

## ASIMILACIÓN DE DATOS METEOROLÓGICOS EXTERNOS COMO CONDICIONES DE BORDE PARA SIMULAR EL CAMPO DE VIENTO Y TEMPERATURA EN CAPAS BAJAS EN LA REGIÓN DE GUALEGUAYCHÚ, ARGENTINA.

César A. Aguirre<sup>a,c</sup>, Guillermo A. Berri<sup>b</sup>, Armando B. Brizuela<sup>a,c</sup> y Emiliana E. Orcellet<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Laboratorio de Ciencias de la Atmósfera, Centro de Investigaciones Científicas y Transferencia de Tecnología a la Producción (CICYTTP), CONICET-UNER. Materi y España s/n, (E3105BWA) Diamante, Argentina, cesaraguirredalotto@gmail.com, <http://www.cicytpp.org.ar>

<sup>b</sup>Servicio Meteorológico Nacional (SMN). 25 de Mayo 658, (1002) Buenos Aires, Argentina.

<sup>c</sup>Facultad de Ciencias Agropecuarias - Universidad Nacional de Entre Ríos (FCA-UNER), Ruta 11, Km 10 (3101) Oro Verde, Argentina.

**Palabras Clave:** Simulación de las Grandes Esclalas, Asimilación de datos externos, Capa límite atmosférica.

**Resumen.** En este trabajo se presenta una comparación y análisis de los resultados de la simulación del campo de viento y temperatura en capas bajas en cercanías de la ciudad de Gualguaychú, Argentina, para 12 horas del día 01 de enero de 2011. Se utilizó el modelo ARPS (Advanced Regional Prediction System) con dos variantes en las condiciones de borde. En un caso se utilizaron condiciones de tipo 'Radiativas' con relajación al estado inicial de la variables mientras que en otro caso se utilizaron condiciones de borde forzadas asimilando datos del Modelo de Capa Límite de Meso-escala Meteorológico (MCLM) de pronóstico operativo utilizado por el Servicio Meteorológico Nacional. Los resultados de ambas simulaciones se comparan con datos medidos por tres estaciones meteorológicas ubicadas en cercanías del Río Uruguay. Como ambas simulaciones se inicializan usando los mismos datos, se observa un mejor acuerdo entre los valores obtenidos forzando las condiciones de borde respecto de los que resultan al utilizar condiciones de borde 'Radiativas' al cabo de transcurridas 2 horas físicas desde inicio de la simulación.

## 1. INTRODUCCIÓN

Desde hace varias décadas se viene incrementado el uso de sistemas de cómputo de alto rendimiento para la simulación de escenarios futuros en la previsión de eventos meteorológicos gracias al vertiginoso avance que han tenido los microprocesadores y la evolución del software. Muchos productos derivados de las observaciones de sensores montados en satélites meteorológicos y de observación de recursos naturales están disponibles gratuitamente en los bancos de datos de los centros especializados de administración de estos datos vía la internet. Además, estos bancos de datos ponen a disposición los resultados de los modelos numéricos globales de las variables meteorológicas pronosticadas hasta 96 horas con buena confiabilidad. Sin embargo, la resolución espacial de los mismos es demasiado baja para utilizarlos en ciertas aplicaciones que requieren mayor precisión, como por ejemplo, eventos de contaminación atmosférica provocados por emanaciones de gases desde las usinas, parques industriales, centros urbanos, basurales a cielo abierto, entre otros. Una alternativa para resolver este problema es la utilización de códigos computacionales en dinámica de fluidos, conocidos por su sigla en inglés CFD (Computational Fluid Dynamics) que permitan obtener resultados de los campos escalares y vectoriales de las variables meteorológicas con una resolución espacial acorde a la requerida por el usuario. Uno de los códigos que el equipo de trabajo viene utilizando desde hace varios años es el Advanced Regional Prediction System (ARPS) desarrollado originalmente por la Universidad de Oklahoma y el Centro de Análisis y Previsión de Tormentas (CAPS) de Estados Unidos. El mismo está escrito en Fortran '90 y los códigos fuentes están disponibles en internet <http://www.caps.ou.edu>. Este modelo es muy completo ya que simula no sólo el campo de viento sino que posee submodelos de balance de calor y agua en la interfaz suelo-atmósfera, simula la formación de nubes, precipitación y demás fenómenos meteorológicos. Aguirre et al. (2003) adicionaron a este modelo los algoritmos que simulan el transporte y dispersión de especies químicamente reactivas acoplando un modelo estocástico lagrangiano. En trabajos posteriores se realizaron varias validaciones del código con resultados de mediciones experimentales en túnel de viento (Aguirre, 2005; Aguirre & Brizuela, 2008). Para validar el código a escala real, Aguirre et al. (2012) presentaron los resultados del campo de viento y temperatura simulados para un día de verano en cercanías de la ciudad de Guleguaychú utilizando condiciones de borde de tipo 'Radiativas' con relajación de las variables al estado inicial. Se compararon estos resultados con los datos medidos por tres estaciones meteorológicas. Del mismo se desprende que si bien el campo de temperatura es bien simulado por el modelo, el viento debe ser corregido teniendo en cuenta los cambios en la circulación con el transcurrir del día. En este trabajo se introduce la asimilación de datos de viento, temperatura y presión atmosférica desde el modelo de Capa Límite de Meso-escala Meteorológico operativo MCLM (Berri, 1987; Berri et al., 2010). Se presentan los resultados de la simulación del campo de viento y temperatura en capas bajas para un día de verano en la región cercana a la fábrica de celulosa de papel Botnia. Se comparan los resultados de la dirección y velocidad del viento y de temperatura con datos medidos por las tres estaciones meteorológicas mencionadas en dos niveles de altura (10 metros y 40 metros). Se analizan dos simulaciones: La primera es la mencionada en Aguirre et al. (2012) donde sólo se tuvieron en cuenta las condiciones iniciales de la superficie del terreno (temperatura del suelo y del agua, relieve y vegetación) y datos de un sondeo aerológico para inicializar las variables meteorológicas en la atmósfera. En la segunda simulación se tienen en cuenta las condiciones iniciales como en la primera, pero además, se adicionan datos del campo de viento, temperatura y presión atmosférica en los bordes del área de estudio a partir del modelo MCLM para considerar los cambios en la circulación atmosférica con el transcurrir del día.

## 2. MÉTODOS

### 2.1. La simulación de las Grandes Escalas de la Turbulencia (SGE)

El modelo ARPS resuelve las ecuaciones de balance de masa, cantidad de movimiento, energía y utiliza la ecuación de estado del aire húmedo para resolver la ecuación de la presión (Xue et al., 2000). Este modelo ha sido diseñado específicamente para el seguimiento y descripción de tormentas, posee submodelos de flujo de calor y vapor de agua, formación de nubes y precipitación. Para ello, tiene en cuenta la orografía y cobertura del terreno como así también las condiciones iniciales tanto del suelo como del estado de la atmósfera. Este modelo es de tipo semicomprimible ya que tiene en cuenta que la densidad del aire varía sólo con la altura en las ecuaciones de balance de masa, cantidad de movimiento y transporte de escalares pero admite la compresibilidad en la resolución de la ecuación de la presión utilizando un paso de tiempo más reducido que para las ecuaciones anteriores. Es decir, este código trabaja con dos pasos de tiempo, uno grande para las ecuaciones de balance y otro pequeño para la resolución de la ecuación de la presión. Las ecuaciones de balance de masa, de cantidad de movimiento y de energía son resueltas utilizando el esquema de diferencias finitas centradas sobre una celda de tipo 'Arakawa C-grid' y utiliza un sistema de coordenadas curvilíneo que sigue las ondulaciones de terreno. El esquema numérico utilizado para obtener la solución de las ecuaciones diferenciales integradas en el paso de tiempo grande es de 4° orden centrado de tipo explícito mientras que el utilizado para integrar la ecuación de la presión y componente vertical de la velocidad del aire es implícito de tipo 'Crank-Nicholson'. Aguirre (2005) realizó algunas modificaciones al mismo introduciendo la opción de cálculo para el coeficiente de Smagorinsky (Smagorinsky, 1963) siguiendo la técnica de Germano et al. (1991) en el término no lineal de la ecuación de balance de cantidad de movimiento y transporte de magnitudes escalares.

#### 2.1.1. Las variables del modelo ARPS

Se plantea una descomposición *Reynolds* del flujo en la capa límite atmosférica y de las otras magnitudes escalares considerando un estado base y una fluctuación. El estado base depende sólo de la altura, mientras que las fluctuaciones son variables tridimensionales que evolucionan en el tiempo:

$$\left\{ \begin{array}{l} u(x, y, z, t) = \bar{u}(z) + u'(x, y, z, t) \\ v(x, y, z, t) = \bar{v}(z) + v'(x, y, z, t) \\ w(x, y, z, t) = w'(x, y, z, t) \\ \theta(x, y, z, t) = \bar{\theta}(z) + \theta'(x, y, z, t) \\ p(x, y, z, t) = \bar{p}(z) + p'(x, y, z, t) \\ \rho(x, y, z, t) = \bar{\rho}(z) + \rho'(x, y, z, t) \\ q_v(x, y, z, t) = \bar{q}_v(z) + q'_v(x, y, z, t) \\ q_{li}(x, y, z, t) = q'_{li}(x, y, z, t) \\ q_h(x, y, z, t) = q'_h(x, y, z, t) \end{array} \right. \quad (1)$$

En (1)  $u, v, w$  son las tres componentes del campo de velocidad en los tres ejes cartesianos ortogonales respectivamente, donde  $x$  toma la dirección oeste-este,  $y$  toma la dirección sur-norte y  $z$  es la dirección vertical. Además,  $\theta$  es la temperatura potencial,  $p$  es la presión,  $\rho$  es la densidad del aire,  $q_v$  es la relación de mezcla del vapor de agua,  $q_{li}$  del agua en estado líquido y  $q_h$  del estado sólido. Puede observarse también que la componente vertical del estado base de la velocidad es nula  $\bar{w}(z) = 0$ .

### 2.1.2. Las ecuaciones de balance del modelo ARPS

La técnica SGE implica la resolución de las escalas del flujo turbulento mayores a una escala  $\Delta$  que se debe encontrar en el rango inercial de la cascada de energía de Kolmogorov. Esto involucra el uso de una operación de filtrado espacial con un filtro pasa bajo:

$$u_i^\oplus(\vec{x}, t) = \int_V u_i(\vec{x} - \vec{r}, t) G(\vec{r}) d\vec{r}, \quad (2)$$

donde  $\vec{r}$  es el radio vector posición y  $G(\vec{r})$  es la función de convolución que cumple la condición:  $\int_V G(\vec{r}) d\vec{r} = 1$ . Esta operación de filtrado aplicada al campo de velocidades puede ser vista como una descomposición del mismo en grandes escalas  $\vec{u}^\oplus$  (resueltas por SGE) y pequeñas escalas residuales  $\vec{u}^\ominus$  (no resueltas):

$$\vec{u}(\vec{x}, t) = \vec{u}^\oplus(\vec{x}, t) + \vec{u}^\ominus(\vec{x}, t). \quad (3)$$

La operación de filtro aplicada a las ecuaciones de transporte de masa, cantidad de movimiento y energía resulta:

$$\frac{\partial(\bar{\rho}u_i^\oplus)}{\partial x_i} = 0, \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\bar{\rho}u_i^\oplus)}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho}u_i^\oplus u_j^\oplus)}{\partial x_j} = \bar{\rho}g_i B^\oplus - \left( \frac{\partial p'}{\partial x_i} \right)^\oplus + 2\epsilon_{ijk} \Omega_j \bar{\rho} u_k^\oplus - \frac{\partial(\bar{\rho}\tau_{ij})}{\partial x_j} + \frac{\partial(\bar{\rho}T_{ij})}{\partial x_j}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\theta^\oplus)}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho}u_j^\oplus \theta^\oplus)}{\partial x_j} = \mathcal{S}_\theta - \frac{\partial(\bar{\rho}h_{\theta_j})}{\partial x_j}. \quad (6)$$

donde  $\mathcal{S}_\theta$  representa las fuentes o sumideros del escalar  $\theta$ . En las ecuaciones (4), (5) y (6)  $\bar{\rho}$  representa el promedio del valor de la densidad del aire en planos horizontales, es decir, varía sólo con la altitud (de allí el carácter semi-compresible del código). Esto implica que se ha utilizado la aproximación siguiente:

$$\rho'(x, y, z, t) \ll \bar{\rho}(z) \quad (7)$$

Además, en la ecuación (5),  $B$  es el término que representa el empuje hidrostático,  $\Omega$  es la velocidad angular de la tierra en el término de la fuerza de *Coriolis* y  $T_{ij}$  es el tensor de tensiones de viscosidad molecular. En las ecuaciones (5) y (6) ha sido utilizada la identidad de *Leonard* (Leonard, 1974) de la siguiente forma. Para la ecuación de balance de cantidad de movimiento (5):

$$\begin{aligned} (u_i u_j)^\oplus &= (u_i^\oplus u_j^\oplus)^\oplus + (u_i^\oplus u_j^\ominus + u_i^\ominus u_j^\oplus)^\oplus + (u_i^\ominus u_j^\ominus)^\oplus, \\ &= (u_i^\oplus u_j^\oplus) + \mathcal{L}_{ij} + \mathcal{C}_{ij} + \mathcal{R}_{ij}, \\ &= (u_i^\oplus u_j^\oplus) + \tau_{ij}, \end{aligned} \quad (8)$$

mientras que para la ecuación de la energía (6):

$$(u_j \theta)^\oplus = u_j^\oplus \theta^\oplus + h_{\theta_j}. \quad (9)$$

Para la resolución del tensor de tensiones de submalla o viscosidad de submalla  $\tau_{ij}$  y del término  $h_{\theta_j}$ , ARPS dispone de dos alternativas: Una es utilizar un modelo a gradiente a partir de las escalas resueltas, denominado modelo de *Smagorinsky Estándar* (Smagorinsky, 1963). La segunda opción es estimar la energía cinética turbulenta de submalla (1.5 TKE) planteando una ecuación de transporte donde los términos de producción, difusión, gravedad y disipación son obtenidos a partir de modelos a gradiente propuestos por Deardorff (1980).

Aguirre (2005) adicionó una tercer alternativa consistente en la utilización del modelo *Smagorinsky dinámico* siguiendo la metodología de Germano et al. (1991).

Como se dijo anteriormente, la ecuación de la presión es resuelta a partir de la ecuación de estado de los gases para el aire húmedo siguiendo a Klemp & Wilhelmson (1978):

$$\frac{\partial p'^{\oplus}}{\partial t} = - \left( u_i \frac{\partial p'}{\partial x_i} \right)^{\oplus} - g_i \bar{\rho} u_i^{\oplus} - V_s^2 \frac{\partial (\bar{\rho} u_i)^{\oplus}}{\partial x_i} + V_s^2 \bar{\rho} \left( \frac{1}{\theta} \frac{d\theta}{dt} - \frac{1}{A} \frac{dA}{dt} \right)^{\oplus} \quad (10)$$

En la ecuación (10)  $V_s$  representa la velocidad del sonido y  $A$  es la relación entre la constante de los gases perfectos para el aire seco y el aire húmedo (Proctor, 1987). El término de correlación velocidad-gradiente de la fluctuación de la presión es resuelto utilizando un modelo a gradiente (Deardorff, 1980). En la formulación de esta última ecuación no se ha realizado la aproximación (7), de allí el carácter semi-compresible del modelo.

El modelo de pared que permite estimar las tensiones tangenciales  $\tau_{13}|_p$  y  $\tau_{23}|_p$  en las celdas de la malla de cálculo más próximas al suelo es de tipo *ley de pared logarítmica*:

$$\begin{cases} \tau_{13}|_p = -\bar{\rho} C_{dm} \left| \vec{V}_p^{\oplus} \right| u_p^{\oplus} \\ \tau_{23}|_p = -\bar{\rho} C_{dm} \left| \vec{V}_p^{\oplus} \right| v_p^{\oplus} \end{cases} \quad (11)$$

donde el subíndice  $p$  denota el valor calculado de la variable para la celda del dominio de cálculo adyacente al suelo,  $\left| \vec{V}_p^{\oplus} \right|$  es el módulo de la componente horizontal de la velocidad y  $C_{dm}$  es el coeficiente de fricción calculado teniendo en cuenta la ley logarítmica del perfil de viento:

$$C_{dm} = \frac{k_v^2}{\ln^2 \left( \frac{\Delta z_p}{z_0} \right)} \quad (12)$$

$k_v$  representa la constante de *Von-Kármán*,  $\Delta z_p$  es la altura de la celda de cálculo adyacente al suelo y  $z_0$  es el parámetro de la rugosidad del suelo.

## 2.2. Asimilación de las condiciones de borde a partir del modelo de pronóstico regional MCLM

Las condiciones de borde están referidas a los valores que toman las variables simuladas por el modelo fuera del dominio de estudio. Éstas pueden ser de tipo 'Neumann' (o flujo cero) que impone que las mismas no se modifican cuando el flujo atraviesa el borde del área de estudio. También pueden utilizarse en este modelo las condiciones de tipo 'Radiativas' que permiten amortiguar ciertas ondas de presión en los bordes del dominio de la simulación para evitar que

se reflejen y vuelvan hacia el interior del mismo. Estos tipos de condiciones pueden ser válidos para períodos cortos de tiempo (del orden de 1 a 2 horas físicas de simulación) con viento persistente desde una dirección y velocidad moderada. Sin embargo, si se desea simular períodos de tiempo más largos (días) la dirección y velocidad del viento fuera del área de estudio pueden variar por lo que se hace necesario asimilar condiciones de borde externas para tener en cuenta estas variaciones dentro del dominio de la simulación. En este trabajo se muestra la forma en que se realiza la asimilación de la velocidad y dirección del viento a partir del modelo de pronóstico operativo que utiliza el Servicio Meteorológico Nacional denominado Modelo de Capa Límite de Meso-escala (MCLM). Este modelo es a su vez condicionado a una escala regional a partir del modelo ETA-CPTEC (Centro de Previsión del Tiempo y Estudios Climáticos de Brasil). Para este fin, se utilizan las salidas de los valores de velocidad y dirección del viento, presión y temperatura potencial del modelo MCLM que están organizados en una grilla espacial de resolución de 1 *kilómetro* para cada hora durante un día. Estas condiciones son impuestas en los bordes del área de estudio utilizando una función de relajación para evitar discontinuidades espaciales fuertes e inestabilidades en la resolución numérica de las ecuaciones (4), (5), (6), (8), (9), (10) y (11).

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = -K_b (\phi - \phi_e) \quad (13)$$

Estos términos son adicionados a las ecuaciones de balance de masa, cantidad de movimiento y energía que resuelve ARPS. En la ecuación (13),  $\phi$  representa el valor que toma una variable al interior del dominio de cálculo mientras que  $\phi_e$  es el valor externo que es impuesto desde el modelo MCLM. Como esta ecuación se resuelve para todos los pasos de tiempo de la simulación ( $\Delta t = 10$  *segundos*) y  $\phi_e$  sólo está disponible cada 3600 *segundos*, se realiza una interpolación lineal temporal para la obtención de las condiciones de borde externas en todos los pasos de tiempo de la simulación. El coeficiente de relajación  $K_b$  está definido como:

$$K_b = \begin{cases} \frac{K_{b0}}{1 + \left[ \frac{2(i - i_b)}{(n_b - 1)} \right]^2} & , \text{para } |i - i_b| \leq n_b - 1 \\ 0 & , \text{para } |i - i_b| > n_b - 1 \end{cases} \quad (14)$$

donde  $K_{b0}$  es el valor máximo del coeficiente de relajación adoptado en el borde y  $n_b$  es el ancho de la zona de relajación en unidades de celdas de la grilla de simulación ( $i$  indica la posición de la celda en la grilla e  $i_b$  en la zona de relajación). Esta condición provoca que los valores de las variables cercanos a los bordes del dominio de cálculo tiendan a los valores impuestos en los bordes del mismo.

El valor máximo de relajación  $K_{b0}$  se elige en función del paso de tiempo considerado en la simulación de forma tal que  $10\Delta t \leq 1/K_{b0} \leq 20\Delta t$ . En el presente caso de simulación se utilizó  $K_{b0} = 0,005 \text{ s}^{-1}$ .

### 3. CASO DE ESTUDIO

#### 3.1. Descripción de la zona de estudio

La zona de estudio comprende la margen argentina y uruguaya del Río Uruguay en cercanías de las ciudades de Gualaguaychú - Argentina y Fray Bentos - Uruguay. En esta zona se ubican tres estaciones meteorológicas sobre la margen argentina del río. Las mismas están indicadas

como Torre NORTE, Torre ESTE y Torre SUR en la Figura 1. Las estaciones pertenecen al Programa de Vigilancia Ambiental del Río Uruguay que desarrolla el Servicio Meteorológico Nacional mediante un convenio firmado con la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación. Las mismas poseen sensores de viento y temperatura a dos niveles: 2 metros y 40 metros para la temperatura; 10 metros y 40 metros para la velocidad y dirección del viento. En este trabajo se realizó la simulación del campo de viento, temperatura, humedad y presión usando el modelo ARPS. La simulación correspondió al día 01 de enero de 2011 entre las 09:00 horas y las 21:00 horas (12:00 UTC a 24:00 UTC).



Figura 1: Dominio geográfico de la simulación y ubicación de las torres meteorológicas.

### 3.2. Descripción de la simulación

Las simulaciones han sido realizadas utilizando una computadora personal que consta de un procesador doble núcleo Intel Pentium y 4 GByte de RAM. Todas las variables fueron calculadas simulando 12 horas con el modelo ARPS (entre las 9:00 horas y las 21:00 horas). La grilla está compuesta de celdas prismáticas regulares de altura variable. Las mismas tienen una dimensión horizontal de 1 Kilómetro x 1 Kilómetro y su altura va desde 5 metros, para las celdas adyacentes al terreno, hasta 198 metros para las que se encuentran al tope del dominio de cálculo. La ley de variación de la altura de las celdas sigue una función tangente hiperbólica. De esta forma, la grilla se compone de 75 x 75 celdas en dirección horizontal y 33 celdas en la dirección vertical. La altura del dominio útil se ha fijado en 2150 metros por encima del cual se ha dispuesto una capa suplementaria de 990 metros (5 celdas) para eliminar las ondas de presión utilizando un amortiguador de tipo Rayleigh. Cabe destacar que la coordenada vertical de la grilla sigue las ondulaciones del terreno. La Figura 2 presenta un corte vertical en dirección oeste-este a la altura de la fábrica Botnia. Se utilizó un paso de tiempo  $\Delta t_G = 10$  segundos para la resolución de las ecuaciones de balance de masa, cantidad de movimiento y energía mientras

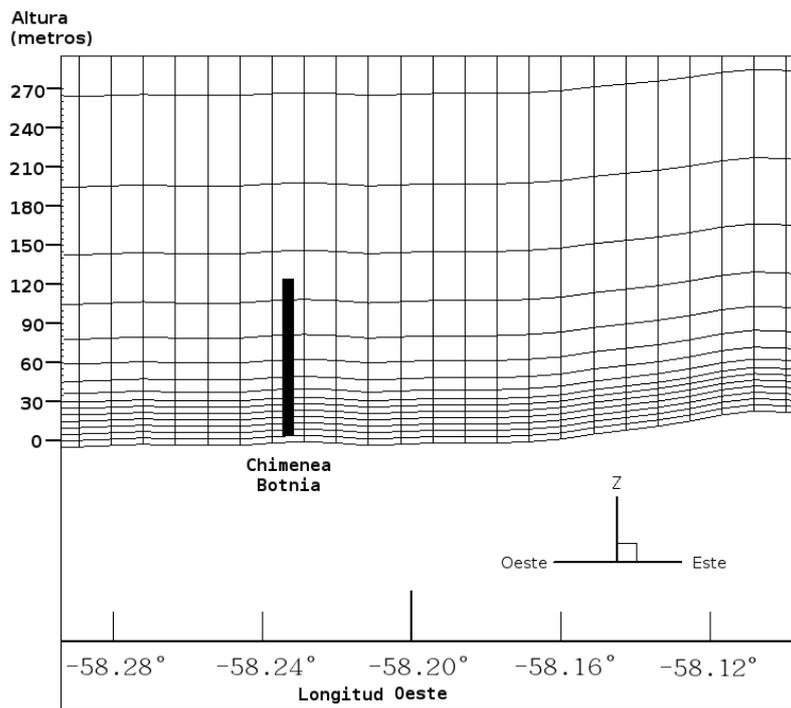


Figura 2: Configuración vertical de la malla de cálculo.

que para la ecuación de resolución de la presión, el paso de tiempo  $\Delta t_p = 1$  segundo. Estos valores se adoptaron según las expresiones siguientes:

a) Para el paso de tiempo grande:

$$\Delta t_G \leq \frac{1}{|V_{h \max}|} \left[ \left( \frac{1}{\Delta x} \right)^2 + \left( \frac{1}{\Delta y} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (15)$$

con  $|V_{h \max}| = 50$  m/s que representa el máximo valor de la velocidad de viento considerada para admitir que la solución diverge en el cómputo y es necesario disminuir el paso de tiempo.  $\Delta x = 1000$  metros y  $\Delta y = 1000$  metros son las dimensiones espaciales horizontales de la celda de la grilla de cálculo.

b) Para el paso de tiempo pequeño:

$$\Delta t_p \leq \frac{1}{c_s} \left[ \left( \frac{1}{\Delta x} \right)^2 + \left( \frac{1}{\Delta y} \right)^2 + \left( \frac{1}{\Delta z_{\min}} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (16)$$

donde  $c_s$  representa la velocidad de las ondas de presión y se calcula según:

$$c_s = \sqrt{\frac{\gamma R \bar{T}}{M}} \quad (17)$$

en esta última ecuación  $\gamma = 1,4$  representa el coeficiente de dilatación adiabática para el aire,  $\bar{T}$  es la temperatura del estado base en  $^{\circ}K$ ,  $R = 8,314$  J/(mol  $^{\circ}K$ ) es la constante universal de los gases y  $M = 0,029$  Kg/mol es la masa molar del aire. En la expresión (17) usando  $\bar{T} = 40^{\circ}C$  resulta un valor de  $c_s = 354,5$  m/s.

En la ecuación (16)  $\Delta_z \text{ min} = 5 \text{ metros}$  es la menor dimensión vertical de las celdas de la grilla de cálculo pero en este caso no se tiene en cuenta debido a que se optó por la resolución implícita en dirección vertical para la velocidad. Con estos pasos de tiempo, las simulaciones llevaron un tiempo de cómputo de 2 horas 25 minutos para 12 horas físicas.

### 3.3. Fuente de datos de las condiciones iniciales del modelo

En ARPS pueden utilizarse datos de las características de la superficie del suelo para ser incluidas como condiciones iniciales. Éstos fueron obtenidos a partir de un procesamiento de imágenes del satélite LANDSAT 5 y del satélite TERRA para el día 01 de enero de 2011. Con estos datos se procedió a realizar una clasificación no supervisada de los elementos existentes en el área de estudio en seis categorías. Posteriormente, cada categoría fue identificada realizando un muestreo a campo. La banda del infrarrojo térmico del mismo sensor permitió obtener datos de la temperatura de la superficie del suelo. El modelo de elevación de terreno (MDE) fue obtenido del banco de datos de U.S. Geological Survey (<http://srtm.usgs.gov>). A partir de la imagen clasificada se obtuvieron datos de la cobertura del terreno como el tipo de vegetación en zonas rurales, zonas urbanas y zonas cubiertas por agua. Estos tipos de vegetación fueron llevados a categorías según la tipología de *Olson World Ecosystem Classes* (Olson et al., 1985) y a partir de la correspondencia que proponen los autores, se obtuvo el mapa del parámetro de rugosidad del suelo. Para la obtención del Índice de Vegetación de la Diferencia Normalizada (NDVI) se utilizaron los datos del sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) montado en el satélite TERRA. Éstos fueron adquiridos del banco de datos de *Land Processes Distributed Active Archive Center* (LP DAAC) de *USGS/Earth Resources Observation and Science* (EROS) Center, Sioux Falls, South Dakota ([http://lpdaac.usgs.gov/get\\_data](http://lpdaac.usgs.gov/get_data)). Todos los datos obtenidos de las imágenes de satélite fueron llevados a una resolución espacial de 1 *Kilómetro*. Para inicializar los perfiles de las variables meteorológicas se utilizaron datos obtenidos de un radiosondeo de Ezeiza correspondiente a las 12:00 UTC (9:00 hora local) del 01 de enero de 2011. Las imágenes que se procesaron para ser utilizadas en las condiciones iniciales de la simulación son las mismas que se muestran en Aguirre et al. (2012).

## 4. RESULTADOS

Se comparan dos casos de simulación versus los datos medidos en las estaciones meteorológicas. En la primera simulación (caso 1) no se impusieron condiciones de borde externas ya que se utilizaron condiciones de tipo 'Radiativas' con relajación de los valores de las variables meteorológicas al estado inicial (valores del sondeo de EZEIZA a las 12:00 UTC). Para la segunda simulación (caso 2) se imponen condiciones externas asimiladas del modelo MCLM. En la Figura 3 se observan las marchas diarias de la dirección del viento a 10 *metros* de altura para las torres ESTE, NORTE y SUR mientras que la Figura 4 representa la misma variable a 40 *metros* de altura. La Figura 5 muestra las marchas de la velocidad del viento a 10 *metros* de altura correspondientes a los sitios donde se encuentran las torres de medición mencionadas, la Figura 6 muestra la misma variable a 40 *metros* de altura. En estas marchas se observan los datos medidos por los anemómetros con símbolos y las curvas representan los resultados de las simulaciones para los casos 1 y 2. En la Figura 7 se muestra la marcha diaria de la temperatura del aire a 2 *metros* de altura en las tres torres mientras que la Figura 8 presenta la marcha de la misma variable a 40 *metros* de altura.

Las Tablas 1 muestran el porcentaje de aciertos de las simulaciones de la dirección del viento con respecto a los datos registrados para 10 *metros* y 40 *metros* de altura. El cuadro de la

izquierda considera 'acierto' cuando el valor simulado cae dentro del cuadrante de valor registrado mientras que en el cuadro de la derecha se considera 'acierto' si el valor simulado cae dentro del octante del valor registrado. Las Figuras 9 y 10 presentan una comparación entre los valores registrados y simulados (Caso 2) de la velocidad del viento a 10 metros y 40 metros respectivamente para todas las torres de medición. Se observa además la línea de tendencia y el coeficiente de determinación. Las Figuras 11 y 12 también muestran una comparación entre los registros y las simulaciones (Caso 2) de la temperatura del aire a 2 metros y 40 metros respectivamente.

## 5. DISCUSIÓN

### 5.1. Dirección del viento

Una de las variables más importantes a simular es la dirección del viento ya que un buen ajuste de la misma permitirá un mejor pronóstico de la trayectoria de la pluma de emisión de contaminantes y consecuentemente una menor incertidumbre en la delimitación de zonas de riesgo potencial. Observando la Figura 4 es de destacar en primer lugar que a partir de aproximadamente dos horas físicas de simulación, las curvas de dirección del viento simuladas comienzan a separarse teniendo un mejor ajuste con los datos observados la que corresponde al caso 2, es decir, utilizando las condiciones de borde forzadas desde los resultados del modelo MCLM. Se observa además que las marchas correspondientes al caso 1 muestran que la dirección del viento se mantiene prácticamente constante en  $45^\circ$  lo que era de esperarse ya que las condiciones de borde impuestas en este caso tienden a las del estado inicial correspondientes al sondeo de EZEIZA (viento del *NE*). Los registros de las estaciones muestran que el viento es del *E* y sufre luego una rotación al *SSE* cerca de las 11 horas en la torre NORTE y de las 14 horas en la torre SUR. Estos cambios son simulados aceptablemente para el caso de forzado de las condiciones de borde con el modelo MCLM (caso 2) entre las 14 horas y las 18 horas. Luego de las 18 horas el viento sigue rotando al sector *S* en las torres NORTE y SUR pero esto no es bien representado por el modelo. En relación al ajuste general para la dirección del viento mostrado en las Tablas 1, es de señalar que tanto para 10 metros como para 40 metros de altura se ha logrado una mejora sustancial en la predicción usando los datos del MCLM (caso 2) respecto de la utilización de las condiciones de borde 'radiativas' (caso 1). El ajuste por octante presenta un porcentaje de acierto más bajo respecto al ajuste por cuadrante debido a que para el octante estamos justo en el error del instrumental (la veleta registra 8 direcciones de la rosa de vientos). El análisis por cuadrante es más apropiado para analizar errores en este tipo de instrumento. Se destaca en ambas tablas que para la Torre ESTE el porcentaje de acierto es mayor respecto de las demás torres. Esto se debe a que el viento en este sitio ha mostrado menor variabilidad de la dirección para todo el tiempo de simulación. En ambas tablas para todas las torres se observa que existe una leve ventaja a 10 metros respecto de 40 metros exceptuando el caso 2 en el análisis por octante para la Torre SUR.

### 5.2. Velocidad del viento

Respecto de la velocidad del viento, puede mencionarse observando las Figuras 5 y 6 que el modelo forzado (caso 2) representa bastante mejor esta variable respecto de la utilización de las condiciones de borde 'radiativas' (caso 1) para todas las torres y en ambas alturas. A 10 metros en la torre ESTE (Figura 5) las velocidades del viento registradas son muy bajas y si bien en ambas simulaciones (casos 1 y 2) se sobreestiman las mismas, las correspondientes al caso 2 presentan un mejor ajuste respecto del caso 1. Los gráficos de comparación que se

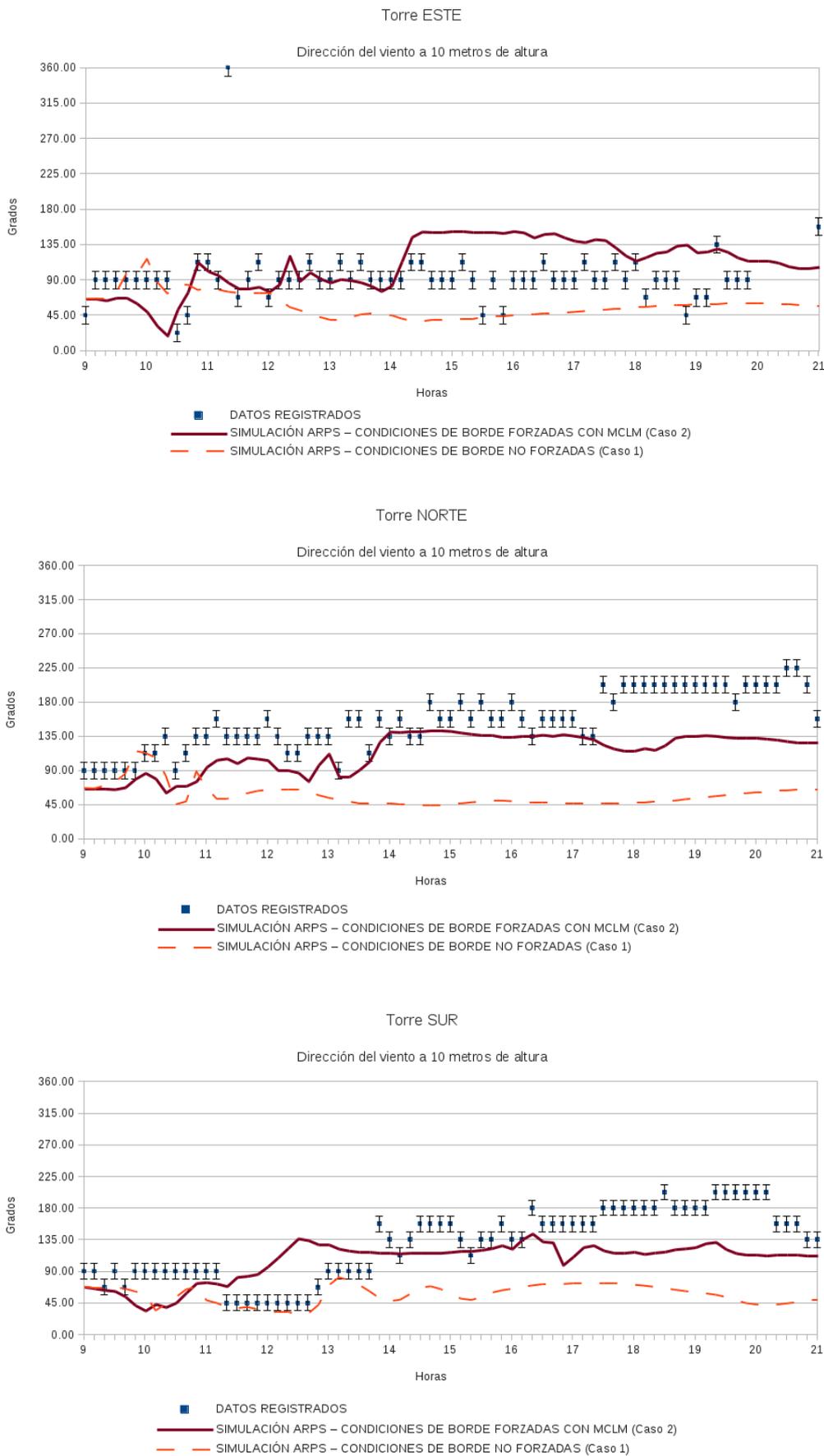


Figura 3: Marcha de la dirección del viento a 10 metros de altura (Torres ESTE, NORTE y SUR).

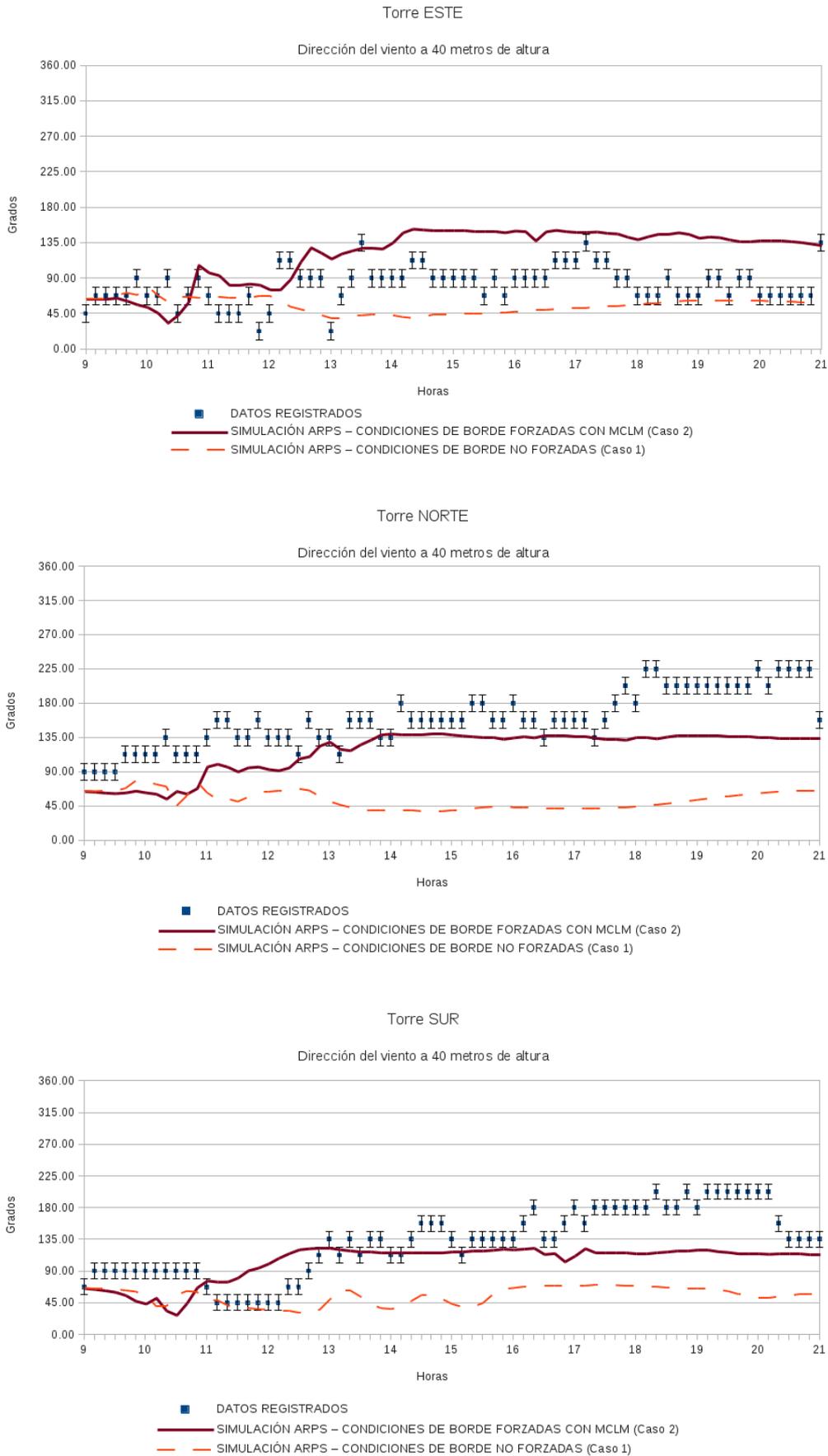


Figura 4: Marcha de la dirección del viento a 40 metros de altura (Torres ESTE, NORTE y SUR)

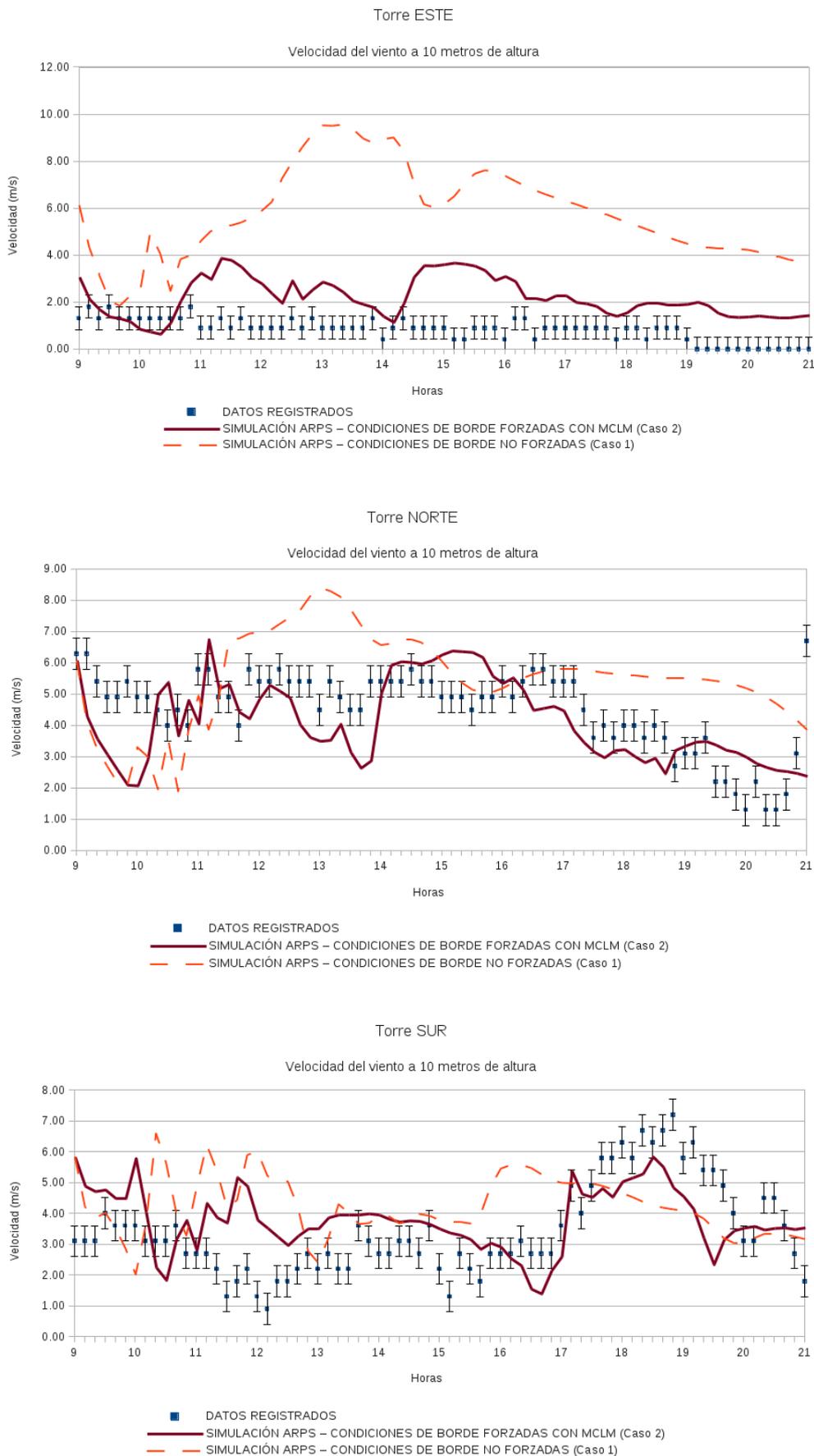


Figura 5: Marcha de la velocidad del viento a 10 metros de altura (Torres ESTE, NORTE y SUR).  
 Copyright © 2013 Asociación Argentina de Mecánica Computacional <http://www.amicadimne.org.ar>

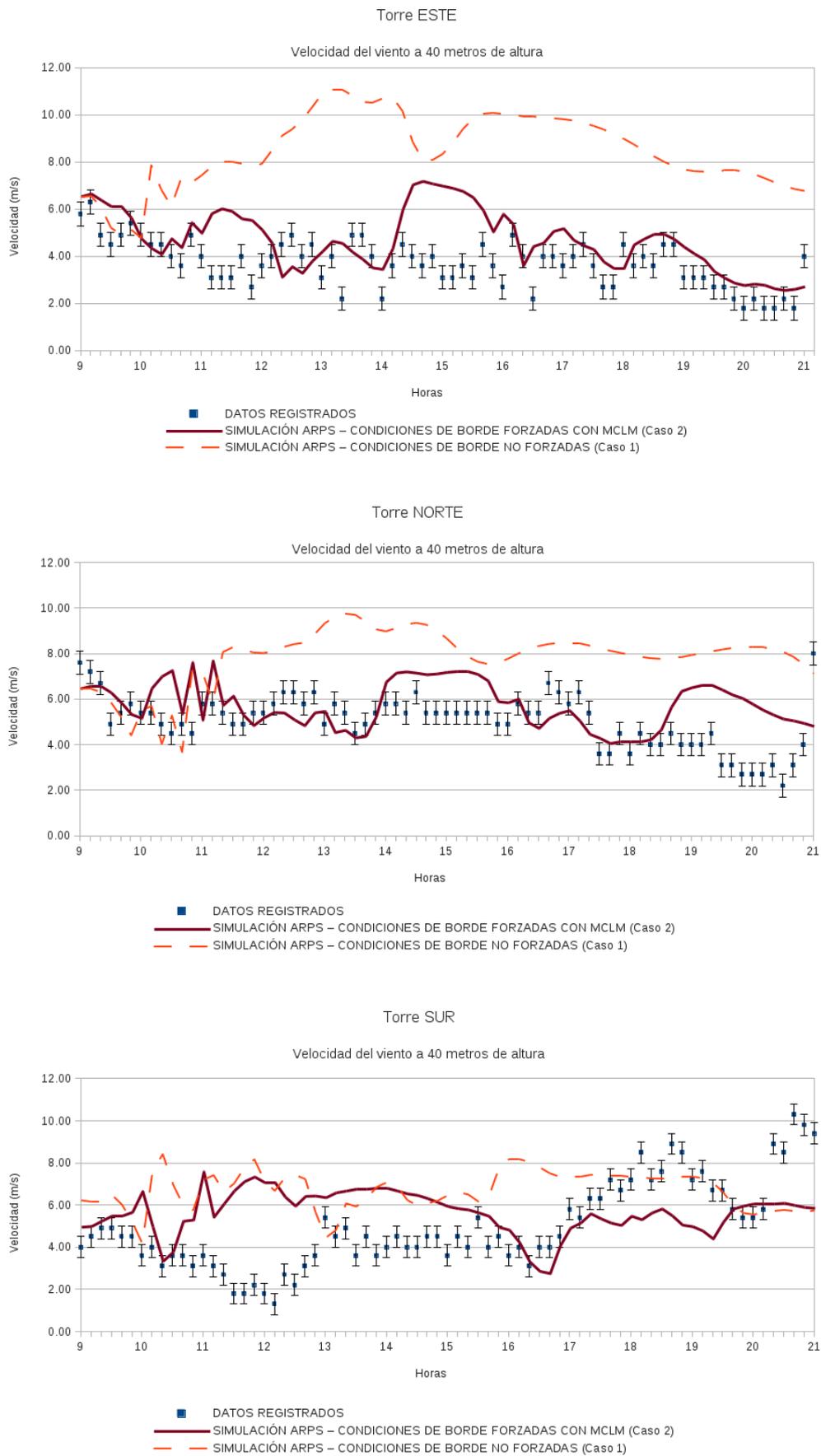


Figura 6: Marcha de la velocidad del viento a 40 metros de altura (Torres ESTE, NORTE y SUR).  
 Copyright © 2013 Asociación Argentina de Mecánica Computacional <http://www.amcaonline.org.ar>

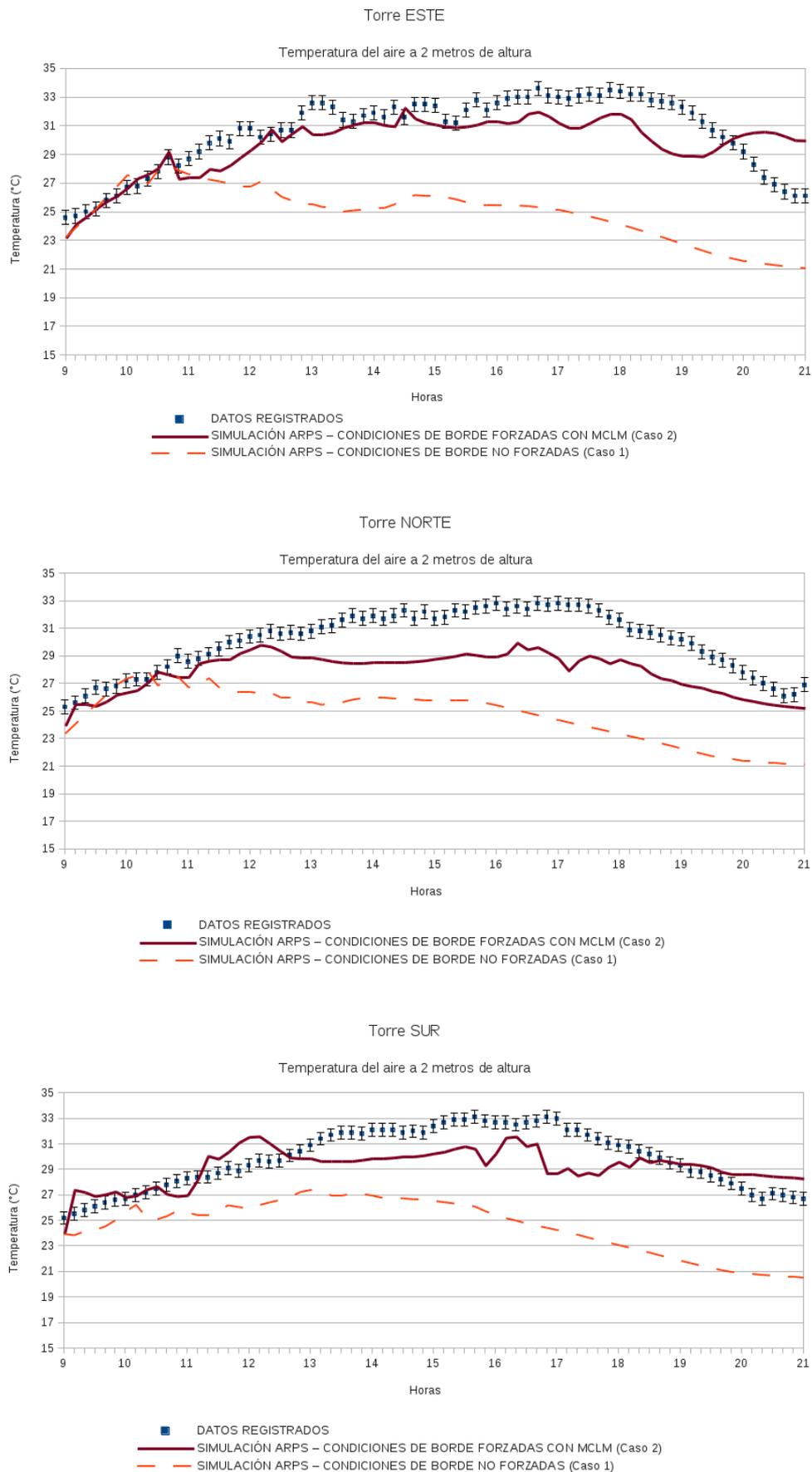


Figura 7: Marcha de la temperatura del aire a 2 metros de altura (Torres ESTE, NORTE y SUR).  
 Copyright © 2013 Asociación Argentina de Mecánica Computacional <http://www.amcaonline.org.ar>

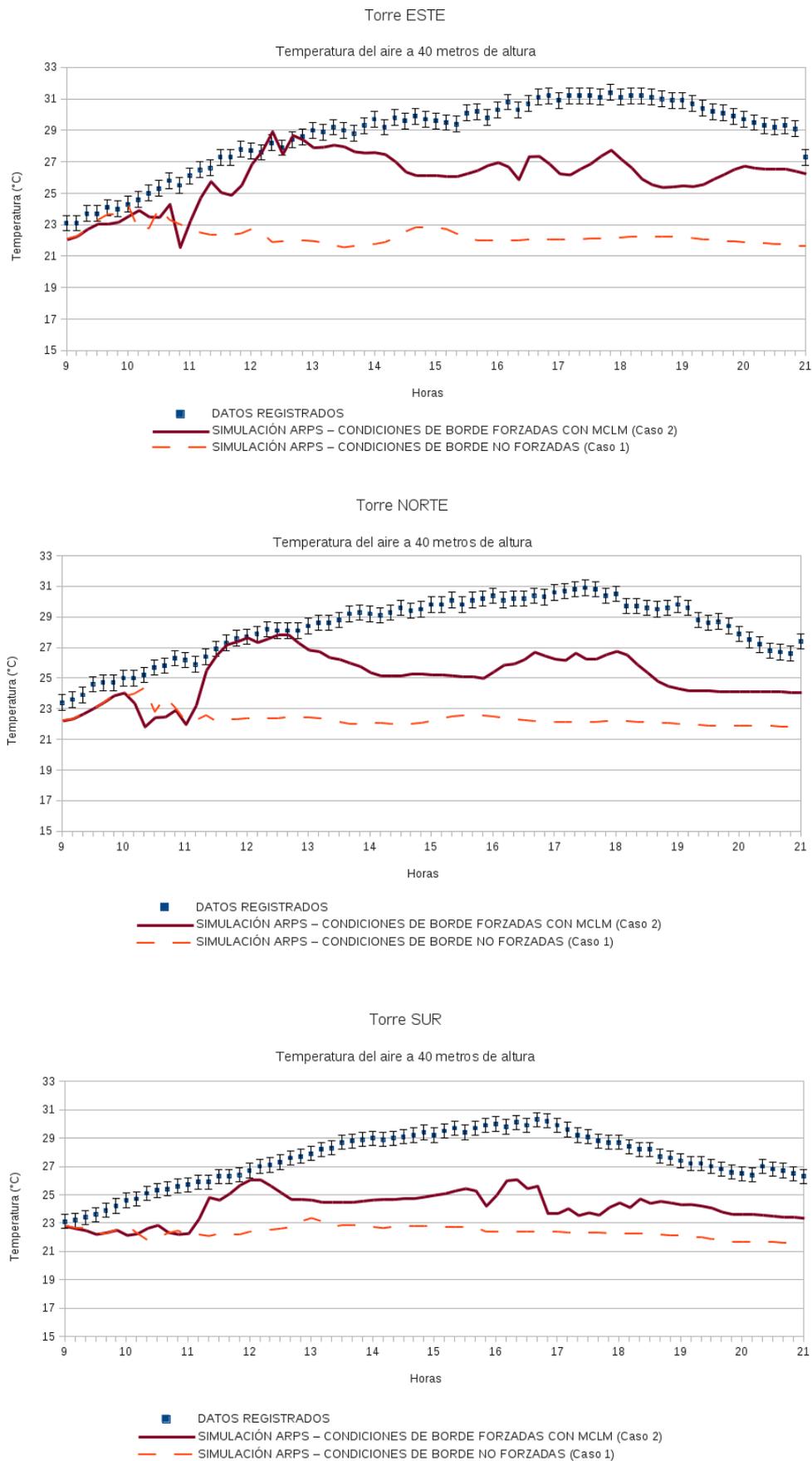


Figura 8: Marcha de la temperatura del aire a 40 metros de altura (Torres ESTE, NORTE y SUR).

Por Cuadrante					Por Octante				
	Caso 1		Caso 2			Caso 1		Caso 2	
	10 metros	40 metros	10 metros	40 metros		10 metros	40 metros	10 metros	40 metros
Todas las Torres	39.7	37.0	63.0	54.8	Todas las Torres	18.3	18.3	29.7	27.9
TE	68.5	70.0	68.5	46.6	TE	21.9	42.5	34.2	20.5
TN	13.7	13.7	60.3	58.9	TN	6.8	0.0	31.5	28.8
TS	37.0	27.4	60.3	58.9	TS	26.0	12.3	23.3	34.2

Tablas 1. Porcentaje de acierto entre los valores simulados de la dirección del viento respecto de los registrados en las torres de medición.

Izquierda: Acierto en el cuadrante. Derecha: Acierto en el octante.

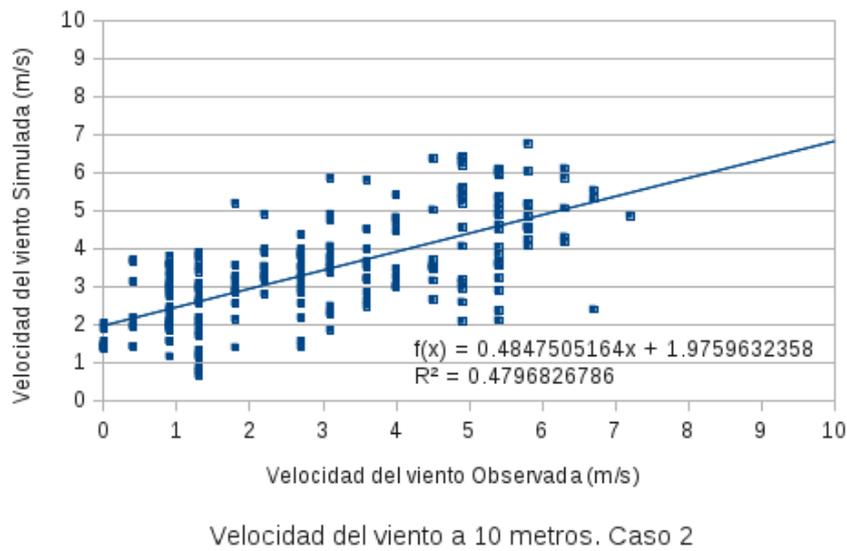


Figura 9: Comparación entre los valores registrados y observados de la velocidad del viento a 10 metros de altura.

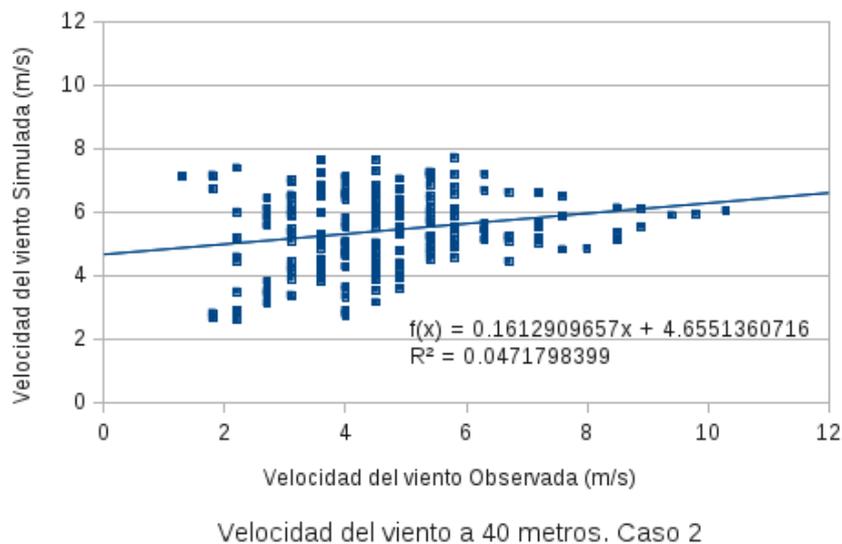


Figura 10: Comparación entre los valores registrados y observados de la velocidad del viento a 40 metros de altura.

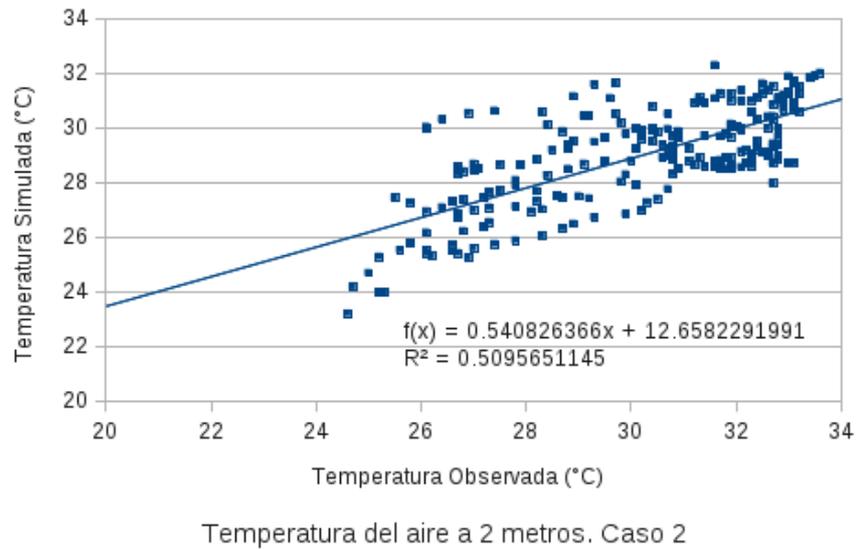


Figura 11: Comparación entre los valores registrados y observados de la temperatura del aire a 2 metros de altura.

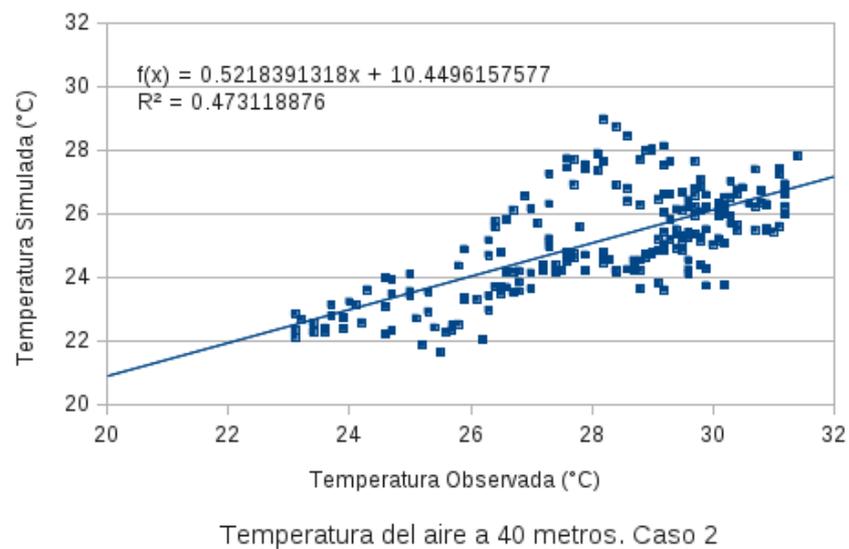


Figura 12: Comparación entre los valores registrados y observados de la temperatura del aire a 40 metros de altura.

muestran en las Figuras 9 y 10 correspondientes al caso 2, indican que se ajustan mejor las simulaciones realizadas a 10 metros respecto de las obtenidas a 40 metros. En particular en la Figura 9 que corresponde a 10 metros, el coeficiente de correlación  $R = 0,693$  mientras que en la Figura 10 (40 metros) el  $R = 0,217$ . Además, la pendiente de la recta de regresión lineal de la Figura 9 está más cerca de la unidad mientras que la ordenada al origen está más cerca del valor nulo. Esto indica que, en promedio para todas las torres, existe una sobreestimación del valor de velocidad del viento para valores bajos y una subestimación para valores altos. Este comportamiento del modelo es esperable debido a que estamos comparando registros de velocidad del viento obtenidos en un sitio puntual con valores que resultan de la simulación de las grandes escalas de la turbulencia que son obtenidos aplicando un filtro 'pasa bajo', es decir, un promedio espacial en una celda de 1 Kilómetro x 1 Kilómetro. Se debería obtener una mejora en las simulaciones para una disminución del tamaño horizontal de las celdas de la malla de cálculo.

### 5.3. Temperatura del aire

En las Figuras 7 y 8 se observa la marcha diaria de la temperatura del aire a 2 metros y 40 metros respectivamente. Se muestra la onda termal más pronunciada a 2 metros. Ambas simulaciones (casos 1 y 2) subestiman los valores registrados en las torres aunque para el caso 2 la subestimación es menor que para el caso 1. Los gráficos de comparación de las temperaturas en todas las torres a 2 metros y a 40 metros de las Figuras 11 y 12 respectivamente muestran en general un mejor ajuste que para las simulaciones de la velocidad del viento. Esto puede deberse a que la temperatura tiene una variabilidad espacial menor que el viento. Los ajustes del caso 2, tanto a 2 metros como a 40 metros, son muy similares, encontrando un coeficiente de correlación  $R = 0,714$  para el caso de la simulación a 2 metros (Figura 11) y de  $R = 0,688$  para el caso de la simulación a 40 metros. Las pendientes y ordenadas al origen de la ecuación de regresión lineal en ambas figuras son también muy parecidas. Éstas indican que, en promedio para todas las torres y en ambas alturas, se están subestimando los valores altos y se están sobreestimando los valores bajos de temperatura ya que las pendientes son menores a la unidad y las ordenadas al origen mayores al valor nulo. La misma reflexión que para la velocidad del viento es válida para explicar este comportamiento.

## 6. CONCLUSIONES

Es necesario considerar los cambios en la circulación del viento como condiciones de borde forzadas cuando se desea simular la dirección y velocidad del mismo para un período de tiempo prolongado del orden de días.

Para la simulación del día 1 de enero de 2011 en la región del Río Uruguay, cerca de la ciudad de Gualaguaychú, se observa un buen ajuste del cuadrante de la dirección del viento y un ajuste regular para la velocidad en el caso de forzar las condiciones de borde con datos del Modelo de Capa Límite de Meso-escala Meteorológico (MCLM) respecto de los datos registrados por estaciones meteorológicas. Para el caso de las simulaciones obtenidas utilizando condiciones de borde de tipo 'radiativas' el ajuste es malo luego de 2 horas físicas de simulación. La temperatura registrada a 2 metros de altura es levemente mejor simulada que a 40 metros de altura para el caso de forzado con el MCLM pero el ajuste de esta simulación supera el que se obtiene usando condiciones de borde de tipo 'Radiativas' para ambas alturas.

**Reconocimientos:** Este trabajo se ha realizado con el apoyo de los proyectos PICT2008-1417 y PICT2010-2492 ambos de la Agencia Nacional de Promoción Científica (ANPCyT). Los datos ASTER L1B fueron obtenidos a partir de la base de datos de la NASA *Land Processes Distributed Active Archive Center* (LP DAAC), USGS/Earth Resources Observation and Science (EROS) Center, Sioux Falls, South Dakota [http://lpdaac.usgs.gov/get\\_data](http://lpdaac.usgs.gov/get_data).

## REFERENCIAS

- Aguirre C. A., S. Simoëns and M. Ayrault. Chemically reactive dispersion into atmospheric boundary layer. *International Workshop on Physical Modeling of Flow and Dispersion Phenomena. Proceeding of PHYSMOD2003*. Prato, Italy, 154–158, 2003.
- Aguirre C. A. Dispersión et Mélange Atmosphérique Euléro-lagrangien de Particules Fluides Réactives. Application à des cas simples et complexe. *Thèse de doctorat. Université Claude Bernard Lyon 1, France*, **115-2005**, 1–323, 2005.
- Aguirre C. A. y A. B. Brizuela. Simulación Numérica de la Dispersión Atmosférica de Gas Pasivo sobre una Colina utilizando un Modelo Acoplado. *Serie Mecánica Computacional, Argentina*, **XXVII (4)**: 217–237, 2008.  
[URL:www.cimec.org.ar/ojs/index.php/mc/issue/view/229](http://www.cimec.org.ar/ojs/index.php/mc/issue/view/229)
- Aguirre C. A., G. J. Berri, A. B. Brizuela y E. E. Orcellet. Simulación de la circulación de viento y temperatura en capas bajas en la región de la ciudad de Gualaguaychú, Argentina. *Serie Mecánica Computacional, Argentina*, **XXXI (2)**: 21–36, 2012.  
[URL:www.cimec.org.ar/ojs/index.php/mc/issue/view/672](http://www.cimec.org.ar/ojs/index.php/mc/issue/view/672)
- Berri G. J. Estudio del comportamiento termo-hidrodinámico de la capa límite atmosférica sobre la región del Río de La Plata con un modelo de simulación numérica. *Tesis doctoral, Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, Argentina*, 189 pp, 1987.
- Berri G. J., L. Sraibam, R. Tanco and G. Bertossa. Low-level wind field climatology over the La Plata River region obtained with a mesoscale atmospheric boundary layer model forced with local weather observations, *J. App. Meteorol. and Climat.*, **49 (6)**: 1293–1305, 2010.
- Deardorff J. W. Stratocumulus-capped mixed layer derived from a three dimensional model. *Boundary-Layer Meteorology*, **18**: 495–527, 1980.
- Germano M., U. Piomelli, P. Moin and W. H. Cabot. A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model. *J. of Physics Fluids*, **A 3**: 1760–1765, 1991.
- Klemp J. B. and R. B. Wilhelmson. The Simulation of three-dimensional convective storm dynamics. *J. Atmos. Sci.*, **35**: 1070–1096, 1978.
- Leonard A. Energy Cascade in Large Eddy Simulation of Turbulent Fluid Flow. *Adv. Geophysics*, **18 A**: 237–248, 1974.
- Olson, J. S., J. A. Watts, and L. J. Allison. Major world ecosystem complexes ranked by carbon in live vegetation: a database. *Carbondioxide Information Center, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, NDP-017*: Tennessee, 1985.
- Proctor F. H. The Terminal Area Simulation System. *Volume I: Theoretical Formulation*. NASA Contractor Report. **CR-4046**: 176 pp, 1987.
- Smagorinsky J. General Circulation Experiments with the Primitive Equations. I. The Basic Experiments", *Mon. Weather Rev.*, **91**: 99–164, 1963.
- Xue M., K. Droegemeier and V. Wong. The Advanced Regional Prediction System (ARPS). A Multi-Scale Nonhydrostatic Atmospheric Simulation and Prediction Model. Part I: Model Dynamics and Verificatio. *Meteorology Atmospheric Physics*, **75**: 161–193, 2000.