



Simulación Multiescala de Viento Sobre Terreno Complejo Mediante el Método Embebido WRF-LES y Asimilación Variacional de Datos 4D

Pablo Andrés Cárdenas Zamorano

Magíster en Ciencias de la Ingeniería Mecánica
Universidad Técnica Federico Santa María

Profesor Guía:

Ph.D. Alex Flores Maradiaga

Profesor Correferente:

Ph.D. Carlos Rosales Huerta

Evaluador Externo:

Ph.D. Ricardo Muñoz Magnino

Octubre, 2019

Motivación

¿Por qué Predecir el Viento?

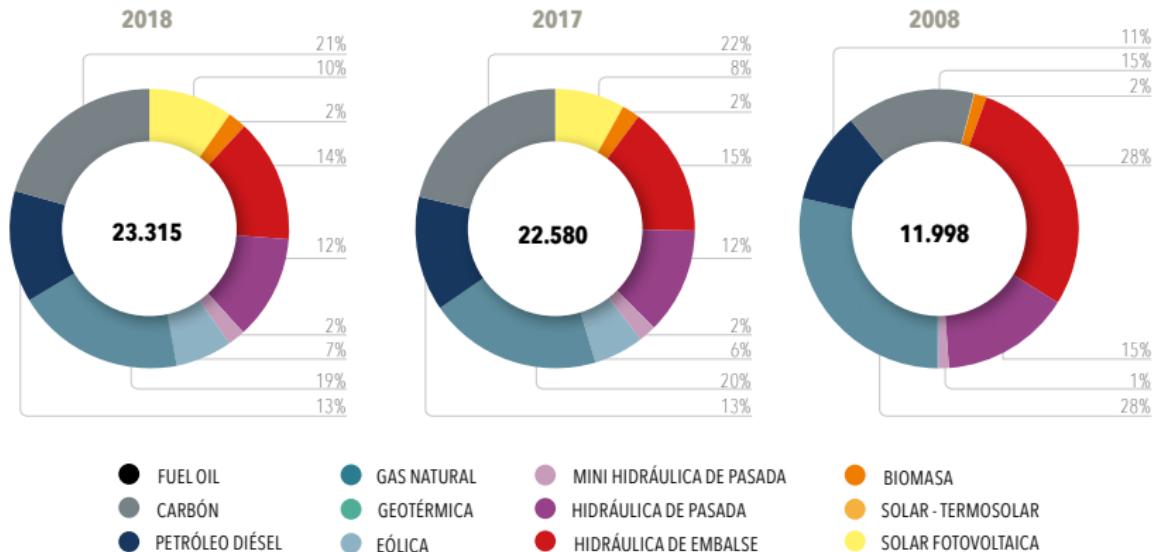


Figura 1: Evolución de la matriz energética chilena. Fuente: Comisión Nacional de Energía (2018).

Motivación

¿Por qué Predecir el Viento?

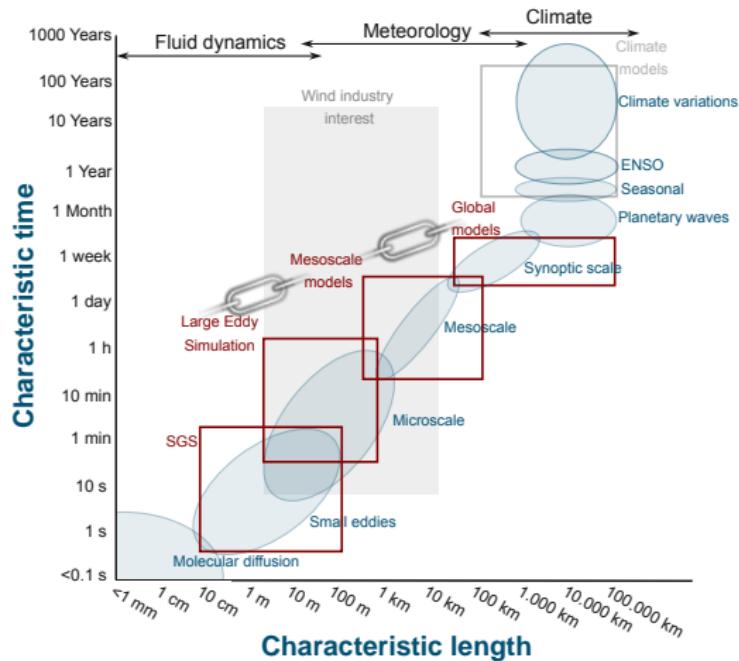


Figura 2: Unificación de escalas en dinámica atmosférica. Fuente: Montornés et al. (2017).

Motivación

¿Cómo Predecirlo?

- a. Extrapolación Estadística / Simulación Numérica.
- b. Modelos Meteorológicos / CFD.
- c. Correcta representación de la CLP (PBL).
- d. Turbulencia y Terreno Complejo.

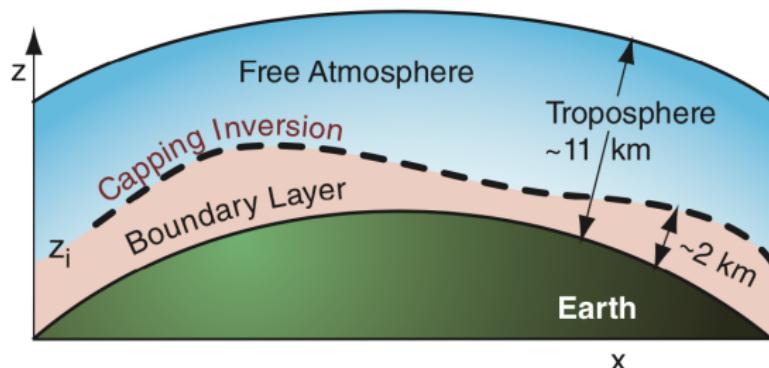


Figura 3: Esquema de la capa límite planetaria. Fuente: Stull (2018).

Motivación

¿Cómo Predecirlo?

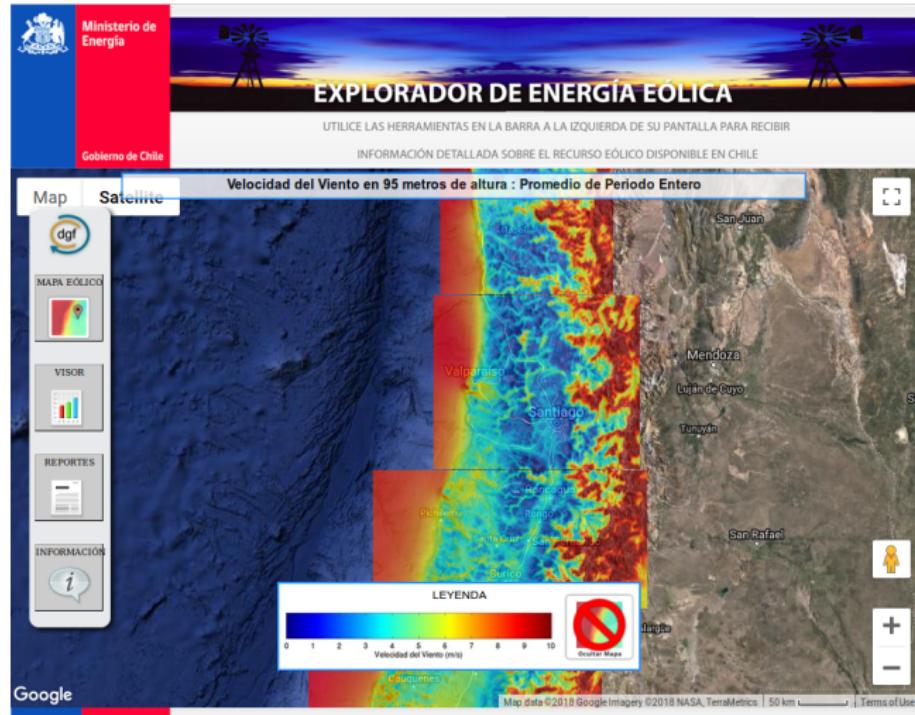


Figura 4: Interfaz online del explorador eólico de la Universidad de Chile.

Motivación

¿Cómo Predecirlo?

AEROTRANSPORTADA AUTONOMA
(EMA2)

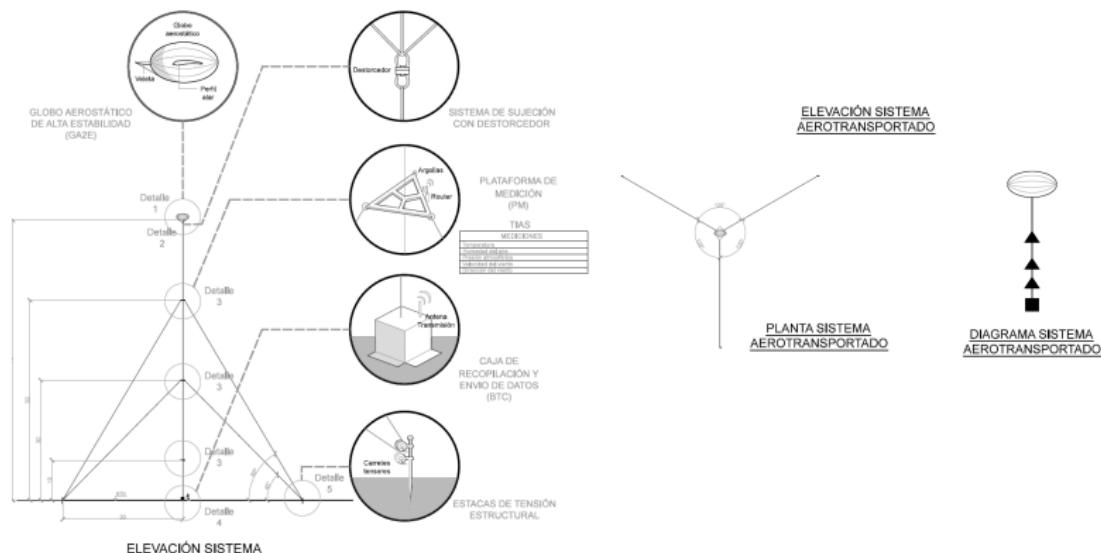
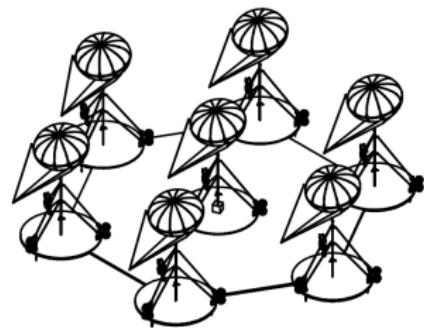


Figura 5: Esquema de la sonda FONDEF ID16I10105.

Motivación

¿Cómo Predecirlo?

(a)



(b)



Figura 6: Detalle del proyecto FONDEF ID16I10105. (a) Célula del sistema experimental de medición. (b) Prototipo en el laboratorio.

Hipótesis y Objetivos

Hipótesis

Se pueden mejorar las predicciones numéricas de viento a corto plazo sobre terreno complejo a través de simulaciones multiescala de alta resolución, LES y asimilación de datos 4D en la CLP.

Objetivo Principal

Implementar una metodología que incorpore escalamiento dinámico de dominios, nuevas bases de datos de alta resolución, LES y asimilación de datos 4D multipunto para mejorar los resultados de modelos numéricos de viento sobre terreno complejo.

Estado del Arte

- a. Problemáticas del escalamiento dinámico.
- b. Antecedentes de turbulencia atmosférica y terreno complejo.
- c. Desafíos de la alta resolución en terreno complejo.
- d. Contexto de la asimilación de datos.

Estado del Arte

Problemáticas del escalamiento dinámico

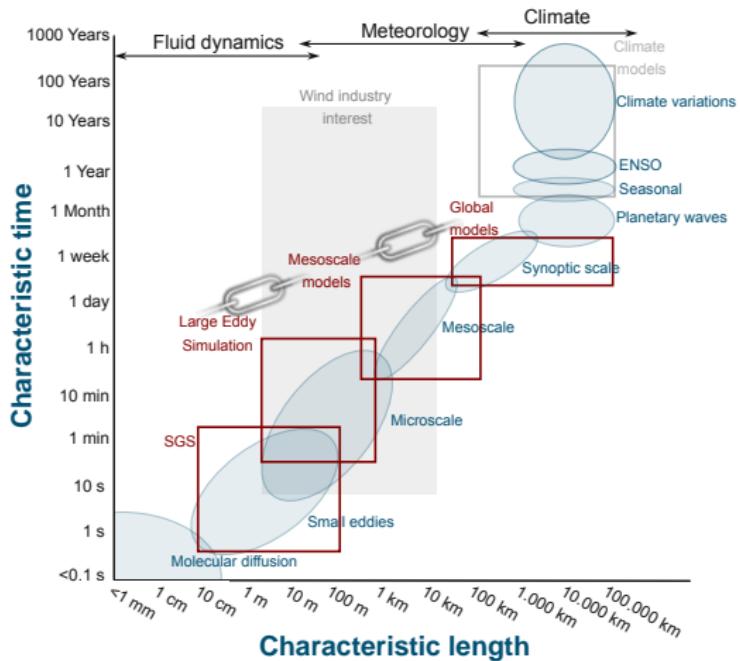


Figura 7: Unificación de escalas en dinámica atmosférica. Fuente: Montornés et al. (2017).

Estado del Arte

Problemáticas del escalamiento dinámico

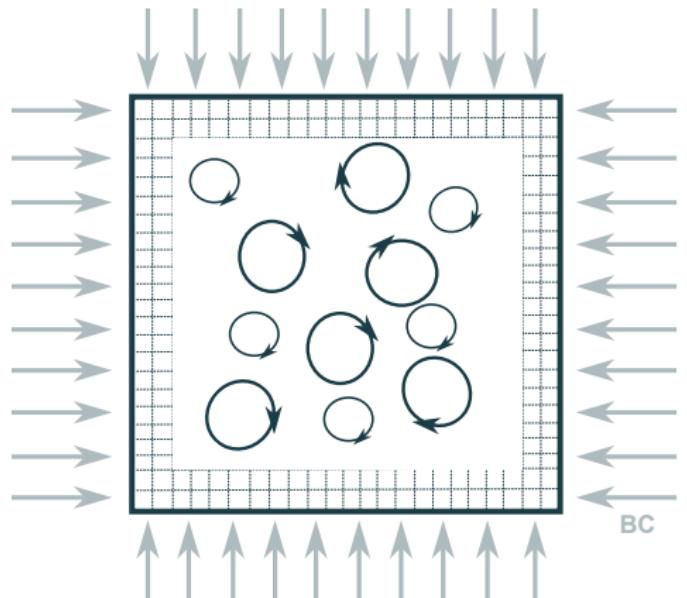


Figura 8: Idealización de los distintos tamaños de vórtices dentro de un dominio en la zona gris de la turbulencia. Fuente: Montornés et al. (2017).

Estado del Arte

Problemáticas del escalamiento dinámico

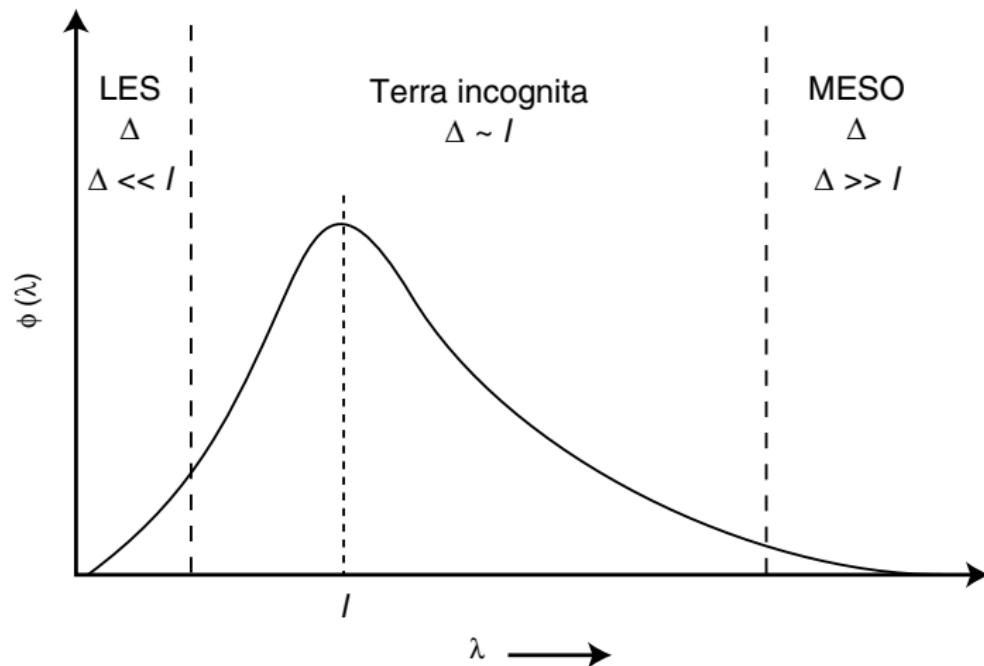


Figura 9: Espectro de energía cinética turbulenta multiescala. Fuente: Warner (2010).

Estado del Arte

Turbulencia Atmosférica y Terreno Complejo

- ▶ Modelos Lineales (Jackson y Hunt 1975, Mason y Sykes 1979)
- ▶ No lineales: 2D (Taylor 1977), RANS (Launder y Spalding 1974)
- ▶ LES: Desde los 90s se viene desarrollando para la CLP.
- ▶ Simulaciones Askeverin (2009) y cerros sinusoidales (2001).

Estado del Arte

Alta Resolución y Terreno Complejo

- ▶ Aspectos Computacionales.
- ▶ Aspectos Numéricos.
 - ▶ Precisión
 - ▶ Estabilidad
 - ▶ Difusión Numérica
 - ▶ Coordenadas
 - ▶ Benchmarking
- ▶ Parametrización de CLP.
- ▶ Inicialización y Datos de Entrada.

Estado del Arte

Alta Resolución y Terreno Complejo

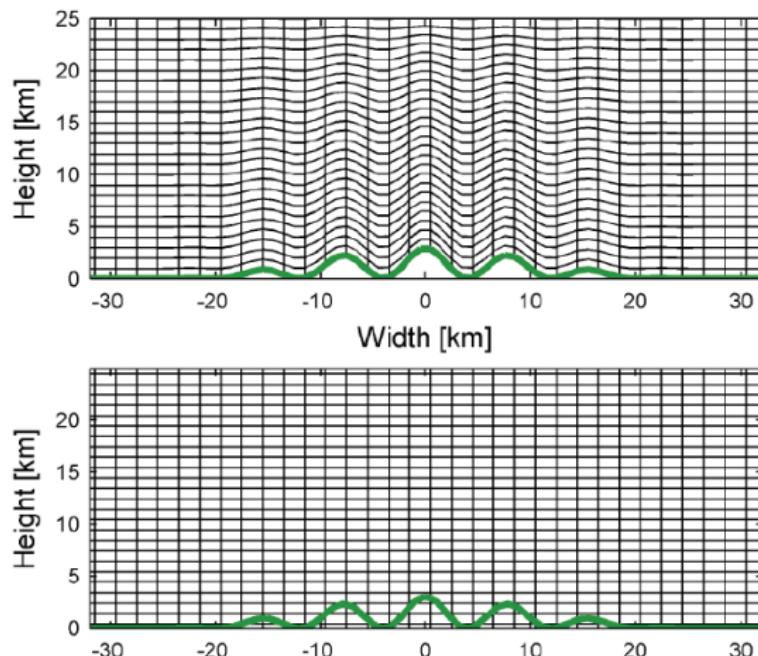


Figura 10: Comparación entre las coordenadas usuales sigma (arriba) y el método de frontera inmersa (abajo). Fuente: Arnold et al. (2010).

Estado del Arte

Alta Resolución y Terreno Complejo

- ▶ Aspectos Computacionales.
- ▶ Aspectos Numéricos.
 - ▶ Precisión
 - ▶ Estabilidad
 - ▶ Difusión Numérica
 - ▶ Coordenadas
 - ▶ Benchmarking
- ▶ Parametrización de CLP.
- ▶ Inicialización y Datos de Entrada.

Estado del Arte

Contexto de la Asimilación de Datos

- ▶ Busca obtener una mejor solución mediante la combinación de observaciones con los resultados de un modelo.
- ▶ Es satisfactorio para los casos de escalas planetarias y sinópticas.
- ▶ Para la Capa Límite Planetaria (CLP) se tienen 3 casos:
 - a. DA en CLP para mesoescala: Mejoras de hasta un 30 % en el error.¹
 - b. DA con datos superficiales: Mejoras en los resultados debido al cálculo de flujos turbulentos². No para terreno complejo.
 - c. DA en CLP para microescala: No existe literatura.

¹Cheng et al. (2017) y Dumais et al. (2013)

²Stauffer et al. (1991) y Reen y Stauffer (2010)

Marco Teórico

- a. Leyes fundamentales de un Fluido.
- b. Ecuaciones que rigen la Dinámica Atmosférica.
- c. Turbulencia.
- d. Fundamentos de Capa Límite Atmosférica.
- e. Simulación de Grandes Vórtices.
- f. Asimilación de Datos.

Marco Teórico

Leyes Fundamentales de un Fluido

Conservación de Masa:

$$\partial_t \rho + \partial_i (\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

Conservación de Momentum:

$$\rho \partial_t u_i = \rho g_i + \partial_j \sigma_{ij} \quad (2)$$

Conservación de Energía:

$$\rho \partial_t (e + K) = u_i \rho g_i + \partial_j (u_i \sigma_{ij}) - \partial_j q_i \quad (3)$$

Ecuación de Estado:

$$p = f(\rho, T) \quad (4)$$

Marco Teórico

Ecuaciones de Dinámica Atmosférica

Ecuaciones Primitivas:

$$d_t u = \frac{uv \tan \psi}{a} - \frac{uw}{a} - \frac{1}{\rho} \partial_x p - 2\Omega_e (w \cos \psi - v \sin \psi) + F_{rx} \quad (5)$$

$$d_t v = -\frac{u^2 \tan \psi}{a} - \frac{uw}{a} - \frac{1}{\rho} \partial_y p - 2\Omega_e u \sin \psi + F_{ry} \quad (6)$$

$$d_t w = \frac{u^2 + v^2}{a} - \frac{1}{\rho} \partial_z p + 2\Omega_e u \cos \psi - g + F_{rz} \quad (7)$$

$$\partial_t T = -u \partial_x T - v \partial_y T + (\gamma - \gamma_d) w + \frac{1}{C_p} d_t H \quad (8)$$

$$d_t \rho = -\rho (\partial_i u_i) \quad (9)$$

$$d_t q_v = Q_v \quad (10)$$

$$p = \rho R T \quad (11)$$

Marco Teórico

Ecuaciones de Dinámica Atmosférica

Algunas definiciones nuevas:

- ▶ Temperatura Potencial:

$$\theta = T \left(\frac{p_s}{p} \right)^{R/C_p} \quad (12)$$

- ▶ Temperatura Potencial Virtual:

$$\theta_v = \theta(1 + 0,61q_v) \quad (13)$$

- ▶ Criterios de Estabilidad:

$$d_z \theta_v > 0 ; \text{ Estable} \quad (14)$$

$$d_z \theta_v = 0 ; \text{ Neutra} \quad (15)$$

$$d_z \theta_v < 0 ; \text{ Inestable} \quad (16)$$

Marco Teórico

Turbulencia

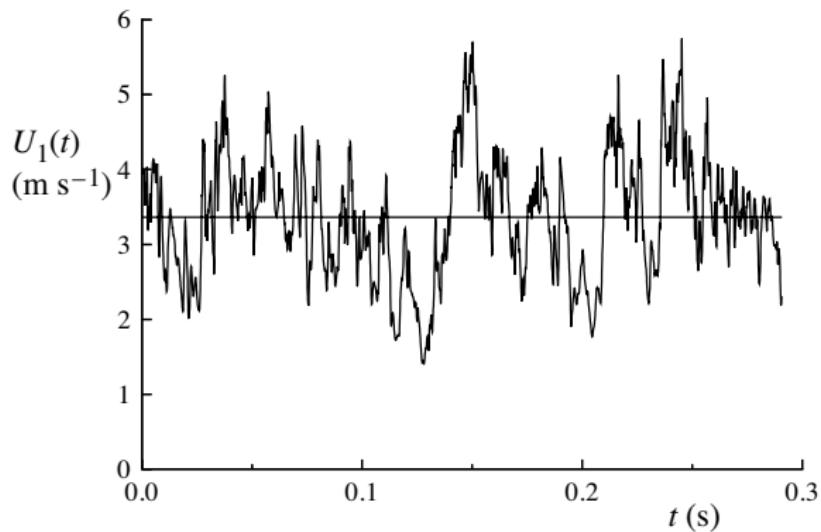


Figura 11: Serie de tiempo para una componente de la velocidad en un flujo turbulento. Fuente: Pope (2000).

Marco Teórico

Turbulencia

- Descomposición de Reynolds:

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i. \quad (17)$$

- Ecuación de N-S promediada:

$$(\partial_t \bar{u}_i + \bar{u}_j \partial_j \bar{u}_i) = \nu \partial_{jj} \bar{u}_i - \frac{1}{\rho} \partial_i \bar{p} - \partial_i (\bar{u}'_i \bar{u}'_j). \quad (18)$$

- Energía cinética turbulenta:

$$k = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i}. \quad (19)$$

Marco Teórico

Turbulencia

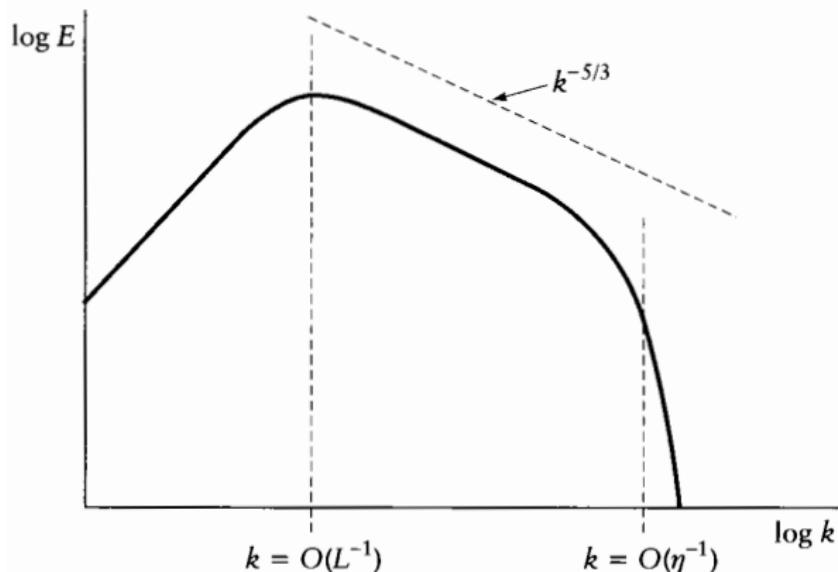


Figura 12: Gráfico típico log-log de distribución de energía cinética turbulenta con respecto al número de onda k para un flujo con un número de Reynolds elevado. Fuente: Mathieu y Scott (2000).

Marco Teórico

Fundamentos de CLA

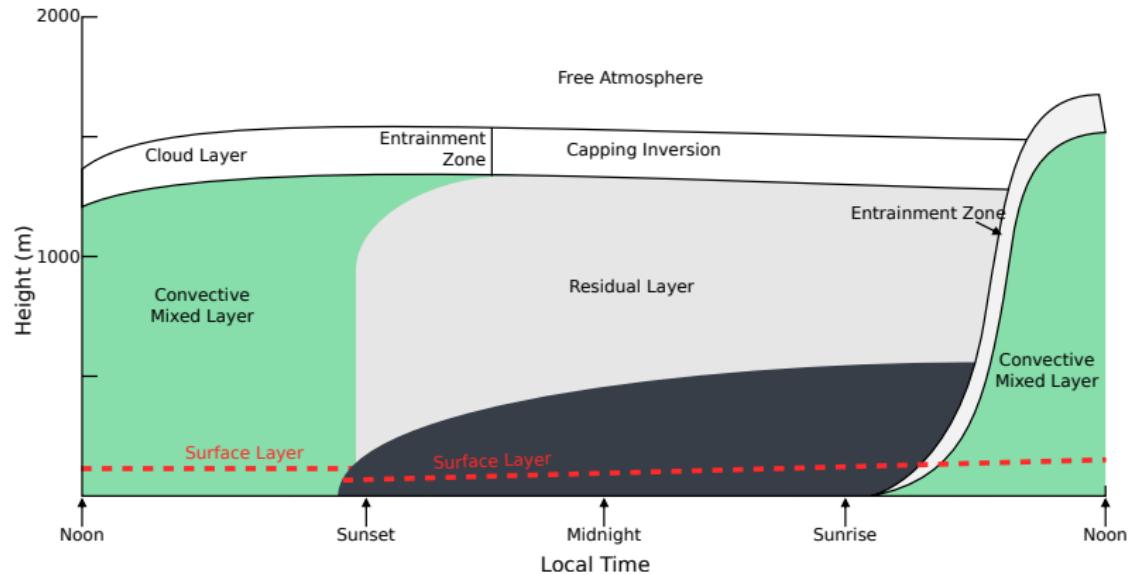


Figura 13: Evolución diurna de la estructura de la capa límite. Fuente: Wikimedia.

Marco Teórico

Fundamentos de CLA

Principales características de la CLA:

- ▶ La humanidad gasta la mayoría de su vida dentro de la ABL.
- ▶ Los pronósticos del clima son en verdad pronósticos de la capa límite.
- ▶ La polución queda atrapada en la ABL.
- ▶ La neblina es creada en la ABL.
- ▶ La fuente principal de energía para toda la atmósfera es la radiación solar, la cual, en su mayoría es absorbida por el suelo y transmitida al resto de la atmósfera por los procesos de capa límite.
- ▶ Cerca de un 50 % de la energía cinética de la atmósfera es disipada en la capa límite.
- ▶ El transporte turbulento de momentum desde la capa límite a la superficie es el sumidero más grande de momentum de la atmósfera.
- ▶ Las turbinas eólicas extraen energía de los vientos de la ABL.

Marco Teórico

Fundamentos de CLA

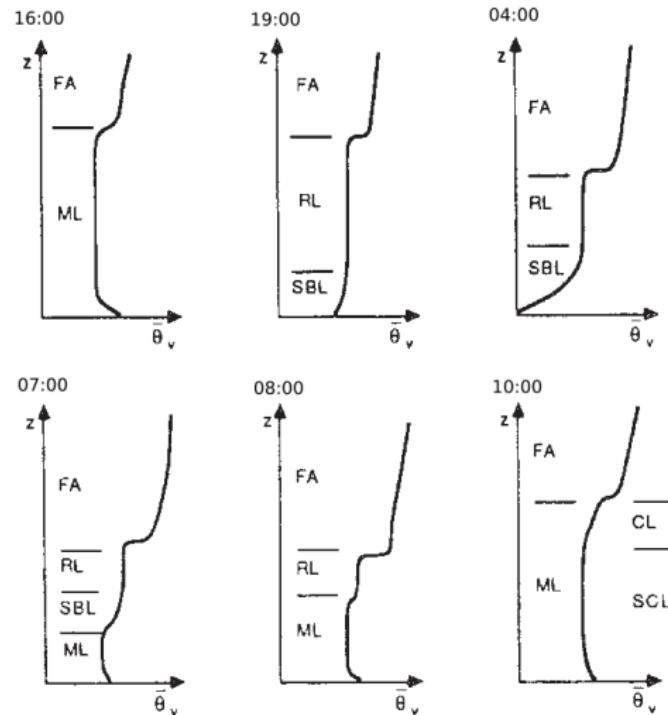


Figura 14: Evolución del perfil de $\bar{\theta}_v$ en el ciclo diurno. Fuente: Stull (1988).

Marco Teórico

Fundamentos de CLA

Definimos nuevas variables relevantes:

- ▶ Esfuerzo (turbulento) Superficial:

$$\tau_{xz,s}^r = -\rho(\overline{w'u'})_s \quad (20)$$

- ▶ Velocidad de Fricción:

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_{xz,s}^r}{\rho}} \quad (21)$$

Se debe encontrar una clausura para τ_{xz}^r . Existen varios métodos: Arrastre aerodinámico, teoría gradiente, **teoría de similaridad de Monin-Obukhov**.

Marco Teórico

Fundamentos de CLA

Teoría de Similaridad M-O:

$$\phi_m = \frac{\kappa z}{u_*} \frac{\partial |\bar{V}_h|}{\partial z} \quad (22)$$

$$\phi_m = \begin{cases} 1 + \beta_m \frac{z}{L} & \frac{z}{L} > 0 \text{ Estable} \\ (1 - \gamma_m \frac{z}{L})^{-1/4} & \frac{z}{L} < 0 \text{ Inestable} \\ 1 & \frac{z}{L} = 0 \text{ Neutral} \end{cases} \quad (23)$$

β_m, γ_m son funciones del valor de κ ($\approx 0,4$).

Para estratificación neutra se puede integrar y obtener la *log-law*:

$$|\bar{V}_h(z)| = \frac{u_*}{\kappa} \ln \frac{z}{z_{0,m}} \quad (24)$$

Marco Teórico

Simulación de Grandes Vórtices

Permite filtrar las pequeñas escalas de las grandes escalas a través de un operador de filtro:

$$\bar{u}(x_i, t) = \int G(r_i, x_j) u(x_j - r_i, t) dr_i \quad (25)$$

Definimos una magnitud residual de la forma:

$$u' = u - \bar{u}. \quad (26)$$

Marco Teórico

Simulación de Grandes Vórtices

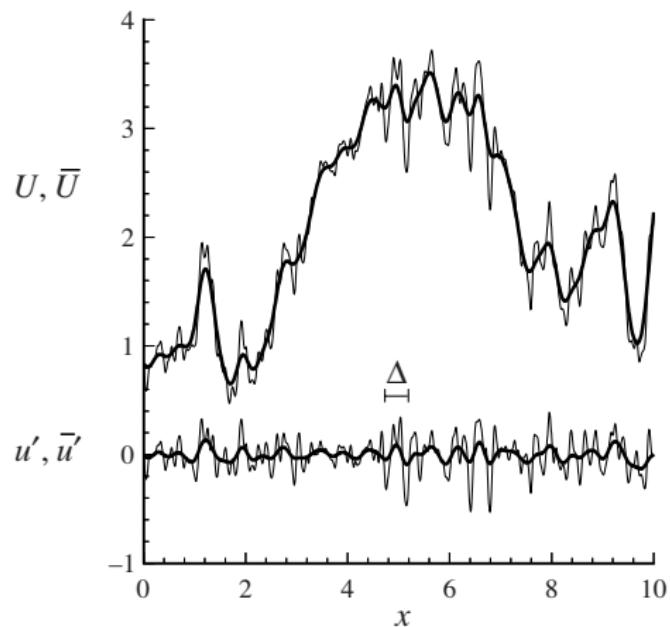


Figura 15: Curva superior: una muestra de un campo de velocidad u y su correspondiente campo filtrado \bar{u} (en negrita). Curva inferior: campo residual u' y campo residual filtrado \bar{u}' (en negrita). Fuente: Pope (2000).

Marco Teórico

Simulación de Grandes Vórtices

Aplicando el filtro a las ecuaciones de N-S se obtiene el esfuerzo residual:

$$\tau_{ij}^R \equiv \overline{u_j u_i} - \bar{u}_j \bar{u}_i \quad (27)$$

y su esfuerzo anisotrópico asociado es:

$$\tau_{ij}^r = \tau_{ij}^R - \frac{2}{3} k_r \delta_{ij} \quad (28)$$

Este último se debe modelar.

Marco Teórico

Simulación de Grandes Vórtices

El esfuerzo τ_{ij}^r se puede modelar de diversas formas. Para esta tesis se modela utilizando el modelo 1.5TKE de Deardorff (1974):

- ▶ Se plantea una ecuación de transporte para la TKE residual k_r .
- ▶ La disipación se modela a través de:

$$\varepsilon_r = \frac{C_E k_r^{3/2}}{\Delta} \quad (29)$$

- ▶ Es esfuerzo se computa a través de una viscosidad turbulenta de la forma:

$$\tau_{ij}^r = -2\nu_t \bar{S}_{ij} \quad (30)$$

$$\nu_t = C_v k_r^{1/2} \Delta \quad (31)$$

Marco Teórico

Asimilación de Datos

Objetivo: Hallar la mejor estimación del estado de la atmósfera combinando observaciones y resultados de un modelo.

- ▶ x_a : Análisis (resultado del DA).
- ▶ x_b : Background (del modelo numérico).
- ▶ y : Observaciones (de la instrumentación).

De manera general se tiene:

$$x_a = x_b + \delta x \quad (32)$$

$$x_a = x_b + K(y - H(x_b)) \quad (33)$$

K es la matriz de peso del proceso y $H(x)$ es el operador de observación.

Marco Teórico

Asimilación de Datos: Análisis Variacional Tridimensional

En la práctica, el análisis se encuentra minimizando una función de costo:

$$J(x) = J_b + J_o = \frac{1}{2}(x - x_b)^T \mathbf{B}^{-1}(x - x_b) + \frac{1}{2}(H(x) - y)^T \mathbf{R}^{-1}(H(x) - y) \quad (34)$$

De manera referencial, la solución se escribe:

$$\nabla J(x) = \mathbf{B}^{-1}(x - x_b) - H^T \mathbf{R}^{-1}(y - H(x)) = 0 \quad (35)$$

El análisis es entonces:

$$x_a = x_b + \mathbf{B}H^T(H\mathbf{B}H^T + \mathbf{R})^{-1}(y - H(x_b)) \quad (36)$$

Como esto es costoso, la minimización se hace a través de un método numérico como un método de Newton o el gradiente conjugado.

Modelo WRF

Aspectos Generales

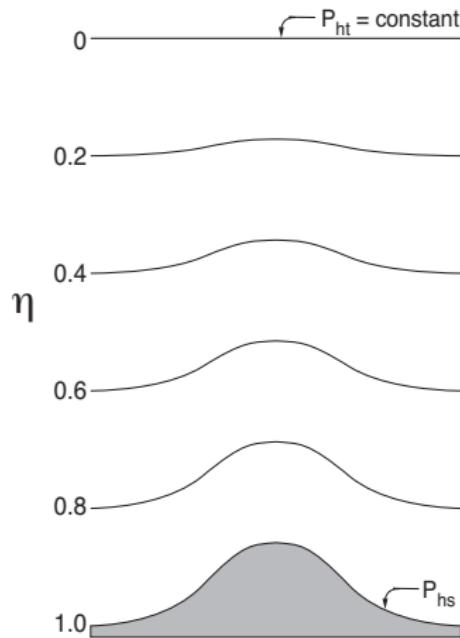
El WRF-ARW es un modelo atmosférico de mesoescala no hidrostático que resuelve las ecuaciones de Euler para flujo compresible en su forma conservativa y utilizando una coordenada vertical de presión.

Algunas características relevantes:

- ▶ Discretización espacial con malla escalonada, constante en la horizontal y variable en la vertical.
- ▶ Discretización temporal a través de RK3.
- ▶ Un filtro separa las ondas de alta frecuencia de las de baja frecuencia. Las ondas de alta frecuencia se integran en un paso de tiempo intermedio para asegurar estabilidad.
- ▶ Condiciones de borde reales e ideales.
- ▶ Anidamiento de dominios.
- ▶ Opciones de advección de hasta 6to orden.
- ▶ Físicas incluidas: Capa superficial, CLP, radiación, microfísicas y cúmulos.

Modelo WRF

Coordenada Vertical



Se define η como:

$$\eta = \frac{p_{dh} - p_{dht}}{\mu_d} = \frac{p_{dh} - p_{dht}}{p_{dhs} - p_{dht}}$$

μ_d : Peso de la columna de aire.

El modelo resuelve:

$$(u, v, w, \mu_d, \phi, \theta, p, \alpha, k)$$

Figura 16: Estructura de la coordenada vertical. Fuente: Shamarock et al. (2008).

Modelo WRF

Ecuaciones Resueltas

$$\begin{aligned} \partial_t U + m_x [\partial_x (Uu) + \partial_y (Vu)] + \partial_\eta (\Omega u) \\ + (m_x/m_y)(\alpha/\alpha_d)[\mu_d(\partial_x \phi' + \alpha_d \partial_x p' + \alpha'_d \partial_x \bar{p}) + \partial_x \phi(\partial_\eta p' - \mu'_d)] = F_U \end{aligned} \quad (37)$$

$$\begin{aligned} \partial_t V + m_y [\partial_x (Uv) + \partial_y (Vv)] + (m_y/m_x)\partial_\eta (\Omega v) \\ + (m_y/m_x)(\alpha/\alpha_d)[\mu_d(\partial_y \phi' + \alpha_d \partial_y p' + \alpha'_d \partial_y \bar{p}) + \partial_y \phi(\partial_\eta p' - \mu'_d)] = F_V \end{aligned} \quad (38)$$

$$\begin{aligned} \partial_t W + m_x [\partial_x (Uw) + \partial_y (Vw)] + \partial_\eta (\Omega w) \\ - m_y^{-1} g(\alpha/\alpha_d)[\partial_\eta p' - \bar{\mu}_d(q_v + q_c + q_r)] + m_y^{-1} \mu'_d g = F_W \end{aligned} \quad (39)$$

$$\partial_t \mu'_d + m_x m_y [\partial_x U + \partial_y V] + m_y \partial_\eta \Omega = 0 \quad (40)$$

$$\partial_t \phi' + \mu_d^{-1}[m_x m_y (U \partial_x \phi + V \partial_y \phi) + m_y \Omega \partial_\eta \phi - m_y g W] = 0 \quad (41)$$

$$\partial_t \Theta + m_x m_y [\partial_x (U\theta) + \partial_y (V\theta)] + m_y \partial_\eta (\Omega \theta) = F_\Theta \quad (42)$$

Modelo WRF

Modelación de la Turbulencia

Dentro del modelo el tensor de esfuerzos turbulentos es:

$$\tau_{ij} = -\mu_d K_{h,v} S_{ij} \quad (43)$$

La manera de computar $K_{h,v}$ va a depender de la escala espacial en la que estemos (parametrización/LES).

Para la mesoescala:

$$K_h = C_s^2 l^2 [0.25(S_{11} - S_{22})^2 + S_{12}]^{0.5} \quad (44)$$

$$K_v = f(PBL) \quad (45)$$

Modelo WRF

Modelación de la Turbulencia

Para la microescala (LES):

$$K_{h,v} = C_k l_{h,v} \sqrt{k}. \quad (46)$$

C_k es la constante del modelo y $l_{h,v}$ es un largo característico.

La ecuación de transporte para k :

$$\partial_t(\mu_d k) + (\nabla \cdot \vec{V}k)_\eta = \mu_d(\mathcal{P} + \mathcal{F} + \mathcal{D}). \quad (47)$$

El RHS corresponde a la producción mecánica, producción por flotación y disipación de k .

$$\mathcal{P} = K_h(S_{11}^2 + S_{22}^2 + S_{12}^2) + K_v(S_{33}^2 + S_{13}^2 + S_{23}^2), \quad (48)$$

$$\mathcal{F} = -K_v N^2, \quad (49)$$

$$\mathcal{D} = -\frac{Ck^{3/2}}{l_k}, \quad (50)$$

Metodología

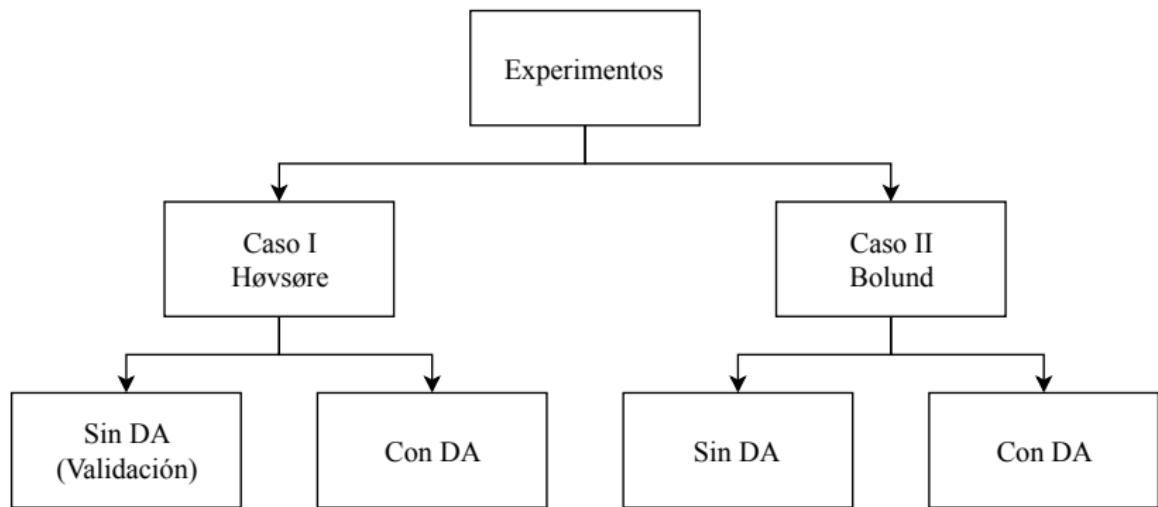


Figura 17: Diagrama de experimentos realizados.

Metodología

Selección de Dominios: Caso I Høvsøre



Figura 18: Fotografía del terreno en Høvsøre. Fuente: Peña et al.(2013)

Metodología

Configuración: Caso I Høvsøre

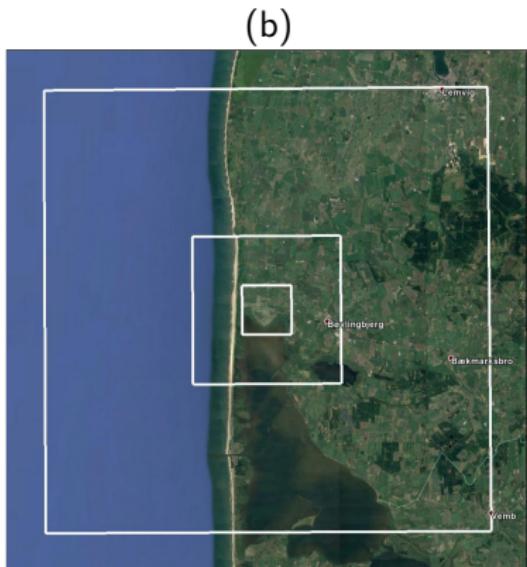
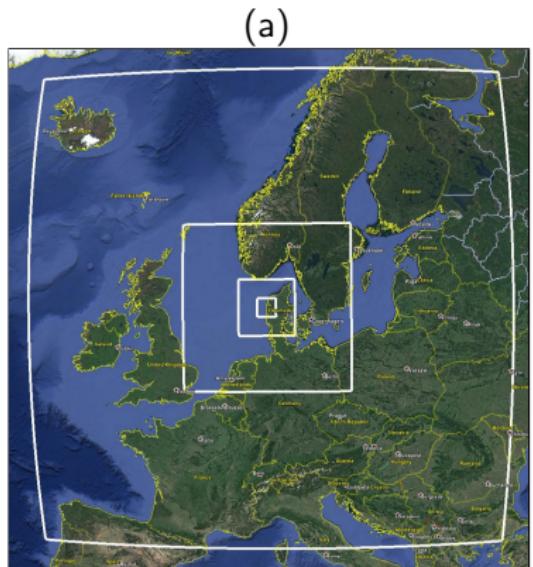


Figura 19: Información de los dominios de simulación para el caso Høvsøre. (a) Dominios d01-d04. (b) Dominios d05-d07.

Metodología

Configuración: Caso I Høvsøre

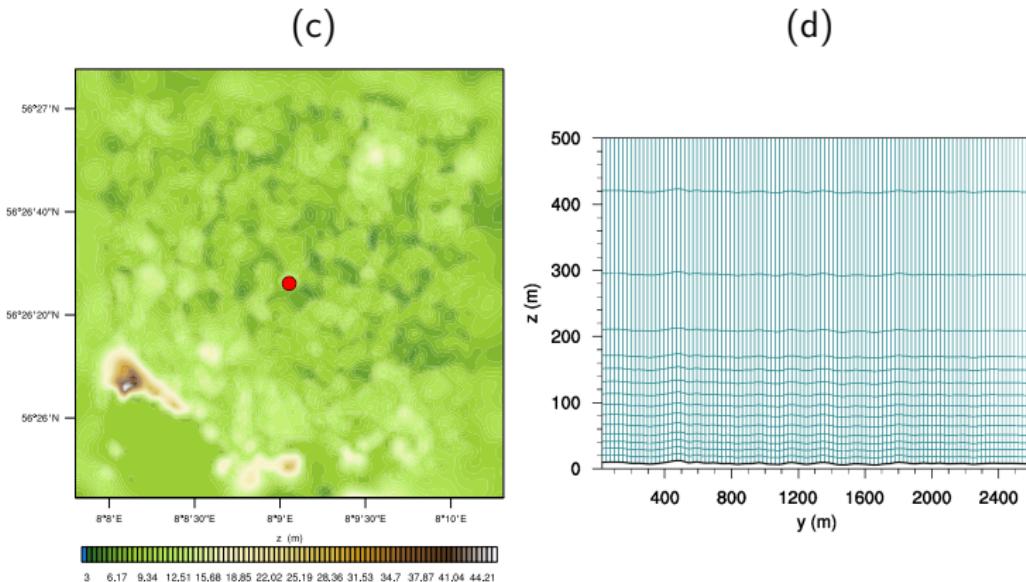


Figura 20: Información de los dominios de simulación para el caso Høvsøre. (c) Dominio d07 con el punto de control. (d) Distribución vertical de la malla adaptativa en escala 4:1.

Metodología

Configuración: Caso I Høvsøre

Tabla 1: Dominio numérico espacial y temporal para simulación del caso Høvsøre.

Parámetro	Selección
Fecha	2010-09-08
Hora Inicio	06:00:00 UTC
Hora Término	20:00:00 UTC
Puntos Malla Vert.	37
P_{top}	30000 [Pa]
# Dominios	7
Lat. Centro	56.440588
Lon. Centro	8.150896
Interválo Salida	10 [min]
Punto de Malla Total	2,831,472

Metodología

Configuración: Caso I Høvsøre

Tabla 2: Valores característicos de cada dominio en Høvsøre.

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
$\Delta x, y [m]$	30000	10000	3333.3	1111.1	222.22	74.074	24.691
$\Delta t [s]$	75	25	8.333	2.778	0.556	0.185	0.062
Orografía	GMTED	GMTED	GMTED	ASTER	ASTER	ASTER	ASTER
Uso de Suelo	USGS	USGS	USGS	CLC12	CLC12	CLC12	CLC12

Tabla 3: Parametrizaciones físicas utilizadas en el modelo para Høvsøre.

Dominio	d01	d02	d03	d04	d05	d06	d07
Micro-físicas	WSM5						
Cúmulos	Grell	Grell	—	—	—	—	—
Capa Superficial	MYNN						
PBL	MYNN	MYNN	MYNN	MYNN	—	—	—
Modelo LES	—	—	—	—	1.5TKE	1.5TKE	1.5TKE
c_k	—	—	—	—	0.3	0.3	0.3
Modelo de Suelo	Difus.						
Rad. Onda Larga	RRTM						
Rad. Onda Corta	Dudhia						

Metodología

Selección de Dominios: Caso II Bolund



Figura 21: Fotografías de la colina de Bolund. Fuente: Chaudhari (2014)

Metodología

Configuración: Caso II Bolund



Figura 22: Distribución telescópica de las 8 mallas anidadas en el dominio numérico de la colinda Bolund.

Metodología

Configuración: Caso II Bolund

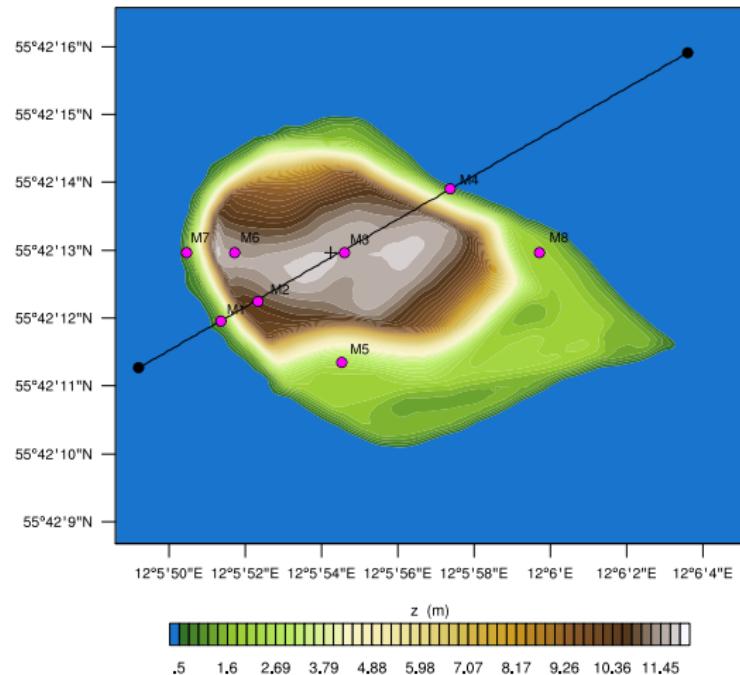


Figura 23: Ubicación espacial de los puntos de control en el dominio de Bolund. En cada punto de control se ubican anemómetros que miden a las alturas de 2m, 5m, y 9m sobre el suelo.

Metodología

Configuración: Caso II Bolund

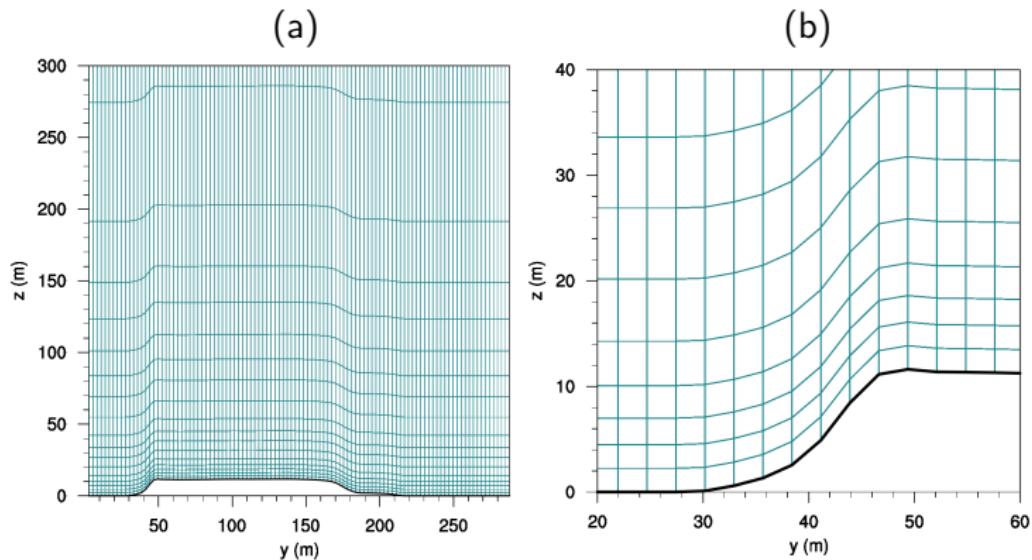


Figura 24: (a) Distribución de la malla vertical en la mitad del dominio en Bolund. (b) Detalle la pendiente abrupta (escala 1:1).

Metodología

Configuración: Caso II Bolund

Tabla 4: Dominio numérico espacial y temporal para simulación del caso Bolund.

Parámetro	Selección
Fecha	29-12-2007
Hora Inicio	06:00 UTM
Hora Término	15:00 UTM
Puntos Malla Vert.	41
P_{top}	30000 [Pa]
# Dominios	8
Lat. Centro	55.703474
Lon. Centro	12.098854
Interválo Salida	5 [min]
Punto de Malla Total	3,465,000

Metodología

Configuración: Caso II Bolund

Tabla 5: Valores característicos de cada dominio en Bolund.

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
$\Delta x, y [m]$	10000	3333.3	1111.1	222.22	74.074	24.691	8.23045	2.74348
$\Delta t [s]$	12	4	1.3333	0.4444	0.0889	0.0296	0.0099	0.0033
Orografía	GMTED	GMTED	GMTED	ASTER	ASTER	ASTER	ASTER	Bolund
Uso de Suelo	USGS	USGS	USGS	CLC12	CLC12	CLC12	CLC12	Bolund

Tabla 6: Parametrizaciones físicas utilizadas en el modelo para Bolund.

Dominio	d01	d02	d03	d04	d05	d06	d07	d08
Micro-físicas	WSM5							
Cúmulos	Grell	–	–	–	–	–	–	–
Capa Superficial	MYNN							
PBL	MYNN	MYNN	MYNN	–	–	–	–	–
Modelo LES	–	–	–	1.5TKE	1.5TKE	1.5TKE	1.5TKE	1.5TKE
c_k	–	–	–	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Modelo de Suelo	Difus.							
Rad. Onda Larga	RRTM							
Rad. Onda Corta	Dudhia							

Metodología

Configuración de la Asimilación de Datos

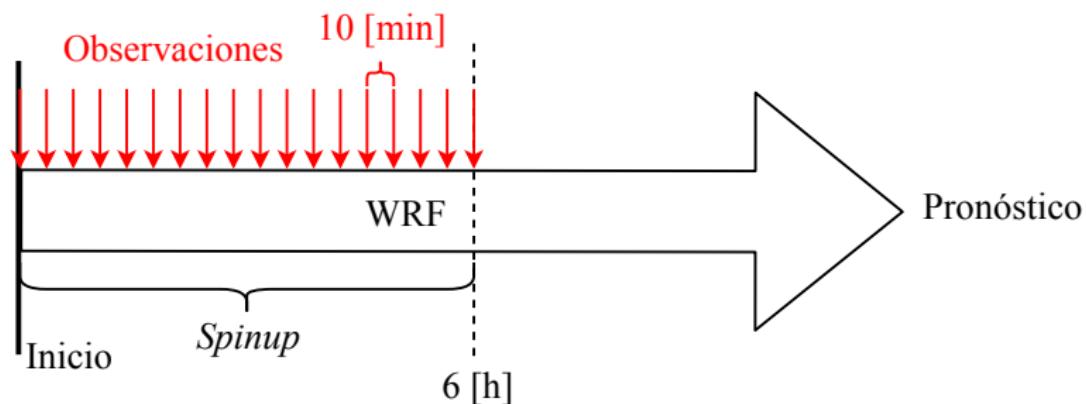


Figura 25: Esquema del proceso de asimilación de datos.

Metodología

Configuración de la Asimilación de Datos

Tabla 7: Características del proceso de DA en Høvsøre.

Parámetro	Selección
Hora Inicio DA	06:00:00
Hora Término DA	12:00:00
Intervalo de DA	10 [min]
Puntos a Anidar	1
Alturas	10m, 40m, 60m, 80m, 100m
Variables	u, v
Lat. Mástil	56.440582
Lon. Mástil	8.150896

Tabla 8: Detalle de la asimilación en cada mástil en Bolund.

	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
Latitud	55.70332	55.70340	55.70360	55.70386	55.70315	55.70360	55.70360	55.70360
Longitud	12.09760	12.09787	12.09850	12.09927	12.09848	12.09770	12.09735	12.09992
Alturas	2, 5, 9m	2, 5m	2, 5m	2, 5, 9m	2, 5m	2, 5m	2, 5m	2, 5m

Metodología

Configuración de la Asimilación de Datos

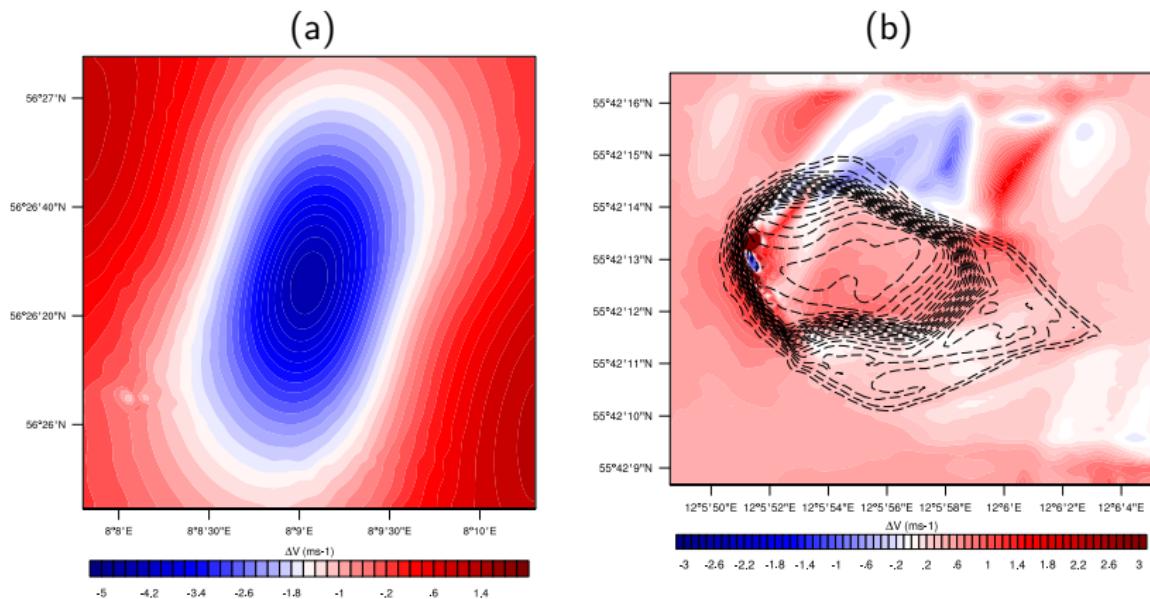


Figura 26: Diferencia de la magnitud del campo de velocidad en el primer nivel del modelo entre resultados sin y con asimilación de datos. (a) Caso I puntual. (b) Caso II con varios puntos.

Metodología

Estimación del Error

MAE:

$$E_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - x_i| \quad (51)$$

RMSE:

$$E_2 = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2} \quad (52)$$

Coeficiente de Pearson:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\left[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]^{1/2} \left[\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \right]^{1/2}} \quad (53)$$

Resultados

Caso I: Høvsøre - Validación

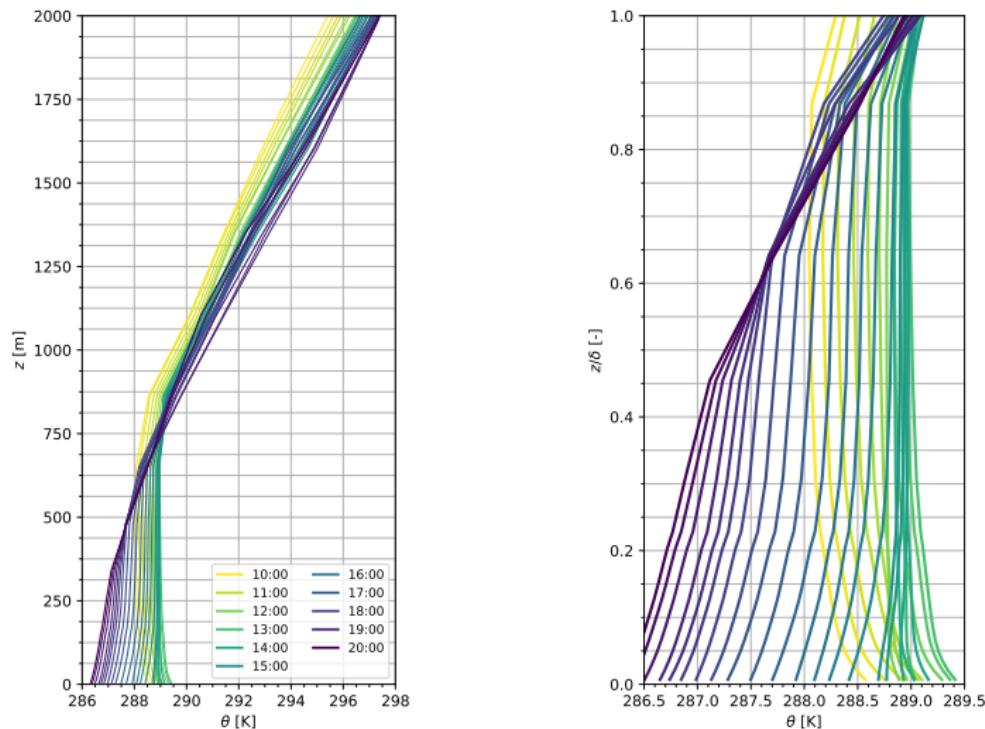


Figura 27: Perfil de temperatura potencial virtual en Høvsøre ($\delta \approx 750 [m]$).

Resultados

Caso I: Høvsøre - Validación

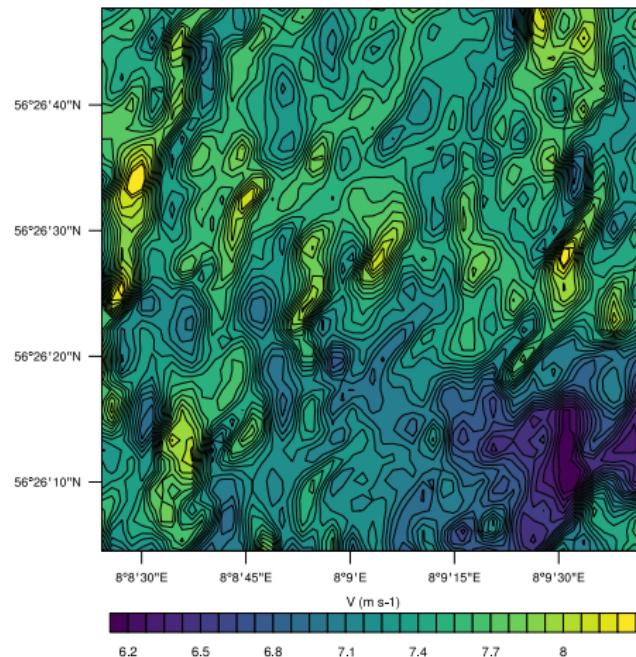


Figura 28: Magnitud de la velocidad en el primer nivel de la coordenada vertical ($z_1 = 5,25 \text{ [m]}$) para las 15:00.

Resultados

Caso I: Høvsøre - Validación

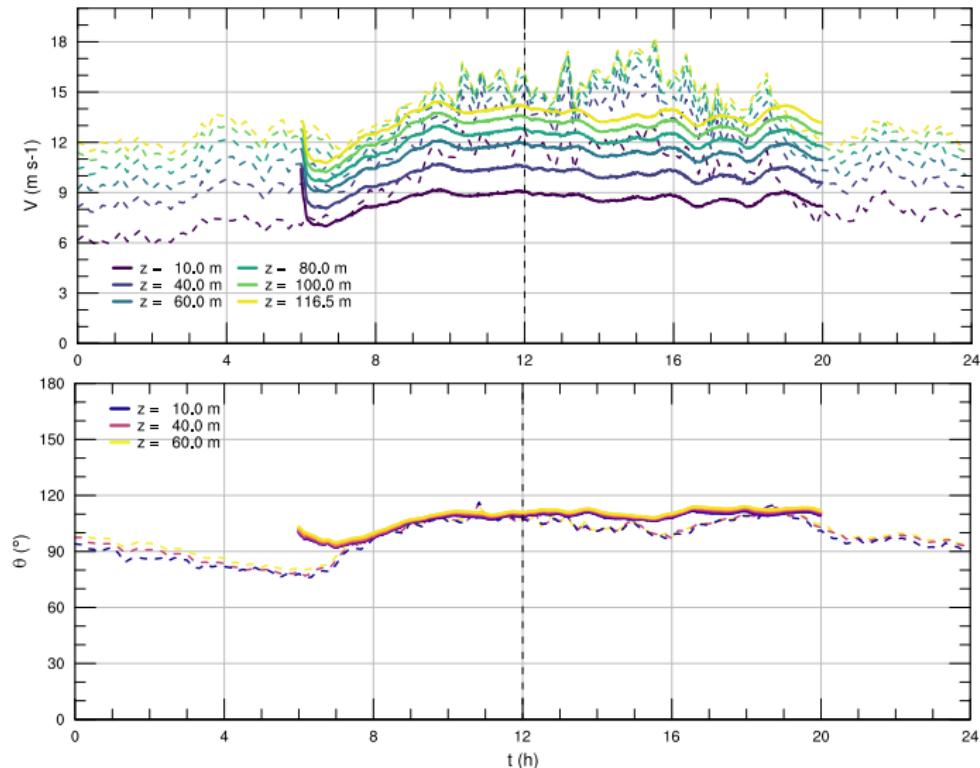


Figura 29: Serie de tiempo para la solución caso Høvsøre.

Resultados

Caso I: Høvsøre - Validación

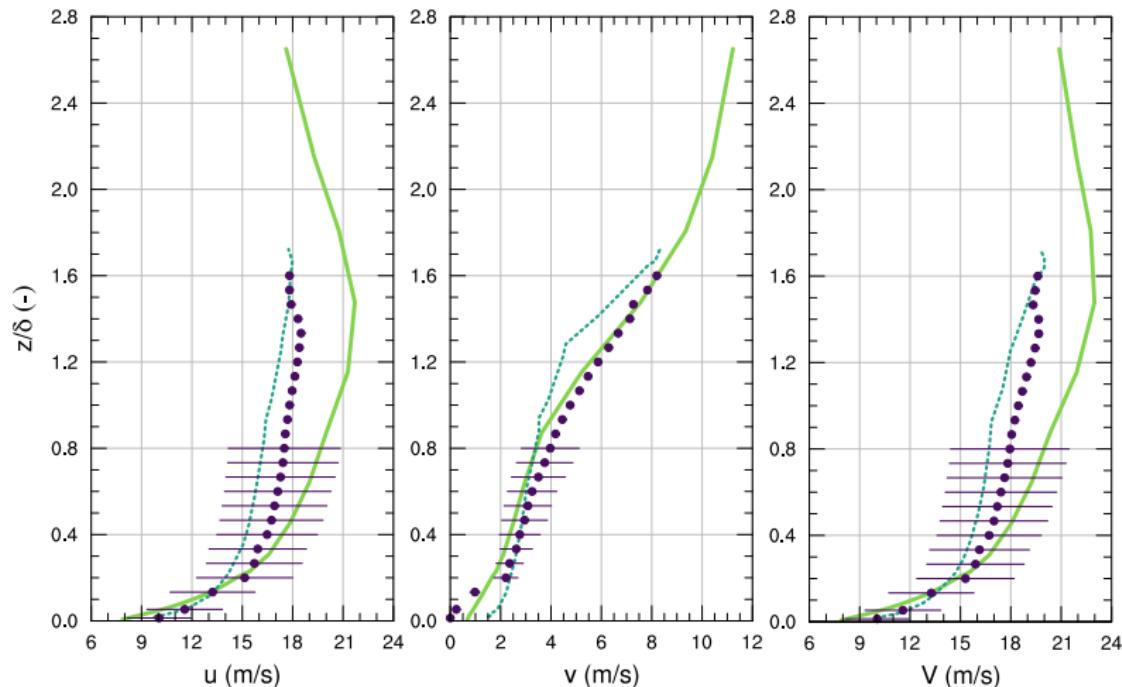


Figura 30: Validación con Peña et al. (2013). Valores promedios entre las 12:00 y 15:00.

Resultados

Caso I: Høvsøre - Validación

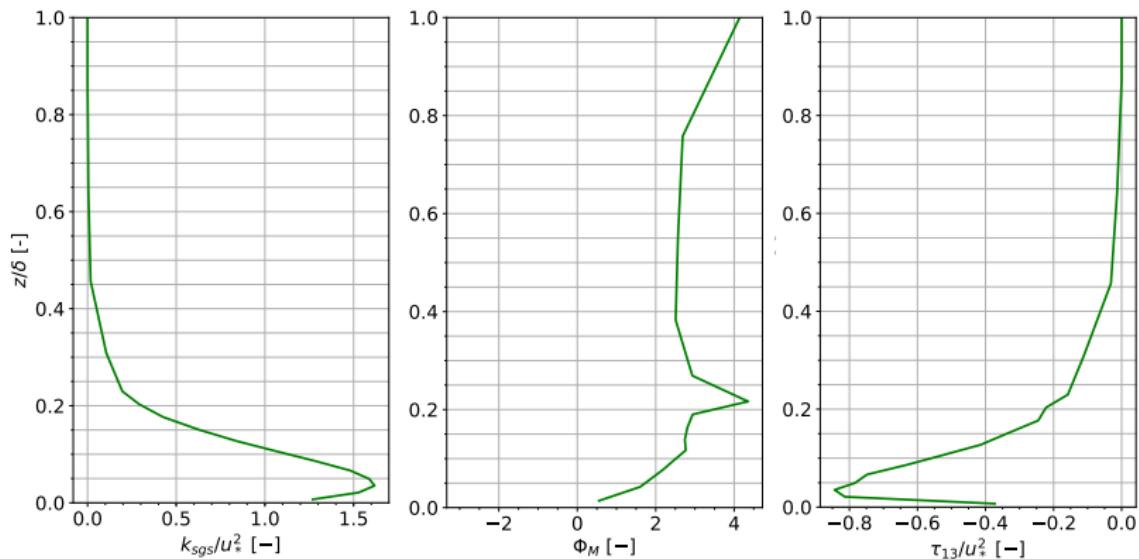


Figura 31: Variables de segundo orden adimensionalizadas. Promedios entre las 12:00 y 15:00 ($u_* = 0,552$ [m/s]).

Resultados

Caso I: Høvsøre - Validación

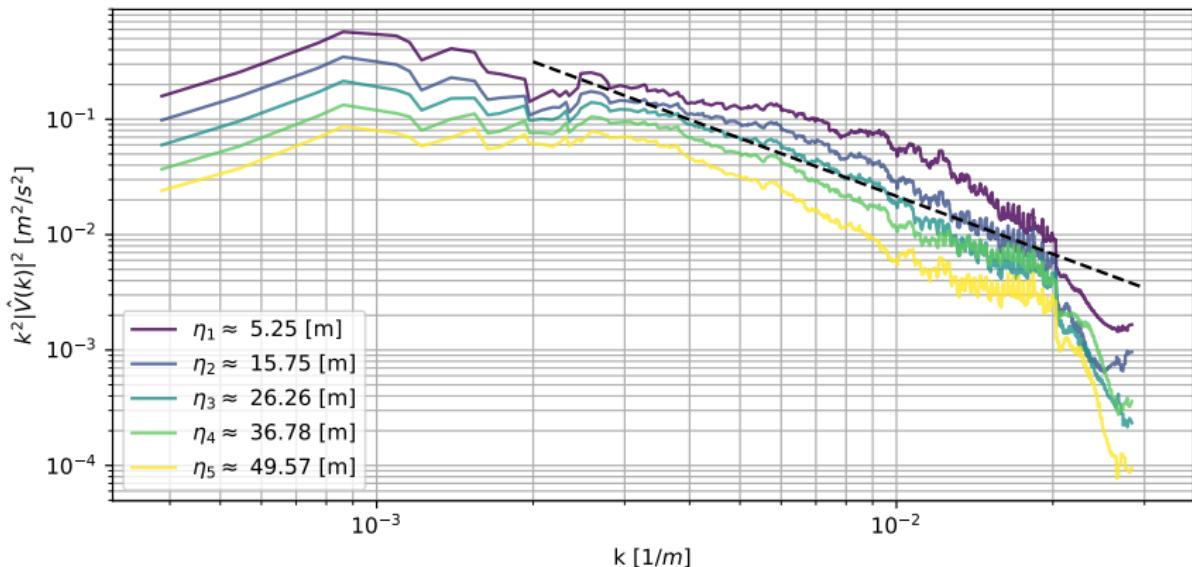


Figura 32: Espectros de energía cinética para la magnitud horizontal del viento a distintos niveles verticales en el dominio d07 caso Høvsøre.

Resultados

Caso I: Høvsøre - Validación

$$\text{MAE} = 2,41091 \text{ [m/s]} ; \text{ RMSE} = 2,80142 \text{ [m/s]}$$

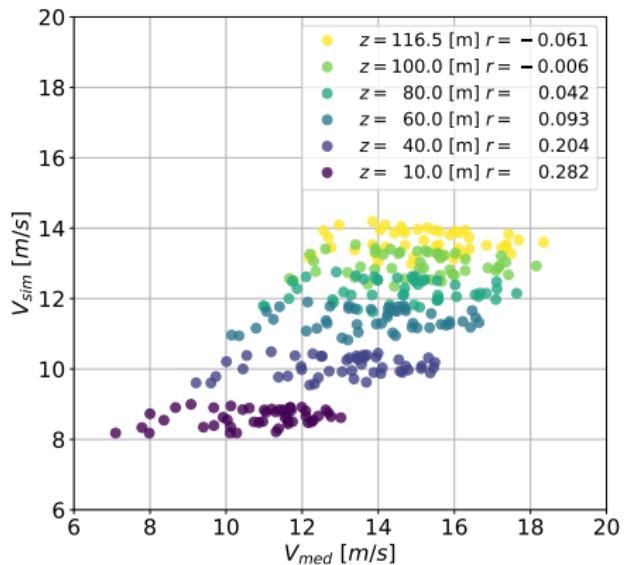


Figura 33: Gráfico de dispersión para las velocidades a distintas alturas en el mástil meteorológico de Høvsøre.

Resultados

Caso I: Høvsøre - Asimilación de Datos

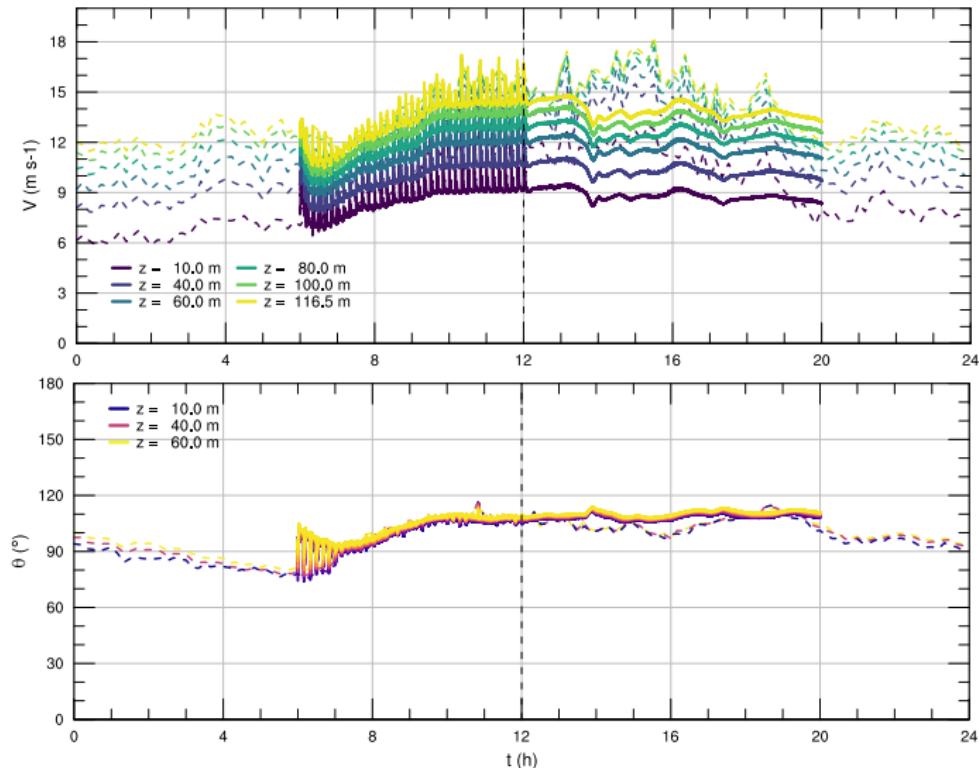


Figura 34: Serie de tiempo para la solución caso Høvsøre.

Resultados

Caso I: Høvsøre - Asimilación de Datos

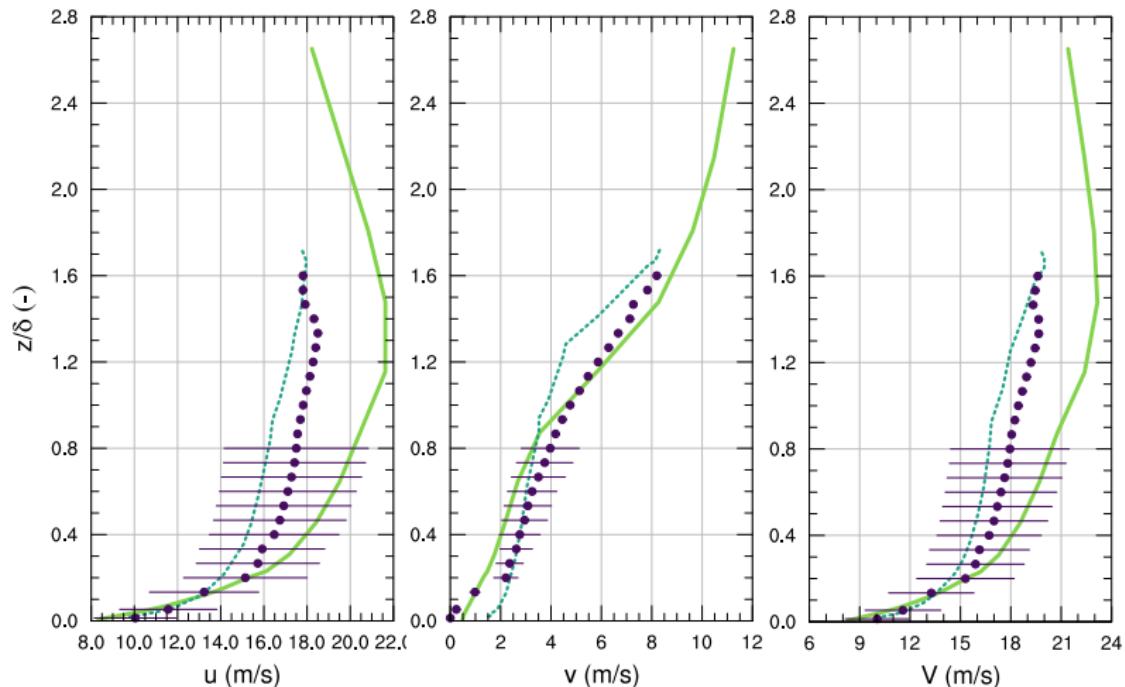


Figura 35: Validación con Peña et al. (2013). Valores promedios entre las 12:00 y 15:00.

Resultados

Caso I: Høvsøre - Asimilación de Datos

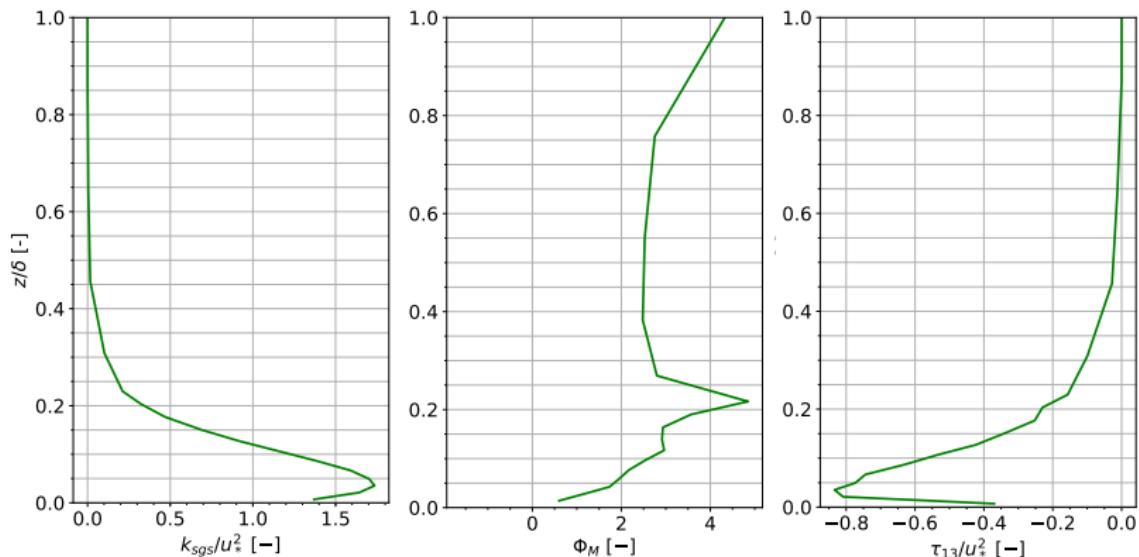


Figura 36: Variables de segundo orden adimensionalizadas. Promedios entre las 12:00 y 15:00 ($u_* = 0,527$ [m/s]).

Resultados

Caso I: Høvsøre - Asimilación de Datos

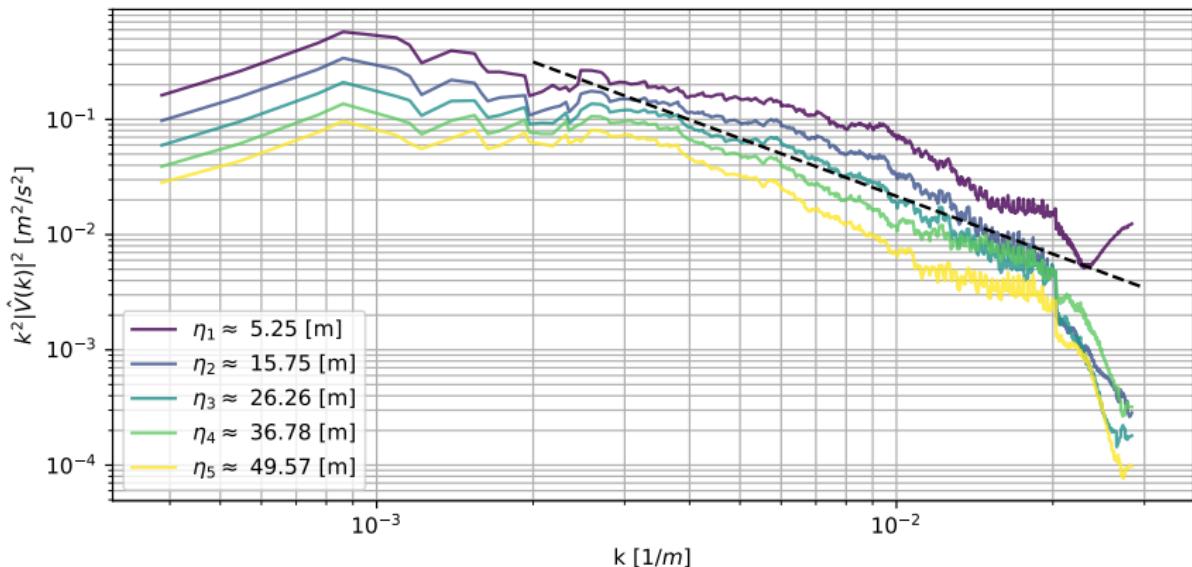


Figura 37: Espectros de energía cinética para la magnitud horizontal del viento a distintos niveles verticales en el dominio d07 caso Høvsøre.

Resultados

Caso I: Høvsøre - Asimilación de Datos

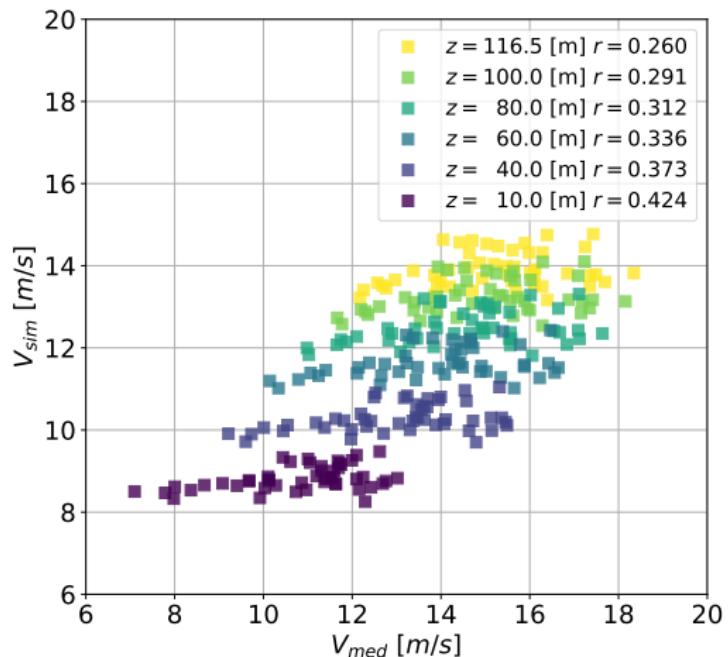


Figura 38: Gráfico de dispersión para las velocidades a distintas alturas en el mástil meteorológico de Høvsøre.

Resultados

Caso I: Høvsøre - Síntesis

Observaciones relevantes:

- ▶ Los resultados con Peña validan la metodología.
- ▶ El LES funciona de buena manera.
- ▶ El modelo es muy difusivo en los primeros niveles.
- ▶ Las variables de 2do orden se comportan según lo esperado, salvo Φ_M .
- ▶ La asimilación de datos presenta mejoras en los estadísticos.

Tabla 9: Comparación de métricas para el caso I Høvsøre.

	Sin DA	Con DA
MAE	2.41 m/s	2.17 m/s
RMSE	2.80 m/s	2.56 m/s
Δ RMSE	–	8,70 %
Δ MAE	–	10,47 %

Resultados

Caso II: Bolund

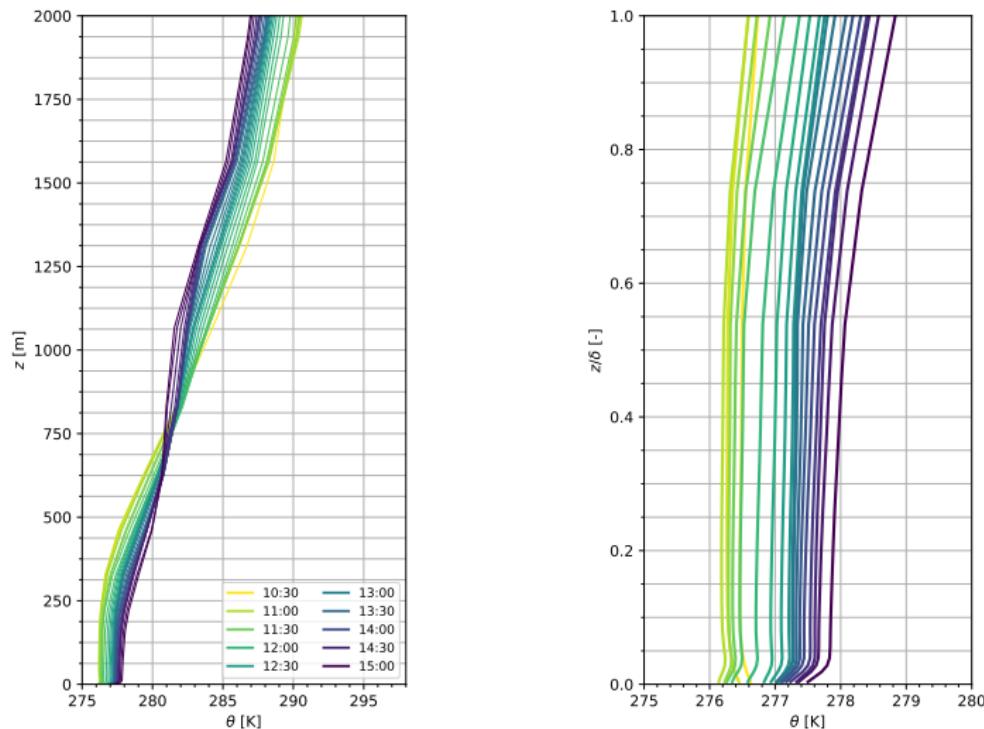


Figura 39: Perfil de temperatura potencial virtual en Bolund ($\delta \approx 300$ [m]).

Resultados

Caso II: Bolund

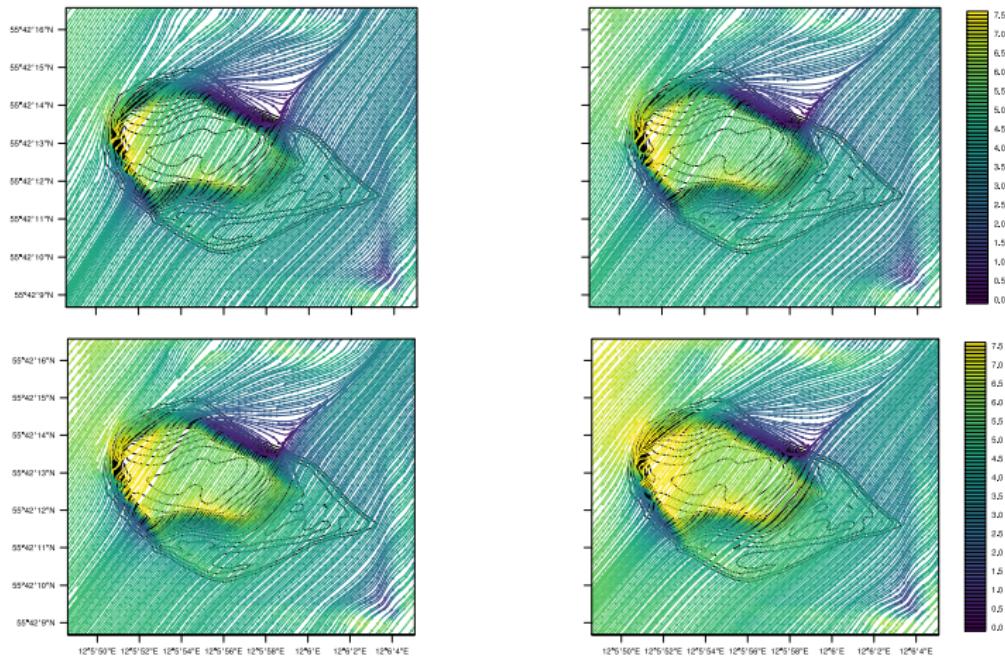


Figura 40: Líneas de flujo para la solución en Bolund en el primer nivel ($z_1 = 1,12$ [m]) para (a) 12:00, (b) 13:00, (c) 14:00 y (d) 15:00.

Resultados

Caso II: Bolund

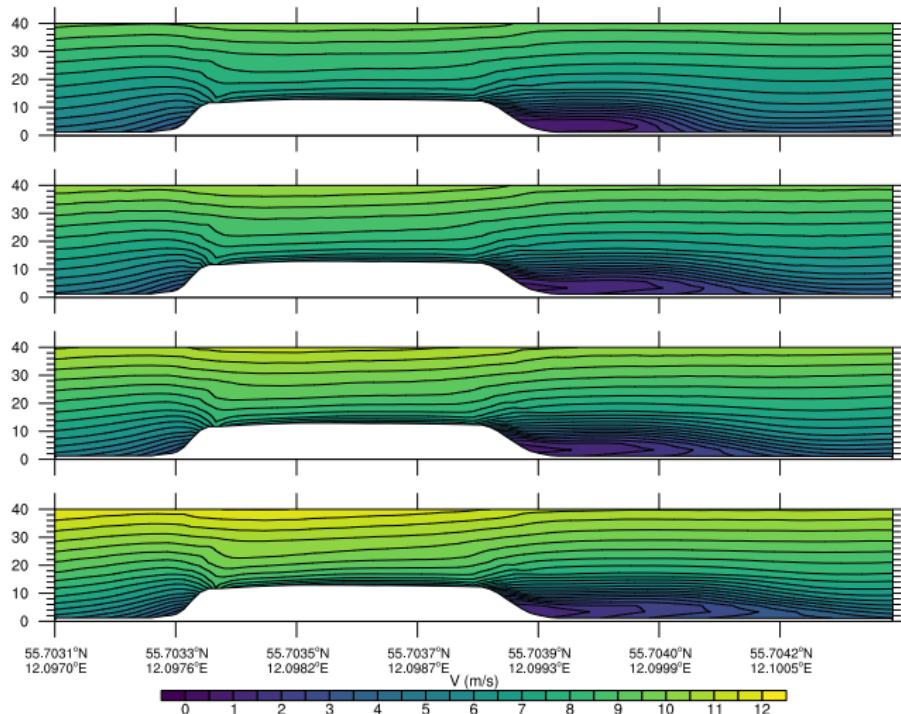
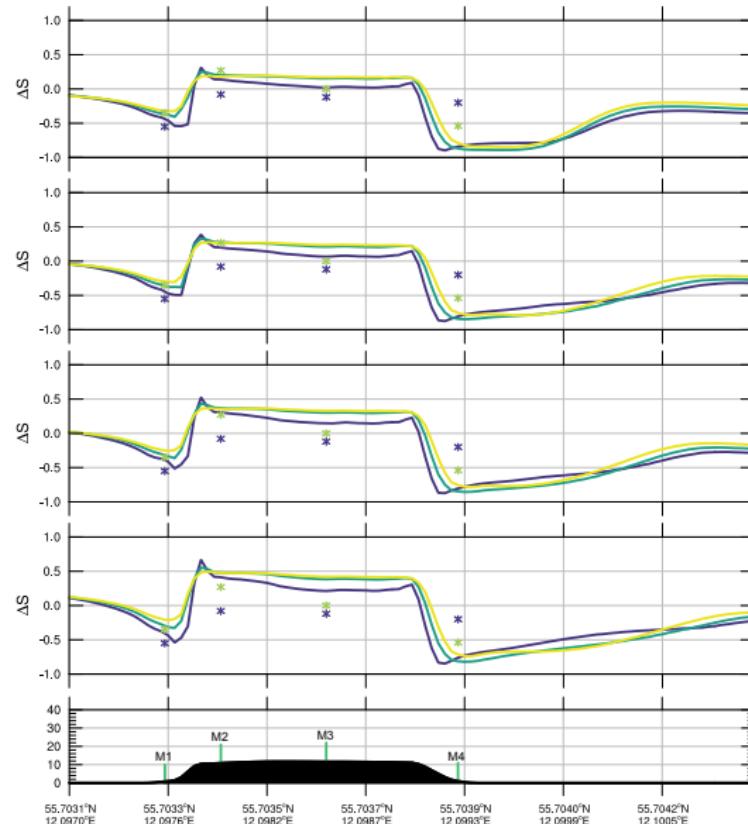


Figura 41: Contornos de rapidez del viento para la sección de corte vertical a 240° en Bolund. 12:00 a 15:00. Escala 1:1.

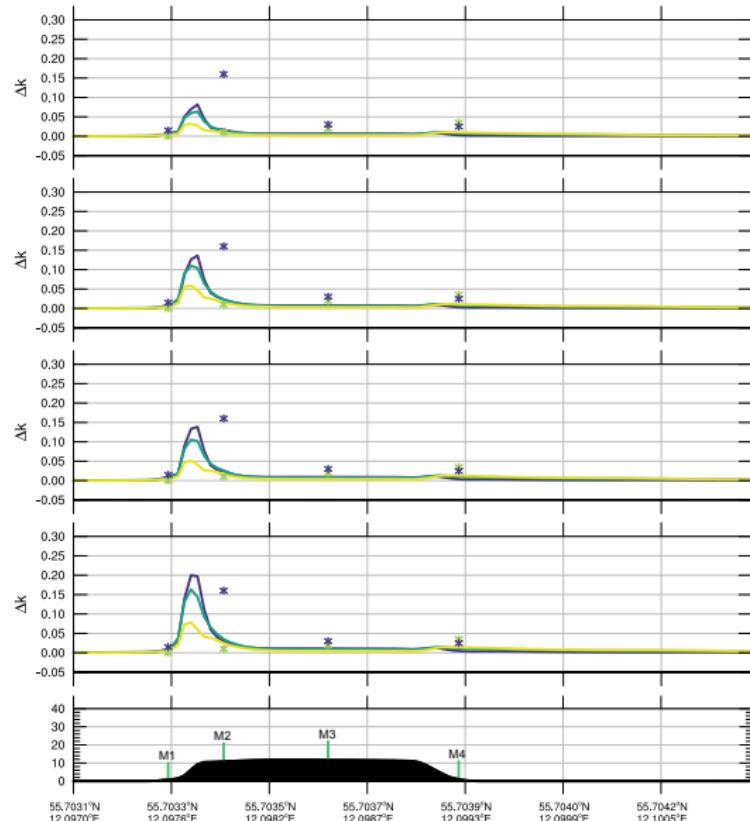
Resultados

Caso II: Bolund (Aceleración M1-M4)



Resultados

Caso II: Bolund (Delta TKE)



Resultados

Caso II: Bolund

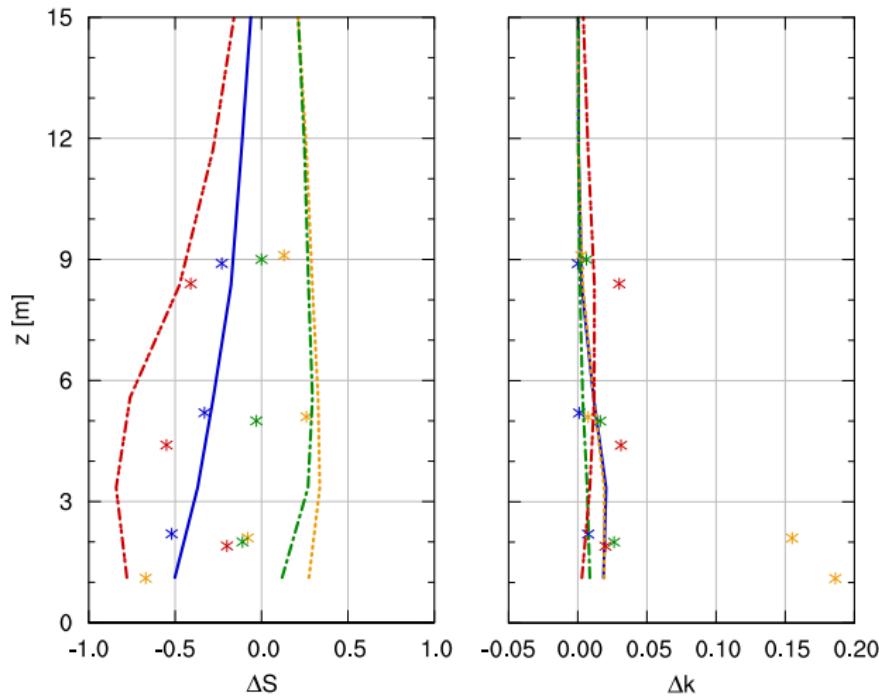


Figura 42: Perfil vertical promedio de 12:00 a 15:00 de (a) *speedup* y (b) variación adimensional de energía cinética turbulenta para las estaciones M1 (azul), M2 (naranja), M3 (verde) y M4 (rojo).

Resultados

Caso II: Bolund

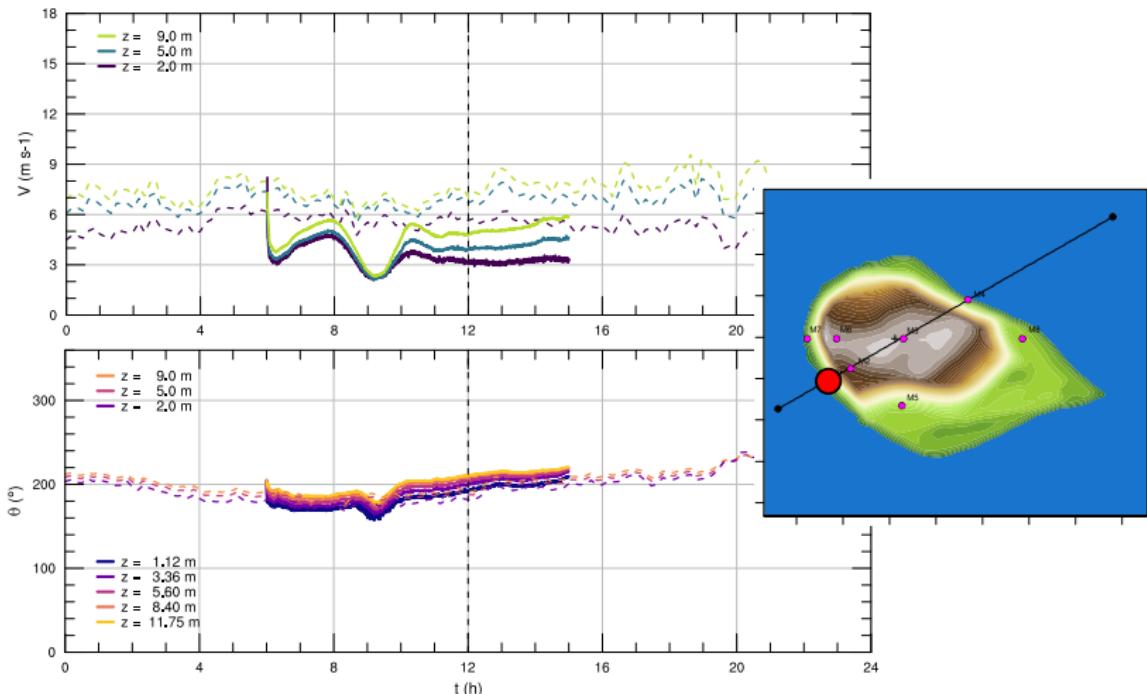


Figura 43: Series de tiempo para la rapidez V y dirección θ del viento en M1.

Resultados

Caso II: Bolund

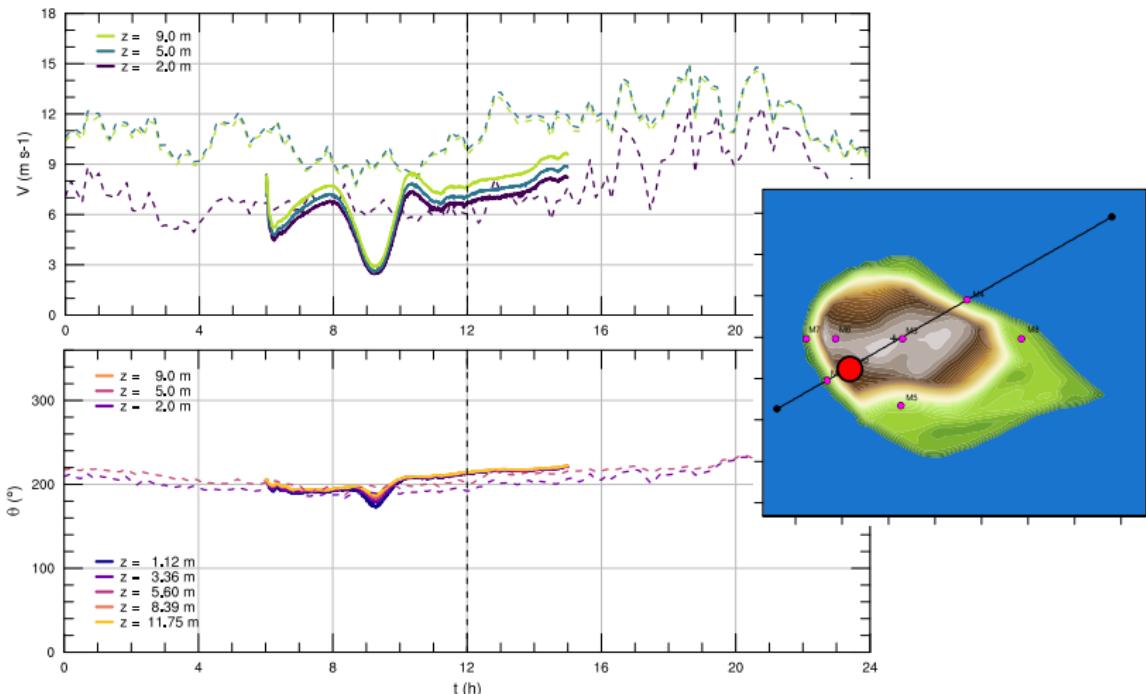


Figura 44: Series de tiempo para la rapidez V y dirección θ del viento en M2.

Resultados

Caso II: Bolund

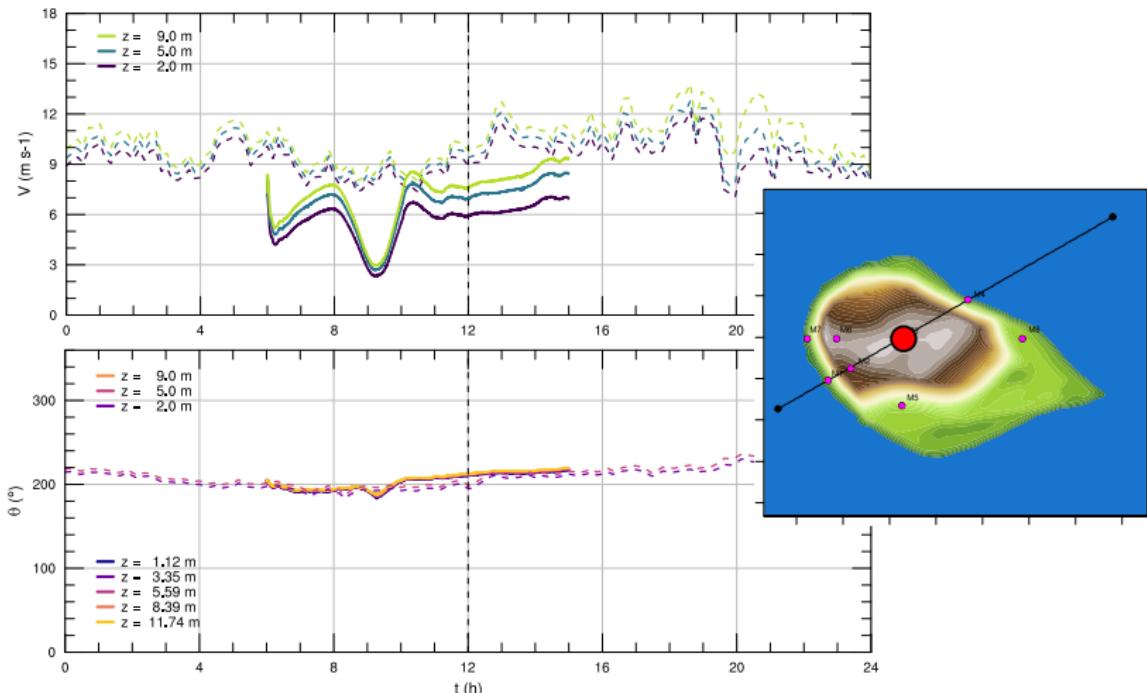


Figura 45: Series de tiempo para la rapidez V y dirección θ del viento en M3.

Resultados

Caso II: Bolund

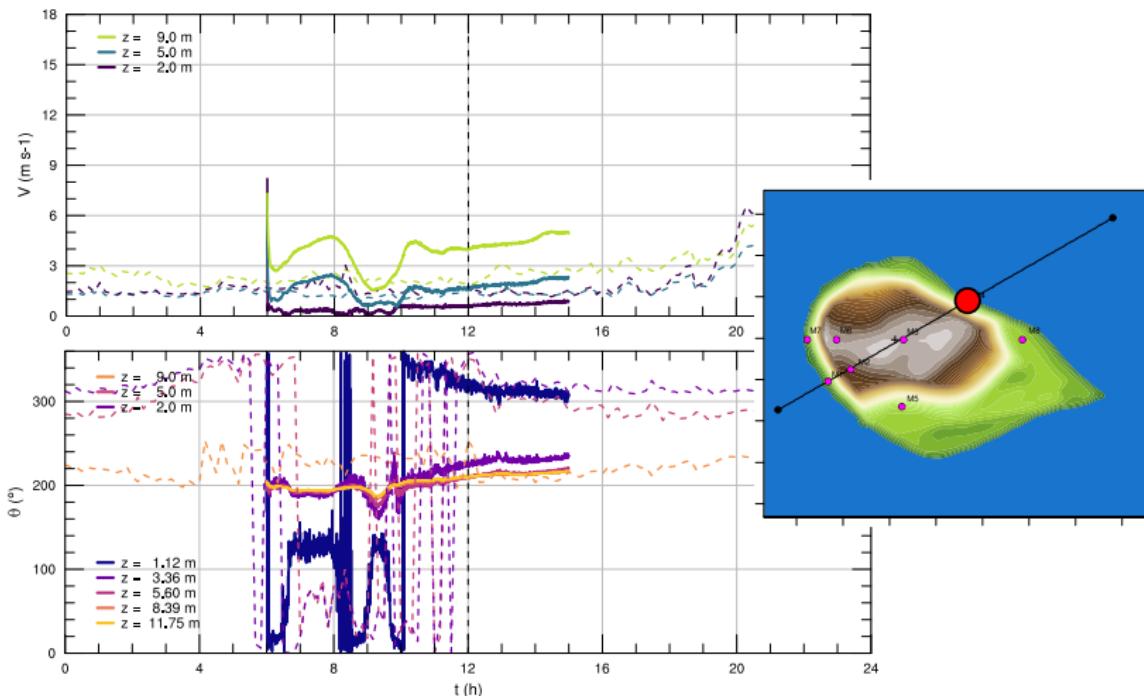


Figura 46: Series de tiempo para la rapidez V y dirección θ del viento en M4.

Resultados

Caso II: Bolund

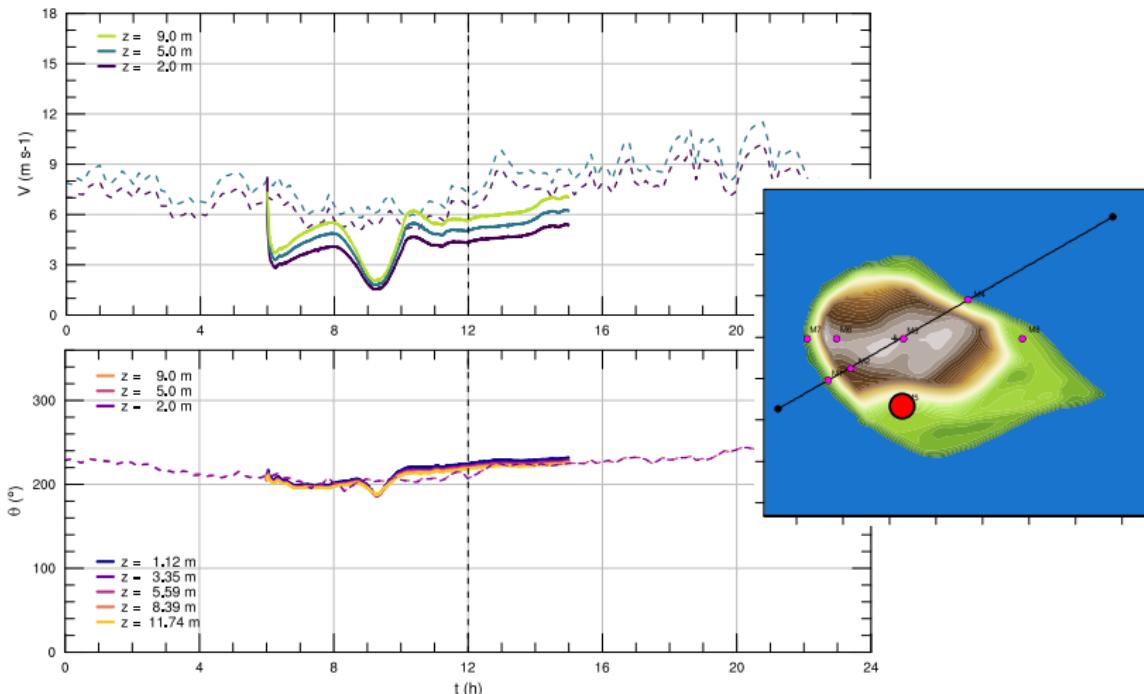


Figura 47: Series de tiempo para la rapidez V y dirección θ del viento en M5.

Resultados

Caso II: Bolund

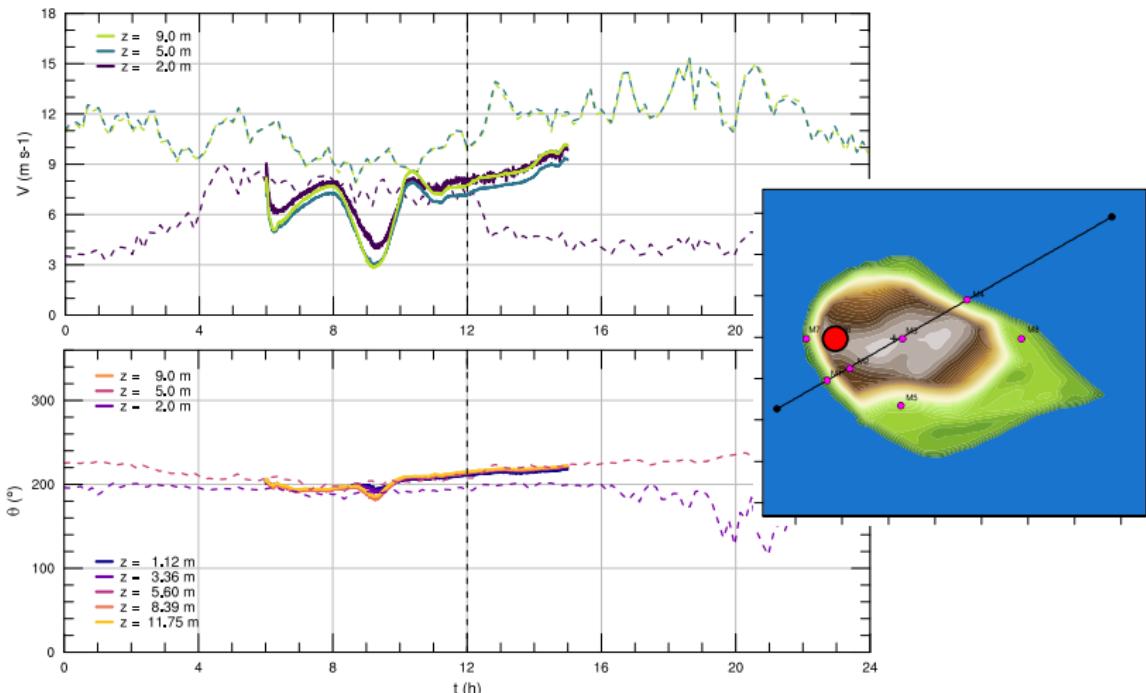


Figura 48: Series de tiempo para la rapidez V y dirección θ del viento en M6.

Resultados

Caso II: Bolund

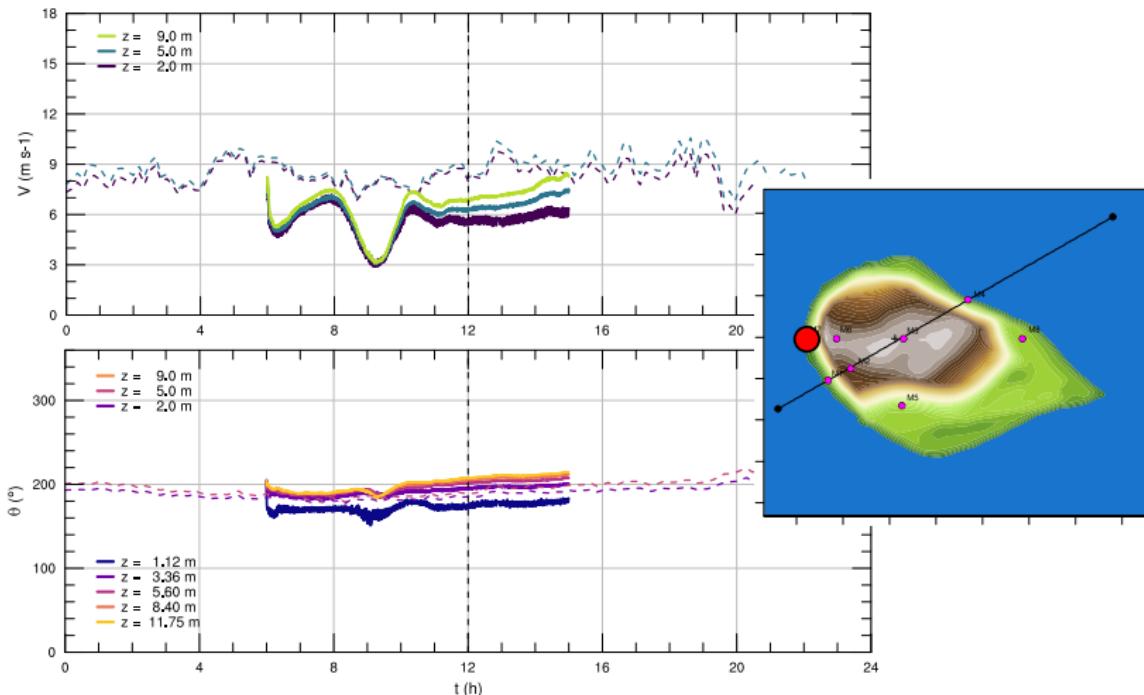


Figura 49: Series de tiempo para la rapidez V y dirección θ del viento en M7.

Resultados

Caso II: Bolund

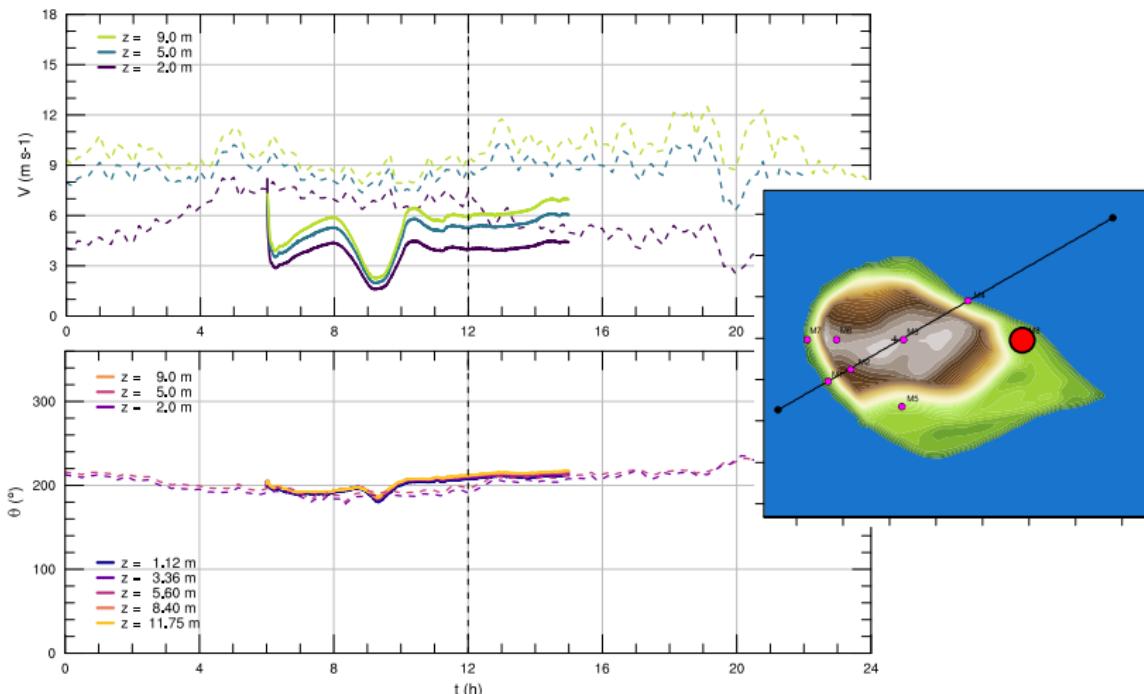


Figura 50: Series de tiempo para la rapidez V y dirección θ del viento en M8.

Resultados

Caso II: Bolund

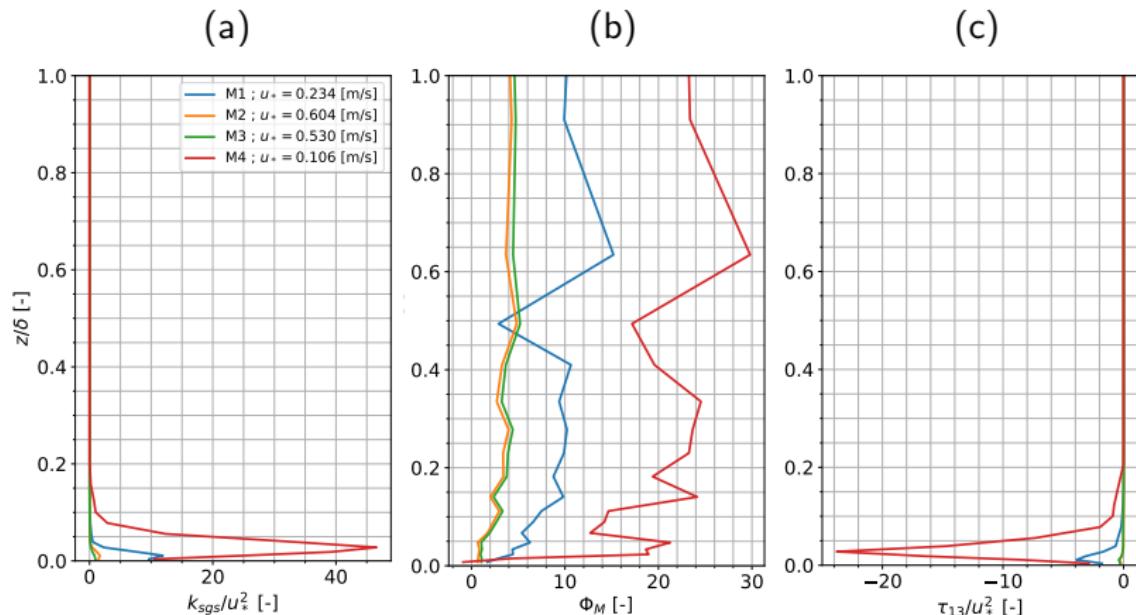


Figura 51: Variables adimensionalizadas de segundo orden para M1-M4 promediadas entre las 12:00 y las 15:00. (a) Energía cinética turbulenta de submallá, (b) Gradiente de velocidad, (c) Esfuerzo turbulento.

Resultados

Caso II: Bolund

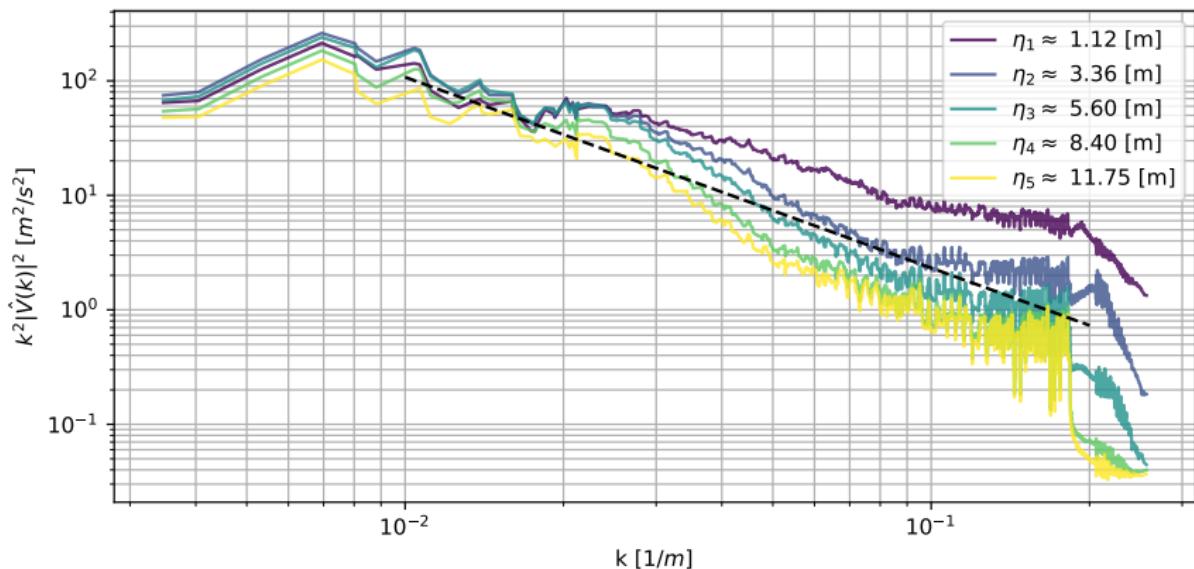
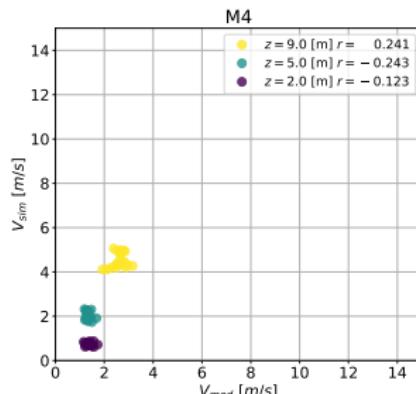
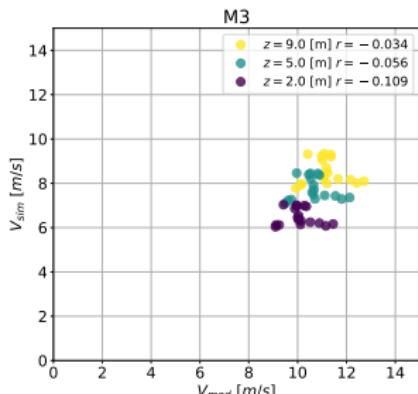
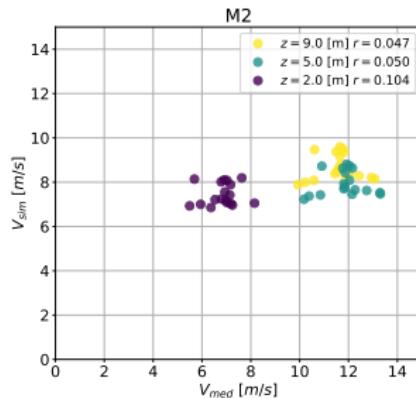
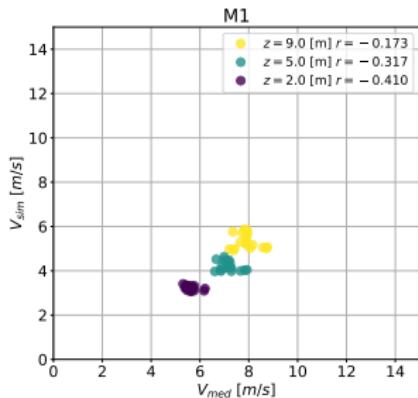


Figura 52: Espectros de energía cinética para la magnitud horizontal del viento a distintos niveles verticales en el dominio d08 caso Bolund.

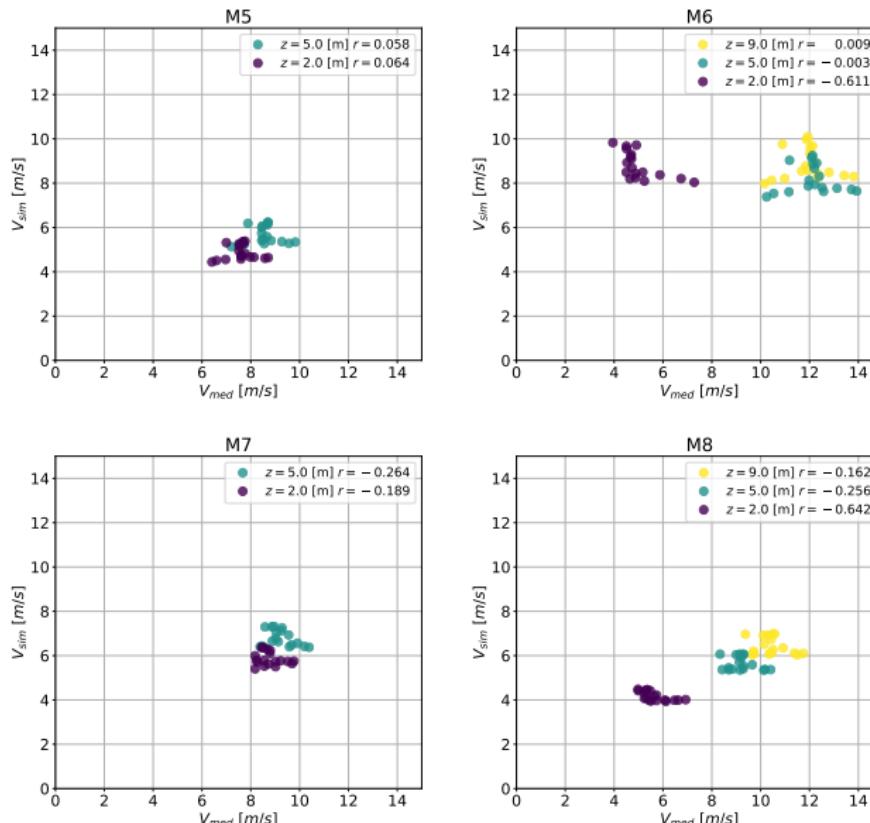
Resultados

Caso II: Bolund (Dispersión)



Resultados

Caso II: Bolund (Dispersión)



Resultados

Caso II: Bolund - Asimilación de Datos

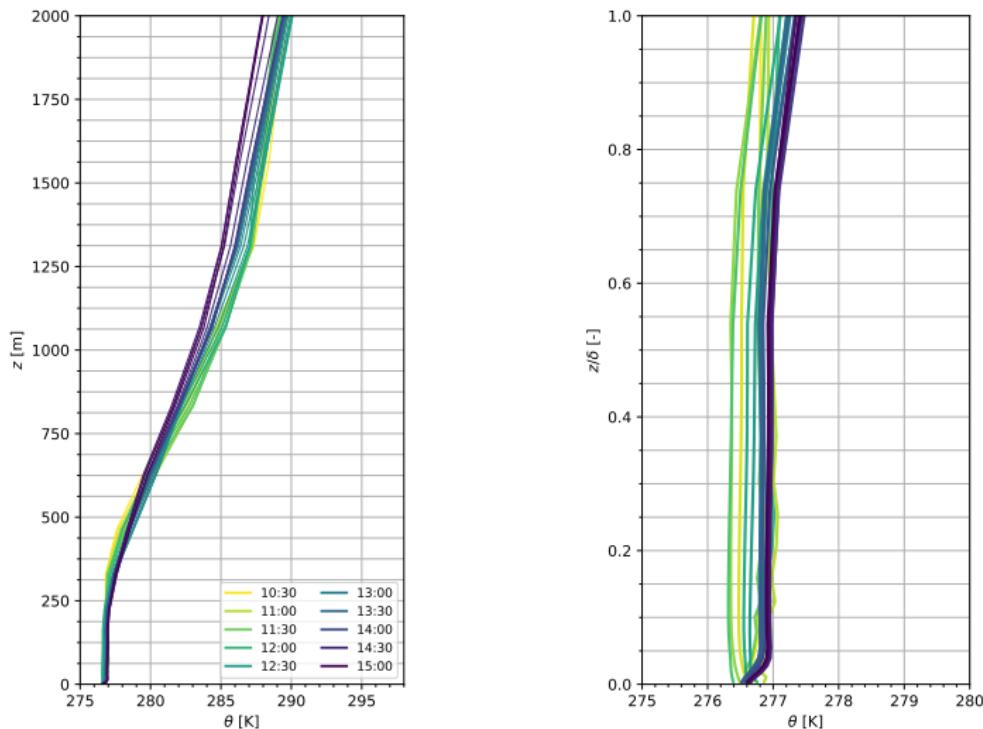


Figura 53: Perfil de temperatura potencial virtual en Bolund con DA ($\delta \approx 300$ [m]).

Resultados

Caso II: Bolund - Asimilación de Datos

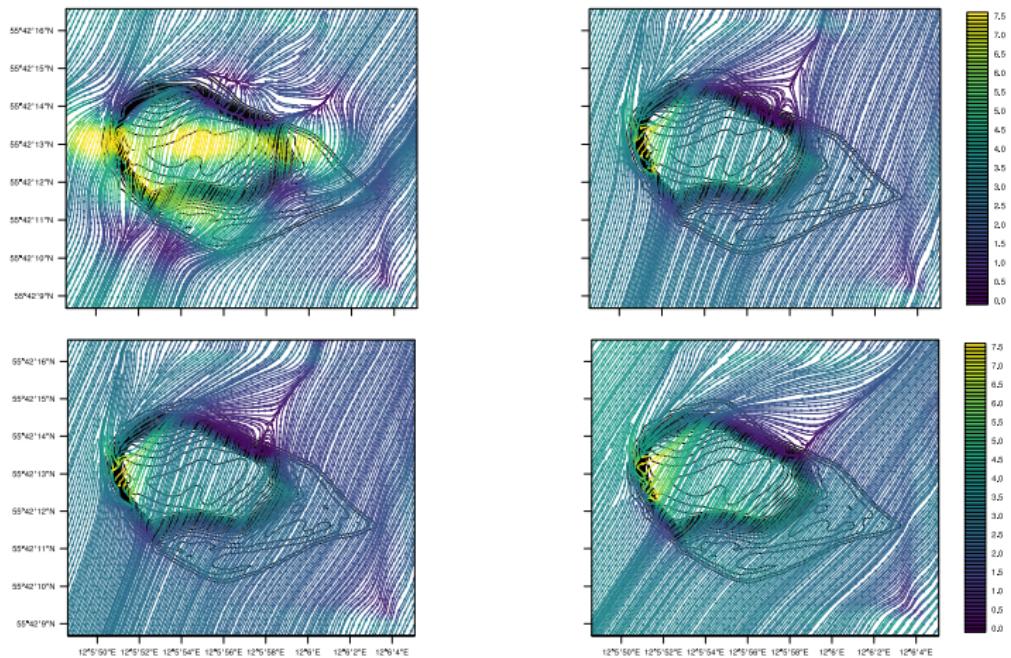


Figura 54: Líneas de flujo para la solución en Bolund con DA en el primer nivel ($z_1 = 1,12$ [m]) para (a) 12:00, (b) 13:00, (c) 14:00 y (d) 15:00.

Resultados

Caso II: Bolund - Asimilación de Datos

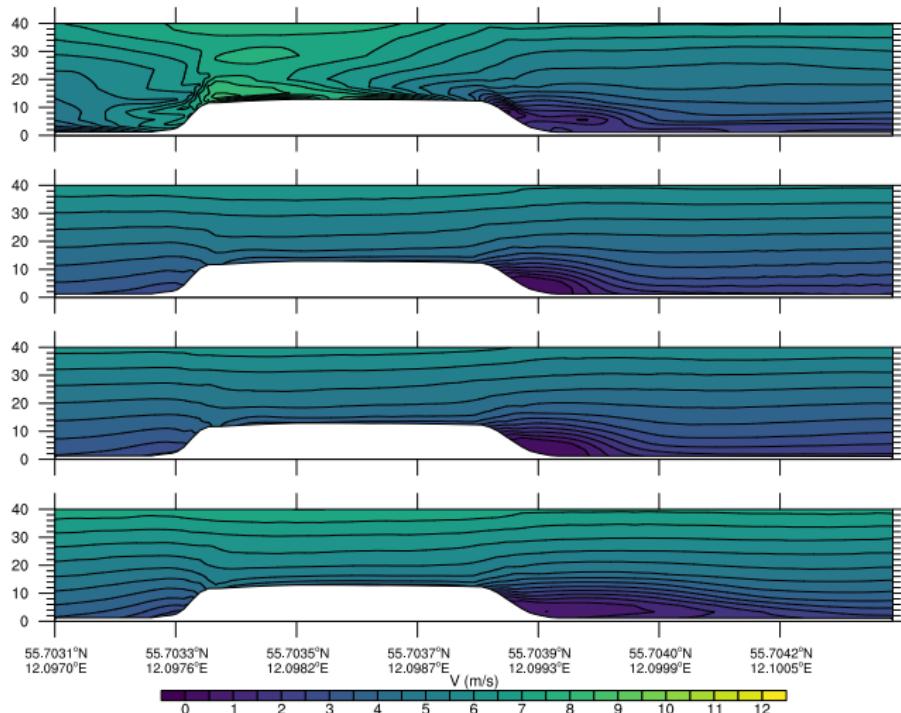
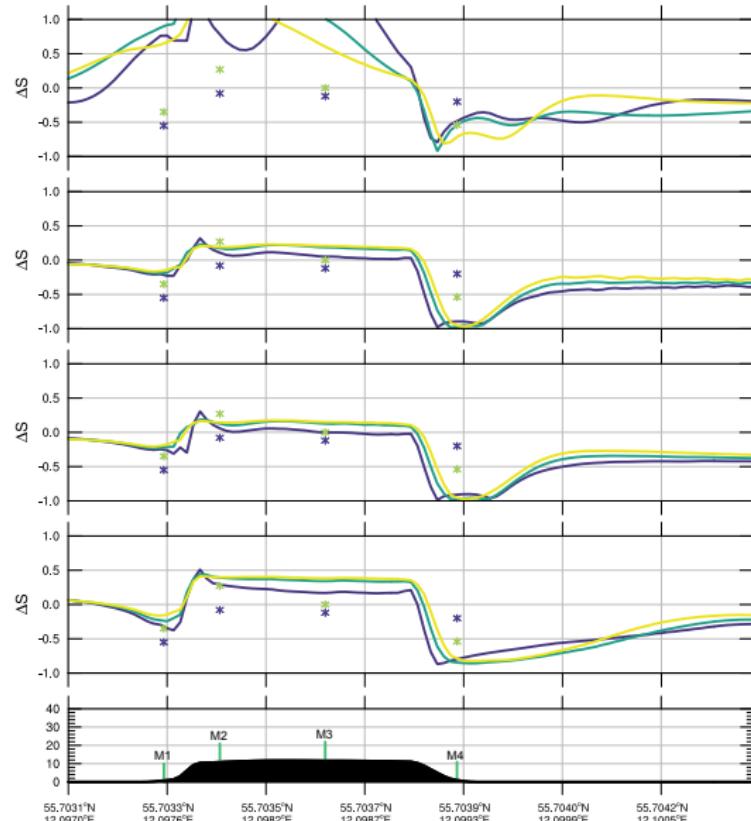


Figura 55: Contornos de rapidez del viento para la sección de corte vertical a 240° en Bolund con DA. 12:00 a 15:00. Escala 1:1.

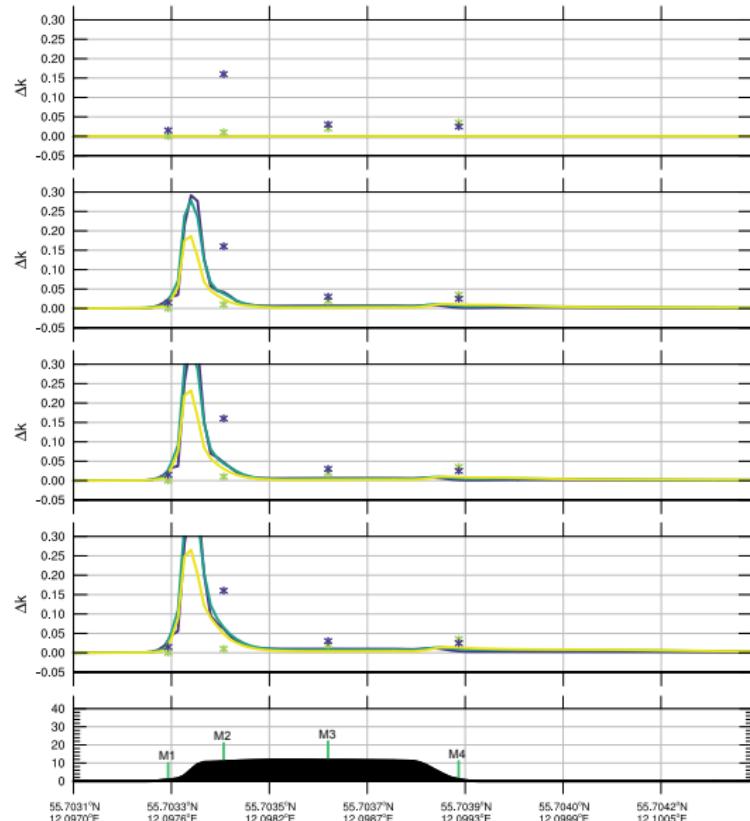
Resultados

Caso II: Bolund - Asimilación de Datos (Aceleración M1-M4)



Resultados

Caso II: Bolund - Asimilación de Datos (Delta TKE)



Resultados

Caso II: Bolund - Asimilación de Datos

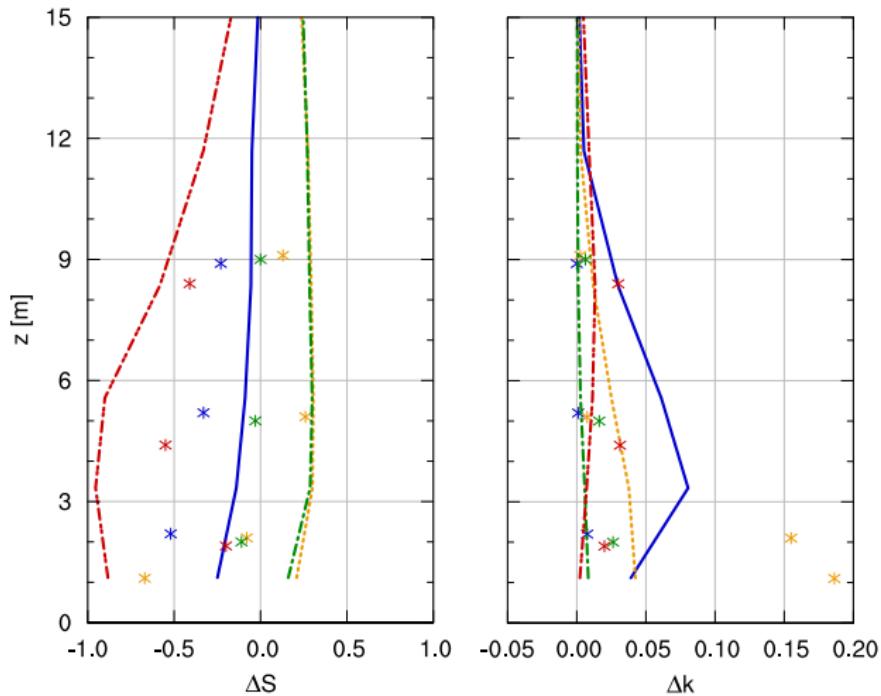


Figura 56: Perfil vertical promedio de 12:00 a 15:00 de (a) *speedup* y (b) variación adimensional de energía cinética turbulenta para las estaciones M1 (azul), M2 (naranja), M3 (verde) y M4 (rojo) para el caso con DA.

Resultados

Caso II: Bolund - Asimilación de Datos

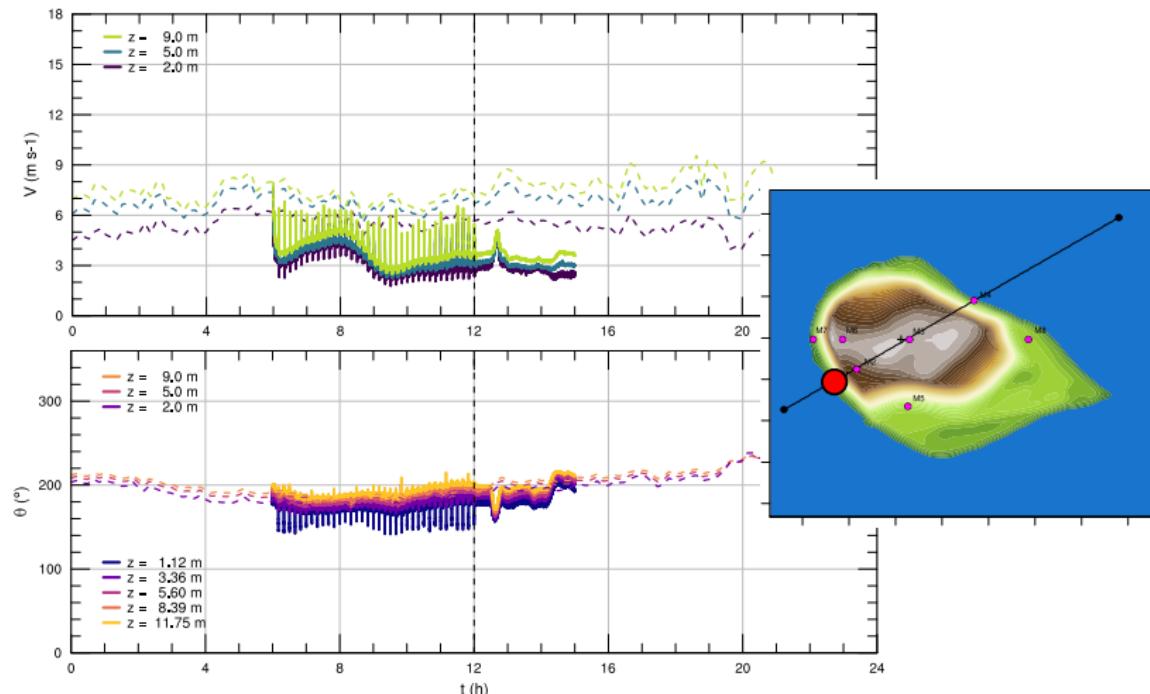


Figura 57: Series de tiempo para la rapidez V y dirección θ del viento en $M1$ con DA.

Resultados

Caso II: Bolund - Asimilación de Datos

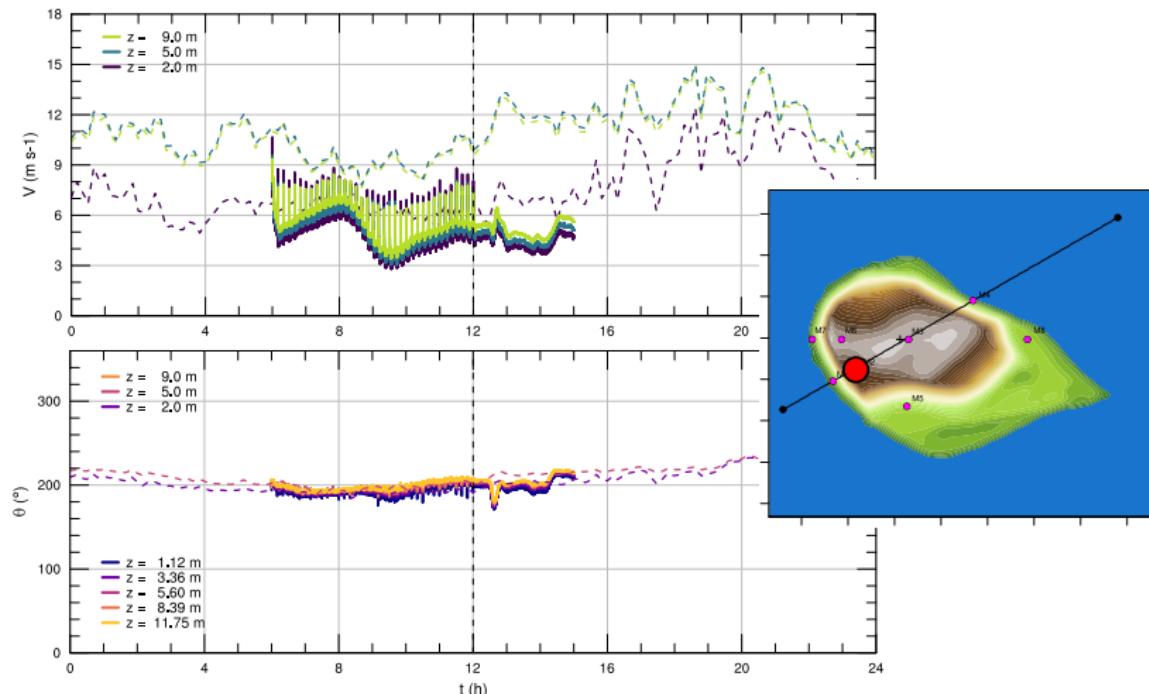


Figura 58: Series de tiempo para la rapidez V y dirección θ del viento en M2 con DA.

Resultados

Caso II: Bolund - Asimilación de Datos

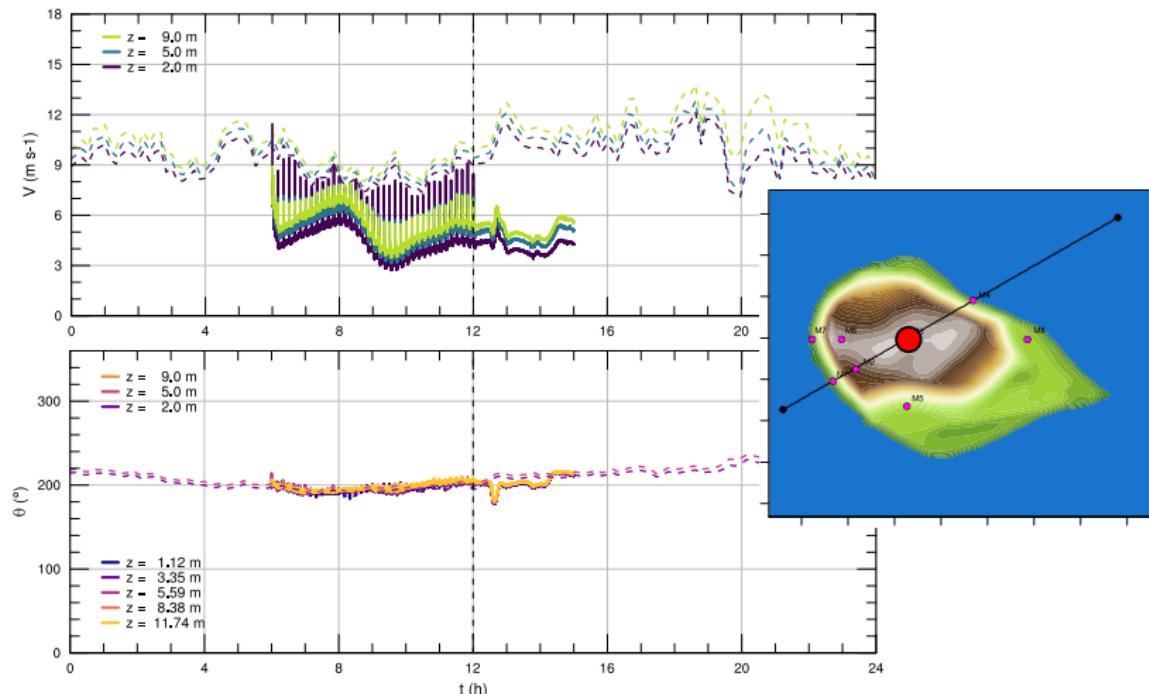


Figura 59: Series de tiempo para la rapidez V y dirección θ del viento en M3 con DA.

Resultados

Caso II: Bolund - Asimilación de Datos

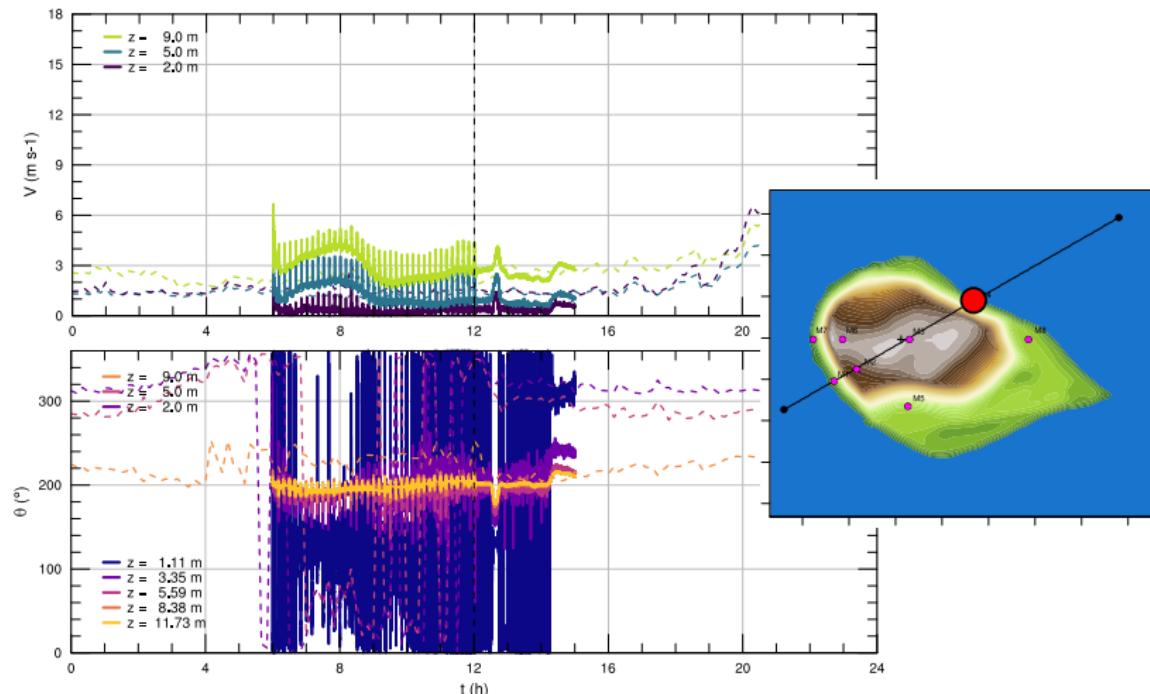


Figura 60: Series de tiempo para la rapidez V y dirección θ del viento en M4 con DA.

Resultados

Caso II: Bolund - Asimilación de Datos

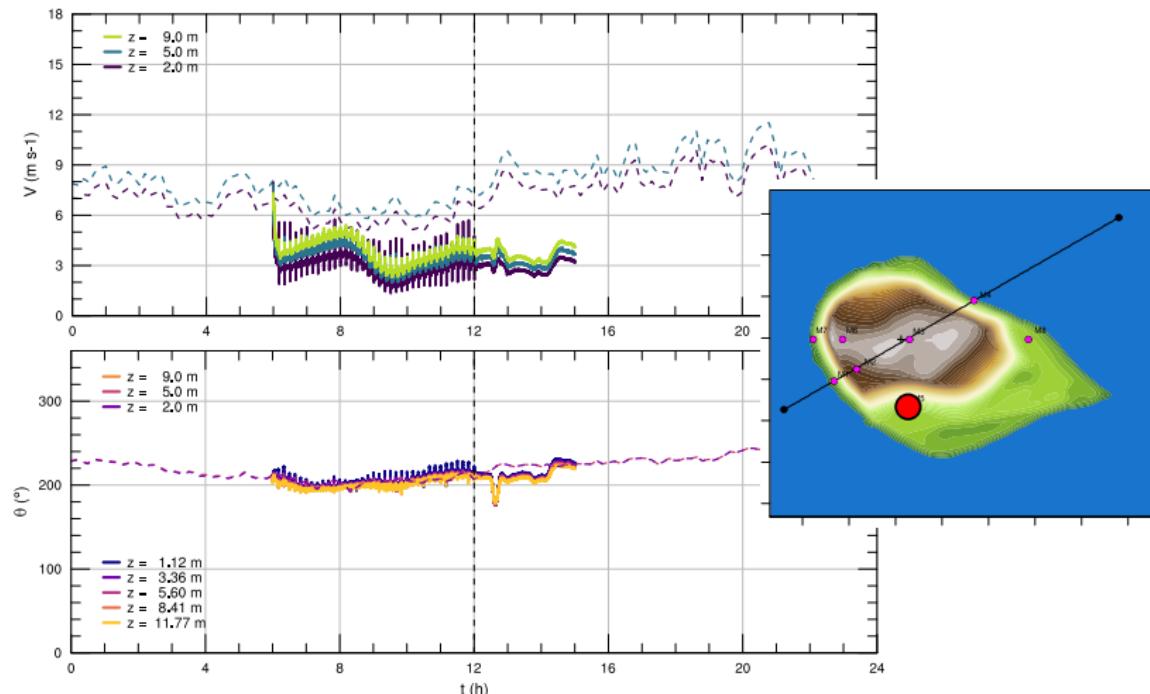


Figura 61: Series de tiempo para la rapidez V y dirección θ del viento en M5 con DA.

Resultados

Caso II: Bolund - Asimilación de Datos

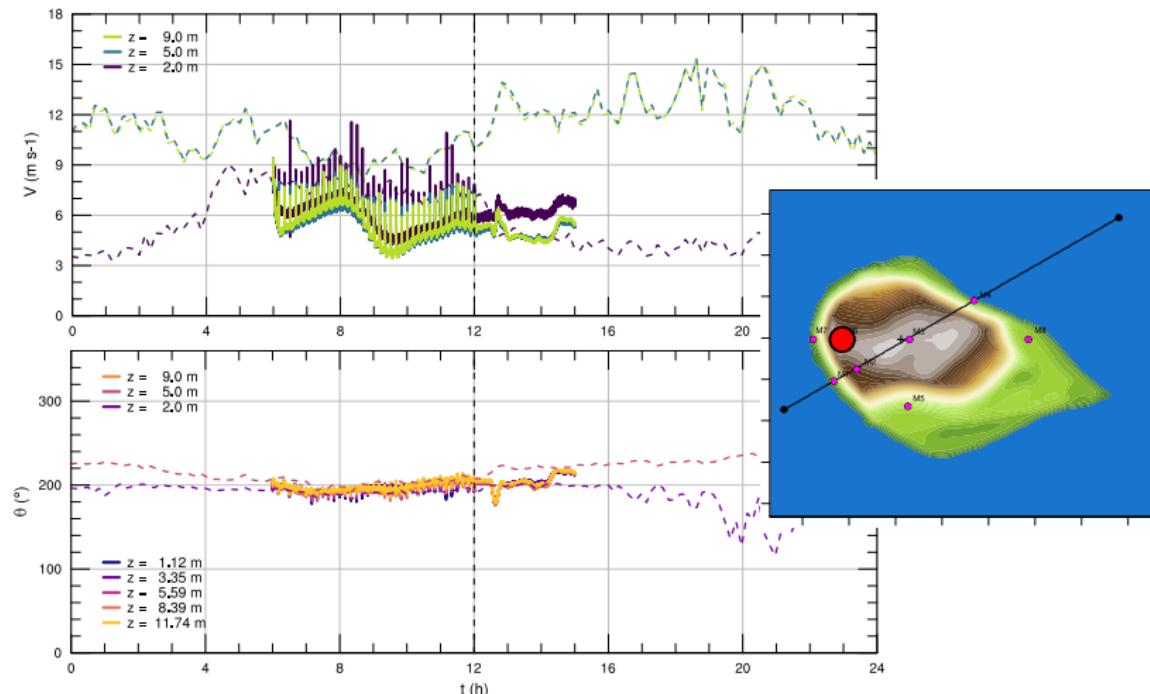


Figura 62: Series de tiempo para la rapidez V y dirección θ del viento en M6 con DA.

Resultados

Caso II: Bolund - Asimilación de Datos

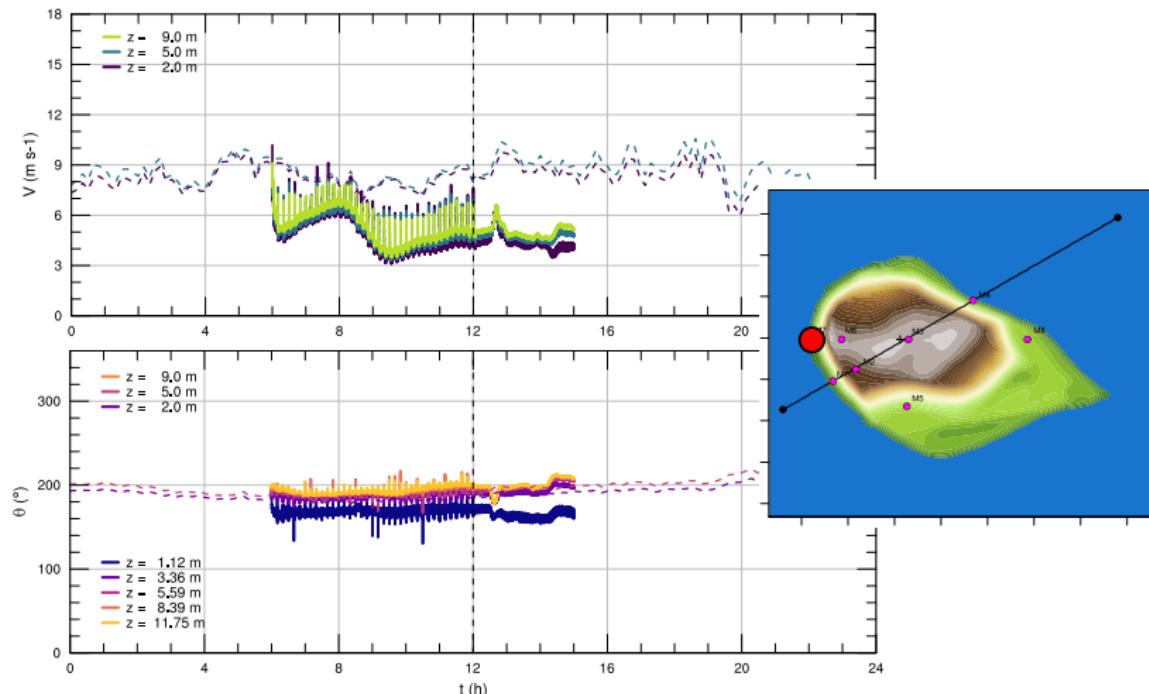


Figura 63: Series de tiempo para la rapidez V y dirección θ del viento en M7 con DA.

Resultados

Caso II: Bolund - Asimilación de Datos

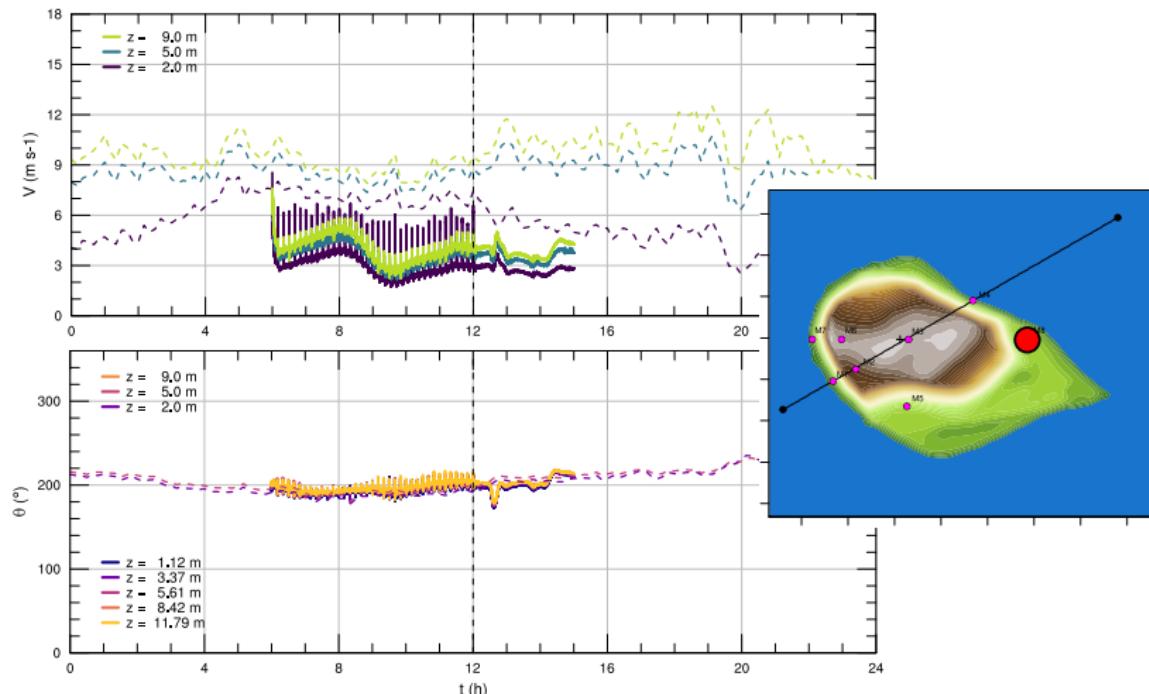


Figura 64: Series de tiempo para la rapidez V y dirección θ del viento en M8 con DA.

Resultados

Caso II: Bolund - Asimilación de Datos

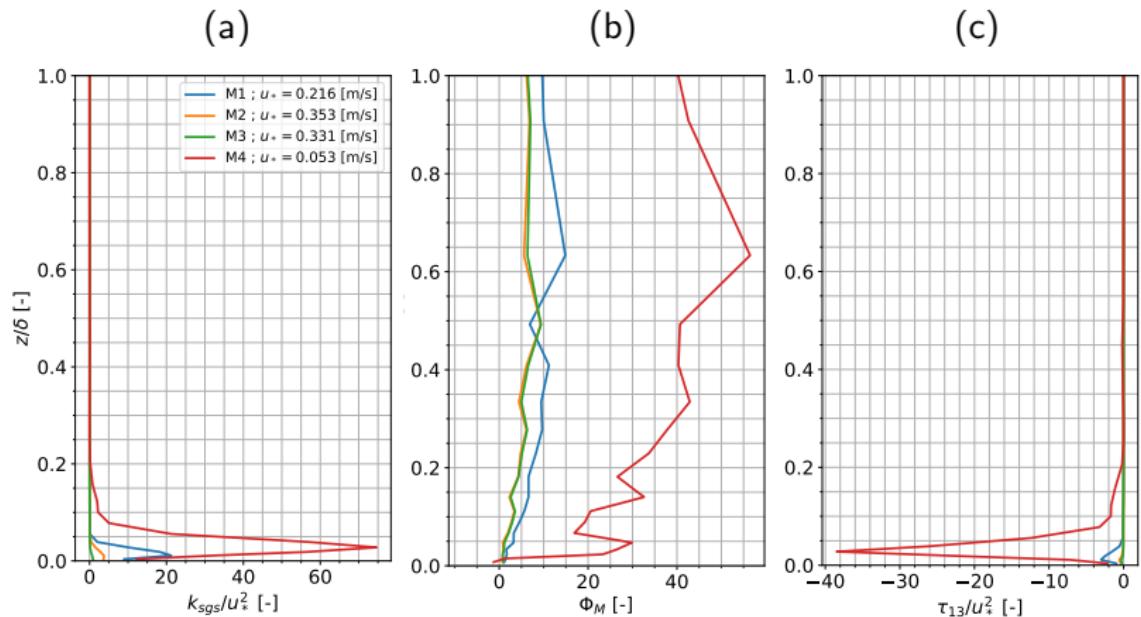


Figura 65: Variables adimensionalizadas de segundo orden para M1-M4 con DA promediadas entre las 12:00 y las 15:00. (a) Energía cinética turbulenta de submallá, (b) Gradiente de velocidad, (c) Esfuerzo turbulento.

Resultados

Caso II: Bolund - Asimilación de Datos

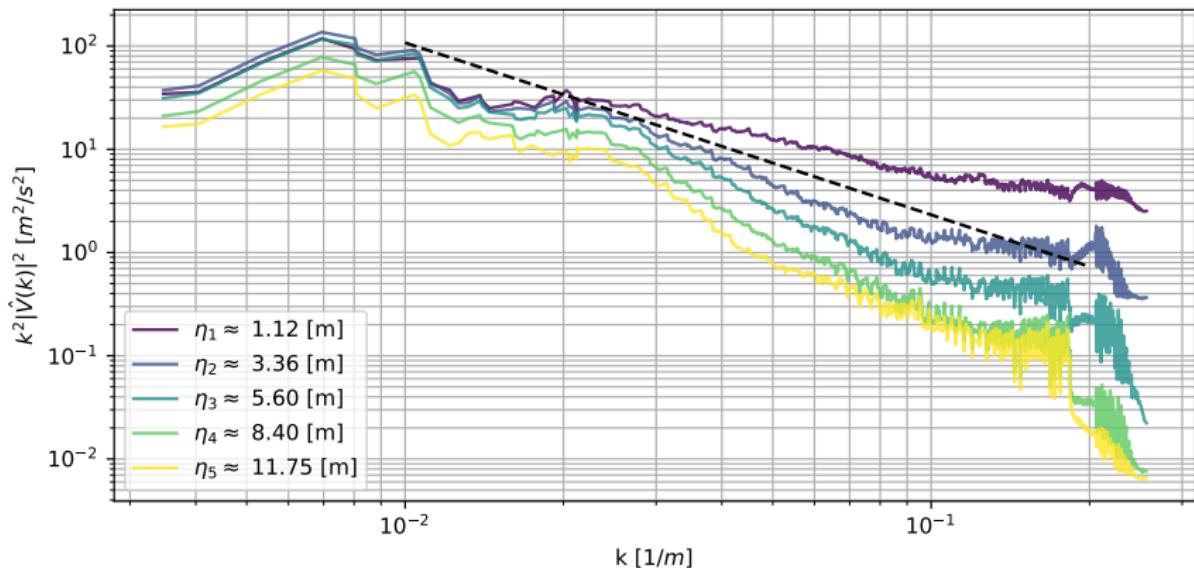
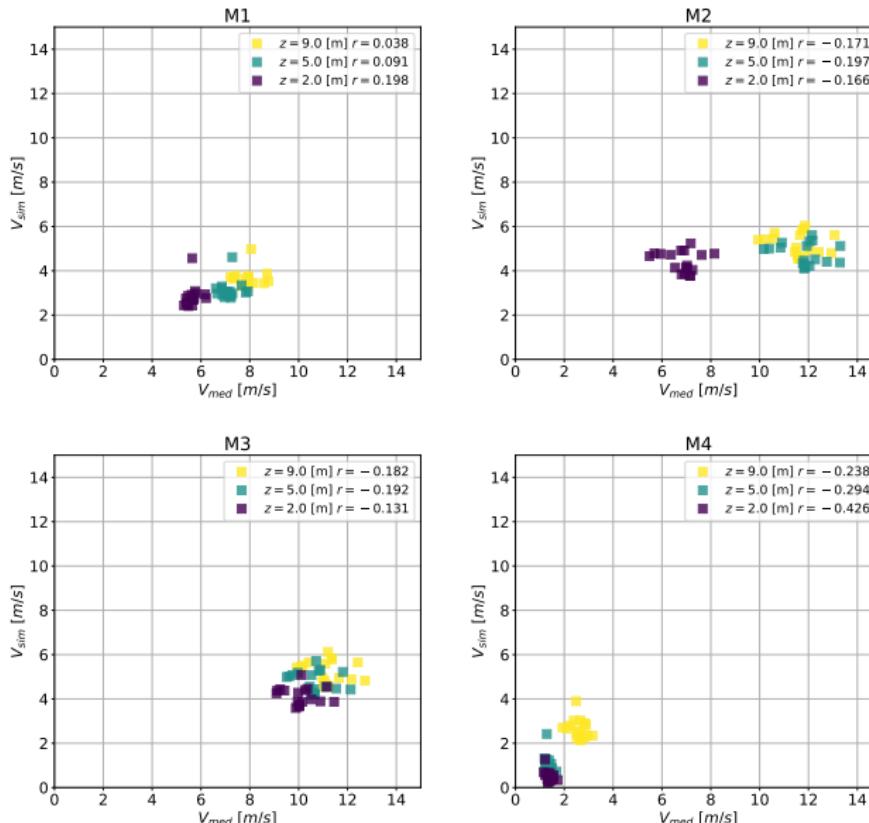


Figura 66: Espectros de energía cinética para la magnitud horizontal del viento a distintos niveles verticales en el dominio d08 caso Bolund con DA.

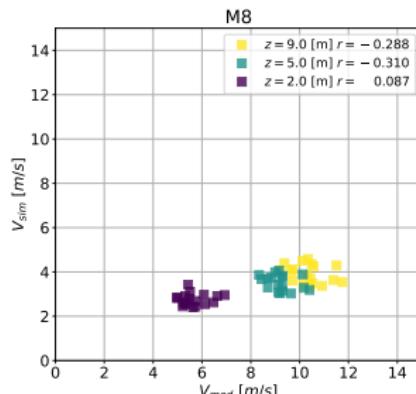
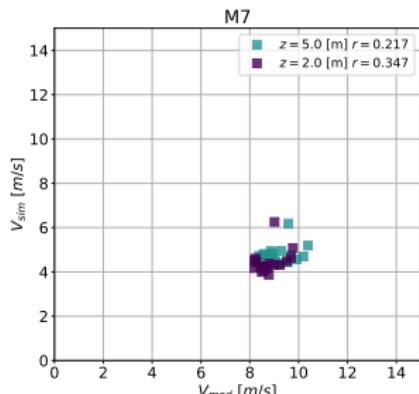
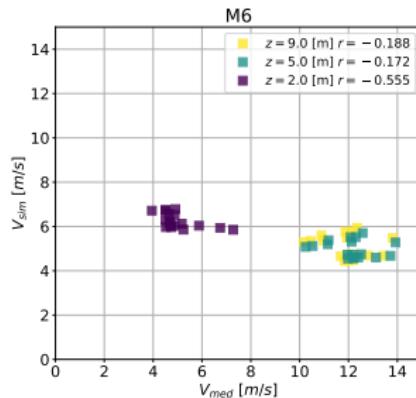
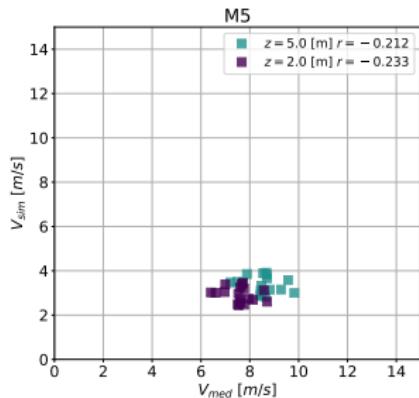
Resultados

Caso II: Bolund - Asimilación de Datos (Dispersión)



Resultados

Caso II: Bolund - Asimilación de Datos (Dispersión)



Resultados

Caso II: Bolund - Síntesis

Observaciones relevantes:

- ▶ Se rescata el comportamiento cualitativo del viento mostrándose concordancia entre lo simulado y la comparación ciega (ΔS y Δk).
- ▶ La simulación exhibe turbulencia resuelta en las series de tiempo.
- ▶ Existen diferencias comparables entre lo medido y lo simulado.
- ▶ La asimilación de datos empeoró los resultados en un -60% .

Tabla 10: Comparación de métricas para el caso II Bolund.

	Sin DA	Con DA
MAE	2.67 m/s	4.36 m/s
RMSE	2.95 m/s	4.90 m/s
Δ RMSE	–	–65,91 %
Δ MAE	–	–63,01 %

Conclusiones

- ▶ La asimilación de datos 4D multipunto en la CLP en un modelo a alta resolución y con LES no demostró una ventaja comparativa.
- ▶ La influencia de la asimilación de datos no logra permear a través de la integración numérica. Sin embargo si permite alterar la simulación obteniendo mejoras para el caso I.
- ▶ La presencia de mediciones a distancias mas altas presenta ventajas con respecto a tener varios puntos para estos casos.
- ▶ La utilización del LES y el acople de las escalas fue exitoso.
- ▶ Las BBDD de alta resolución son imprescindibles para el desarrollo de esta metodología.
- ▶ Los resultados obtenidos presentan concordancia con los casos de validación presentes en la literatura.

Conclusiones

Trabajo Futuro

- ▶ Extrapolar mediciones superficiales según ley logarítmica y asimilar a mayor altura.
- ▶ Eliminar puntos de malla que no aportan al modelo, bajar el $p_{top} = 30000 \text{ [Pa]}$ y/o utilizar anidamiento vertical.
- ▶ Analizar la asimilación multipunto en otras campañas de medición y con otros esquemas de asimilación (filtro de Kalman).
- ▶ Asimilar gran cantidad de datos al modelo en la microescala.
- ▶ Programar un algoritmo cíclico que permita la continuidad del TKE.
- ▶ Sensibilizar los resultados con otras parametrizaciones físicas, especialmente de capa superficial y CLP.
- ▶ Probar esquemas de orden superior para la clausura LES.
- ▶ Usar paso de tiempo adaptativo.
- ▶ Desarrollar campañas en terreno para tener mas y mejores bbdd estáticas.
- ▶ Utilizar sistemas coordenados vanguardistas. WRF 3.9 ya implementó coordenadas híbridas.

Agradecimientos



Danmarks
Tekniske
Universitet

DGIIP



FONDEF
Fondo de Fomento al Desarrollo
Científico y Tecnológico



Simulación Multiescala de Viento Sobre Terreno Complejo Mediante el Método Embebido WRF-LES y Asimilación Variacional de Datos 4D

Pablo Andrés Cárdenas Zamorano

Magíster en Ciencias de la Ingeniería Mecánica
Universidad Técnica Federico Santa María

Profesor Guía:

Ph.D. Alex Flores Maradiaga

Profesor Correferente:

Ph.D. Carlos Rosales Huerta

Evaluador Externo:

Ph.D. Ricardo Muñoz Magnino

Octubre, 2019

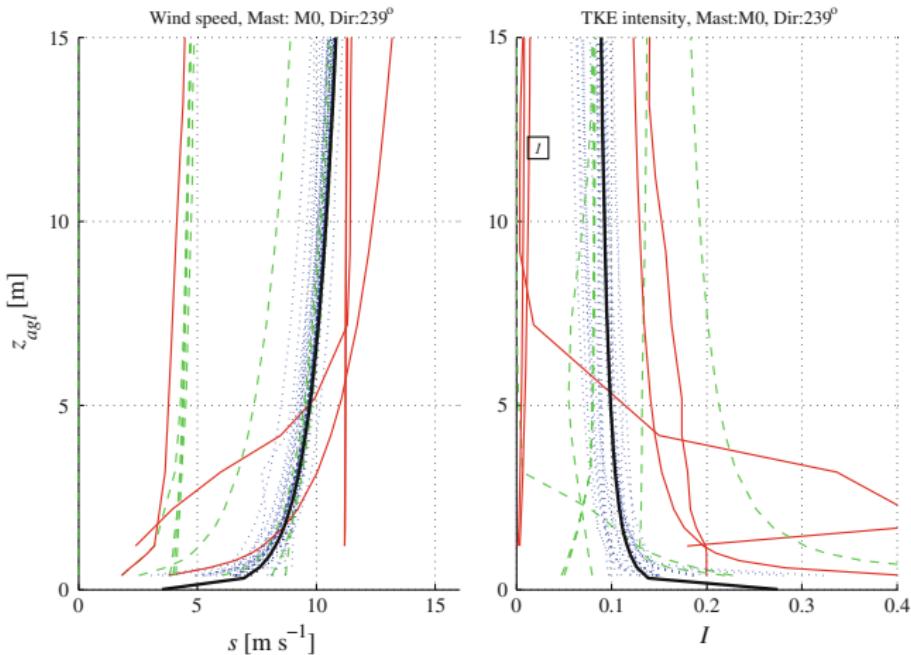


Figura 67: Perfil del viento no perturbado en el punto referencial M0 (ver Figura 21). En línea negra está el perfil entregado por los desarrolladores (para utilizar como condición de borde) y el resto corresponde a distintos modelos. La línea sólida roja corresponde a simulaciones LES.

Cálculo de Variaciones Bolund

$$\Delta S_s = \frac{\bar{s} - \bar{s}_0}{\bar{s}_0} \quad (54)$$

$$\Delta k_s = \frac{\bar{k}}{\bar{s}_0^2} - \frac{\bar{k}_0}{\bar{s}_0^2} \quad (55)$$

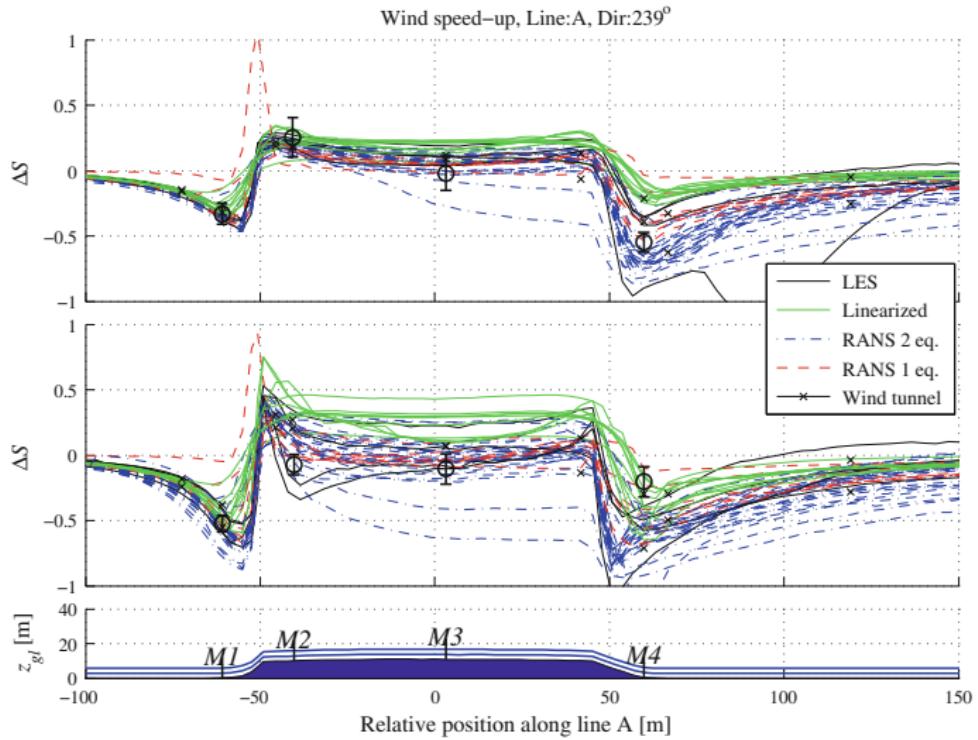


Figura 68: Speedup medido y simulado a través de la sección transversal a 240°. Arriba: valores para $z = 5$ [m]. Abajo: valores para $z = 2$ [m].

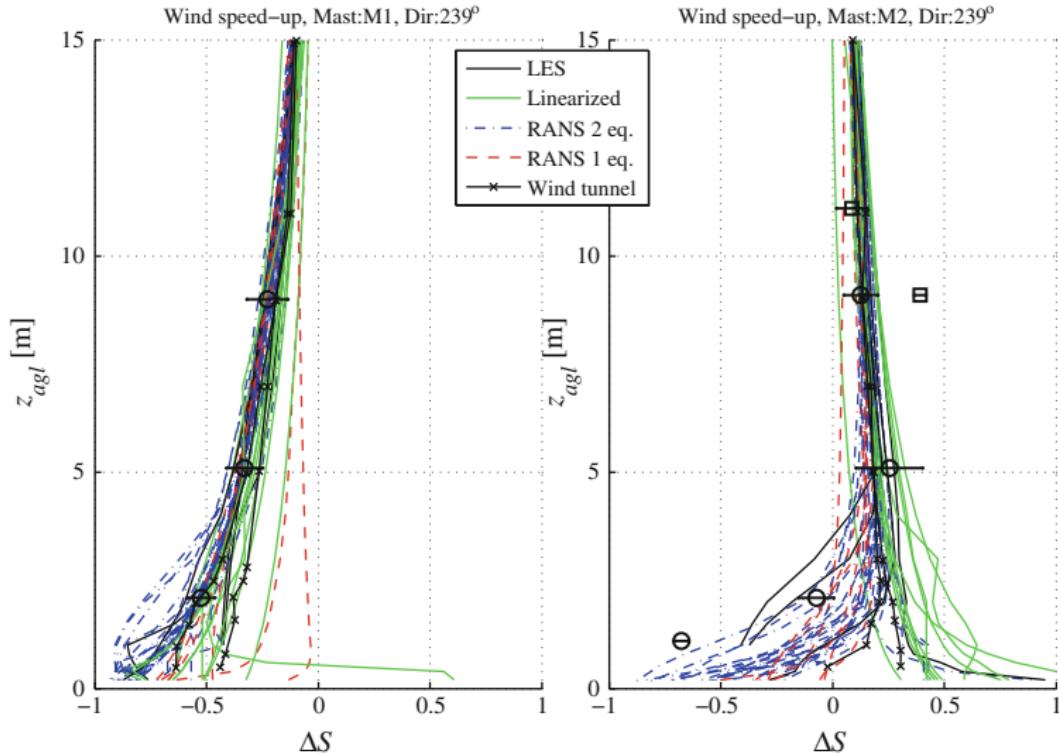


Figura 69: Perfil de speedup medido y simulado en M1-M2.

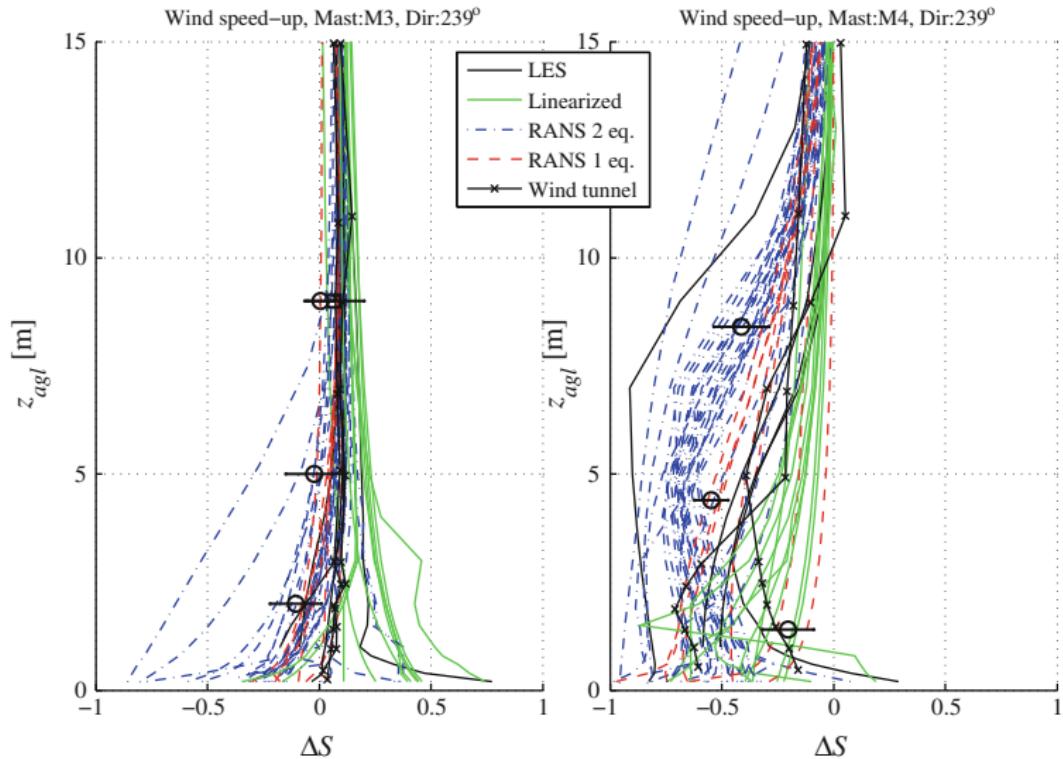


Figura 70: Perfil de speedup medido y simulado en M3-M4.

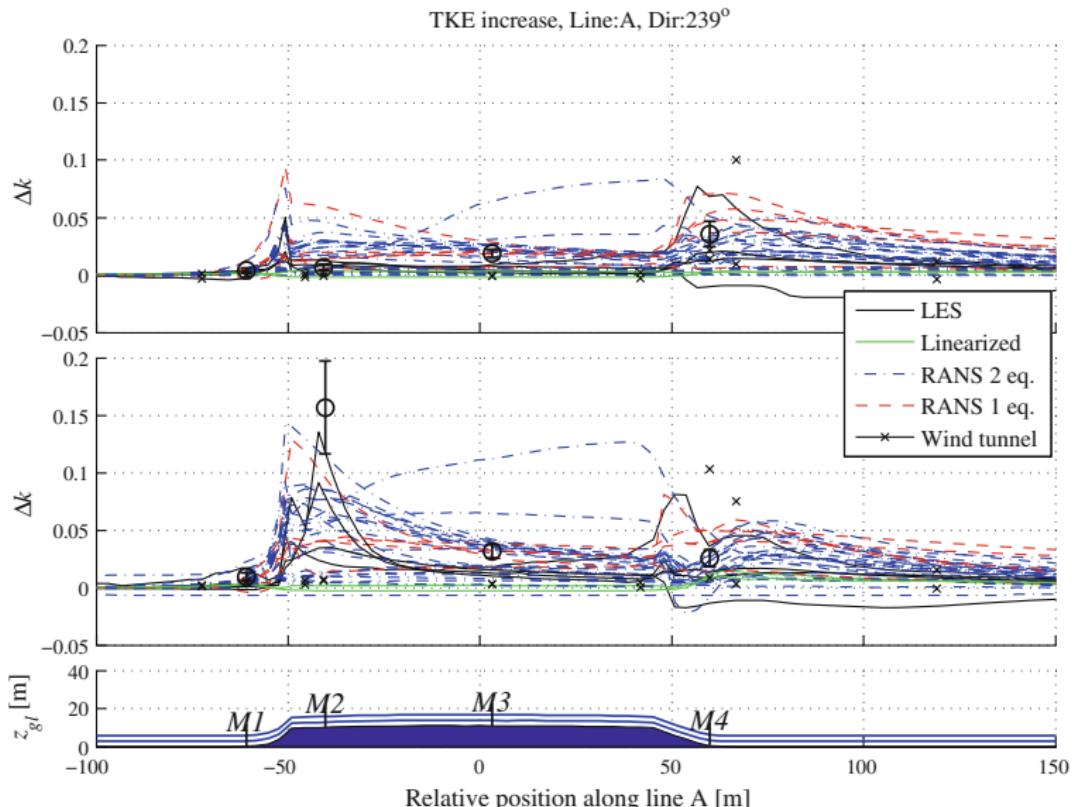


Figura 71: Δk medido y simulado a través de la sección transversal a 240° .
Arriba: valores para $z = 5 \text{ [m]}$. Abajo: valores para $z = 2 \text{ [m]}$.

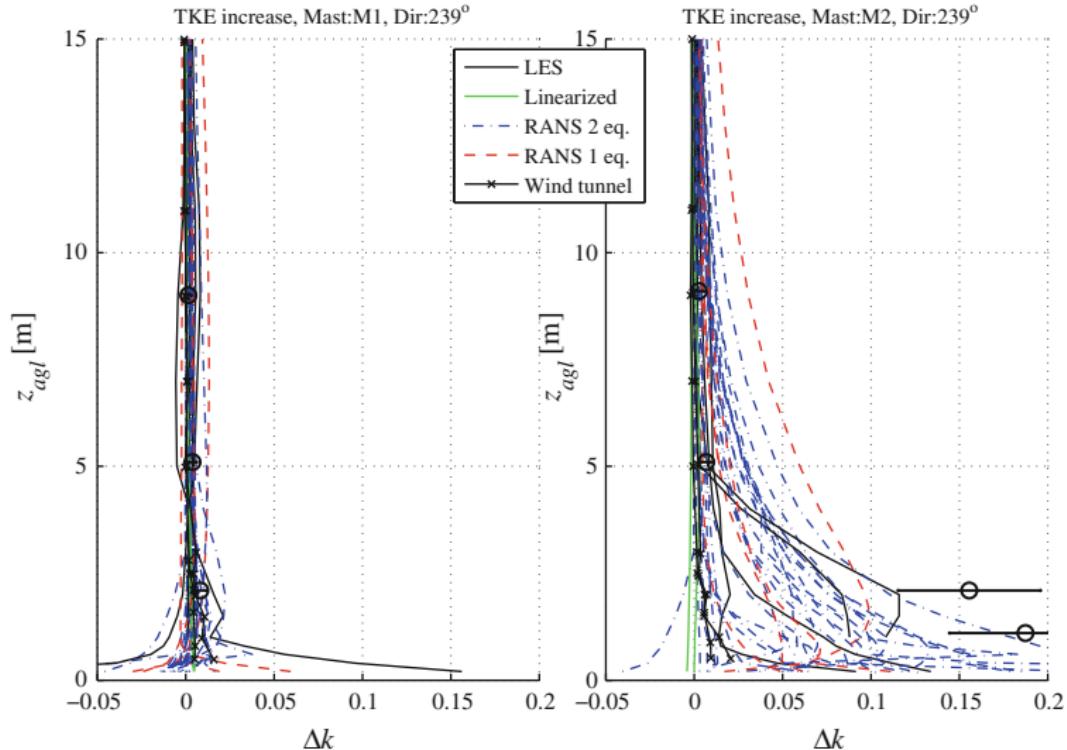


Figura 72: Perfil de Δk medido y simulado en M1-M2.

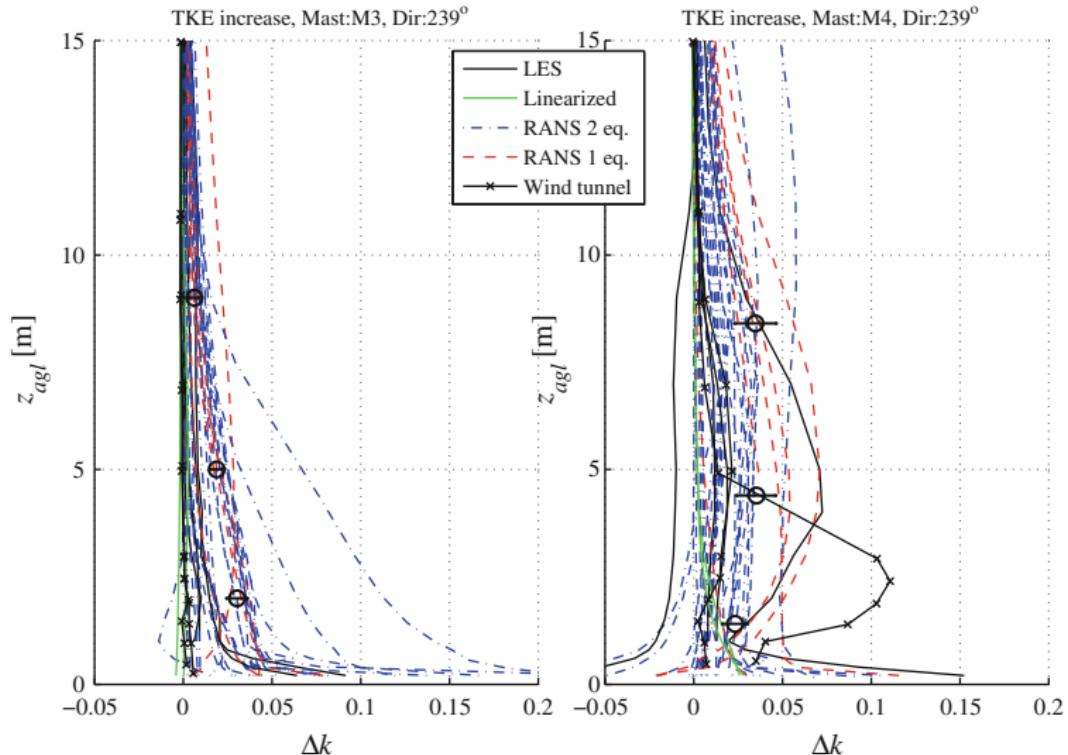
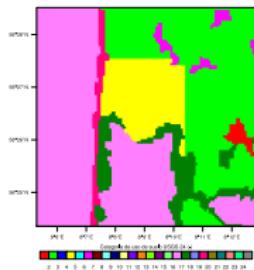
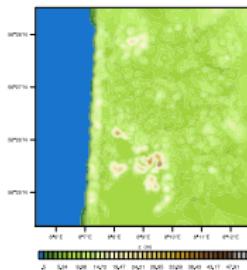
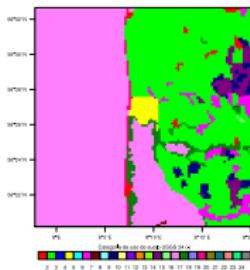
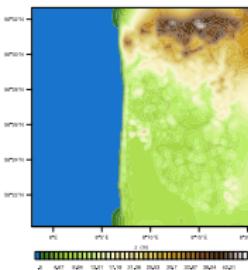
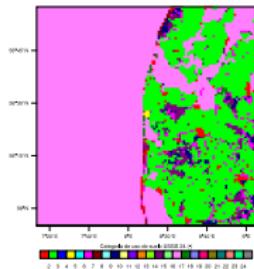
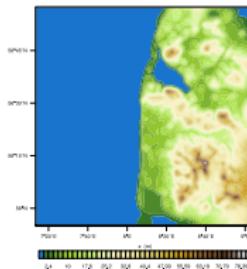
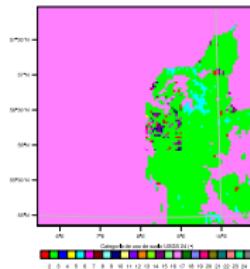
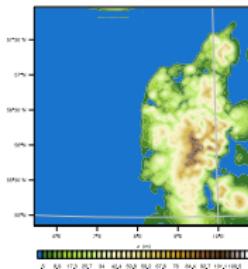
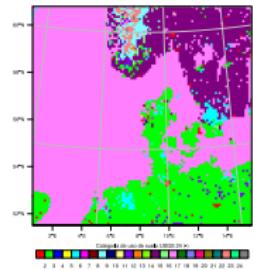
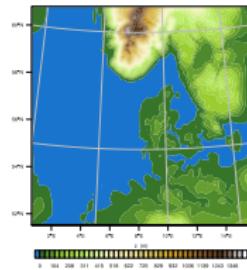
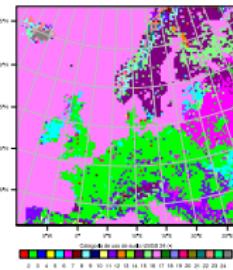
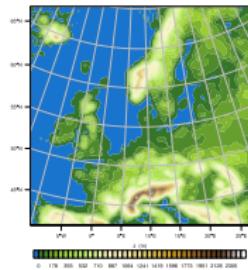


Figura 73: Perfil de Δk medido y simulado en M3-M4.



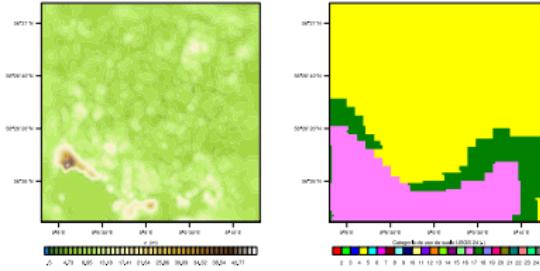
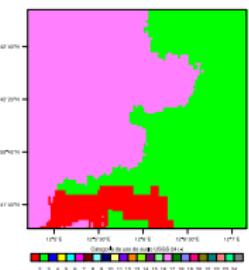
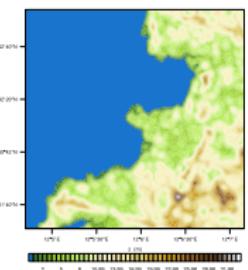
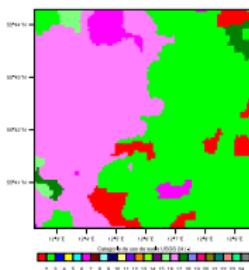
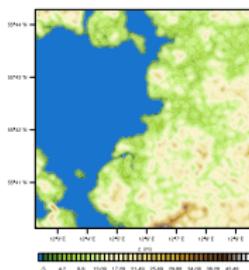
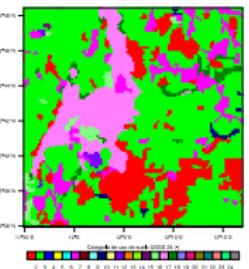
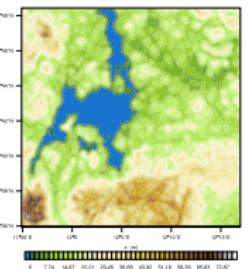
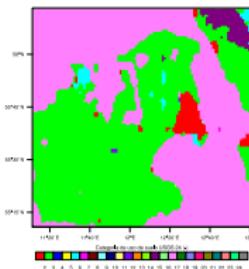
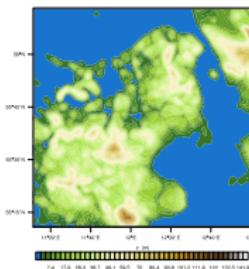
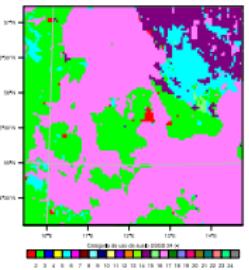
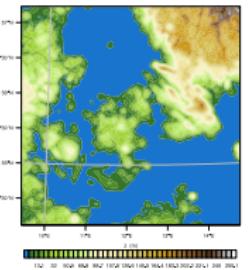
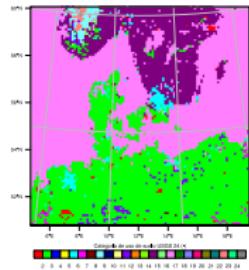
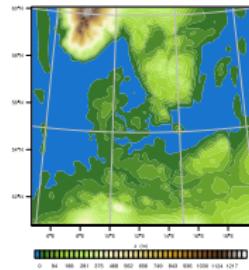


Figura 74: Orografía (MSNM) y uso de suelo (categoría USGS24) de alta resolución para cada uno de los mallas anidadas (d01-d07) en Høvsøre.



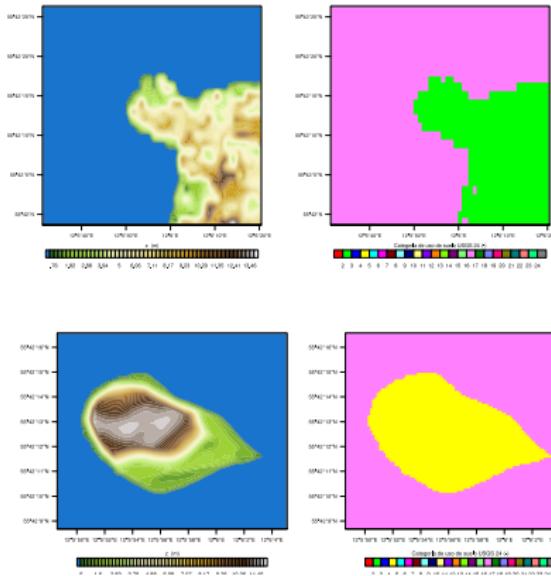


Figura 75: Orografía (MSNM) y uso de suelo (categoría USGS24) de alta resolución para cada uno de las mallas anidadas (d01-d08) en Bolund.

Tabla 11: Especificaciones técnicas de los recursos computacionales utilizados.

Servidor	S1	S2
CPU	Intel Xeon CPU E5-2609 v2@2.50Ghz	Intel Xeon Silver 4110 CPU @ 2.10GHz
# Cores	8	32
Arquitectura	x86_64	x86_64
RAM	55Gb	126Gb
HDD	1Tb	2Tb
OS	Scientific Linux 7.2	Debian 9

Tabla 12: Tiempos de cálculo para cada experimento.

Caso	Fecha Inicio	Fecha Término	T _w [h]	Δt [h]	Incremento
Høvsøre s/DA	25/02/2019 17:30	04/03/2019 01:28	151,97	-	-
Høvsore c/ DA	13/03/2019 23:13	19/03/2019 00:49	121,60	-30,37	-19,98 %
Bolund s/DA	12/02/2019 22:22	20/03/2019 08:35	850,22	-	-
Bolund c/ DA	25/04/2019 22:58	24/05/2019 09:44 ³	662,02	-188,20	-22,14 %



Simulación Multiescala de Viento Sobre Terreno Complejo Mediante el Método Embebido WRF-LES y Asimilación Variacional de Datos 4D

Pablo Andrés Cárdenas Zamorano

Magíster en Ciencias de la Ingeniería Mecánica
Universidad Técnica Federico Santa María

Profesor Guía:

Ph.D. Alex Flores Maradiaga

Profesor Correferente:

Ph.D. Carlos Rosales Huerta

Evaluador Externo:

Ph.D. Ricardo Muñoz Magnino

Octubre, 2019