón y Ritoque, caso SW.
(Fuente: Elaboración Propia)

En el sector del campo dunar de Ritoque en viento proveniente del SW no disminuye abruptamente su magnitud, presentando incluso zonas que favorecen la aceleración, la que estaría dominada principalmente por los cambios de rugosidad y topografía.

Generalmente, como se es de esperar con este tipo de modelos, en el mar no se encuentran variaciones de las velocidades espacialmente, sin considerar los efectos de Punta Ángeles y Concón, o Quintero. A continuación estos resultados se pueden apreciar en la Figura 38, en que se aprecia el viento proveniente del NW, es decir, una dirección que no interactúa previamente con el continente para llegar a la zona de estudio.

Los cambios de velocidades del viento en el espacio son un elemento importante en la estabilidad de los campos dunares, ya que en conjunto con las características de los granos definen la dinámica de los sedimentos y sus consecuencias sería tendencia a la acreción o erosión, lo que depende de las tasas transportadas. Nótese que estos efectos fueron estudiados y sus resultados son reportados en los siguientes capítulos.



4.3.4 VALIDACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO

Como se mencionó anteriormente, se realizó una comparación con mediciones realizadas en el marco del proyecto EOLO (Depto. Geofísica, U. de Chile, 1993), cuya información está disponible en el sitio web <http://dgf.uchile.cl/eolo/>, de la cual se utilizaron 2 de las mediciones realizadas anteriormente, las cuales corresponden a Quintero y Ritoque, ambas emplazadas de acuerdo a lo mostrado en Figura 39.



Figura 39: Ubicación de mediciones proyecto EOLO.
(Fuente: Elaboración Propia)

La estadística de Quintero corresponde a la base de datos de la Dirección Meteorológica de Chile, del cual el período de información corresponde desde enero del año 1986 hasta noviembre del año 1991. Las mediciones pertenecientes a Ritoque corresponden al período entre los meses de mayo a junio del año 1981 (Depto. Geofísica, U. de Chile, 1993).

Se realizó una validación de modo estadístico, en la cual se obtienen las distribuciones de ocurrencia de los resultados del modelo en los mismos puntos mencionados de medición del proyecto EOLO. Estos resultados del modelo se comparan con la distribución de las mediciones del proyecto EOLO con la finalidad de realizar la validación entre los resultados del modelo junto con las mediciones, ambos a los 10 m de altura.

El modelo numérico se forzó en ambos casos de validación con las características del viento provenientes desde Punta Ángeles, considerando los intervalos de tiempo equivalentes, pero no coincidentes, entre ambas bases de datos, a modo de eliminar posibles desviaciones por diferencias en la extensión de la información comparada.

En la Figura 40 se muestra la comparación de resultados del modelo en el sitio de Quintero obtenidas a los 10 m sobre el nivel del terreno, mientras que para la estación de Ritoque se ilustran en la Figura 41.

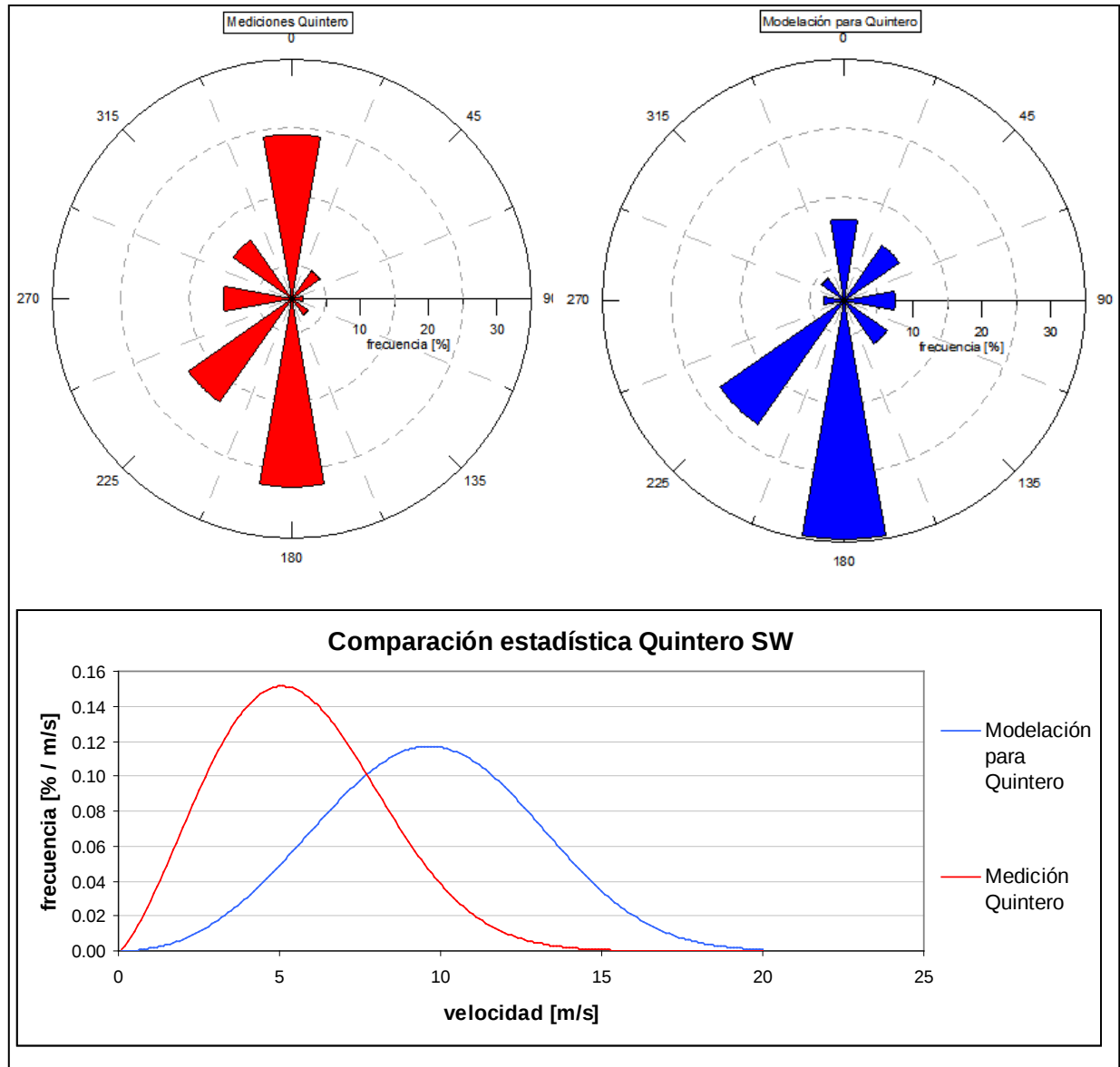


Figura 40: Comparación de Estadística de vientos a 10 m. Sitio Quintero.
(Fuente: Elaboración Propia)

En el caso de Quintero, existe en la modelación correspondiente de los vientos desde Punta Ángeles una distribución de las velocidades del viento más amplia que las mediciones, las

cuales tienden a concentrarse entre la calma hasta los 15 m/s. En cuanto a las direcciones se aprecia en ambos casos una misma tendencia de procedencia de la dirección principal asociada al Sur, sin embargo, en las mediciones se tiene una mayor ocurrencia de vientos provenientes del Norte. Tales diferencias en resultados pueden tener origen a los distintos períodos de la estadística utilizada, ya que cabe recordar, no se tuvo tiempos coincidentes, solo equivalentes, es decir, mismos meses en otros años.

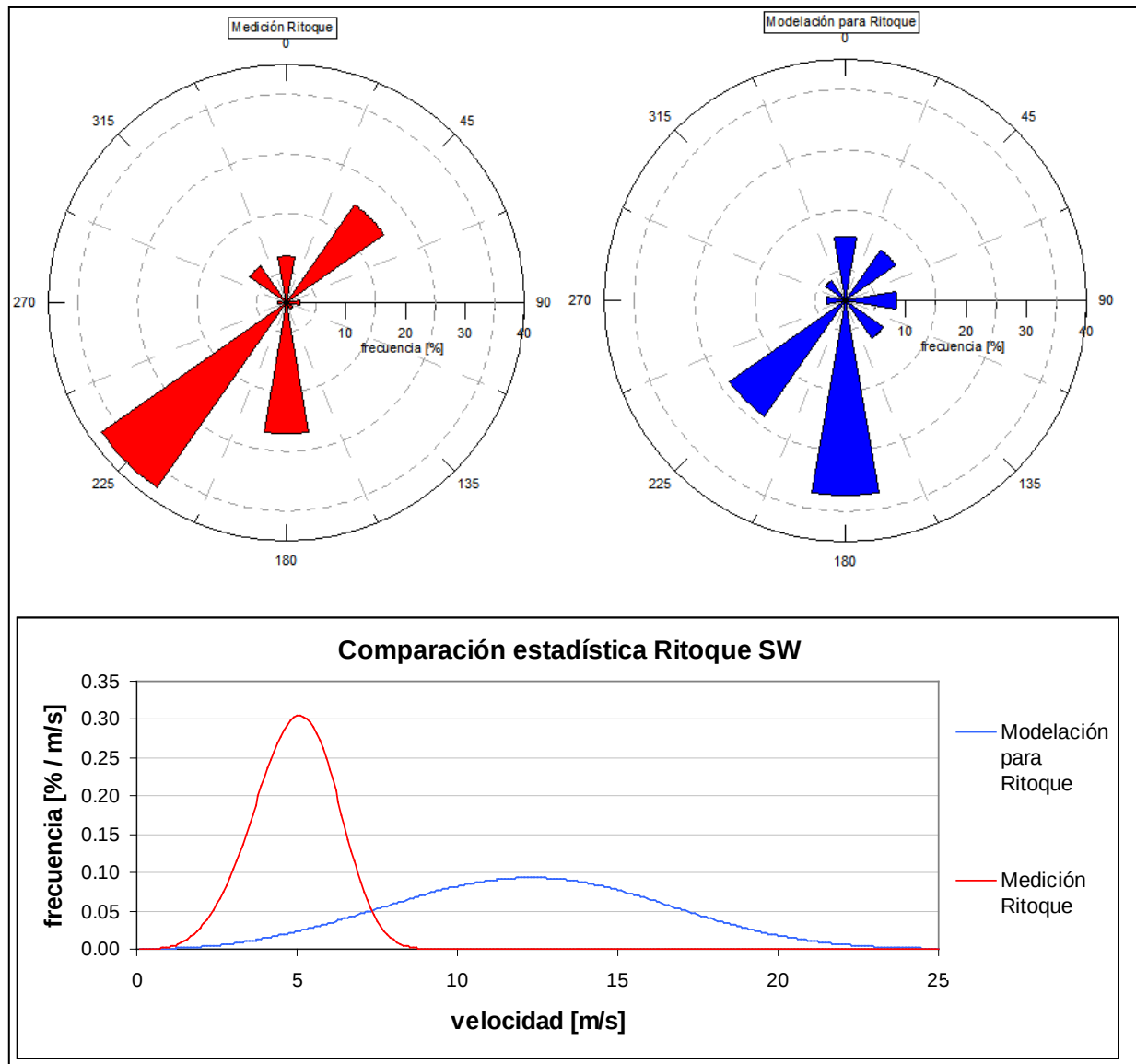


Figura 41: Comparación de Estadística de vientos a 10 m. Sitio Ritoque
(Fuente: Elaboración Propia)

Específicamente, en la modelación de los vientos de Punta Ángeles y los vientos medidos de Quintero, los provenientes del Norte tienen una marcada diferencia de ocurrencia, esto es debido a que en la bahía de Quintero localmente se tienen condiciones de vientos provenientes de esta dirección, los cuales ocurren por otros efectos que no se incluyen en el modelo.

En el caso de Ritoque, existe una mayor diferencia entre la distribución de velocidades, como también en la dirección de incidencia, en la modelación se tiene que las velocidades se distribuyen desde la calma hasta aproximadamente los 25 m/s, en donde existe una mayor densidad de ocurrencia en velocidades cercanas a la calma, en cuanto a la medición en Ritoque, se observa una concentración de la densidad de frecuencia entre la calma y los 8 m/s aproximadamente, teniendo su mayor frecuencia en los 3 m/s, lo que es diferente a lo que se tiene con los resultados de las modelaciones. Esto se puede dar dado que el período de medición en Ritoque consta solamente de 2 meses, con lo cual no es posible obtener un registro parcial de cada evento y características del clima de vientos que se pueda dar durante todo el año. En cuanto a las distribuciones de las direcciones, se denota una diferencia en las direcciones S y SW, en donde se encuentra una mayor frecuencia en las mediciones desde el SW. Esto está relacionado a una incertidumbre de la posición exacta del instrumento, donde el cual sus registros pueden haber estado influenciado por algún obstáculo como árboles que son abundantes en el sector, o alguna construcción cercana como también el periodo de medición como se mencionó anteriormente.

De acuerdo a lo anterior, se puede concluir que los resultados de los campos de viento del modelo Wasp, pueden no ser exactos a la realidad, pero si una adecuada aproximación y estimación de estos para la realización de este proyecto de título dado que no se alejan sus resultados al clima de vientos que describen las mediciones.

5 RESULTADOS

5.1 VIENTOS EN DUNAS DE RITOQUE

Como se demostró en capítulos anteriores, la dirección de vientos que produce el desplazamiento de partículas de sedimentos y definen la configuración morfológica del campo dunar de Ritoque es la incidente del SW, el cual se aprecia en la Figura 42.

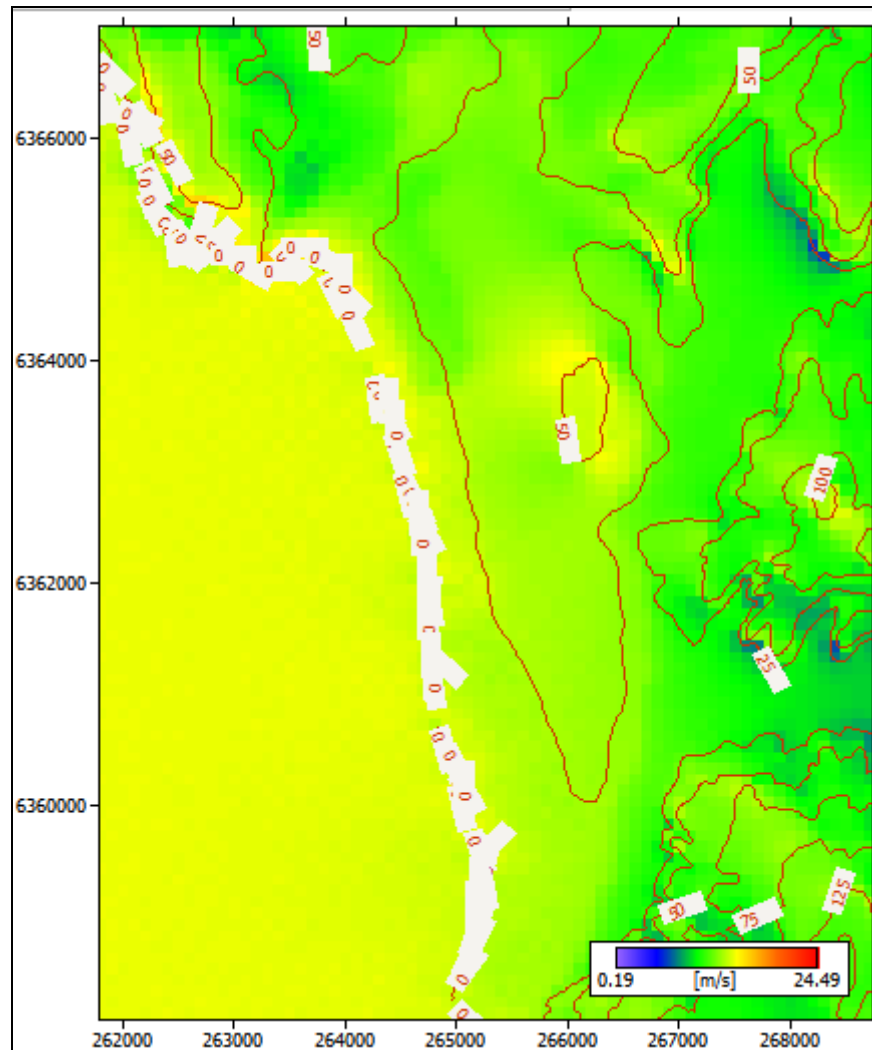


Figura 42: Campo de viento medio SW en campo dunar de Ritoque.
(Fuente: Elaboración Propia)

De este sector simulado, se puede apreciar que los vientos al entrar desde el SW al campo dunar de Ritoque, las velocidades comienzan a disminuir a medida que se van adentrando desde la línea de costa (nivel 0). En el sector sur de estas las intensidades media de los vientos se distribuyen de un modo prácticamente homogéneos, en el sector Oeste del centro del campo dunar, se encuentra un área que sobrepasa los 50 m de altura marcado por su

correspondiente curva de nivel, en donde se puede encontrar una aceleración de los vientos por efecto topográfico en ese lugar. Desde el punto anterior, en el sector norte del campo dunar, se encuentra una distribución del viento del SW de menor intensidad en todo el campo.

Este campo de vientos es fundamental en el presente estudio, el cual se toma como base para la determinación de los caudales sólidos.

5.2 CUANTIFICACIÓN DE CAUDALES SÓLIDOS

En esta etapa se seleccionaron 4 métodos para la caracterización del caudal sólido, que han sido descritos anteriormente en la Tabla 2, los cuales corresponden a las formulaciones de Bagnold (1941), Kawamura (1951), Lettau y Lettau (1978) y de White (1979). Se utilizan estos modelos debido a que estas formulaciones incluyen los efectos descritos en la sección 3.3.1.2 y han sido referenciados en diversos estudios, con lo que se consideran adecuados para la implementación en el desarrollo de este proyecto de título.

Para el cálculo del campo de caudales en la duna, se procedió a utilizar una metodología descrita por la U. S. Army Corps of Engineers (2003), la cual se detalla a continuación:

Primero se obtiene la velocidad de corte de inicio del movimiento a través de la Ecuación 4, para todo el dominio numérico. Posteriormente mediante la relación dada por Hsu (1977) entre la velocidad del viento a 2 m de altura (U_{2m}) con la velocidad de corte u_* , la cual es dada por:

$$u_* = 0.044 \cdot U_{2m} \quad (14)$$

En condiciones de Umbral, se tiene que:

$$u_{*t} = 0.044 \cdot U_{2m_t} \quad (15)$$

Donde:

U_{2m_t} es la velocidad del viento umbral a los 2 m de altura.

De este modo se puede obtener esta velocidad umbral a los 2 m. U_{2m_t} .

Del perfil logarítmico del viento entre 2 alturas, se tiene que la velocidad umbral a la altura de medición debe ser determinada por:

$$u_* = \frac{K \cdot (U_{z2} - U_{z1})}{\ln\left(\frac{z_2}{z_1}\right)} \quad (16)$$

Así, se tomó u_* igual a u_{*t} , ya que la velocidad de corte u_* es independiente de la altura desde el suelo.

Entonces, dejando $U_{z2}=U_{10m_t}$, $U_{z1}=U_{2m_t}$, $z_2=10$ m y $z_1=2$ m, utilizando el valor obtenido antes de U_{2m_t} , se obtiene la velocidad umbral a la altura de los 10 m.

Luego se expresa la velocidad de corte u_* en términos de la velocidad a los 10 m (U_{10m}), por ende se utiliza nuevamente la Ecuación 16.

De este modo se obtiene una expresión de la velocidad de corte u_* dependiendo de la velocidad a la altura de 10 m. (U_{10m}).

Luego si la velocidad a los 10 m es mayor que la velocidad de umbral a la misma altura (U_{10m_t}), se procede a calcular el caudal sólido, ya que se tendría una condición favorable para el inicio del movimiento y posterior transporte de los sedimentos. Esta aproximación, corresponde a una estimación considerando los procesos físicos, la que por definición es de mayor precisión de los cálculos basados en potencial de movilización.

A continuación se ilustra en un esquema la metodología implementada para el cálculo de la velocidad de umbral a los 10 m de altura por pasos:

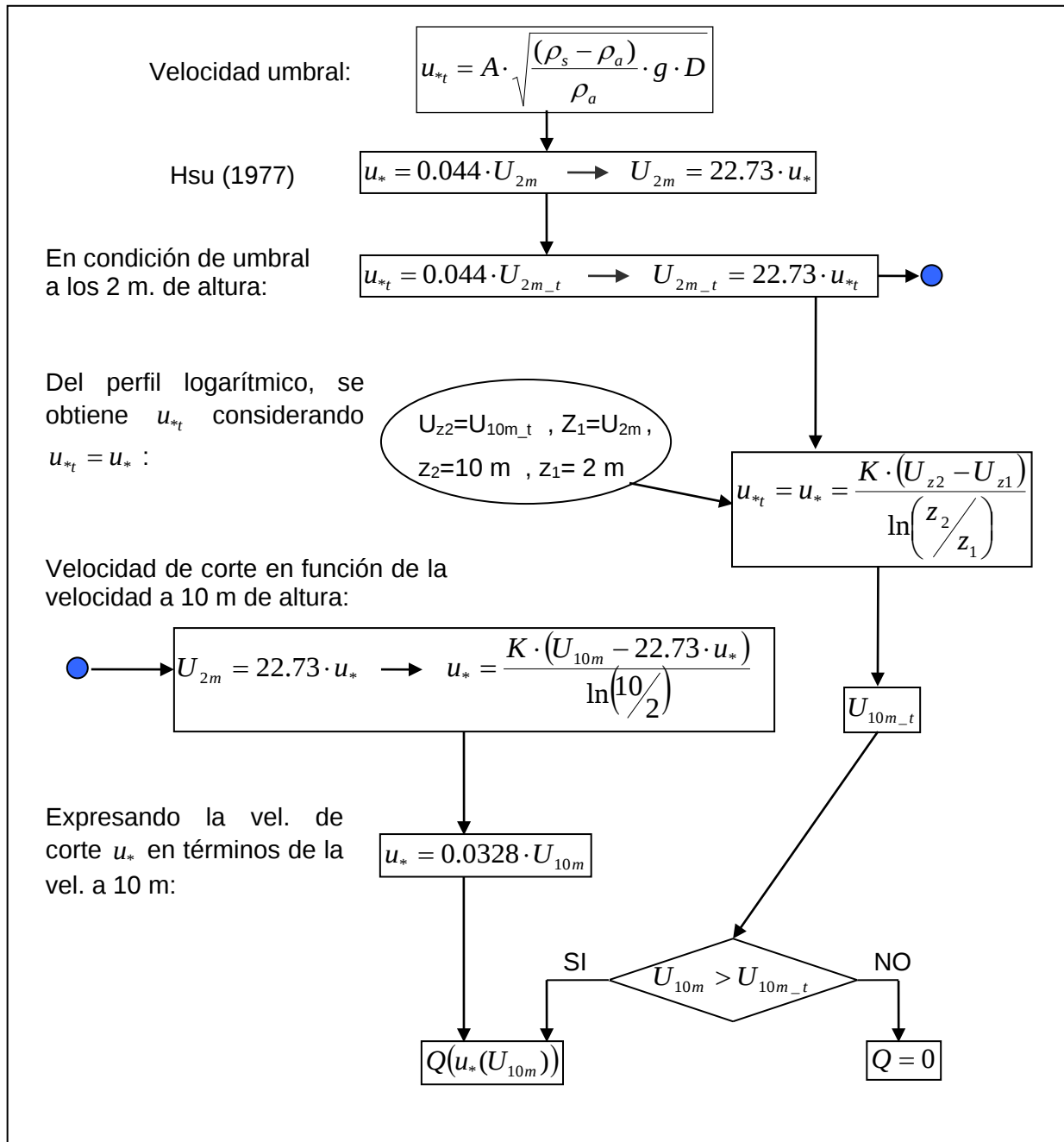


Figura 43: Esquema de cálculo de velocidad umbral a 10 m y de caudal sólido.
(Fuente: Elaboración Propia)

Este esquema es utilizado para el cálculo del caudal realizado por el viento medio, ya que estadísticamente esta medida de medida de tendencia central, representa de mejor manera lo ocurrido en cada estado de viento, minimizando las rachas y maximizando las calmas en ventadas de tiempo del orden de los 10 minutos.

Con las formulaciones mencionadas en la Tabla 2 se obtiene el caudal en peso [gr/s/cm], las cuales se transformaron a [gr/año/m]. Una vez realizado esto, se obtuvo el caudal total en volumen al año, de acuerdo a la siguiente formulación:

$$Q = \frac{q}{(1-p) \cdot \rho_s} \text{ [m}^3\text{/año/m]} \quad (17)$$

Donde:

Q es el caudal real en [m³/año/m]

q es el caudal obtenido de las formulaciones [Kgr/seg/m]

p es el grado de porosidad (0.4)

ρ_s es la densidad del sedimento [Kgr/m³]

Para el cálculo en el área del campo dunar, se utilizó los resultados del campo de vientos medios, específicamente en un área rectangular con un punto inicial desde la coordenada 262802 E 6358772 S, con una distancia hacia el Este de 5000 m. y hacia el Norte de 9600 m. como se muestra en la Figura 44.



**Figura 44: Área de cálculo de caudales.
(Fuente: Elaboración Propia)**

Para afinar el detalle del campo dunar de Ritoque, se realizó un mapa nuevo de rugosidades para la finalidad de diferenciar los tipos de suelos que se encuentran en este campo. (Ver Figura 45). Es decir, se desarrolló una nueva modelación para mejorar la descripción de las variaciones del viento en la zona de estudio.

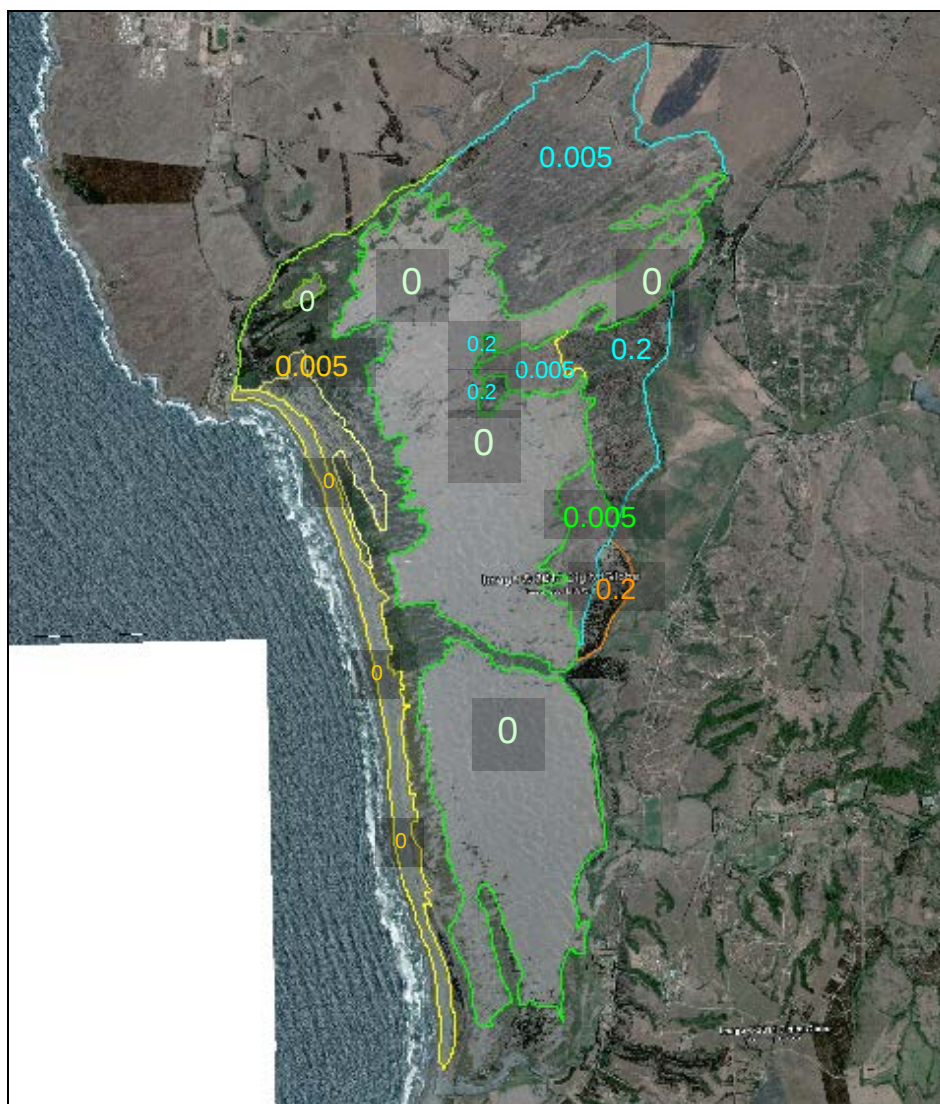
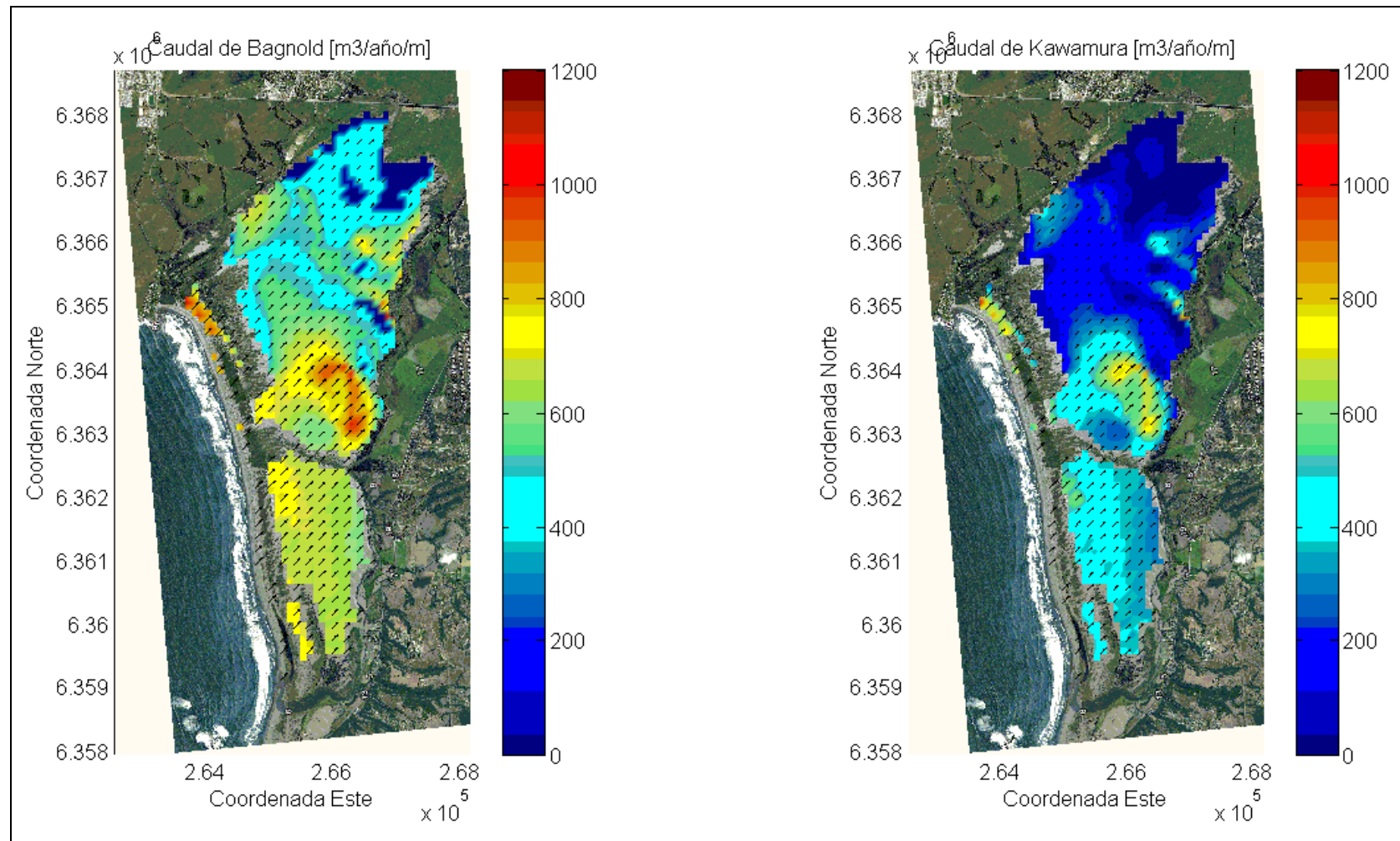


Figura 45: Mapa de valores de rugosidades detallado en campo dunar.
(Fuente: Elaboración Propia)

Los valores de rugosidades utilizados fueron desde cero para los sectores sin vegetación alguna (ver Figura 45), en donde se encuentran solo dunas demarcadas generalmente con líneas verdes y en la playa marcadas con amarillo, hasta valor de 0.2 en sectores donde hay dunas junto con vegetación abundante, las cuales se denotan con líneas celestes y naranja. En los sectores donde se encuentra solo vegetación y bosques como el sector cercano al balneario Ritoque no se calcula el caudal, ya que son lugares en donde estos impiden el arrastre de los sedimentos. Tampoco se calcula el caudal fuera de la envolvente del mapa de rugosidades obtenido en la Figura 45.

Este cómputo comprende las influencias de las pendientes en la dirección de cálculo de transporte. No se toman en cuenta la humedad ya que se realiza el supuesto de que no ocurre arrastre de sedimentos en condiciones de humedad. A continuación se muestran mapas resultantes de caudales de sólidos.



**Figura 46: Caudal anual en $[m^3/año/m]$, Dir NW, Bagnold, Kawamura.
(Fuente: Elaboración Propia)**

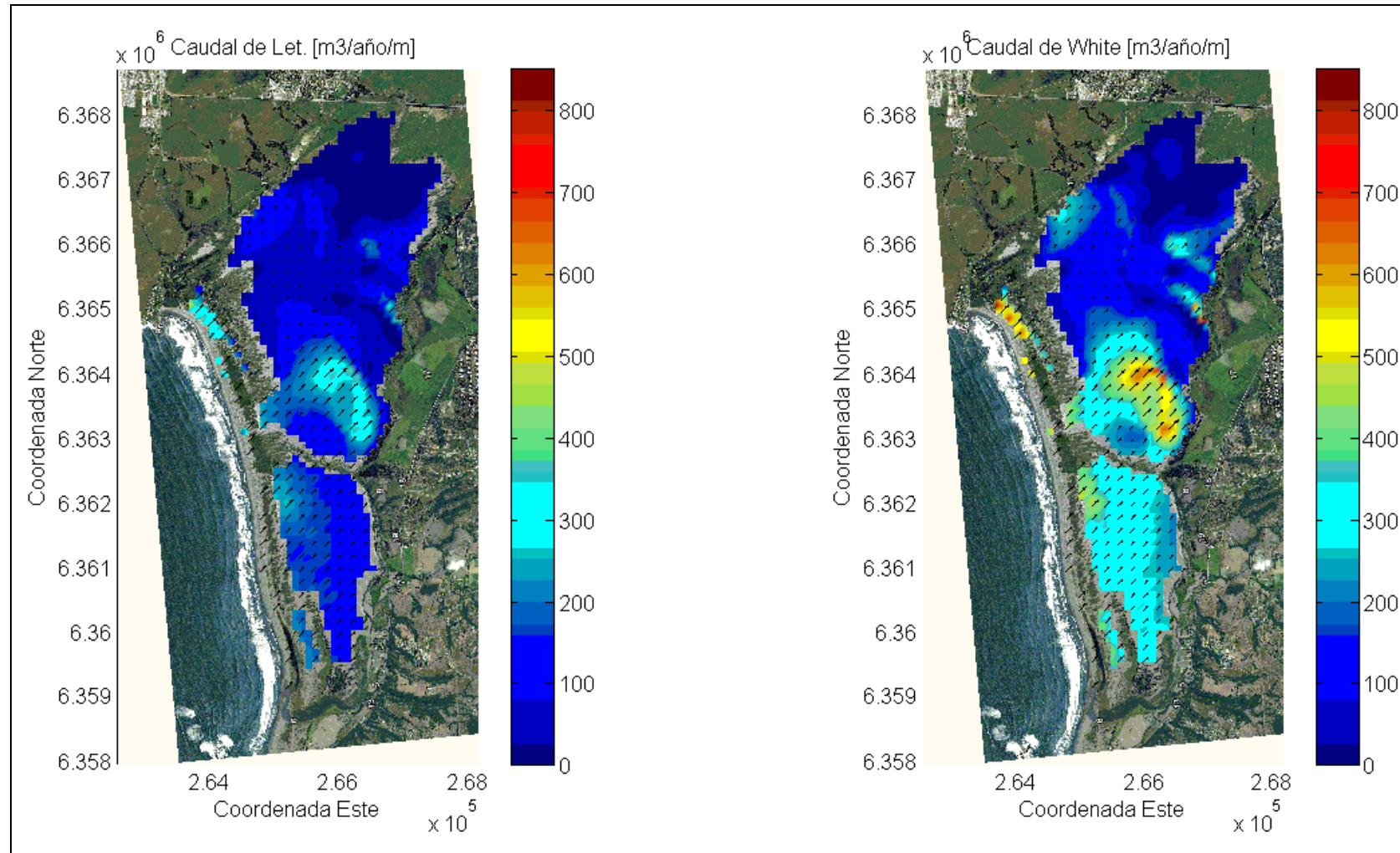


Figura 47: Caudal anual en $[m^3/año/m]$, Dir NW, Lettau y Lettau, White.
(Fuente: Elaboración Propia)

De los resultados mostrados en la Figura 46 y la Figura 47, la formulación de Bagnold (1941) presenta un caudal mayor en toda el área del campo dunar de Ritoque, la cual le sigue la formulación de Kawamura (1951), luego la de White (1979), y por último la de menor magnitud es la de Lettau y Lettau (1978).

Independiente de las magnitudes obtenidas por cada una de las formulaciones de cálculo del caudal sólido, se advierte que en todos los casos los resultados son comparables y equivalentes, ya que se puede advertir que todos predicen una zona con tendencia a la depositación (menor capacidad de transporte) en el sector Norte de la duna. Siendo el cordón dunar costero, el que presenta las mayores capacidades de poner en movimiento los sedimentos y por lo cual se podría establecer como la fuente de sedimentos que permitirían la posible expansión de la duna hacia el interior.

Para comprender los cambios espaciales en el mapa de caudales de sólidos medios, se muestra un mapa del campo de vientos junto con curvas de nivel a cada 25 m marcadas en rojo, esto específicamente en el campo dunar de Ritoque, la cual se aprecia en la Figura 42.

Con lo anterior, se puede apreciar que los resultados mostrados en la Figura 46 y Figura 47 son concordantes con lo mostrado en la Figura 42 de la sección anterior.

La acumulación o erosión se puede medir si el nivel topográfico de los sedimentos crece o decrece en el tiempo, lo que se puede cuantificar con mediciones. En este caso como se obtuvieron los caudales espaciales medios del campo dunar, se puede obtener la tendencia del campo, dando a conocer su estado de depositación o erosión, mediante la solución de la ecuación de conservación de la cantidad de sedimentos.

La variación de las profundidades/elevaciones se puede relacionar con los cambios de caudales sólidos en el espacio y tiempo, de acuerdo a la ecuación de conservación de la cantidad sedimentos, la que se muestra a continuación:

$$\frac{\partial h}{\partial t} \propto \frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial t} \quad (18)$$

Donde:

$\frac{\partial h}{\partial t}$ representa el cambio de nivel topográfico debido al transporte de sedimentos.

$\frac{\partial q}{\partial x}$ es el cambio espacial de caudal sólido.

$\frac{\partial q}{\partial t}$ es el cambio temporal de caudal sólido.

De modo que en un sistema en donde entran y sale caudales de sólidos, si el caudal de entrada es mayor al de salida, el nivel de sedimentos aumenta y por lo tanto los sedimentos están en depositación, mientras que si la entrada es menor a la salida, el nivel baja por lo que se tiene un sistema en erosión (Figura 48).

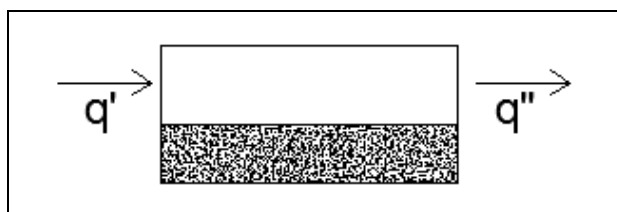


Figura 48: Esquema sistema de caudal.
(Fuente: Elaboración Propia)

Para el análisis dentro del sector en estudio, se utilizará los resultados de Bagnold (1941), debido a que se pueden apreciar de mejor modo los cambios de los caudales, sin embargo, cabe destacar que en todas las formulaciones de gasto sólido empleadas los resultados espaciales son equivalentes.

Como el análisis realizado fue enfocado en los caudales medios anuales, la componente de cambio temporal de estos no se analizará, debido a que en términos medios, no existen cambios, por lo que se anula y se enfocará en los cambios espaciales de estos caudales, siempre teniendo en cuenta que a lo largo del tiempo se tiene un clima de vientos homogéneo.

En la Figura 49, se muestra el mapa de caudal de Bagnold la dirección principal NE, en donde se trazan 2 líneas en el sector Norte del campo dunar de Ritoque, enumerando ciertos puntos o sectores para comparar los valores de caudales.

En la primera línea blanca, siguiendo desde el SW al NE, pasando desde el punto 1 al punto 2, se puede observar que en el punto 1 el caudal es de menor intensidad que en el punto 2, como también la magnitud baja aún más en el sector 3 de la línea blanca. De modo similar ocurre con la segunda línea amarilla, comparando los 2 puntos, en donde el punto 1 se encuentra mayor magnitud de transporte que en el segundo punto.

Con lo anterior, y considerando el sector analizado del campo dunar de Ritoque en dirección NE, se puede determinar que el campo dunar está en depositación.

De acuerdo a los resultados, los niveles del terreno de sedimentos van aumentando simultáneamente a lo largo de las líneas de análisis, lo que produce que los campos de dunas en el sector Norte están avanzando en la dirección analizada.

En los sectores sur del campo dunar, siguiendo el mismo esquema de análisis utilizado, se puede concluir que existe una estabilidad de las dunas, debido a que los caudales obtenidos son prácticamente homogéneos en su distribución espacial.

En síntesis, los caudales obtenidos a través del campo de vientos SW en el sector norte de las dunas de Ritoque, tienden a ir incrementándose e ir avanzando.

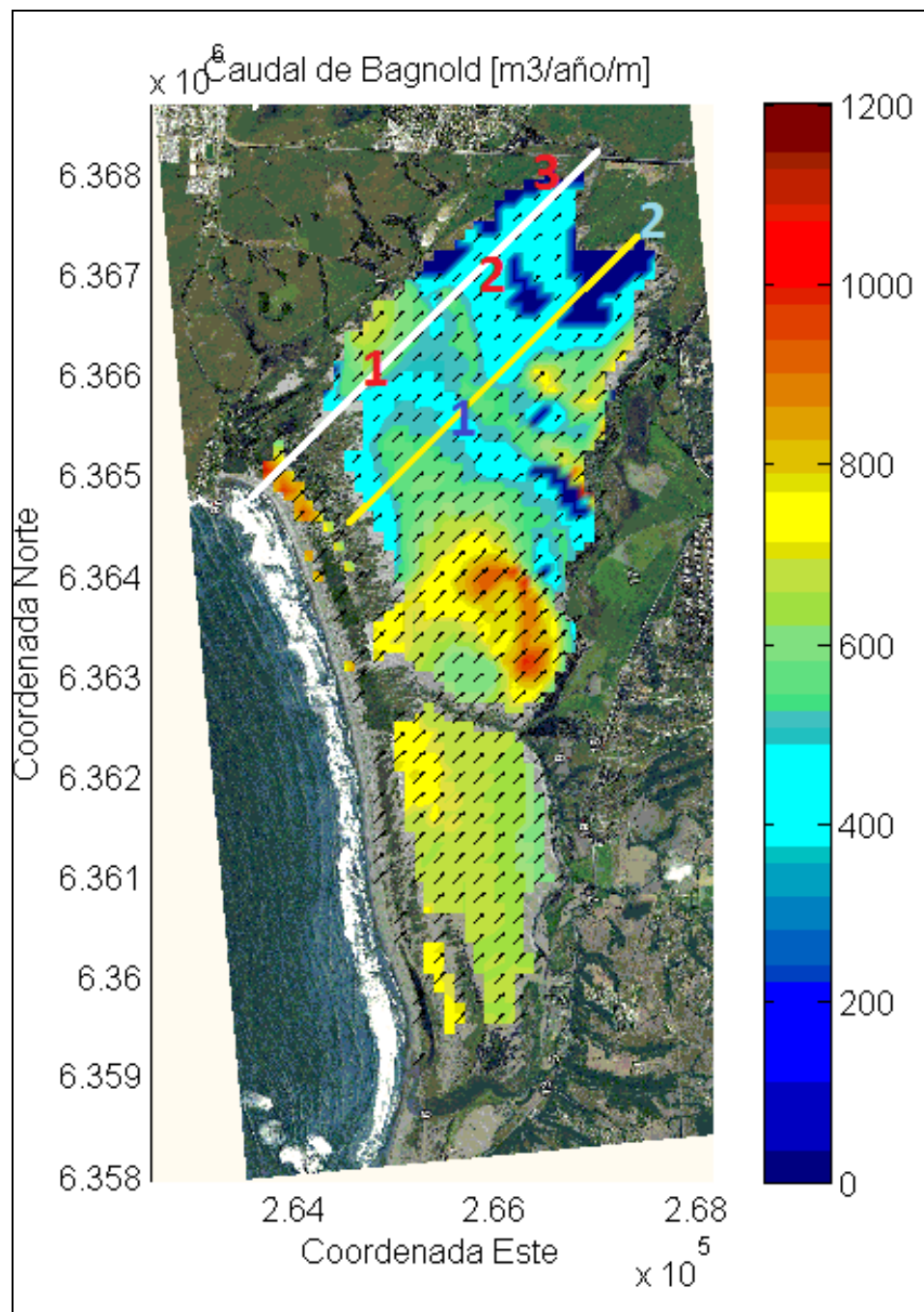


Figura 49: Análisis espacial de caudal de Bagnold (1941), en sentido NE.
(Fuente: Elaboración Propia)

5.3 ANÁLISIS HISTÓRICO DE DESPLAZAMIENTOS DE DUNAS

5.3.1 BASE DE DATOS FOTOGRÁFICOS

Para la determinación de los límites del campo dunar de Ritoque, se dispuso de un set de fotografías aéreas correspondiente a los años 1970, 1975, 1977, 1996 y 2007, con la finalidad de cuantificar los avances y movimientos que se encuentren en los límites del sector de estudio en este campo dunar, y verificar si existen desplazamientos significativos en el lado Este.

Todas las fotografías fueron georeferenciadas en sistema UTM -19, datum WGS-84 utilizando los software Didger 3. De éste se obtuvieron las líneas límites del campo dunar, y posteriormente con Surfer 8 se realizaron los mapas que se muestran a continuación:

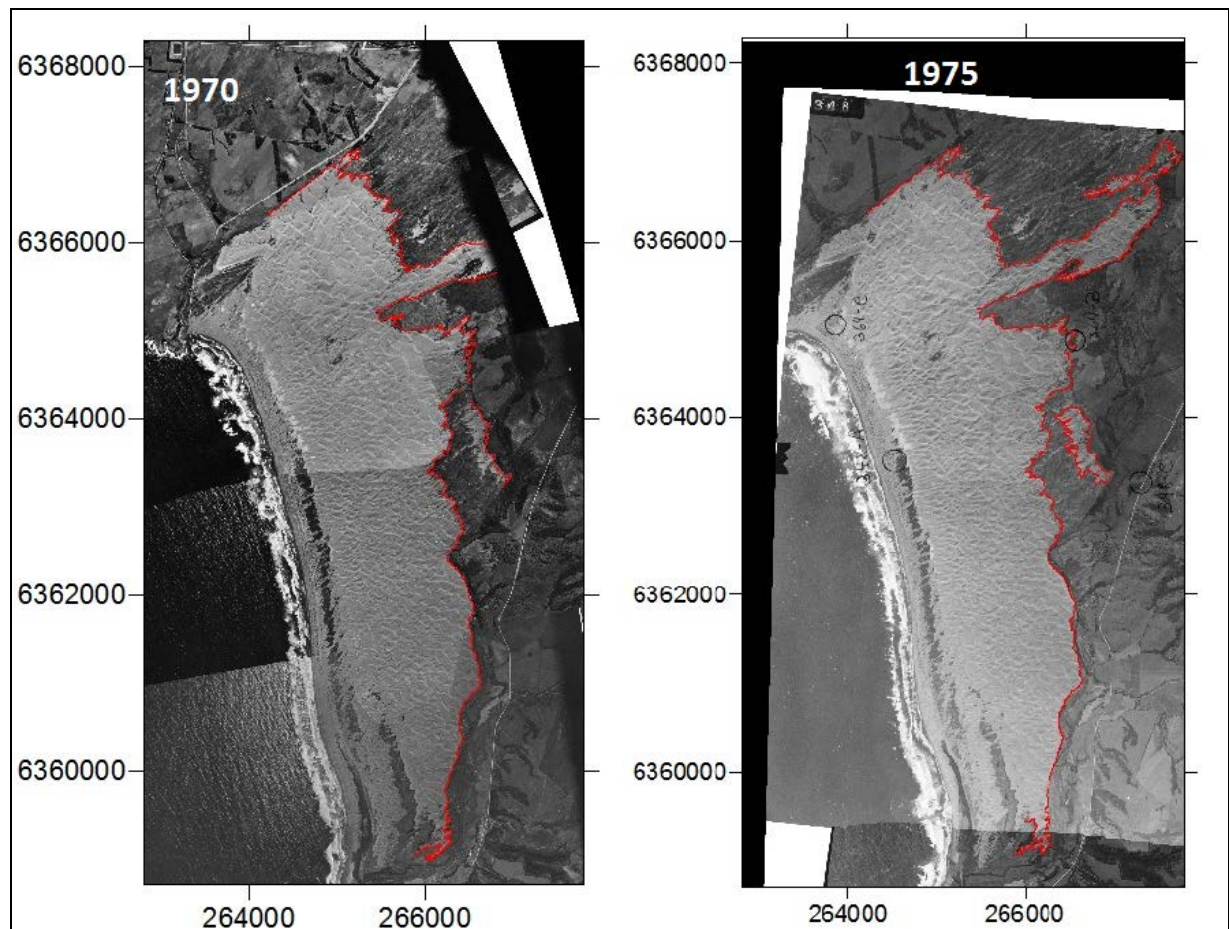


Figura 50: Fotos aéreas campo dunar 1970, 1975.
(Imagen izquierda: Fuente SHOA)
(Imagen derecha: Fuente SHOA)

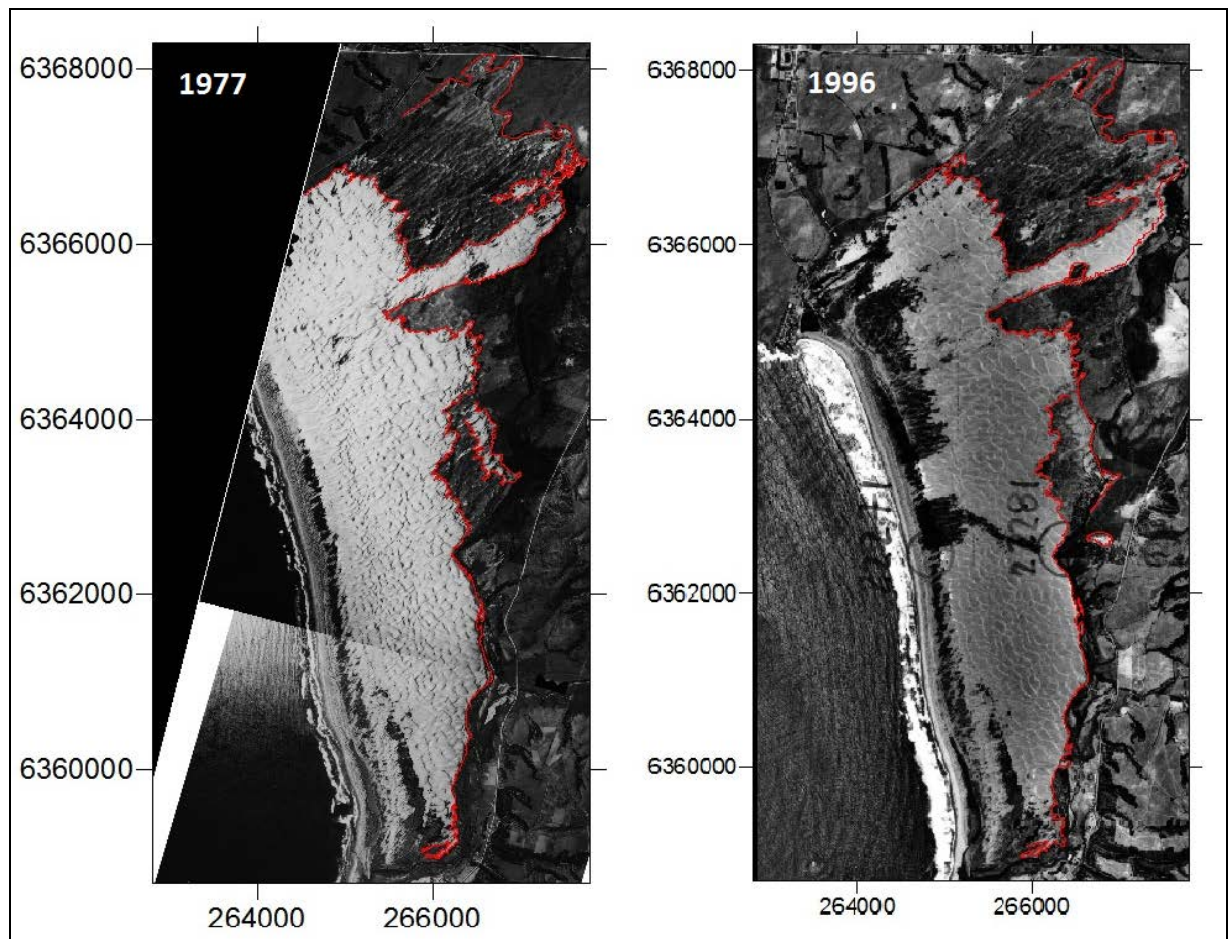


Figura 51: Fotos aéreas campo dunar 1977, 1996.

(Imagen izquierda: Fuente SHOA)

(Imagen derecha: Fuente GEOTEC)

En estas imágenes, se puede apreciar generalmente que las dunas en el sector NorOeste, a medida de que pasa el tiempo se han ido degradando cerca de la costa, esto es debido a trabajos en terreno y otros, como se han mencionado en la Sección 4.1, de modo que en sectores los sedimentos han sido transportados quedando sin depósitos de estos, por lo que se han acumulado vegetación.

Como se describirá más adelante, se han realizado trabajos en las dunas borderas en el sector norte, obstruyendo el paso de sedimentos con empalizadas y cerrando los corredores de deflación, lo que contribuyó finalmente a reforzar la acción erosiva del viento junto con el del oleaje en la costa (Castro, 1987).

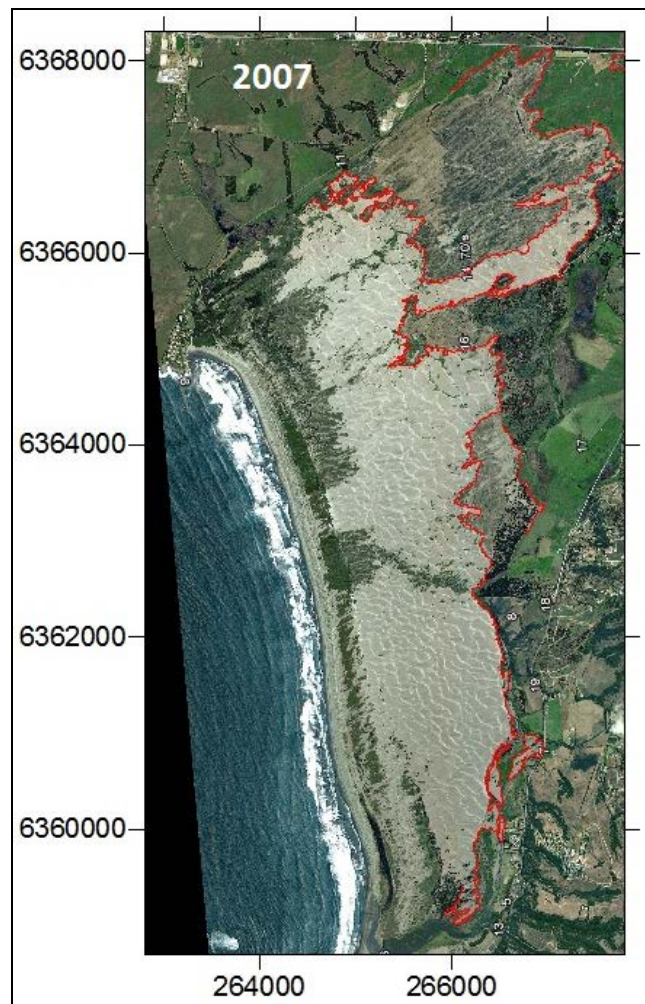


Figura 52: Fotos aéreas campo dunar 2007.
(Fuente: Google Earth)

Esta imagen es la más reciente con que se contará en el estudio. A simple vista se puede revisar este deterioro en el sector NW comparando las fotos correspondientes al año 1970 y del 2007.

De modo similar, se realizó una cuantificación de las áreas que ocupan los sectores del campo dunar, demarcándose 3 tipos de áreas: 1- Las dunas propiamente tal sin ningún tipo de arbusto, 2- las dunas con gran presencia de arbustos que se encuentran generalmente adentro del área descrita anteriormente y cercanas a la costa, 3- las dunas con arbustos que se encuentran al Nor-Oeste del campo, las cuales se encuentran cercanas a la carretera de acceso a Quintero por el Sur.

De acuerdo a lo anterior, se marcaron las áreas mencionadas para el set de fotografías³ correspondientes a los años 1970, 1975, 1996 y 2007, las cuales se pueden apreciar en las siguientes figuras.

³ No se considera la fotografía correspondiente al año 1977 debido a que ésta no tendría grandes cambios en el transcurso de 2 años considerando la fotografía de 1975.

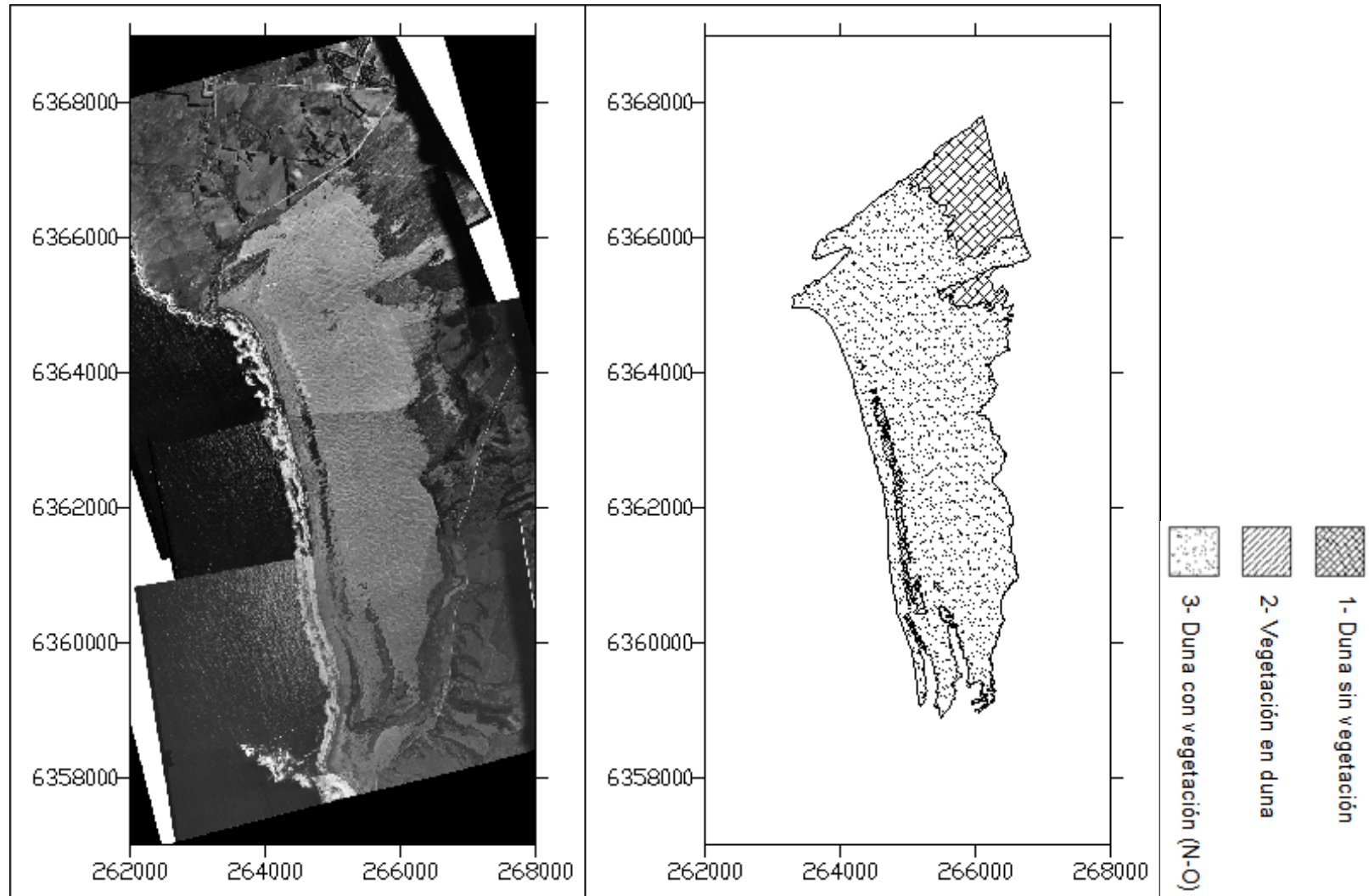


Figura 53: Áreas demarcadas campo dunar, año 1970.
(Fuente: Elaboración propia)

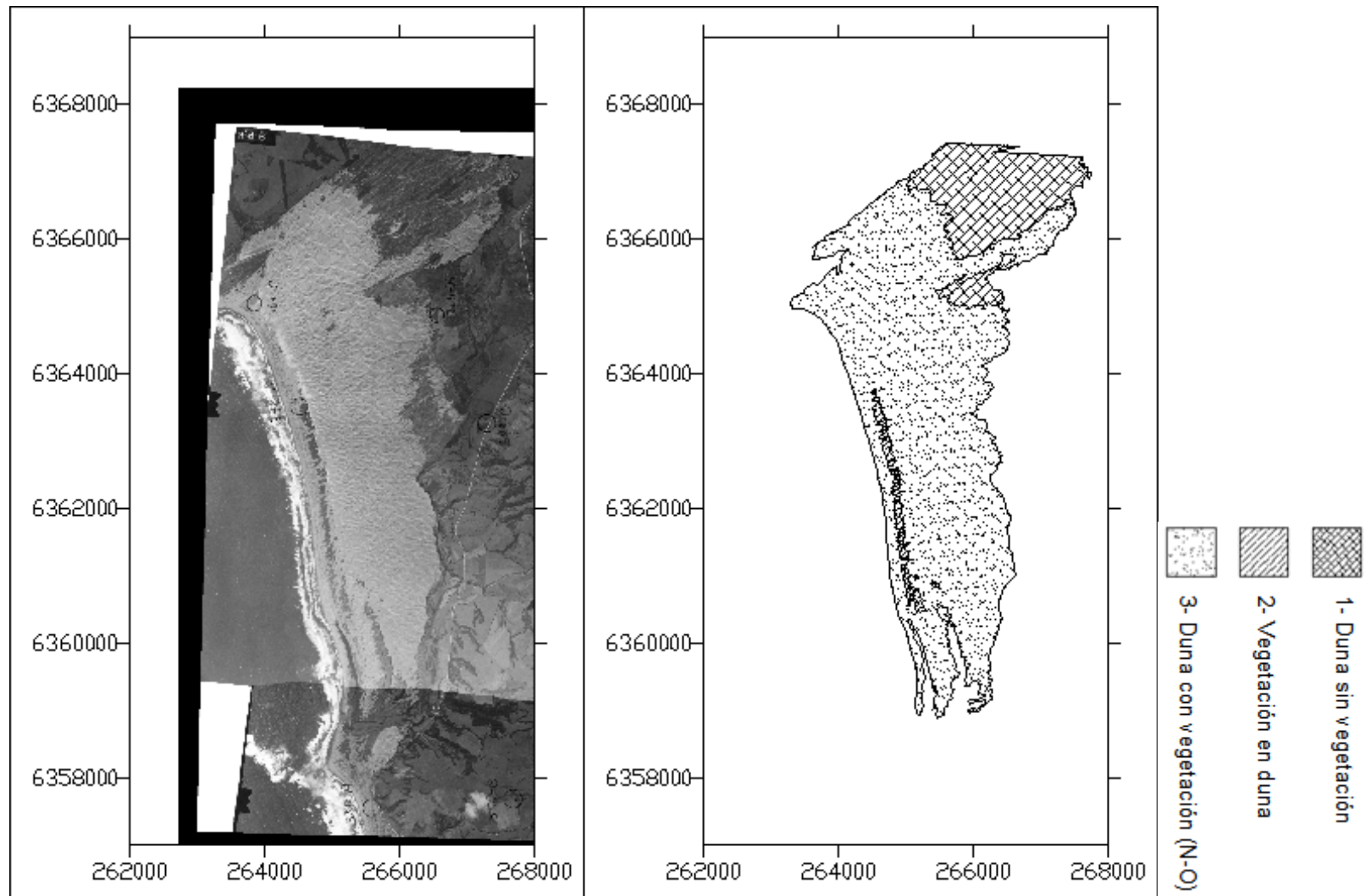


Figura 54: Áreas demarcadas campo dunar, año 1975
(Fuente: Elaboración propia)

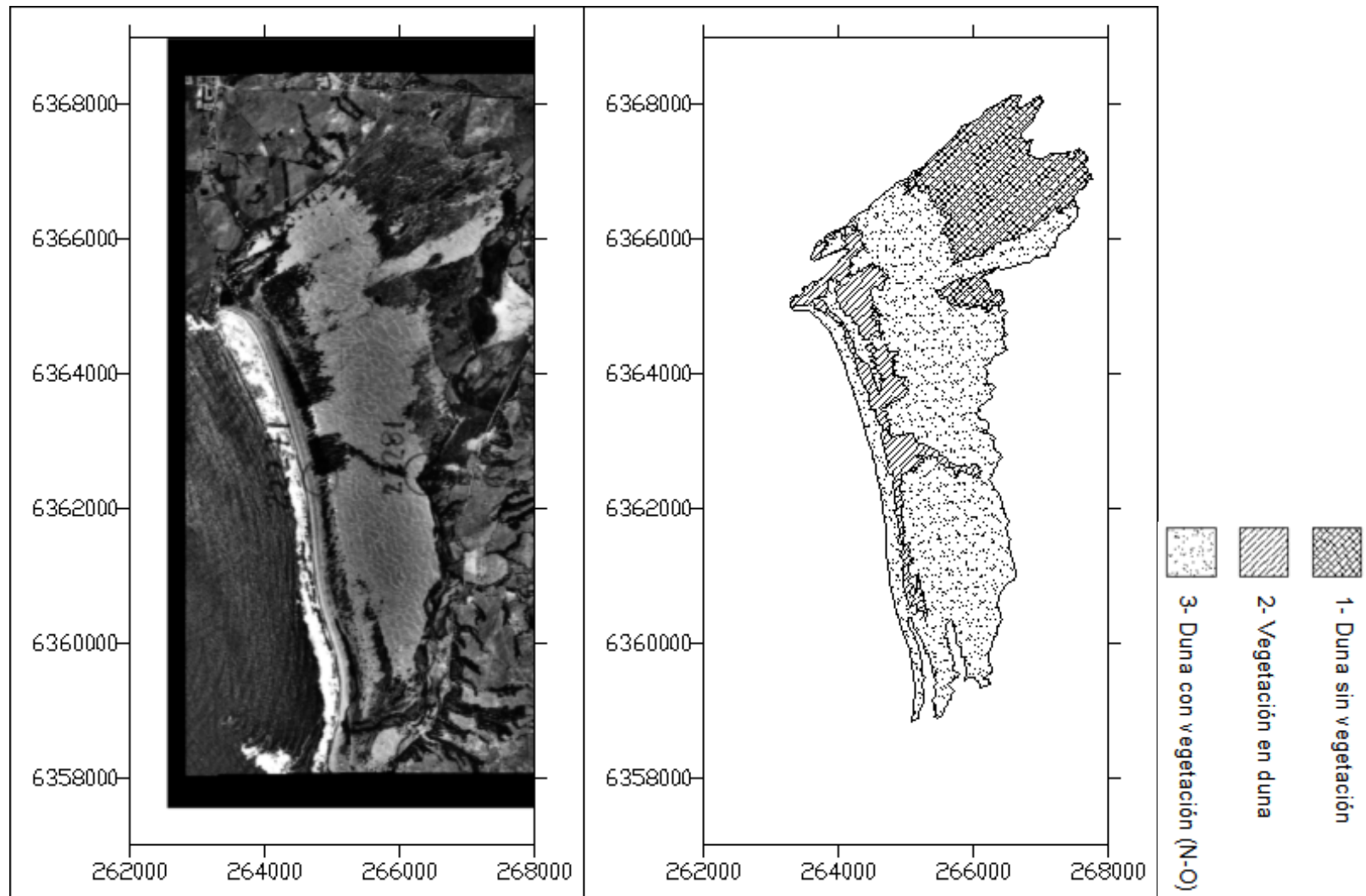


Figura 55: Áreas demarcadas campo dunar, año 1996
(Fuente: Elaboración propia)

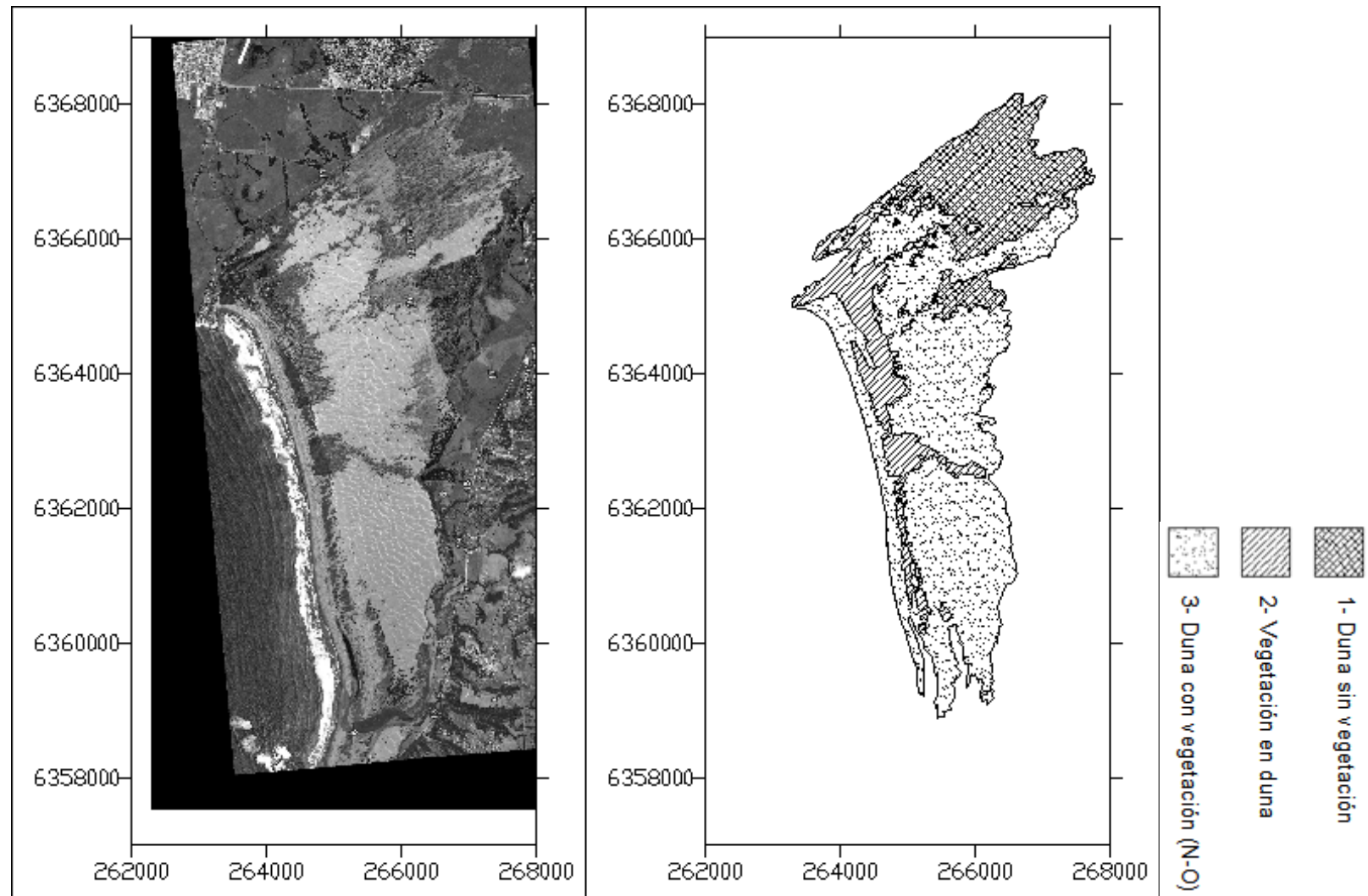


Figura 56: Áreas demarcadas campo dunar, año 2007.
(Fuente: Elaboración propia)

Para el año 1970, en la Figura 53, las áreas correspondientes a las dunas sin vegetación tienen una gran amplitud, con sectores menores de vegetación cercanas a la costa. Para el sector Nor-Oeste no se tiene información.

El año 1975 no se muestran grandes cambios con respecto al año 1970 debido que en 5 años no es un lapso de tiempo suficiente para encontrar modificaciones. El área no vegetada mantiene prácticamente su forma, como también los sectores de vegetación. En esta fotografía (Figura 54) tampoco se tiene información completa del sector Nor-Oeste del campo dunar.

En el año 1996 (Figura 55), se denota un cambio en las distribuciones de las áreas después de 21 años, particularmente las áreas de dunas sin vegetación sufren una disminución en su extensión, pasando a ser estas parte de las dunas del sector Nor-Oeste. Se puede apreciar también una afloración de vegetación cercanas a la costa, y un cordón de estos en el sector central del campo dunar.

Finalmente en el año 2007 (Figura 56), las dunas sin vegetación han ido cediendo gran parte de terreno que ocupaba en el sector norte, lo que evidencia el transporte del sedimento hacia las dunas del sector Nor-Oeste del campo dunar. Cerca de la costa, se encuentran mayores extensiones de vegetación, incluyendo el cordón de esta con una mayor tamaño.

Se muestra a modo de resumen una tabla con los valores de las áreas y porcentaje de cada año con respecto al su valor en 1975, debido a que en el año 1970 no se tiene información completa de las áreas del campo dunar. Para el sector de las dunas con vegetación al Nor-Oeste, se calcula la diferencia entre los años 1996 y 2007.

Tabla 7: Áreas en m² de sectores del campo dunar.
(Fuente: Elaboración propia)

año	duna sin vegetación (1)	vegetación en duna (2)	duna con vegetación N-O (3)
1975	13538163	283329	n/a
1996	11677421	1990834	3757760
2007	11149719	2382683	3884624

Tabla 8: Porcentaje de áreas del campo dunar c/r a año base
(Fuente: Elaboración propia)

año	duna sin vegetación (1)	vegetación en duna (2)	duna con vegetación N-O (3)
1975	100%	100%	-
1996	86.26%	702.66%	100%
2007	82.36%	840.96%	103.38%

La Tabla 8 se aprecia que existe una decrecida en los sectores de dunas sin vegetación, mientras que la vegetación dentro del campo dunar 2007 se ha incrementado 8,4 veces c/r al 1970. Por lo anterior, el sector del N-O ha ganado terreno ocupando los espacios de las dunas sin vegetación.

5.3.2 ANÁLISIS HISTÓRICO

Se procedió a comparar las líneas de los límites históricas extraídas de la digitalización de las fotografías en cada periodo, para así realizar la comparación entre estas en cada periodo del set de fotografías utilizadas:

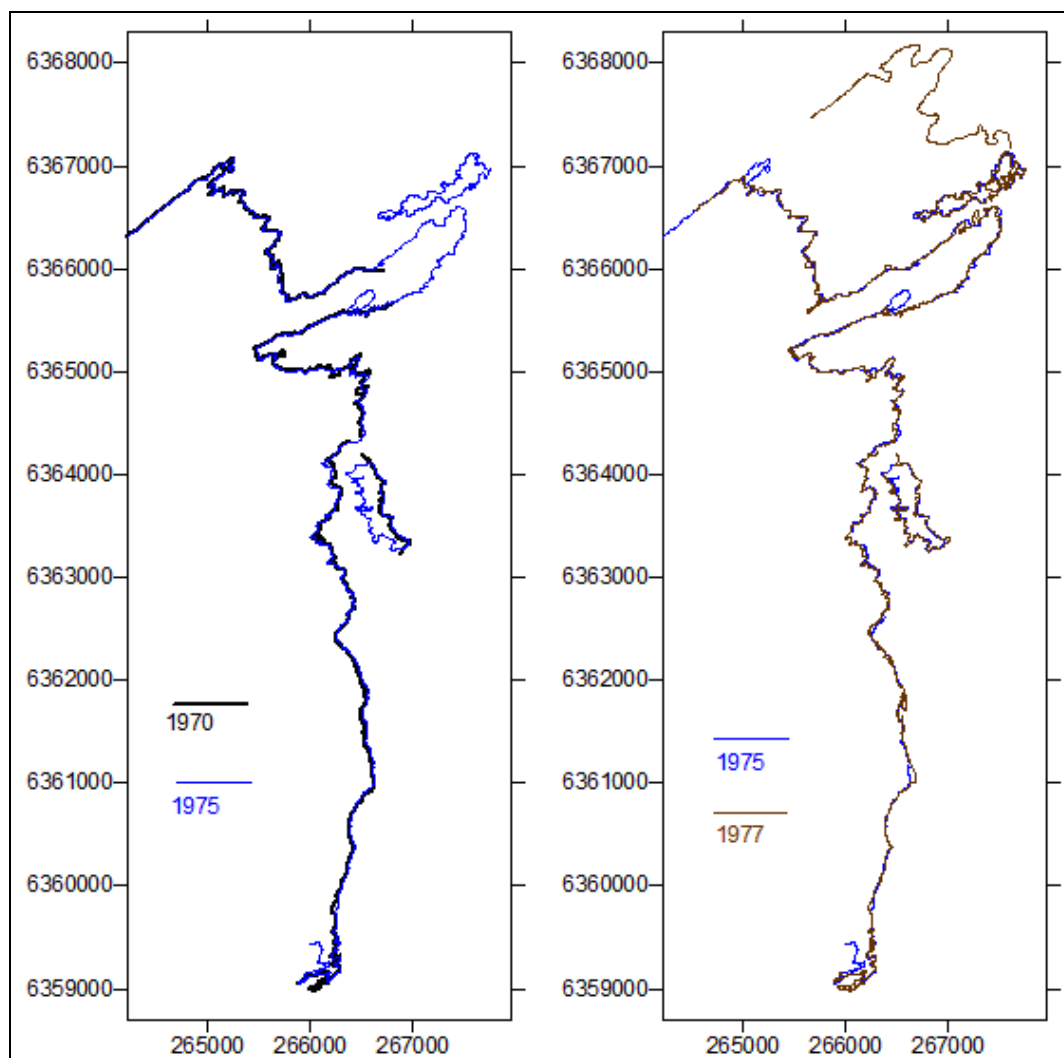


Figura 57: Comparación años 1970, 1975 y 1977.
(Fuente: Elaboración Propia)

En el periodo entre 1970 y 1975, no se contó con información del sector NE en donde se hallan vegetación, en tanto con lo obtenido en la comparación, se encuentra que a lo largo de las dunas propiamente tal desde Norte hacia el Sur, existen avances así como también sectores en donde se pueden apreciar retrocesos. De modo similar se encuentran estas diferencias en el periodo entre 1975 y 1977.

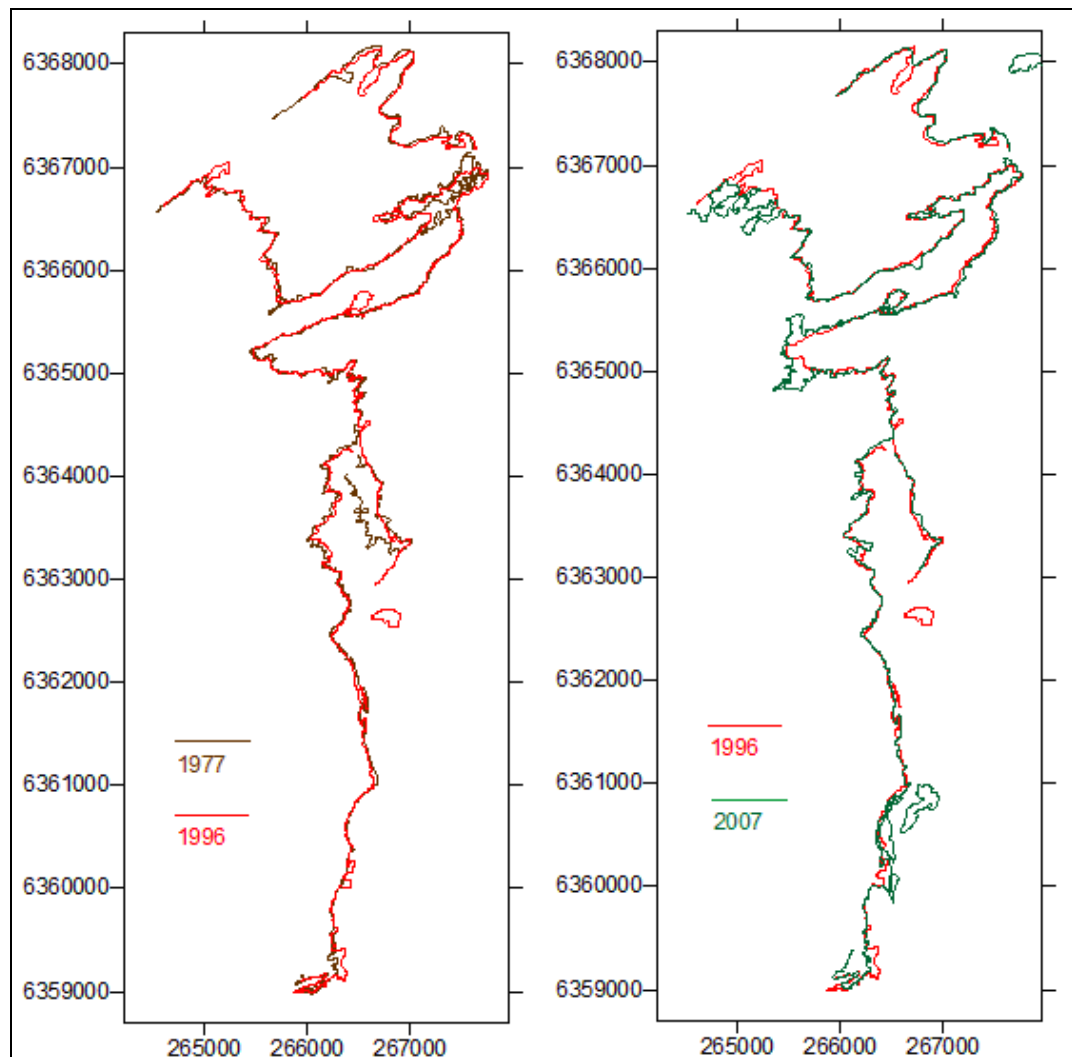


Figura 58: Comparación años 1977, 1996 y 2007.
(Fuente: Elaboración Propia)

De la Figura 58, similarmente a los periodos anteriores, se pueden observar que los cambios de los límites del campo dunar no han tenido grandes variaciones, pero si se detectan zonas en que se encuentran avances y retrocesos de esta. En el norte de las dunas propiamente tal, se encuentra una variación de sus límites en los últimos años, por lo que se tiene una deterioración de las dunas en el sector.

A lo largo del límite de las dunas, se pueden apreciar entre los distintos años que existen movimientos de estas, siendo así de retroceso o de avance hacia el Este.

En las fotografías correspondientes a los años 1977, 1996 y 2007 se puede encontrar información de las líneas del campo dunar en el sector norte, en donde existe la problemática de que los sedimentos puedan sobrepasar la carretera. Para este caso se realizó una comparación de las líneas de estos años en el sector en cuestión.

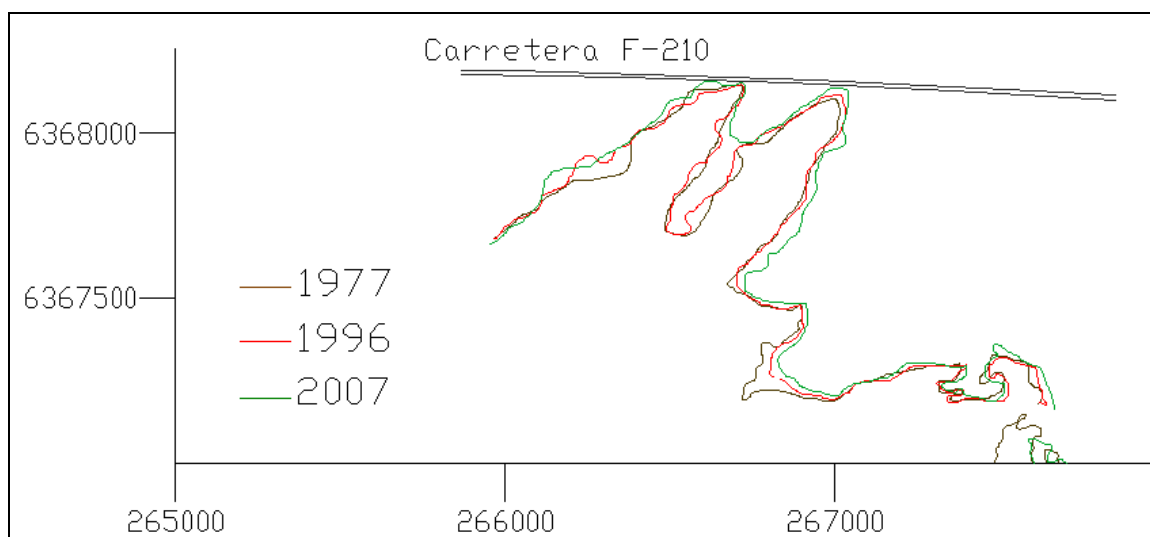


Figura 59: Sector Norte de campo dunar, años 1977, 1996 y 2007.
(Fuente: Elaboración Propia)

En la Figura 59 se visualiza las líneas de la zona norte del campo dunar, por medio de las cuales se obtuvo una cuantificación de los cambios históricos de éstas en sentido SW a NE. Para esto se calculan los avances y retrocesos, los cuales están con respecto al año 1977 (ver Figura 60), ya que es la fotografía más antigua de la que se puede obtener información en el sector mencionado. En cierto sector para el año 2007 no se realizó la comparación debido a que los cambios de los sectores de la duna son debido a movimientos laterales de esta, los cuales se traducen en valores poco confiables en avances hacia la dirección NE.

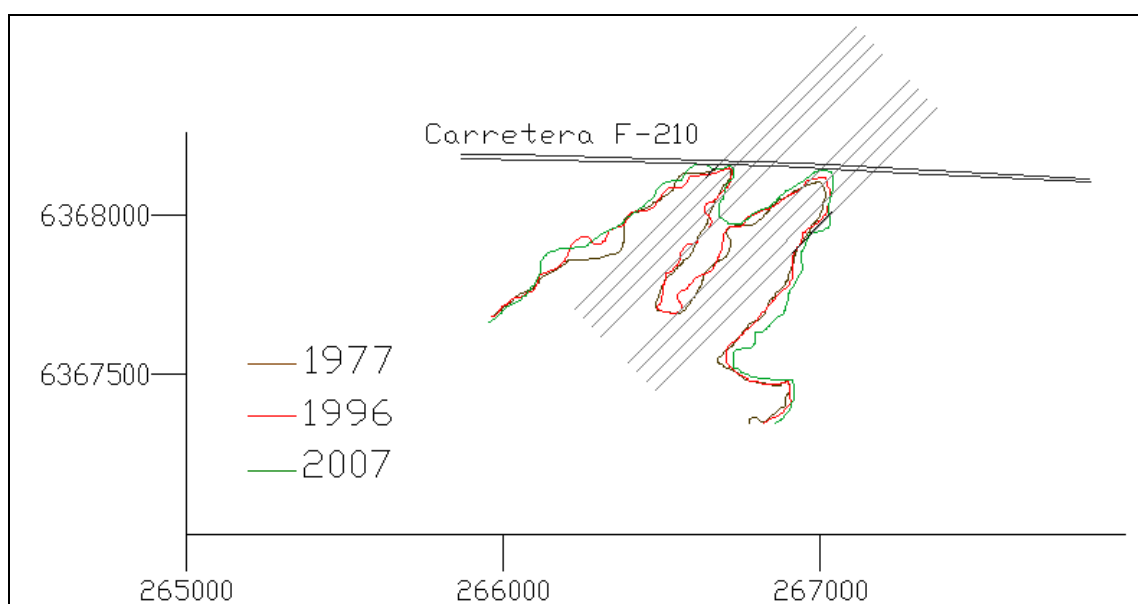


Figura 60: Cuantificación de avances y retrocesos, años 1977, 1996 y 2007.
(Fuente: Elaboración Propia)

Como se muestra en la Figura 60, se trazaron líneas en sentido NE, para así medir los avances del campo dunar de este sector en esta dirección, las cuales están separadas a cada 40 m.

En la Figura 61 se muestran los retrocesos (valores negativos del eje y) y avances (valores positivos del eje y) en dirección al NW en el sector norte de campo dunar de Ritoque con respecto al año 1977, en donde existe el riesgo de que estos sedimentos sobrepasen la carretera.

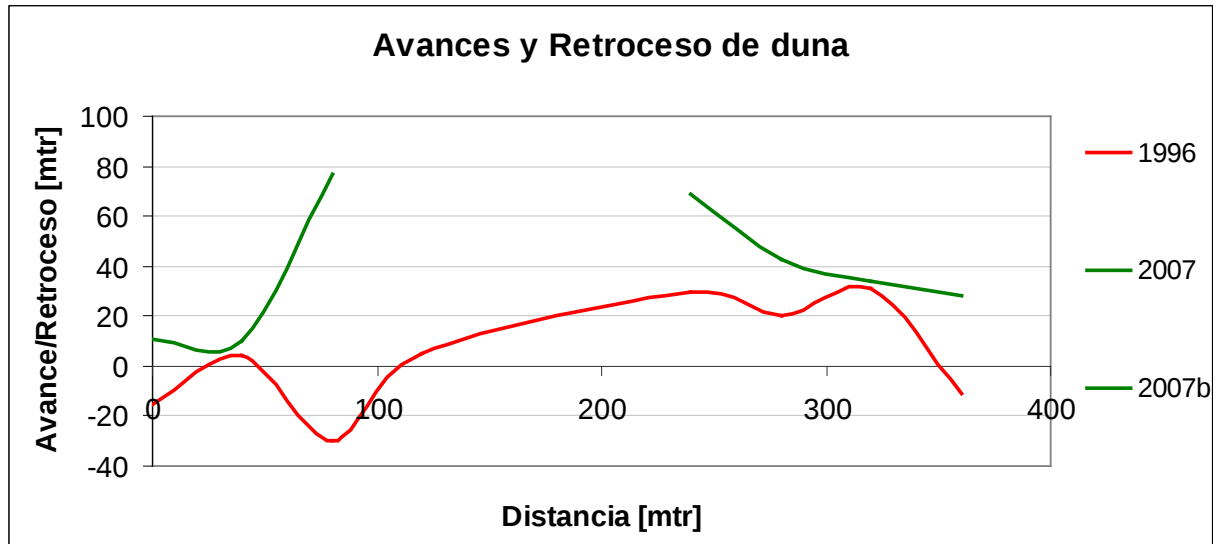


Figura 61: Cambios de la línea del campo dunar.
(Fuente: Elaboración Propia)

De esta se pueden deducir un avance de aproximadamente 30 m. para el año 2007 con respecto al año 1977, ya que los valores más altos corresponden a las diferencias de las líneas en los costados de ciertos sectores que se expanden en otras direcciones. Como valor medio de avance entre 1977 y 1996, se tiene una magnitud de 20 m. aproximadamente lo que corresponde a una tasa de 1.05 m/año, mientras que entre 1977 y 2007 se tiene un avance promedio de 40 m dando un avance de 1.3 m/año. Con lo anterior, se considera un avance promedio de este sector de 1.12 m/año.

5.4 SUPERFICIE ESTIMADA DE AVANCE

Se realizó una estimación de la superficie obtenida por el avance del campo dunar en el sector norte de esta entre los años 1977 y 2007. En la Figura 62 se muestra sub-área de estudio, la cual corresponde a 43,306.529 m², siendo medido en una distancia perpendicular a la dirección de acción del transporte de sólidos hacia el NW correspondiente a 360 m.

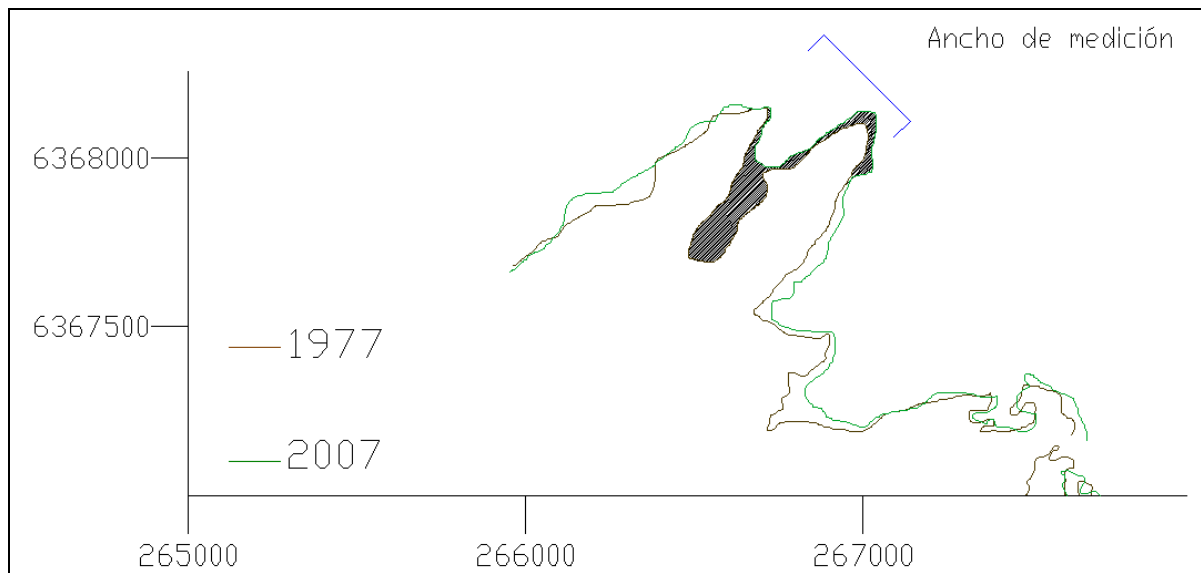


Figura 62: Determinación de la superficie de avance, sector norte.
(Fuente: Elaboración Propia)

El volumen con que ha ganado terreno el campo dunar no es posible obtener ya que no se cuenta con levantamiento topográfico de detalle de estos. Sin embargo, con los datos anteriores, se tiene que en el lapso de 30 años en el sector Norte tiene una ganancia de terreno de 1,443.55 m²/año.

Mediante la tasa real de transporte de sedimentos, se comparó con las distintas formulaciones para transporte eólico utilizadas en la sección 5.2, en que se consideraron las condiciones granulométricas del campo dunar, de la cual se extrajo los valores característicos obtenidos en la zona en cuestión⁴ (ceranos a la posición 266,776E 6,367,830N), junto con el valor real del área de avance, los cuales aparecen en la Tabla 9.

Tabla 9: Comparación de resultados, sector norte campo dunar.

Método	Tasa [m ³ /año/m]
Área de avance	1,443.55
Bagnold	430
Kawamura	65
Lettau y Lettau	20
White	40

(Fuente: Elaboración Propia)

De acuerdo a lo anterior, se puede concluir que la ecuación de Bagnold (1941) aplicada tiene un ajuste más cercano con el cual se debe considerar que el área de avance de la duna en el sector analizado es aproximadamente 3,3 veces mayor que el dado por Bagnold, mientras que las demás se escapan abruptamente de la magnitud del área erosionada.

⁴ Los cálculos se realizaron considerando 1 m. de altura.

5.5 PROYECCIONES ESTIMADAS A FUTURO

Con los resultados obtenidos, se procedió a obtener los posibles avances del sector norte del campo dunar de Ritoque, siempre considerando que todos los parámetros medios que se han estudiado y considerado para este proyecto de título no cambien, tales como el clima de vientos, parámetros de sedimentos, y el campo permanezca abierto en dirección hacia el mar.

Para esta proyección, se utilizó los trazos que limitan el campo dunar pertenecientes al año estudiado más reciente (2007), con el cual se desplaza en las posiciones siguiendo las tendencias de los resultados obtenidos anteriormente. Con esta metodología se obtuvo trazos del posible emplazamiento del campo dunar para 50 y 100 años a futuro a partir del año 2007, los cuales se pueden apreciar en la Figura 63:

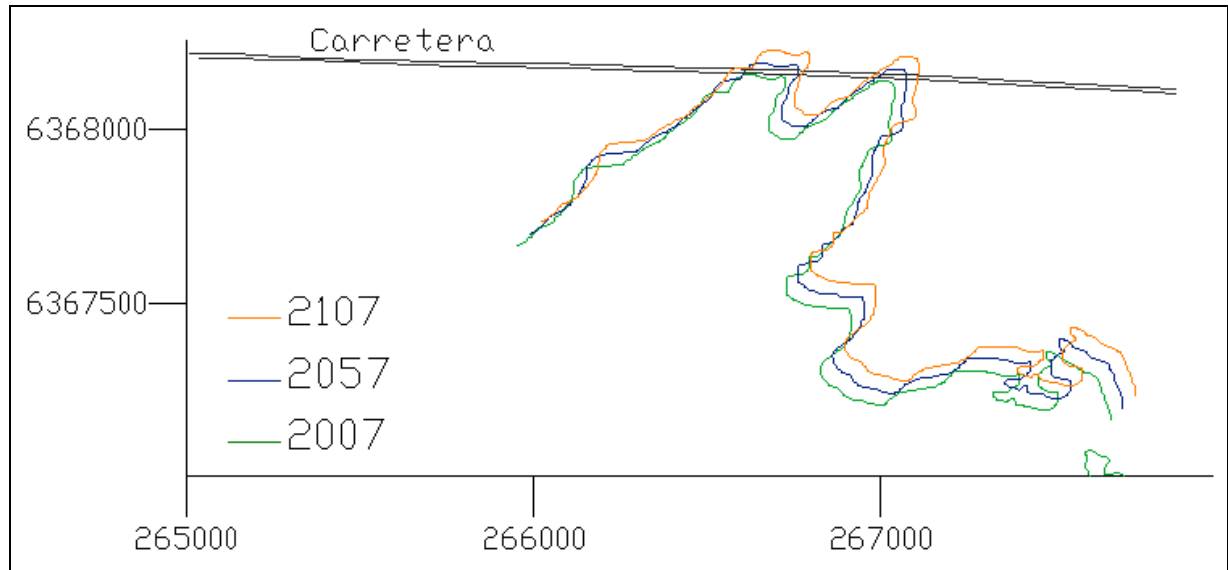


Figura 63 : Posibles avances de campo dunar, sector norte.
(Fuente: Elaboración Propia.)

Con esta proyección a futuro, se puede observar que a un mediano plazo se produzca un avance masivo del campo dunar en el sector norte, el cual puede generar problemas en el sector norte de la carretera, como también aparecer otras concentraciones a causa de la saltación de los sedimentos y su transporte a mayores alturas causado por rachas grandes de vientos y que puedan depositarse en estos sectores.

5.6 RECOPIACIÓN DE MEDIDAS DE MITIGACIÓN REALIZADAS

En el campo dunar de Ritoque, se han realizado diversos trabajos previos de plantaciones para aminorar el efecto del transporte eólico de sedimentos. Una de éstas fue la Corporación Nacional Forestal en 1972, realizó trabajos en el sector noreste de las dunas, con lo que se consiguió evitar el avance de las dunas borders sobre la línea del ferrocarril.

Actualmente existen en diversos sectores campos de bosques que retienen de modo efectivo las dunas, como las que se encuentran en el sector Este de las dunas, así como también en el sector Noroeste en la localidad de Ritoque. En la Figura 64 se han destacado los sectores en donde se introdujeron especies de arbustos u otros en distintos trabajos.



Figura 64: Trabajos de trampas de arenas.
(Fuente: Elaboración Propia.)

Rojas (2008) en su memoria de título realizó una basta compilación de trabajos realizados en el campo dunar, de las cuales se destacan las siguientes:

- Finalizando la década de 1960 por parte de la División Forestal del Servicio Agrícola y Ganadero (SAG) se realizó riego con agua de mar, en donde se utilizaron ciertas especies de arbustos.
- Por parte del Servicio Agrícola y Ganadero (SAG) se introdujeron especies destacándose la *Acacia saligna*, un pequeño árbol.
- Un trabajo de control de dunas realizado por Vita y Cogollor (1979), quienes introdujeron el *Tamarix gallica*, un arbusto que mide hasta 6-8 m., y probaron la utilización de *Amophila arenaria* en hileras.
- Por parte de CONAF, se realizó una plantación amplia de *Ammophila arenaria* en 1974, planta que puede alcanzar 1.2 m, las cuales se concentraron en la zona de la Estación de Ritoque. Este programa se continuó en 1975 donde se realizaron algunos ensayos.

De modo similar se compilaron algunas acciones realizadas en las dunas en el trabajo de Castro (1987), en el cual se muestran intervenciones en los años 1972 y posteriormente desde 1982 en las dunas borderas cercanas a la línea de costa, los cuales constan de estructuras de ramas o quinchas. También se cerraron los corredores de deflación (separaciones de las dunas borderas originadas por el viento) con las mismas empalizadas, con la finalidad de aumentar la altura de la acumulación de estas, siguiendo también aumentando la elevación de las empalizadas.



Figura 65: Empalizadas en dunas borderas. 1980.
(Fuente: Castro, 1987)

En la actualidad, estas estructuras no existen, como se menciona en la memoria de Rojas (2008), y también se pudo visualizar en la campaña de muestreo realizada para la caracterización de los sedimentos.



Figura 66: Dunas borderas actuales (Diciembre 2011)
(Fuente: Elaboración Propia)

En el sector analizado en sus avances del campo dunar, existe un campo de arbustos con la finalidad de mitigar el transporte de estos sedimentos. Como se puede observar en la Figura 67, existe una línea árboles de gran altura que siguen la carretera de entrada a Quintero (F-210), la cual no se extiende completamente a lo largo de esta carretera.



Figura 67: Trampas actuales, Sector Norte.
(Fuente: Google Earth)

Como se pudo cuantificar que el campo dunar actualmente está en avance, estas trampas de arenas que se encuentran no son completamente efectivas o bajaron su rendimiento debido al constante aporte de sedimentos hacia la zona, por lo que se requiere un nuevo proyecto trampas de arenas.

Como recomendación para evitar un posible problema a futuro, se sugiere implementar en el sector del campo dunar la utilización en una gran densidad de *Ammophila Arenaria*, la cual se ha utilizado ya en trabajos como se mencionó anteriormente, la cual corresponde a una planta de origen extranjero, de tallos largos, capaz de retener los sedimentos y acumularlos, estabilizando los campos de dunas, con lo que se obtuvieron resultados adecuados.

Un posible desplazamiento para estas plantaciones es en la zona inmediata a la ruta F-210, abarcando un área aproximada de 658000 m² (Figura 68). La opción de utilizar esta planta viene al buen uso y resultados que se han obtenido en trabajos anteriores, con la cual se acumulan los sedimentos, lo que se puede apreciar en la Figura 14 de la Sección 3.1.3.

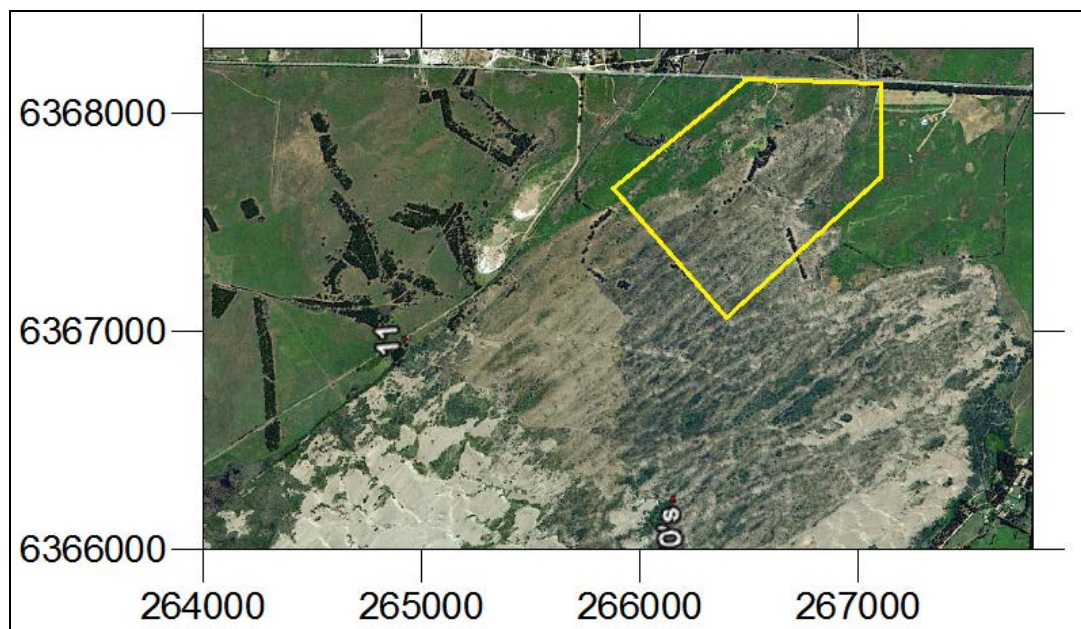


Figura 68: Área propuesta para plantación.
(Fuente: Elaboración Propia)

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se ha realizado un estudio y análisis del campo dunar de Ritoque, específicamente en el sector Norte de esta, de cuyos análisis y resultados se tienen las siguientes conclusiones y recomendaciones:

En cuanto a la caracterización del medio, en el sector de Punta Ángeles en Valparaíso, la dirección principal de los vientos proviene del 3° cuadrante. Los resultados obtenidos con los campos de vientos generados, muestran también que en toda el área del campo dunar de Ritoque los vientos provienen del SW principalmente, la cual tiene un gran potencial para transportar los sedimentos presentes en el campo.

El modelo de vientos utilizado para la descripción espacial, a pesar de no contar con suficiente medición temporal de vientos en los sectores de validación, ha sido una adecuada herramienta de caracterización de estos, ya que en el caso de la presente memoria de título, los vientos provenientes del SW en el sector entre Punta Ángeles y el campo dunar de Ritoque, no tienen accidentes topográficos que produzcan efectos que no puede simular este modelo. Su aplicación para la obtención de los campos de vientos medios ha sido crucial para el cálculo de caudales sólidos en el dominio del espacio. En general el modelo representa de modo apropiado la dinámica eólica todo el dominio analizado.

De las cuantificaciones de transporte eólico de sedimentos, se deduce de las 4 formulaciones utilizadas que en el sector Oeste del campo dunar se tienen tasas de transporte mayores a los que en el sector Noeste del campo dunar, por lo que como sistema se tiende a depositar los sedimentos que se encuentran en movimiento desde el lado Oeste del campo dunar. Comparando los resultados en el sector norte del campo dunar, se verificó que la formulación de Bagnold es la más adecuada para describir los transportes de sedimentos en este estudio. Los resultados de estos y sus tendencias son coincidentes con lo que ocurre en la realidad, lo que se ha demostrado con el análisis de fotografías aéreas y antecedentes de trabajos anteriores.

De acuerdo los análisis de las fotos aéreas históricas, el campo dunar en general tiene ciertos cambios en su línea límite, encontrándose en ciertos sectores avances, mientras que en otros se detectan retrocesos de esta, así como también una parte de degradación. En el sector norte de este campo, cercano a la carretera se ha encontrado un avance de este campo dunar en promedio de 1.12 m/año. Junto con esto, la duna propiamente en donde no se encuentra vegetación ha ido disminuyendo su extensión en la zona norte con mayor velocidad, lo que evidencia que existe realmente un mayor transporte de sedimentos como también no existe una alimentación de estos.

En cuanto a las proyecciones, para un periodo de entre 50 a 100 años, el sector norte del campo dunar de Ritoque estaría invadiendo significativamente el sector de la carretera como también áreas que se encuentran al Norte de esta, lo que puede provocar problemas a futuro.

En este proyecto de título, se utilizaron supuestos y aproximaciones que permitieron el desarrollo, realización y alcance de los objetivos generales y específicos que se plantearon inicialmente. En base a los datos y herramientas utilizadas junto con las metodologías realizadas y resultados obtenidos, se recomienda lo siguiente:

1. Realizar una campaña de mediciones de vientos en el sector norte del campo dunar de Ritoque de extensión mínima de un año, con la finalidad de obtener una mejor validación de la herramienta o metodología utilizada para obtener una validación más cercana a la realidad, o como también realizar mediciones de mayor extensión temporal para realizar la modelación del campo de viento con el input de vientos del mismo sector, obteniendo una caracterización de los campos de vientos medios mas cercanos a la realidad.
2. Realizar una medición del transporte de sedimentos en un lapso de tiempo dentro de las de vientos, esto para obtener una aproximación de las ecuaciones de las formulaciones que se utilicen para realizar un ajuste de estas a las mediciones. También hacer mediciones y estudio del caudal de sólido en situaciones de humedad tal como en lluvias.
3. Realizar una campaña de recolección de sedimentos, para así obtener curvas granulométricas en distintos sectores, y corroborar con datos la similitud de los sedimentos en las distintas áreas del campo dunar de Ritoque.
4. Realizar campañas de topografía mensuales, semestrales o anuales, con la finalidad de cuantificar las diferencias de volúmenes y así realizar una asociación entre estos datos junto con los caudales de sólidos.
5. Incluir un análisis mineralógico de distintos sectores del campo dunar, con la finalidad de aclarar aún más la componente dunar clara predomina al norte y es mayormente transportada al N por la corriente litoral de la costa y al NE posteriormente por el viento, mientras que la componente obscura predomina al sur.

Este proyecto de título podría ser considerado como una de las primeras aplicaciones de modelos de evolución aérea de campos de arena, de acuerdo a la revisión bibliográfica realizada, y previamente no se conoce una modelación en el tema.

7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ref. 1:** Ayuda del Software WAsP.
- Ref. 2:** Castro, C., 1987. *Transformaciones Geomorfológicas Recientes y Degradación de las dunas de Ritoque*. Revista de Geografía Norte Grande N° 14, pág. 3 – 13.
- Ref. 3:** Cuadrat, J.M. y Pita, M.P., 2000. *Climatología*. 2da Edición, Catedra Geografía.
- Ref. 4:** Departamento de Geofísica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 1993. *Informe Final Proyecto EOLO, Evaluación del Potencial Eólico Nacional*. Universidad de Chile, Santiago.
- Ref. 5:** Imagen de Internet disponible en la pagina web http://www.bapecquipmentstore.com/images/products/large_1220_Sand_Gaug_e.jpg [Accedido el día 14/6/2013].
- Ref. 6:** Mann, J. et al., 2000. *WAsP Engineering DK*. Risø National Laboratory, Dinamarca.
- Ref. 7:** Ministerio de Medio Ambiente, Dirección General de Costas, 2007. *Manual de Restauración de Dunas Costeras*. Gobierno de España.
- Ref. 8:** Okin G. S., 2008. *A new model of wind erosion in the presence of vegetation*. Journal of Geophysical Research, Vol. 113
- Ref. 9:** Pascoff, R. y Manriquez, H., 2004, *Las Dunas de las Costas de Chile*. Catedra, Instituto Geográfico Militar de Chile, Santiago. 2004.
- Ref. 10:** Peña, F. et al., 2008. *Morfología y dinámica dunaria en el borde costero de la Región de La Araucanía en Chile. Antecedentes para la conservación y gestión territorial*. Revista Geográfica Norte Grande N° 41
- Ref. 11:** Perillo, G., 2001. *Hacia una nomenclatura y clasificación de formas de fondo transversales generadas por flujos de agua*. Rev. Asociación Argentina de Sedimentología. Vol. 8, pág. 37 – 56.
- Ref. 12:** Perillo, G., 2003. *Dinámica del Transporte de Sedimentos*. Asociación Argentina de Sedimentología, Publicación Especial Nro. 2, La Plata.
- Ref. 13:** Petersen, E. et al., 1997. *Wind Power Meteorology*, Risø National Laboratory, Roskilde, Dinamarca.

- Ref. 14:** Quezada, M., 2007. *Estudio de Erosión Costera y Regeneración de Espacios Litorales. Una aplicación en playa El Papagayo, Quintero*. Universidad de Valparaíso.
- Ref. 15:** Rojas, G., 2008. *Caracterización Espacial y Temporal de las dunas de Ritoque, Quinta Región de Chile*. Universidad de Chile, Santiago
- Ref. 16:** Sørensen, M., 2004. *On the Rate of Aeolian Sand Transport*. Geomorphology, 59. University of Copenhagen. Copenhagen, Dinamarca.
- Ref. 17:** Troen, I., 1990. *A High Resolution Spectral Model for Flow in Complex Terrain*. Proceedings from the 9th Symposium on Turbulence and Diffusion, Roskilde, Dinamarca.
- Ref. 18:** U. S. Army Corps of Engineers., 2003. *Coastal Engineering Manual*. Volumen II, Capítulo 4 y Volumen III.
- Ref. 19:** Vergara, H., 2014. *Distribución de metales como la magnetita a lo largo de playas y del campo dunar*. (Reunión personal, 25 de marzo 2014).

8 ANEXOS

8.1 ANEXO A: CAMPOS DE VIENTOS

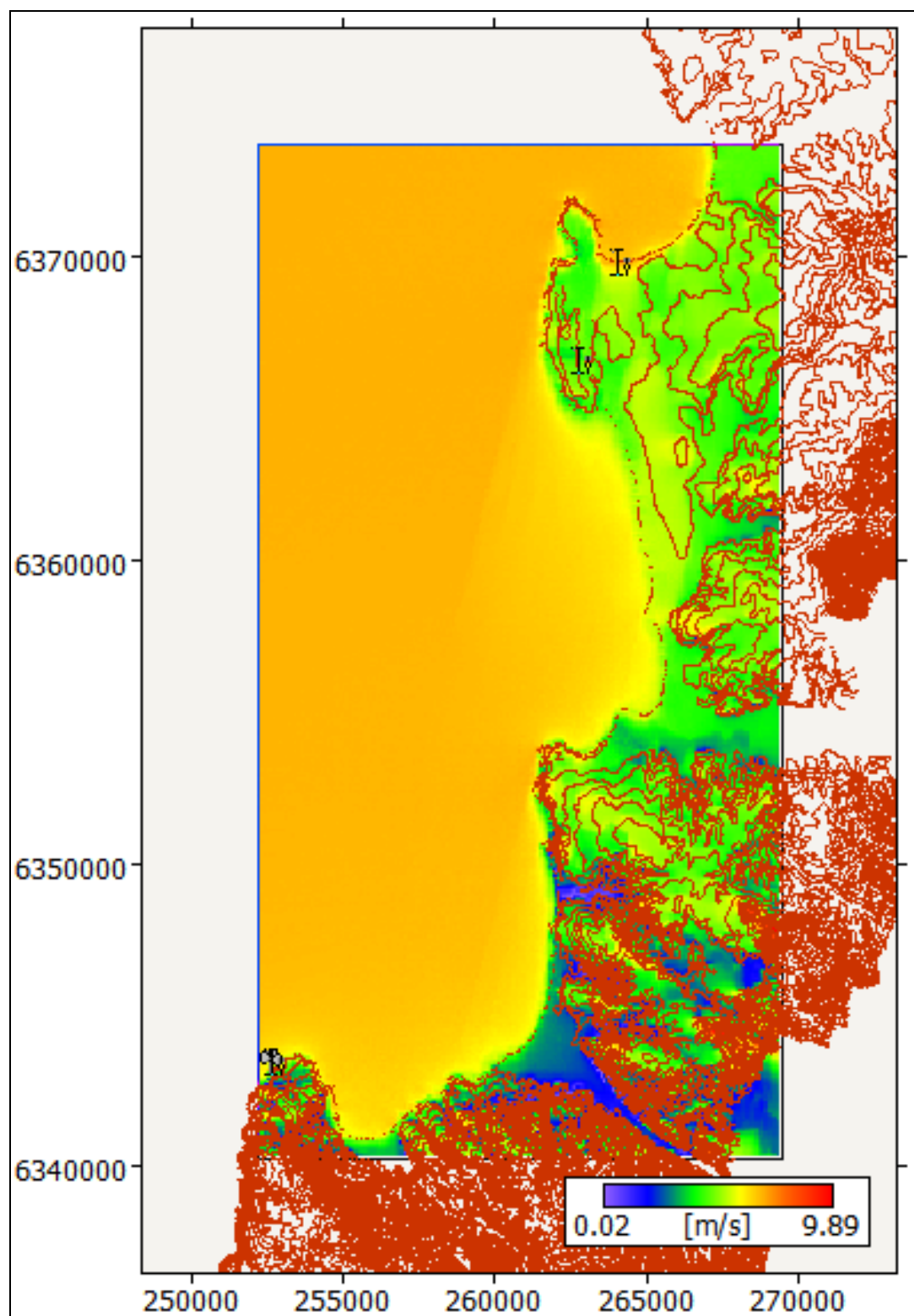


Figura 69: Campo de Vientos Medios, Dirección Norte.
(Fuente: Elaboración Propia)

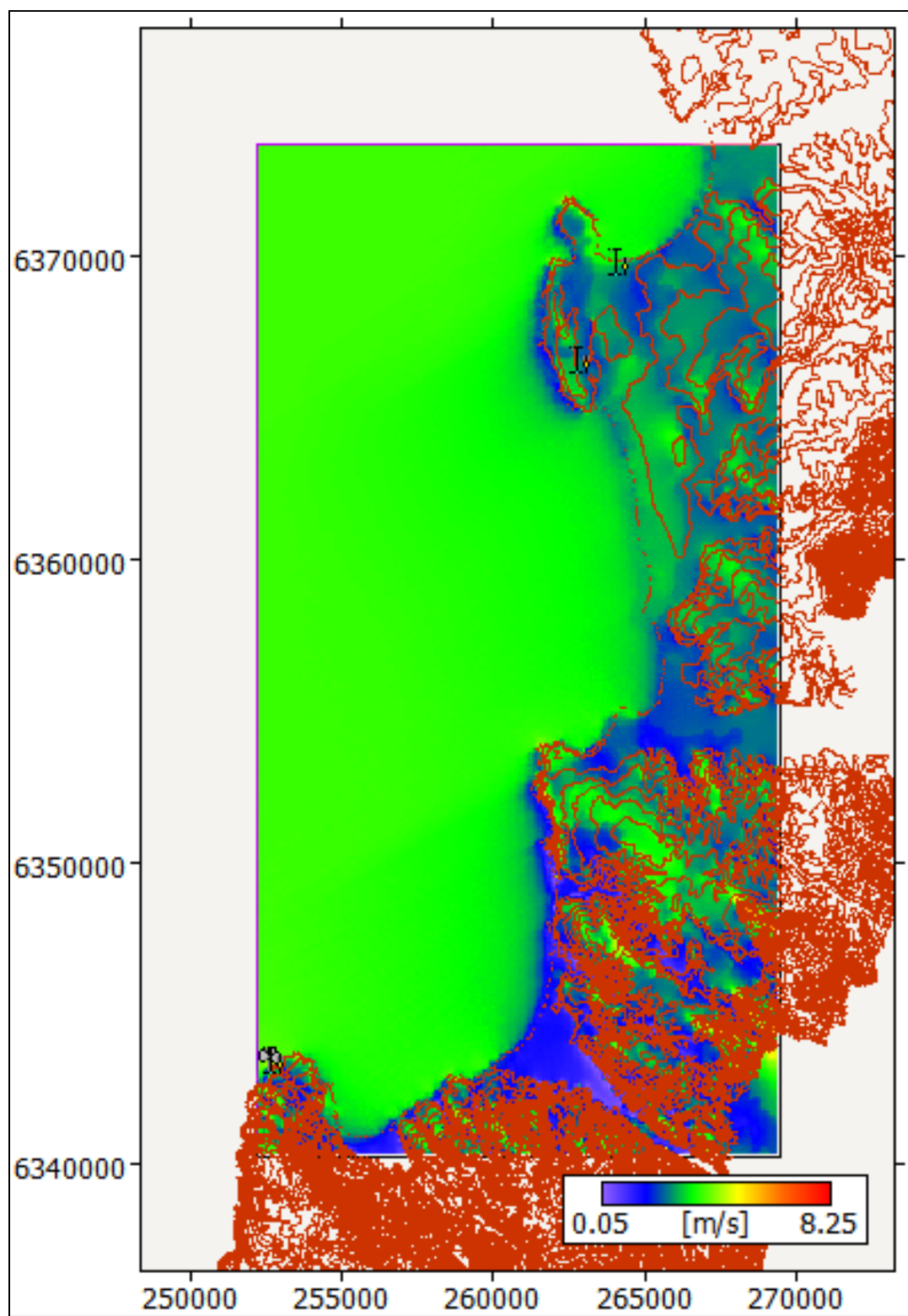


Figura 70: Campo de Vientos Medios, Dirección Noreste.
(Fuente: Elaboración Propia)

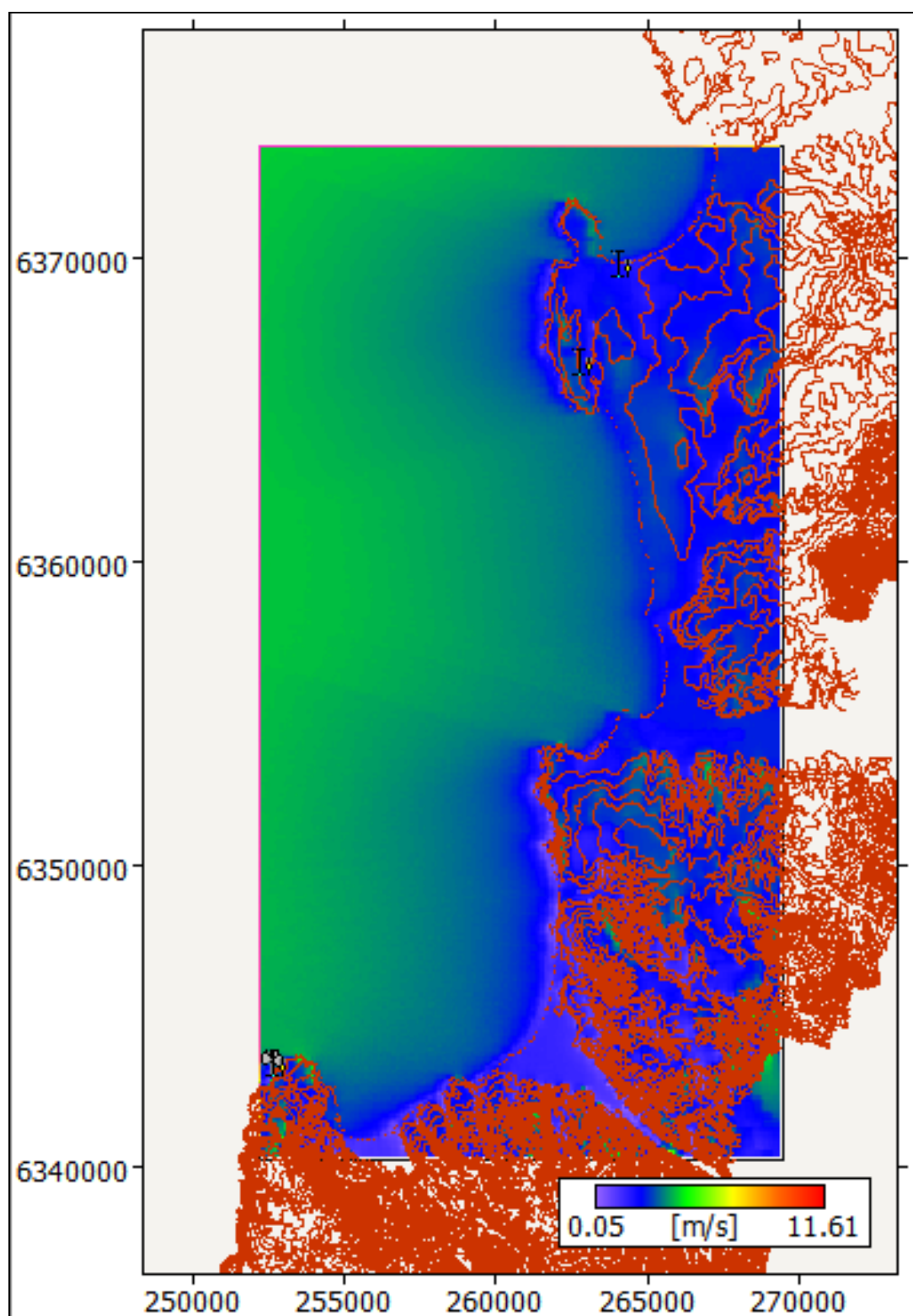


Figura 71: Campo de Vientos Medios, Dirección Este.
(Fuente: Elaboración Propia)

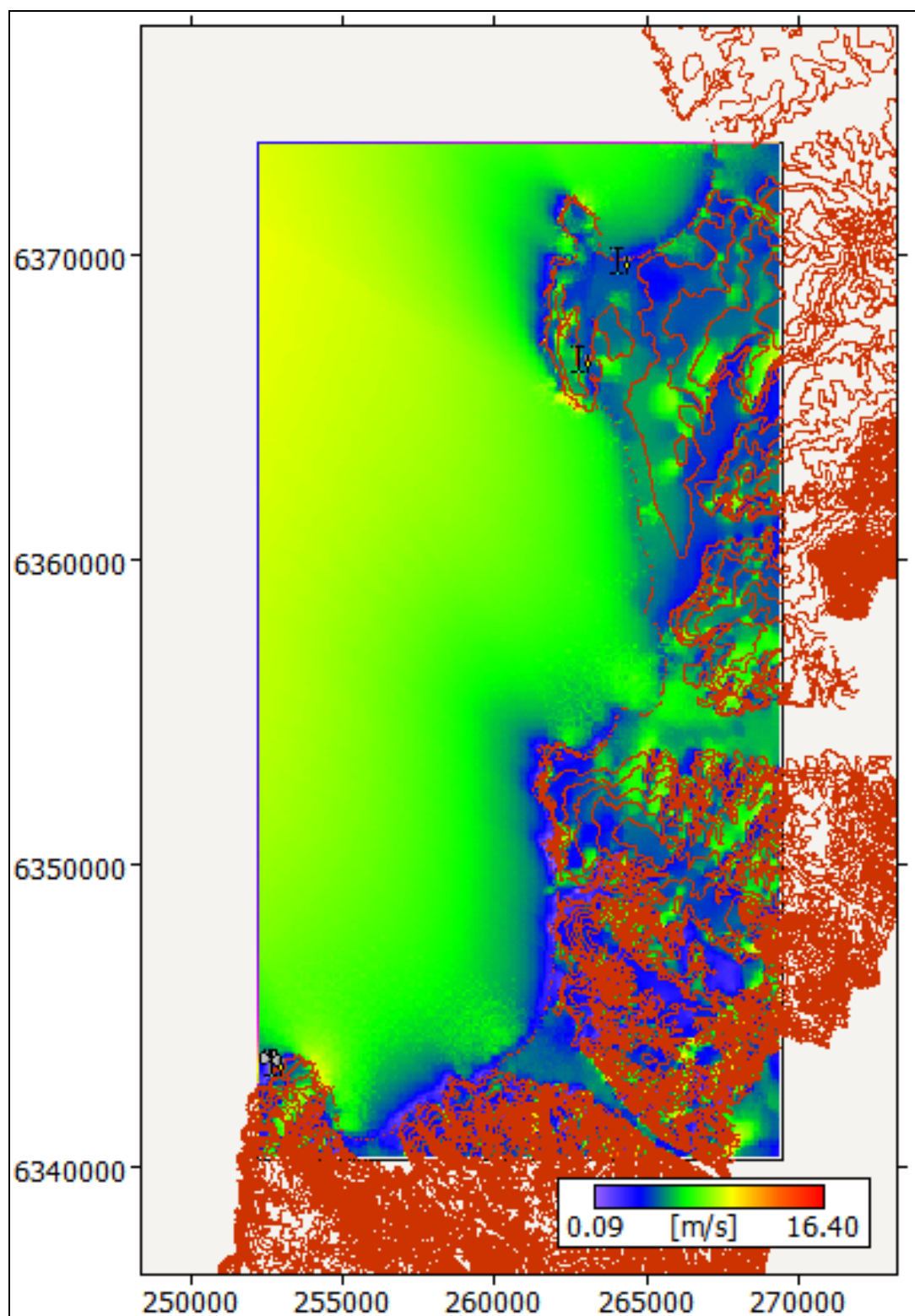


Figura 72: Campo de Vientos Medios, Dirección Sureste.
(Fuente: Elaboración Propia)

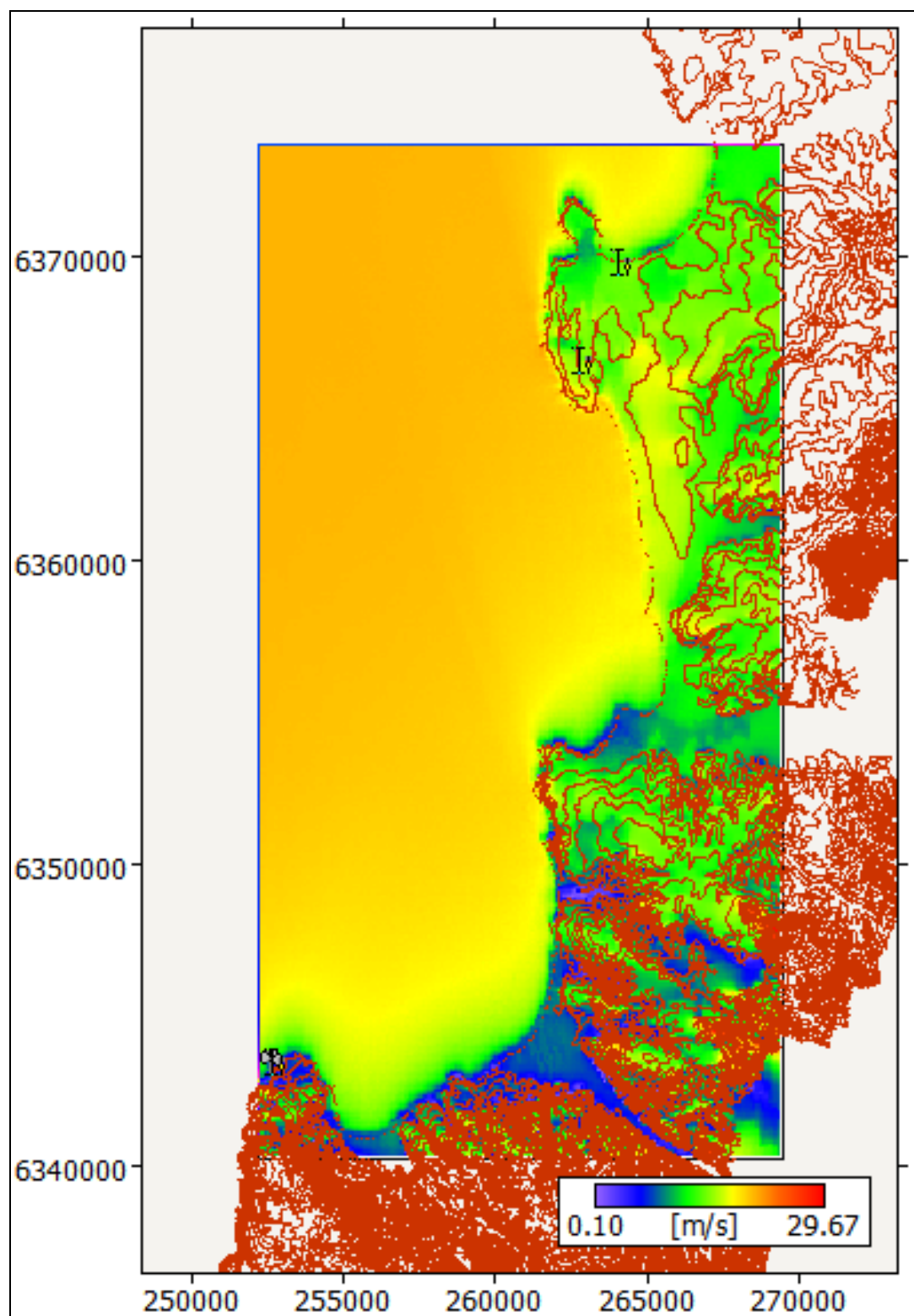


Figura 73: Campo de Vientos Medios, Dirección Sur.
(Fuente: Elaboración Propia)

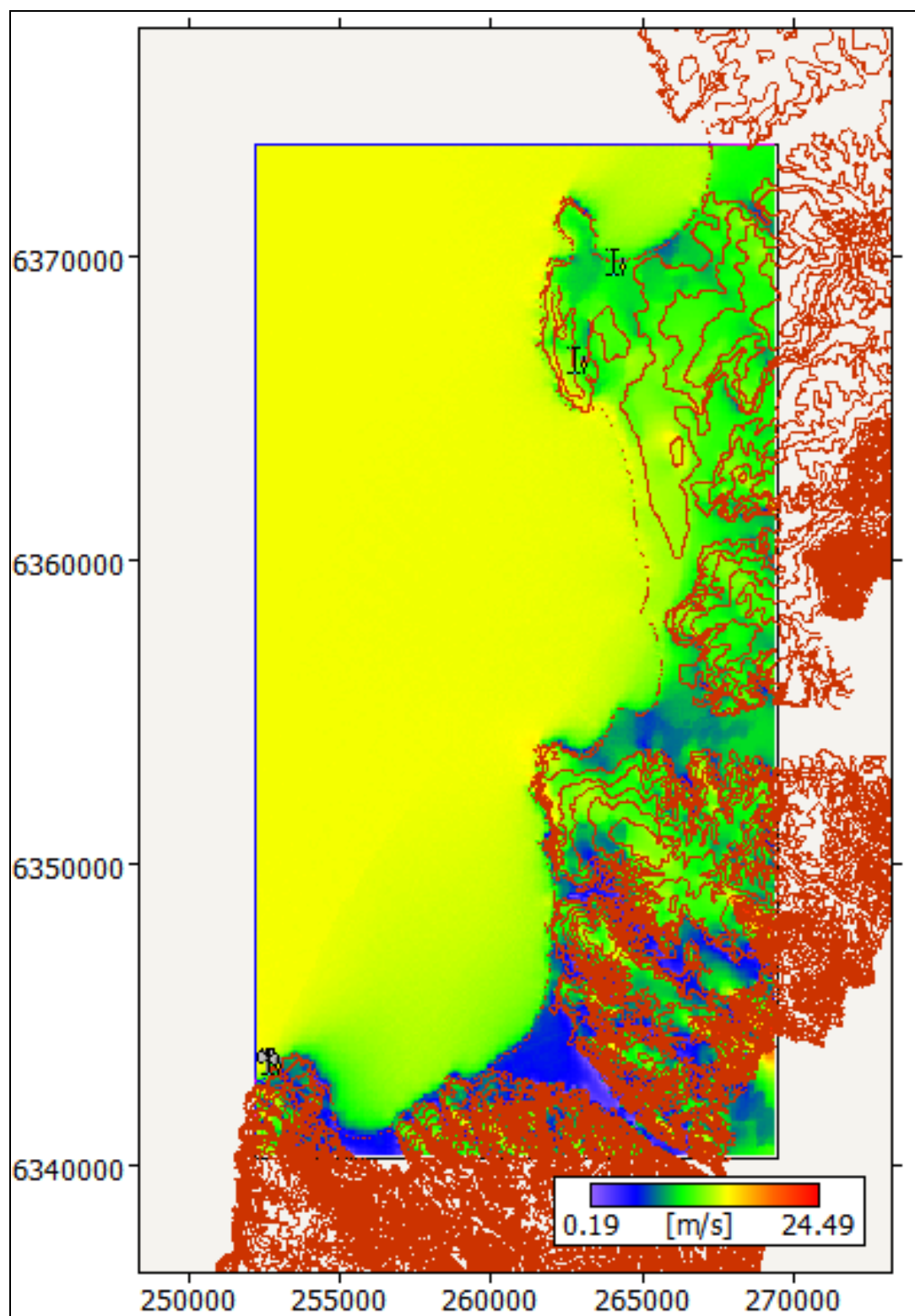


Figura 74: Campo de Vientos Medios, Dirección Suroeste.
(Fuente: Elaboración Propia)

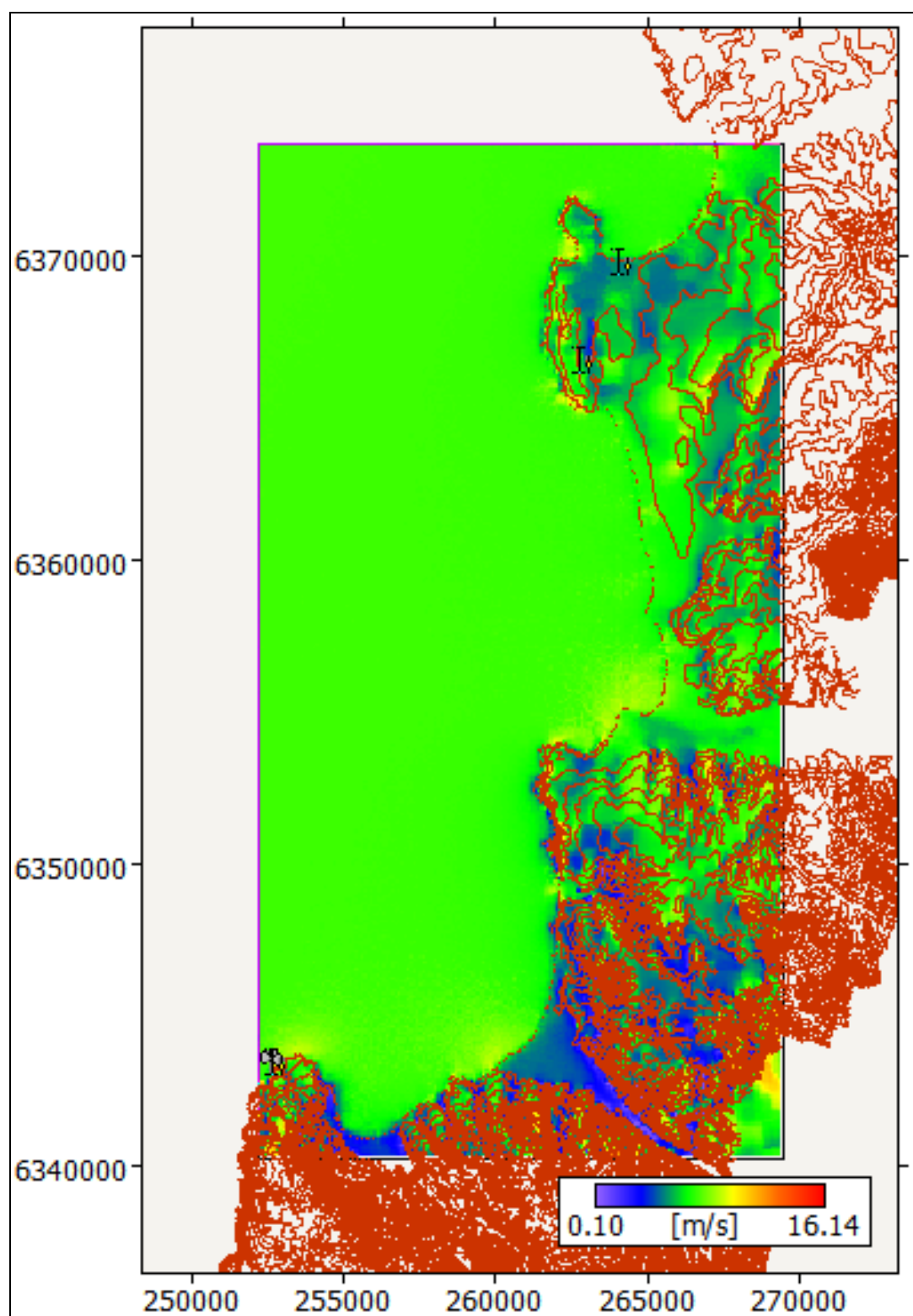


Figura 75: Campo de Vientos Medios, Dirección Oeste.
(Fuente: Elaboración Propia)

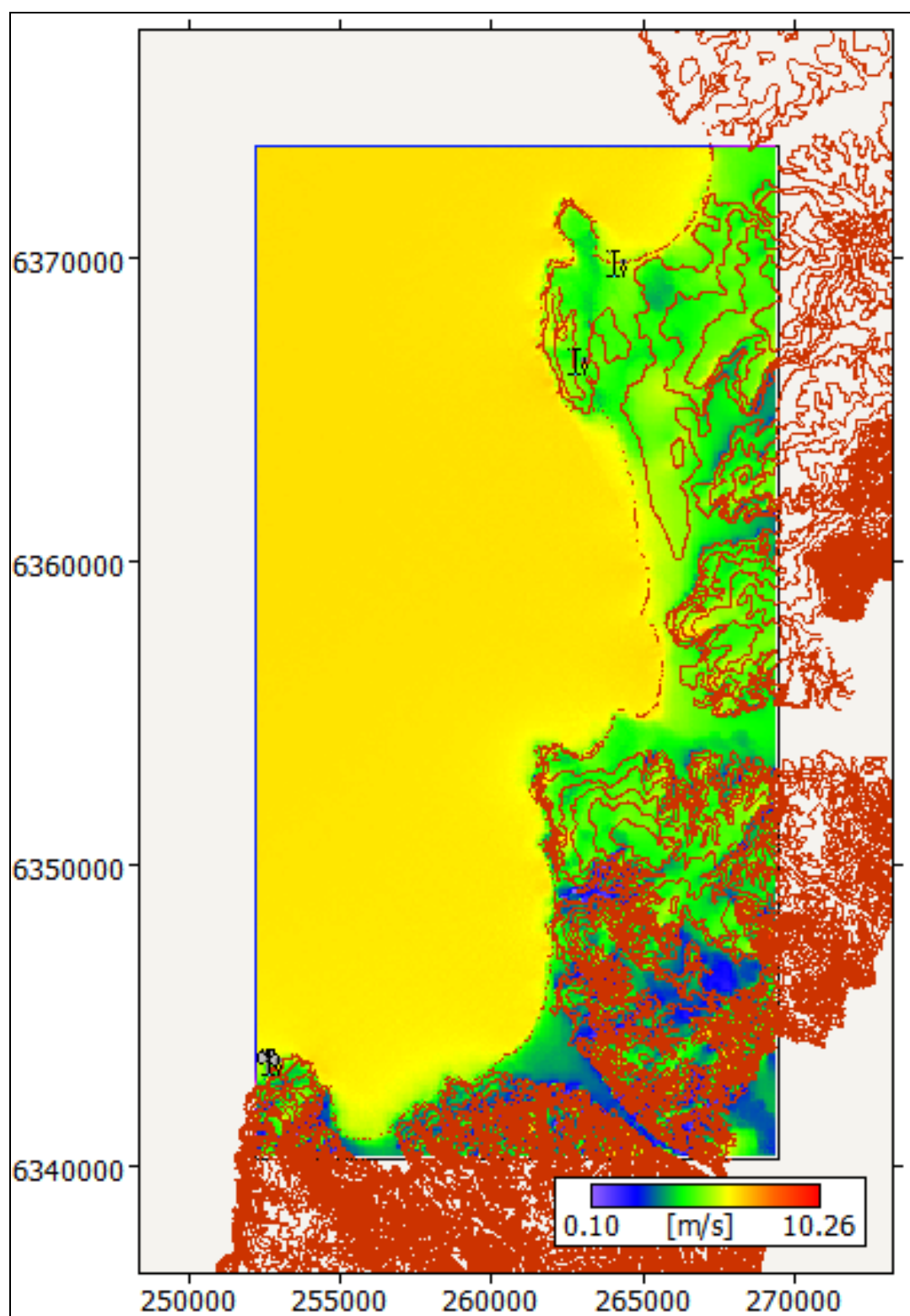


Figura 76: Campo de Vientos Medios, Dirección Noroeste.
(Fuente: Elaboración Propia)

8.2 ANEXO B: MODO DE CÁLCULO DE WASP Y WASP ENGINEERING

El modelo Wasp en general, está basado en el modelo LIMCOM. Ambos están basados en la linealización de las ecuaciones de movimiento y el uso de las transformadas de Fourier y del cálculo independiente de la velocidad de perturbaciones para cada vector de número de onda.

Las ecuaciones del movimiento linealizadas en sistema cartesiano para perturbaciones en un flujo neutral a un estado referenciado con velocidad del viento u_0 horizontal constante (independiente de la altura) leída:

$$\begin{aligned}u_0 \frac{\partial u}{\partial x} + v_0 \frac{\partial u}{\partial y} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_x}{\partial z} \\u_0 \frac{\partial v}{\partial x} + v_0 \frac{\partial v}{\partial y} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_y}{\partial z} \\u_0 \frac{\partial w}{\partial x} + v_0 \frac{\partial w}{\partial y} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_z}{\partial z} \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} &= 0\end{aligned}$$

A excepción de una capa delgada cerca de la superficie, las condiciones de estrés pueden dejarse de lado y la solución resultante para el flujo se vuelve idéntica a la solución para un fluido no viscoso.