

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECÁNICA

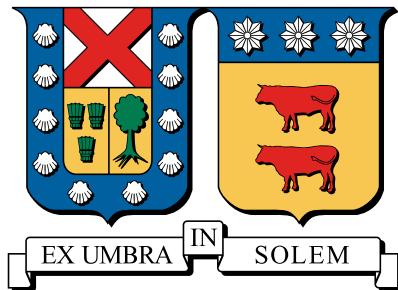
VALPARAISO- CHILE

**“SISTEMA DE PREDICCIÓN EÓLICA DE ALTA
RESOLUCIÓN A CORTO PLAZO PARA CASOS
REALES EN TERRENO COMPLEJO MEDIANTE
ACOPLAMIENTO MESO-MICROESCALA,
SIMULACIÓN DE GRANDES VÓRTICES Y
ASIMILACIÓN DE DATOS”**

Pablo Andrés Cárdenas Zamorano

Magíster en Ciencias de la Ingeniería Mecánica

Julio - 2018



**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECÁNICA
VALPARAISO- CHILE**

**“SISTEMA DE PREDICCIÓN EÓLICA DE ALTA RESOLUCIÓN A CORTO
PLAZO PARA CASOS REALES EN TERRENO COMPLEJO MEDIANTE
ACOPLAMIENTO MESO-MICROESCALA, SIMULACIÓN DE GRANDES
VÓRTICES Y ASIMILACIÓN DE DATOS”**

PABLO ANDRÉS CÁRDENAS ZAMORANO

Tesis de grado para optar al grado de:
Magíster en Ciencias de la Ingeniería Mecánica
y al título de:
Ingeniero Civil Mecánico

Profesor Guía: Dr. Ing. Alex Flores

Profesor Correferente: Phd. Carlos Rosales

Profesor Correferente externo: Dr. XXXXX XXXXXXXXXX

Julio - 2018

TITULO DE LA TESIS:

**“SISTEMA DE PREDICCIÓN EÓLICA DE ALTA RESOLUCIÓN A CORTO PLAZO
PARA CASOS REALES EN TERRENO COMPLEJO MEDIANTE ACOPLAMIENTO
MESO-MICROESCALA, SIMULACIÓN DE GRANDES VÓRTICES Y ASIMILACIÓN
DE DATOS”**

AUTOR:

Pablo Andrés Cárdenes Zamorano

TRABAJO DE TESIS, presentado en cumplimiento parcial de los requisitos para el Grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Dr. Ing. Alex Flores
.....

Phd. Carlos Rosales
.....

Dr. XXXXX XXXXXXXXXX
.....

VALPARAISO, CHILE- 2018

The more we learn about the world, and the deeper our learning, the more conscious, specific, and articulate will be our knowledge of what we do not know, our knowledge of our ignorance. For this, indeed, is the main source of our ignorance — the fact that our knowledge can be only finite, while our ignorance must necessarily be infinite

Karl Popper

Agradecimientos

Quiero agradecer enormemente a todas las personas que fueron parte de este largo proceso de tesis y en general a todas aquellas que me influenciaron directa e indirectamente a lo largo de mi vida. Sus influencias se manifiestan en mayor o menor medida en cada una de los párrafos de este trabajo.

Especialmente quiero agradecer a mis grandes amigos Laura, Sebastián y Pablo por todos los buenos momentos compartidos dentro de la universidad, por hacer de esta, una etapa inolvidable dentro de mi vida y por permitirnos el cuestionamiento constante de nuestras conductas, logrando así la mejora continua de nosotros mismos como persona con el fin de alcanzar en el futuro una sociedad más igualitaria, solidaria y libre.

Evidentemente, también agradecer a mi madre, a mi padre, por fomentarme desde niño una curiosidad permanente a los fenómenos que me rodean, a mis hermanos Iván y Rául, y a Fabián los cuales fueron testigos y soportaron mis excentricidades viviendo bajo el mismo techo y fueron también conejillos de indio de mis innumerables experimentos culinarios y también a mis pequeñas medias hermanas Amaya y Maite.

Quiero agradecer a todas las personas que tuve el privilegio de conocer y compartir dentro de la universidad en diversos contextos y que fomentaron mi desarrollo como profesional integral. A mis compañeros y compañeras de carrera, a mis amigos y amigas con las que participé dentro de la política universitaria, a la vocalía de género, a las grandes personas con la que conformamos el Centro de Alumnos de Mecánica 2015, a mis compañeros de banda, al Club de Música UTFSM, a los voluntarios y voluntarias del taller de robótica y a todas aquellas personas que hacían que el día a día dentro de esta universidad fuera menos monótono y más liberador.

Del mismo modo, quiero dar agradecimientos especiales a mis profesores de mecánica de fluidos y turbulencia, profesor Alex Flores, Carlos Rosales y Romain Gers, por la paciencia y por permitirme recibir el conjunto de conocimientos que, por una parte forman el núcleo en el que se sustenta esta tesis y que, por otra, me permitieron descubrir la belleza, los desafíos y los misterios de esta área.

Finalmente agradecer a la universidad y a la Dirección de Posgrado y Programas por

la preocupación constante y el financiamiento que permitieron mi mantención a través de este trabajo.

Abstract

Resumen

Con el fin de lograr una correcta predicción del recurso viento en terreno complejo en zonas muy localizadas, se llevaron cabo una serie de simulaciones numéricas multiescala con datos reales utilizando WRF-LES y la técnica de dominios anidados hasta una resolución mínima de aproximadamente 2 [m]. Luego de validar este acercamiento, se procedió a utilizar un modelo de asimilación de datos en el dominio mas pequeño con el fin de mejorar las soluciones obtenidas. Los resultados obtenidos muestran que es posible obtener predicciones certeras y que rescaten el comportamiento turbulento del viento a las escalas simuladas y que además, la asimilación de datos mejora considerablemente esta predicción, dando pie a un uso operativo de esta tecnología.

Índice general

Agradecimientos	7
Abstract	10
Resumen	12
1. Introducción	18
2. Estado del Arte	25
2.1. Simulaciones de Alta Resolución en Terreno Complejo	25
2.2. Uso Operativo de Asimilación de Datos	27
3. Marco Teórico	28
3.1. Leyes Fundamentales	28
3.1.1. Mecánica de Fluidos	28
3.1.2. Dinámica Atmosférica	29
3.2. Turbulencia Hidrodinámica	29
3.2.1. Fundamentos	29
3.2.2. Cascada de Energía	29
3.2.3. Hipótesis de Taylor	29
3.3. Teoría de la Capa Límite Atmosférica	30
3.4. Large Eddy Simulation	31
3.5. Asimilación de Datos	31
4. Weather Research and Forecast (WRF)	34
4.1. Aspectos Generales	34
4.1.1. Ecuaciones Resueltas	35
4.1.2. Discretización Espacial	35
4.1.3. Discretización Temporal	35

4.1.4. Aspectos Numéricos	35
5. Metodología	37
5.1. Alcance de la Investigación	37
5.2. Datos de entrada al modelo	37
5.3. Preproceso de la Asimilación de Datos	37
5.4. Posproceso de los datos	37
5.4.1. Interpolación de alturas	37
5.4.2. Cálculo de Errores	37
5.5. Caso de Validación: Terreno Plano Høvsøre	38
5.5.1. Aspectos generales de las simulaciones	38
5.5.2. Aspectos generales del proceso de asimilación de datos	41
5.6. Caso de Estudio: Terreno Complejo Bolund	42
5.6.1. Aspectos generales de las simulaciones	42
5.6.2. Aspectos generales del proceso de asimilación de datos	47
6. Resultados	49
6.1. Caso de Validación: Hovsore sin Asimilación de Datos	49
6.2. Caso de Validación: Hovsore con Asimilación de Datos	49
6.3. Caso de Estudio: Bolund sin Asimilación de Datos	49
6.4. Caso de Validación: Bolund con Asimilación de Datos	49
7. Conclusiones	50
A. Incorporación de Bases de Datos de Alta Resolución	51

Índice de figuras

1.1.	Interfaz online del explorador eólico de la Universidad de Chile.	21
1.2.	Detalle del proyecto FONDEF ID16I10105. (a) Célula del sistema experimental de medición. (b) Prototipo en el laboratorio.	22
1.3.	Esquema de la sonda FONDEF ID16I10105.	23
2.1.	Separación de escalas en simulación de mecánica de fluidos.	26
2.2.	Espectro de energía turbulenta multiescala.	27
5.1.	Distribución telescopica de los 7 mallas anidadas en el dominio numérico.	39
5.2.	Orografía (MSNM) y uso de suelo (categoría USGS24) de alta definición para cada uno de las mallas anidadas (d01-d07). Para el dominio d07 se presenta la ubicación del punto de control (rojo) y la distribución de turbinas eólicas en la zona (negro).	40
5.3.	Distribución de la malla vertical.	41
5.4.	Distribución telescopica de los 8 mallas anidadas en el dominio numérico.	44
5.5.	Orografía (MSNM) y uso de suelo (categoría USGS24) de alta definición para cada uno de las mallas anidadas (d01-d08).	45
5.6.	Ubicación espacial de los puntos de control en el dominio. En cada punto de control se ubican anemómetros que miden a las alturas de 2m, 5m, y 9m.	46
5.7.	Distribución de la malla vertical.	47

Índice de cuadros

5.1.	Dominio numerico espacial y temporal para simulación del caso Høvsøre.	38
5.2.	Valores característicos de cada dominio.	38
5.3.	Parametrizaciones físicas utilizadas en el modelo.	39
5.4.	Características del proceso de DA.	42
5.5.	Dominio numerico espacial y temporal para simulación del caso Høvsøre.	42
5.6.	Valores característicos de cada dominio.	43
5.7.	Parametrizaciones físicas utilizadas en el modelo.	43
5.8.	Características del proceso de DA.	48

Capítulo 1

Introducción

En el transcurso de los últimos años, es decir, desde la década de los 2000 en adelante, ha habido un aumento considerable en el uso de tecnologías renovables para la obtención de energía eléctrica a lo largo de todo el planeta. El consenso internacional de avanzar en pos de un desarrollo sustentable para la humanidad y que esta, a la vez, sea amigable con el resto de las especies y los recursos naturales, da la intuición de que es la manera correcta para progresar y por lo tanto se debe desplegar la mayor cantidad de capital humano de modo que estas tecnologías continúen en un proceso de mejora continua y se asegure el bienestar de toda la sociedad.

De manera mas concreta, esto se está llevando a cabo a través del uso e implementación de las Energías Renovables No Convencionales (en adelante ERNC) y que corresponden a la energía solar, a la energía hidráulica, la mareomotriz, undimotriz, geotérmica, biomasa y eólica. Para el alcance de este trabajo de tesis, se está interesado en la energía eólica, que es aquella energía que se extrae del viento en movimiento.

El recurso viento posee la particularidad de ser extremadamente variable en todo su espectro de escalas temporales y espaciales, es decir, desde los cambios que tiene en la escala climática (ciclos planetarios, cambio climático) hasta la microescala (escala turbulenta y disipación viscosa) y por ende la generación de energía a partir de esta es igualmente variable. De este modo, surge la necesidad de buscar maneras teóricas y prácticas para tenerla completamente determinada y así tener también determinada la potencia eléctrica que se puede generar de esta.

Para tener un acercamiento a la importancia de la correcta estimación del viento, consideremos la energía cinética del viento, para un área arbitraria de magnitud A en un tiempo t :

$$E = \frac{1}{2}mV^2 = \frac{1}{2}(AVt\rho)V^2 = \frac{1}{2}At\rho V^3 \quad (1.0.1)$$

Donde ρ es la densidad del aire y V es la rapidez del viento. AVt es entonces el volumen de aire pasando por el área A que se define como normal a la dirección de la velocidad del viento V . La potencia del viento (energía por unidad de tiempo) para el caso de una turbina eólica queda definida entonces como:

$$P = \frac{E}{t} = \frac{1}{2} A \rho V^3 \quad (1.0.2)$$

Donde A es el área del rotor de la turbina. La potencia del viento, es entonces, proporcional al cubo de la velocidad del viento.

Se puede derivar la ecuación anterior para hallar una relación entre los errores relativos entre las dos variables de interés. Derivando la ecuación anterior se obtiene:

$$dP = \frac{1}{2} A \rho \cdot d(V^3) = \frac{3}{2} A \rho V^2 dV \quad (1.0.3)$$

Y dividiendo ahora por la potencia eólica:

$$\frac{dP}{P} = 3 \frac{dV}{V} \quad (1.0.4)$$

Lo que significa que un error relativo (o porcentual) en una estimación de la velocidad del viento, conlleva a un error el triple mas grande para la potencia que se podría generar. Este hecho sustenta la necesidad de tener predicciones para la rapidez del viento lo mas cercanas a la realidad que se puedan, ya que variaciones en la potencia que puede generar un parque eólico puede significar la no rentabilidad económica de este, entre otros problemas como mantenciones correctivas o fallas en la planificación de la mantención preventiva de las turbinas y la aparición esfuerzos no deseados en el aspa.

Por otro lado, en la práctica existe un conflicto permanente en que las zonas con mayor potencial eólico, son aquellas que tienen terreno complejo, i.e. terreno con topología no regular como las costas o montañas, esto debido a la aceleración que toma el viento al ajustarse a los contornos del suelo. Existe entonces una dicotomía entre que los lugares mas aptos para poner parques eólicos, son al mismo tiempo los mas turbulentos y los más difíciles de predecir.

Se está interesado entonces en buscar una manera de predecir el comportamiento del viento en su interacción con este terreno complejo. Históricamente se ha dependido de técnicas estadísticas (describiendo el viento a través de distribuciones de probabilidad) basadas en bases de datos que contienen mediciones del viento a lo largo de varios años. El problema con este acercamiento es que para el terreno complejo, en donde el comportamiento del viento es en gran parte no homogéneo, este no refleja el movimiento

real ni los fenómenos no lineales (como el desprendimiento de la capa límite) dentro de la zona de interés. Aún así, si se quisiera aplicar estos métodos estadísticos, el volumen de instrumentación necesaria sería inmenso y por lo tanto, los costos asociados serían demasiado altos como para que se pudieran llevar a cabo en todos los lugares en donde se quisieran instalar turbinas.

Se busca entonces aplicar un método mas indirecto, en este caso, predecir el comportamiento del viento a través de simulaciones numéricas. Evidentemente las simulaciones se encargaran de resolver las ecuaciones que rigen el comportamiento de la atmósfera. Estas ecuaciones son las llamadas ecuaciones primitivas y dan el paso a una rama de la meteorología llamada predicción numérica del clima (Numerical Weather Prediccción NWP).

La predicción numérica del clima no es algo que se viene realizando desde hace poco. Las primera simulaciones atmosféricas datan desde el los años 20, en donde Lewis Fry Richardson logró hacer un pronóstico para 6 horas en dos puntos de Europa central. Este cálculo tardó cerca de dos semanas debido a que fueron realizados a mano. No fue hasta la década del 50, con la llegada de los computadores, que este campo pudo desarrollarse mas intensivamente, principalmente gracias al trabajo desarrollado por el grupo de investigación de Carl-Gustav Rosby que logró un pronóstico de 6 horas operativo. Desde aquí en adelante, el avance exponencial de la computación y la sofisticación de las ecuaciones que modelan la atmósfera, permiten tener pronósticos cada día mas precisos y para ventanas de tiempo cada vez mayores.

vivimos en la capa límite

Entonces, frente a esta latente necesidad de conocer el comportamiento del viento dentro de la capa límite para terreno complejo y aprovechando los avances en capacidad computacional que existen actualmente, es que se plantea el uso de simulaciones multiescala que permitan resolver desde las escalas planetarias hasta las escalas mas pequeñas relevantes para el caso de estudio y así obtener pronósticos fiables para zonas muy localizadas. Estos resultados no solamente serán útiles en términos de generación por energía eólica, si no que también sientan las bases de una manera vanguardista para predecir dispersión de contaminantes, zonas de recirculación, evolución de incendios, entre otros.

Para el caso de Chile,

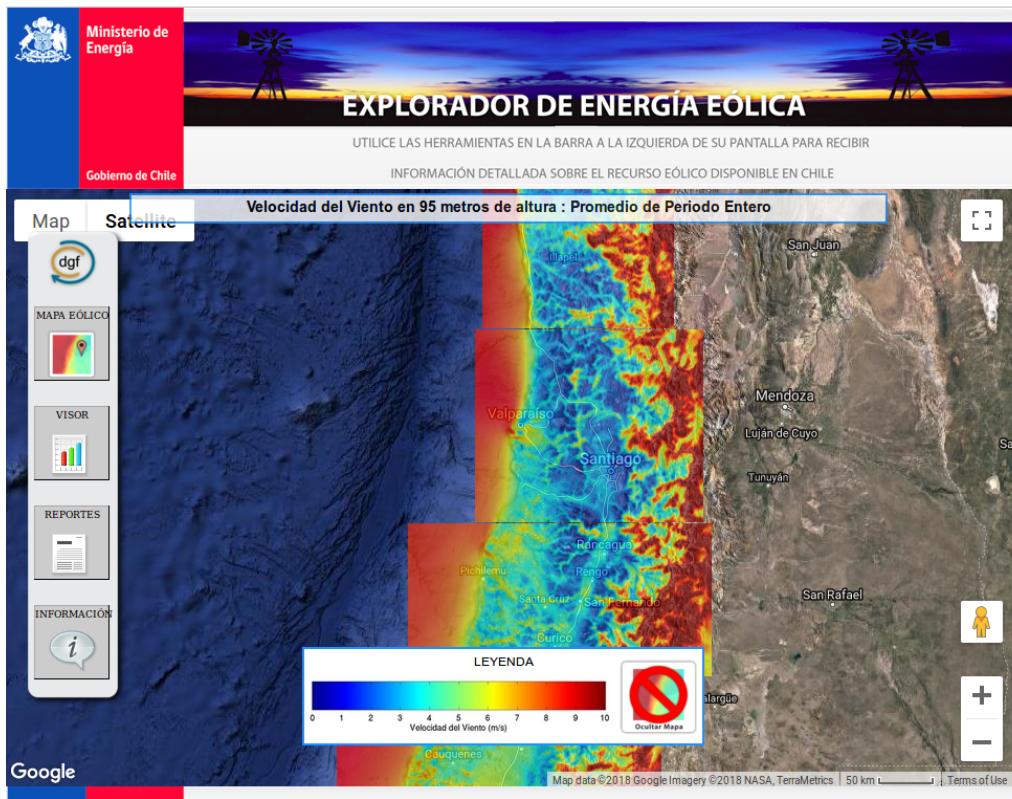


Figura 1.1: Interfaz online del explorador eólico de la Universidad de Chile.

El trabajo realizado en esta tesis se enmarca dentro del proyecto FONDEF ID16I10105: “Red multisensorial distribuida para la evaluación del recurso eólico con sondas aerotransportadas y georeferenciadas” cuyo objetivo práctico es diseñar un sistema de monitoreo en terreno para el viento a través de globos situados de forma estratégica en un terreno complejo. En las Figuras se pueden apreciar algunos detalles técnicos del trabajo que hasta el día de hoy se está realizando por parte del laboratorio de energías renovables de la universidad. Las simulaciones numéricas, las cuales son el núcleo de esta tesis, tienen cabida dentro de este proyecto en la parte donde es necesario predecir a corto plazo y en una zona muy localizada, el comportamiento futuro del viento en función de los valores medidos por las sondas (asimilación de datos).

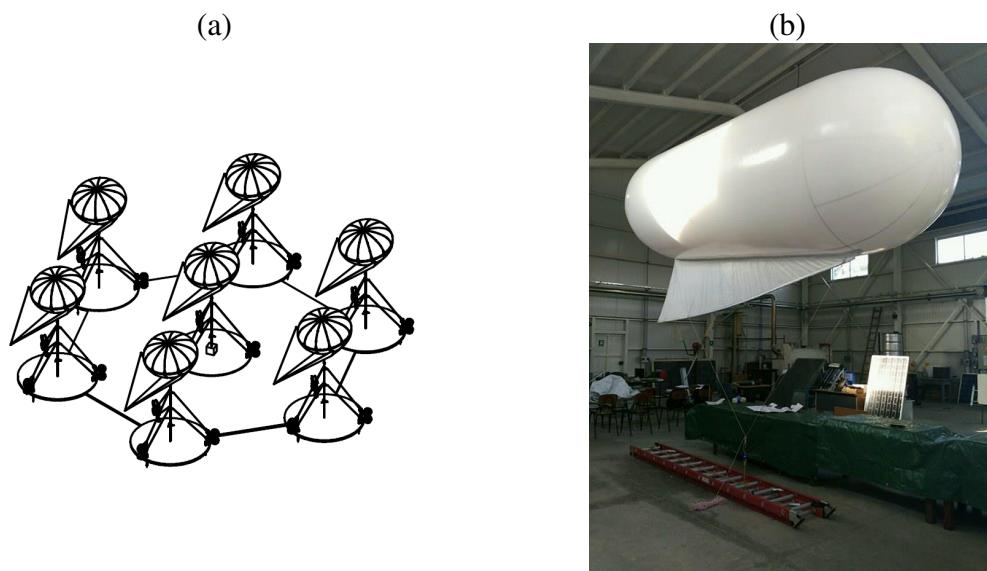


Figura 1.2: Detalle del proyecto FONDEF ID16I10105. (a) Célula del sistema experimental de medición. (b) Prototipo en el laboratorio.

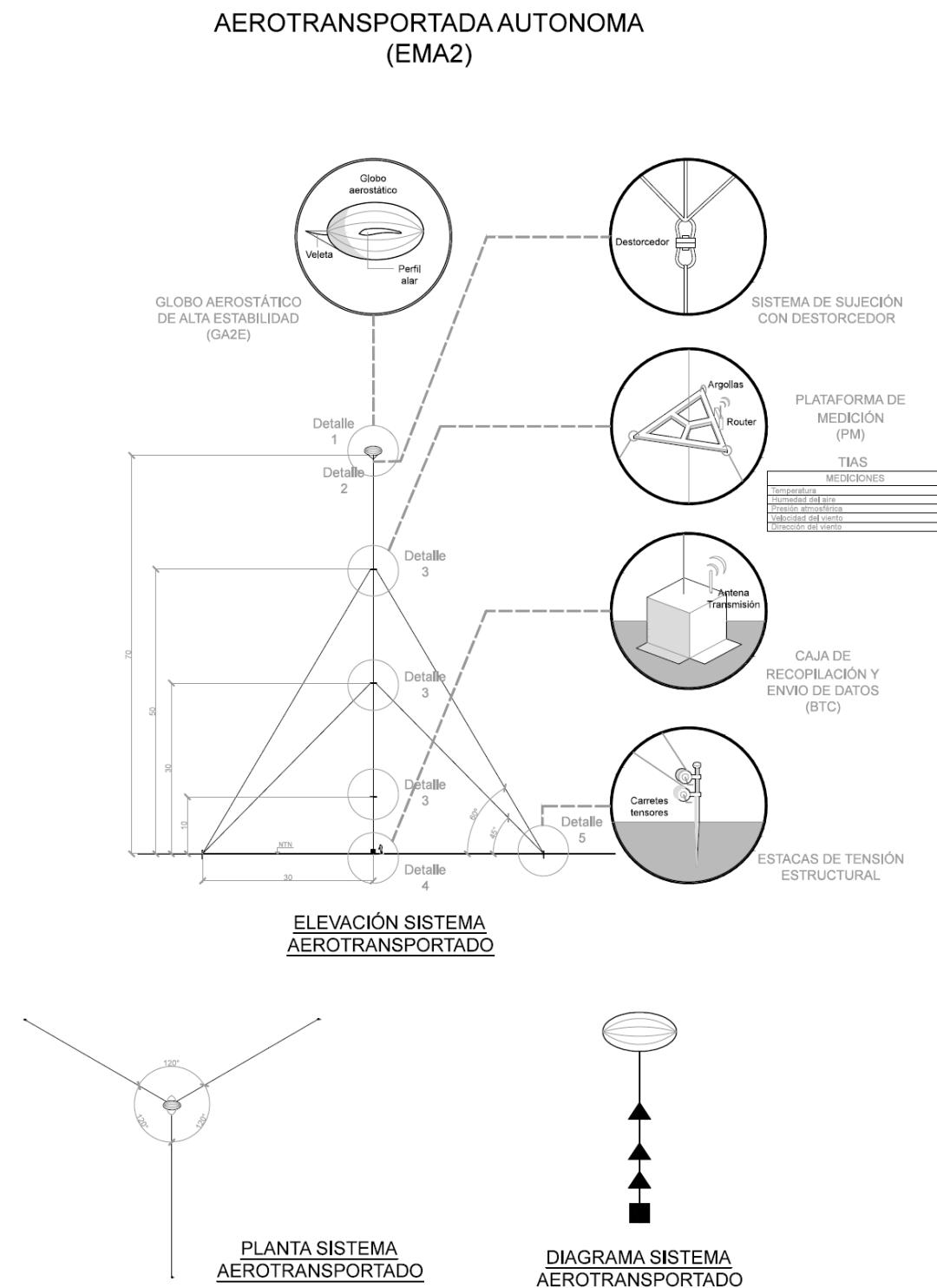


Figura 1.3: Esquema de la sonda FONDEF ID16I10105.

El objetivo final de esta investigación será lograr un sistema robusto que obtenga una buena aproximación del campo de viento futuro en función de datos medidos que se están

obteniendo en tiempo real haciendo uso de simulaciones numéricas

Finalmente, a través de esta tesis se espera una descripción acabada de los fenómenos y problemáticas que abarca la tarea descrita anteriormente, además de un resumen de la bibliografía necesaria para que cualquier persona que quiera involucrarse en el campo de la simulación atmosférica pueda hacerlo de una manera sencilla. En el capítulo 2 se explican los últimos avances, problemáticas y consensos en torno a la simulación atmosférica multiescala. El capítulo 3 sienta las bases matemáticas, físicas y numéricas que enmarcan toda la investigación. En el capítulo 4 se detallan las particularidades del código WRF, que es el programa que se utilizó para realizar las simulaciones y el proceso de asimilación de datos. El capítulo 5 muestra la metodología de trabajo para poder obtener los resultados esperados, detallando la configuración con la que se llevaron a cabo las simulaciones en WRF y la manera con la que se valida el modelo propuesto. En el capítulo 6 se exponen los resultados obtenidos. Finalmente en el capítulo 7 están las conclusiones de la investigación y los aspectos que quedan abiertos a la mejora.

Capítulo 2

Estado del Arte

2.1. Simulaciones de Alta Resolución en Terreno Complejo

Tal como se describió en la anteriormente, el comportamiento de un fluido está sujeto a la acción de diversos actores que son los miembros que componen las ecuaciones fundamentales. En el caso de una simulación multiescala, la predominancia de los términos dentro de las ecuaciones no es única, es decir, en una escala donde la longitud característica sea del orden de los 100 [km], las fuerzas asociadas a la rotación de la tierra son de primer orden y en cambio las fuerzas viscosas pueden ser válidamente despreciadas, sin embargo, en una escala donde la longitud característica sea del orden de 1 [m], la importancia de la viscosidad no se puede despreciar y también es necesario comenzar a incorporar otros mecanismos como puede ser la flotación y la turbulencia.

Este problema dentro de la simulación, separa las áreas del conocimiento y de la aplicación de la mecánica de los fluidos, tal como se puede apreciar en la figura 2.1

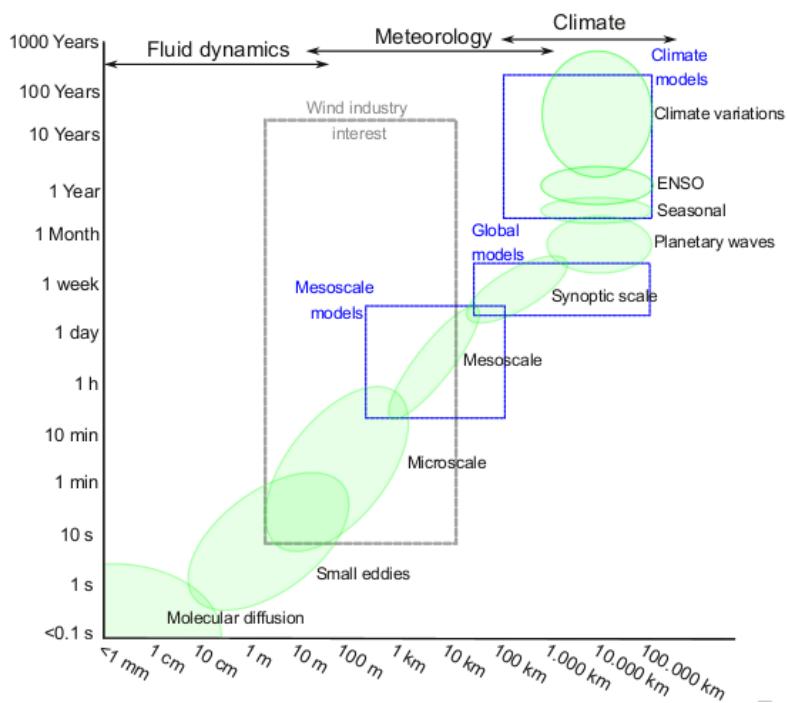


Figura 2.1: Separación de escalas en simulación de mecánica de fluidos.

Cuando se lleva este problema a la modelación de la turbulencia, aparece un fenómeno especial denominado *Terra Incognita*.

Utilizando la terminología de Wyngaard (2004), sea Δ la escala del filtro espacial asociado a la solución de las ecuaciones de movimiento y l la escala característica de los vórtices en el rango inercial. La Figura 2.2 muestra como se vería el espectro de energía turbulenta dentro de estas escalas.

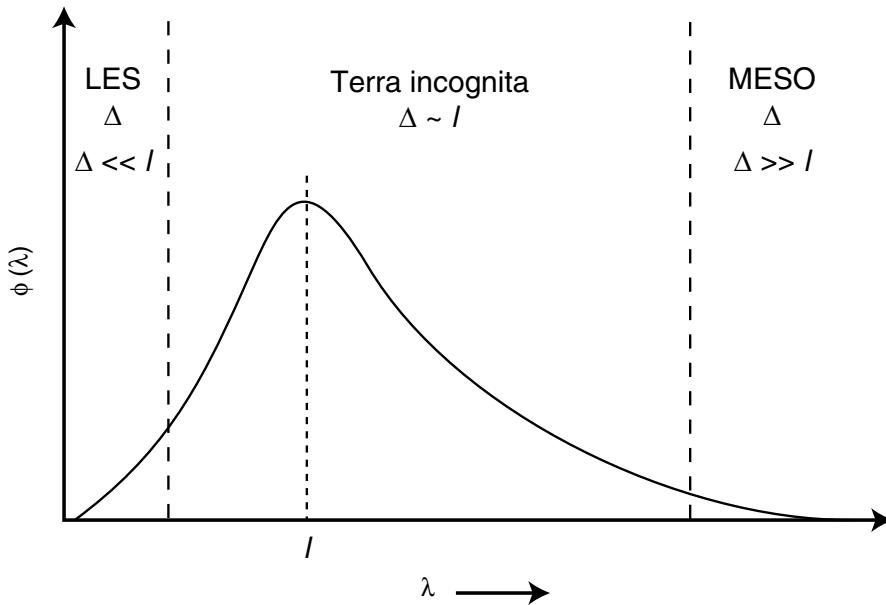


Figura 2.2: Espectro de energía turbulenta multiescala.

Para valores de $\Delta \gg l$ asociados a la mesoscala, la producción de energía turbulenta queda por debajo del filtro y por lo tanto, tiene sentido que se modele a través de un esquema de submalla. Por otro lado, para valores de $\Delta \ll l$ los vórtices que contienen la energía pueden ser completamente modelado por las ecuaciones y entonces no debe usarse un SGS (microescala).

Queda entonces el rango en donde $\Delta \sim l$. Dentro de este intervalo se desconoce cual es el comportamiento de los modelos atmosféricos ya que existe una doble representación de tanto los vórtices que se resuelven como los que se modelan.

En la práctica, el acercamiento para compensar este problema es definir los dominios de modo que se evite usar el modelo en el rango de la *Terra Incognita*.

2.2. Uso Operativo de Asimilación de Datos

Capítulo 3

Marco Teórico

3.1. Leyes Fundamentales

En esta sección se desarrollarán las ecuaciones que rigen el movimiento de los fluidos, tomando como base, las leyes fundamentales de conservación para un elemento diferencial.

3.1.1. Mecánica de Fluidos

Primero, se generalizarán las ecuaciones, a modo de tener un marco lo suficientemente amplio para después aplicarlo específicamente a la dinámica atmosférica y así extraer las ecuaciones primitivas de la atmósfera.

Conservación de la Masa

La conservación de la masa queda descrita en el sentido euleriano de la forma:

$$\partial_t \rho + \partial_i (\rho u_i) = 0 \quad (3.1.1)$$

donde el primer término corresponde a la acumulación de masa dentro de un elemento diferencial de fluido, y el segundo, a los flujos de masa por las fronteras.

Aunque la atmósfera es un fluido que a grandes rasgos es compresible, es válido hacer la aproximación de incompresibilidad debido a que los movimientos de las masas de aire rara vez exceden el $Ma = 0,3$. Para el caso incompresible se tiene entonces:

$$\rho = \rho_0 = \text{cte.} \quad (3.1.2)$$

$$\partial_i u_i = 0 \quad (3.1.3)$$

Implicando que el volumen de un elemento diferencial de fluido se mantiene constante en toda su trayectoria material.

Conservación de la Cantidad de Movimiento

ley de newton en forma general, fuerzas de superficie y de cuerpo, describir cada fuerza, órdenes de magnitud, aproximaciones.

Conservación de la Energía

energía cinética, energía térmica.

3.1.2. Dinámica Atmosférica

a través de las ecuaciones anteriores deducir las ecuaciones primitivas, introducir temperatura potencial, geopotencial y otra def atmofericas

3.2. Turbulencia Hidrodinámica

3.2.1. Fundamentos

naturaleza de la turbulencia, fenomenología,

3.2.2. Cascada de Energía

hipótesis de kolmogorov, derivar ley -5/3, espectro de energía cinética turbulenta.

3.2.3. Hipótesis de Taylor

Debido a la dificultad operativa y numérica que presenta el tener información instantánea de un campo de flujo en la capa límite atmosférica para caracterizar los distintos tamaños de los vórtices, G.I. Taylor sugirió que para ciertos casos especiales, es posible obtener información acerca del espectro de energía solo utilizando mediciones en un solo punto del espacio sobre un periodo de tiempo prolongado.

En la simplificación de Taylor, se habla de turbulencia congelada, es decir, el tiempo característico asociado a los vórtices turbulentos es muy menor que el tiempo característico de advección de los mismos.

Sea ϕ una variable cualquiera, la hipótesis queda expresada como:

$$D_t \phi = 0 \quad (3.2.1)$$

Entonces, al desarrollar la derivada material, la forma general de la hipótesis de turbulencia congelada de Taylor es de la forma:

$$\partial_t \phi = -u_i \partial_i \phi \quad (3.2.2)$$

Para los fenómenos dentro de ABL, los cuales son predominantemente horizontales, es conveniente dejar todo expresado en función de la rapidez horizontal del viento $V_h = \sqrt{u^2 + v^2}$. De esta forma se tiene:

$$\partial_t \phi = -V_h \partial_{x_h} \phi \quad (3.2.3)$$

donde x_h es la dirección horizontal del viento.

Expresada en términos de la frecuencia y número de onda:

$$\kappa = \frac{f}{V_h} \quad (3.2.4)$$

Finalmente, la condición de turbulencia congelada es válida para un punto fijo según la sugerencia de Willis y Deardorff (1976):

$$\sigma_{V_h} < 0,5 \cdot V_h \quad (3.2.5)$$

donde σ_{V_h} es la desviación estándar de la velocidad horizontal del viento. Este valor es una medida de la intensidad de la turbulencia. Es decir, la hipótesis de Taylor se debe cumplir para flujos en donde la intensidad de la turbulencia es pequeña en relación a la rapidez del flujo medio.

3.3. Teoría de la Capa Límite Atmosférica

Se define la capa límite atmosférica (ABL) como la parte de la troposfera que está influenciada directamente por la presencia de la superficie terrestre y responde a las fuerzas superficiales en una escala de tiempo del orden de las horas o menor.

explicar fenómenos de la abl, turbulencia, explicar transporte turbulento e introducir la descomposición de Reynolds.

3.4. Large Eddy Simulation

Considerando entonces la naturaleza multiescala de la turbulencia, es natural querer resolver los campos de flujo separando las escalas de producción (relacionadas con los grandes vórtices y el ingreso de energía) de las microescalas (relacionadas a los vórtices en la escala de Kolmogorov y a la disipación de energía).

La manera de realizar esto es aplicando un filtro a las variables de modo que actúe al nivel del espectro de energía, separando las escalas grandes de las pequeñas. Se introduce entonces el operador de filtrado según Leonard(1974).

$$\bar{\phi}(x_i, t) = \int G(r_i, x_j) \phi(x_j - r_i, t) dr_i \quad (3.4.1)$$

Donde la integración se realiza en todo el dominio del flujo. Notar que el filtro corresponde a una operación de convolución en el sentido del análisis de Fourier. El kernel G del filtro satisface una condición de normalización:

$$\int G(r_j, x_i) dr_j = 1 \quad (3.4.2)$$

Se define entonces una magnitud residual basada en la operación de filtrado como:

$$\phi' = \phi - \bar{\phi} \quad (3.4.3)$$

Es decir, se depara la variable de interés en una parte filtrada y su residuo. Esta descomposición es, a priori, análoga a una descomposición de Reynolds.

Se debe tener en cuenta que el filtro es en el fondo un nuevo operador matemático que cumple sus propias propiedades y que permite separar las escalas grandes de las pequeñas. Para una mejor descripción teórica de lo que implica un operador de filtrado se puede recurrir a las referencias...

falta mucho...

3.5. Asimilación de Datos

Se busca minimizar la siguiente función de costo, que pondera los errores provenientes del modelo J_b (*background*) y de las observaciones J_o :

$$J(x) = \frac{1}{2}(x - x_b)^T B^{-1}(x - x_b) + \frac{1}{2}(Hx - y)^T R^{-1}(Hx - y) \quad (3.5.1)$$

$$J(x) = J_b + J_o \quad (3.5.2)$$

En este problema $x = x_a$ es el valor que a posteriori minimiza la función de costo y por lo tanto es lo mas cercano al verdadero estado de la atmósfera.

El operador de observación H se encarga de hacer una interpolación 3D de la malla numérica al espacio de observación. En el paquete de asimilación del WRF esto se hace en dos pasos, una interpolación vertical y otra horizontal. El funcionamiento exacto se desconoce porque las subrutinas que realizan esta operación no están comentadas, sin embargo existe una ponderación según distancias para los 4 puntos mas cercanos a la observación.

Teóricamente el problema variacional se soluciona minimizando el gradiente de la función de costo, es decir:

$$\nabla J(x) = B^{-1}(x - x_b) - H^T R^{-1}(y - Hx) = 0 \quad (3.5.3)$$

Dejando expresado el incremento como:

$$x_a - x_b = BH^T(HBH^T + R)^{-1}(y - Hx_b) \quad (3.5.4)$$

La ecuación anterior es fácil de entender si se identifican las matrices $H B H^T$ que es la proyección del error del background en el espacio de observación y BH^T que es la proyección del error del background en espacio de background-observación.

En WRF, para hallar x_a se consideran los siguientes cambios de variables que disminuyen el costo computacional:

$$y'_o = y_o - H(x_b) \quad (3.5.5)$$

$$x' = Uv = x - x_b \quad (3.5.6)$$

Donde U se calcula convenientemente para que:

$$UU^T \approx B \quad (3.5.7)$$

v es llamada la variable de control.

Notar que y'_o es el vector de innovación, i.e. la desviación entre la observación y el background. x' es el incremento de análisis.

Entonces podemos escribir el problema variacional como:

$$J(v) = \frac{1}{2}v^T v + \frac{1}{2}(y'_o - \bar{H}Uv)^T R^{-1}(y'_o - \bar{H}Uv) \quad (3.5.8)$$

Donde \bar{H} es el operador de observación linealizado.

En la práctica U es una aplicación recursiva de varios filtros que permiten que el proceso de asimilación sea menos costoso y que la variable de control cumpla con los balances atmosféricos.

La Ecuación 3.5.8 es la que se minimiza dentro del programa siguiendo el algoritmo de minimización Quasi-Newtoniano.

Capítulo 4

Weather Research and Forecast (WRF)

4.1. Aspectos Generales

El modelo ARW-WRF (Advanced Research WRF) es un modelo atmosférico (es decir, simula el comportamiento de la atmósfera) no hidrostático que resuelve el sistema de ecuaciones para flujo compresible en su forma conservativa y utilizando una coordenada vertical de masa (o de presión hidrostática). Su coordenada vertical está definida como:

$$\eta = \frac{p_{dh} - p_{dht}}{\mu_d} \quad (4.1.1)$$

Donde p_{dh} corresponde a la componente hidrostática de la presión del aire seco, y:

$$\mu_d = p_{dhs} - p_{dht} \quad (4.1.2)$$

es la masa de aire seco para una columna. En estas ecuaciones los subíndices t y s corresponden a los límites superior (top) e inferior (surface) del dominio. Las variables principales que resuelve el modelo son las velocidades covariantes (u, v, w), masa de aire seco, geopotencial, temperatura potencial (θ) y energía cinética turbulenta (TKE) de submalla (SGS). La ecuación de momentum, temperatura potencial, SGS TKE y otros escalares relevantes tienen una forma acoplada con la masa de aire seco, a priori:

$$\partial_t(\mu_d \theta) + \partial_x(\mu_d u \theta) + \partial_y(\mu_d v \theta) + \partial_\eta(\mu_d \omega \theta) = F \quad (4.1.3)$$

Donde F es la suma de la mezcla turbulenta junto con otras fuerzas y

$$\omega = d_t \eta \quad (4.1.4)$$

es la velocidad en la coordenada vertical.

La discretización en el tiempo se realiza a través de un esquema de integración temporal múltiple. Este esquema separa los modos de alta frecuencia (i.e. ondas acústicas y de gravedad) de los modos de baja frecuencia (modo físico). ARW utiliza un esquema RK3 y durante cada paso en el RK, el modo de alta frecuencia que se propaga horizontalmente es integrado a través de un esquema *forward-backward* utilizando un paso de tiempo acústico, que es típicamente un orden de magnitud más pequeño que el paso físico, mientras que un esquema implícito es utilizado para el modo de alta frecuencia que se propaga de manera vertical.

4.1.1. Ecuaciones Resueltas

ecuaciones de euler, derivacion de las ecuaciones completas, etc.

4.1.2. Discretización Espacial

malla vertical, malla horizontal, arakawa c-grid, metodos anidados

4.1.3. Discretización Temporal

pasos de tiempo físico y acustico, pasos del rk3

4.1.4. Aspectos Numéricos

Filtros

filtro acustico, filtro polar, otros filtros

Advección

discretizacion numerica de la advection, limitadores, etc.

Difusión

La difusión y los flujos turbulentos calculados según el espacio físico (x, y, z) se calculan haciendo uso de la métrica del espacio:

$$z_x = g^{-1} \delta_x \phi \quad (4.1.5)$$

$$z_y = g^{-1} \delta_y \phi \quad (4.1.6)$$

El término difusivo se agrega al lado derecho de las ecuaciones de Euler, junto al resto de las fuerzas externas. Estas se ven:

$$\partial_t U = \dots - m_x [\partial_x \tau_{11} + \partial_y \tau_{12} - \partial_z (z_x \tau_{11} + z_y \tau_{12})] - \partial_z \tau_{13} \quad (4.1.7)$$

$$\partial_t V = \dots - m_y [\partial_x \tau_{12} + \partial_y \tau_{22} - \partial_z (z_x \tau_{12} + z_y \tau_{22})] - \partial_z \tau_{23} \quad (4.1.8)$$

$$\partial_t W = \dots - m_y [\partial_x \tau_{13} + \partial_y \tau_{23} - \partial_z (z_x \tau_{13} + z_y \tau_{23})] - \partial_z \tau_{33} \quad (4.1.9)$$

Y el tensor de esfuerzos viscosos es:

$$\tau_{ij} = -\mu_d K_{h,v} S_{ij} \quad (4.1.10)$$

donde $K_{h,v}$ es la viscosidad turbulenta en dirección horizontal o vertical según la ecuación y S_{ij} es el tensor tasa de deformación.

La viscosidad turbulenta se calcula en función de la energía cinética turbulenta e y de la forma:

$$K_{h,v} = C_k l_{h,v} \sqrt{e} \quad (4.1.11)$$

donde C_k es una constante (normalmente $0,15 < C_k < 0,25$) y l es un largo característico que se calcula en función de la isotropía de la malla, la resolución, e y la estratificación.

La ecuación de transporte para e es:

$$\partial_t (\mu_d e) + (\partial_i V_i e)_\eta = \mu_d (\text{producción} + \text{flotación} + \text{dissipación}) \quad (4.1.12)$$

falta detallar el resto de las ecuaciones, modelo de smagorinsky.

Microfísicas

detallar cada microfísica y su incorporación a las ecuaciones

Capítulo 5

Metodología

5.1. Alcance de la Investigación

5.2. Datos de entrada al modelo

condiciones de borde, bbdd de terreno, bbdd de uso de suelo.

5.3. Preproceso de la Asimilación de Datos

5.4. Posproceso de los datos

5.4.1. Interpolación de alturas

ley logarítmica.

5.4.2. Cálculo de Errores

Considerando que el resultado final de las simulaciones realizadas es un archivo de texto con la serie de tiempo para los valores de u , v y w para cada punto de interés en el dominio, es necesario definir una estimación del error entre la simulación realizada y la serie de tiempo medida en el mástil.

Se decide utilizar dos indicadores para llevar a cabo esta tarea: el MAE y el RMSE.

El MAE (*Mean Absolute Error*) entre dos variables continuas se calcula de la siguiente forma:

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - x_i| \quad (5.4.1)$$

Es un promedio del valor absoluto de los errores.

Si graficáramos la correspondencia de los datos en un gráfico de x vs y , el MAE correspondería al valor medio de la distancia horizontal entre cada punto y la línea $x = y$.

El RMSE (*Root Mean Squared Error*) por otro lado se calcula como:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2} \quad (5.4.2)$$

Y corresponde a la raíz de los momentos muestrales de segundo orden de la diferencia entre los valores a comparar, en otras palabras, es un análogo al MAE pero pondera con mayor importancia los errores mas grandes. Es un promedio de los errores al cuadrado.

5.5. Caso de Validación: Terreno Plano Høvsøre

5.5.1. Aspectos generales de las simulaciones

Cuadro 5.1: Dominio numérico espacial y temporal para simulación del caso Høvsøre.

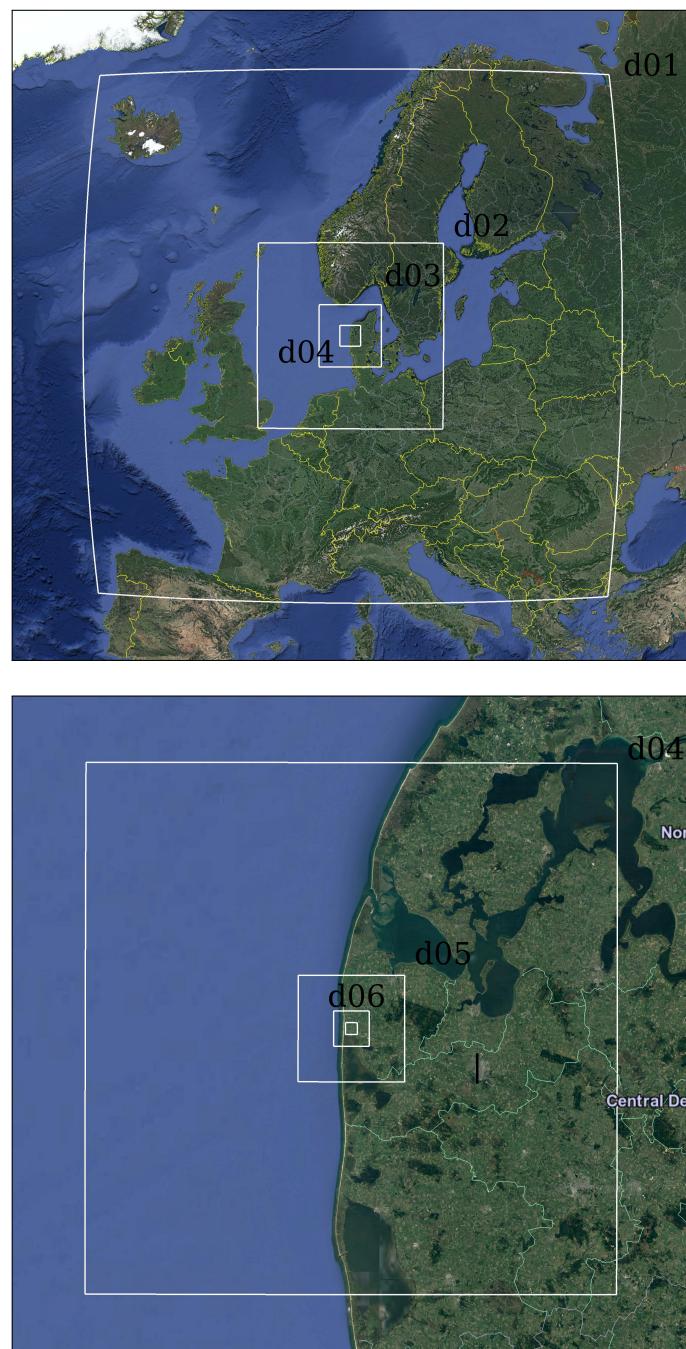
Parámetro	Selección
Fecha	2010-09-08
Hora Inicio	06:00:00
Hora Término	20:00:00
Puntos Malla Vert.	47
P_{top}	5000 kPa
# Dominios	7
Lat. Centro	56.447984
Lon. Centro	8.151570

Cuadro 5.2: Valores característicos de cada dominio.

Dominio	d01	d02	d03	d04	d05	d06	d07
N_x	107	107	107	107	107	107	107
N_y	107	107	107	107	107	107	107
$\Delta x = \Delta y$ [m]	30000	10000	3333.3	1111.1	222.22	74.074	24.691
Δt [s]	90	30	10	3.333	0.666	0.222	0.074
Orografía	GMTED2010	GMTED2010	GMTED2010	ASTER	ASTER	ASTER	ASTER
Uso de Suelo	USGS	USGS	USGS	CLC12	CLC12	CLC12	CLC12

Cuadro 5.3: Parametrizaciones físicas utilizadas en el modelo.

Dominio	d01	d02	d03	d04	d05	d06	d07
Micro-físicas	WSM5						
Cúmulos	Grell	Grell	—	—	—	—	—
Capa Superficial	MM5						
PBL	YSU	YSU	YSU	YSU	—	—	—
Modelo LES	—	—	—	—	1.5TKE	1.5TKE	1.5TKE
Modelo de Suelo	Difus.						
Rad. Onda Larga	RRTM						
Rad. Onda Corta	Dudhia						

**Figura 5.1:** Distribución telescopica de los 7 mallas anidadas en el dominio numérico.

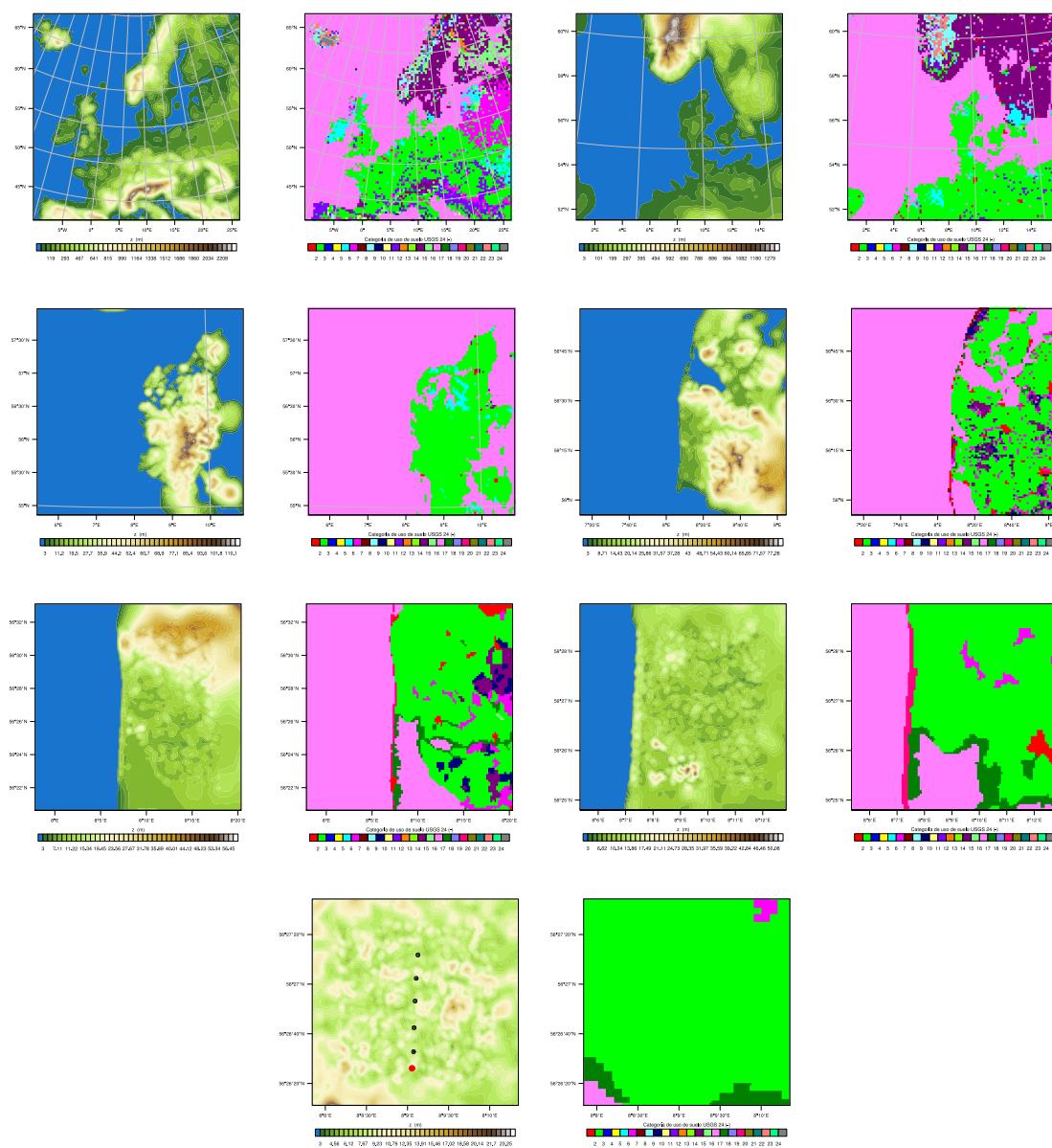


Figura 5.2: Orografía (MSNM) y uso de suelo (categoría USGS24) de alta definición para cada uno de las mallas anidadas (d01-d07). Para el dominio d07 se presenta la ubicación del punto de control (rojo) y la distribución de turbinas eólicas en la zona (negro).

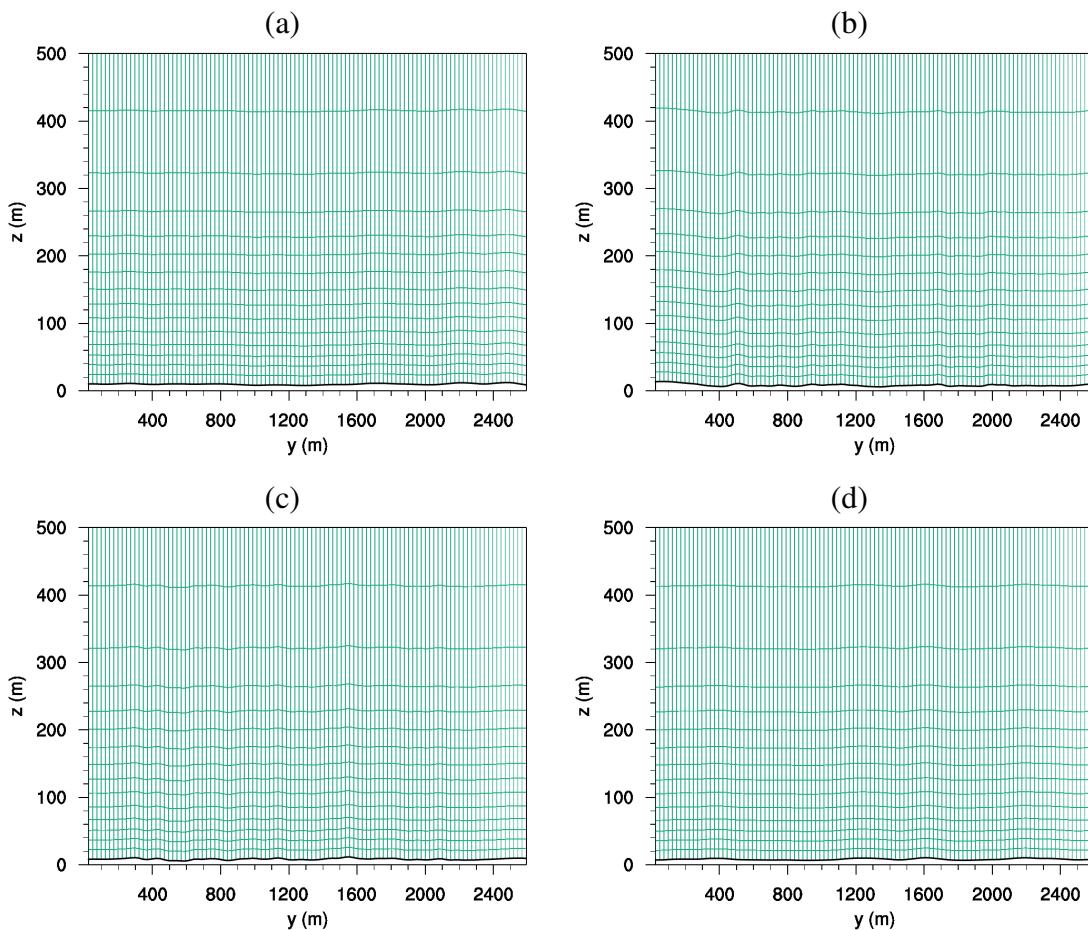


Figura 5.3: Distribución de la malla vertical.

5.5.2. Aspectos generales del proceso de asimilación de datos

A modo de implementar una mejora para la simulación multiescala a alta resolución que se está realizando, es que se plantea la utilización de un método de asimilación de datos para poder anclar ciertos valores conocidos dentro de la simulación y así obtener resultados mas acordes a la realidad.

La base teórica de la asimilación de datos en WRF ya se mencionó en informes anteriores. A continuación se presentan la información relevante para la correcta ejecución del sistema de asimilación y su replicabilidad.

Los valores a asimilar son los valores tomados experimentalmente en el mástil meteorológico de Høvsøre y que se pueden ver en la Figura ??.

Cuadro 5.4: Características del proceso de DA.

Parámetro	Selección
Hora Inicio DA	06:00:00
Hora Término DA	12:00:00
Intervalo de DA	10 mins.
Puntos a Anidar	5
VARIABLES	u, v
Lat. Mástil	56.440582
Lon. Mástil	8.150896
Alturas	10m, 40m, 60m, 80m, 100m

5.6. Caso de Estudio: Terreno Complejo Bolund

5.6.1. Aspectos generales de las simulaciones

Tomando en cuenta que la campaña de medición para el caso Bolund se llevó a cabo durante los meses de Enero y Febrero del 2008, fue necesario hallar un día en donde hubiera una estratificación atmosférica lo mas neutra posible, con el modo de tener resultados comparables con aquellos obtenidos en la literatura y simulados de manera ideal.

Convenientemente, en el informe técnico que detalla la campaña de medición, los autores presentan un gráfico para la longitud de Monin-Obukhov que permite identificar que los días 3-4 de Enero presentan una estratificación muy cercana a la neutra y por lo tanto se decide simular para esas horas.

Cuadro 5.5: Dominio numérico espacial y temporal para simulación del caso Høvsøre.

Parámetro	Selección
Fecha	04-01-2008
Hora Inicio	06:00 UTM
Hora Término	20:00 UTM
Puntos Malla Vert.	50
P_{top}	10000 kPa
# Dominios	8
Lat. Centro	55.70360
Lon. Centro	12.09840

Cuadro 5.6: Valores característicos de cada dominio.

Dominio	d01	d02	d03	d04	d05	d06	d07	d08
N_x	106	106	106	106	106	106	106	106
N_y	106	106	106	106	106	106	106	91
$\Delta x, \Delta y$ [m]	10000	3333.3	1111.1	222.22	74.074	24.691	8.23045	2.74348
Δt [s]	40	13.3333	4.4444	0.8889	0.2963	0.0988	0.0329	0.0110
Orografía	GMTED2010	GMTED2010	GMTED2010	ASTER	ASTER	ASTER	ASTER	Bolund
Uso de Suelo	USGS	USGS	USGS	CLC12	CLC12	CLC12	CLC12	Bolund

Cuadro 5.7: Parametrizaciones físicas utilizadas en el modelo.



Figura 5.4: Distribución telescópica de los 8 mallas anidadas en el dominio numérico.

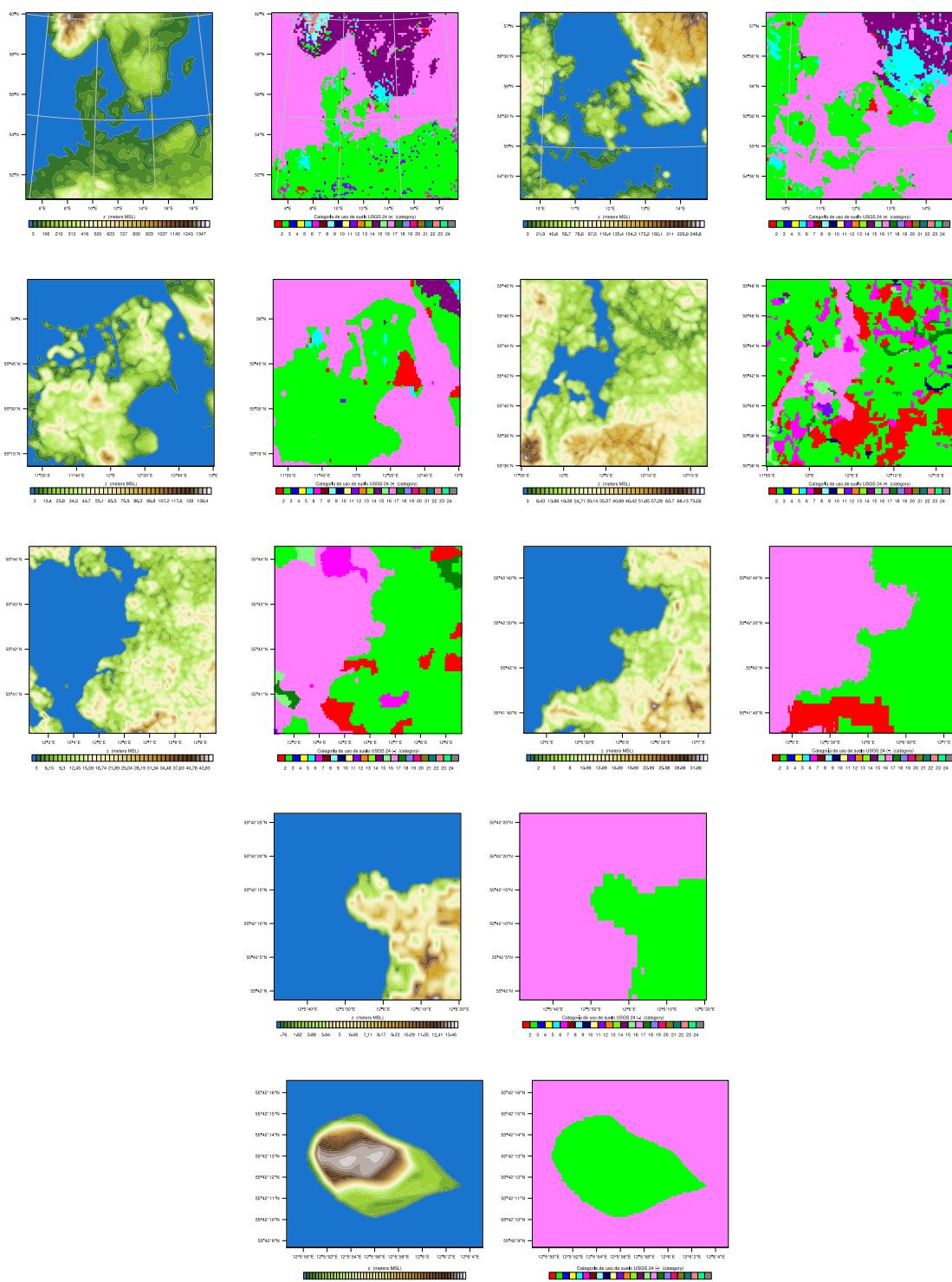


Figura 5.5: Orografía (MSNM) y uso de suelo (categoría USGS24) de alta definición para cada uno de las mallas anidadas (d01-d08).

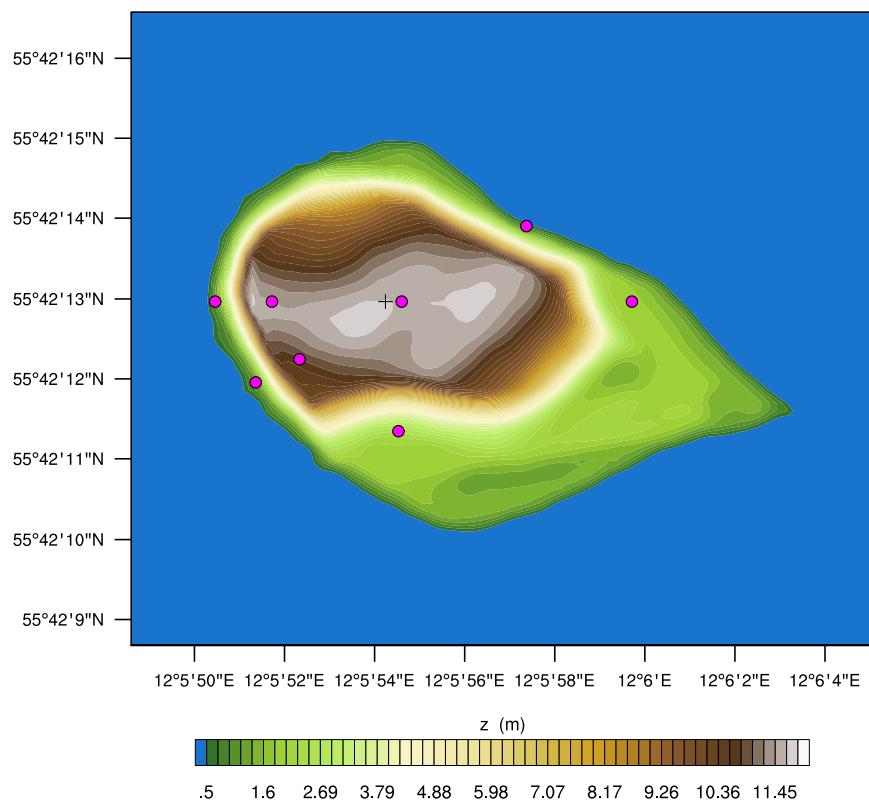


Figura 5.6: Ubicación espacial de los puntos de control en el dominio. En cada punto de control se ubican anemómetros que miden a las alturas de 2m, 5m, y 9m.

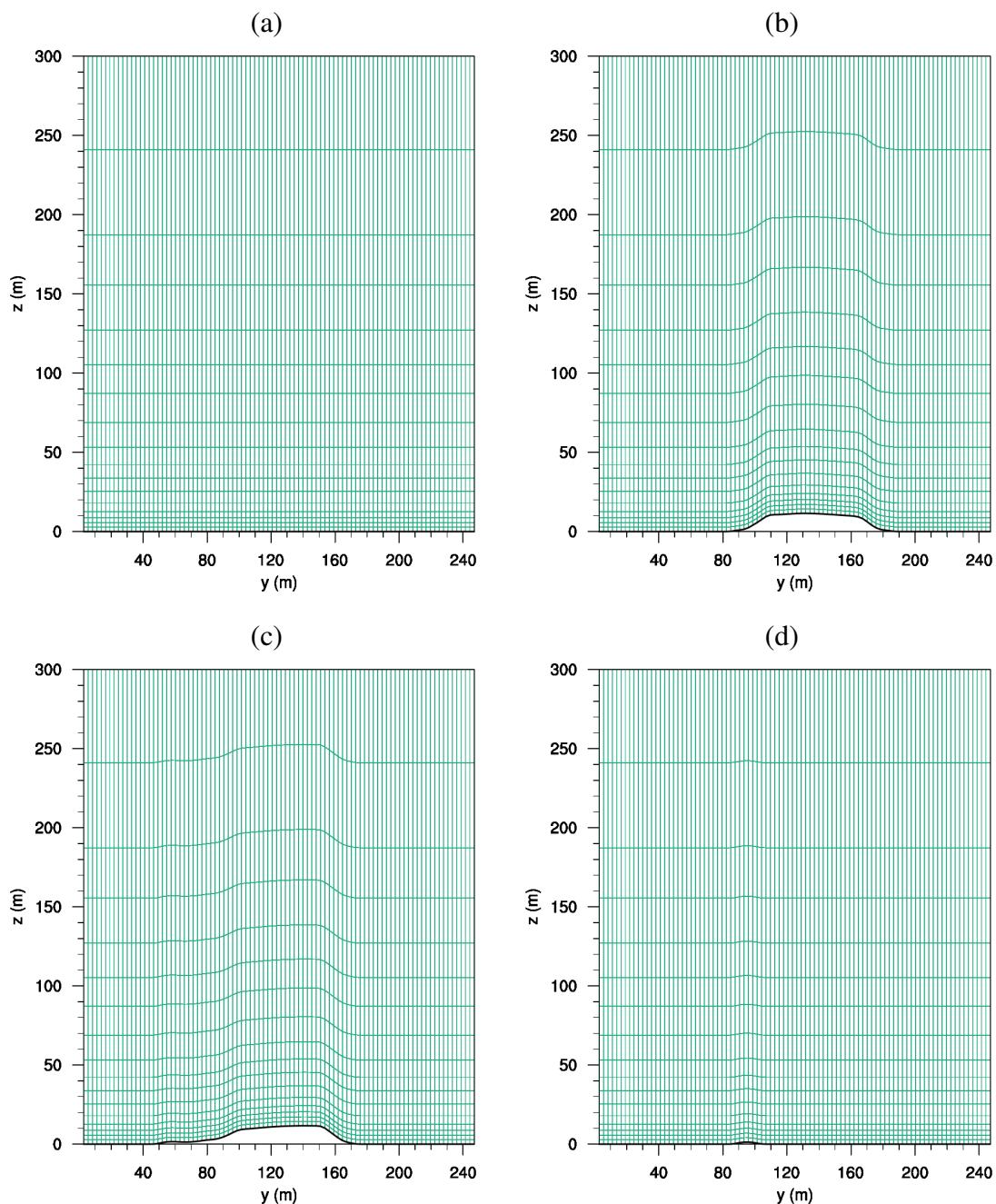


Figura 5.7: Distribución de la malla vertical.

5.6.2. Aspectos generales del proceso de asimilación de datos

Cuadro 5.8: Características del proceso de DA.

Parámetro	Selección
Hora Inicio DA	06:00:00
Hora Término DA	12:00:00
Intervalo de DA	10 mins.
Puntos a Anidar	??
Variables	u, v
Lat. Mástil	??
Lon. Mástil	??
Alturas	2m, 5m, 9m

Capítulo 6

Resultados

- 6.1. Caso de Validación: Hovsore sin Asimilación de Datos**
- 6.2. Caso de Validación: Hovsore con Asimilación de Datos**
- 6.3. Caso de Estudio: Bolund sin Asimilación de Datos**
- 6.4. Caso de Validación: Bolund con Asimilación de Datos**

Capítulo 7

Conclusiones

Apéndice A

Incorporación de Bases de Datos de Alta Resolución