

Informe Resultados de Simulación en la Costa de Valparaíso

Resumen En el presente documento se muestran los resultados obtenidos para dos simulaciones en los meses de Enero y Agosto para el año 2010 en la costa de Valparaíso utilizando el software WRF. El objetivo específico es replicar los resultados obtenidos por la Universidad de Chile con el Explorador Eólico pero con una resolución horizontal el doble mas fina (500 metros). Los resultados obtenidos concuerdan a grandes rasgos con aquellos mostrados por el explorador, por lo tanto se puede comenzar a trabajar sobre estos resultados para implementar un análisis 4D Variacional que permita la incorporación de observaciones en tiempo real a la simulación.

1. WRF y Modelo Físico

WRF (Weather Research and Forecasting) es un modelo numérico para simulación atmosférica que es ampliamente usado a nivel internacional y corresponde a uno de los modelos “estado del arte” para simulaciones de mesoscala tanto a nivel operacional como en investigación.

Su rango de dominios de simulación (planetaria hasta mesoscala) tiene que ver directamente con el sistema de ecuaciones que resuelve. En específico, las ecuaciones que resuelve el modelo son las ecuaciones de Euler para un flujo no hidrostático y compresible.

Para llegar a escribir las ecuaciones primero debemos considerar el cambio en la coordenada vertical y algunas variables auxiliares. La coordenada vertical (que mantiene la forma del terreno) es:

$$\eta = \frac{p_h - p_{ht}}{\mu} \quad (1.1)$$

Donde $\mu = p_{hs} - p_{ht}$.

Las definiciones de cada término se pueden ver en la sección 5.

Introducimos variables auxiliares:

$$\vec{V} = \mu \vec{v} \quad (1.2)$$

$$\Omega = \mu \dot{\eta} \quad (1.3)$$

$$\Theta = \mu \theta \quad (1.4)$$

\vec{v} es el vector velocidad (u, v, w), donde $w = \dot{\eta}$, θ es la temperatura potencial.

Para escribir la forma completa de las ecuaciones, consideramos las siguientes variables no conservativas: $\phi = gz$ (geopotencial), p (presión) y $\alpha = p^{-1}$.

1.1. Forma Conservativa de las Ecuaciones de Euler

$$\partial_t U + (\nabla \cdot \vec{V} u) - \partial_x(p\phi_\eta) + \partial_\eta(p\phi_x) = F_U \quad (1.5)$$

$$\partial_t V + (\nabla \cdot \vec{V} v) - \partial_y(p\phi_\eta) + \partial_\eta(p\phi_y) = F_V \quad (1.6)$$

$$\partial_t W + (\nabla \cdot \vec{V} w) - g(\partial_\eta p - \mu) = F_W \quad (1.7)$$

$$\partial_t \Theta + (\nabla \cdot \vec{V} \theta) = F_\Theta \quad (1.8)$$

$$\partial_t \mu + (\nabla \cdot \vec{V}) = 0 \quad (1.9)$$

$$\partial_t \phi + \mu^{-1}[(\vec{V} \cdot \nabla \phi) - gW] = 0 \quad (1.10)$$

$$(1.11)$$

Ademas de la relación auxiliar y la ecuación de estado:

$$\partial_\eta \phi = -\alpha \mu \quad (1.12)$$

$$p = p_0 \left(\frac{R_d \theta}{p_0 \alpha} \right)^\gamma \quad (1.13)$$

WRF se basa en estas ecuaciones para integrar temporalmente el modelo. Los términos de forzamiento corresponden a aquellos relacionados a los fenómenos de turbulencia, viscosidad, curvatura, de proyección y Coriolis y se resuelven o directamente o con una parametrización adecuada.

Las ecuaciones reales que resuelve WRF contienen la humedad y están escritas en términos de las perturbaciones desde un estado de equilibrio hidrostático (ya que de no ser así es más fácil caer en inestabilidades numéricas). La formulación completa de estas ecuaciones se pueden revisar en las referencias.

Finalmente, como se trata con las ecuaciones compresibles, WRF separa los fenómenos de baja frecuencia (aquellos que consideraríamos incompresibles) y los resuelve para el paso de tiempo indicado. Por otra parte, los fenómenos de alta frecuencia se resuelven en pasos de tiempo intermedio dentro de cada iteración.

2. Dominio Computacional y Resolución Horizontal

Para este caso, se está interesado en caracterizar el comportamiento del viento en la zona de la costa de Valparaíso, mas específicamente en el sector de Laguna Verde en donde existe un alto interés en términos de recurso eólico que posee.

Como la meta es lograr que el dominio mas fino tenga una resolución de 500 [m], se utiliza la ya utilizada razón de 1:3 para generar dominios anidados (y así amortiguar los errores por interpolación de las condiciones de borde) y por otro lado la condición de borde proveniente de un modelo global tiene una resolución de 0.5 grados de latitud y longitud, lo que significa que se interpolará datos cada:

$$d = \phi a = 6371 \cdot \left(\frac{0.5\pi}{180} \right) \approx 55.6 \text{ [km]}$$

Entonces, la malla mas gruesa ideal debería ser de aproximadamente 18.5 [km].

Finalmente se opta por una configuración de 4 mallas anidadas de $61 \times 61 \times 40$, donde la resolución horizontal de cada una es 13.5, 4.5, 1.5 y 0.5 [km] respectivamente y su distribución espacial en el globo se puede ver en las figuras 2.1 y 2.2.

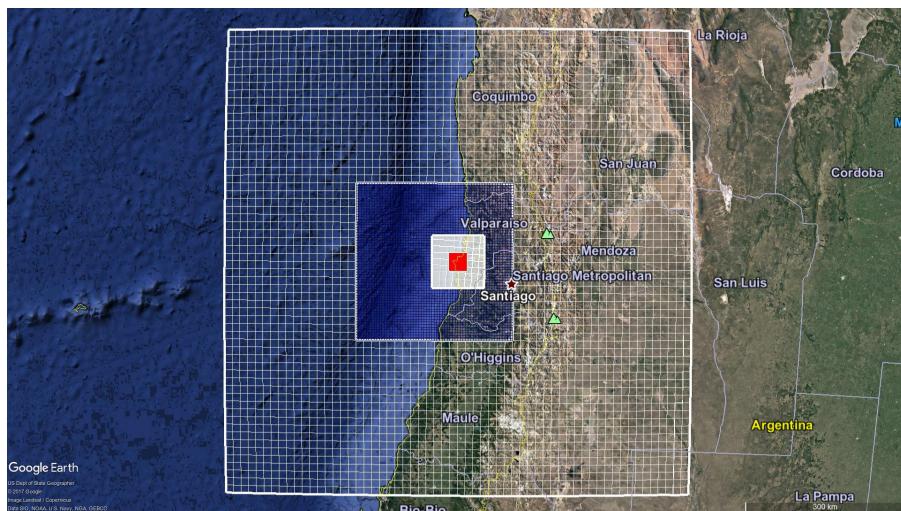


Figura 2.1: Ubicación de los 4 dominios (gris, azul, blanco, rojo).

3. Información del Terreno

Para la topografía se utilizan los datos GMTED2010 (con resolución de 30 segundos de arco, ≈ 50 [m]), en contraste con los datos satelitales SRTM que usa el explorador eólico que son mas antiguos.

Por otra parte, las propiedades de la superficie como vegetación, rugosidad, uso de suelo, etc. provienen de los instrumentos satelitales MODIS al igual que en el Explorador.

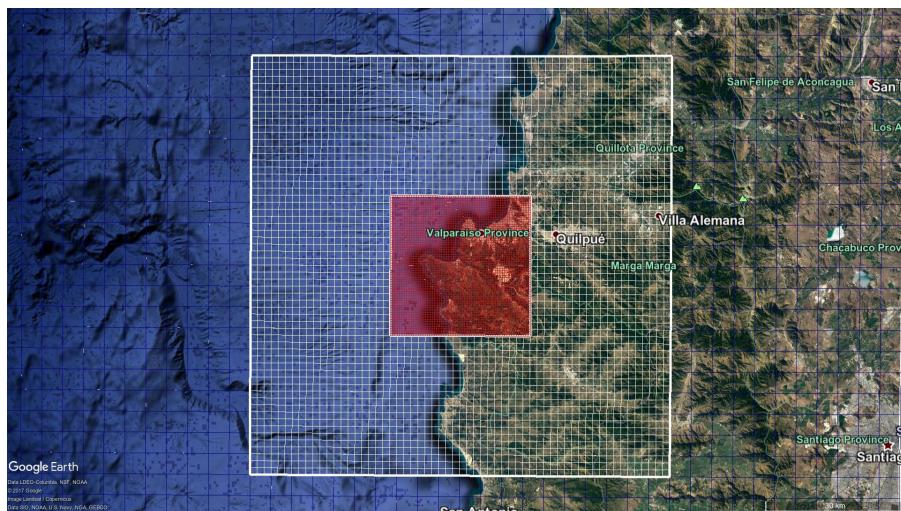


Figura 2.2: Ubicación de los 2 dominios mas finos.

4. Condición Inicial y de Borde

Al igual que en resto de los modelos de mesoescala y escala sinóptica, las condiciones iniciales y de borde para las variables deben venir de un modelo global. Para este caso se utilizan los análisis operacionales del modelo GFS, con resolución de 0.5° . Su utilización se justifica por su gran compatibilidad con WRF, por que no existen otras bases de datos con mejor calidad y por que es la misma que utiliza el Explorador Eólico.

5. Resolución Vertical

WRF utiliza una cordenada vertical que se adapta a la complejidad del terreno. Esta nueva coordenada η se define como:

$$\eta = \frac{p_h - p_{ht}}{p_{hs} - p_{ht}} \quad (5.1)$$

Donde:

- p_h es la presión hidrostática en el punto.
- p_{hs} es la presión hidrostática en la superficie.
- p_{ht} es la presión hidrostática en la frontera superior del dominio (top). Para la simulación está definida como 5000 [Pa] por recomendación del manual.

La distribución por defecto de esta coordenada en el dominio a simular es bastante gruesa para, por ejemplo, caracterizar el perfil de velocidad en los primeros 200 metros de altura desde la superficie.

Las simulaciones desarrolladas por el Explorador Eólico utilizan una malla vertical en donde se tienen 10 elementos en los primeros 150 metros.

Por lo tanto, para caracterizar de buena manera el perfil, se realiza un ajuste manual a esta coordenada. En específico, se utiliza una distribución en forma de tangente hiperbólica (muy usada en CFD) para así, afinar la malla cerca de la superficie (donde $\eta = 1$).

El dominio vertical se definirá con 40 nodos, tal como se indicó en la sección 2.

Luego, si se supone una discretización regular para el dominio $\eta \in [0, 1]$, la transformación para afinar la malla queda definida matemáticamente como:

$$\eta' = \frac{\tanh(\delta\eta)}{\tanh(\delta)} \quad (5.2)$$

Donde δ es una constante de ajuste. Acá se usa $\delta = 3$.

Esta transformación permite tener de manera práctica 10 puntos dentro de los primeros 150 metros, sin embargo como la coordenada está en base a la presión, el alto de cada centro de los elementos en la malla es variable,

pero esta variación no es tan significativa, lo que permite obtener un valor medio para todo el dominio entre nivel η y altura. Esta relación se puede ver en la figura 5.1

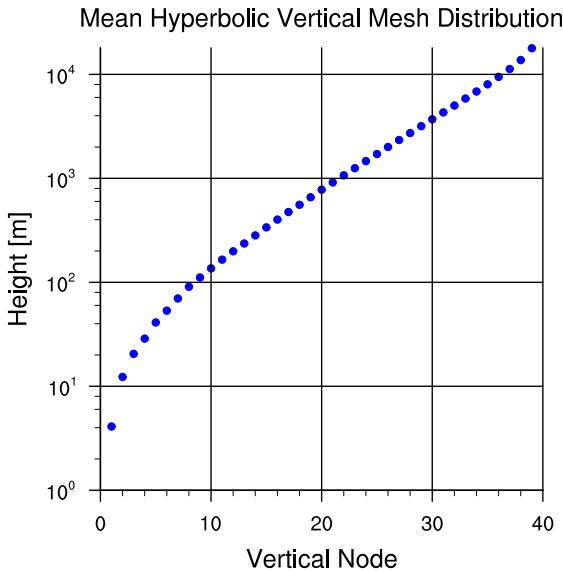


Figura 5.1: Distribución media de altura para η en el dominio.

6. Resolución Temporal

Para la resolución temporal en cada dominio, se utiliza una relación mas que nada empírica y que es parte de las buenas prácticas de los usuarios en WRF para evitar no cumplir la condición CFL limitante. Esta relación impone:

$$\Delta t > 3\Delta x \quad (6.1)$$

Donde Δx se utiliza en [km].

Considerando esto y un pequeño factor de seguridad es que utiliza para las simulaciones:

$$\Delta t = 40 \text{ [s]} \quad (6.2)$$

Para el dominio mas grande. Luego, para el resto de los dominios este valor va disminuyendo a 1/3 de su dominio madre.

7. Esquemas de Parametrización

Debido a la naturaleza numérica del problema, es necesario parametrizar ciertos fenómenos físicos cuya resolución es mucho mas fina que los elementos de la malla, o de lo contrario los resultados obtenidos no reflejarían la física del problema.

Los fenómenos físicos que se parametrizan en WRF son:

1. Micro física: Interacción entre las diversas fases del agua y su relación con las ecuaciones de conservación.
2. Cúmulos: Formación de nubes y perdida de radiación por estas.
3. Capa Superficial: Subcapa viscosa.
4. Modelo de Suelo: Interacción de la superficie con el fluido, la vegetación, uso de suelo, etc.
5. Capa Límite Planetaria.
6. Radiación Atmosférica: Calentamiento de la atmósfera y superficie por la radiación solar.

Y los esquemas utilizados son los mismos que utiliza el Explorador Eólico y que están acorde a lo recomendado por la guía de usuarios de WRF. Estos se pueden ver en la tabla 1.

Tabla 1: Esquemas de Parametrización Utilizados.

Física	Esquema Utilizado
Micro-físicas	WSM 5-especie
Cúmulos	–
Capa Superficial	QNSE
PBL	QNSE
Modelo de Suelo	Esquema simple de 5 capas
Radiación Onda Larga	RRTMG
Radiación Onda Corta	Dudhia

8. Casos a Simular

Debido a los recursos computacionales se seleccionan 5 días dentro de cada mes para hacer una simulación representativa de este.

1. Enero: Desde el día 10 a las 00:00 UTC hasta el día 15 a las 00:00.
2. Agosto: Desde el día 10 a las 00:00 UTC hasta el día 15 a las 00:00.

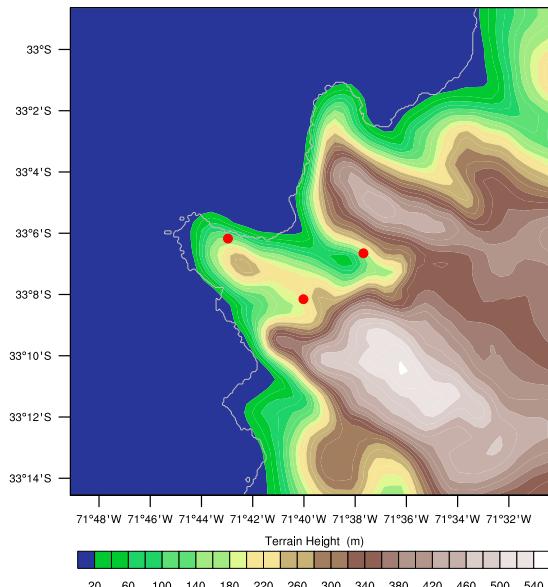
8.1. Resultados a Comparar

De los datos simulados, compararemos el perfil de velocidad, en los primeros puntos de la coordenada vertical, en 3 puntos específicos del dominio. Estos puntos se escogieron debido a que son representativos de zonas muy distintas y por ende sus perfiles deben tener diferencias considerables.

Los tres puntos son:

- -33.103, -71.716
- -33.136, -71.667
- -33.111, -71.628

Y se pueden ver gráficamente en la figura 8.1.

**Figura 8.1:** Puntos de obtención de perfil en el dominio.

Por otra parte, también se compararán los mapas de rapidez del viento medio en cada nivel de la coordenada vertical, tal cual como los muestra el explorador eólico.

Otros gráficos a obtener son las rapideces instantáneas de viento a 10 metros de la superficie para cada intervalo de tiempo en donde se guarda información (cada 30 minutos).

9. Resultados Obtenidos

9.1. Simulaciones Realizadas

Los resultados para cada perfil de velocidad, los mapas de rapidez promedio por coordenada vertical y la rapidez instantánea a 10 metros de altura se presentan en los anexos a este informe, debido a la gran cantidad de datos presentados.

Los tiempos de simulación se pueden ver en la tabla 2.

Tabla 2: Wall time para cada simulación.

Mes	Tiempo [h]
Enero	≈ 35
Agosto	≈ 35

9.2. Explorador Eólico

Las rapideces media para los meses de Enero de Agosto se pueden ver en las figuras 9.1 y 9.2 respectivamente.

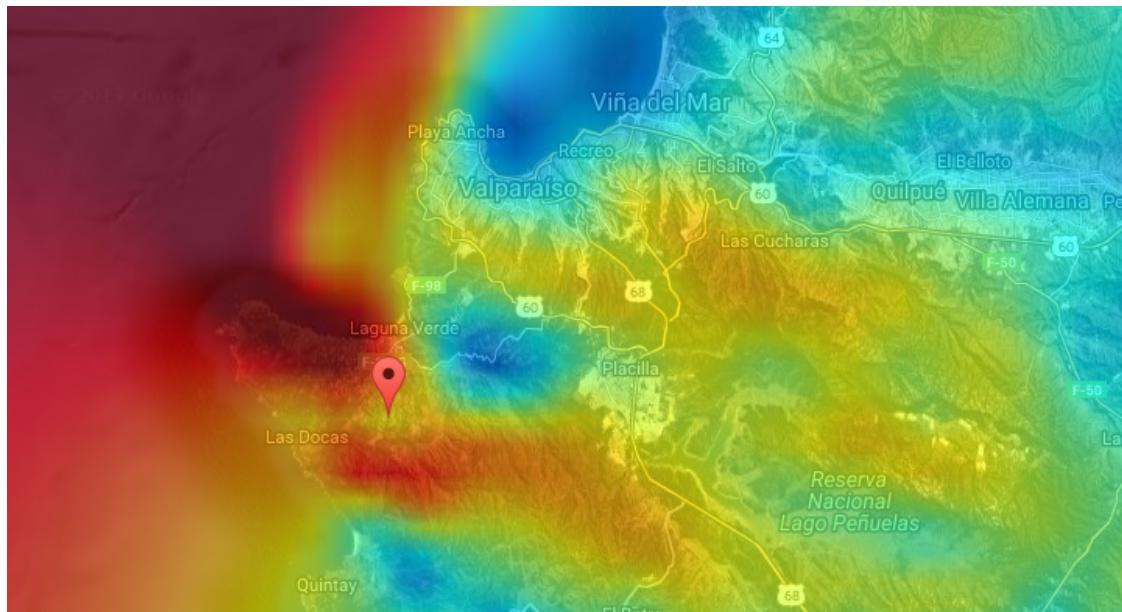


Figura 9.1: Rapidez media para el mes de Enero a 95 metros de altura.

Por otra parte los perfiles para los puntos seleccionados están en las figuras 9.3, 9.4 y 9.5.

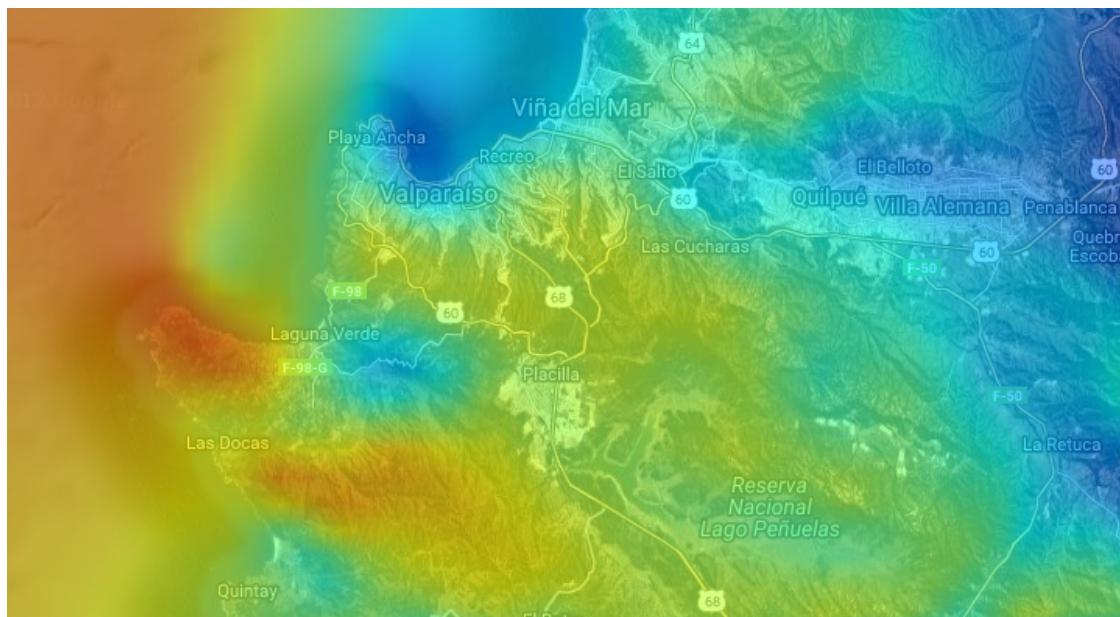


Figura 9.2: Rapidez media para el mes de Agosto a 95 metros de altura.

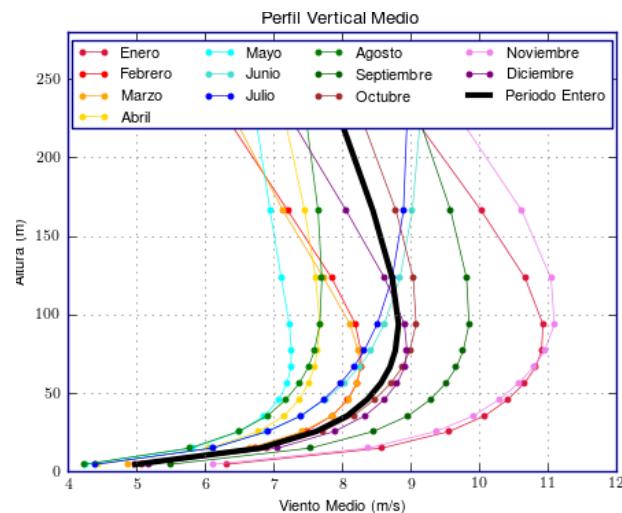


Figura 9.3: Perfil de velocidad para (-33.103, -71.716).

Referencias

- [1] Skamarock, W., et al, (2008), *A Description of the Advanced Research WRF Version 3*.
- [2] Tomkins, W., (2011), *Numerical Weather and Climate Prediction*.
- [3] NCAR, (2017), *ARW Version 3 Modeling System User's Guide*.

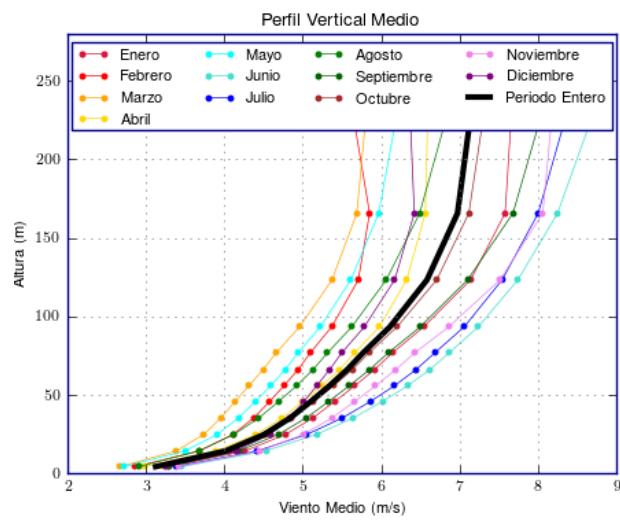


Figura 9.4: Perfil de velocidad para (-33.136, -71.667).

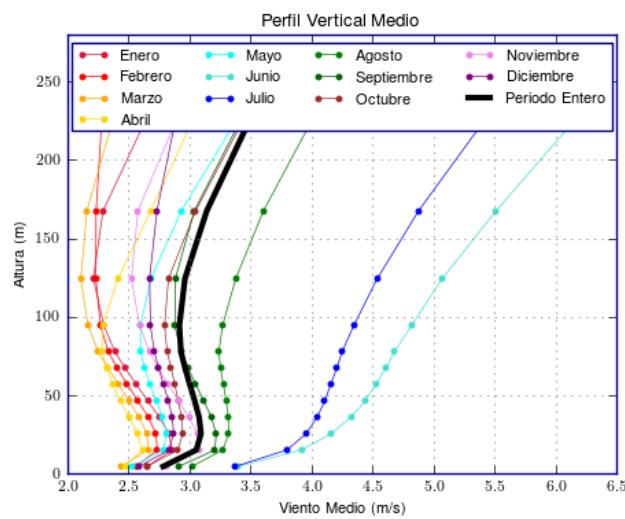


Figura 9.5: Perfil de velocidad para (-33.111, -71.628).