

**MEJORÍA DEL CONOCIMIENTO Y  
ADMINISTRACIÓN DE LA INFORMACIÓN  
EÓLICA EN CHILE**  
SEGUNDA ETAPA

Preparado para la Comisión Nacional de Energía  
**C N E**



**INFORME FINAL**

Unidad ejecutante  
Centro de Estudio de los Recursos Energéticos  
de la  
UNIVERSIDAD DE MAGALLANES

**C E R E - U M A G**



**Punta Arenas, Chile  
Mayo 2005**

## Agradecimientos

Quienes tuvieron la responsabilidad de desarrollar este estudio, no pueden dejar de expresar su sincero agradecimiento a todos los que amablemente nos hicieron entrega de información meteorológica.

Así, queremos agradecer a la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CENMA) y a su representante el Sr. Marcelo Araya Mendoza quien se preocupó de entregar la base de datos de toda la red de estaciones disponibles.

También debemos agradecer a la Dirección Meteorológica de Chile (DMC) y a su Directora Subrogante la Sra. Myrna Araneda Fuentes y en particular a los señores meteorólogos Jorge Carreño Campos y Juan Quintana Arena, por procesar y entregar resultados que fueron incluidos en este proyecto.

Queremos agradecer a las siguientes empresas que aportaron datos para este estudio, y en especial a las siguientes personas: Empresa CODELCO, el Sr. Francisco Montané; Empresa SERPRAM S.A. al Sr. Claudio Simian y Empresa Nacional del Petróleo, Refinería Bio Bio S. A., al Sr. Fernando Díaz.

Además nuestros sinceros agradecimientos a las siguientes Instituciones y a sus representantes que cooperaron enviando información: INIA Remehue Osorno al Sr. Aldo Valdebenito Burgos; el Observatorio Geodésico TIGO de la Universidad de Concepción y a su director el Sr. Armin Böer.

Finalmente, queremos agradecer al Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile por facilitarnos datos, en especial a los señores Manuel Martínez y Ricardo Muñoz.

## **INDICE**

LISTADO DE FIGURAS .....	V
LISTADO DE TABLAS.....	V
<b><u>[1] INTRODUCCIÓN .....</u></b>	<b><u>5</u></b>
<b><u>[2] CONSIDERACIONES EN EL CONOCIMIENTO DEL RECURSO EÓLICO .....</u></b>	<b><u>7</u></b>
<b>2.1 FUERZAS DETERMINANTES DE LA DIRECCIÓN Y LA VELOCIDAD DEL VIENTO.....</b>	<b>8</b>
FUERZA DE LAS VARIACIONES DE PRESIÓN .....	8
EFFECTO DE LA ROTACIÓN TERRESTRE O DE CORIOLIS .....	10
FRICCIÓN .....	11
<b>2.2 VARIACION VERTICAL .....</b>	<b>11</b>
EL VIENTO EN LAS CAPAS DE AIRE INMEDIATAS A LA SUPERFICIE .....	12
<b>2.3 REGIONES OROGRAFICAS Y SUS INFLUENCIAS CLIMATICAS .....</b>	<b>15</b>
<b>2.4 PROSPECCION EOLICA.....</b>	<b>17</b>
2.4.1 IDENTIFICACION PRELIMINAR DE ZONAS .....	17
2.4.2 EVALUACION DEL RECURSO EOLICO .....	18
2.4.3 MICRO-LOCALIZACION .....	18
2.4.4 DENSIDAD DE POTENCIA EOLICA Y CATEGORIAS DE POTENCIAL EOLICO .....	18
<b><u>[3] ASPECTOS METODOLOGICOS DEL ESTUDIO.....</u></b>	<b><u>20</u></b>
<b><u>[4] ESTIMACIÓN DEL RECURSO EÓLICO OBSERVADO EN REGIONES METROPOLITANA – X<sup>A</sup> REGIÓN.....</u></b>	<b><u>22</u></b>
4.1 ESTACIONES CON DATOS DE VIENTO .....	23
4.2 METODOLOGÍA DE ANÁLISIS.....	25
4.3 RESULTADOS .....	35
<b><u>[5] MODELACIÓN DEL RECURSO EÓLICO EN LA IV REGIÓN.....</u></b>	<b><u>39</u></b>
5.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO.....	39
5.2 INICIALIZACION DE METPHOMOD .....	42
5.3 RESULTADOS .....	46
<b><u>[6] OTROS RESULTADOS DEL ESTUDIO .....</u></b>	<b><u>63</u></b>
<b><u>[7] DISCUSION Y SUGERENCIAS.....</u></b>	<b><u>67</u></b>

<b>[8] CONCLUSIONES .....</b>	<b>69</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>72</b>
<b>(A1) MODELOS DIGITALES DE TERRENO EN TORNO A ESTACIONES.....</b>	<b>72</b>
<b>(A2) PARAMETROS BASICOS ESTACIONES.....</b>	<b>72</b>
<b>(A3) REPORTES DETALLADOS DE RESULTADOS.....</b>	<b>72</b>
<b>(A4) SIG EOLICO Y VISUALIZADOR TIPO SIG.....</b>	<b>72</b>
<b>(A5) ARCHIVOS DIGITALES CON TODOS LOS RESULTADOS DEL ESTUDIO.....</b>	<b>72</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>73</b>

## **ACLARACION**

Este informe fue preparado por encargo de la Comisión Nacional de Energía. Sin perjuicio de ello, las conclusiones, opiniones y recomendaciones de los autores no necesariamente reflejan la posición del Gobierno de Chile. De igual forma, cualquier referencia a una empresa, producto, marca, fabricante u otro similar no constituye en ningún caso una recomendación por parte del Gobierno de Chile.

## LISTADO DE FIGURAS

Figura 2.1: La rosa de los vientos	7
Figura 2.2: Carta sinóptica de Sudamérica	9
Figura 2.3 Efecto de Coriolis en el hemisferio sur	10
Figura 2.4: Las brisas costeras	13
Figura 2.5: Vientos de valles y montañas	14
Figura 2.6: Topografía de Chile	15
Figura 4.1 Localización de Estaciones en Regiones de estudio	28
Figura 4.2 Localización de Estaciones en Región Metropolitana	29
Figura 4.3 Localización de Estaciones en Región Libertador General Bernardo O'higgins VI	30
Figura 4.4 Localización de Estaciones en Región del Maule VII	31
Figura 4.5 Localización de Estaciones en Región del Bío Bío VIII	32
Figura 4.6 Localización de Estaciones en Región de la Araucanía IX	33
Figura 4.7 Localización de Estaciones en Región de Los Lagos X	34
Figura 5.1: Tiempo requerido para alcanzar estado estacionario	43
Figura 5.2 Modelación basada en Kalthoff et al. (2003)	47
Figura 5.3 Modelo Digital de Terreno del dominio de Modelación (70 km x 70 km)	48
Figura 5.4 Velocidad media del viento para Enero 2003 a 50 metros	49
Figura 5.5 Desviación standard media del viento para Enero 2003 a 50 metros	50
Figura 5.6 Velocidad media del viento para Abril 2003 a 50 metros	51
Figura 5.7 Desviación standard media del viento para Abril 2003 a 50 metros	52
Figura 5.8 Velocidad media del viento para Julio 2003 a 50 metros	53
Figura 5.9 Desviación standard media del viento para Julio 2003 a 50 metros	54
Figura 5.10 Velocidad media del viento para Septiembre 2003 a 50 metros	55
Figura 5.11 Desviación standard media del viento para Septiembre 2003 a 50 metros	56
Figura 5.12 Velocidad Promedio Horario (m/s) a 50 metros mes de Enero	57
Figura 5.15 Velocidad Promedio Horario (m/s) a 50 metros mes de Julio	60
Figura 7.1 Evaluación global del potencial eólico	64
Figura 7.2 Promedio anual escaterómetro (1999-2002)	65
Figura 7.3 Promedio mensuales escaterómetro (1999-2002)	66

## LISTADO DE TABLAS

Tabla 4.1 Contactos establecidos en la Zona de Estudio	23
Tabla 4.2 Estaciones con información de Viento en zona de estudio	24
Tabla 4.3 Distribución de estaciones por región	26
Tabla 4.4 Parámetros de cálculo de estaciones	36
Tabla 4.5 Resultados de cálculo de las estaciones a 50 metros sobre el nivel del suelo	37
Tabla 4.6 Estaciones de la DMC con información de Viento	38

## **[1] INTRODUCCIÓN**

El presente documento corresponde al Informe Final del Estudio “Mejoramiento del conocimiento y administración de la información eólica en Chile, segunda etapa” realizado por el Centro de Estudio de los Recursos Energéticos (CERE) de la Universidad de Magallanes.

En concordancia con sus funciones, la Comisión Nacional de Energía (CNE) se encuentra analizando el desarrollo probable de las energías renovables no convencionales y su potencial contribución a los objetivos de seguridad de suministro y sustentabilidad ambiental de la política energética nacional.

Este estudio se enmarca en esa línea de trabajo, mediante la mejoría del diagnóstico del potencial eólico del país, específicamente con miras a su aprovechamiento para generación eléctrica conectada a los principales sistemas eléctricos del país.

Por la complejidad y la gran cantidad de información de base que se requiere para ese tipo de análisis, no se pretende que el estudio de una respuesta definitiva sobre la materia, más bien, se espera avanzar en una caracterización de mayor detalle para el país, mediante la recopilación y procesamiento de la información del recurso eólico generada por diversas instituciones. Lo anterior con miras a detectar sectores, a través de un análisis comparativo, en los cuales resulte atractivo realizar estudios más detallados del potencial eólico.

En el presente estudio se recopiló información para una zona comprendida entre las regiones Metropolitana a Décima, la cual se encuentra localizada en el área cubierta por el principal sistema eléctrico de Chile, el Sistema Interconectado Central (SIC). De esta forma, mediante el presente estudio se pretende complementar la información recopilada en un trabajo previo que se concentró en las regiones III, IV y V y contar con una sistematización de la información de acceso público en toda el área cubierta por el SIC.

Adicionalmente, como resultado de estudios previos, CNE cuenta con una base de datos de información meteorológica que se vio incrementada con la información recopilada en el presente trabajo, la cual se encontraba en un formato que dificultaba su administración y traspaso. Esta información fue uniformada y se implementó un Sistema de Información Geográfica (SIG) que facilita en gran medida el acceso a estos datos y se estima será de gran utilidad para centros de investigación y para potenciales inversionistas en energía eólica. Además se desarrolló un sitio Web para visualizar los resultados de este estudio, el cual también contribuye a eliminar la barrera de acceso a información básica que limita

el desarrollo de las energías renovables no convencionales en Chile. En resumen, se implementaron medidas que permiten un traspaso operativo y flexible de la información a los potenciales usuarios de ella.

De acuerdo al convenio, el objetivo principal del Estudio ha sido mejorar la sistematización del conocimiento del potencial del recurso eólico entre las regiones Metropolitana y Décima del país y contar con un sistema de información para la administración y difusión pública de la información eólica.

El cumplimiento del objetivo principal se ha efectuado a través de la concreción de los siguientes objetivos específicos:

- 1) Contar con una estimación del recurso eólico observado en la zona centro y sur del sistema interconectado central, Regiones Metropolitana a la Décima
- 2) Contar con un sistema de información georreferenciado para administrar la información del recurso eólico disponible en CNE
- 3) Contar con el diseño de un sitio Web que permita el traspaso de la información eólica disponible en CNE a los interesados
- 4) Contar con un documento de síntesis de los resultados obtenidos, que pueda ser publicado para efectos de información de potenciales inversionistas y del público en general.

## [2] CONSIDERACIONES EN EL CONOCIMIENTO DEL RECURSO EÓLICO

- Cómo se produce el viento?
- Regiones orográficas y sus influencias climáticas
- Prospección eólica

El viento se define como el movimiento horizontal del aire. El viento se mide a partir de dos magnitudes: su dirección y su intensidad. La dirección corresponde al punto desde el cual sopla el viento (un viento del W es un viento que viene del W y va hacia el E) y se expresa a partir de las direcciones recogidas en la rosa de los vientos, o bien en grados, medidos sobre un círculo graduado en el sentido de giro de las agujas del reloj tomando como origen la dirección Norte. Convencionalmente, a la dirección Norte se le asigna el valor  $360^\circ$  (véase figura 2.1)

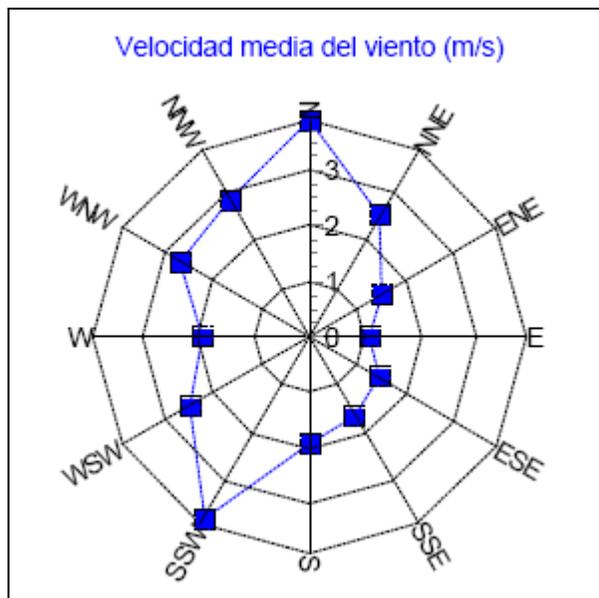


Figura 2.1: La rosa de los vientos

La intensidad expresa la velocidad del viento y se mide en unidades de velocidad tales como los m/seg, los km/h o los nudos. Tanto en la dirección como en la velocidad del viento, nunca se consiguen los valores instantáneos registrados por las magnitudes, sino valores medios de un período de varios minutos (normalmente diez). La razón de ello estriba en las continuas fluctuaciones que el viento experimenta por el hecho de ser un flujo turbulento y no laminar.

## 2.1 FUERZAS DETERMINANTES DE LA DIRECCIÓN Y LA VELOCIDAD DEL VIENTO

Todo cuerpo que se pone en movimiento lo hace en respuesta a una fuerza que lo impulsa, dado que, con arreglo a la ley de Newton, si un cuerpo está en reposo permanecerá en reposo hasta que una fuerza se ejerza sobre él. Cuando no hay una sola fuerza impulsora, sino varias, el movimiento dependerá de la composición de todas estas fuerzas en su conjunto; obedecerá en suma, a la fuerza resultante total.

En la génesis del viento intervienen cuatro fuerzas impulsoras fundamentales: la fuerza del gradiente de presión, la fuerza de Coriolis, la fuerza de rozamiento terrestre y la fuerza centrífuga, actuando esta última sólo en el caso de trayectorias curvas (Cuadrat & Pita, 2000)

### FUERZA DE LAS VARIACIONES DE PRESIÓN.

Por las leyes de la dinámica de Newton, las causas que producen el movimiento son las fuerzas. Las variaciones de presión producen una fuerza, llamada **fuerza del gradiente de presión**, que contribuye a la formación del viento. Cuando una masa de aire es sometida a una mayor presión a un lado que al otro, el desbalance produce una fuerza dirigida desde la zona de alta presión a la de baja presión en forma perpendicular a las isobaras, cruzándolas en ángulo recto. Esta diferencia de presión entre las altas y las bajas presiones, produce el viento, y mientras mayor es la diferencia entre dos lugares, mayor es el viento en esa región.

Se llaman **isobaras** a las líneas que unen puntos de igual presión, similares a las isotermas. Los datos de presión en superficie se dibujan por medio de isobaras sobre mapas, cuyo resultado se llama **carta de tiempo**, **carta sinóptica** o **carta de presión**. La separación entre las isobaras indica las variaciones de presión sobre el mapa, a estas variaciones de presión se le llama **gradiente de presión**. En el mapa, donde los isobaras están más juntas, indican un gradiente de presión grande que produce vientos más fuertes, y donde los isobaras están más separadas, el gradiente de presión es más pequeño y el viento es más débil.

En la figura 2.2 se observan las isobaras en una carta sinóptica de Sudamérica, para un día representativo de una situación meteorológica cualquiera, obtenida con valores reales de presión en superficie. Las líneas en tonos verde a violeta representan áreas de bajas presiones y las de tono amarillo a rojo altas presiones. Del mapa se puede destacar, por ejemplo frente a la zona central de Chile, un centro de baja presión (asociado al cinturón de bajas presiones subpolares) centrado en 35° S, 75° W, con valores inferiores a 1006 hPa, con un fuerte gradiente de presión como se puede ver por el agrupamiento

de isobaras en esa zona, lo que indica que los vientos son muy intensos en esa zona, y sobre el Pacífico, un centro de alta presión (conocido como anticiclón del Pacífico sur) centrado en torno a los 30° S, 100° W, con valores superiores a los 1025 hPa, con un gradiente de presión mas débil, indicativo de vientos leves en esa área.

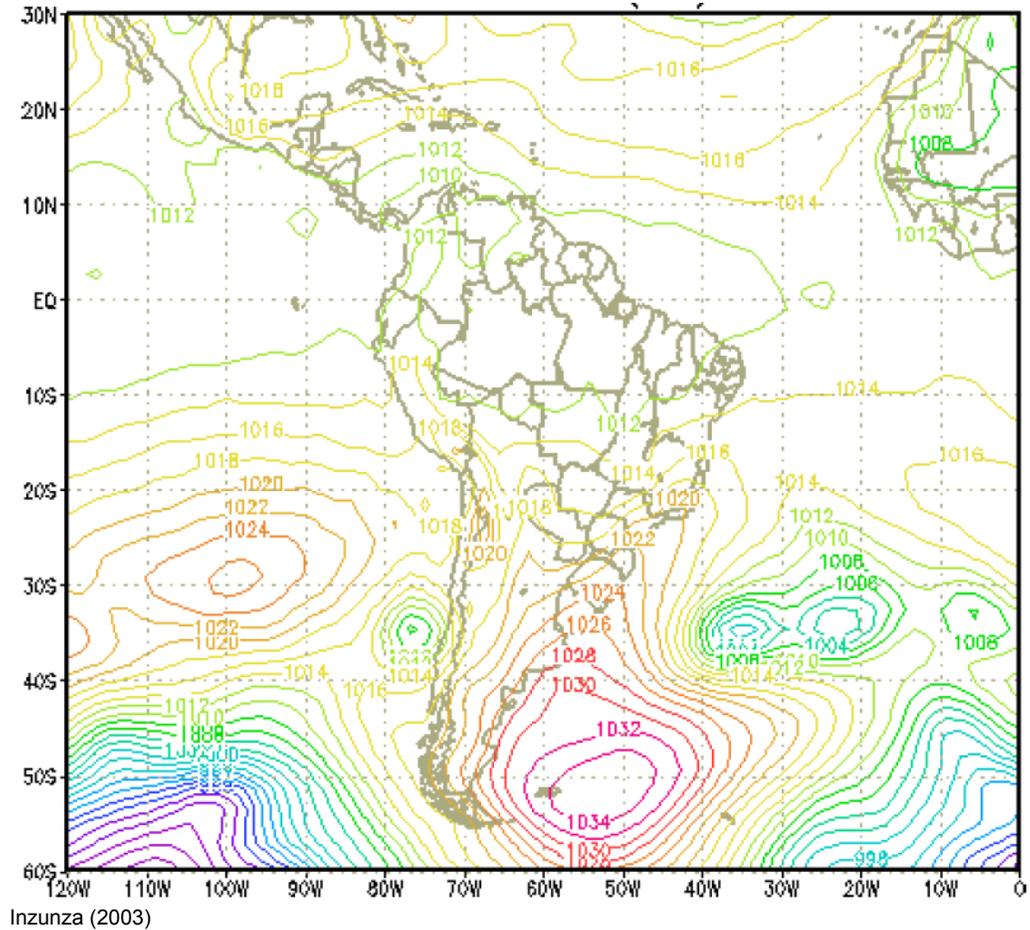


Figura 2.2: Carta sinóptica de Sudamérica

## EFFECTO DE LA ROTACIÓN TERRESTRE O DE CORIOLIS.

Si bien la fuerza del gradiente de presión está dirigida desde las altas a bajas presiones, perpendicular a las isobaras, el viento no cruza las isobaras en ángulo recto, sino que se produce una desviación del viento debido a la rotación de la Tierra. A esta desviación se le llama **efecto de Coriolis**, nombre puesto en honor de Gaspard de Coriolis (1792 – 1843), quién fue un ingeniero francés, que derivó las ecuaciones de movimiento de los cuerpos sobre un sistema de referencia en rotación, como la Tierra.

El efecto de Coriolis describe como todo objeto que se mueve libremente sobre la superficie terrestre, incluido el aire y las aguas, se desvía a causa de la rotación terrestre hacia la izquierda de su movimiento en el hemisferio sur y hacia la derecha en el hemisferio norte. La dirección de la **fuerza de Coriolis** tiene una gran componente apuntando en sentido opuesto a la fuerza de presión. Esto produce que la dirección del movimiento del aire sea no cruzando las isobaras, sino que aproximadamente paralelo a ellas. Si un observador en tierra se ubica mirando en la dirección hacia donde se mueve el aire, en el hemisferio sur las altas presiones quedan a la izquierda del observador y las bajas presiones a la derecha; en el hemisferio norte la situación es opuesta.

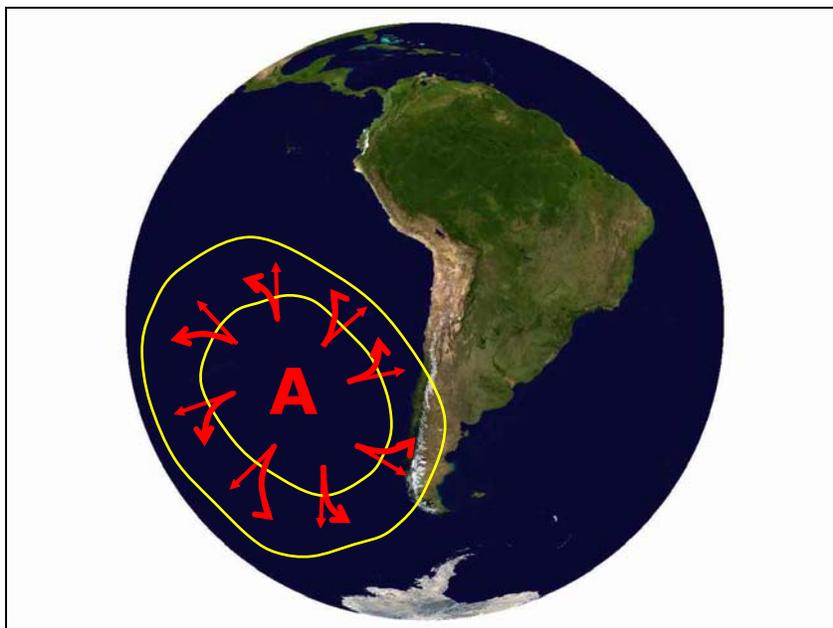


Figura 2.3 Efecto de Coriolis en el hemisferio sur

La magnitud de la desviación producida por la fuerza de Coriolis tiene las siguientes características: (1) depende de la latitud, disminuye desde los polos, donde es máxima, hacia el Ecuador donde se anula y no se produce desviación, (2) siempre está dirigida perpendicular a la dirección del flujo, (3) afecta sólo a la dirección del flujo, no su rapidez y (4) es proporcional a la rapidez del viento.

Finalmente, cabe destacar que la interacción entre el gradiente de presión y la fuerza de Coriolis da origen al viento geostrófico. Este es un viento que circula por los canales isobáricos y que se aproxima al viento real en niveles bajos de la tropósfera (cerca de la superficie terrestre), debido principalmente a las fuerzas de fricción del terreno.

## **FRICCIÓN**

La fuerza de presión acelera el flujo desde las altas a las bajas presiones y la de Coriolis lo desvía en dirección de las isobaras. Pero la rapidez del viento no aumenta continuamente, por lo que debe existir otra fuerza que haga mantener aproximadamente constante la rapidez del viento y por lo tanto que se oponga a la fuerza de presión. De nuestra experiencia diaria, sabemos que si a un objeto en movimiento sobre una superficie se lo deja libre, después de un tiempo se detiene. Lo que produce esa detención es lo que llamamos fuerza de fricción o de roce.

El efecto de la fricción en superficie es disminuir la rapidez del viento y desviar el movimiento del aire a través de las isobaras, hacia el área de bajas presiones. El grado de irregularidad del terreno determina el ángulo que se desvía el viento respecto a las isobaras, como también la magnitud de su disminución. Sobre los océanos relativamente llanos, la fricción es pequeña y el aire se desvía entre  $10^\circ$  a  $20^\circ$  respecto a las isobaras y su rapidez disminuye aproximadamente a  $2/3$  respecto de su valor si no hubiese roce. Sobre terrenos muy irregulares donde la fricción es grande, el viento se puede desviar hasta en  $45^\circ$  y su rapidez reducirse hasta en un 50%. Este efecto de la fricción es especialmente importante cuando se considera el movimiento del aire alrededor de los centros de altas y bajas presiones en superficie. El aire en movimiento es afectado por la irregularidad de la superficie terrestre, que produce el roce con el aire, pero a medida que ascendemos en la vertical, disminuye el efecto del roce. A alturas superiores a 1.0 – 1.5 km, el viento ya no es afectado por la fricción, soplando aproximadamente paralelo a las isobaras.

## **2.2 VARIACION VERTICAL**

De modo general puede afirmarse que el viento se intensifica con la altura por dos razones básicas: en primer lugar, por el proceso de disminución de la

densidad del aire que se registra al subir, lo cual contribuye a que aumente la fuerza del gradiente; en segundo lugar, por la disminución de la fuerza de rozamiento terrestre. Además, complementando lo señalado se puede indicar que el viento aumenta con la altura (cizalle vertical del viento) debido a las diferencias horizontales de temperatura, también llamado viento térmico.

## **EL VIENTO EN LAS CAPAS DE AIRE INMEDIATAS A LA SUPERFICIE**

En estas capas de aire la fuerza de rozamiento adquiere tal relevancia que los vientos, además de reducir en gran medida su velocidad, suelen fluir guiados por la fuerza del gradiente, lo que se traduce en la existencia de vientos perpendiculares a las isobaras y orientados desde las altas a las bajas presiones.

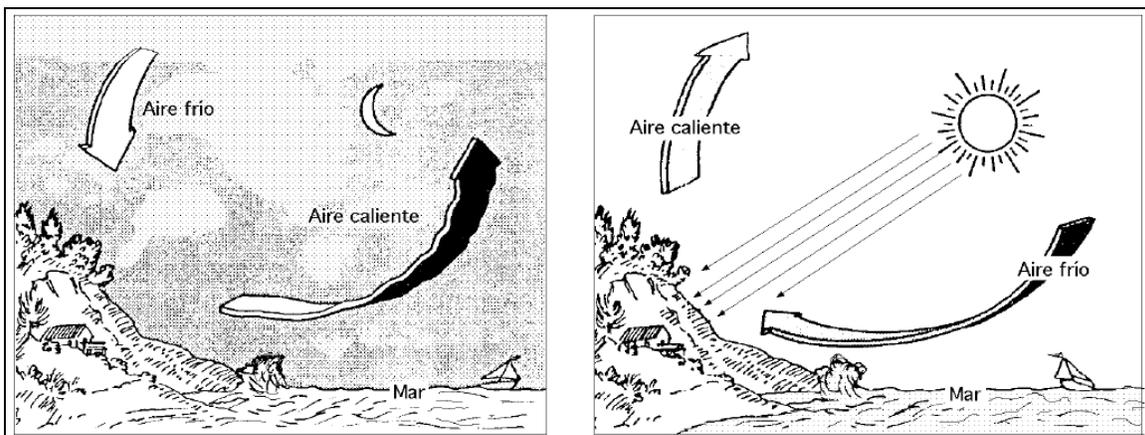
Pero a esta modificación general cabe añadir las modificaciones derivadas de hechos importantes: por un lado, la aparición de distribuciones isobáricas específicas originadas por fenómenos térmicos de escala local derivados de la naturaleza de la superficie y, por otro lado, el efecto ejercido por los obstáculos que se oponen localmente al viento. Entre los primeros destacan las circulaciones térmicas que se originan a lo largo de las líneas de costa o entre valles y laderas de una cadena montañosa. Entre los segundos merecen destacarse las modificaciones impuestas en el viento cuando atraviesa una cadena de montañas o cuando experimenta un proceso de encajamiento en un valle.

### **a) Las brisas costeras**

En diferente comportamiento térmico existente entre el mar y la tierra determina que en las líneas de costa se generen habitualmente diferencias de temperatura muy acusadas: durante el día la tierra se recalienta mucho más que el mar, en tanto que por la noche el mar conserva su calor mucho más que la tierra. Estas diferencias térmicas originan diferencias de densidad que propician la aparición de circulaciones del aire a las que se denomina circulaciones térmicas.

Durante el día, el aire más frío y denso del océano se dirige hacia la superficie terrestre, en la cual el aire cálido y ligero tiene tendencia a subir. Se organiza así una circulación dirigida desde el mar a la tierra en superficie y contrarrestada por una circulación de sentido opuesto en las capas más altas del aire. Se trata de la brisa marina que se inicia después de la salida del sol y alcanza su máxima intensidad en las horas centrales del día. Puede penetrar varios kilómetros tierra adentro y determina en la costa la existencia de vientos racheados, con frecuentes cambios de dirección y una suavización notable de las temperaturas.

Durante la noche la situación es justamente inversa de la descrita. Ahora las máximas temperaturas se sitúan sobre la superficie oceánica y las mínimas sobre la continental. En consecuencia, se establece una circulación dirigida en superficie de la tierra al mar y sobre montada en altura por la inversa de ésta (véase figura 2.4). Estamos en este caso ante la brisa de tierra, que se desarrolla durante la noche y alcanza su máxima intensidad antes del amanecer. Pero ahora las diferencias térmicas entre la tierra y el mar no suelen ser tan marcadas como durante el día; de ahí que la brisa de tierra presente en general menos intensidad y potencia.



Fernández, 2003

Figura 2.4 : Las brisas costeras

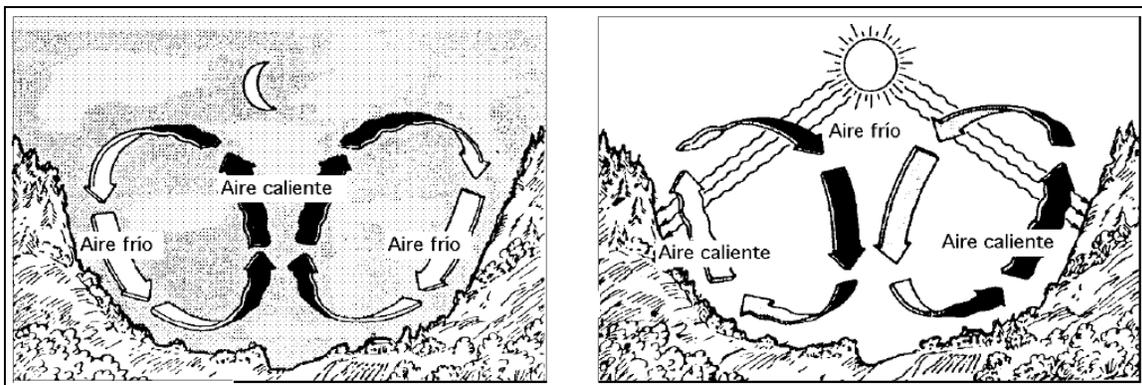
De todos modos, hay que reseñar que el fenómeno de las brisas costeras no es un fenómeno cotidiano ni se presenta siempre que exista la misma intensidad. Conviene señalar que para que tenga lugar debe haberse producido una diferencia térmica importante entre la tierra y el mar, y esto sólo es posible con cielos predominantemente despejados y en ausencia de fuertes vientos que comporten advecciones de calor desde unos lugares a otros. Por otro lado, tampoco hay que olvidar que éste régimen, cuando se produce, se combina con el flujo de vientos determinado por el campo general de las presiones; de ahí que su efecto sea especialmente notorio en situaciones de débil flujo general de viento.

#### b) Las brisas de montaña

Los valles encajados entre las montañas también generan circulaciones térmicas derivados del distinto calentamiento experimentado por cada una de sus partes. Durante el día, las laderas de solana, que reciben la radiación solar con un elevado ángulo de incidencia, son las que experimentan un calentamiento más intenso. El fondo del valle permanece frío porque apenas recibe ninguna radiación solar, y el aire situado en el mismo plano horizontal que la ladera de solana, pero

lejos de ella, también permanece más frío dado que el aire se calienta esencialmente a partir de la radiación de onda larga emitida por el suelo. En consecuencia, se genera un gradiente de presiones que orienta al viento hacia las laderas, más caldeadas, remontándolas y dando lugar a los denominados vientos anabáticos. Simultáneamente tiene lugar un flujo de vientos que remonta el valle (se denomina precisamente viento del valle) y que es sobre montado por un viento de retorno de sentido contrario (véase figura 2.5).

Durante la noche las laderas sufren un intenso proceso de enfriamiento como consecuencia de las pérdidas de calor por irradiación nocturna, y el gradiente de presiones entonces apunta hacia el fondo del valle. En este caso el aire, ayudado además por la fuerza de la gravedad, desciende por las laderas dando lugar a los denominados vientos catabáticos. Este aire, al confluír en el fondo del valle, genera un flujo de viento que se desliza desde la cabecera hasta zonas bajas del valle y que se denomina viento de montaña, estando sobre montado por un viento igual, pero de sentido contrario. En consecuencia, durante el día asistimos en las zonas de montaña a brisas de ladera anabáticas acompañadas de vientos de valle. Por la noche la situación se invierte produciéndose brisas catabáticas de ladera acompañadas de vientos de montaña (véase figura 2.5).



Fernández, 2003

Figura 2.5: Vientos de valles y montañas

c) Modificaciones originadas en el viento por una barrera orográfica

Cuando el flujo de viento superficial encuentra en su recorrido un obstáculo, tiene que remontarlo adhiriéndose en cierta medida al perfil de dicho obstáculo. Ello origina corrientes ascendentes en la ladera de barlovento y descendentes en la de sotavento, acompañadas de desviaciones horizontales de los flujos de aire tendientes a rodear el obstáculo.

Cuando el obstáculo tiene unas dimensiones reducidas, los movimientos horizontales son los predominantes y el viento tiende a contornear el trazado del obstáculo. Cuando es amplio, sobre todo en anchura, los movimientos verticales se imponen y con ellos ciertas modificaciones en el flujo de viento. Estas modificaciones determinan la aparición de remolinos de eje horizontal en la ladera de barlovento, que conducen a flujos descendentes en dicha ladera, y a remolinos similares en sotavento, pero esta vez con flujos ascendentes. Estos remolinos hacen su aparición cuando las pendientes de las laderas son suficientemente marcadas (mas de 40°), estando ausentes en los casos de pendientes suaves.

d) Modificaciones originadas en el viento por los valles encajados

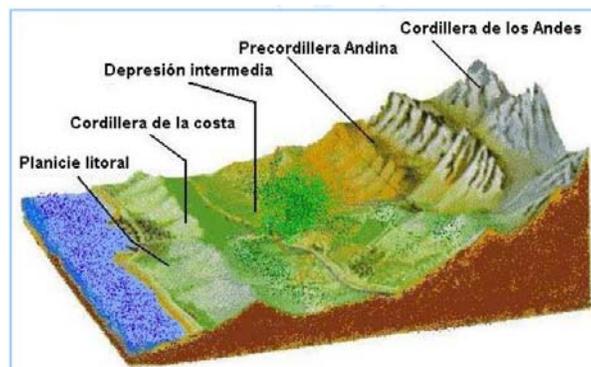
Los valles estrechos y encajados constituyen auténticos pasillos por los que el viento se canaliza modificando su dirección y su intensidad.

En la zona de máximo estrangulamiento se produce una acumulación de aire que conduce a una aceleración de los vientos y a una ondulación con ascenso vertical. Cuando el valle se abre se produce un descenso compensatorio y una expansión horizontal del aire que da lugar a remolinos dirigidos hacia las laderas del valle.

### 2.3 REGIONES OROGRAFICAS Y SUS INFLUENCIAS CLIMATICAS

De acuerdo al punto anterior la topografía adquiere un importante papel en el desarrollo de los campos de viento, razón por la cual a continuación se describe resumidamente la topografía de Chile. Cabe destacar que para cada estación meteorológica considerada en este estudio se presenta en el sitio Web un modelo digital de terreno del entorno de las mismas, y también se anexa una impresión gráfica de los mismos en el Anexo A1.

Un esquema típico de la de la topografía de Chile se muestra en la figura 2.6.



Insunza (2003)

Figura 2.6: Topografía de Chile

Las principales características de la topografía nacional son descritas basadas en Inzunza (2003)

Hacia el este el país presenta una frontera natural con Argentina conocida como Cordillera de los Andes; donde en el tramo central que se extiende desde Santiago hasta Puerto Montt presenta alturas cercanas a las 6.000 metros, pero hacia el Sur marca un acusado descenso, coincidiendo las mayores alturas con volcanes de alturas en torno a los 4.000 metros, la mayor parte de los cuales se localiza en o cerca del límite internacional. Más hacia el Sur, se aprecia una evidente aproximación a la Depresión Central. En este tramo, como en el Norte Chico y sectores más australes, la cordillera presenta numerosos cajones glaciales y áreas planas.

Hacia el este se presenta la Cordillera de la Costa, que toma sus mayores alturas en la zona central, por ejemplo, en la octava región, al sur del Bío-Bío se eleva como un gran bloque, presentando alturas significativas, pues el Alto de la Cueva alcanza a 1440 m. y se extiende hacia el sur por 190 km de largo, con un ancho máximo de 50 km entre las ciudades de Cañete y Angol; de esta forma se constituye en una importante barrera contra las influencias oceánicas y perturbaciones ciclónicas cada vez mas frecuentes en esta zona, los frentes dejan gran parte de la precipitación a barlovento de la misma y el sector de sotavento, el valle central, acentúa sus rasgos de continentalidad.

Las Planicies Litorales entre el Océano Pacífico y la Cordillera de la Costa, en la zona central adquieren gran amplitud, por ejemplo en las desembocaduras de los ríos Maipo y Rapel, extendiéndose, en este último, por más de 30 km. de ancho, especialmente en San Antonio y Matanzas. En Pichilemu y en Constitución se atenúa su presencia ya que uno de los cordones de la Cordillera de la Costa se acerca al mar, pero en Chanco otra vez se amplía. Al sur del Bío-Bío reaparece en su forma más extendida en la península de Arauco. Entre las desembocaduras de los ríos Imperial y Toltén tiende a desaparecer, para reaparecer al Sur de Toltén, pero las terrazas son angostas por la cercanía de la cordillera y muy pegadas al mar. Casi toda la bahía de Corral, en cambio, está rodeada por una terraza de unos 20 m de altitud la cual se continua hacia valle arriba del Valdivia. Finalmente, desde la desembocadura del río Maullín hasta el Canal de Chacao, en parte por la baja altura de la cordillera costera y en parte porque esta misma desaparece, la planicie marina prosigue hacia la Depresión Intermedia, pero la terraza principal se advierte bien en Puerto Montt.

La Depresión Intermedia es una faja de relieve deprimido que se extiende longitudinalmente, encerrada entre las dos cordilleras, desde el límite con Perú hasta la península de Taitao y el Golfo de Penas. Entre el sur de la III Región y la cadena de Chacabuco la Depresión Intermedia está interrumpida por los Valles

transversales. Alcanza en la región de Antofagasta alturas de 1400 m; de 550 m en Santiago; 300 m en la región de la Araucanía; de menos de 100 m de Osorno al sur, quedando sumergida desde Puerto Montt hasta el Golfo de Penas. El Valle central se extiende como una planicie que se ensancha cada vez más hacia el sur hasta alcanzar, a la altura de Chillán, cerca de 100 km de ancho.

Finalmente cabe destacar que mayores detalles acerca de las características climáticas de Chile son proporcionados en literatura especializada (Inzunza, 2005; Romero, 1985 )

## **2.4 PROSPECCION EOLICA**

Un programa de prospección eólica es similar a cualquier otro proyecto de carácter técnico. Requiere planificación y coordinación, y esta limitado por un presupuesto y plazos para su desarrollo. Es necesario considerar un conjunto claro de objetivos para escoger el mejor programa de prospección. El éxito del mismo residirá en la calidad de cada una de las partes involucradas, es decir, adecuados equipos para monitorear las características del viento, técnicas de monitoreo adecuadas, personal calificado, y apropiadas técnicas para el análisis de los datos (AWS Scientific, Inc., 1997).

### **Estrategias y Objetivos**

Existen varias estrategias para investigar las características del recurso eólico en un área geográfica específica. La estrategia a emplear dependerá de los objetivos del programa de prospección eólico en cuestión y de la experiencia previa en esta área. Las estrategias se pueden clasificar en 3 escalas o etapas básicas de prospección eólicas:

- Identificación preliminar de zonas
- Evaluación del recurso eólico en estas zonas
- Micro-localización

#### **2.4.1 IDENTIFICACION PRELIMINAR DE ZONAS**

En esta escala se prospecta una zona a una escala típicamente regional. Esto se puede realizar a través de: modelación de mesoscala para obtener mapas eólicos y análisis de los mismos; revisión de datos de estaciones meteorológicas disponibles en la zona de interés; revisión de indicadores de la magnitud de la velocidad del viento en la zona, como por ejemplo, forma de los árboles; revisión de modelos digitales de terreno para determinar áreas que pueden ser favorables para el desarrollo localizado de altas velocidades del viento. El objetivo

fundamental de esta estrategia es seleccionar lugares para desarrollar uno o mas programas de medición del potencial del recurso eólico.

#### **2.4.2 EVALUACION DEL RECURSO EOLICO**

En esta escala se prospecta una zona(s) específica(s), donde existe un interés mas concreto en implementar de un proyecto energético de tipo eólico. Los objetivos característicos a este nivel son:

- Determinar o verificar si existe suficiente recurso eólico dentro de la zona(s) de interés para justificar investigaciones in-situ más específicas.
- Comparar zonas para distinguir la importancia relativa del potencial del recurso.
- Obtener datos representativos para estimar el comportamiento y/o viabilidad económica de aerogeneradores específicos.
- Prospección de sitios potenciales para la instalación de aerogeneradores.

#### **2.4.3 MICRO-LOCALIZACION**

Esta es la escala mas pequeña, o tercera etapa, en una prospección eólica. Su objetivo principal es cuantificar la variabilidad del recurso eólico en una pequeña zona de interés. Fundamentalmente, la micro-localización se utiliza para ubicar uno o más aerogeneradores en un área de terreno de tal forma de maximizar la producción energética del o los aerogeneradores instalados. Es necesario considerar que para producir energía eólica de una manera comercialmente atractiva se requieren velocidades medias anuales mínimas de alrededor de 6.7 m/s a 50 metros sobre el nivel del suelo.

#### **2.4.4 DENSIDAD DE POTENCIA EOLICA Y CATEGORIAS DE POTENCIAL EOLICO**

El mejor indicador del potencial eólico en cualquier zona esta determinado por el valor de la densidad de potencia eólica (DPE) basada en los datos disponibles de velocidad del viento. Para calcular la DPE, se requiere un promedio anual de la velocidad del viento. Este calculo combina los efectos de la velocidad del viento y la densidad del aire, y se ha constituido en un estándar en la industria eólica para determinar el potencial eolo-energético de una zona. La formula de calculo de la DPE esta basada en el cubo de la velocidad del viento, y por esta razón una pequeña variación en la misma puede originar grades variaciones en la DPE. Entonces, la disponibilidad de valores confiables de la

velocidad del viento en una zona es un aspecto clave al considerar el desarrollo de proyectos eólicos.

#### Determinación de las categorías del potencial eólico

Los datos de la velocidad del viento se utilizan para obtener un valor de velocidad del viento promedio anual y la DPE, los cuales son utilizados para determinar categorías de potencial eólico, mientras mayor es la categoría mayor es el potencial eólico.

La tabla presenta rangos de categorías de potencial eólico para mediciones efectuadas a 10 metros y a 50 metros sobre el nivel del suelo. La sección sombreada de la tabla sólo pretende destacar las categorías que ofrecen un mayor atractivo para el desarrollo de proyectos eólicos.

Categoría de Potencial Eólico	10 metros		50 metros	
	Densidad de Potencia Eólica	Velocidad del viento	Densidad de Potencia Eólica	Velocidad del viento
	(watts/m <sup>2</sup> )	m/s	(watts/m <sup>2</sup> )	m/s
1	<= 100	<= 4.4	<= 200	<= 5.6
2	<= 150	<= 5.1	<= 300	<= 6.4
3	<= 200	<= 5.6	<= 400	<= 7.0
4	<= 250	<= 6.0	<= 500	<= 7.5
5	<= 300	<= 6.4	<= 600	<= 8.0
6	<= 400	<= 7.0	<= 800	<= 8.8
7	<= 1000	<= 9.4	<= 2000	<= 11.9

Se proporciona el valor de 10 metros porque éste corresponde a mediciones típicamente efectuadas en aeropuertos y en estudios de contaminación. Por otro lado el valor de 50 metros es un valor normalmente empleado para el análisis de factibilidad de mega proyectos eólicos, porque es un valor mínimo típico de la altura de buje de un aerogenerador. Resulta interesante destacar que esta altura transita en un rango hasta los 100 metros.

### **[3] ASPECTOS METODOLOGICOS DEL ESTUDIO**

**A)** Estimación del recurso eólico observado en la zona centro y sur del sistema interconectado central, Regiones Metropolitana a la Décima.

**A.1)** Se recopiló la información disponible de registros horarios de viento en el área analizada, con una descripción detallada de todas las características de las estaciones y su entorno relevante para la evaluación del recurso eólico y para la aplicación de modelos de simulación de campos de viento. Para lo anterior se diseñó una encuesta que se distribuyó a numerosas empresas privadas, organismos públicos y particulares.

**A.2)** Se caracterizó el recurso eólico en la totalidad de las estaciones con información recopilada. Dicha caracterización incluye, entre otros parámetros, la variabilidad diaria, estacional e interanual del recurso a las alturas del registro, 10 y 60 metros. Además se obtuvieron los parámetros de distribución Weibull representativos de los registros de cada estación, se estableció producción anual de energía generada por una o más máquinas eólicas de potencia, y se determinó el factor de capacidad y densidad de potencia. Esta caracterización es compatible con la desarrollada en el estudio "Mejoría del conocimiento del recurso eólico en el norte y centro del País" (Fundación para la transferencia tecnológica, 2003).

**A.4)** Se generó una base de datos con la información recopilada y procesada, compatible con la señalada en el estudio ya citado.

**A.5)** Se evaluó las condiciones relativas del recurso en la IV región, mediante la aplicación de una herramienta de modelación meteorológica con resolución espacial de 2 Km y 1 Km.

**B)** *Implementación de un sistema de información georreferenciado para administrar la información del recurso eólico disponible en CNE.*

**B.1)** Se incorporó la información disponible del recurso eólico en el país en un Sistema de Información Geográfica (SIG) bajo plataforma computacional ArcView 3.2

**B.2)** Se definieron las coberturas de datos, red de caminos, centros poblados y límites comunales que fueron incorporados en el SIG. Toda la información fue georreferenciada a coordenadas UTM, WGS84. Se incorporaron modelos digitales de terreno para cada estación.

**C)** Se diseñó un sitio Web que permite visualizar los resultados principales de este estudio (en Anexo 1 se presenta la metodología conceptual para presentar los resultados del proyecto en sitio Web de la CNE).

**D)** Desarrollo de **Documento de Síntesis** de los resultados obtenidos

**D.1)** Se desarrolló un documento que resume a nivel nacional la información disponible del recurso eólico.

**D.2)** Se diseñó un CD complementario a la información presentada en el documento anterior. Este CD contiene una aplicación autoejecutable que simula un ambiente ArcView, donde es posible visualizar buena parte de la información contenida en el Sistema de Información Geográfico Eólico implementado para CNE en este estudio. Cabe destacar que para ejecutar la aplicación no es necesario tener instalado ArcView en el PC. Para desarrollar este CD se empleó la misma tecnología utilizada en el desarrollo del CD que presenta los resultados del Proyecto Fondef (D01i1165) "Caracterización y Aprovechamiento Integral de la Energía del Viento en Chile", 2002-2004.

## [4] ESTIMACIÓN DEL RECURSO EÓLICO OBSERVADO EN REGIONES METROPOLITANA – X<sup>A</sup> REGIÓN

Uno de los objetivos principales del estudio fue reunir la data referida a la velocidad y dirección de vientos registradas por estaciones meteorológicas entre las región Metropolitana y la X<sup>a</sup> región. Como base del estudio, en este aspecto, se utilizó la información resultante del proyecto EOLO93, es así como se actualizaron los datos de estaciones reportados en este proyecto que estuvieran ubicadas en la zona antes mencionada. Además, se identificó y contactó a varias instituciones y personas que se detectó quizás tuvieran información atinente al presente estudio en la zona. El detalle de las principales gestiones realizadas se visualiza en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 “Contactos establecidos en la Zona de Estudio”

Institución	Contactos	Resultados de la Solicitud
CENMA	Sr. Marcelo Araya	Entrega datos para 27 estaciones
SERPRAM	Sr. Claudio Simian	Entrega datos para 7 estaciones
ENAP BIO BIO	Sr. Fernando Díaz	Entrega datos para 1 estación
OBSERVATORIO GEODÉSICO TIGO	Sr. Armin Böer	Entrega datos para 1 estación
	Sr. Manuel Martínez	Entrega datos para 4 estaciones
INIA X Región	Sr. Aldo Valdebenito Burgos	Entrega datos para 3 estaciones
	Sr. Francisco Montané	Entrega datos para 5 estaciones
Dirección Meteorológica de Chile (DMC)	Sra. Myrna Araneda Fuentes	Entrega datos para 21 estaciones
Sistema de Vigilancia de la Calidad del Aire - SIVICA	<a href="http://chile.fdns.net/">http://chile.fdns.net/</a>	2 estaciones
Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile, proyecto DiD-U.Ch N°CSMAR 03/03/2		Entrega 1 estación
TOTAL estaciones		72

## 4.1 ESTACIONES CON DATOS DE VIENTO

La Tabla 4.2 muestra las 51 estaciones identificadas con data de viento en la zona de estudio, sin considerar las estaciones proporcionadas por la DMC. Estas estaciones han sido clasificadas en la tabla de acuerdo a la región en que se ubican.

Tabla 4.2 Estaciones con información de Viento en zona de estudio (no se incluyen las estaciones DMC)

Nº	Código	Nombre	Lat.	Lon	Altitud	Región	Período	Meses
1	13DOR05	LA DORMIDA	37°14'41"	67°13'58"	1413	RM	01/01-12/04	47
2	13POL05	POLPAICO	33°09'33"	70°52'27"	520	RM	01/02-02/02	2
3	13ENT05	ENTEL	33°26'27"	70°26'27"	554	RM	01/01-12/04	47
4	13PRA05	LO PRADO	33°27'20"	70°56'47"	1065	RM	01/01-12/04	47
5	13REI05	LA REINA	33°27'02"	70°31'36"	680	RM	01/01-12/04	47
6	13MAL05	MALLARAUCO	33°34'19"	71°09'24"	156	RM	01/01-05/03	29
7	13CAM05	LA CAMPANA	33°38'15"	70°57'29"	483	RM	01/01-07/01	7
8	13PLA05	LA PLATINA	33°34'13"	70°37'32"	652	RM	01/01-12/04	47
9	13MAN05	EL MANZANO	33°35'28"	70°22'53"	874	RM	01/01-12/04	47
10	13PIR05	PIRQUE	33°39'22"	70°36'44"	676	RM	01/02-02/02	2
11	13TIL05	LOS TILOS	33°42'19"	70°42'06"	486	RM	01/02-02/02	2
12	13PAI05	EL PAICO	33°42'06"	71°00'13"	255	RM	01/01-12/04	47
13	13COD05	CODIGUA	33°45'27"	71°19'16"	131	RM	01/01-12/04	47
14	13LCA05	LO CAÑAS	33°31'05"	70°32'50"	643	RM	01/96-03/00	54
15	13EIN05	ESCUELA DE INGENIERÍA	33°27'15"	70°39'44"	543	RM	01/95-09/98	45
16	13LPI05	LO PINTO	36°16'00"	70°44'06"	554	RM	01/95-11/00	70
17	13SCR05	SAN CRISTÓBAL	33°25'01"	70°37'41"	875	RM	07/96-03/98	21
18	13MPI05	MARÍA PINTO	33°28'18"	71°04'10"	180	RM	01/96-10/00	57
19	13PNE05	PAINE	33°50'14"	70°44'51"	373	RM	04/96-07/99	40
20	13CBA05	CUESTA BARRIGA	33°33'20"	70°56'47"	554	RM	04/97-12/99	33
21	13QUI05	QUILAPILUN	33°59'39"	70°44'54"	615	RM	04/97-10/00	42
22	06CHA05	CUESTA CHADA	33°55'56"	70°39'15"	696	VI	01/01-12/04	47
23	06MOS05	MOSTAZAL	33°58'50"	70°42'15"	500	VI	01/04-12/04	11

Nº	Código	Nombre	Lat.	Lon	Altitud	Región	Período	Meses
24	06PEU05	CASAS DE PEUCO	33°57'15"	70°38'20"	607	VI	01/04-12/04	8
25	06COD05	CODEGUA	34°01'54"	70°39'37"	550	VI	01/01-12/04	44
26	06CAN05	SUB ESTACION CANDELARIA	34°01'54"	70°36'31"	663	VI	02/01-12/01	10
27	06SEW05	SEWEL	34°04'48"	70°22'12"	2186	VI	01/00-12/04	59
28	06RAN05	RANCAGUA	34°10'12"	70°43'12"	521	VI	03/04-02/05	8
29	06COP05	COYA POBLACIÓN	34°12'11"	70°31'46"	820	VI	01/00-12/04	60
30	06COC05	COYA CLUB	34°12'05"	70°32'30"	936	VI	01/00-12/04	60
31	06CAU05	CAUQUENES	34°14'28"	70°33'10"	720	VI	09/00-12/04	52
32	06CIP05	CIPRESES	34°15'43"	70°27'47"	890	VI	09/00-12/04	52
33	06TOT05	TOTIHUE	34°19'44"	70°44'29"	330	VI	08/97-08/98	13
34	06REQ05	REQUINOA	34°16'51"	70°48'52"	420	VI	06/01-08/01	3
35	06PRO05	SITIO DEL PROYECTO	34°19'05"	70°50'12"	355	VI	12/97-08/98	8
36	06BRE05	BOMBEROS REQUINOA	34°16'55"	70°48'56"	325	VI	01/98-08/98	8
37	06COL05	COLTAUCO	34°17'23"	71°04'40"	250	VI	03/04-12/04	10
38	06QTI05	QUINTA DE TILCOCO	32°33'01"	70°55'34"	250	VI	03/04-12/04	10
39	06LOR05	MONTE LORENZO	34°22'53"	71°08'02"	140	VI	03/04-12/04	8
40	06PIC05	PICHILEMU <sup>(*)</sup> (PCLMU)	34°22'48"	72°00'00"	90	VI	01/04-12/04	12
41	07PUT05	PUTÚ	35°13'12"	72°18'00"	50	VII	05/97-12/04	91
42	08BIO05	ENAP BIO BIO	36°38'06"	73°58'58"	4	VIII	05/93-12/04	140
43	08TIG05	TIGO	36°36'40"	74°04'01"	171	VIII	02/02-12/04	35
44	08CHI05	CHIGUAYANTE	36°55'27"	67°02'10"	20	VIII	08/01-06/03	23
45	08ARA05	ARAUCO	37°14'41"	67°13'58"	10	VIII	07/01-12/02	18
46	09TEM05	TEMUCO	38°43'12"	72°35'24"	103	IX	01/04-12/04	9
47	10PAL05	PAMPA ALEGRE	40°33'32"	67°09'00"	22	X	01/01-07/01	7
48	10CER05	CESAR ERCILLA	40°34'12"	73°07'48"	100	X	07/01-10/03	28
49	10REM05	REMEHUE	40°35'00"	73°08'00"	73	X	05/01-01/05	31
50	10PAM05	LA PAMPA	40°52'00"	73°12'00"	91	X	01/03-07/03	4
51	10BUT05	BUTALCURA	42°16'00"	73°41'00"	150	X	11/97-10/04	78

(\*) Datos obtenidos por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile mediante proyecto DID-U.Ch. N°. CSMAR 03/03-2

Al igual que en la primera parte de este Estudio, se estableció un código de 5 letras para cada estación recopilada, el cual es empleado en los gráficos y tablas de resultados, así como en los archivos de la base de datos originada en el proyecto. La Tabla 4.2 muestra también las coordenadas (latitud y longitud) y altitud (sobre el nivel del mar) de las estaciones. Las columnas “Periodo” y “Meses” describen el tiempo que abarcan los datos analizados.

La Tabla 4.3 indica la distribución del número de estaciones según el tipo y Región donde están ubicadas. Las figuras 4.1 a 4.7 muestran mapas con la ubicación de las estaciones. La figura 4.1 incluye la totalidad de las estaciones de la Tabla 4.2. Las figuras 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7 rescatan las estaciones detectadas en las Regiones Metropolitana, VI, VII, VIII, IX y X respectivamente.

Tabla 4.3 Distribución de estaciones por región

<b>Región</b>	<b>Estaciones NO DMC</b>	<b>Estaciones DMC</b>	<b>Total</b>
RM	<b>21</b>	<b>1</b>	<b>22</b>
VI	<b>19</b>	<b>3</b>	<b>22</b>
VII	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
VIII	<b>4</b>	<b>6</b>	<b>10</b>
IX	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
X	<b>5</b>	<b>7</b>	<b>12</b>
<b>TOTAL</b>	<b>51</b>	<b>21</b>	<b>72</b>

## **4.2 METODOLOGÍA DE ANÁLISIS**

Se documenta a continuación la metodología de análisis de los datos de viento de las 72 estaciones recopiladas en este estudio, y además la aplicada sobre todas las estaciones recopiladas en la primera etapa del mismo, esto con el fin de uniformar los resultados de ambas etapas del Estudio.

La data de viento fue recibida en archivos digitales. Sin embargo, los tipos de archivos y sus formatos fueron muy variados según la fuente de información. Entonces, una primera tarea significó uniformar la data según el formato establecido en la primera etapa de este Estudio. Es así como se crearon archivos de tipo Excel, donde cada archivo tiene una hoja con los datos de velocidad y otra hoja con los datos de dirección de viento a nivel horario. Las unidades de velocidad corresponden a (m/s). Las unidades de la dirección del viento se uniformaron a grados sexagesimales.

Al igual que en la primera parte de este Estudio, los archivos Excel creados fueron empleados para revisar la calidad de los datos básicos. Esta revisión se ejecuto mediante la visualización de las series completas de datos, a través de la cual se detectó y se eliminó datos que parecían erróneos. Los archivos Excel validados de esta forma son entregados como Anexo digital A5 de este informe final, y son los que fueron utilizados directamente en el análisis de datos.

Para el cálculo de la estadística básica se emplearon los software estándar en la industria eólica WAsP y WindPRO v.2.3. Los resultados del procesamiento a través de estos programas se presentan en Anexo A2. En este anexo, en primer lugar, se presenta un recuadro que permite visualizar la disponibilidad de datos para análisis. Un segundo recuadro presenta la variabilidad diaria y estacional de la velocidad media, así también como la dirección media del viento a la altura de medición de la estación meteorológica. Un tercer recuadro, presenta los resultados de la distribución de la velocidad del viento para las doce direcciones de la rosa de los vientos.

Dependiendo si en la base de datos hay adaptación de la distribución Weibull para las doce direcciones de la rosa de los vientos, aparece un recuadro en donde se presentan los resultados generales del análisis del viento. Teniendo en cuenta la distribución Weibull de velocidad del viento, se representa la curva de distribución de velocidad Weibull, la rosa de energía, rosa de distribución de la dirección de los vientos (que representa el porcentaje de tiempo en que el viento proviene de una determinada dirección) y, rosa de distribución de la velocidad del viento.

Además, con el análisis estadístico de los resultados del viento para cada estación, fue posible obtener resultados de energía y producción anual estimada para el lugar en donde se encuentra instalada la estación meteorológica. Se considero en este estudio una turbina genérica de 660 KW y con una altura de buje de 45 metros sobre el nivel del suelo.

Cuando no fue posible obtener o inferir los valores de rugosidad del viento, fue necesario utilizar el valor estándar en los estudios eólicos para efectos de cálculo, es decir un valor de 1/7 o bien 0.1428.

Finalmente, cabe destacar que en el caso de la determinación de la densidad del aire, la cual juega un papel importante en el cálculo de energía y producción anual, se realizo el cálculo de la densidad media anual cuando fue posible obtener para la estación la temperatura media anual del aire y su altitud. Para aquellos casos donde esto no fue posible se utilizó el valor de la densidad estándar del aire de 1.225 [Kg/m<sup>3</sup>].

A continuación se presentan las figuras que contextualizan todas las estaciones meteorológicas analizadas (DMC y No-DMC) desde la Región Metropolitana hasta la región de los Lagos

Figura 4.1 Localización de Estaciones en Regiones de estudio

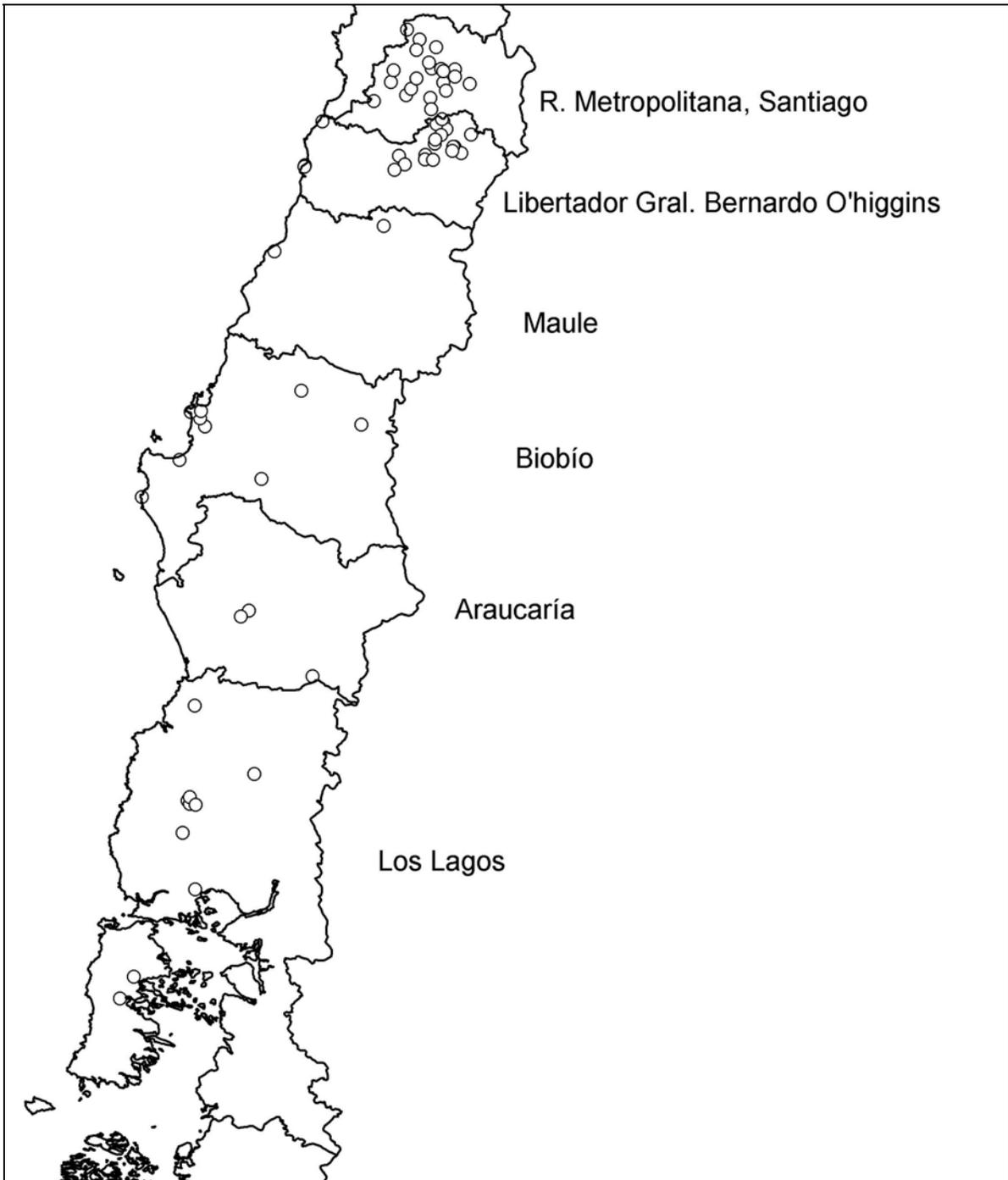


Figura 4.2 Localización de Estaciones en Región Metropolitana

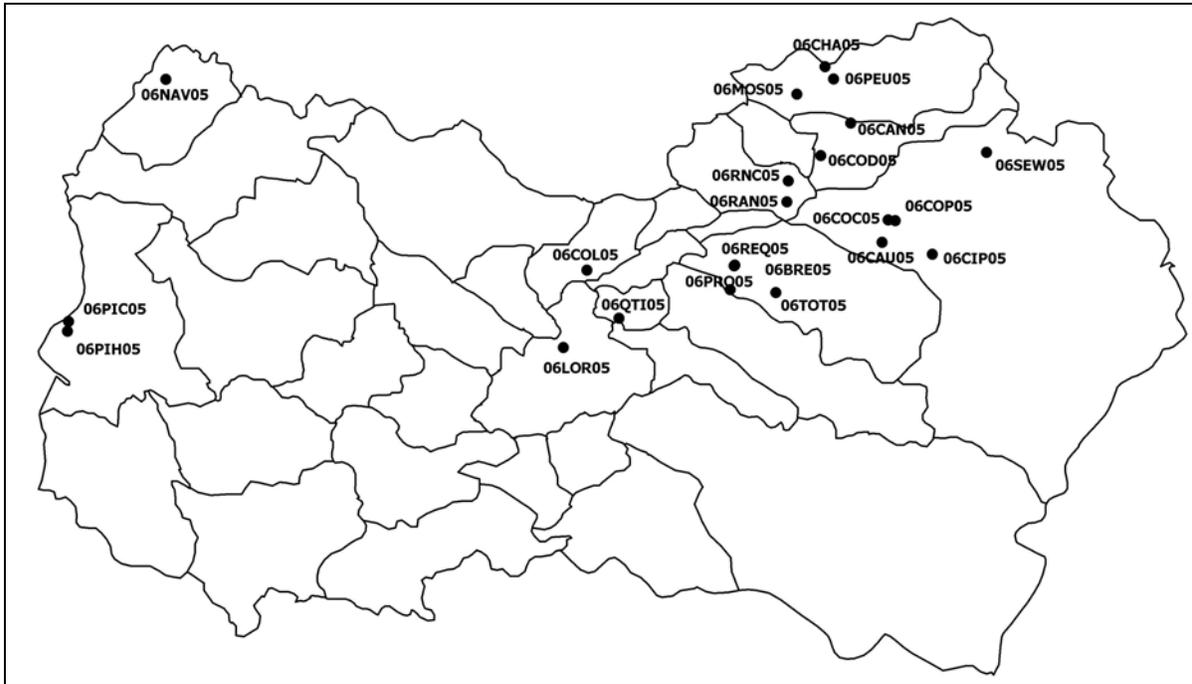


Región Metropolitana a nivel comunal

Estaciones:

- 13DOR05: La Dormida
- 13POL05: Polpaico
- 13PRA05: Lo Prado
- 13REI05: La Reina
- 13ENT05: Entel
- 13MAL05: Mallarauco
- 13PLA05: La Platina
- 13MAN05: El Manzano
- 13CAM05: La Campana
- 13PIR05: Pirque
- 13PAI05: El Paico
- 13TIL05: Los Tilos
- 13COD05: Codigua
- 13LCA05: Lo Cañas
- 13EIN05: Escuela de Ing.
- 13LPI05: Lo Pinto
- 13SCR05: San Cristóbal
- 13MPI05: María Pinto
- 13PNE05: Paine
- 13CBA05: Cuesta Barriga
- 13QUI05: Quilapilun
- 13PUD05: Pudahuel (DMC)

Figura 4.3 Localización de Estaciones en Región Libertador General Bernardo O'higgins VI

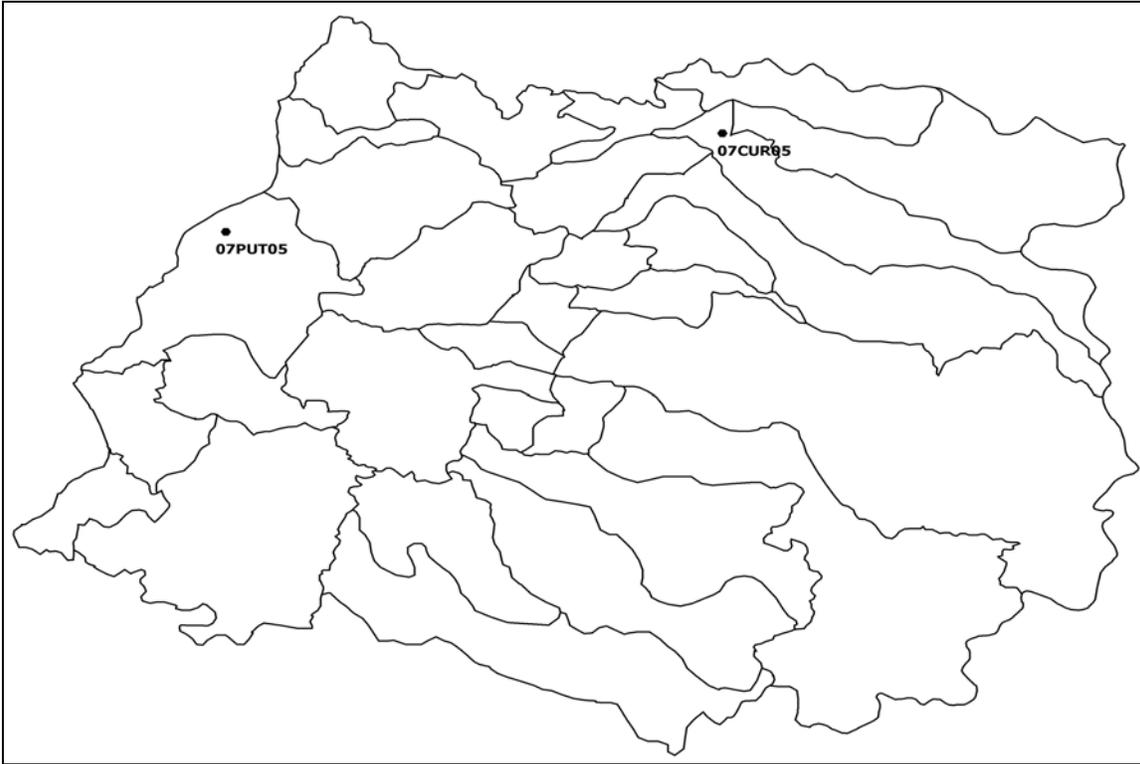


VI Región a nivel comunal

Estaciones:

- 06CHAD05: Cuesta Chada
- 06MOS05: Mostazal
- 06PEU05: Casas de Peuco
- 06CAN05: Sub Estación Candelaria
- 06COD05: Codegua
- 06SEW05: Sewel
- 06RAN05: Rancagua
- 06COC05: Coya Club
- 06COP05: Coya Población
- 06COL05: Coltauco
- 06REQ05: Requinoa
- 06BRE05: Bomberos Requinoa
- 06CAU05: Cauquenes
- 06CIP05: Cipreses
- 06QTI05: Quinta de Tilcoco
- 06PRO05: Sitio del Proyecto
- 06TOT05: Totihue
- 06LOR05: Monte Lorenzo
- 06PIC05: Pichilemu
- 06NAV05: Navidad DCP (DMC)
- 06PIH05: Pichilemu DCP (DMC)
- 06RNC05: Rancagua DCP (DMC)

Figura 4.4 Localización de Estaciones en Región del Maule VII

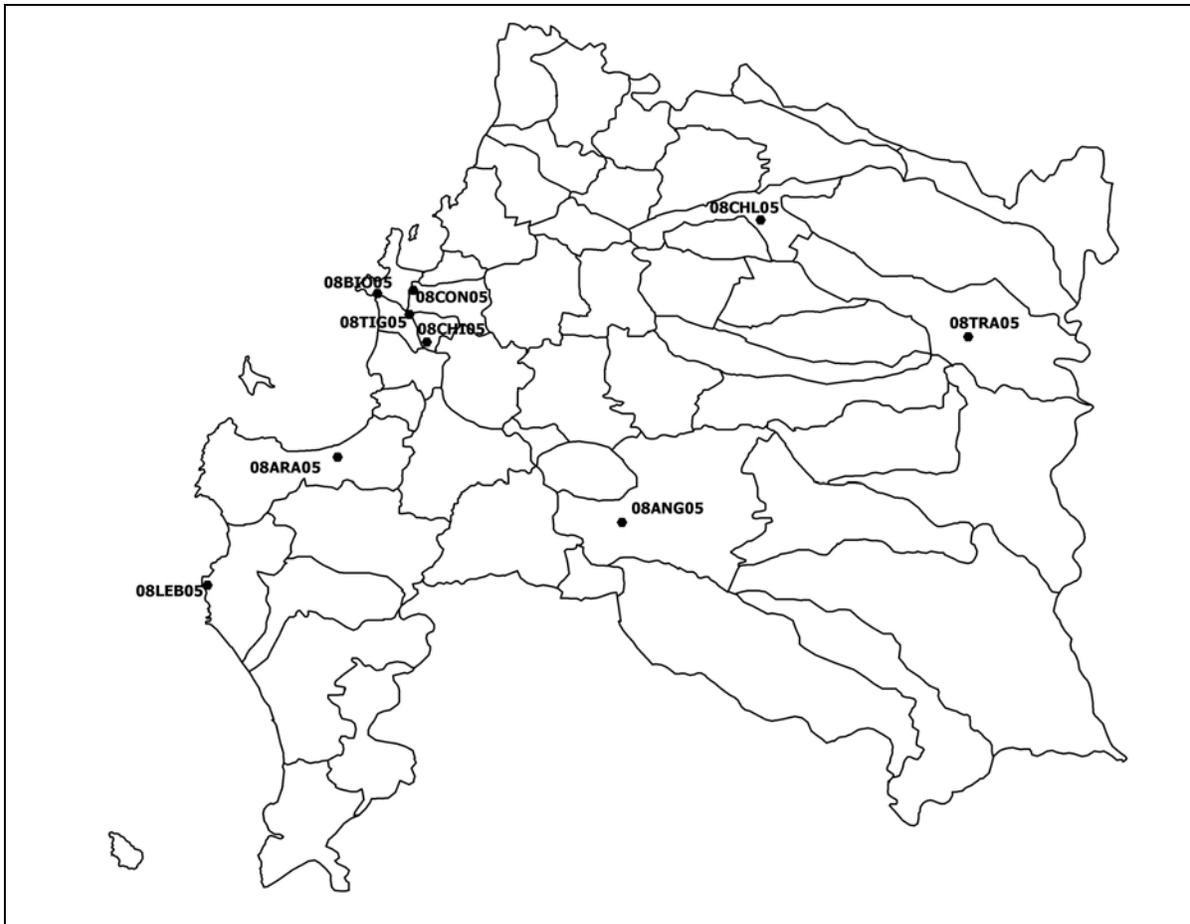


VII Región a nivel comunal

Estación:

- 07PUT05: Putú
- 07CUR05: Curicó (DMC)
- 07CUR05: Curicó DCP (DMC)

Figura 4.5 Localización de Estaciones en Región del Bío Bío VIII



VIII Región a nivel comunal

Estaciones:

- 08BIO005: Enap Bío Bío
- 08TIG05: Tigo
- 08CHI05: Chiguayante
- 08ARA05: Arauco
- 08CHL05: Chillán (DMC)
- 08CHL05: Chillán DCP (DMC)
- 08CON05: Concepción (DMC)
- 08TRA05: Las Trancas DCP (DMC)
- 08ANG05: Los Angeles DCP (DMC)
- 08LEB05: Lebu DCP (DMC)

Figura 4.6 Localización de Estaciones en Región de la Araucanía IX

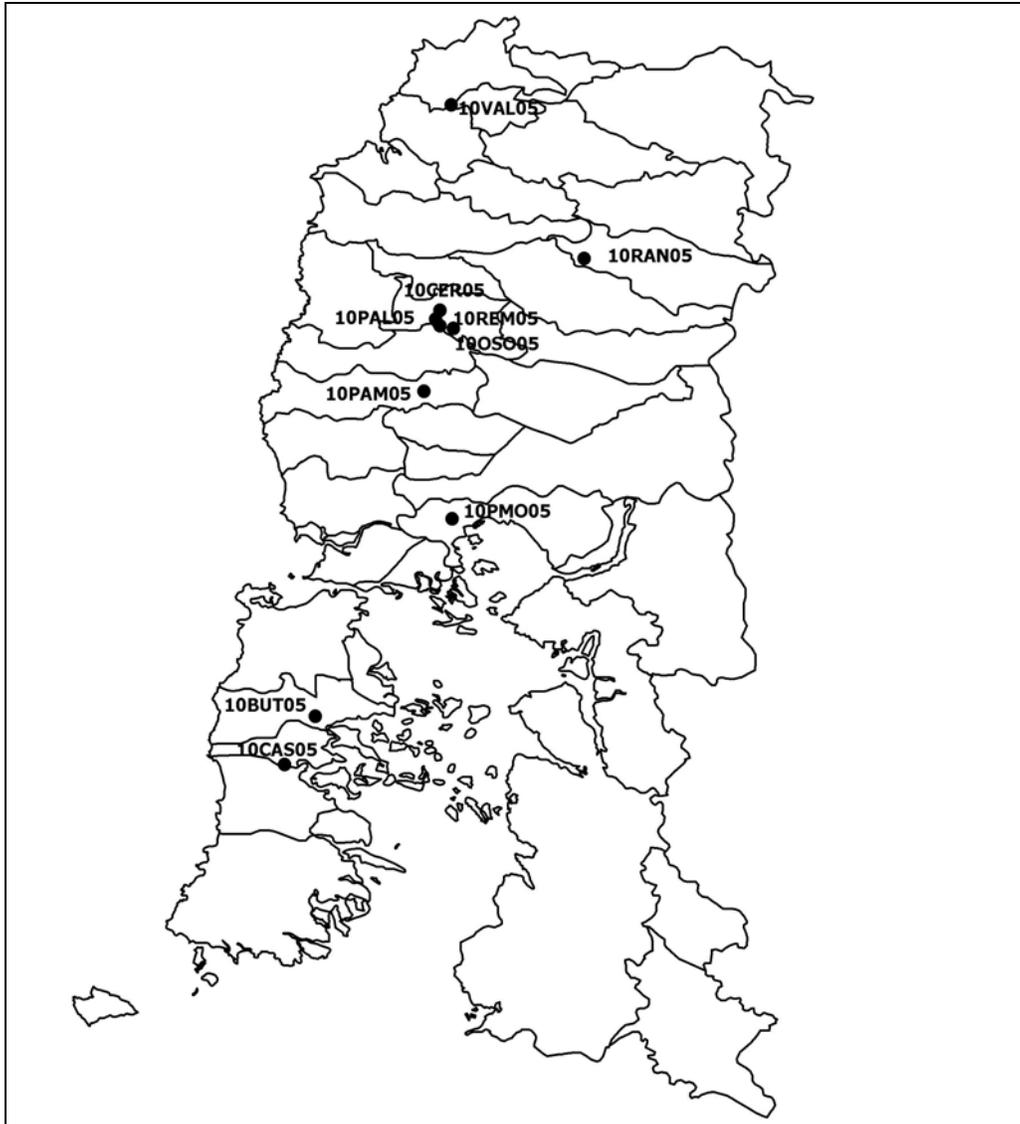


IX Región a nivel comunal

Estación:

- 09TEM05: Temuco
- 09TMC05: Temuco (DMC)
- 09PUC05: Pucón DCP (DMC)

Figura 4.7 Localización de Estaciones en Región de Los Lagos X



X Región a nivel comunal

Estaciones:

- |                                 |                               |
|---------------------------------|-------------------------------|
| - 10PAL05: Pampa Alegre         | - 10 CER05: César Ercilla     |
| - 10REM05: Remehue              | - 10PAM05: La Pampa           |
| - 10BUT05: Butalcura            | - 10PMO05: Puerto Montt (DMC) |
| - 10VAL05: Valdivia (DMC)       | - 10VAL05: Valdivia DCP (DMC) |
| - 10OSO05: Osorno (DMC)         | - 10OSO05: Osorno DCP (DMC)   |
| - 10RAN05: Lago Ranco DCP (DMC) | - 10CAS05: Castro DCP (DMC)   |

### **4.3 RESULTADOS**

Los resultados de la aplicación de la metodología de análisis utilizada en este estudio (ver sección 4.2) se presentan resumidamente en las tablas 4.4, 4.5 y 4.6. Los Resultados *in-extenso* se pueden encontrar en los anexos A2 y A3.

La tabla 4.4 presenta los valores para la altura del sensor sobre el nivel del suelo en metros, la altitud de la estación sobre el nivel del mar en metros, la rugosidad en metros, los parámetros de Weibull A y K, y la temperatura media anual en grados celsius.

La tabla 4.5 introduce los resultados, ordenados en forma descendente, para la velocidad media anual, la densidad de potencia, y la energía del viento, normalizados a una altura de 50 metros sobre el nivel del suelo.

La tabla 4.6 muestra antecedentes básicos de las estaciones para las cuales la Dirección Meteorológica de Chile realizó un cálculo de velocidad media del viento, los cuales fueron proporcionados para su incorporación en este informe.

Tabla 4.4 Parámetros de cálculo de estaciones NO DMC

N°	Código	Altura Sensor [m]	Altitud [m. snm]	Rugosidad [m]	Parámetros de Weibull		Temperatura Media Anual [°C]
					A [m/seg]	K [ ]	
1	13DOR05	40	1413	0.143	4.7	1.807	13.0
2	13POL05	10	520	0.143	2.5	1.772	22.2
3	13ENT05	127	554	0,143	2.9	1.422	17.2
4	13PRA05	33	1065	0,143	5.68	1.879	13.8
5	13REI05	10	680	0,143	1.76	1.554	18.0
6	13MAL05	10	156	0,143	1.67	1.379	15.3
7	13CAM05	22	483	0,143	3.79	1.606	15.6
8	13PLA05	10 - 24	652	0,3464	1.93	1.703	15.1
9	13MAN05	10	874	0,143	4.16	1.488	15.2
10	13PIR05	10	676	0,143	2.55	2.13	19.7
11	13TIL05	10	486	0,143	2.03	1.706	19.5
12	13PAI05	22	255	0,143	3.24	1.395	15.3
13	13COD05	10	131	0,143	2.31	1.364	14.8
14	13LCA05	10	643	0,143	1.63	2.265	15.7
15	13EIN05	10	543	0,143	2.14	1.694	15.5
16	13LPI05	10	554	0,143	-	-	14.0
17	13SCR05	70	875	0,143	2.77	1.570	15.9
18	13MPI05	10	180	0,143	2.06	1.352	14.1
19	13PNE05	10	373	0,143	1.71	1.539	14.9
20	13CBA05	20	554	0,143	5.66	1.743	18.1
21	13QUI05	10	615	0,143	1.91	1.392	14.9
22	06CHA05	10	696	0,143	7.66	1.255	14.4
23	06MOS05	10	500	0,143	1.81	1.750	14.8
24	06PEU05	10	607	0,143	2.54	2.21	15.4
25	06COD05	10	550	0,143	2.58	1.875	14.6
26	06CAN05	10	663	0,143	3.01	2.223	13.9
27	06SEW05	20	2186	0,143	3.57	1.883	?
28	06RAN05	6	521	0,143	2.92	1.840	17.4
29	06COP05	10	820	0,143	1.89	1.836	?
30	06COC05	10	936	0,143	2.67	1.476	?
31	06CAU05	10	720	0,143	1.53	1.82	?
32	06CIP05	10	890	0,143	1.87	2.071	?
33	06TOT05	10	330	0,143	1.98	1.74	?
34	06REQ05	10	420	0,143	1.77	1.59	?
35	06PRO05	10	355	0,143	1.76	1.701	?
36	06BRE05	10	325	0,143	1.67	1.94	?
37	06COL05	10	250	0,143	1.45	2.22	?
38	06QTI05	10	250	0,143	1.38	1.80	?
39	06LOR05	15	140	0,143	1.78	1.11	?
40	06PIC05 <sup>(*)</sup>	6	90	0,143	2.32	1.282	?
41	07PUT05	10	50	0,143	2.34	1.293	?
42	08BIO05	10 - 24	4	0,3183	5.06	1.901	?
43	08TIG05	4	171	0,143	1.72	1.382	?
44	08CHI05	10	20	0,143	2.41	1.552	13.5
45	08ARA05	10	10	0,143	2.89	1.607	12.6
46	09TEM05	6	114	0,143	2.02	1.487	12.4
47	10PAL05	10	22	0,143	2.83	1.541	11.4
48	10CER05	10	100	0,143	2.52	1.600	?
49	10REM05	2	73	0,143	1.96	1.495	12.9
50	10PAM05	3,5	91	0,143	2.03	1.339	10.0
51	10BUT05	2	150	0,143	3.49	1.626	?

(\*) Datos obtenidos por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile mediante proyecto DID-U.Ch. N°. CSMAR 03/03-2

Tabla 4.5 Resultados de cálculo de las estaciones No-DMC a 50 metros sobre el nivel del suelo

Nº	Código	Velocidad Media [m/seg]	Densidad de potencia [W/m <sup>2</sup> ]	Energía del Viento [KWh/m <sup>2</sup> ]
22	06CHA05	9.0	704	6271
20	13CBA05	5.7	233	2133
42	08BIO05	5.6	195	1869
4	13PRA05	5.3	155	1405
51	10BUT05	4.9	140	1261
9	13MAN05	4.7	136	1230
16	13LPI05	4.6	302	2662
1	13DOR05	4.3	91	831
7	13CAM05	3.8	70	635
27	06SEW05	3.6	53	479
26	06CAN05	3.4	34	307
12	13PAI05	3.3	59	532
28	06RAN05	3.3	47	433
45	08ARA05	3.3	46	419
47	10PAL05	3.2	40	360
8	13PLA05	3.0	30	291
30	06COC05	3.0	39	350
25	06COD05	2.9	24	221
40	06PIC05 <sup>(*)</sup>	2.9	44	393
48	10CER05	2.8	28	256
49	10REM05	2.8	26	228
24	06PEU05	2.7	23	206
41	07PUT05	2.7	34	305
44	08CHI05	2.7	28	253
13	13COD05	2.6	28	256
50	10PAM05	2.5	40	362
15	13EIN05	2.4	16	143
17	13SCR05	2.4	20	178
18	13MPI05	2.4	20	183
2	13POL05	2.3	23	213
11	13TIL05	2.3	13	123
10	13PIR05	2.2	18	167
21	13QUI05	2.2	15	132
43	08TIG05	2.2	17	148
29	06COP05	2.1	10	91
32	06CIP05	2.1	9	81
33	06TOT05	2.1	14	130
5	13REI05	2.0	10	88
23	06MOS05	2.0	9	83
35	06PRO05	2.0	9	77
6	13MAL05	1.9	11	98
19	13PNE05	1.9	10	89
34	06REQ05	1.9	12	110
39	06LOR05	1.9	24	218
14	13LCA05	1.7	5	48
36	06BRE05	1.7	6	59
31	06CAU05	1.5	5	47
37	06COL05	1.5	4	34
38	06QTI05	1.5	4	34
3	13ENT05	-	45	602
46	09TEM05	-	-	-

(\*) Datos obtenidos por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile mediante proyecto DID-U.Ch. N°. CSMAR 03/03-2

Tabla 4.6 Estaciones de la DMC con información de Viento

N°	Código	Nombre Estación	Latitud Sur	Longitud Oeste	Altitud [m.snm]	Velocidad Media [m/seg]	Región	Período [años]
1	13PUD05	PUDAHUEL	33°23'	70°47'	474	2.4	RM	1991-2004
2	06NAV05	NAVIDAD (DCP)	33°57'	70°50'	100	1.5	VI	2000-2004
3	06PIH05	PICHILEMU (DCP)	34°24'	72°00'	40	1.6	VI	2000-2004
4	06RNC05	RANCAGUA (DCP)	34°08'	70°43'	500	2.2	VI	2000-2004
5	07CUR05	CURICÓ	34°58'	71°14'	228	2.7	VII	1991-2000
6	07CUR05	CURICO (DCP)	34°58'	71°14'	228	2.3	VII	2000-2004
7	08CHL05	CHILLÁN	36°34'	71°27'	140	3.1	VIII	1991-1999
8	08CHL05	CHILLÁN (DCP)	36°34'	71°27'	140	2.1	VIII	2000-2004
9	08CON05	CONCEPCIÓN	36°46'	73°03'	12	3.8	VIII	1990-2003
10	08TRA05	LAS TRANCAS (DCP)	36°54'	71°27'	700	1.9	VIII	2000-2004
11	08ANG05	LOS ANGELES (DCP)	37°26'	72°26'	114	2.1	VIII	2000-2004
12	08LEB05	LEBU (DCP)	37°35'	73°40'	140	3.1	VIII	2000-2004
13	09TMC05	TEMUCO	38°46'	72°38'	114	2.3	IX	1991-2004
14	09PUC05	PUCÓN (DCP)	39°21'	71°40'	225	1.7	IX	2000-2004
15	10VAL05	VALDIVIA	39°38'	73°05'	19	2.7	X	1991-2000
16	10VAL05	VALDIVIA (DCP)	39°38'	73°05'	19	1.6	X	2000-2004
17	10OSO05	OSORNO	40°36'	73°04'	65	3.0	X	1991-2000
18	10OSO05	OSORNO (DCP)	40°36'	73°04'	65	1.9	X	2000-2004
19	10RAN05	LAGO RANCO (DCP)	40°18'	72°30'	79	2.1	X	2000-2004
20	10PMO05	PUERTO MONTT	41°25'	73°05'	85	3.1	X	1991-2004
21	10CAS05	CASTRO (DCP)	42°49'	73°46'	41	2.0	X	2000-2004

## **[5] MODELACIÓN DEL RECURSO EÓLICO EN LA IV REGIÓN**

La presente descripción se basa fundamentalmente en el trabajo desarrollado por Müller (2001) en el área de modelación de campos de viento en topografía compleja, el cual fue revisado y adaptado para Chile por el propio autor.

### **5.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO**

Un **modelo meteorológico numérico** es una simplificación abstracta de la atmósfera real, la cual es válida para un cierto dominio y escala de tiempo. El modelo está dado por un conjunto de ecuaciones y sus correspondientes soluciones numéricas para cuyo uso es necesario discretizar la atmósfera en tiempo y espacio. La resolución espacial y temporal de un modelo de mesoescala es mejor que la de un modelo de macroescala, pero no así que la de un modelo de microescala. En este estudio se trabajó a nivel de mesoescala y las resoluciones horizontales estudiadas fueron de 2 kilómetros y 1 kilómetro. La configuración de los fenómenos de mesoescala depende de efectos hidrodinámicos (i.e. canalización, efectos de rugosidad) y del carácter no-homogéneo del balance de energía, fundamentalmente debido a la variabilidad espacial de las características del terreno (i.e. uso de suelo, vegetación, agua), pero también debidas al tipo del terreno y su pendiente. Desde el punto de vista de la evaluación del potencial eólico, resulta de particular interés modelar las variaciones térmicas donde se considere una muy limitada influencia de las fuerzas sinópticas.

Los modelos de mesoescala son utilizados para diversos propósitos, los cuales incluyen pronóstico del tiempo, estudios de contaminación, e investigación pura. Durante la última década se han desarrollado sofisticados modelos de mesoescala como RAMS, MC2, MM5, ETA, NMM. La complejidad física de estos modelos permite hoy en día simulaciones muy precisas. Sin embargo, su uso requiere extensos y muy costosos recursos computacionales, además de años de experiencia en el campo de las ciencias atmosféricas. Durante el curso de este estudio se aplicó un modelo de mesoescala aplicable a la modelación eólica, y que puede ser utilizado en un computador personal. Los objetivos de la modelación mesoescala incluyeron: (a) una adecuada precisión en las simulaciones numéricas de los procesos de mesoescala que considerara la influencia de los parámetros de escala sinóptica para la generación y evolución de los fenómenos de mesoescala, y (b) representar valores promedio estacionales de la velocidad del viento en un dominio de modelación con una resolución espacial no superior a 1000 metros.

En este estudio se utilizó el modelo **MetPhoMod** para simular campos de viento originados por frentes sinópticos y gradientes térmicos en la IV región de Coquimbo. Por medio de diferentes simulaciones se revisa la aplicabilidad de MetPhoMod hasta resoluciones de 1000 m.

A continuación se presenta una breve descripción del modelo, la cual se centra en los puntos más importantes para potenciales usuarios de MetPhoMod.

MetPhoMod, cuyas siglas en Inglés corresponden a **Meteorology and Photochemistry Model**, es un modelo euleriano de tres dimensiones que permite la interacción completa de procesos meteorológicos y química de fase gas en la mesoscala. La primera versión de este modelo fue desarrollada por Perego (1996). Silvan Perego realizó un upgrade del modelo a su actual versión 2.0 que ha estado disponible para el uso público, en forma gratuita, desde 1999<sup>1</sup>.

Con MetPhoMod es posible simular dinámica de fluidos, intercambios suelo-atmósfera, transferencias de radiación de onda corta y larga, nubes y lluvia, química de fase gas y emisiones. La mayoría de estos módulos puede ser activada o desactivada por el usuario. MetPhoMod utiliza una red cartesiana con puntos de grilla regulares y de sub-superficie. Estas características lo hacen particularmente apropiado para realizar simulaciones en terrenos complejos. El comportamiento de MetPhoMod a escalas pequeñas es desconocido, pero un espaciado de grilla tan pequeño como 100 metros es un input válido para el modelo. Durante las simulaciones realizadas en este proyecto se emplearon únicamente los módulos meteorológicos. La descripción siguiente se centra en los aspectos relevantes para ejecutar MetPhoMod, por lo que una descripción detallada de la física del modelo queda fuera de consideración. Para una descripción detallada referirse a Perego (1996). Todas las simulaciones fueron llevadas a cabo empleando la versión 2.0 de MetPhoMod.

### ***Estructura de la Grilla***

MetPhoMod usa un sistema de coordenadas cartesianas de geometría regular. Las distancias horizontales entre puntos de la grilla son constantes, pero las distancias verticales pueden variar. Para representar la topografía se requiere una categoría especial de celda-grilla de sub-superficie sin flujos laterales. Cuando se proporciona un modelo de elevación de terreno a MetPhoMod, este es automáticamente aproximado al límite superior o inferior más cercano de la celda correspondiente. Por lo tanto, la precisión del modelo de elevación de terreno depende de la distancia vertical entre celdas vecinas. Las alturas especificadas con "level" en la sección ENVIRONMENT del archivo de entrada a MetPhoMod

---

<sup>1</sup> [Http://www.giub.unibe.ch/klimet/metphomod/](http://www.giub.unibe.ch/klimet/metphomod/)

definen el techo y fondo de los cubos rectangulares que forman la grilla de modelación. Cada punto de grilla es automáticamente fijado en el centro de cada cubo rectangular y no necesita ser definido por el usuario. El modelo de topografía rectangular es mucho menos detallado que la topografía representada en un modelo con coordenadas que siguen la forma del terreno. Sin embargo, MetPhoMod puede manejar agudas pendientes, profundos valles, y otros ángulos agudos en topografía compleja con mayor precisión que la mayoría de los modelos basados en sistemas con coordenadas que siguen la forma del terreno (Perego, 1996).

### ***Dinámica***

Los fundamentos de cualquier modelo atmosférico de mesoscala están cimentados en un conjunto de principios de conservación. Los módulos dinámicos de MetPhoMod resuelven un conjunto simplificado de ecuaciones de Navier-Stokes, el cual está basado en Pielke (1984). Una descripción de las ecuaciones relevantes en MetPhoMod está fuera del marco de este informe, pero una presentación detallada de las mismas se encuentra en Müller (2001). Cabe destacar que no existe solución analítica para los conjuntos de ecuaciones diferenciales utilizadas en MetPhoMod por lo cual se requiere resolverlas a través de integración numérica. Las técnicas de integración numérica utilizadas en el caso de MetPhoMod pueden ser encontradas en Perego (1996).

### ***Condiciones de borde***

Cualquier modelo de mesoscala tiene condiciones de borde para las cuales todas las variables tienen que ser definidas o tratadas de forma diferente del resto del dominio de simulación. Las condiciones de borde pueden tener una gran influencia en la simulación. Normalmente, los valores simulados se deterioran al aproximarse al borde del dominio de simulación, dejando el centro del mismo sin perturbaciones. En otros casos, la reflexión de energía puede influenciar todo el dominio de simulación y producir velocidades de viento muy altas, irreales físicamente, para desembocar finalmente en la caída del modelo. En el primer caso, el problema se puede resolver extendiendo el dominio de simulación alrededor del área de interés. En el segundo caso, se deben plantear condiciones de borde más restrictivas, las cuales pueden considerar “damping” hacia un valor fijo de condición de borde para reducir numéricamente la cantidad de energía disponible. En MetPhoMod existen tres formulaciones de condiciones de borde para simulaciones aplicadas al mundo real:

*FREE*: los gradientes de las condiciones de borde del dominio de simulación son fijados en cero. Esta condición funciona satisfactoriamente para el borde

“downwind”, pero después de un tiempo normalmente conduce a una inestabilidad numérica en el borde “upwind”.

*SPONGE*: las condiciones de borde son fijadas en valores  $A_0$ . Para prevenir reflexión numérica los puntos cerca del borde son desechados hacia los valores fijos, una vez cada paso de tiempo. Entonces la ecuación prognostic de la variable  $\mathbf{A}$  tiene un término adicional que cobra mayor importancia hacia el borde del dominio de simulación:

$$\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = X - \frac{r}{\Delta t} (\mathbf{A} - A_0)$$

donde X representa los términos individuales en la ecuación para conservación de  $\mathbf{A}$ , r representa el grado de relajación, y  $\Delta t$  el paso de integración de tiempo. Los bordes laterales forman un borde con un espesor de 4 celdas a cada lado. Los grados de relajación son definidos como sigue:  $r_0=1$ ,  $r_1=0.5$ ,  $r_2=0.25$ ,  $r_3=0.125$ , y  $r_4=0.0625$ .

*AUTO-CONSTANT*: aquí la velocidad del viento se fija en un valor para todo el borde del dominio del modelo.

### ***Efectos de Superficie***

En un modelo de mesoscala las fuerzas de circulación no provienen únicamente de la velocidad del viento y gradientes de presión. Muchos procesos meteorológicos pueden ser forzados por la superficie de la tierra a raíz de la elevación del terreno, variaciones de pendiente del mismo, y diferentes flujos superficiales de calor, humedad y momentum.

## **5.2 INICIALIZACION DE METPHOMOD**

A continuación se presentan fundamentalmente puntos relacionados con la metodología y datos utilizados en la modelación:

- (a) se definen los dominios de modelación, y además se presentan los estudios preliminares requeridos para comenzar las simulaciones
- (b) se determina el tiempo de modelación necesario para alcanzar un estado de equilibrio en las condiciones iniciales
- (c) se ilustra la importancia de la resolución espacial en la modelación
- (d) se identifican los valores iniciales utilizados para la modelación

- (e) se presentan los parámetros superficiales requeridos para el balance de energía, los cuales en general demandan el uso de información espacial del uso de suelo

Se opto por los software ENVI (The Environment for Visualizing Images) e IDL (Interactive Data Language) para interactuar con todos los procesos de input, output, análisis, y visualización involucrados en la modelación con Metphomod. Algunas de las rutinas IDL utilizadas pertenecen al Institute of meteorology, Climatology and Remote Sensing de la University of Basel y otras fueron generadas específicamente para este estudio.

### ***Inicialización basada en Kalthoff et al. (2003)***

Esta modelación utilizo una resolución horizontal de 2km para un área que cubre desde Tongoy a los Vilos. Esta primera simulación se utilizo para comparar los resultados de Metphomod con los del modelo de mesoscala utilizado en la investigación llevada a cabo por Kalthoff et al. La figura 5.2 presenta los resultados puntuales de modelación para las 15 hrs de un día de verano.

El modelo se ejecuta hasta alcanzar un estado estacionario, lo que toma solo un par de horas (ver Figura 5.1).

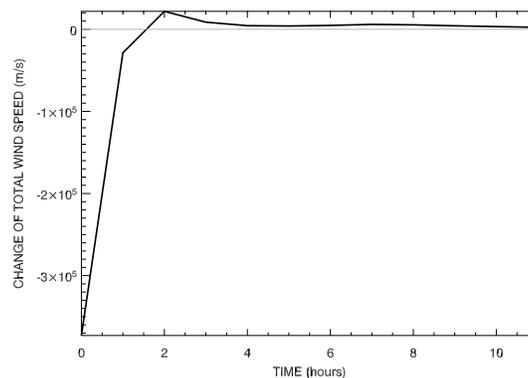


Figura 5.1: Tiempo requerido para alcanzar estado estacionario

### ***Generación de parámetros físicos para el Modelo***

Se utilizo la más precisa y reciente fuente de topografía disponible para Chile, la cual fue generada por el proyecto “Shuttle Radar Topography Misión (SRTM)” de la NASA. La topografía fue convertida a una proyección rectangular, y se escogió UTM para adaptarse a MetPhoMod. La resolución horizontal

disponible en la topografía, originalmente de 90 m, se extrapolo a las resoluciones empleadas durante las simulaciones.

Por otra parte, se realizó una inspección en terreno del tipo de vegetación existente en el dominio de modelación, lo que fundamenta la suposición de propiedades de desierto para derivar los parámetros físicos necesarios en el modelo.

### ***Configuración de Metphomod***

El modelo MetPhoMod se ejecuto en un modo no-hidroestático y la resolución fue de 2 y 1 kilómetros. El dominio de modelación fue de 100x100 y 70x70 puntos de grilla en el plano horizontal y 37 niveles verticales. Las resoluciones verticales fueron: 15 m hasta los 240 snm, 30 m hasta los 600 snm, 50 m hasta los 850 snm y luego se incremento la resolución desde 300 m hasta 500 m hasta alcanzar los 5000 m snm, borde superior del modelo.

### ***Inicialización completa basada en reanalysis data***

En este caso se utilizaron datos de tipo Reanalysis, los cuales fueron descargados desde el NOAA-CIRES Climate Diagnostics Center, Boulder, Colorado, concretamente desde su página Web <http://www.cdc.noaa.gov/>.

Estos datos son cada 6 horas y 2.5° de resolución horizontal. Se empleo el año 2003 como caso de estudio, sin la intención de atribuir a este año en particular la condición de año representativo de la condición climatológica de la región, sino solamente el año escogido para demostrar la aplicación del modelo de mesoscala.

Para el dominio del modelo los campos espaciales de altura geopotencial, temperatura, humedad y viento fueron bi-linealmente interpolados para la grilla del modelo.

Los niveles verticales empleados fueron 1000 hPa, 925 hPa, 850 hPa, 700 hPa, 600 hPa, 500 hPa. El modelo requiere "virtual potencial temperatura". Se empleo una interpolación vertical, teniendo mucho cuidado en mantener las condiciones dinámicas iniciales dadas en los archivos de reanálisis. Se efectuó una interpolación lineal vertical para la temperatura y humedad. La presión fue calculada basada en estos perfiles verticales. Con estos perfiles se calcularon los "virtual potencial temperature" y la "top pressure" para MetPhoMod. Para el caso del viento se realizó un calculo similar al anterior, excepto que la parte logarítmica partió desde 0 m hasta 1000 hPa, donde la velocidad a 0 m se considero 0 m/s. Las condiciones de borde tienen una resolución de 6 hr, y en el caso de velocidad del viento fueron computadas como valores espaciales medios sobre cada nivel

vertical del modelo. Esto significa que la velocidad del viento en todos los borde laterales es la misma. Esto fue realizado para asegurar la conservación de la masa en un dominio reducido, como fue el caso. El proceso de inicialización (rutina) puede generar la variabilidad espacial en los bordes laterales para la velocidad del viento, pero esto solo se recomienda para dominios mucho mas grandes que el caso de estudio en este proyecto. Para temperatura y humedad la variabilidad espacial en los bodes laterales fue considerada. En el techo del modelo el campo de vientos geostrófico (con resolución temporal de 6 hr) determina las fuerzas sinópticas. La temperatura superficial de la tierra se requiere al inicio de modelo. La temperatura se adapta rápidamente, y luego de un día debe ser la correcta. Debido a la falta de datos experimentales, se utilizaron los datos de reanálisis, se asumió que la T decrece  $0.5^{\circ}$  cada 100m, y con el DTM se calculo entonces temperatura superficial de la tierra. La T a 2 m de profundidad, la cual no cambia durante la simulación, se asumió 3 K bajo la temperatura superficial de la tierra. La T del océano se asumió homogénea y los valores fueron tomados desde reanálisis y observaciones experimentales.

### ***Dominio de Modelación***

Los niveles verticales consideran 100 m de espacio entre niveles hasta los 3000 m. Se considero además un nivel adicional a los 7.5 asl para considerar la interacción entre el océano y la tierra. Después de los 3000 m el espacio entre niveles va desde los 150 m hasta los 600m, hasta el techo del modelo que es 5000m asl. Este dominio vertical con equiespaciado se requirió porque las alturas bajo 3000 m asl aparecen con una frecuencia importante en el DTM del dominio de modelación.

### **Comparación de los resultados de Modelación**

Los resultados alcanzados con MetPhoMod se compararan con mediciones en terreno, y con los resultados obtenidos por otros estudios en el área realizados hasta la fecha.

### **5.3 RESULTADOS**

En las siguientes páginas se presenta resultados gráficos de promedios de velocidad del viento a 50 metros sobre el nivel del suelo.

La figura 5.2 muestra el resultado de una modelación que utilizo una resolución horizontal de 2km para un área que cubre desde Tongoy a los Vilos. Los resultados son de carácter específico, en este caso para las 15 hrs de un día de verano.

La figura 5.3 presenta el Modelo Digital de Terreno (MDT) del área de modelación seleccionada en este estudio para calcular la variabilidad estacional y horaria de la velocidad del viento.

La figura 5.4 muestra la velocidad media del viento calculada por el modelo para Enero del año 2003 a 50 metros de altura sobre el nivel del suelo, y la figura 5.5 la desviación estándar media del viento para el mismo mes. Las figuras 5.6, 5.7, 5.8, 5.9, 5.10 y 5.11 replican lo anterior para los meses de Abril, Julio y Septiembre respectivamente.

Las figuras 5.12, 5.13, y 5.14 introducen la velocidad promedio horario a 50 metros para el mes de Enero del año 2003. Por su parte las figuras 5.15, 5.16, y 5.17 hacen lo mismo para el mes de Julio del año 2003.

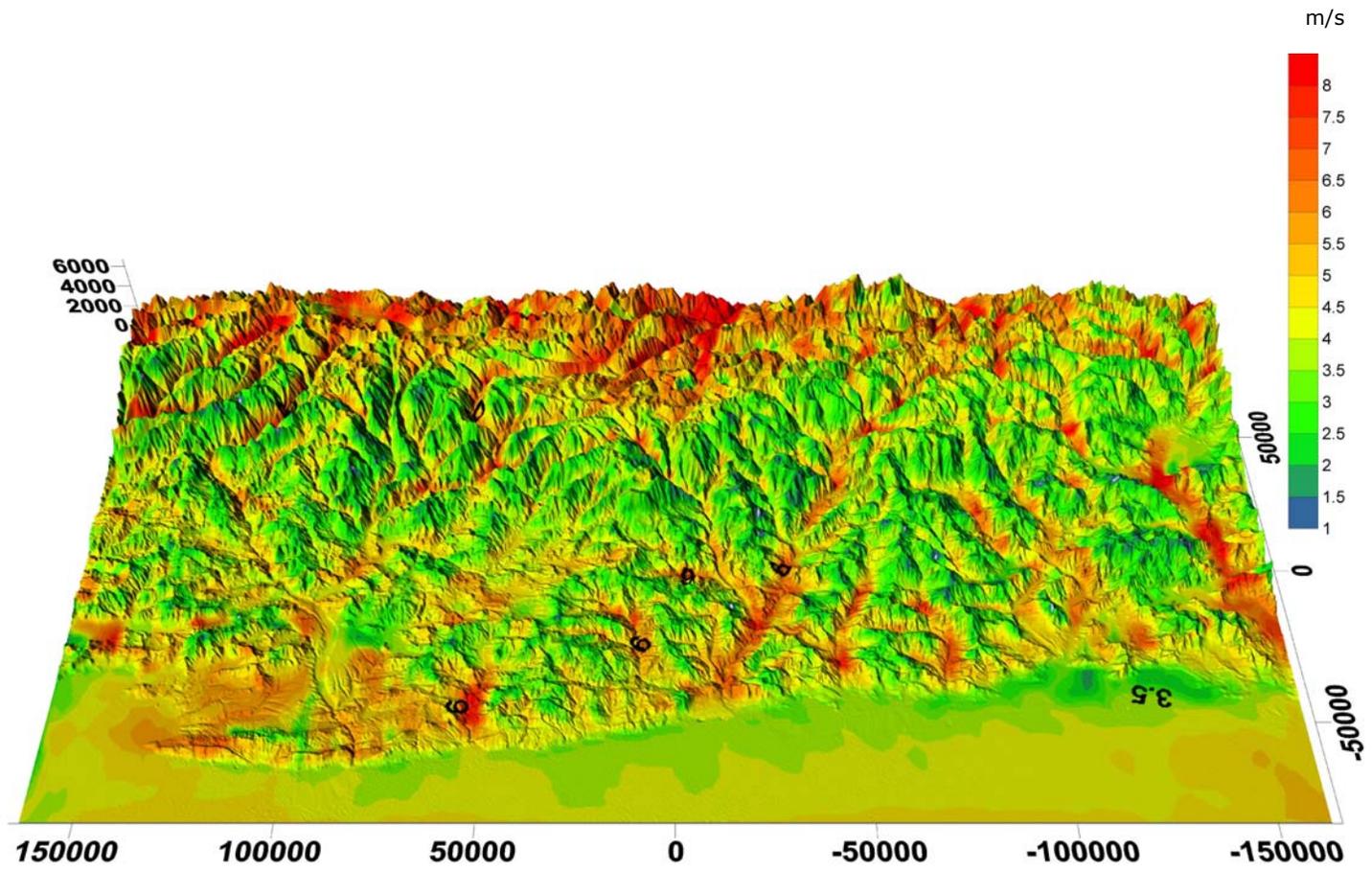


Figura 5.2 Modelación basada en Kalthoff et al. (2003)

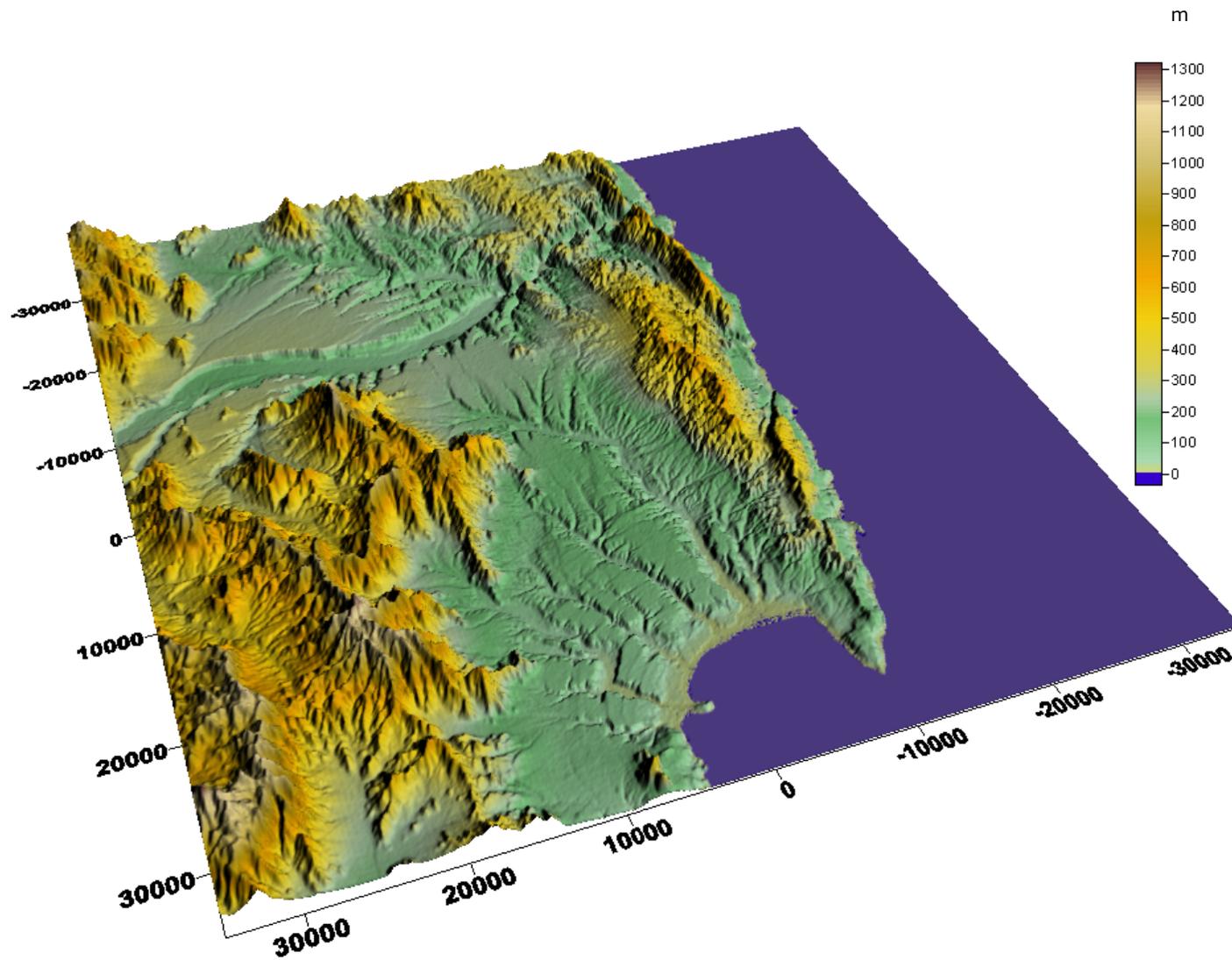


Figura 5.3 Modelo Digital de Terreno del dominio de Modelación (70 km x 70 km)

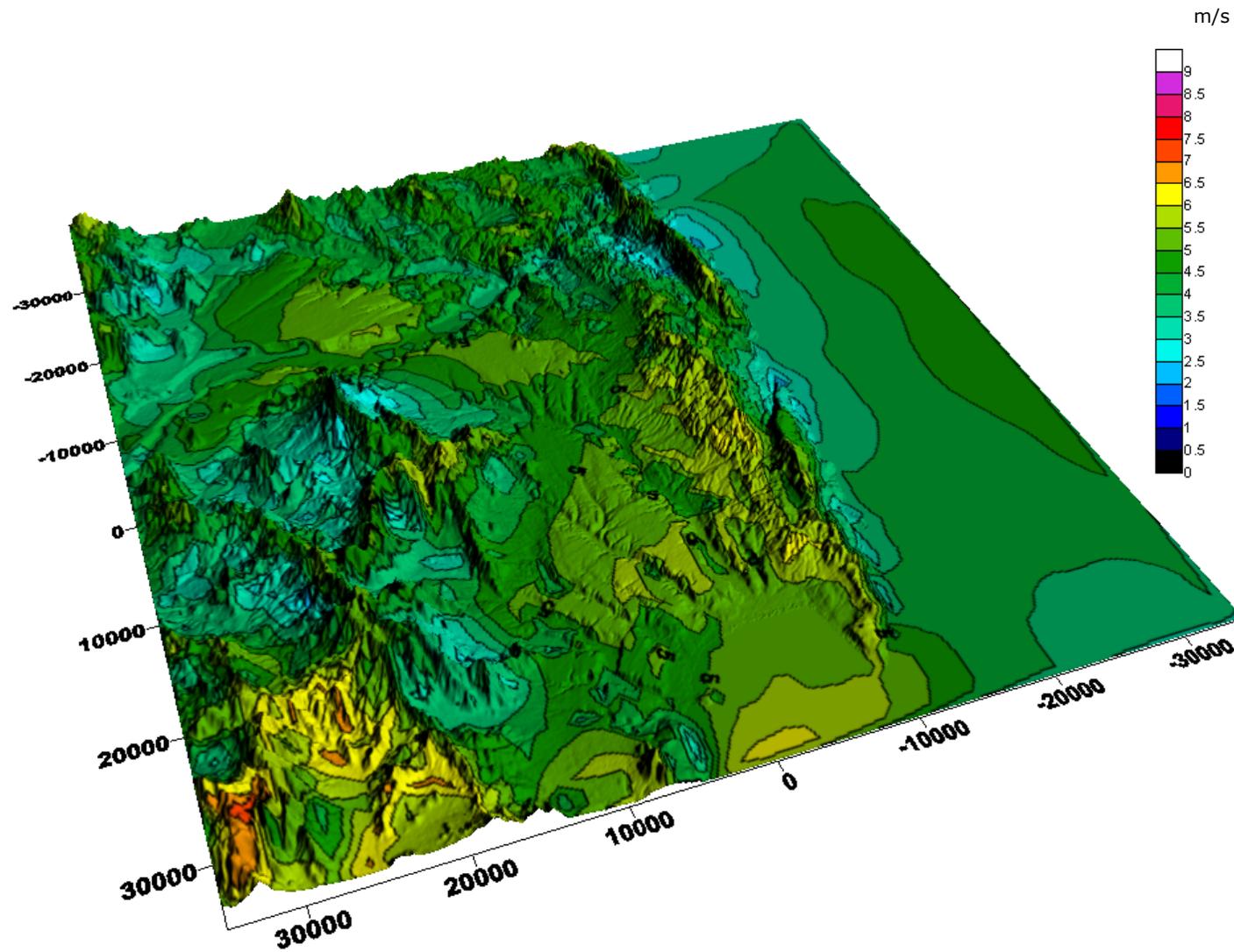


Figura 5.4 Velocidad media del viento para Enero 2003 a 50 metros

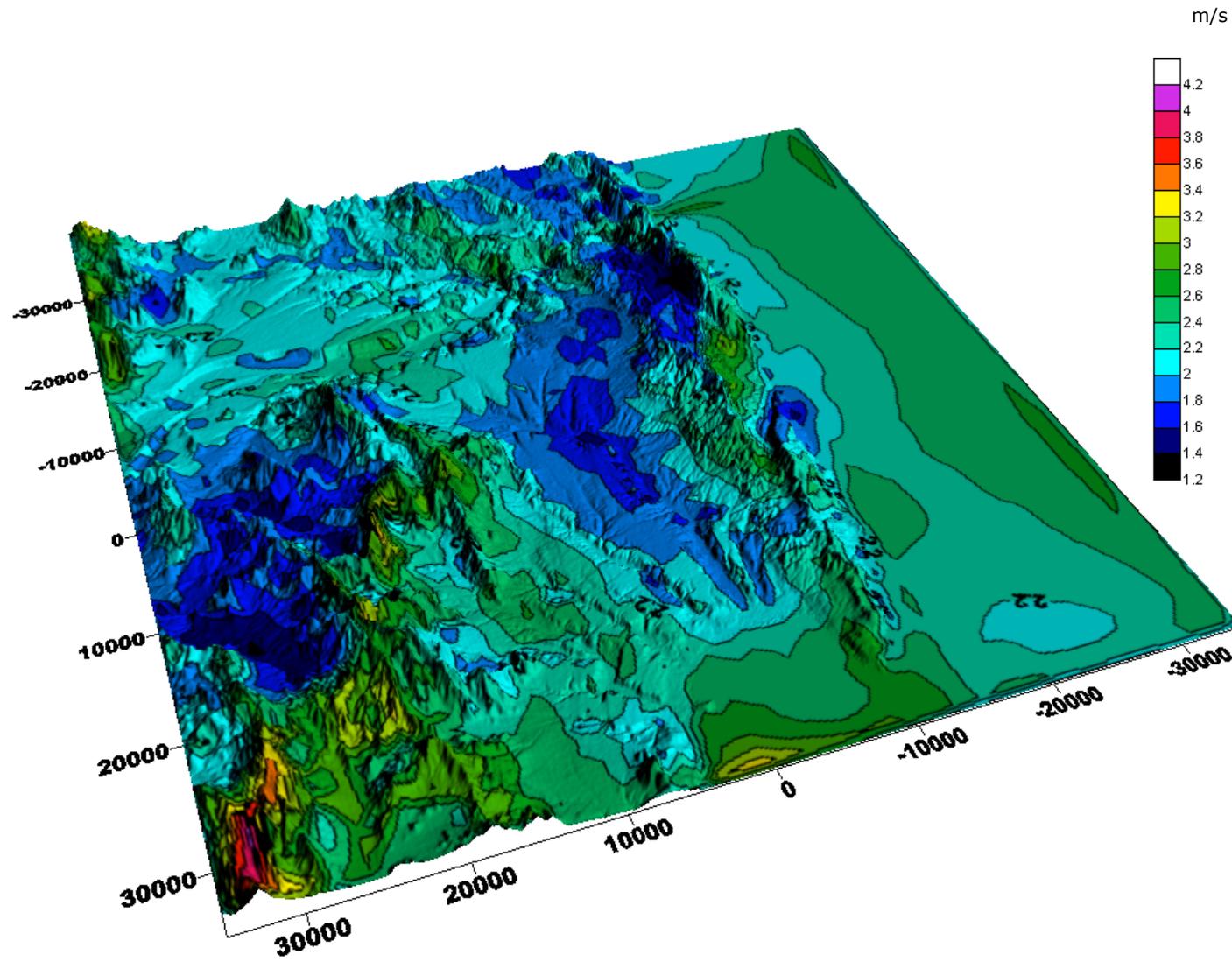


Figura 5.5 Desviación standard media del viento para Enero 2003 a 50 metros

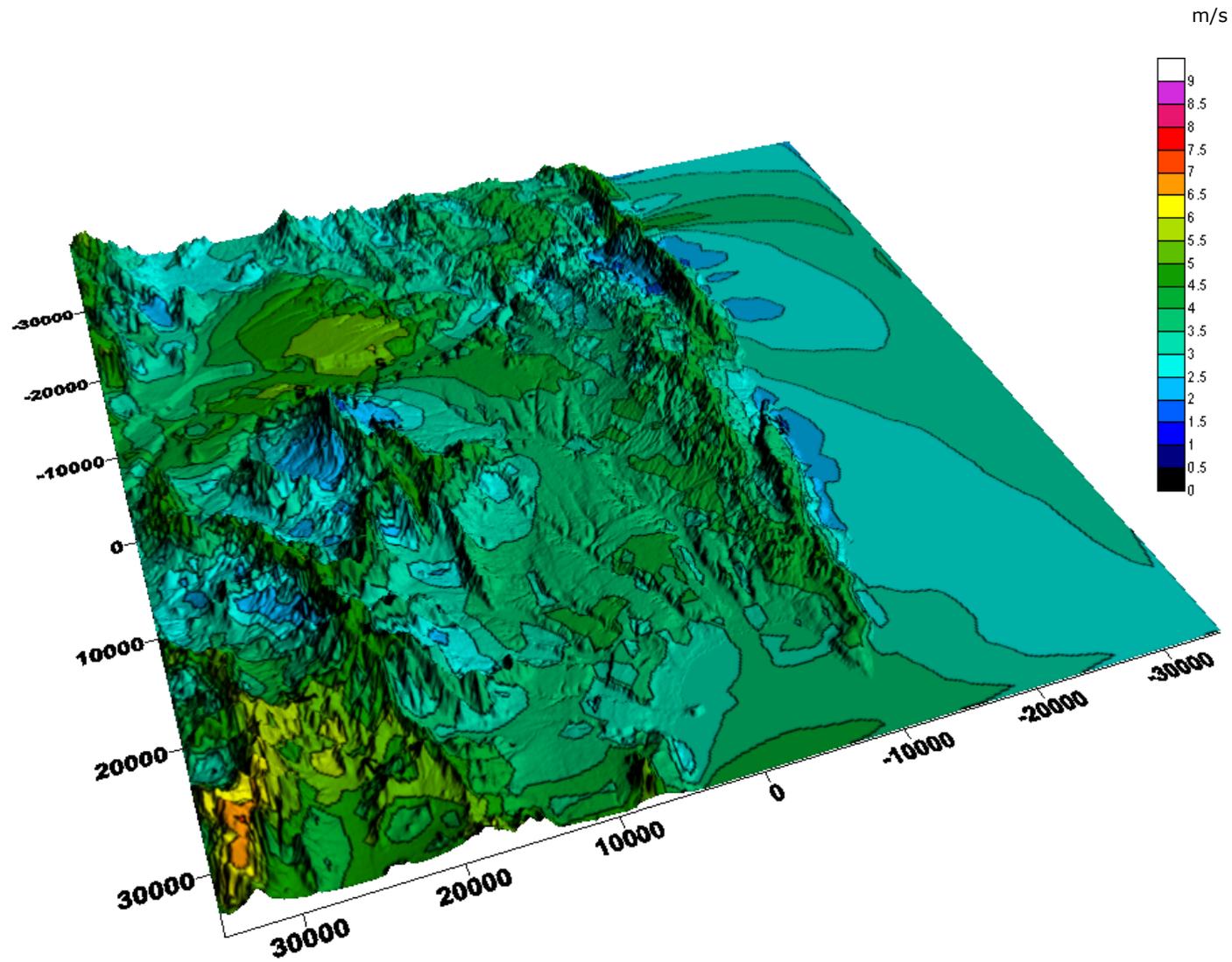


Figura 5.6 Velocidad media del viento para Abril 2003 a 50 metros

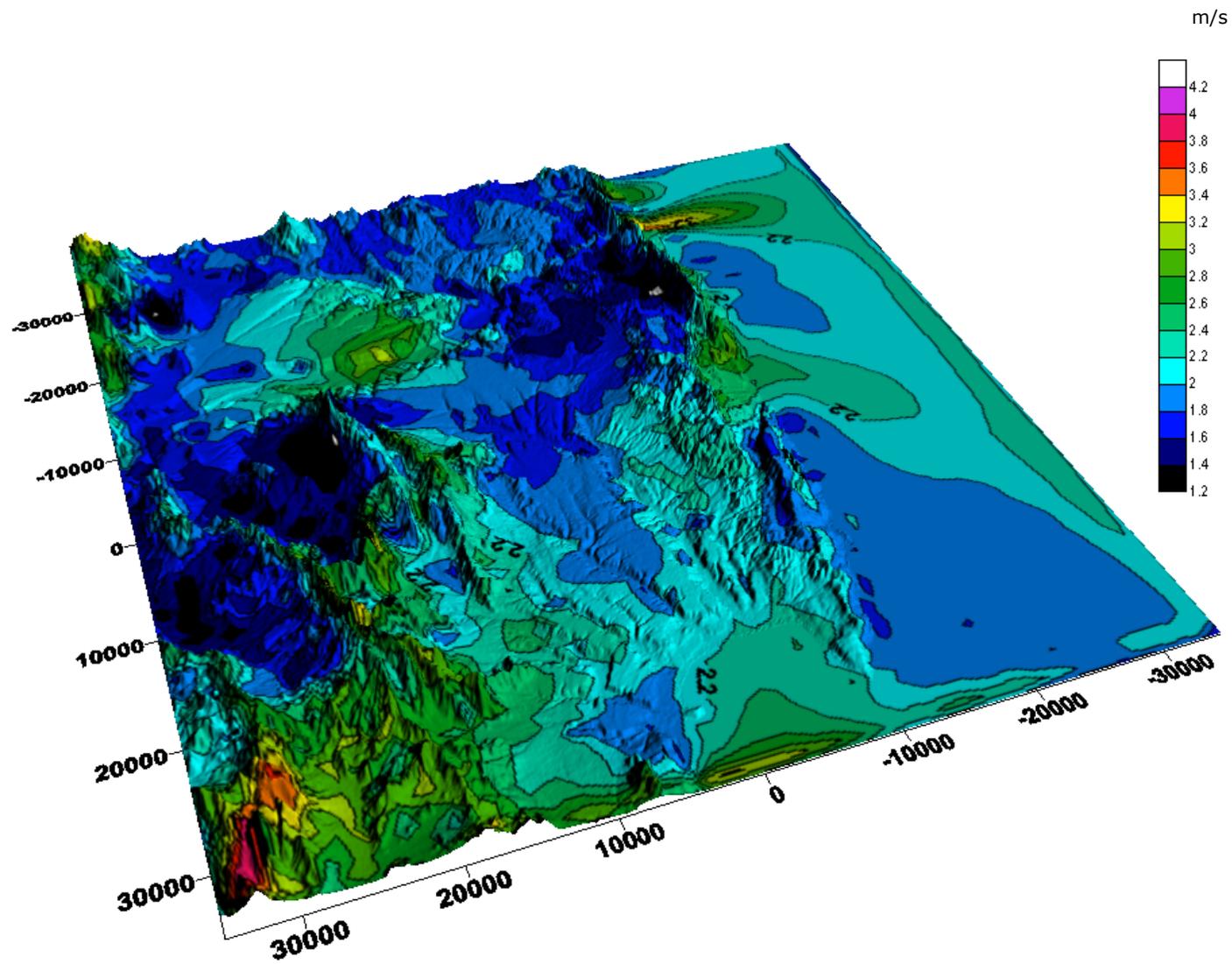


Figura 5.7 Desviación standard media del viento para Abril 2003 a 50 metros

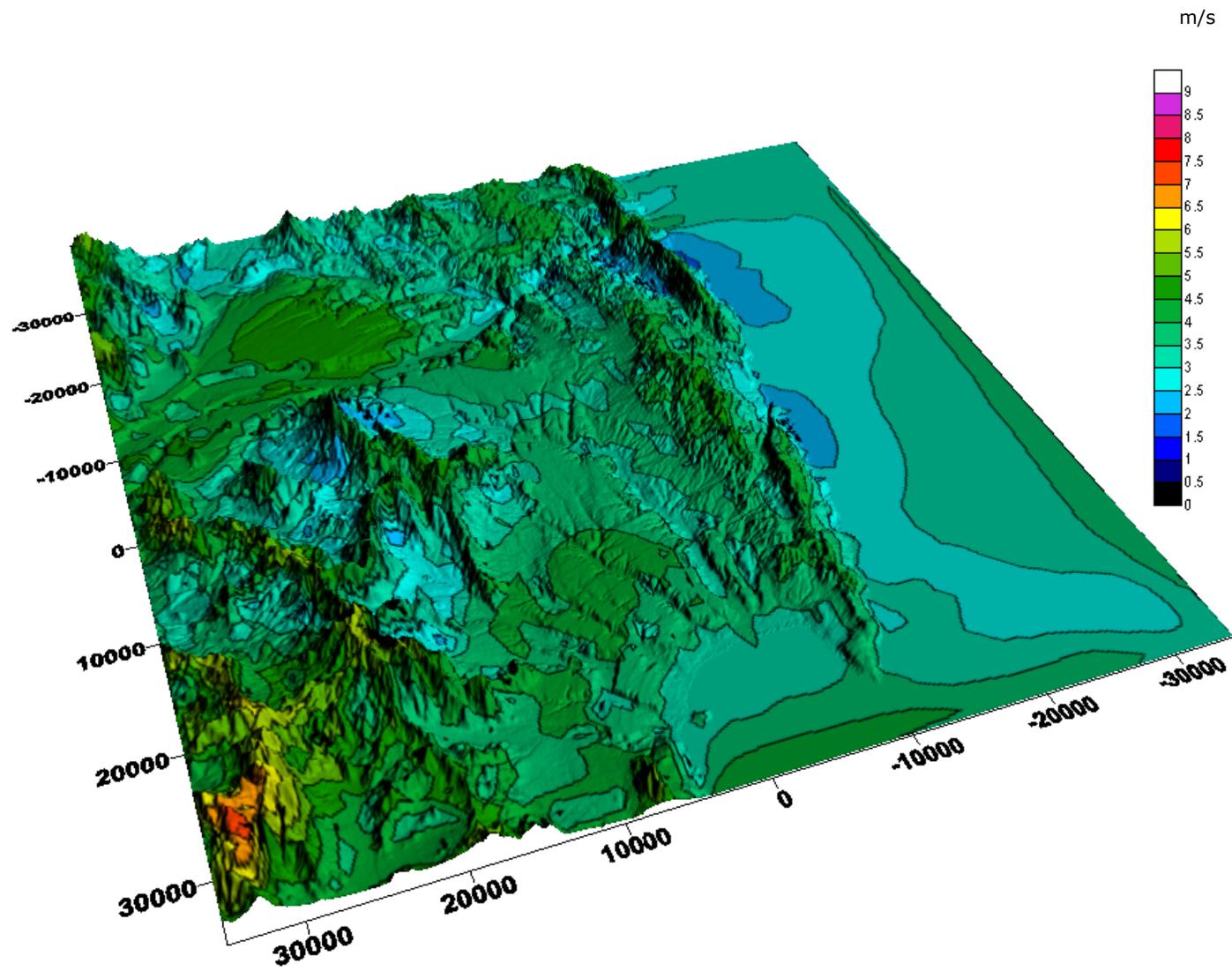


Figura 5.8 Velocidad media del viento para Julio 2003 a 50 metros

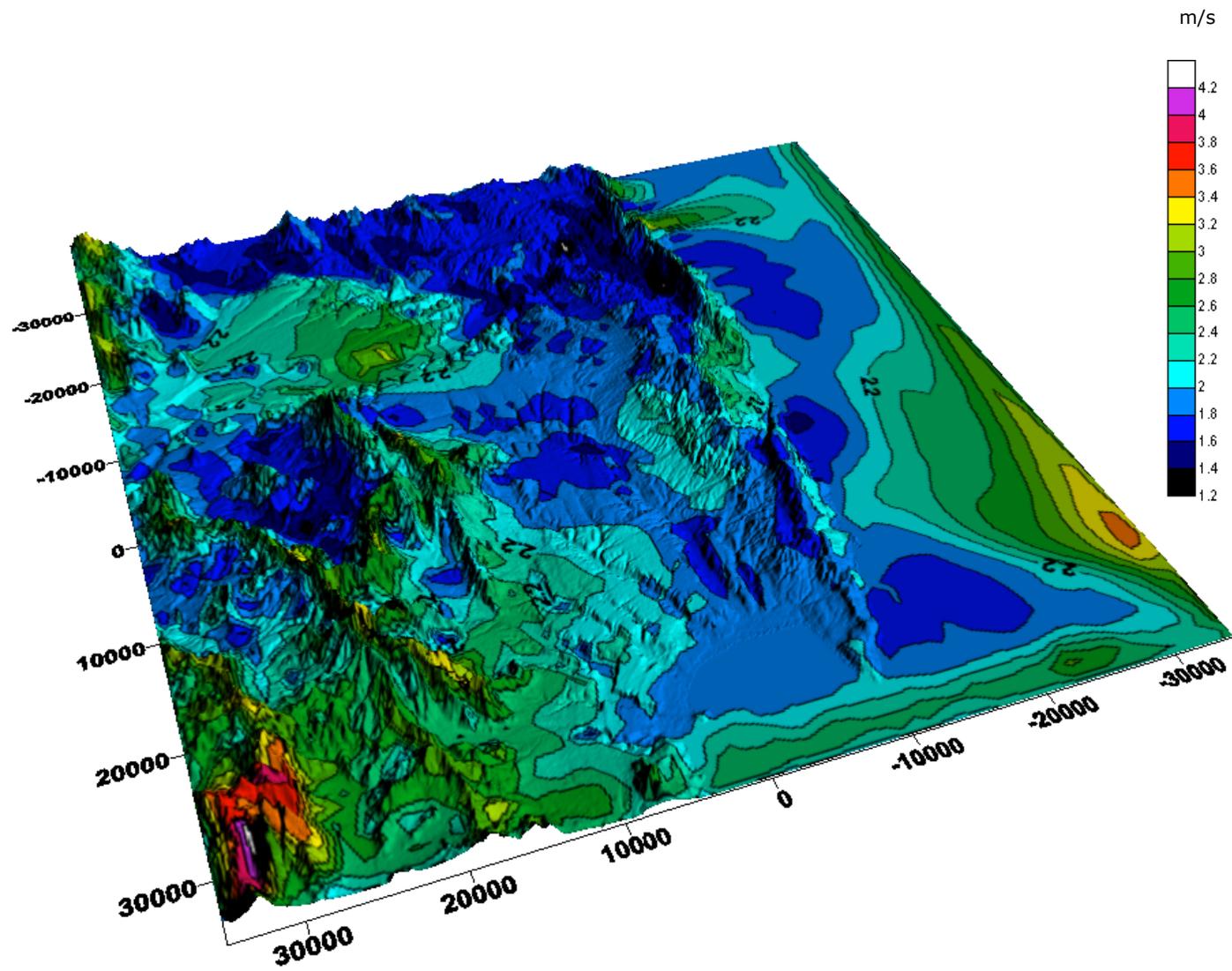


Figura 5.9 Desviación standard media del viento para Julio 2003 a 50 metros

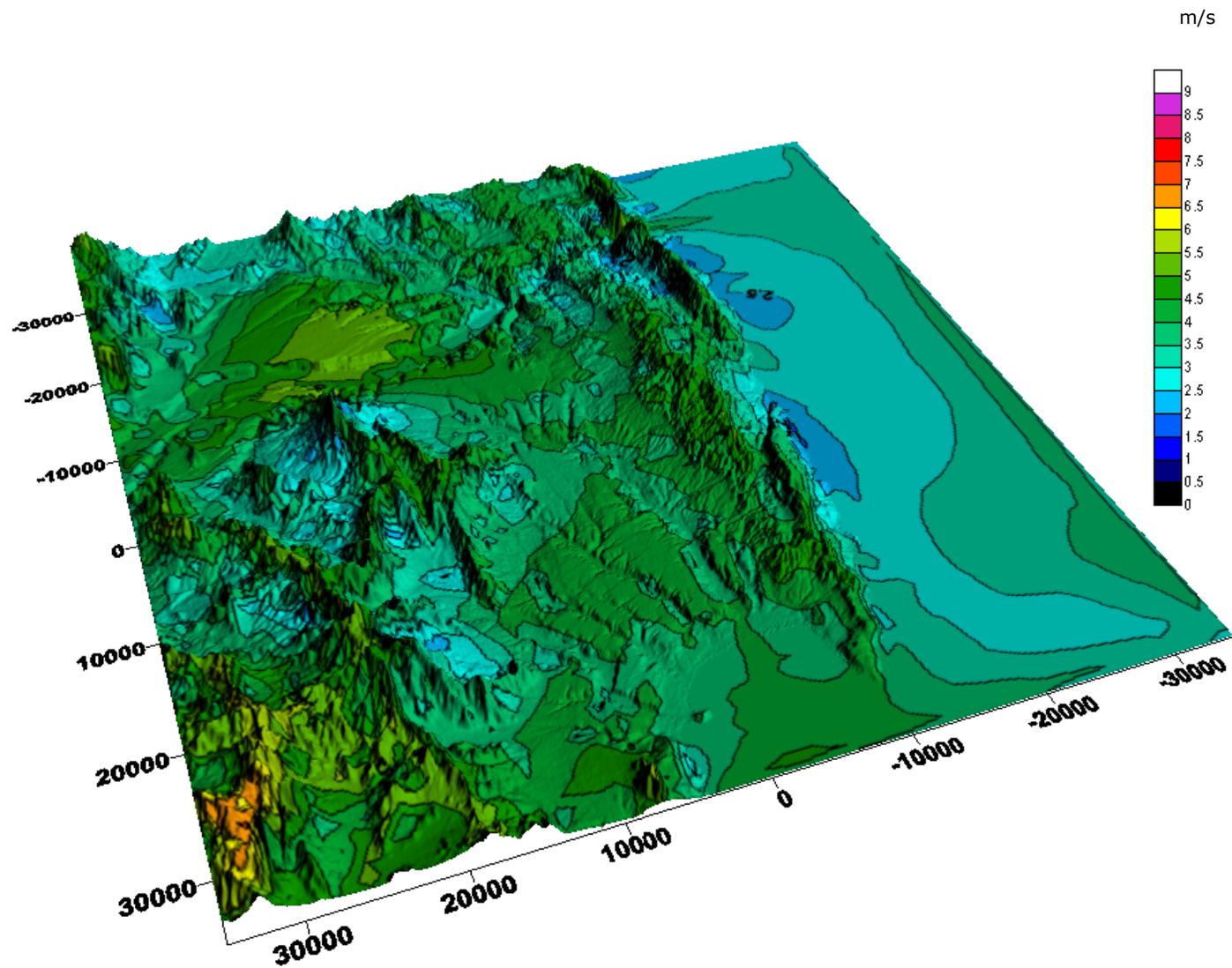


Figura 5.10 Velocidad media del viento para Septiembre 2003 a 50 metros

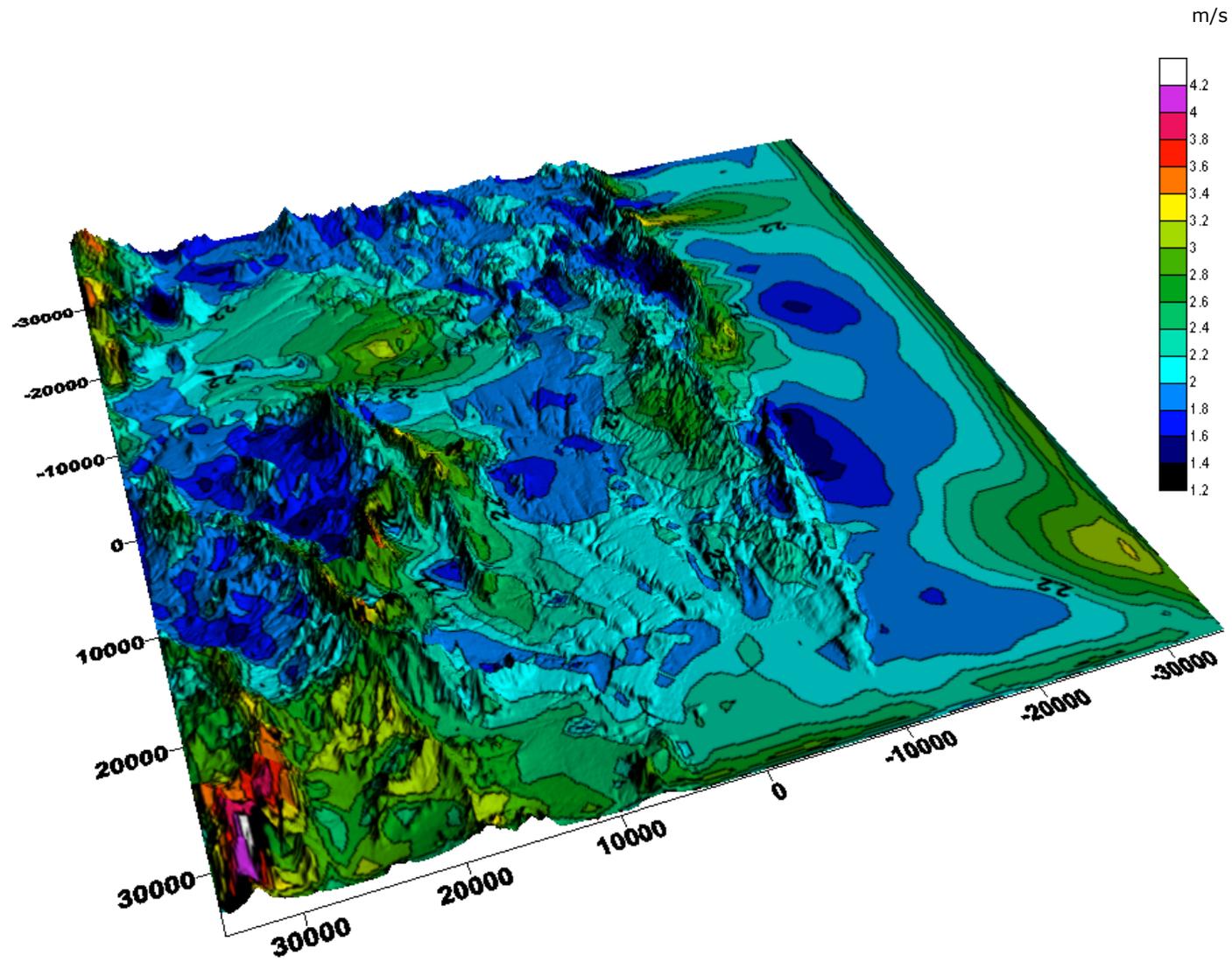


Figura 5.11 Desviación standard media del viento para Septiembre 2003 a 50 metros

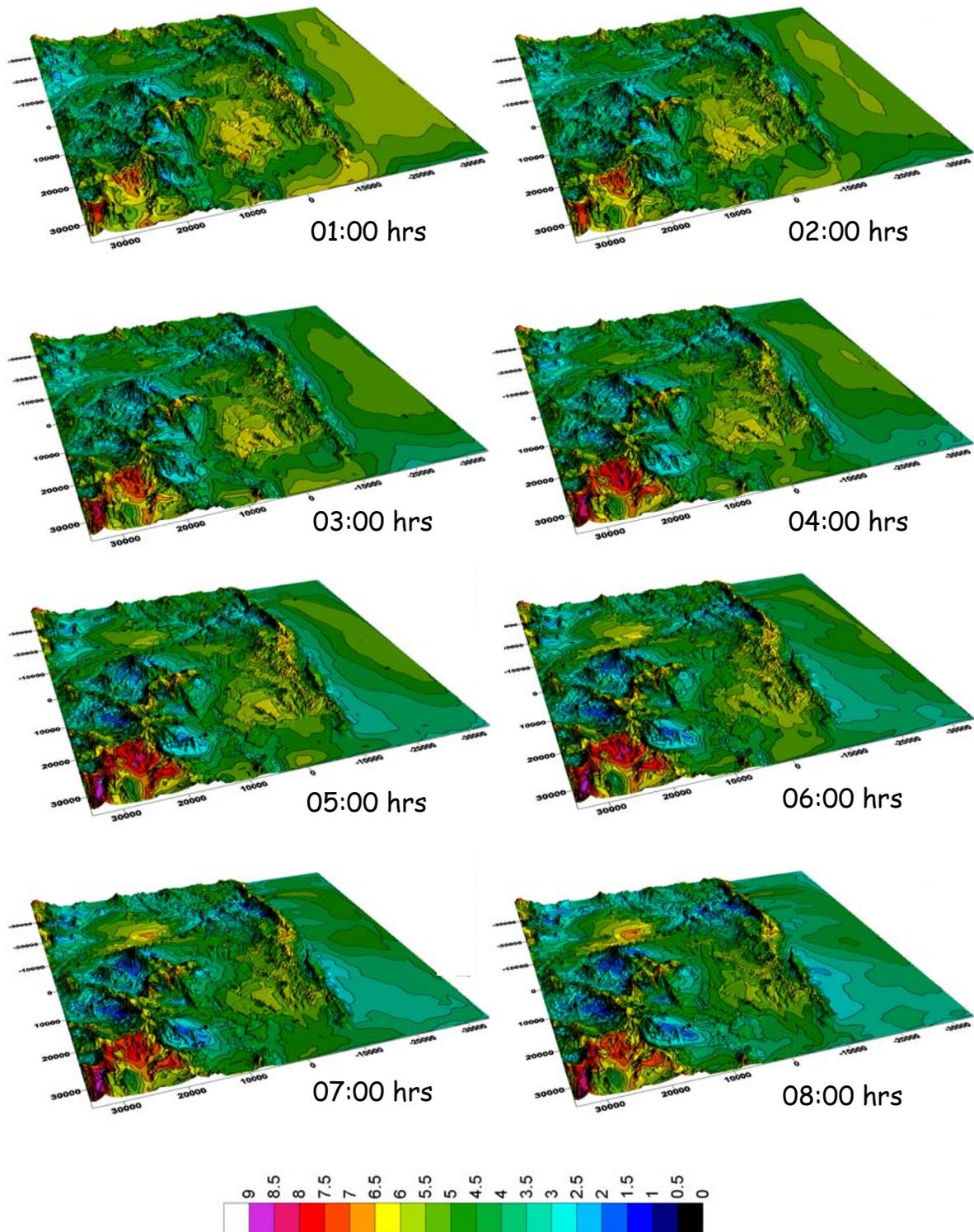


Figura 5.12 Velocidad Promedio Horario (m/s) a 50 metros  
mes de Enero

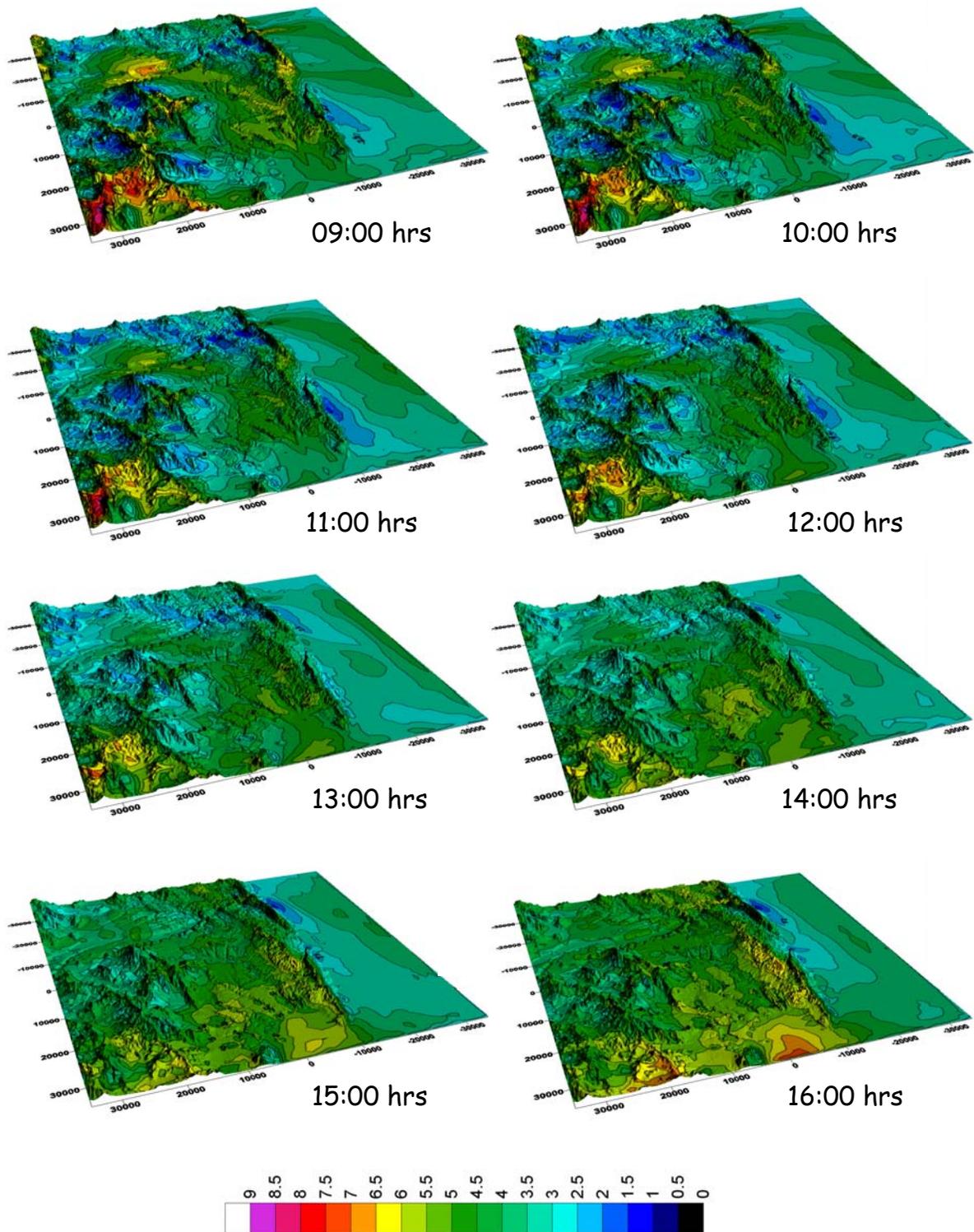


Figura 5.13 Velocidad Promedio Horario (m/s) a 50 metros  
mes de Enero

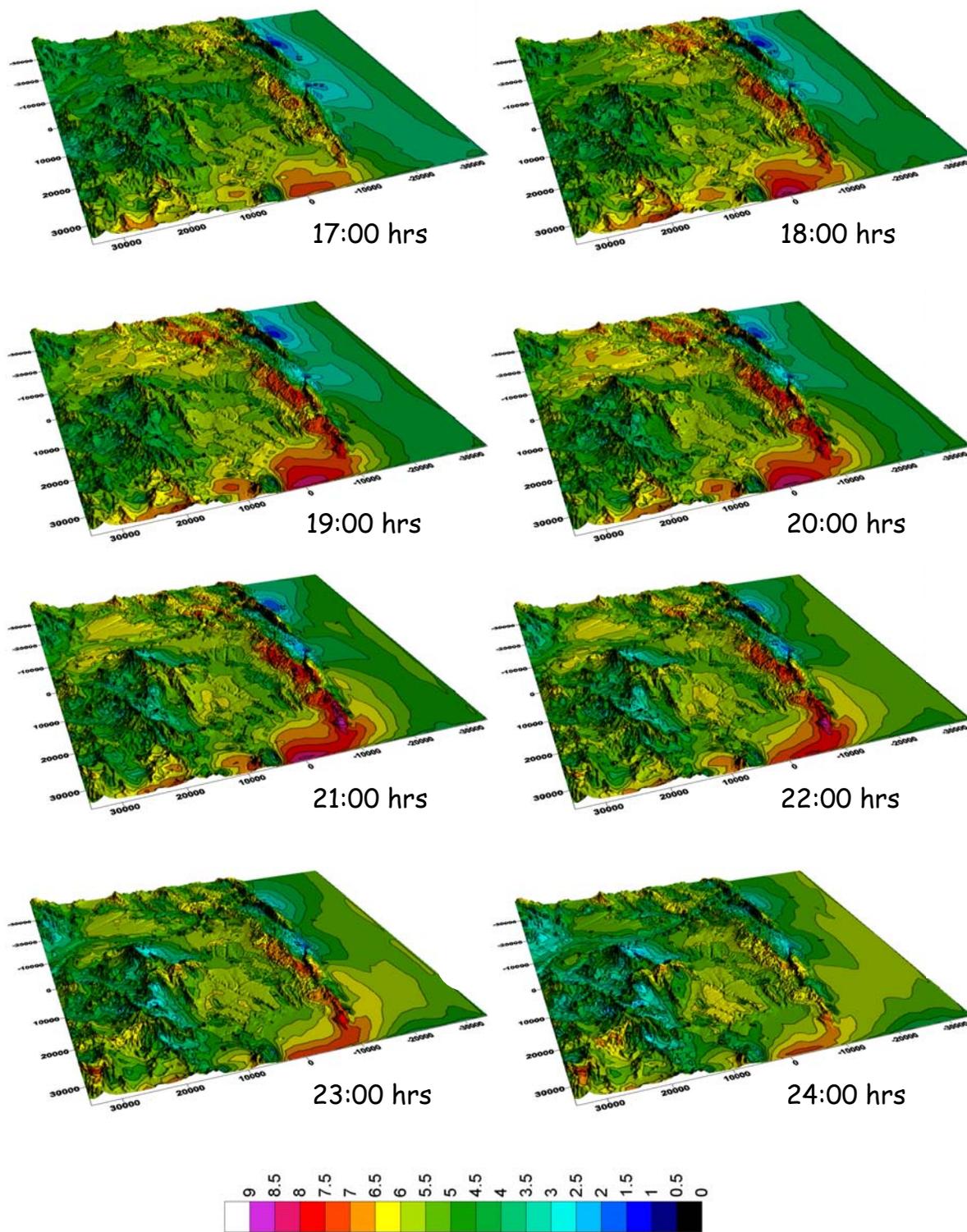


Figura 5.14 Velocidad Promedio Horario (m/s) a 50 metros  
mes de Enero

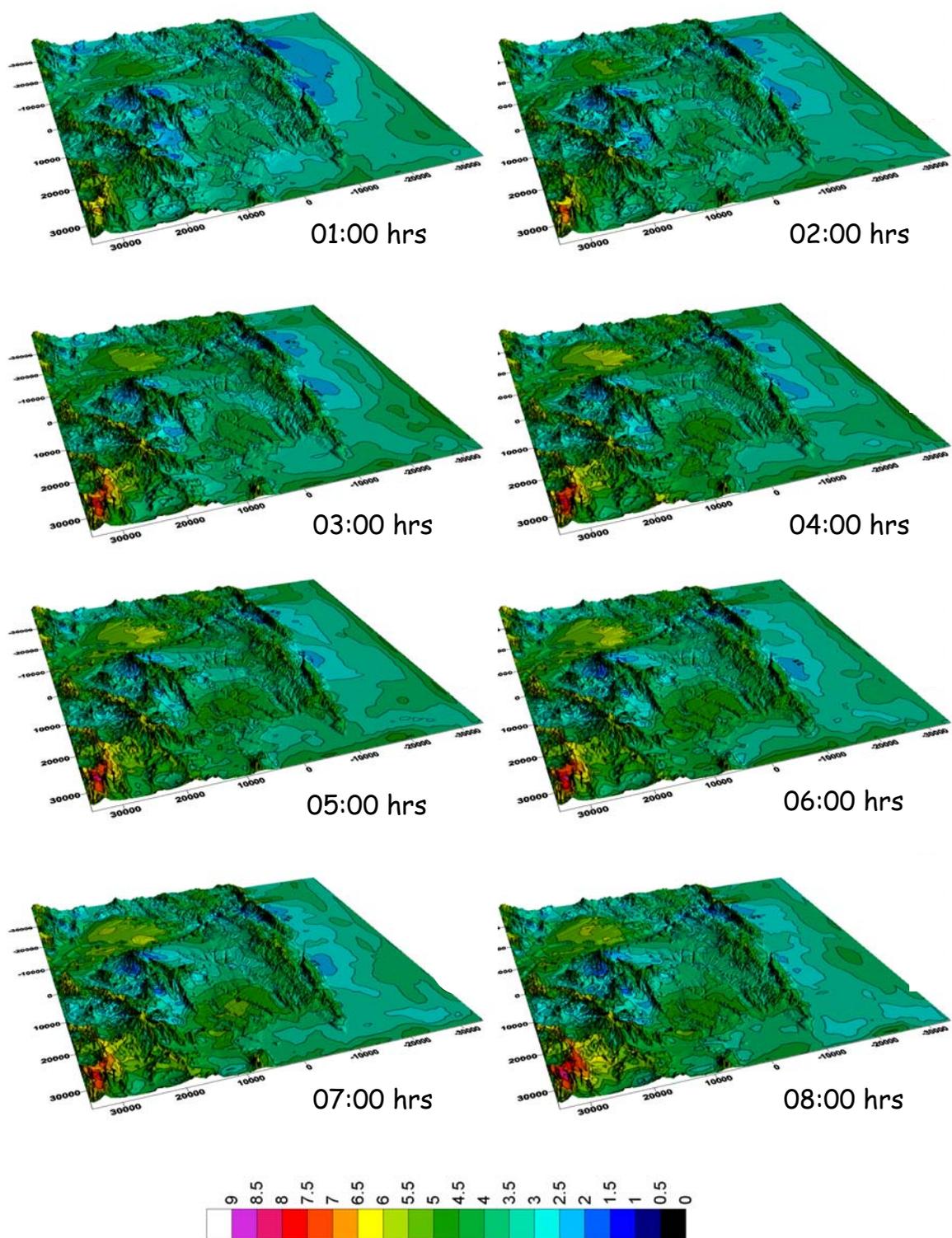


Figura 5.15 Velocidad Promedio Horario (m/s) a 50 metros  
mes de Julio

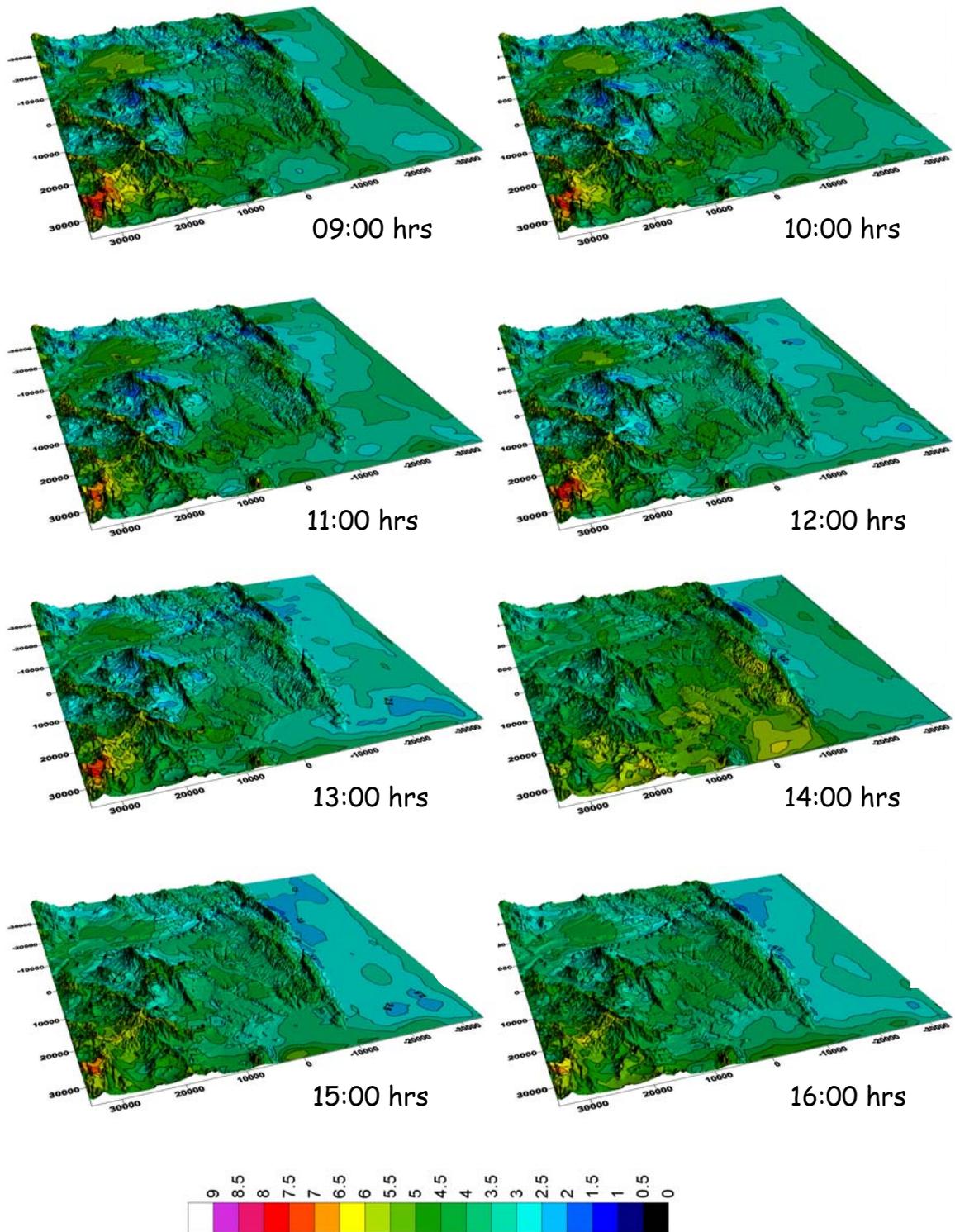


Figura 5.16 Velocidad Promedio Horario (m/s) a 50 metros mes de Julio

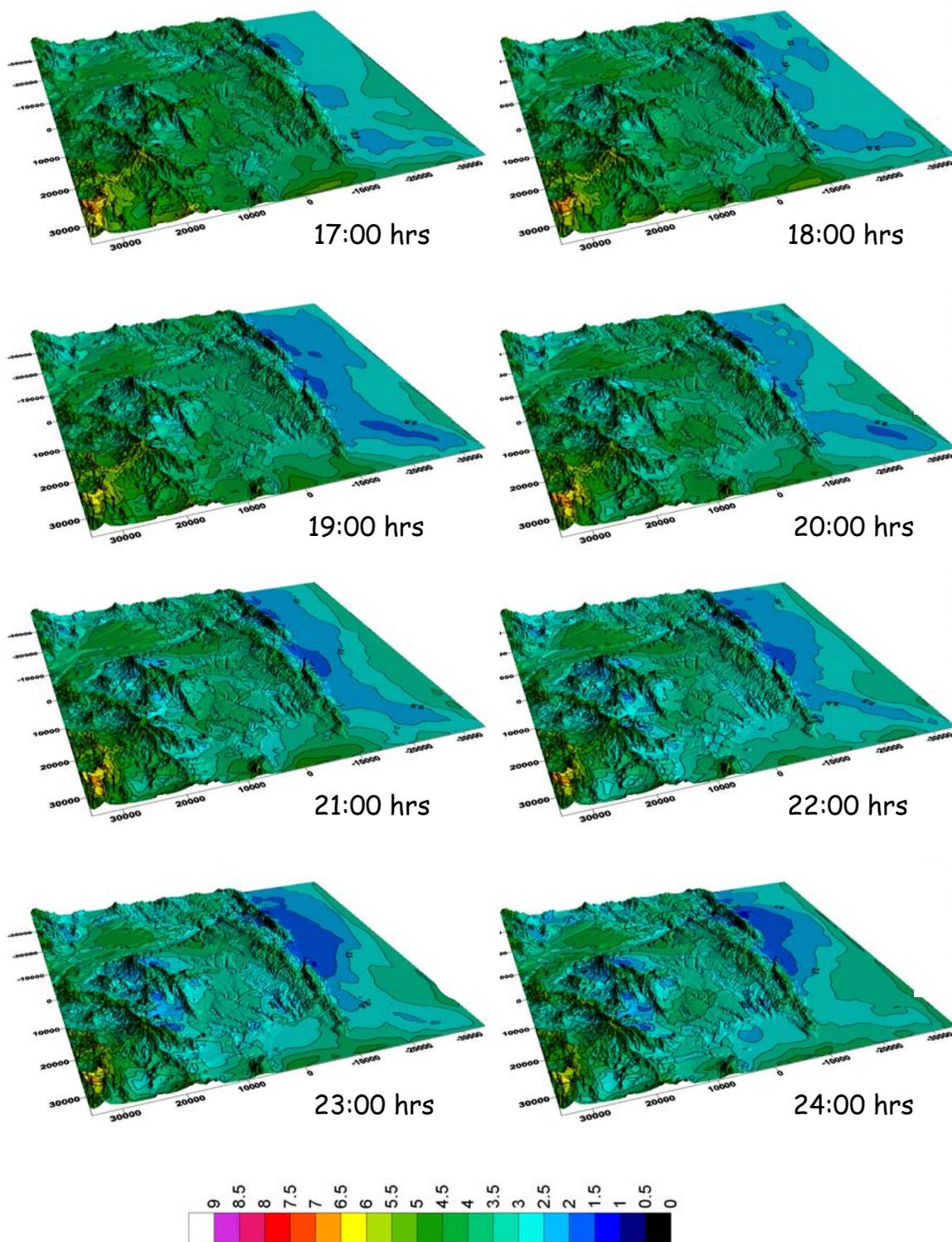


Figura 5.17 Velocidad Promedio Horario (m/s) a 50 metros mes de Julio

## **[6] OTROS RESULTADOS DEL ESTUDIO**

En la sección anexos se describe el Sistema de Información Geográfica Eólico, y la aplicación independiente de plataforma Arcview para difundir los resultados del Estudio. Además se implemento como parte de este estudio una página Web que presenta los resultados mas importantes del mismo.

Además, se entrega en forma digital la base de datos (archivos EXCEL) de las estaciones meteorológicas pertenecientes a la segunda etapa de este estudio.

A continuación se introducen un par de aspectos interesantes con relación a la evaluación global del recurso eólico y a la evaluación del recurso costa afuera en Chile.

El siguiente mapa corresponde a una publicación que ha tenido amplia difusión, Archer, C. & Jacobson, M. (2005), la cual presenta un análisis de tipo global del potencial eólico. Parece interesante destacar esta publicación como un nuevo elemento de referencia en el estudio del potencial eólico. Además en las figuras 7.2 y 7.3 se presentan los resultados del análisis de los datos de imágenes QSCAT para el período 1999-2002 (Proyecto FONDEF D0111165), el cual permite tener una visión general del comportamiento de la velocidad del viento en las costas de Chile. Cabe destacar aquí que los colores calidos representan valores bajos de velocidad y los colores fríos valores altos de velocidad del viento.

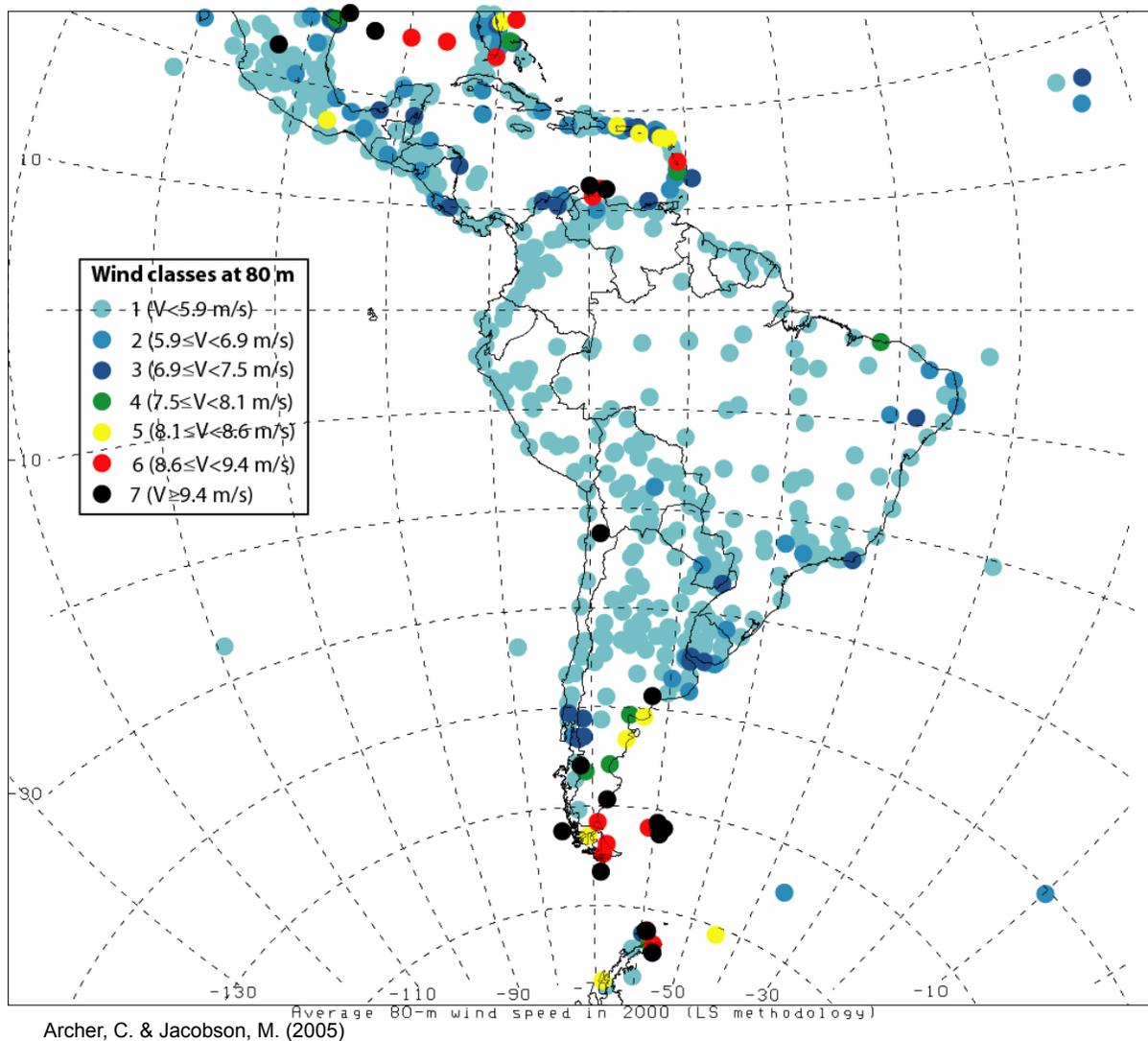


Figura 7.1 Evaluación global del potencial eólico

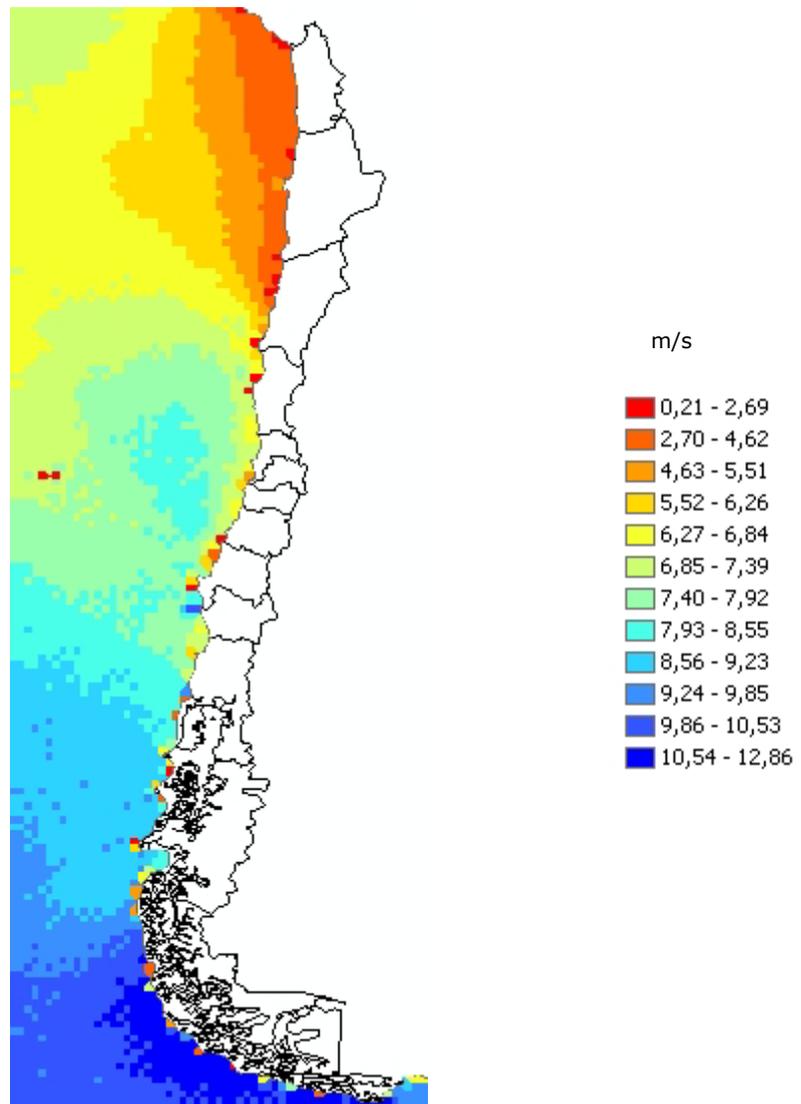


Figura 7.2 Promedio anual escaterómetro (1999-2002)

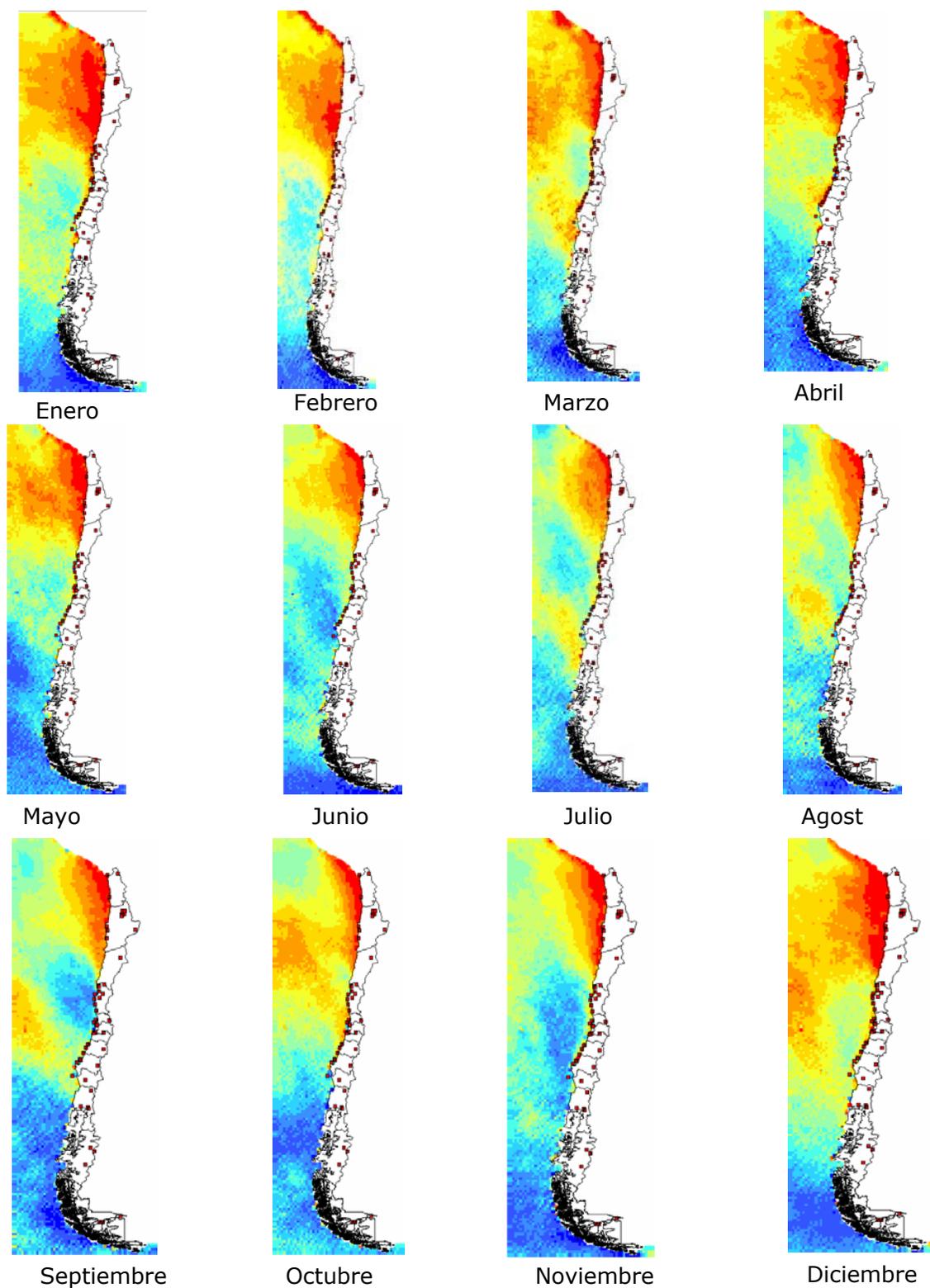


Figura 7.3 Promedio mensuales escaterómetro (1999-2002)  
(aplica la misma escala de la figura anterior)

## **[7] DISCUSION Y SUGERENCIAS**

Luego del análisis de la información recopilada durante este estudio podemos señalar que la situación de la exploración del potencial eólico de Chile no ha cambiado mucho desde el primer estudio serio en este sentido encargado por la Corporación de Fomento de la Producción a la Universidad de Chile en 1992. La situación ha variado muy poco en los últimos 13 años, pues aún no existe en Chile un programa de medición de la velocidad y dirección del viento de largo plazo que despliegue estaciones meteorológicas a lo largo de Chile orientadas a la prospección del recurso eólico. Las iniciativas son escasas y descoordinadas, y están normalmente vinculadas a empresas privadas o investigadores de centros académicos.

En este estudio se utilizó un modelo meteorológico de mesoscala que incorpora en forma explícita en su funcionamiento las principales forzantes de los campos de viento. Sistemas frontales de tipo sinóptico, efectos térmicos y topografía compleja son considerados en la inicialización del modelo. Estas características hacen especialmente útil el modelo empleado debido a que son precisamente aquellas las que se presentan en el territorio nacional.

La experiencia en modelación de mesoscala para la evaluación del recurso eólico en Chile es limitada (Vergara, 1992), pero sí existe el expertise en su aplicación en otros campos.

Por otra parte, la modelación de mesoscala para generar mapas eólicos fuera de las fronteras de Chile está muy generalizada. Por ejemplo sólo en Latino América existen iniciativas importantes como el Proyecto SWERA (Solar Wind Energy Resource Assessment) que financió el desarrollo de mapas eólicos para varios países de Centro América y Brasil. Por otra parte está el trabajo desarrollado por NREL (National Renewable Energy Laboratory) quien incluso generó un mapa eólico para una región del sur de Chile; cabe destacar en este caso que NREL estaba en una etapa de investigación en la aplicación de su metodología para generar mapas eólicos. Además, está la experiencia del CREE (Centro Regional de Energía Eólica del Chubut) en la generación de mapas eólicos en Argentina y la de TrueWind Solutions y Camargo-Schubert Energía Eólica Ltda. en Brasil.

Se sugiere crear sinergias en el ámbito nacional entre los investigadores que utilizan modelos de mesoscala para aplicar y comparar los resultados de su aplicación en el estudio del potencial eólico en Chile. Se propone la siguiente agenda de investigación en este sentido:

- desarrollar mapas eólicos de algunas regiones de Chile
- desarrollar técnicas de validación para estos mapas eólicos

- mejorar las técnicas de parametrización de la rugosidad (verificación en terreno y utilización de mejores fuentes de información de cobertura vegetal)
- resolución de la grilla de modelación (anidamiento, paralelización de modelos)

Además, se sugiere avanzar en la incorporación de las siguientes coberturas al Sistema de Información Geográfica Eólico desarrollado en este estudio:

- líneas de transmisión eléctrica
- red de caminos
- curvas de nivel
- cuerpos de agua
- clasificación de uso de suelo

Estas coberturas ayudarán a facilitar una planificación general a posibles inversionistas interesados en desarrollar proyectos eólicos; sin embargo, la inversión en los mismos deberá siempre basarse en análisis detallados y específicos de cada sitio.

Finalmente, se sugiere explorar en técnicas como la “correlación a largo plazo de datos de medición de viento” (conocida en Inglés como MCP por Measure-Correlate-Predict), la cual permite producir series climatológicas representativas de velocidad y dirección de viento en un punto, para el cual se cuenta con una serie incompleta de datos, basados en una serie más larga de datos registrados en otro punto climatológicamente igual al primero.

## **[8] CONCLUSIONES**

Las principales conclusiones de carácter general que se obtienen del estudio son las siguientes:

- Se ha obtenido una distribución espacial sobre modelos digitales de terreno de las estaciones meteorológicas compiladas en el Estudio Corfo (1993), y en el presente estudio en sus etapas 1 y 2
- Se ha desarrollado un sitio Web que permite acceder a la mayor parte de los resultados de este estudio
- Se desarrolló un Sistema de Información Geográfica Eólico (SIG Eólico) en plataforma ArcView 3.2 que facilita enormemente el rápido acceso a las bases de datos de las estaciones meteorológicas, y que además entrega una visión espacial de las estaciones meteorológicas compiladas en el Estudio Corfo (1993), y en el presente estudio en sus etapas 1 y 2
- Se implementó una aplicación, tipo ArcView, autoejecutable, que permite distribuir los resultados contenidos en el SIG Eólico a cualquier usuario con acceso a un equipo tipo PC bajo plataforma Windows, sin necesidad de contar con el software ArcView instalado en dicho equipo
- Se obtuvo la distribución espacial discreta del recurso eólico a escala nacional de acuerdo a la información de viento que estuvo disponible al momento de realizar el estudio
- El estudio corresponde al tercer esfuerzo global en Chile de recopilación de información, normalización y presentación de resultados en el ámbito de la evaluación del potencial eólico. Se introducen antecedentes estadísticos del régimen de vientos para un total de 124 estaciones, y se progresa notablemente en la presentación y en el desarrollo de herramientas para la difusión de los resultados

Las principales conclusiones de carácter específico que se obtienen del estudio son las siguientes

- Se proporcionan distribuciones espaciales continuas de la velocidad del viento en una zona de la IV región, obtenidas mediante la aplicación de un modelo de mesoscala. Se reproducen satisfactoriamente la variabilidad horaria y mensual de la velocidad del viento en una zona de modelación de

70x70 km. Se obtienen máximos de velocidad del viento después del mediodía y se obtienen valores medios para la velocidad del viento superiores a 6 m/s a 50 m para la zona conocida como Punta Lengua de Vaca, lo cual se correlaciona muy bien con la velocidad del viento medida en este lugar por la estación cuyo código es DGLVA, la cual entrega un valor de velocidad media anual normalizado a 50 m de 6.0 m/s. La razón de modelación lograda durante este estudio fue de hasta 1:3, es decir para modelar 3 horas de tiempo real se necesitó 1 hr de modelación computacional.

- La modelación de mesoscala, en la IV región, permite a los consultores sugerir la existencia de potenciales muy interesantes de energía eólica en esta región. Se sugiere otorgar prioridad al desarrollo de un mapa eólico para esta región, en cuya validación podría gestionarse la utilización de la red de estaciones meteorológicas existentes en la zona, entre las que cabe destacar la calidad de las estaciones que mantiene el Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas (CEAZA). Varias de estas estaciones fueron chequeadas en terreno por el equipo consultor como parte de la tarea de reconocimiento previo de la zona antes de comenzar la modelación de mesoscala
- Los resultados de este estudio, considerando únicamente los de las estaciones pertenecientes a su segunda etapa, permiten a los consultores sugerir la existencia de potenciales interesantes de energía eólica en las siguientes regiones del país:
  - VI región (estación cuyo código es 06CHA05)
  - VIII región (estación cuyo código es 08BIO05)
  - X región (estación cuyo código es 10BUT05)

Sin embargo, es necesario mencionar que los resultados anteriores deben tomarse con precaución, dado que no hay datos de estaciones cercanas que permitan validarlos. Esto ilustra la necesidad de implementar un adecuado programa de prospección eólica en Chile.

Finalmente este equipo consultor se permite la libertad de proponer lo siguiente:

- Aplicar modelos de mesoscala para definir cualitativamente los mejores lugares para implementar programas de medición de la velocidad y dirección del viento en Chile

- Trabajar en los mecanismos que permitan desarrollar un programa de medición de la velocidad y dirección del viento con el objetivo de determinar potencial eólico
- Estudiar el potencial eólico costa afuera en Chile

## **ANEXOS**

Los Anexos se presentan en volúmenes separados a este informe final y fueron organizados de la siguiente forma:

### **(A1) MODELOS DIGITALES DE TERRENO EN TORNO A ESTACIONES**

Este Anexo presenta modelos digitales de terreno para todas las estaciones que cuentan con una base de datos Excel con datos horarios (ver Anexo A4).

### **(A2) PARAMETROS BASICOS ESTACIONES**

Este Anexo presenta los que se estimaron como parámetros básicos del análisis de los datos de cada estación.

### **(A3) REPORTES DETALLADOS DE RESULTADOS**

Este Anexo presenta reportes detallados de información obtenida del procesamiento de las series de datos de cada estación.

### **(A4) SIG EOLICO Y VISUALIZADOR TIPO SIG**

### **(A5) ARCHIVOS DIGITALES CON TODOS LOS RESULTADOS DEL ESTUDIO**

Se incluye aquí este informe final y todos sus anexos, lo cual incluye las bases de datos Excel normalizadas de las estaciones meteorológicas.

## REFERENCIAS

- [1] Fundación para la transferencia tecnológica (2003) Informe Final: Mejoría del conocimiento del recurso eólico en el norte y centro del país. Estudio para la Comisión Nacional de Energía.
- [2] AWS Scientific, Inc. (1997) "Wind resource assessment handbook, fundamentals for conducting a successful monitoring program". NREL Subcontract No. TAT-5-15283-01.
- [3] Fernández, P. (2002) "Energía Eólica". Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética, Universidad de Cantabria.
- [4] Archer, C. & Jacobson, M. (2005) Evaluation of Global Wind Power. *Journal of Geophysical Research – Atmospheres*, 110, in press.
- [5] Kalthoff, N., Bischoff-Gauß, I., Fiebig-Wittmaack, M., Fiedler, F., Thürauf, J., Novoa, E., Pizarro, E., Castillo, R., Gallardo, L., Rondanelli, R. and M. Kohler (2002) "Mesoscale Wind Regimes in Chile at 30°S" *J. App. Meteor*, Vol. 41, No. 9, pp. 953-970.
- [6] Müller, M.D. (2001): Simulation of thermally induced and synoptically driven wind fields in complex terrain – An evaluation of the mesoscale model MetPhoMod. Diploma thesis at the University of Basel.
- [7] <http://pages.unibas.ch/geo/mcr/3d/meteo/>
- [8] José M<sup>a</sup> Cuadrat y M<sup>a</sup> Fernanda Pita (2000) *Climatología*, 2<sup>a</sup> Edición. Editorial Cátedra (Geografía).
- [8] Inzunza, J. (2003) *Meteorología Descriptiva*.
- [9] Romero, H. (1985) *Geografía de los Climas*, Tomo XI. En *Geografía de Chile del Instituto Geográfico Militar*.
- [10] Vergara, J.A. (1992) Un modelo numérico tridimensional de meso-escala y su aplicación a la estimación de los vientos superficiales a los 29,5° S. VII Seminario nacional de energía solar y eólica. Valparaíso, Noviembre 1992.
- [11] Corfo, (1993) Informe Final: Evaluación del Potencial de Energía Eólica en Chile. Departamento de Geofísica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.