

Acoplamiento Meso-Microescala Utilizando WRF-LES Para la Simulación Numérica de Viento Sobre Terreno Complejo de Alta Resolución

P. Cárdenas, A. Flores

Departamento de Ing. Mecánica
Universidad Técnica Federico Santa María

XVI Jornadas de Mecánica Computacional, 2017

Contenidos

1. Objetivos
2. Motivación
3. Metodología
4. Caso de Estudio
5. Resultados
4. Conclusiones y Trabajo Futuro

Objetivos

Objetivo Principal

Estudiar el rendimiento del modelo WRF mesoscala al resolver los fenómenos turbulentos de microescala desarrollados en la CLP en su interacción con el terreno complejo aplicando un modelo LES-TKE de orden 1.5 para así poder estimar el comportamiento del viento en zonas de alto potencial eólico.

Objetivo Secundario

Mejorar este rendimiento mediante el uso de asimilación de información y análisis variacional de datos a alta resolución en las condiciones de contorno.

Motivación

Estimación Eólica

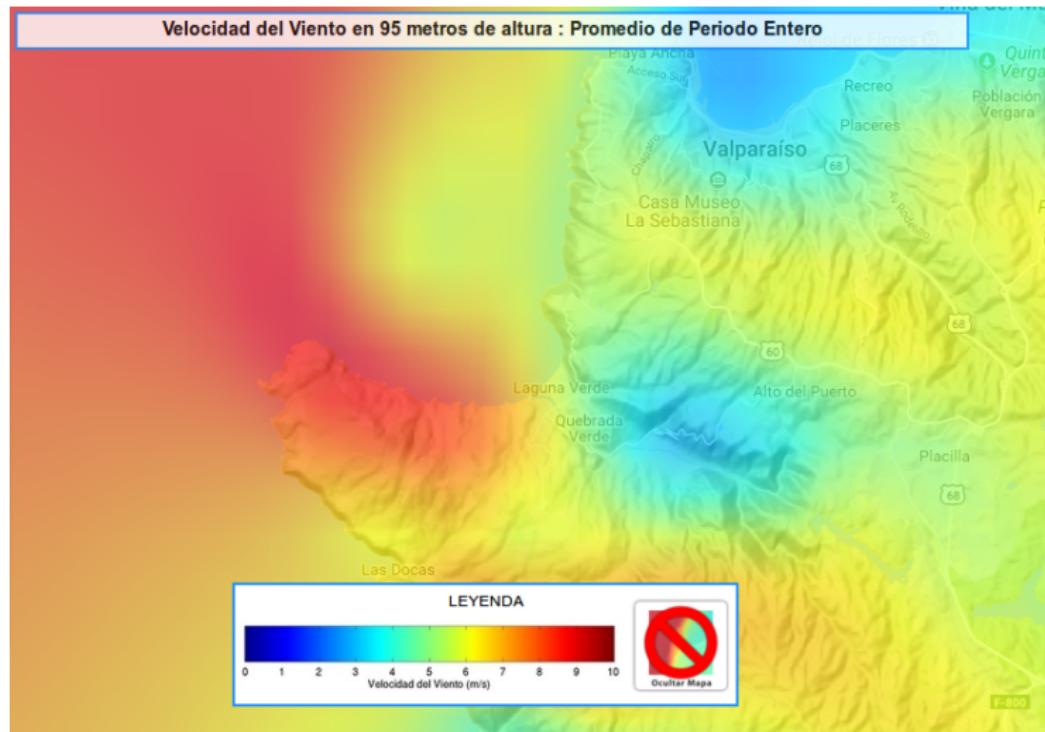


Figura 1: Información del Explorador Eólico para la zona de interés.

Motivación

Simulaciones Multiescala

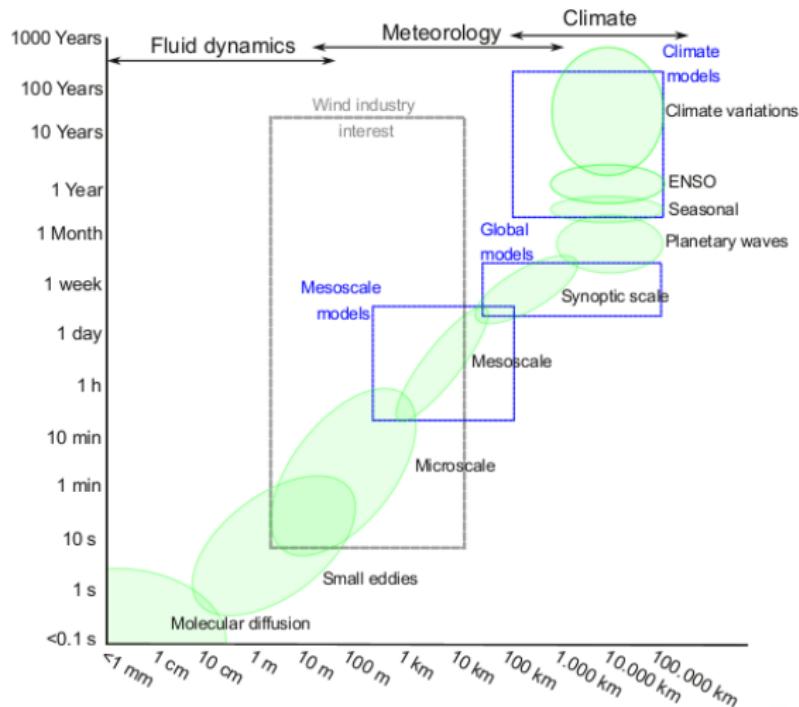


Figura 2: Separación de escalas en simulación de mecánica de fluidos.

Metodología

WRF

- ▶ *Weather Research and Forecasting Model.*
- ▶ Modelo comunitario, open source, gratis, con desarrollo distribuido y soporte centralizado.
- ▶ Su desarrollo lo lidera NCAR y NOAA, en colaboración con distintas universidades en el mundo.
- ▶ Resuelve las ecuaciones dinámicas de la atmósfera utilizando un sistema Eureliano con coordenadas verticales que siguen el terreno.

$$\eta = \frac{p_{dh} - p_{dht}}{p_{dhs} - p_{dht}} = \frac{p_{dh} - p_{dht}}{\mu_d} \quad (1)$$

Metodología

WRF

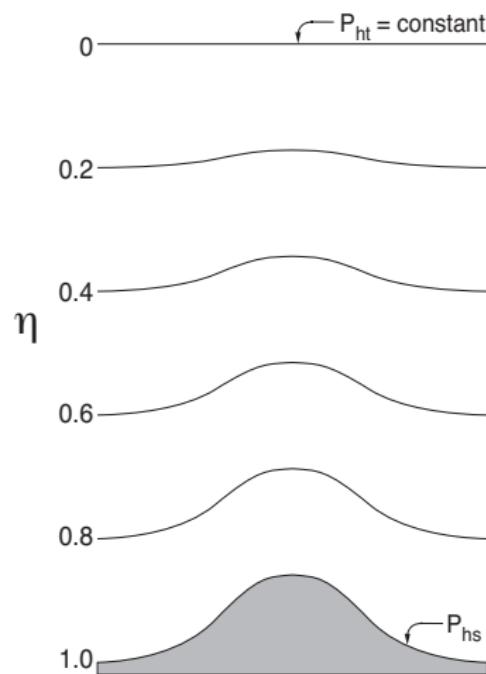


Figura 3: Estructura de la coordenada vertical.

Metodología

Ecuaciones

Se resuelven las ecuaciones de Euler:

$$\partial_t U + (\nabla \cdot \vec{V}U) - \partial_x(p\phi_\eta) + \partial_\eta(p\phi_x) = F_U \quad (2)$$

$$\partial_t V + (\nabla \cdot \vec{V}V) - \partial_y(p\phi_\eta) + \partial_\eta(p\phi_y) = F_V \quad (3)$$

$$\partial_t W + (\nabla \cdot \vec{V}W) - g(\partial_\eta p - \mu) = F_W \quad (4)$$

$$\partial_t \Theta + (\nabla \cdot \vec{V}\theta) = F_\Theta \quad (5)$$

$$\partial_t \mu + (\nabla \cdot \vec{V}) = 0 \quad (6)$$

$$\partial_t \phi + \mu^{-1}[(\vec{V} \cdot \nabla \phi) - gW] = 0 \quad (7)$$

Ademas de la relación auxiliar y la ecuación de estado:

$$\partial_\eta \phi = -\alpha \mu \quad (8)$$

$$p = p_0 \left(\frac{R_d \theta}{p_0 \alpha} \right)^\gamma \quad (9)$$

Estas ecuaciones son referenciales!

Metodología

Parametrizaciones

Debido a la resolución del modelo, los fenómenos que la malla no alcanza a resolver deben ser parametrizados. Cada uno de estos términos se agrega al lado derecho de la ecuación de Euler.

Estos son:

- ▶ Microfísica
- ▶ Cúmulos
- ▶ Capa Límite Planetaria
- ▶ Capa Superficial
- ▶ Modelo de Suelo
- ▶ Radiación

Metodología

Parametrizaciones

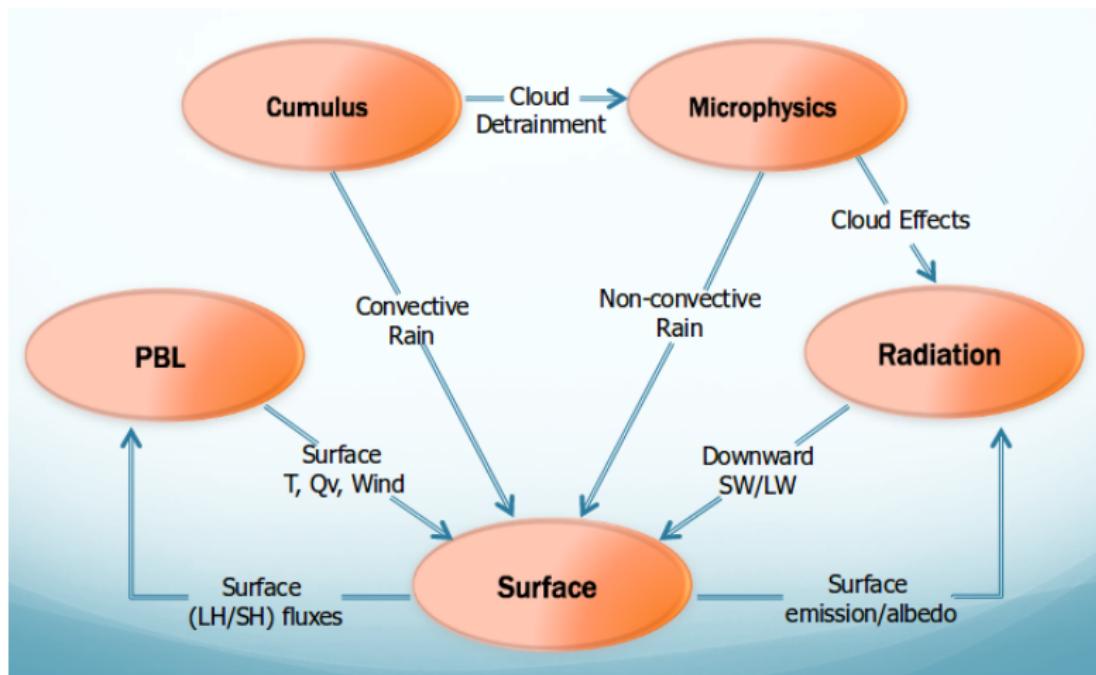


Figura 4: Esquema de interacción entre los fenómenos.

Metodología

Turbulencia

WRF separa la difusión (turbulenta) vertical de la horizontal. La difusión horizontal es resuelta explícitamente según el modelo de viscosidad turbulenta a utilizar, mientras que la difusión vertical se parametriza en los esquemas de CLP.

$$\partial_t U = \dots - m_x [\partial_x \tau_{11} + \partial_y \tau_{12} - \partial_z (z_x \tau_{11} + z_y \tau_{12})] - \partial_z \tau_{13} \quad (10)$$

$$\partial_t V = \dots - m_y [\partial_x \tau_{12} + \partial_y \tau_{22} - \partial_z (z_x \tau_{12} + z_y \tau_{22})] - \partial_z \tau_{23} \quad (11)$$

$$\partial_t W = \dots - m_y [\partial_x \tau_{13} + \partial_y \tau_{23} - \partial_z (z_x \tau_{13} + z_y \tau_{23})] - \partial_z \tau_{33} \quad (12)$$

$$\tau_{ij} = -\mu_d K_{h,v} D_{ij} \quad (13)$$

La forma de determinar $K_{h,v}$ define el LES.

Metodología

Turbulencia

Para las malla no LES:

$$K_h = C_s^2 l^2 [0,25(D_{11} - D_{22})^2 + D_{12}]^{0,5} \quad (14)$$

Con $C_s = 0,25$ y $l = \sqrt{\Delta x \Delta y}$

Para las mallas LES:

$$K_{h,v} = C_k l_{h,v} \sqrt{e} \quad (15)$$

Con $0,15 \leq C_k \leq 0,25$. Como se presume anisotrópico:

$$l_v = \min[\Delta z, 0,76\sqrt{e}/N] \quad ; \quad N^2 > 0 \quad (16)$$

$$l_h = \Delta z \quad ; \quad N^2 \leq 0 \quad (17)$$

N es la frecuencia de Brunt-Väisälä. $N = \sqrt{g/\theta d_z \theta}$

Metodología

Clausura TKE 1.5

Se introduce una ecuación de transporte para e de la forma:

$$\partial_t(\mu_d e) + (\partial_i V_i e)_\eta = \mu_d (\text{producción} + \text{flotación} + \text{dissipación}) \quad (18)$$

$$\text{producción} = K_h(D_{11}^2 + D_{22}^2 + D_{12}^2) + K_v(D_{33}^2 + D_{13}^2 + D_{23}^2) \quad (19)$$

$$\text{flotación} = -K_v N^2 \quad (20)$$

$$\text{dissipación} = -\frac{C e^{3/2}}{l} \quad (21)$$

Con:

$$C = 1,9 C_k + \frac{(0,93 - 1,9 C_k) l}{(\Delta x \Delta y \Delta z)^{1/3}} \quad (22)$$

$$l = \min[(\Delta x \Delta y \Delta z)^{1/3}, 0,76 \sqrt{e}/N] \quad (23)$$

Caso de Estudio

Dominios y Resolución Espacial

- ▶ La malla numérica consta de 6 mallas anidadas telescopicamente y centradas en Punta Curaumilla (-33.097344, -71730552).
- ▶ Cada malla consta de $121 \times 121 \times 47$ nodos.
- ▶ $\Delta x = \Delta y = 12150 \rightarrow 4050 \rightarrow 1350 \rightarrow 450 \rightarrow 150 \rightarrow 50$
- ▶ Las últimas 3 mallas: LES.
- ▶ La malla vertical se fabrica de tal forma que se capture el comportamiento dentro de la capa límite.
- ▶ Se utiliza un $\Delta t = 12$ [s] para iterar en la malla mas gruesa. De esta forma no se viola la condición CFL.

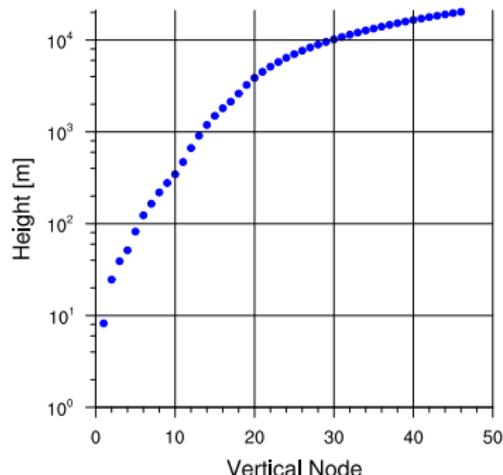


Figura 5: Distribución malla vertical.

Caso de Estudio

Dominios y Resolución Espacial

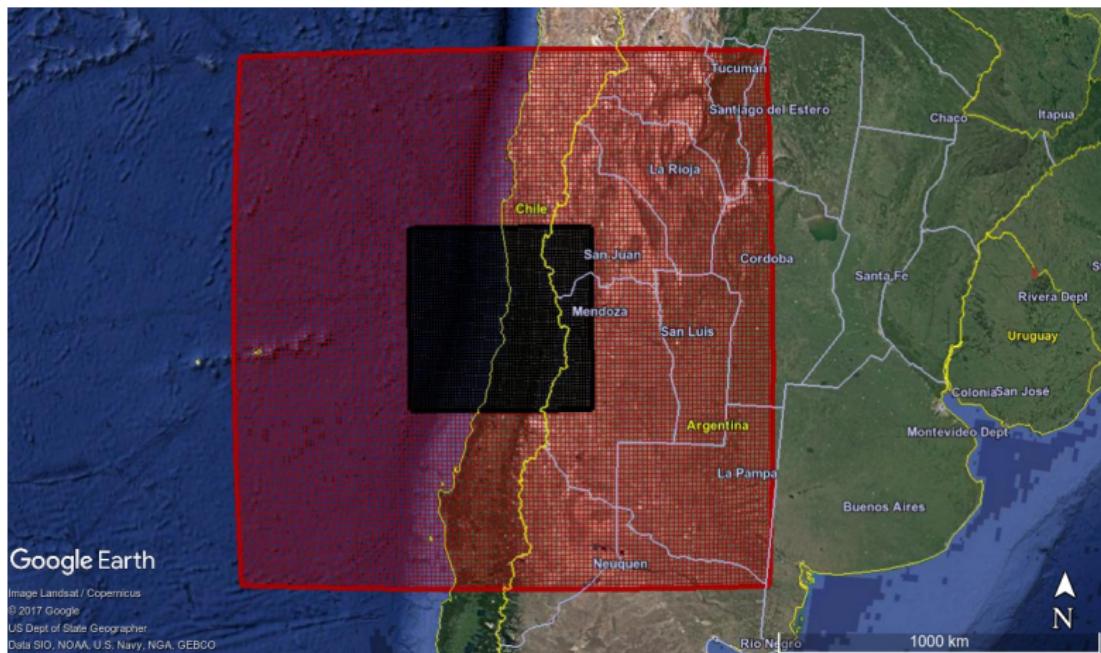


Figura 6: Dominios de las mallas exteriores d01 y d02.

Caso de Estudio

Dominios y Resolución Espacial

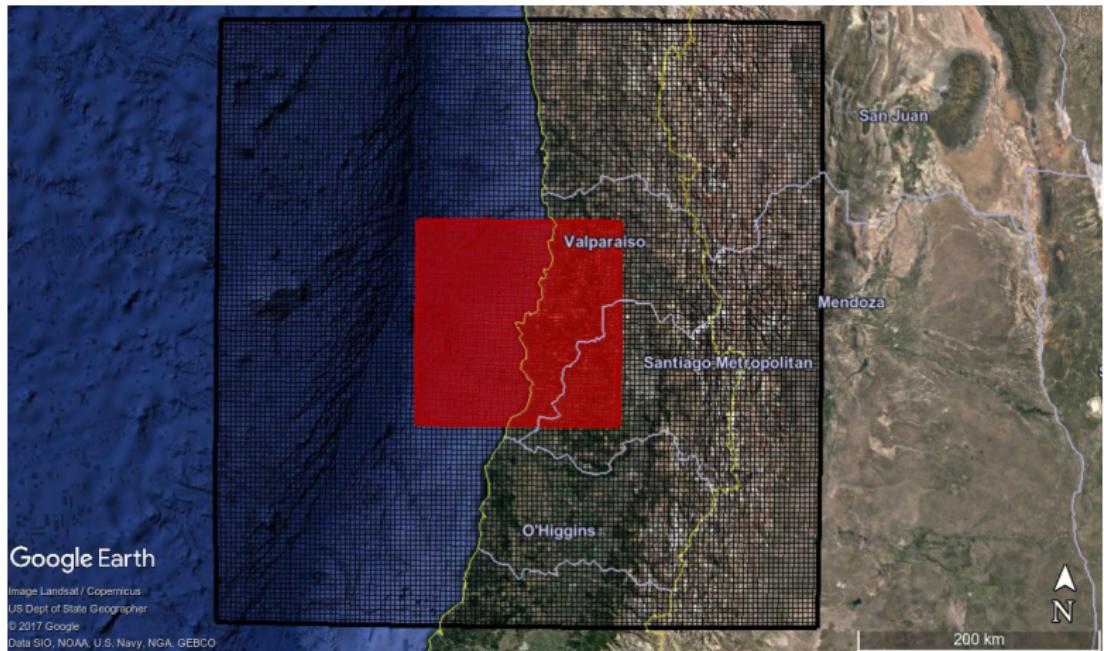


Figura 7: Dominios de las mallas exteriores d02 y d03.

Caso de Estudio

Dominios y Resolución Espacial

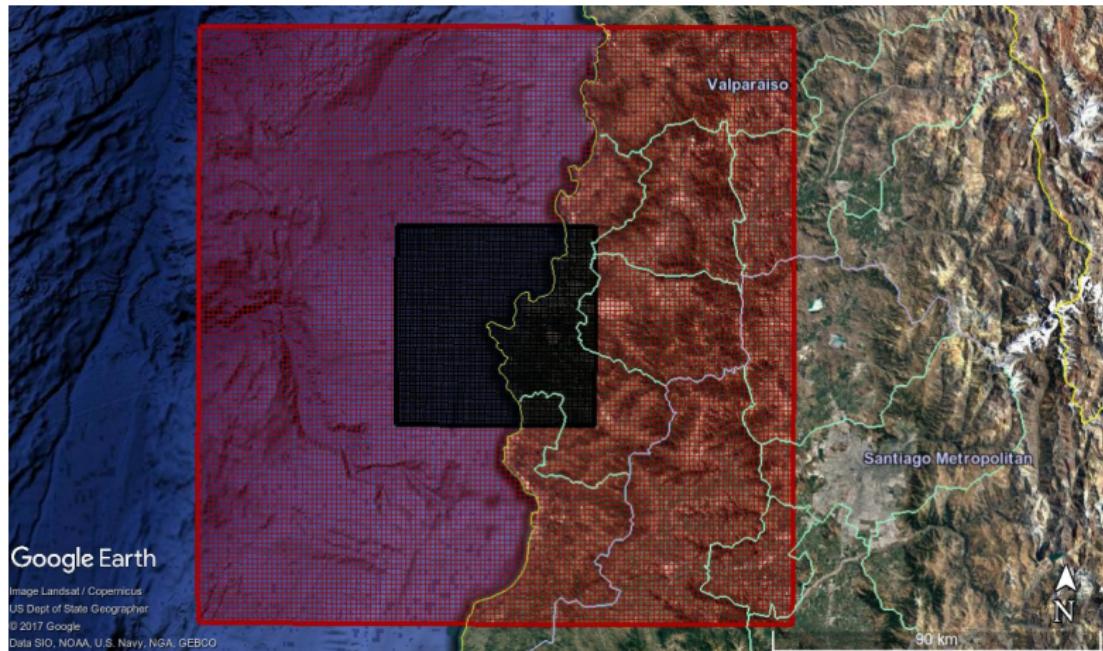


Figura 8: Dominios de las mallas exteriores d03 y d04.

Caso de Estudio

Dominios y Resolución Espacial

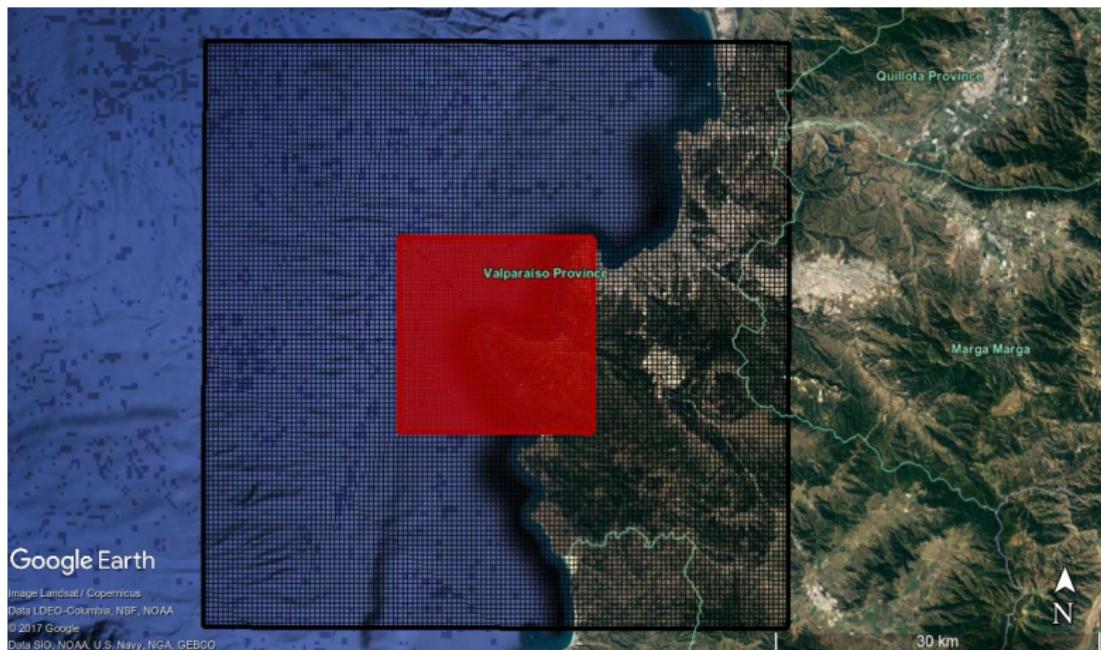


Figura 9: Dominios de las mallas exteriores d04 y d05.

Caso de Estudio

Dominios y Resolución Espacial

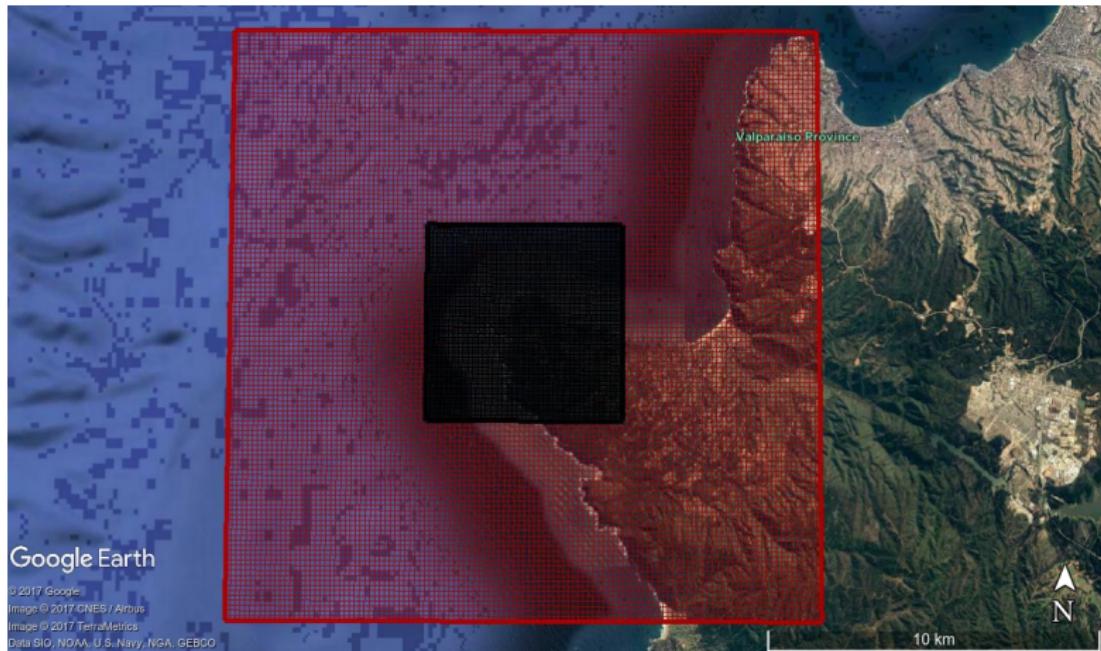


Figura 10: Dominios de las mallas exteriores d05 y d06.

Caso de Estudio

Dominios y Resolución Espacial

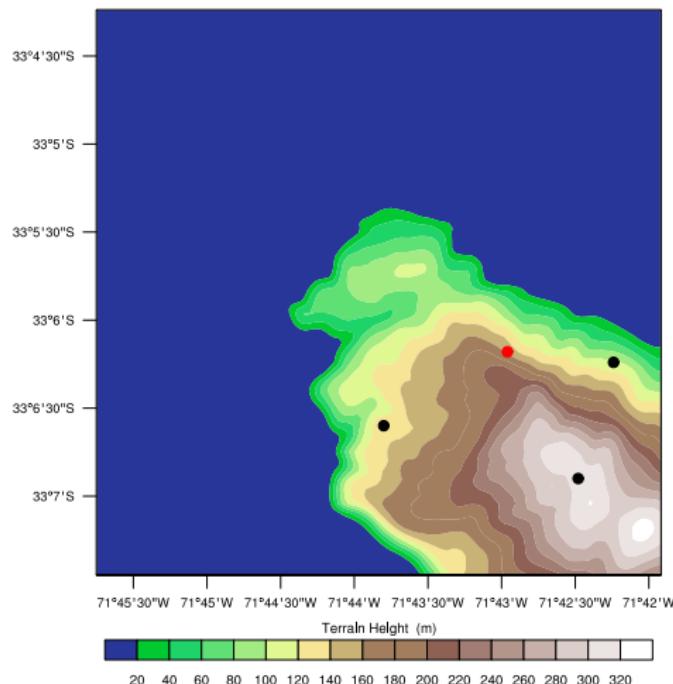


Figura 11: Puntos de monitoreo dominio d06.

Caso de Estudio

CB e Información del Terreno

- ▶ Las condiciones de borde provienen del modelo GFS global con una resolución de $0,5^\circ \approx 55,6$ [km].
- ▶ La coordenada de presión se fija a $p_{dht} = 5000$ [kPa].
- ▶ La información de la topografía se interpola de los datos obtenidos por la operación del satélite STRM de la NASA con 3" de resolución ≈ 90 [m].
- ▶ La información para el uso de suelo y otras características del terreno se obtienen a través de los instrumentos satelitales MODIS.
- ▶ Se modelan 12 horas del 10/01/2010.

Caso de Estudio

Parametrizaciones

Cuadro 1: Esquemas de Parametrización Utilizados.

Física	d01	d02	d03	d04	d05	d06
Micro-físicas	WSM5	WSM5	WSM5	WSM5	WSM5	WSM5
Cúmulos	Grell	–	–	–	–	–
Capa Superf.	MM5	MM5	MM5	MM5	MM5	MM5
PBL	YSU	YSU	YSU	–	–	–
Modelo Suelo	Dif.	Dif.	Dif.	Dif.	Dif.	Dif.
Rad. Larga	RRTM	RRTM	RRTM	RRTM	RRTM	RRTM
Rad. Corta	Dudhia	Dudhia	Dudhia	Dudhia	Dudhia	Dudhia

Resultados

Series de Tiempo

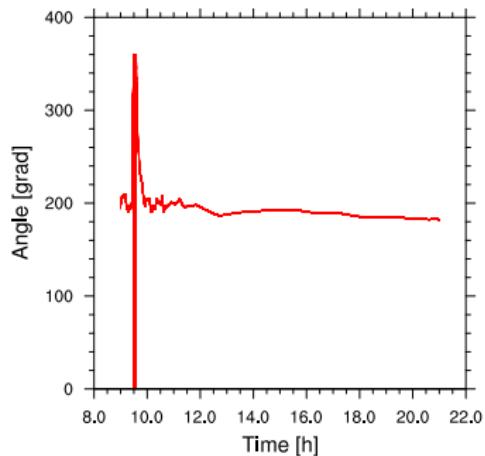
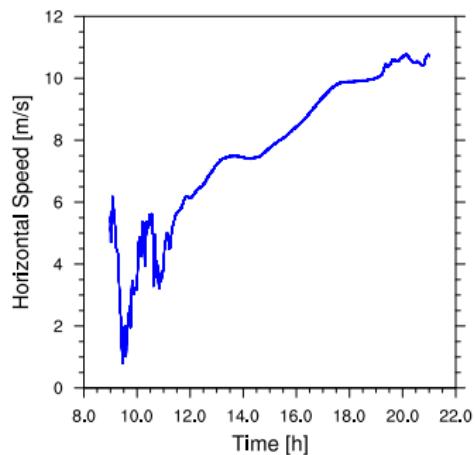


Figura 12: Rapidez y Ángulo del viento para $\eta_l = 6$, $z_l = 123,349$ [m]

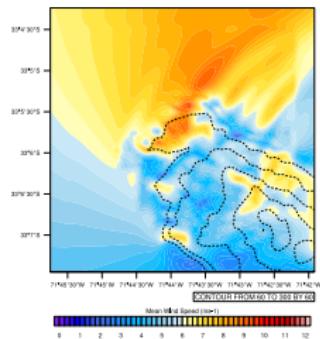
Resultados

Viento Superficial

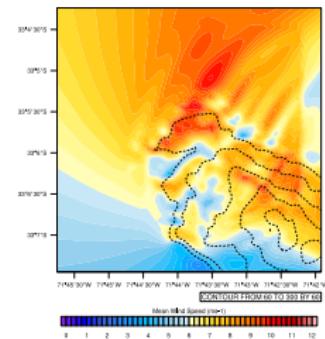
Resultados

Viento Medio

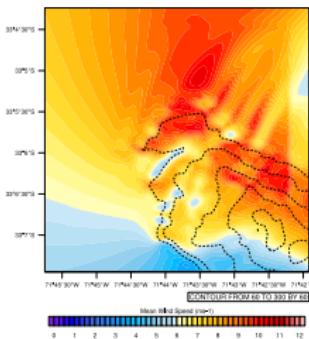
$$\bar{z} = 8,20464 \text{ [m]}$$



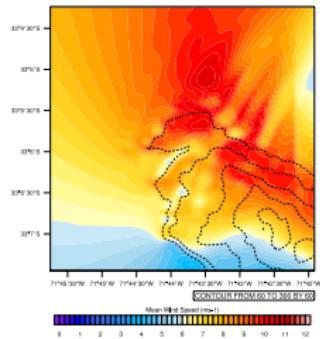
$$\bar{z} = 24,6166 \text{ [m]}$$



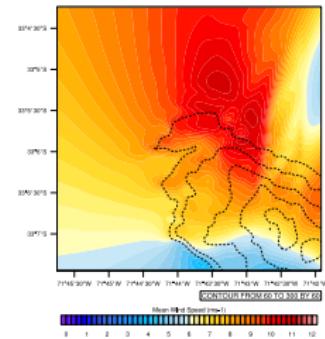
$$\bar{z} = 38,9816 \text{ [m]}$$



$$\bar{z} = 51,2991 \text{ [m]}$$



$$\bar{z} = 82,144 \text{ [m]}$$



$$\bar{z} = 123,349 \text{ [m]}$$

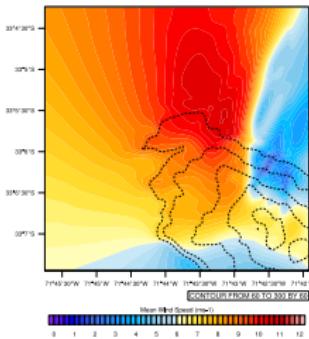


Figura 13: Rapidez del viento medio para los primeros 6 niveles verticales.

Resultados

Perfiles de Viento

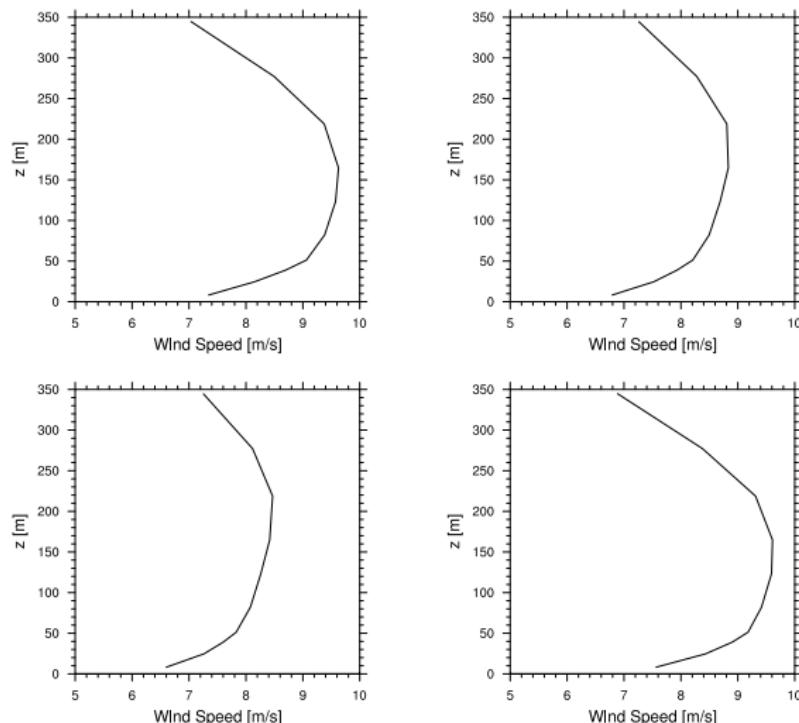


Figura 14: Perfiles de viento promedio para los puntos de observación.

Resultados

Espectros

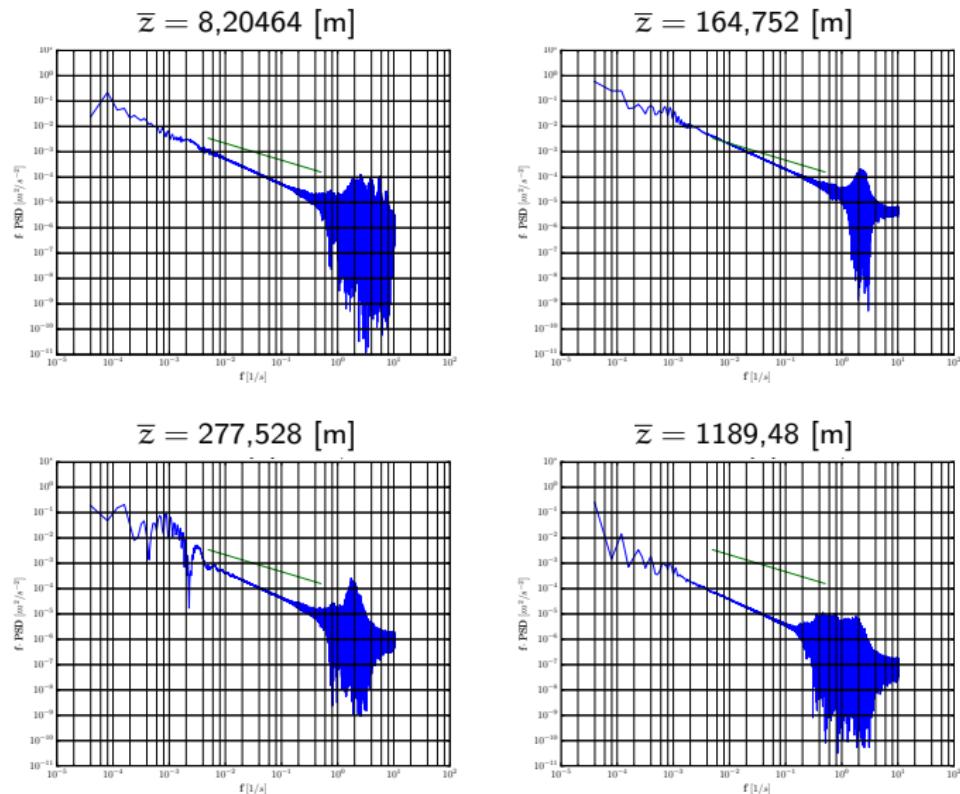


Figura 15: Espectro de velocidad horizontal para los niveles 1, 7, 9 y 14.

Conclusiones

Análisis

- ▶ Existe concordancia física entre lo simulado y lo real, mostrando una aceleración, separación, recirculación y *reattachment* debido a la pendiente natural del sitio.
- ▶ WRF muestra un buen rendimiento para este tipo de simulaciones, siempre y cuando los datos de entrada tengan la resolución necesaria.
- ▶ El terreno complejo afecta en gran medida el comportamiento del flujo, la estimación eólica en este tipo de zonas debe ser mas detallada.
- ▶ Los perfiles de velocidad y los espectros de energía se comportan según lo esperado.

Conclusiones

Trabajo Futuro

- ▶ Este tipo de simulaciones son muy costosas computacionalmente. Se espera optimizar el código para mejorar su eficiencia.
- ▶ Para convencernos: probar otros esquemas LES, sensibilidad a las CB, parametrizaciones, etc.
- ▶ Se necesita validación de los datos:
 - ▶ Obtención de datos experimentales con globos meteorológicos.
 - ▶ Implementación de Data Assimilation.
 - ▶ Simulación caso Bolund (benchmark para terreno complejo).

Acoplamiento Meso-Microescala Utilizando WRF-LES Para la Simulación Numérica de Viento Sobre Terreno Complejo de Alta Resolución

P. Cárdenas, A. Flores

Departamento de Ing. Mecánica
Universidad Técnica Federico Santa María

XVI Jornadas de Mecánica Computacional, 2017