

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

**Evaluación del modelo WRF (Weather Research and
Forecasting) entre la superficie y 30 km sobre Quito: casos
de estudio entre abril y septiembre de 2015**

Proyecto de investigación

Julieta Fernanda Juncosa Calahorrano

Ingeniería Ambiental

Trabajo de titulación presentado como requisito
para la obtención del título de
Ingeniera Ambiental

Quito, 16 de mayo de 2016

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ
COLEGIO DE CIENCIAS E INGENIERÍAS

**HOJA DE CALIFICACIÓN
DE TRABAJO DE TITULACIÓN**

Evaluación del modelo WRF (Weather Research and Forecasting) entre la superficie y 30 km sobre Quito: casos de estudio entre abril y septiembre de 2015

Julieta Fernanda Juncosa Calahorrano

Calificación:

Nombres del profesores, Título académico

María del Carmen Cazorla, P.h.D.
René Parra, P.h.D.

Firma de los profesores

Quito, 16 de mayo de 2016

Derechos de Autor

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma del estudiante: _____

Nombres y apellidos: Julieta Fernanda Juncosa Calahorrano

Código: 00103926

Cédula de Identidad: 1719566620

Lugar y fecha: Quito, 16 de mayo de 2016

RESUMEN

La evaluación de resultados de modelos meteorológicos que simulan variables físicas en una región – realizada mediante comparación con datos experimentales – sirve para entender el comportamiento atmosférico revelado en la configuración paramétrica que mejor se ajusta a la realidad. En el Ecuador, la evaluación de resultados de modelos meteorológicos, como función de la altitud o de la presión, es un campo todavía inexplorado y, por ello, constituye una prioridad de investigación. Con el objetivo de explorar este campo, se simularon variables meteorológicas durante cuatro periodos que coinciden con una campaña de radiosondeos realizados desde la Estación de Mediciones Atmosféricas de la Universidad San Francisco de Quito (EMA-USFQ). Los casos de estudio seleccionados son: el 29-abril (07h00, hora local), 30-junio (13h00), 27-agosto (09h00) y 30-septiembre (07h00) de 2015.

Se utilizaron los resultados del modelo WRF (V3.2) (obtenidos por R. Parra), generados con un dominio maestro y dos subdominios anidados. El segundo subdominio abarca al territorio continental del Ecuador, y se conforma de una malla de 199 filas y 199 columnas (celdas de 4 km), y 44 capas en altura, hasta una presión de 10 hPa. Las simulaciones se efectuaron bajo 2 configuraciones, llamadas FNL1 y FNL2, que combinan opciones físicas para la Capa Superficial (CS), Capa Límite Planetaria (CLP) y esquema Cúmulo Convectivo (CCU). De la matriz tridimensional de resultados del modelo WRF se extrajeron los datos de la simulación, como función del nivel eta, y con ellos se determinó la temperatura del aire, la fracción másica del vapor de agua y la velocidad y dirección del viento en cada nivel de presión. Estas variables se compararon con datos experimentales de los sondeos realizados en 2015 desde la EMA (M. Cazorla). La comparación se realizó graficando en forma superpuesta los perfiles verticales, tanto del modelo como de los sondeos. También se realizó un gráfico 1:1 de los resultados del modelo contra los datos del sondeo y se halló la correlación lineal, el Root Mean Square Error (RMSE), Mean Bias Error (MBE) e Índice de Aceptación (IA) del modelo.

Los perfiles verticales evidencian que la temperatura se validó correctamente a lo largo de toda la trayectoria, sobreestimando el CPT en 3 °C en promedio. Para la configuración FNL1 (FNL2) el coeficiente de correlación es 0.99 (0.99), el RMSE es 1.90 °C (1.97 °C), el MBE es 0.08 °C (-0.12 °C) y el IA es 0.99 (0.99). Para la fracción másica del vapor de agua, se observa que el modelo no captura bien los valores cercanos a la superficie, y mejora en altura. El coeficiente de correlación es 0.91 (0.86), el RMSE es 0.82 g kg⁻¹ (1.18 g kg⁻¹), el MBE es 0.09 g kg⁻¹ aire (0.25 g kg⁻¹) y el IA es 0.97 (0.95). En cuanto a la velocidad y dirección del viento, el modelo captura el patrón de estas variables a lo largo de la trayectoria. Para la velocidad del viento, el coeficiente de correlación es 0.47 (0.49), el RMSE es 4.6 m/s (4.6 m/s), el MBE es -0.7 m/s (-0.8 m/s) y es IA es 0.82 (0.83). Para la dirección del viento, el coeficiente de correlación para es 0.57 (0.53), el RMSE es 69 ° (70°), el MBE es 39° (40°) y el IA es 0.87 (0.86).

Palabras clave: *evaluación WRF, radiosondeos, Ecuador, EMA-USFQ, subdominio anidado*

ABSTRACT

The evaluation of meteorological models that simulate physical variables in a region—which it accomplishes through the comparison with experimental data—is useful to understand the atmospheric behavior revealed in the parametric configuration which better fits the reality.

In Ecuador, meteorological model evaluation, as a function of altitude or pressure, is a field that is yet to be explored and, for that reason, we have simulated meteorological variables during four stages, which coincide with a radiosounding campaign performed from the Atmospheric Measurement Station at Universidad San Francisco de Quito (EMA-USFQ, by its Spanish acronym). This study incorporates data from four dates, which are: April 29th, 2015 (07h00, local time), June 30th, 2015 (13h00), August 27th, 2015 (09h00) and, September 30th, 2015 (07h00).

The results from WRF (V3.2) model (performed by R. Parra) were used for this evaluation. These results were generated with a master domain and two nested subdomains. The second subdomain comprehends Ecuador's continental territory, and it is made up of a 199x199 grid (with 4x4 km cells). The top of the model is 10 hPa with 44 altitude layers. The simulations were performed under 2 configurations called FNL1 and FNL2, which combined physical options for Surface Layer, Planetary Boundary Layer and Cumulus Parameterization. The data for the simulation were extracted from the WRF model's tridimensional results matrix, as a function of the eta level. These data was used to calculate air's temperature, water vapor mixing ratio, wind speed and wind direction for each level of pressure. These variables are compared to experimental data collected in 2015 at EMA-USFQ (M. Cazorla). The vertical profiles from the model as well as from the experimental data were plotted together to make the comparison. A scatter plot and several fit statistics were done and calculated, such as lineal correlation R^2 , root mean square error (RMSE), mean bias error (MBE) and index of agreement (IA) in order to determine the goodness of fit.

The vertical profiles showed that temperature was correctly validated along the trajectory, overestimating the value of the cold point tropopause (CPT) in 3 °C. For the FNL1 (FNL2) configuration, the correlation coefficient was 0.99 (0.99), RMSE was 1.90 °C (1.97 °C), MBE was 0.08 °C (-0.12 °C) and IA was 0.99 (0.99). For the water vapor mixing ratio, the model does not simulate the values near to the surface very well; however, it improves with altitude. The correlation coefficient was 0.91 (0.86), RMSE was 0.82 g kg⁻¹ (1.17 g kg⁻¹), MBE was 0.09 g kg⁻¹ (0.25 g kg⁻¹), and IA was 0.97 (0.95). With regard to wind speed and wind direction, the model simulates the variables' patterns along the trajectory. For wind speed, the correlation coefficient was 0.47 (0.49), RMSE was 4.6 m/s (4.6 m/s), MBE was -0.7 m/s (-0.8 m/s), and IA was 0.82 (0.83). For wind direction, the correlation coefficient was 0.57 (0.52), RMSE was 69° (70 °), MBE was 39 ° (40 °), and IA was 0.84 (0.85).

Key words: *WRF evaluation, WRF valuation, radio sounding, Ecuador, EMA-USFQ, nested subdomain*

TABLA DE CONTENIDO

Introducción.....	10
Radiosondeos.....	10
Perfiles verticales.....	13
<i>Presión</i>	13
<i>Temperatura</i>	14
<i>Temperatura potencial</i>	16
<i>Fracción másica del vapor del agua</i>	16
Modelo Weather Research and Forecasting (WRF).....	17
Métodos.....	21
Parte experimental.....	21
Simulaciones utilizando WRF.....	22
Variables comparadas.....	24
Evaluación del modelo WRF en superficie con observaciones terrenas.....	25
<i>Fracción másica del vapor de agua</i>	25
<i>Velocidad y dirección del viento</i>	26
Evaluación del modelo WRF con radiosondeos.....	27
Variables obtenidas del WRF.....	28
Tratamiento de datos del modelo WRF.....	29
<i>Temperatura 3D</i>	29
<i>Fracción másica del vapor del agua</i>	29
<i>Velocidad y dirección del viento</i>	29
Análisis estadístico.....	29
Resultados y Discusión.....	31
Temperatura.....	31
Series de tiempo de la temperatura en superficie.....	31
Perfil vertical de la temperatura.....	39
Humedad en el aire.....	47
Serie de tiempo de la humedad relativa en superficie.....	47
Perfil vertical de la fracción másica del vapor de agua (Q).....	54
Velocidad del viento.....	61
Series de tiempo de la velocidad en superficie.....	61
Perfil vertical de la velocidad del viento.....	68
Dirección del viento.....	76
Series de tiempo dirección en superficie.....	76
Perfil vertical de la dirección del viento.....	80
Presión en superficie.....	88
Conclusiones.....	92
Referencias Bibliográficas.....	95

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Configuración de referencia para el modelo WRF versión 3.2. Opciones físicas y dinámicas.....	20
Tabla 2. Casos de estudio seleccionados en base al CPT.....	21
Tabla 3. Días simulados con el modelo WRF.....	23
Tabla 4. Esquemas físicos utilizados para las simulaciones realizadas con el modelo WRF V3.2.....	24
Tabla 5. Variables atmosféricas evaluadas en superficie y en la vertical.....	25

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Descripción de la columna de aire en la atmósfera.....	13
Figura 2.	Perfil vertical de temperatura en latitudes medias.....	14
Figura 3.	Dominio de las simulaciones.....	22
Figura 4.	Plano cartesiano con componentes, magnitud y dirección del viento.....	26
Figura 5.	Escalonamiento grueso de la grilla del modelo WRF.....	28
Figura 6.	Perfil diurno de la temperatura de los días 27- y 28-abril-2015.....	31
Figura 7.	Perfil diurno de la temperatura de los días 28 - y 29-junio-2015.....	33
Figura 8.	Perfil diurno de la temperatura de los días 25- y 26-agosto-2015.....	34
Figura 9.	Perfil diurno de la temperatura de los días 28- y 29-septiembre-2015.....	36
Figura 10.	Error cuadrático medio (RMSE) y sesgo medio (MBE) de la temperatura en superficie...	37
Figura 11.	Gráfico de dispersión de puntos de los perfiles diurnos de temperatura.....	38
Figura 12.	Perfil vertical de la temperatura del día 29-abril-2015.....	40
Figura 13.	Perfil vertical de la temperatura del día 30-junio-2015.....	41
Figura 14.	Perfil vertical de la temperatura del día 27-agosto-2015.....	42
Figura 15.	Perfil vertical de la temperatura del día 30-septiembre-2015.....	43
Figura 16.	Dispersión de los datos de temperatura en la vertical.....	44
Figura 17.	Gráfico de dispersión de puntos de los perfiles verticales de temperatura.....	45
Figura 18.	MBE de la temperatura de la configuración FNL1 y FNL2 del modelo WRF.....	46
Figura 19.	Perfil diurno de la humedad relativa de los días 27 -y 28-abril-2015.....	47
Figura 20.	Perfil diurno de la humedad relativa de los días 28 - y 29-junio-2015.....	49
Figura 21.	Perfil diurno de la humedad relativa de los días 25 - y 26-agosto-2015.....	50
Figura 22.	Perfil diurno de la humedad relativa de los días 28 - y 29-septiembre-2015.....	51
Figura 23.	Error cuadrático medio (RMSE) y sesgo medio (MBE) de la humedad relativa en superficie.....	52
Figura 24.	Gráfico de dispersión de puntos de los perfiles diurnos de humedad relativa.....	53
Figura 25.	Perfil vertical de la fracción másica de vapor de agua del día 29-abril-2015.....	54
Figura 26.	Perfil vertical de la fracción másica de vapor de agua del día 30-junio-2015.....	55
Figura 27.	Perfil vertical de la fracción másica de vapor de agua del día 27-agosto-2015.....	56
Figura 28.	Perfil vertical de la fracción másica de vapor de agua del día 30-septiembre-2015.....	57
Figura 29.	Dispersión de los datos de la fracción másica de vapor de agua en la vertical.....	58
Figura 30.	Gráfico de dispersión de puntos de los perfiles verticales de fracción másica del vapor de agua.....	59
Figura 31.	MBE de la fracción másica de vapor de agua de la configuración FNL1 y FNL2 del modelo WRF.....	60
Figura 32.	Perfil diurno de la velocidad del viento de los días 27 - y 28-abril-2015.....	61
Figura 33.	Perfil diurno de la velocidad del viento de los días 28 - y 29-junio-2015.....	63
Figura 34.	Perfil diurno de la velocidad del viento de los días 25 - y 26-agosto-2015.....	64
Figura 35.	Perfil diurno de la velocidad del viento de los días 28 - y 29-septiembre-2015.....	65
Figura 36.	Error cuadrático medio (RMSE) y sesgo medio (MBE) de la velocidad del viento en superficie.....	66
Figura 37.	Gráfico de dispersión de puntos de los perfiles diurnos de velocidad del viento.....	67
Figura 38.	Perfil vertical de la velocidad del viento del 29-abril-2015.....	69
Figura 39.	Perfil vertical de la velocidad del viento del día 30-junio-2015.....	70

Figura 40.	Perfil vertical de la velocidad del viento del día 27-agosto-2015.....	71
Figura 41.	Perfil vertical de la velocidad del viento del día 30-septiembre-2015.....	72
Figura 42.	Dispersión de los datos de la velocidad del viento en la vertical.....	73
Figura 43.	Gráfico de dispersión de puntos de los perfiles verticales de la velocidad del viento.....	74
Figura 44.	MBE de la velocidad del viento de la configuración FNL1 y FNL2 del modelo WRF.....	75
Figura 45.	Perfil diurno de la dirección del viento de los días 27 - y 28-abril-2015.....	76
Figura 46.	Perfil diurno de la dirección del viento de los días 28 - y 29-junio-2015.....	77
Figura 47.	Perfil diurno de la dirección del viento de los días 25 - y 26-agosto-2015.....	78
Figura 48.	Perfil diurno de la dirección el viento de los días 28- y 29-septiembre-2015.....	79
Figura 49.	Error cuadrático medio (RMSE) de la dirección del viento en superficie.....	80
Figura 50.	Perfil vertical de la dirección del viento del día 29-abril-2015.....	81
Figura 51.	Perfil vertical de la dirección del viento del día 30-junio-2015.....	82
Figura 52.	Perfil vertical de la dirección del viento del día 27-agosto-2015.....	83
Figura 53.	Perfil vertical de la dirección del viento del día 30-septiembre-2015.....	84
Figura 54.	Dispersión de los datos de la dirección del viento en la vertical.....	85
Figura 55.	Gráfico de dispersión de puntos de los perfiles verticales de la dirección del viento.....	86
Figura 56.	MBE de la dirección del viento de la configuración FNL1 y FNL2 del modelo WRF.....	87
Figura 57.	Perfil diurno de la presión atmosférica de los días 27- y 28-abril-2015.....	88
Figura 58.	Perfil diurno de la presión atmosférica de los días 28- y 29-junio-2015.....	89
Figura 59.	Perfil diurno de la presión atmosférica de los días 25- y 26-agosto-2015.....	89
Figura 60.	Perfil diurno de la presión atmosférica de los días 28- y 29-septiembre-2015.....	90
Figura 61.	Error cuadrático medio (RMSE) y sesgo medio (MBE) de la presión en superficie.....	91

INTRODUCCIÓN

Los modelos meteorológicos ofrecen oportunidades para comprender los fenómenos atmosféricos y hacer predicciones sobre los mismos. Frente a limitaciones presupuestarias, no siempre es posible recolectar información de forma experimental. En este contexto, la simulación numérica de la meteorología es una herramienta valiosa para generar información de las variables atmosférica. Los estudios de evaluación de modelos comparados con datos experimentales (ej.: observaciones terrenas, radiosondeos u observaciones satelitales) sirven para determinar la configuración de los parámetros físicos y dinámicos que mejor se ajustan a características locales. La evaluación de resultados de modelos en el perfil vertical es una técnica que utiliza datos experimentales de satélites o sondeos atmosféricos. A pesar de su utilidad, la evaluación de datos en vertical es escasa en zonas tropicales, e inexistente en el Ecuador.

Radiosondeos

Un sondeo atmosférico consiste en la recopilación en tiempo real de variables meteorológicas medidas con sensores a bordo de globos que alcanzan una gran altitud. Dichos sensores miden perfiles verticales de temperatura, humedad relativa, presión, velocidad y dirección del viento, y posición mediante un GPS que proporciona datos de ubicación geográfica. Esta información es enviada en tiempo real mediante señales de radio, en un rango de frecuencias desde 400 MHz a 405 MHz, que son captadas en estaciones terrenas. Estos datos, en conjunto con el resto de información de otras sondas que se lanzan en distintos puntos, sirven para configurar y realizar un mapa en tiempo real de condiciones atmosféricas. En la Estación de Mediciones Atmosféricas de la Universidad San Francisco de

Quito (EMA-USFQ) se utilizan las radiosondas iMet, que constan de sensores de temperatura, humedad relativa y presión, Los mismos se describen a continuación (International Met Systems, 2015):

- El sensor de temperatura es un *termistor* con una resistencia variable en función de la temperatura. Este tiene un rango de medición entre los -90°C a 50°C y precisión y resolución de 0.3°C y 0.01°C , respectivamente.
- El sensor de humedad es un dispositivo elaborado con un polímero capacitor que convierte los valores de humedad en capacitancia medida electrónicamente. Además, tiene baja dependencia con la temperatura y es altamente resistente a contaminantes. Este sensor puede registrar un rango entre 0 y 100% con una precisión y resolución de 5% y 1%, respectivamente.
- En cuanto al sensor de presión, es un instrumento de tipo piezo-resistivo en donde la resistividad eléctrica de un semiconductor varía cuando hay un esfuerzo mecánico. Este instrumento mide un rango de 5 a 1110 hPa con una precisión de 0.7 hPa y una resolución de 0.1 hPa.
- Para obtener la dirección y velocidad del viento se usa la información provista por el GPS a bordo del globo meteorológico, es decir, las variables se miden por posición del GPS con una resolución 1° y 0.1 m/s y una precisión de 5° y 0.2 m/s.

Un radiosondeo es un corte vertical atmosférico de gran resolución para el que se utilizan los instrumentos y sensores antes mencionados. A través de señales de radio entre 400 MHz y 405 MHz, los datos son transmitidos desde el globo meteorológico hacia una antena receptora que capta dicha señal y, por medio del software SkySonde, son traducidos en valores meteorológicos (Petracca, 2003). La transmisión de datos se registra hasta que la

pérdida de comunicación es completa; es decir, la radiosonda toma datos tanto en el ascenso como en descenso.

Un globo meteorológico puede alcanzar altitudes de hasta 35 km, con una desviación horizontal de 300 km o más desde su punto de partida. Durante el vuelo, la radiosonda a bordo del globo meteorológico, puede estar expuesta a temperaturas menores a $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Al momento inicial del lanzamiento, el globo puede alcanzar un diámetro de 1.5 m aproximadamente; sin embargo, cuando el globo alcanza una altitud mayor a los 35 km, el diámetro puede incrementar entre 6 y 8 m, causando la explosión del globo.

La importancia de los radiosondeos radica en su contribución al entendimiento de la atmósfera superior y a la retroalimentación de modelos globales y evaluación de datos satelitales.

Para entender los fenómenos de la atmósfera superior es necesario entender los perfiles verticales de las variables meteorológicas. Se conoce que los parámetros termodinámicos y físicos en la altura se encuentran distribuidos de acuerdo a una estructura vertical bajo distintas condiciones.

Perfiles verticales.

Presión.

La presión del aire en la atmósfera es la fuerza que ejerce la columna de aire por unidad de área. Es por esto que la presión decrece con la altitud, porque la cantidad de aire en la columna es menor, como se puede observar en la Figura 1.

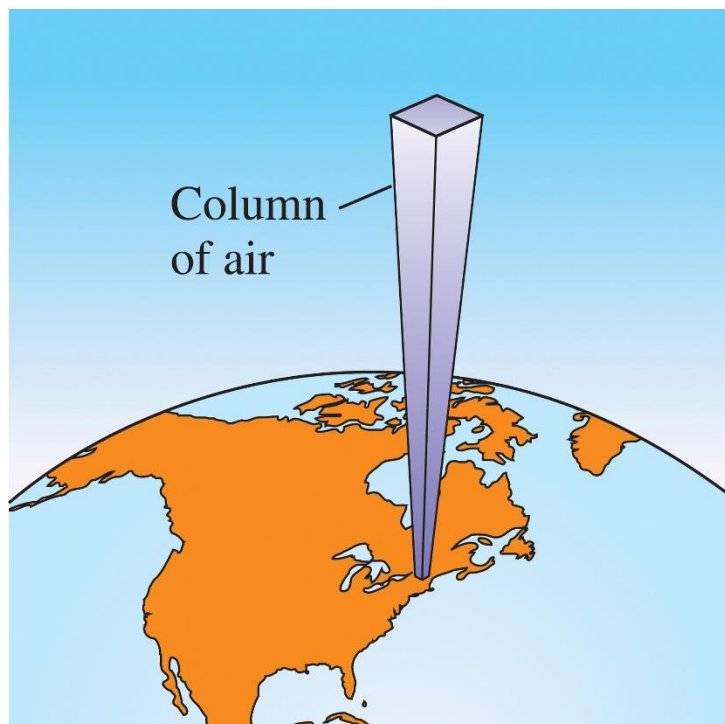


Figura 1. Descripción de la columna de aire en la atmósfera (Chang, 2012).

La presión y densidad del aire en la atmósfera disminuyen exponencialmente con la altitud.

$$P = P_0 e^{-z/H} \quad (1)$$

De acuerdo a la ecuación hidrostática (ecuación 1), se puede observar que tanto la densidad como la presión del aire en la atmósfera descienden exponencialmente con la altitud. En esta ecuación, H es la altitud de escala (8.035 km), P_0 es la presión en un nivel de referencia y P es la presión en un punto determinado a una altura de la atmósfera. La altitud de escala es aquella en la que la presión es reducida en un factor de $1/e$; es decir $H = \frac{RT}{g}$ donde R es la constante universal ideal de los gases, T es la temperatura y g es la constante de gravedad. Las variaciones verticales de la presión y densidad son mucho más grandes que las variaciones horizontales y temporales, por lo que es útil definir a la atmósfera estándar

como el promedio horizontal y temporal de la estructura atmosférica (Wagner, 1997; Wallace y Hobbs, 2006).

Temperatura.

A partir del perfil vertical de la temperatura se pueden identificar las principales capas atmosféricas. Se considera que la atmósfera puede medir hasta 100 km sobre la superficie terrestre tomando en cuenta a la última molécula de aire sujeta al campo gravitacional de la Tierra. A pesar de esto se conoce que el 99.9% de la masa de la atmósfera se encuentra concentrada en los primeros 50 km (Wallace y Hobbs, 2006). En la Figura 2, se pueden observar las 4 capas presentes en los primeros 100 km de la atmósfera.

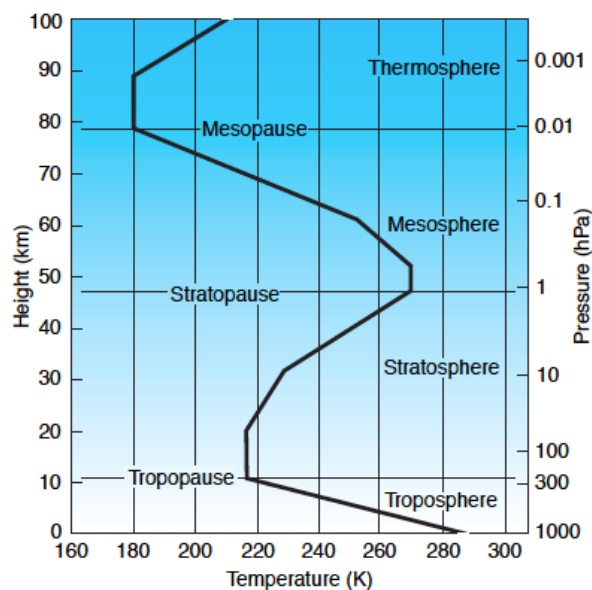


Figura 2. Perfil vertical de temperatura en latitudes medias (Wallace y Hobbs, 2006).

La capa atmosférica más cercana a la superficie es la tropósfera, donde se encuentra el 80% de la masa de la atmósfera y está marcada por un perfil decreciente de la temperatura con la altura (tasa de enfriamiento adiabático de 6.5 °C km^{-1} aproximadamente) (Wallace y Hobbs, 2006). En la tropósfera ocurren todos los fenómenos meteorológicos que

afectan directamente a los seres vivos y es en donde se concentra la mayor parte de oxígeno y vapor de agua. Además, en la tropósfera se pueden observar fenómenos como las inversiones térmicas, las cuales presentan un aumento de la temperatura con la altitud, con lo que inhiben la mezcla vertical. También se conoce que la tropósfera actúa como un regulador térmico e interviene en la prevención de diferencias térmicas grandes que pongan en riesgo la supervivencia de los seres vivos (Wallace y Hobbs, 2006). El perfil de temperatura en una columna de aire se puede medir mediante una radiosonda.

La capa estratosférica se encuentra después de la tropósfera. En la estratósfera, no ocurre mezcla vertical, puesto que la temperatura aumenta con la altitud; en razón de que las moléculas de la capa de ozono absorben radiación electromagnética en la región ultravioleta. En la parte baja de la estratósfera existen temperaturas relativamente estables (Wagner, 1997).

Por otra parte, en la mesósfera (siguiente capa atmosférica) la temperatura decrece con la altitud. Esta es la capa más fría de la atmósfera, en la cual se desintegran los meteoros, protegiendo de esta manera al planeta (Wagner 1997).

En la Figura 2, se puede observar que en la termósfera (última capa) la temperatura vuelve a aumentar con la altitud debido a la fotodisociación y fotoionización de moléculas que ocurre en esta capa. Fuera de esta capa, las temperaturas son poco predecibles ya que varían mucho por la emisión de radiación ultravioleta y rayos X provenientes del Sol (Wallace y Hobbs, 2006).

Temperatura potencial.

La temperatura potencial θ de un volumen de aire se define como la temperatura que tendría dicho volumen de aire si se calienta adiabáticamente hasta una presión de referencia P_0 (1000 hPa). La temperatura potencial es una propiedad conservativa, utilizada para analizar la estabilidad de las capas atmosféricas y se puede expresar en términos de la presión, temperatura y un nivel de referencia P_0 (ecuación 2) (Wallace y Hobbs, 2006).

$$\theta = T \left(\frac{P_0}{P} \right)^{R/c_p} \quad (2)$$

Donde se asume que $R \cong R_d$ (R_d es la constante de los gases para 1 kg de aire seco) con un valor de $R = 287 \text{ J K}^{-1} \text{ kg}^{-1}$ y $c_p = 1004 \text{ J K}^{-1} \text{ kg}^{-1}$ (siendo c_p el calor específico a presión constante).

Fracción másica de vapor de agua.

La fracción másica del vapor de agua indica la cantidad en masa de agua presente en una cierta cantidad másica de aire. El perfil vertical, la fracción másica del vapor de agua disminuye con la altura de manera exponencial, al igual que la presión. El vapor de agua atmosférico es un gas de efecto invernadero, además da origen a fenómenos meteorológicos y microfísicos aportando en la formación y desarrollo de las nubes. (Mona, 2007)

Las estructuras verticales de las variables meteorológicas indicadas anteriormente siguen un comportamiento físico esperado. Sin embargo, dichas estructuras pueden estar sometidas a variaciones locales y temporales. La información de radiosondeos o los datos satelitales son instrumentos de observaciones meteorológicas, que permiten registrar dichas variaciones. Conjuntamente, los modelos meteorológicos, que son una aproximación teórica

de la realidad, pueden ser evaluados con datos experimentales (datos de satélites o radiosondeos) para transformarse en una herramienta evaluada de información meteorológica.

Modelo Weather Research and Forecasting (WRF)

El modelo Weather Research and Forecasting (WRF) es un sistema de predicción numérica y simulación atmosférica para aplicaciones educativas, investigativas y operacionales. El WRF fue diseñado para ser flexible y un modelo de última generación de simulación atmosférica en plataformas computacionales en paralelo (Wang et al., 2008). El desarrollo del WRF ha sido posible gracias a colaboraciones interinstitucionales del Centro Nacional para Investigaciones Atmosféricas (NCAR, por sus siglas en inglés), la Administración Nacional del Océano y la Atmósfera (NOAA, por sus siglas en inglés), la Agencia Meteorológica de la Fuerza Aérea (AFWA, por sus siglas en inglés), la Universidad de Oklahoma, la Administración Federal de Aviación (FAA, por sus siglas en inglés) y la participación conjunta de científicos y expertos de varios países (Skamarock, 2008).

La experiencia y aporte científico al contenido teórico disponible en el modelo WRF se refleja en la alta gama de opciones físicas y dinámicas disponibles, las mismas que pueden ser combinadas por el usuario para obtener diferentes parametrizaciones (Cheng, 2005). Además cuenta con un sistema de asimilación de datos, WRF-Var, el cual puede asimilar una variedad de observaciones, en búsqueda de las condiciones óptimas de inicialización; y el módulo WRF-Chem, el cual tiene la capacidad de modelar el transporte químico de los contaminantes en el aire.

Existen varios juegos de datos que pueden ser utilizados para generar las condiciones iniciales y de contorno para el Sistema de Procesamiento de datos WPS. Para este estudio se utilizaron los datos del NCEP Final Analysis (FNL), que presentan una resolución espacial de celdas de $1^\circ \times 1^\circ$, preparados operacionalmente cada seis horas.

El sistema de soluciones de dinámica ARW integra las ecuaciones eulerianas no-hidrostáticas. Estas ecuaciones se expresan en forma de flujo usando variables conservativas. Las ecuaciones del ARW se formulan utilizando coordenadas verticales de masa en función del terreno y se expresan en función de la presión hidrostática. Dichas coordenadas se denominan coordenadas verticales de masa (η) y se definen con la ecuación 3 y 4.

$$\eta = \frac{p_h - p_{ht}}{\mu} \quad (3)$$

$$\mu = p_{hs} - p_t \quad (4)$$

Donde p_h es el componente hidrostático de la presión, y p_{hs} y p_t son los valores en la superficie y el límite superior de modelo, respectivamente (Skamarock, 2008). La coordenada vertical de masa (η) puede variar desde 1 en la superficie, hasta 0 en el límite superior del dominio del modelo.

Además, el WRF incluye varias opciones dinámicas y físicas. Esto permite al usuario combinar dichas opciones para ajustar el modelo a la realidad del caso de estudio. Las opciones físicas que el usuario puede utilizar con la versión 3.2 del modelo WRF son:

1. *Microfísica* (mp_physics): tendencias de calor y humedad de la atmósfera
2. *Radiación*
 - 2.1. *Radiación de onda larga* (ra_lw_physics): flujos de radiación superficial
 - 2.2. *Radiación de onda corta* (ra_sw_physics): flujos de radiación solar.

3. Superficie

3.1. *Capa superficial (sf_clay_physics): coeficientes de transferencia e intercambio de calor*

3.2. *Capa terrena (sf_surface_physics): temperatura, humedad del suelo*

3.3. *Superficie urbana (sf_urban_physics): temperatura, humedad del suelo*

4. *Capa Límite Planetaria (bl_pbl_physics): flujos de la capa límite, difusión vertical*

5. *Parametrización de Cúmulos (cu_physics): distribución de la precipitación en superficie*

Cada una de estas opciones incluye esquemas teóricos que el usuario puede seleccionar. La posibilidad de elegir los esquemas físicos y dinámicos permite realizar ejercicios de intercomparación con otros modelos o evaluar los resultados del modelo con datos experimentales (Cheng, 2005). La configuración de referencia utilizada por el WRF (V3.2) se detalla en la Tabla 1.

Opciones físicas y dinámicas	Esquemas físicos de la configuración de referencia WRF3.2
<i>Microfísica (mp_physics)</i>	WRF SM 5-class-scheme, 4
<i>Radiación de onda larga (ra_lw_radiation)</i>	RRTM, 1
<i>Radiación de onda corta (ra_sw_radiation)</i>	Dudhia, 1
<i>Capa superficial (sf_sfclay_physics)</i>	Monin Obukhov, 1 -2 QNSE, 4
<i>Capa terrena (sf_surface_physics)</i>	Noah, 2
<i>Capa Límite Planetaria (bl_pbl_physics)</i>	Yonsei, 1 QNSE, 4
<i>Esquema Convectivo-Cúmulo (cu_physics)</i>	Kain-Fritsch scheme, 1

Tabla 1. Configuración de referencia para el modelo WRF versión 3.2. Opciones físicas y dinámicas. (Wang et al., 2008)

Esta investigación tiene por objetivo evaluar por primera vez en Cumbayá - Ecuador, el desempeño del modelo WRF, mediante la comparación de sus resultados, con los registros de datos en la superficie y vertical, recabados por la EMA-USFQ.

Se realizaron simulaciones (ejecutadas por R. Parra) con dos configuraciones de esquemas físicos diferentes. Cada configuración presenta variaciones en los esquemas de Capa Superficial (CS), Capa Límite Planetaria (CLP) y Esquema Convectivo – Cúmulo (CCU). La evaluación del modelo se realizó entre la superficie hasta los 33 km (16 hPa) de 4 casos de estudio entre abril y septiembre del año 2015.

MÉTODO

Parte experimental

La EMA-USFQ es una estación terrena de medición de variables meteorológicas y calidad del aire (Cazorla & Tamayo, 2014). La EMA-USFQ cuenta con un sistema de adquisición de datos meteorológicos y de calidad del aire de alta resolución temporal. Para la evaluación de los resultados del modelo WRF en superficie se han utilizado las observaciones terrenas de la EMA-USFQ.

En la EMA-USFQ se realizó una campaña de lanzamientos de 12 radiosondas y ozonosondas entre el 2 de junio de 2014 y el 30 de septiembre de 2015. Dichos lanzamientos se realizaron desde Cumbayá - Ecuador (-78.4352, -0.19652) a 2391 msnm, con una alta resolución espacial y temporal de 20 m y 1 Hz, respectivamente.

Para este estudio se seleccionaron los datos de cuatro de los doce lanzamientos realizados en la EMA-USFQ, a los que llamaremos iMet. Para la selección de los casos de estudio se tomó en cuenta el valor del punto más frío de la tropopausa (CPT, por sus siglas en inglés). Los cuatro casos de estudio seleccionados, presentan las temperaturas más altas y más bajas del CPT de los 12 lanzamientos realizados. Dicha selección se realizó con el objetivo de evaluar si el modelo es capaz de reproducir este aspecto del perfil de temperatura. En la Tabla 2 se especifican dichos casos y su punto más frío en la tropopausa (CPT).

Día del lanzamiento	Hora local de lanzamiento	CPT (°C)
29-abril-2015	12h00	-87
30-junio-2015	13h00	-81
27-agosto-2015	09h00	-70
30-septiembre-2015	07h00	-72

Tabla 2. Casos de estudio seleccionados.

Simulaciones utilizando WRF

En este trabajo se utilizaron los resultados de simulaciones realizadas por René Parra, utilizando la versión 3.2 del modelo WRF (WRF V3.2), que se encuentra instalado en el Sistema de Cómputo de Alto Rendimiento de la Universidad San Francisco de Quito (HPC-USFQ). Dichas simulaciones se realizaron con un dominio maestro y dos subdominios anidados (Figura 3).

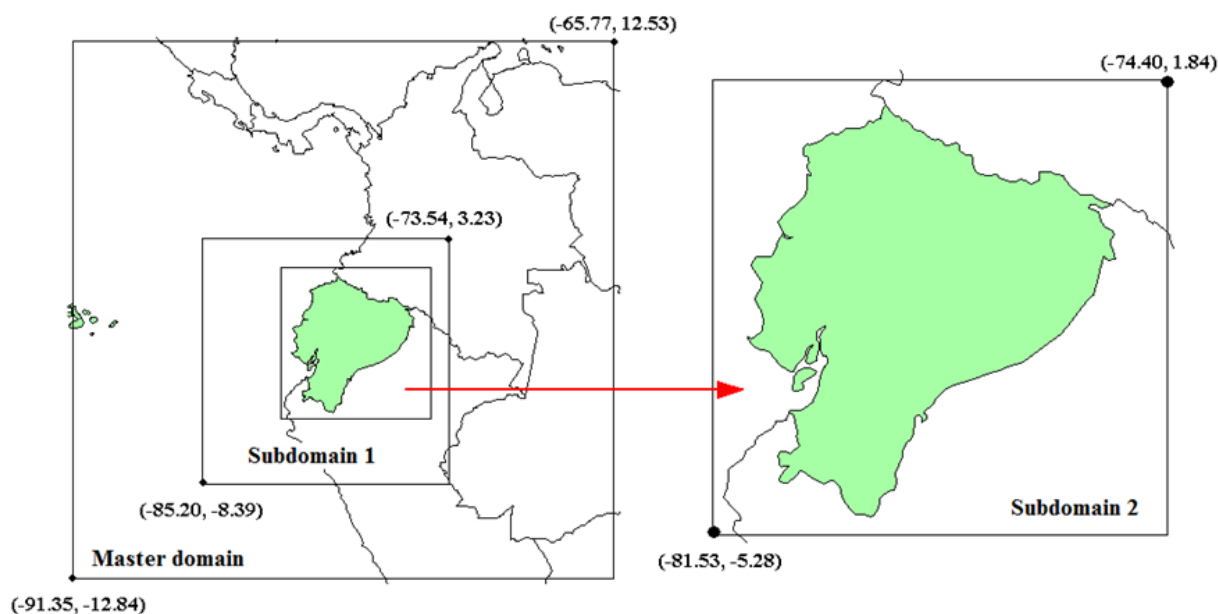


Figura 3. Dominio de la simulaciones: dominio maestro (80 x 80 celdas, 36 x 36 km), subdominio 1 (109 x 109 celdas, 12 x 12 km), subdominio 2 (199 x 199 celdas, 4 x 4 km).

El segundo subdominio anidado circunscribe a todo el territorio continental del Ecuador, y se conforma de una malla de 199 filas y 199 columnas, con celdas de 4 km de lado. Las condiciones iniciales y de contorno se generan a partir de la base de datos de

análisis final (NCEP-FNL) del National Center for Atmospheric Research de los Estados Unidos (NCAR, 2012). Estos archivos proporcionan información meteorológica global, 4 veces por día (horas 00, 06, 12 y 18; hora universal), en celdas de 1 grado geográfico de lado (aproximadamente 110 km). Los archivos de análisis final son generados por el Global Data Assimilation System (GDAS) (ARL, 2012), sistema que permanentemente colecta registros del Global Telecommunications Systems (GTS) y otras fuentes (Parra, 2012). Se utilizaron 44 niveles verticales de masa en función de la topografía terrena con una presión al borde superior del dominio de 10 hPa. Se simularon 100 horas para cada caso de estudio empezando dos días antes del día del lanzamiento y terminando un día después (cuatro días en total). Los archivos crudos de resultados se organizan de acuerdo al protocolo netCDF, que fueron transformados posteriormente a archivos de texto desde una plataforma Linux. En la Tabla 3 se detallan los días simulados por el modelo WRF y qué tipo de evaluación se realizó para estos resultados.

Evaluación del modelo	Horas de simulación	Días correspondientes			
		Abril	Junio	Agosto	Septiembre
En superficie	6 – 54	27 y 28-abril	28 y 29-junio	25 y 26-agosto	28 y 29-septiembre
En la vertical	55 – 81	29-abril	30-junio	27-agosto	30-septiembre

Tabla 3. Días simulados con el modelo WRF. Las primeras 54 horas del modelo (hora universal) corresponden a los dos días antes del lanzamiento de la radiosonda. Las siguientes 24 horas (57-81 hora universal) corresponden al día del radiosondeo.

En la Tabla 3 se especifica la correspondencia en días de las horas simuladas con el modelo WRF. Los resultados de la primera hora del modelo no son tomados en cuenta ya que constituyen una hora ficticia. A partir de la segunda hora se obtienen los resultados de las cero horas en hora universal (hora local Ecuador = hora universal – 5 horas). Los

resultados del modelo utilizados para la evaluación en superficie son desde las 6 horas hasta las 54 horas (2 días de simulación). Para la evaluación del modelo en la vertical, se tomaron los resultados del modelo a partir de la hora 55.

Los esquemas físicos utilizados se detallan en la Tabla 4. Llamaremos FNL1 a la configuración 1 y FNL2 a la configuración 2. Cabe destacar que la configuración 1 (FNL1) es similar a la configuración de referencia del WRF V3.2 con diferencias en la parametrización de la Microfísica, la Capa Superficial y la Capa Terrena.

Los esquemas físicos variados en cada configuración incluyen la Capa Superficial, la Capa Límite Planetaria y el esquema Convectivo-Cúmulo.

Opciones físicas y dinámicas	Configuración de referencia WRF3.2	Configuración 1 (FNL 1)	Configuración 2 (FNL 2)
Microfísica (mp_physics)	WRF SM 5-class-scheme, 4	WRF DM 6-class-scheme, 16	WRF DM 6-class-scheme, 16
Radación de onda larga (ra_lw_radiation)	RRTM, 1	RRTM, 1	RRTM, 1
Radación de onda corta (ra_sw_radiation)	Dudhia, 1	Dudhia, 1	Dudhia, 1
Capa superficial (sf_sfclay_physics)	Monin Obukhov, 1-2 QNSE, 4	Monin Obukhov, 1 (MM5 similarity)	Monin Obukhov, 2 (Eta similarity)
Capa terrena (sf_surface_physics)	Noah, 2	5-layer thermal diffusion, 1	5-layer thermal diffusion, 1
Capa Límite Planetaria (bl_pbl_physics)	Yonsei, 1 QNSE, 4	Yonsei, 1	Mellor-Yamada-Janjic scheme, 2
Esquema Convectivo-Cúmulo (cu_physics)	Kain-Fritsch scheme, 1	Kain-Fritsch scheme, 1	Betts-Miller-Janjic scheme, 2

Tabla 4. Esquemas físicos utilizados para las simulaciones realizadas con el modelo WRF V3.2.

Variables comparadas

En la Tabla 5 se observan las variables atmosféricas comparadas utilizando los resultados del modelo WRF y los datos del radiosondeo (comparación en la vertical) y las observaciones terrenas (comparación en superficie) de la EMA-USFQ.

Comparación en superficie	Comparación en la vertical
Temperatura	Temperatura
Presión	Fracción másica del vapor de agua
Humedad Relativa	Velocidad y dirección del viento
Velocidad y dirección del viento	

Tabla 5. Variables atmosféricas evaluadas en superficie y en la vertical.

Evaluación del modelo WRF en superficie con observaciones terrenas

La evaluación de los resultados del modelo WRF en superficie con las observaciones terrenas de la EMA-USFQ incluyen las variables meteorológicas de temperatura (°C), humedad relativa (%), presión (hPa) y velocidad (m s^{-1}) y dirección del viento (°). Para esta evaluación, se realizaron promedios horarios de las observaciones en superficie de la EMA-USFQ y se tomaron los resultados de las variables en superficie del modelo que representan el valor promedio en el centro de la celda de 4 km de lado correspondiente.

Fracción másica del vapor de agua.

El tratamiento de datos realizado en esta validación incluye la transformación de la fracción másica del vapor de agua ($\text{kg H}_2\text{O kg aire}^{-1}$) del modelo en humedad relativa (%) utilizando la ecuación 5:

$$RH = \frac{w}{w_s} \quad (5)$$

Donde w es la fracción másica del vapor de agua y w_s es fracción másica de saturación del vapor de agua. Para el rango de temperaturas observadas en la atmósfera se puede utilizar la ecuación 6 para aproximar w_s (Wallace y Hobbs, 2006).

$$w_s \cong 0.622 \frac{e_s}{p} \quad (6)$$

Donde e_s es la presión parcial de saturación (disponible en tablas de vapor) y p es la presión total.

Velocidad y dirección del viento.

El viento es un vector y como tal es necesario realizar un cálculo vectorial de sus componentes (U, V) para determinar su magnitud y dirección. La Figura 4 muestra un esquema del sistema cartesiano utilizado para representar el viento. La magnitud del vector viento se obtiene por la suma vectorial de sus componentes U y V (ecuación 7). La dirección del viento se representa en grados y por convención, los vientos que vienen del norte se representan por 0° y 360° , los que vienen del sur por 180° , los del este por 90° y los del oeste por 270° . La ecuación 8 detalla el cálculo para la dirección del viento.

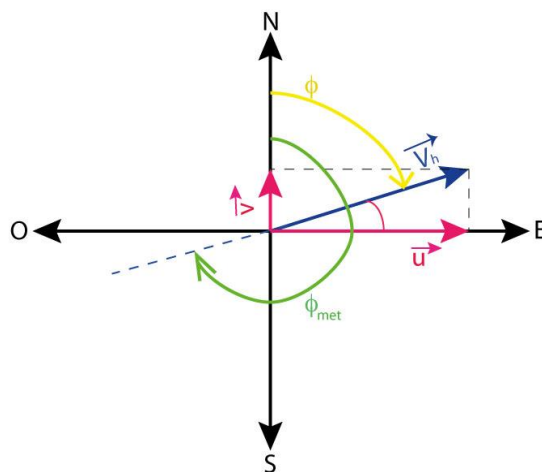


Figura 4. Plano cartesiano con componentes, magnitud y dirección del viento.

$$\text{velocidad del viento} = \sqrt{U^2 + V^2} \quad (7)$$

$$\text{Dirección del viento} \quad (8)$$

$$\text{para } U = 0 \text{ \& } V > 0$$

$$\text{Dirección del viento} = 0$$

$$\text{para } U = 0$$

$$\text{y } V < 0$$

$$\text{Dirección del viento} = 180$$

$$\text{para } U > 0$$

$$\text{Dirección del viento} = \left[90 - \left(\tan^{-1} \left(\frac{V}{U} \right) \right) \right]$$

$$\text{para } u < 0$$

$$\text{Dirección del viento} = \left[270 - \left(\tan^{-1} \left(\frac{V}{U} \right) \right) \right]$$

Evaluación del modelo WRF con radiosondeos

Para la comparación entre los datos del radiosondeo y los resultados del modelo WRF, se obtuvo previamente el promedio de 200 m de la rama ascendente de los datos del radiosondeo (antes de que reviente el globo) con la ayuda del software MatLab R2013a. Después, se utilizó el Sistema de Información Geográfica (ARCGIS V10) para unir la trayectoria de la sonda utilizando los datos del GPS, con la grilla del modelo WRF. Para determinar las coordenadas verticales de masa, se extrajeron los niveles de presión del

promedio realizado de los datos de la radiosonda y se determinó el nivel de presión correspondiente al modelo (ecuaciones 3 y 4).

Variables obtenidas del WRF.

Al igual que en superficie, la mayoría de los resultados de las variables en 3D del modelo son un promedio en el centro de la celda de 4 km de lado, siendo de nuestro interés la temperatura potencial de perturbación (ΔT) y la fracción másica de vapor de agua (Q). Sin embargo, las componentes U y V del viento en la vertical, se dan como valores en los límites de las celdas de 4 km de lado, siendo necesario realizar un promedio para obtener los valores promedios en la mitad de la celda. En la Figura 5 se puede observar la ubicación de los valores en la grilla del modelo.

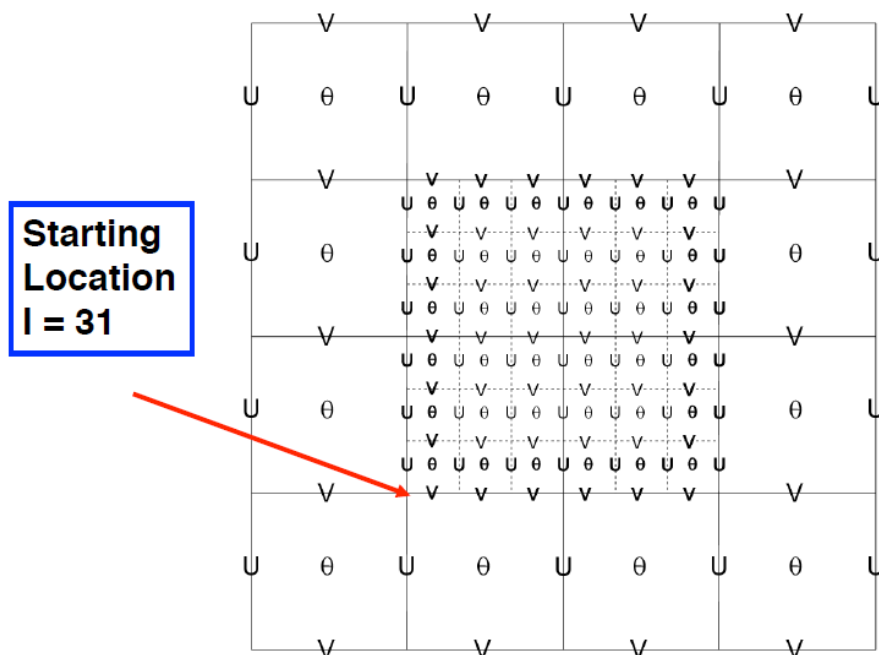


Figura 5. Escalonamiento grueso de la grilla. Proporción 3:1. Localización de los valores de las variables del modelo WRF en las celdas de la grilla. U y V son las componentes X y Y del viento respectivamente y θ representa a las demás variables.

Tratamiento de datos del modelo WRF.

Temperatura 3D.

La temperatura en 3D que se obtiene del modelo WRF a partir de la temperatura potencial de perturbación (ΔT), es igual a la temperatura potencial (θ) menos una temperatura t_0 (300 K). Se despeja la temperatura potencial y con la ecuación 2 obtenemos la temperatura en Kelvin.

Fracción másica del vapor de agua.

El valor de la fracción másica del vapor de agua se obtiene directamente del modelo con unidades de $\text{kg H}_2\text{O kg aire}^{-1}$. Se multiplica a este valor por 1000 para compararlo con el dato de la radiosonda en g kg^{-1} .

Velocidad y dirección del viento.

Los componentes U y V del viento del modelo WRF se dan en los límites de la celda (izquierda y derecha para U; y arriba y abajo para V). Por lo tanto el primer tratamiento es promediar los valores para obtener un solo valor en el centro de la celda. Posteriormente se utilizan las ecuaciones 7 y 8 para calcular la magnitud y dirección del vector viento.

Análisis estadístico

Para el análisis de datos, se realizó una comparación en superficie entre los datos del modelo WRF y las observaciones terrenas de la EMA-USFQ; y una comparación en la vertical con los resultados del modelo y los datos observados de los radiosondeos. Al disponer de

pocos puntos para la evaluación del modelo, se realizó un análisis estadístico global de cada variable atmosférica. Para la comparación en la vertical, se interpoló los valores de la radiosonda a los valores del modelo. Se utilizó el gráfico de intercomparación 1:1, dibujando la línea $x = y$ y la línea del ajuste polinómico de grado 1. Se calculó la raíz del error cuadrático medio (9) (RMSE, por sus siglas en inglés), el error promedio del sesgo (10) (MBE, por sus siglas en inglés) y el índice de aceptación (11) (IA) (Willmot, 1981; Appel, 2007),

$$RMSE = \sqrt{N^{-1} \sum_i^N (e_i - o_i)^2} \quad (9)$$

$$MBE = N^{-1} \sum_i^N (e_i - o_i) \quad (10)$$

$$IA = 1 - \frac{\sum_i^N (e_i - o_i)^2}{\sum_i^N (|e_i - \bar{o}| + |o_i - \bar{o}|)^2} \quad (11)$$

Donde e es el valor estimado por el modelo, o es el valor de radiosondeo y N es el número de puntos comparados.

El RMSE es el error promedio entre las estimaciones del modelo y las observaciones. El MBE representa la diferencia entre la media de las estimaciones del modelo y las media de las observaciones. Ambos parámetros tiene las unidades de las variables observadas y estimadas. Por otro lado, el índice de aceptación es una medida del grado de error de las estimaciones del modelo y sus valores varían entre 0 y 1, donde 1 corresponde a una estimación perfecta.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Temperatura

Series de tiempo de la temperatura en superficie.

Las series de tiempo presentadas (Figuras 6-10), muestran el perfil diario de la temperatura de la EMA-USFQ, FNL1 y FNL2 para los dos días anteriores al lanzamiento de la radiosonda iMet; el perfil del error cuadrático medio global; y el perfil del sesgo medio global para las configuraciones FNL1 y FNL2.

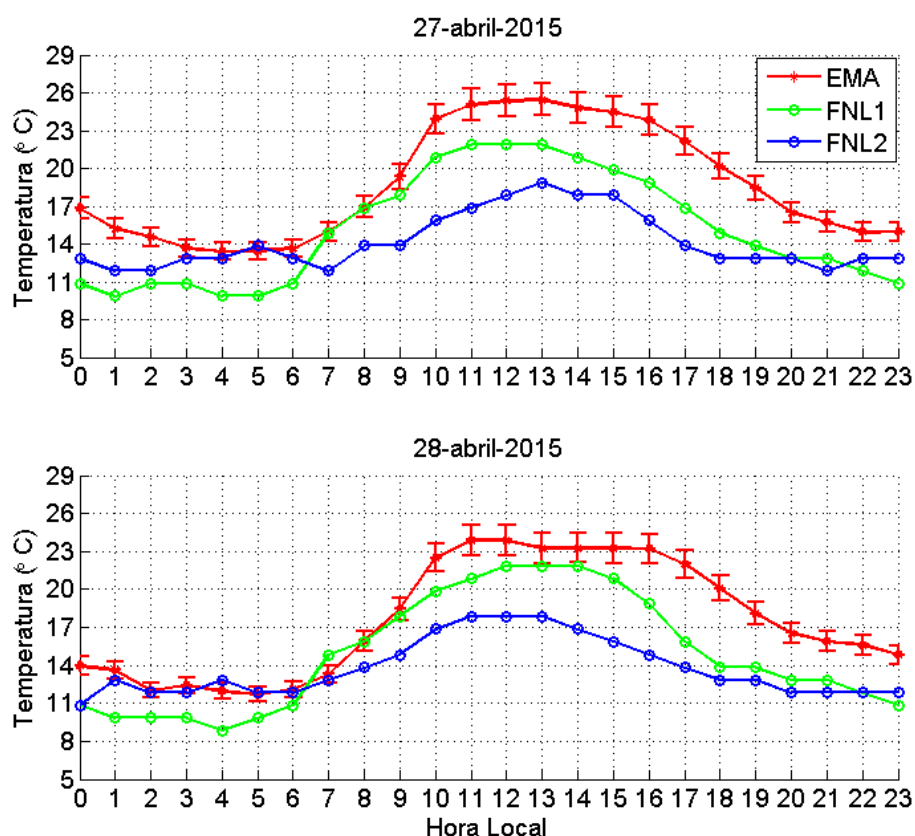


Figura 6. Perfil diario de la temperatura de los días 27- y 28-abril-2015. Las líneas representan los perfiles en superficie de, roja: EMA-USFQ, verde: configuración FNL1 del modelo WRF y azul: configuración FNL2 del modelo WRF. Las barras de error son 1σ basadas en la incertidumbre de los instrumentos de medición de la EMA-USFQ.

Las observaciones de la EMA-USFQ para el 27 y 28 de abril de 2015, muestran temperaturas máximas entre 26 °C y 24°C al medio día, y temperatura mínimas entre 14 °C y 12 °C entre las 05h00 y 06h00. Los resultados de la configuración FNL1 presentan temperaturas máximas de 22 °C al medio día y temperaturas mínimas de 9 °C entre las 04h00 y 05h00. Los resultados de la configuración FNL2 presentan temperaturas máximas de 18 °C al medio día y temperaturas mínimas de 11 °C entre las 21h00 y 00h00.

Los resultados de las configuraciones FNL1 y FNL2 del modelo WRF subestiman los valores de temperatura observados en la EMA-USFQ para los días 27 y 28 de abril de 2015. Dicha subestimación aumenta con el incremento de la temperatura, siendo mayor entre las 10h00 y 17h00. La subestimación de los resultados de la configuración FNL1 en este período de tiempo va desde 3 °C hasta 6 °C del valor observado, mientras que para la configuración FNL2 en el mismo período de tiempo, dichos valores van desde 6 °C hasta 8 °C. En horas de la mañana y la noche, la subestimación de los resultados del modelo va desde 2°C hasta 6 °C y de 0 °C hasta 4 °C para los resultados de la configuración FNL1 y FNL2 respectivamente. Para los resultados de la configuración FNL1 las horas con menor sesgo van desde las 07h00 hasta las 09h00, mientras que para los resultados de la configuración FNL2 dichas horas van desde las 03h00 hasta las 07h00.

Para el 28 y 29 de junio de 2015, la temperatura máxima observada en la EMA-USFQ es de 25 °C al medio día y la temperatura mínima es de 13 °C entre las 05h00 y 06h00. Los resultados de la configuración FNL1 presenta temperaturas máximas de 21 °C al medio día y temperaturas mínimas de hasta 8 °C entre las 04h00 y 05h00. Los resultados de la configuración FNL2 presenta temperaturas máximas de 18 °C al medio día y temperaturas mínimas de 11 °C entre las 03h00 y 06h00.

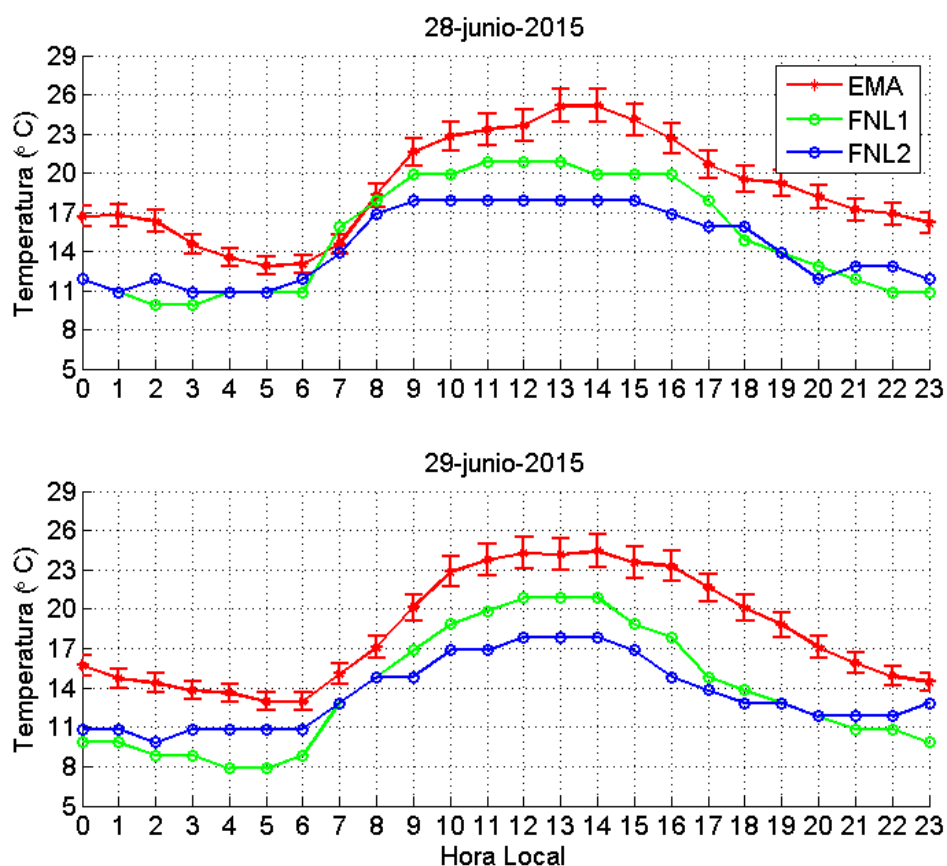


Figura 7. Perfil diario de la temperatura de los días 28 - y 29-junio-2015. Las líneas representan los perfiles en superficie de, roja: EMA-USFQ, verde: configuración FNL1 del modelo WRF y azul: configuración FNL2 del modelo WRF. Las barras de error son 1σ basadas en la incertidumbre de los instrumentos de medición de la EMA-USFQ.

Al igual que para el 27 y 28 de abril de 2015, se evidencia que los resultados de las configuraciones FNL1 y FNL2 del modelo WRF subestiman los valores de temperatura observados en la EMA-USFQ para los días 28 y 28 de junio. La subestimación de los resultados de la configuración FNL1 entre las 00h00 y 06h00 va desde 2 °C hasta 6 °C del valor observado, mientras que para la configuración FNL2 en el mismo período de tiempo, dicha subestimación va desde 1 °C hasta 6 °C. Entre las 10h00 y 17h00 los resultados de FNL1 subestiman el valor de la EMA entre 1 °C y 5 °C, mientras que los resultados de FNL2 subestiman dicho valor desde 3 °C a 9 °C.

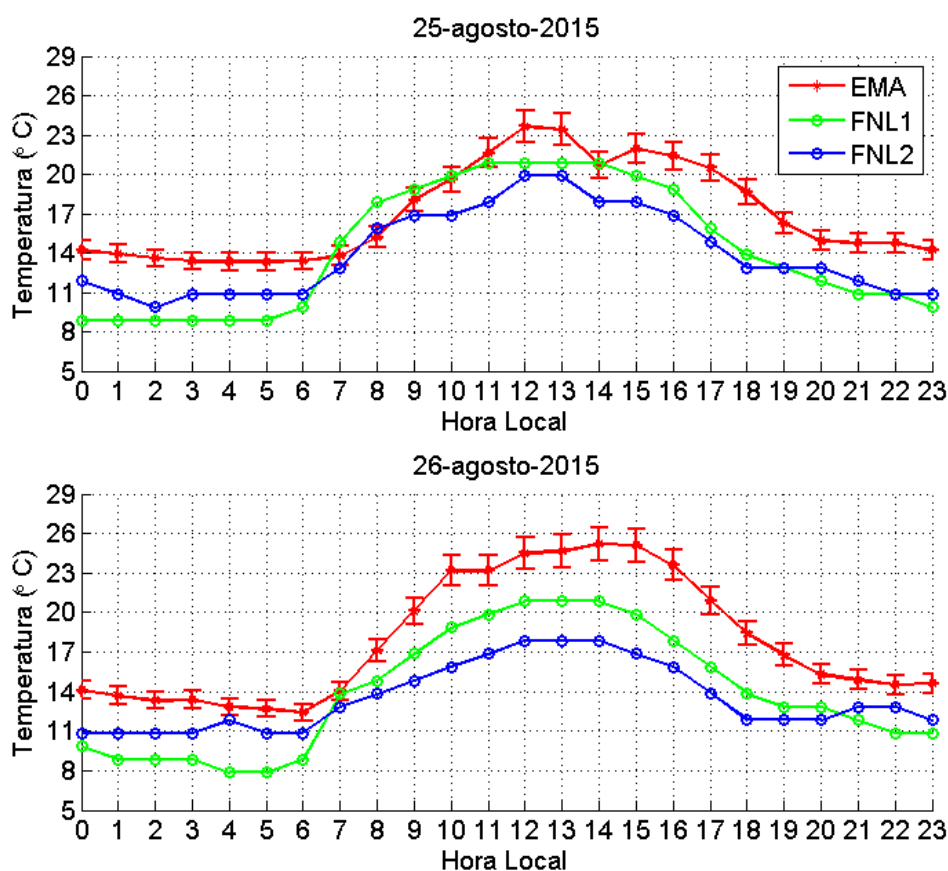


Figura 8. Perfil diario de la temperatura de los días 25- y 26-agosto-2015. Las líneas representan los perfiles en superficie de, roja: EMA-USFQ, verde: configuración FNL1 del modelo WRF y azul: configuración FNL2 del modelo WRF. Las barras de error son 1σ basadas en la incertidumbre de los instrumentos de medición de la EMA-USFQ.

Para el 25 de agosto de 2015, las temperaturas máximas y mínimas observadas en la EMA-USFQ son de 24 °C al medio día y 11 °C a las 06h00, respectivamente. Para el 25 de agosto de 2015 dichas temperaturas son de 25 °C a las 14h00 y 12.5 °C a las 06h00. Los resultados de la configuración FNL1 presenta temperaturas máximas de 21 °C al medio día y temperaturas mínimas de 8 °C entre las 04h00 y 05h00. Los resultados de la configuración FNL2 presenta temperaturas máximas de 20 °C al medio día y temperaturas mínimas de 10 °C entre las 00h00 y 06h00. La subestimación de la configuración FNL1 va desde 6 °C hasta 4 °C entre las 00h00 y 06h00. En el mismo período de tiempo, la configuración FNL2 presenta

un subestimación entre 1 °C y 3 °C. Entre las 10h00 y 17h00 se presenta la subestimación más grande para ambas configuraciones yendo desde 0 °C hasta 6 °C para la configuración FNL1 y 3 °C y 8 °C para la configuración FNL2.

Para el 28 y 29 de septiembre de 2015, los valores máximos de temperatura observados en la EMA-USFQ alcanzan los 27 °C al medio día y los valores mínimos llegan a 11°C a las 05h00. La configuración FNL1 presenta valores máximos de 23 °C al medio día y valores mínimos de 8 °C entre las 03h00 y 05h00. La configuración FNL2 presenta valores máximos de 20 °C y 18 °C (para el 28 y 29 de septiembre, respectivamente) al medio día y valores mínimos de 11 °C entre la 01h00 y 06h00. En horas de la madrugada y la noche, la configuración FNL1 presenta subestimaciones entre 6 °C y 4 °C. En el mismo período de tiempo, la configuración FNL2 presenta subestimaciones del valor observado entre 6 °C y 2 °C. Entre las 10h00 y 17h00 se presentan las subestimaciones mayores para ambas configuraciones yendo desde 2 °C hasta 6 °C para la configuración FNL1 y desde 5 °C hasta 8 °C para la configuración FNL2.

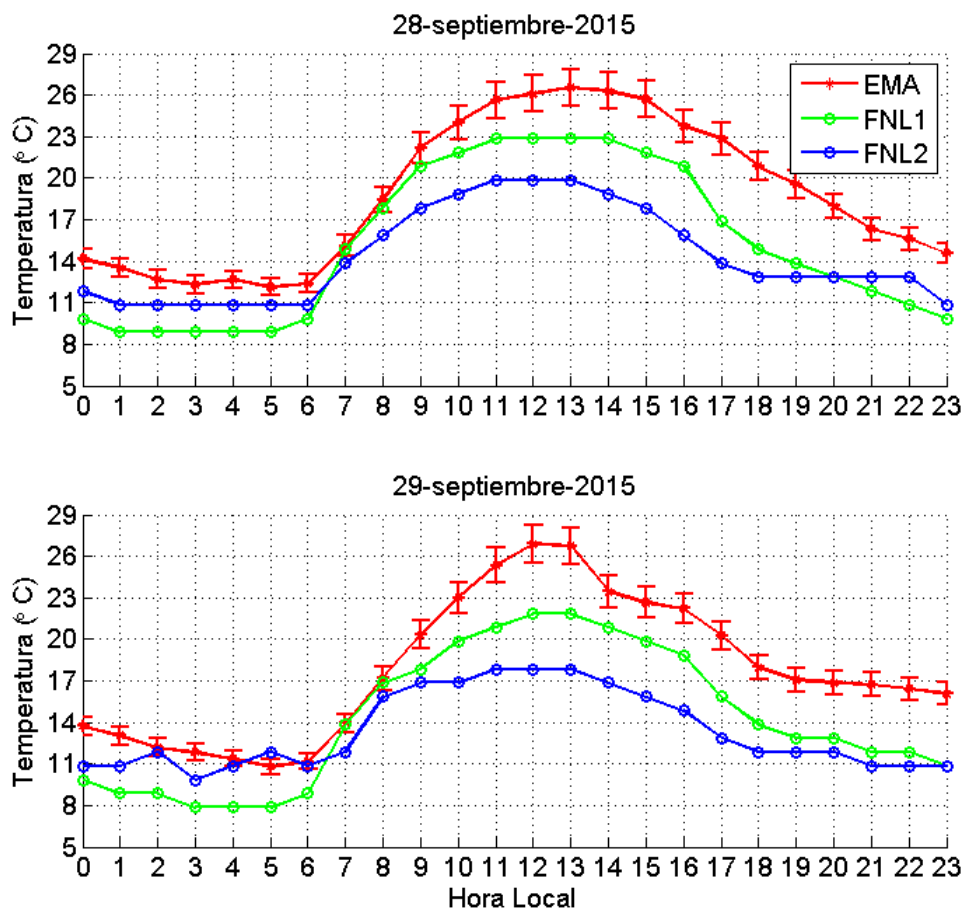


Figura 9. Perfil diario en superficie de la temperatura de los días 28- y 29-septiembre-2015. Las líneas representa, roja: el perfil de la temperatura de la EMA-USFQ, verde: el perfil de la primera configuración (FNL1) del modelo WRF y azul: el perfil de la segunda configuración (FNL2) del modelo WRF. Las barras de error son 1σ basadas en la incertidumbre de los instrumentos de medición de la EMA-USFQ.

El error cuadrático medio (RMSE) para FNL1 y FNL2 es de $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ entre las 00h00 - 05h00 y las 20h00 y 23h00 (Figura 10). El RMSE disminuye entre las 06h00 y las 09h00, llegando a valores de $1.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ a las 08h00. Desde las 08h00 hasta las 18h00 los errores cuadráticos medios de ambas configuraciones difieren en $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ aproximadamente, siendo la configuración FNL2 la que presenta errores mayores. Entre las 10h00 y 19h00 los errores cuadráticos medios para la configuración FNL1 y FNL2 van desde $2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta $5.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y desde $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta y $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ respectivamente. El perfil de sesgo medio evidencia que los resultados de ambas configuraciones del modelo subestiman los datos observados en la EMA-USFQ. La

subestimación de la configuración FNL1 es ligeramente mayor en las noches y a primeras horas de la mañana (18h00 – 24h00 y 00h00 – 05h00) con valores entre -4 °C y -5 °C. Por el contrario, la subestimación de los resultados de la configuración FNL2 son más grandes entre las 10h00 y 17h00 con valores entre -6 °C y -7 °C.

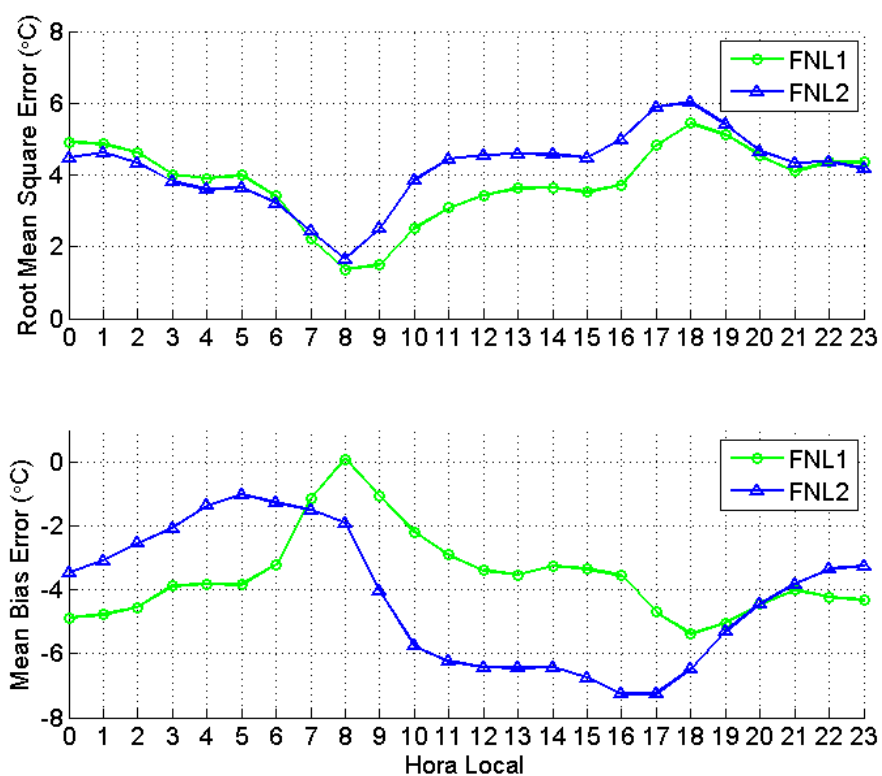


Figura 10. Error cuadrático medio (RMSE) y sesgo medio (MBE) de la temperatura en superficie. Observaciones de EMA vs. resultados de la configuración FNL1 (línea verde) y observaciones de EMA vs. resultados de la configuración FNL2 (línea azul).

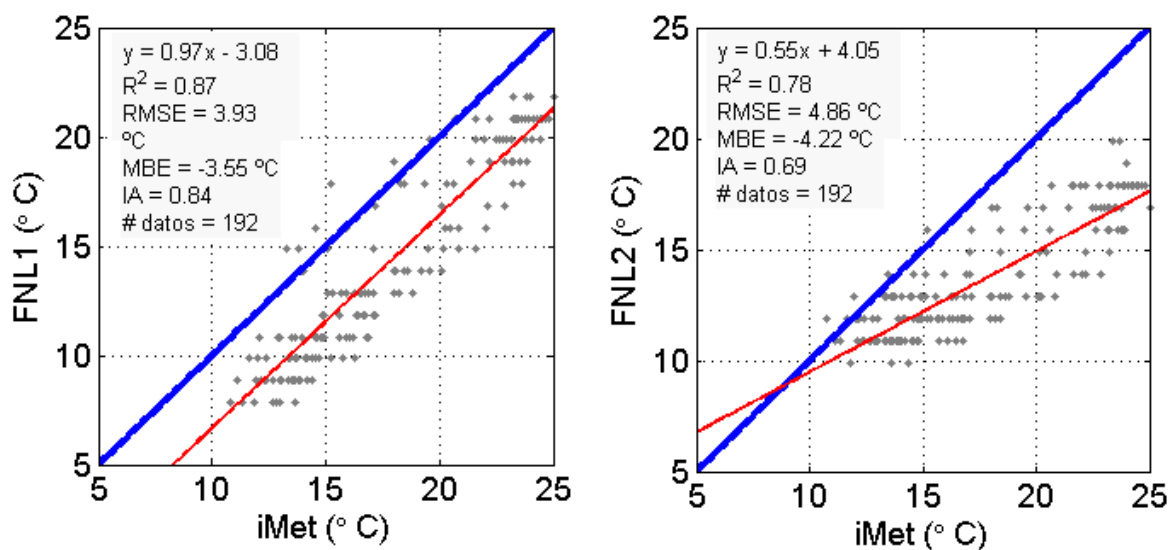


Figura 11. Gráfico de dispersión de puntos de los perfiles diurnos de temperatura medida y modelada (FNL1) y temperatura medida y modelada (FNL2). En ambos gráficos la línea azul es la línea 1:1 y la línea roja es la regresión lineal entre los datos de temperatura medidos y modelados.

Para la evaluación estadística de las configuraciones del modelo WRF se ha realizado un gráfico de dispersión de puntos y una regresión lineal. Para comparar cada juego de datos (EMA-FNL1 y EMA-FNL2), se calculó la raíz del error cuadrático medio (RMSE, por sus siglas en inglés), error de sesgo medio (MBE) y el índice de aceptación (IA) (Willmott, 1981; Appel, 2007). La Figura 11 muestra la dispersión de los datos de la temperatura para los 4 casos de estudio y las 48 horas modeladas. La dispersión de los resultados de la configuración FNL1 ratifica la subestimación de dichos resultados con respecto a los valores observados en la EMA-USFQ, independientemente del valor de la temperatura con una pendiente de 0.97 e intersección en el eje y de -3.08. Por otro lado, la dispersión de los resultados de la configuración FNL2 muestra un subestimación mayor para valores de temperatura más altos (al medio día), y menor para los valores de temperatura más bajos (horas de la mañana).

La subestimación de los resultados del modelo es consistente en todos los casos de estudio, siendo esta más pronunciada entre los 10h00 y 17h00, período del día en el cual se

presentan temperaturas más altas. Esto sugiere que el modelo presenta dificultades al modelar temperaturas altas. Se debe tomar en cuenta que la zona en estudio presenta una topografía muy irregular (calentamiento diferenciado de la superficie) y que Cumbayá es un valle urbanizado con grandes áreas superficiales cubiertas de asfalto y cemento (formación de islas de calor). Estos factores influyen para que el calentamiento de la superficie no sea predecible ni uniforme.

Perfil vertical de la temperatura.

Para la evaluación de los resultados del modelo WRF en la vertical se ha realizado la superposición de los perfiles verticales de: el lanzamiento de la radiosonda (iMet), los resultados de la configuración FNL1 y, los resultados de la configuración FNL2 del modelo WRF. En la Figuras 12-15 se muestran los perfiles de temperatura para cada día.

El 29 de abril de 2015, el lanzamiento de la radiosonda se realizó al medio día (12h00). El punto más frío de la tropósfera (CPT) fue de -87°C a una presión de 92 hPa (17.05 km aproximadamente). Se observa que los resultados de ambas configuraciones del modelo WRF son representativos del perfil observado por el radiosondeo. Sin embargo, entre 108 hPa y 74 hPa (16.1 km a 18.2 km) los resultados del modelo sobreestiman el valor observado por la radiosonda, especialmente el valor del CPT. En este intervalo, los resultados del modelo WRF tienen un cambio mínimo en la temperatura lo cual representa el inicio de la estratósfera. Por el contrario, los datos del radiosondeo presentan un cambio brusco entre la tropósfera y la estratósfera. A partir de esta transición entre las capas, los resultados del modelo representan el promedio de las observaciones del radiosondeo.

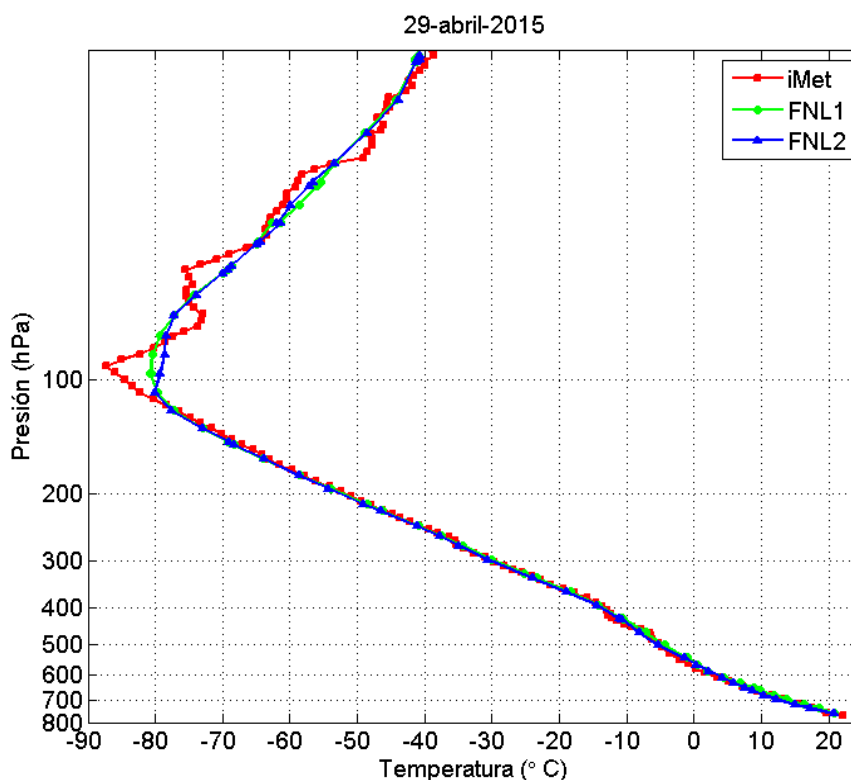


Figura 12. Perfil vertical de la temperatura del día 29-abril-2015. Hora local de lanzamiento 12h00. La línea roja representa el perfil de la radiosonda (iMet), la línea verde el perfil de la configuración FNL1 del modelo WRF y la línea azul el perfil de la configuración FNL2 del modelo WRF.

El 30 de junio de 2015, el lanzamiento de la radiosonda se realizó al medio día (13h00). El punto más frío de la tropósfera (CPT) fue de $-81\text{ }^{\circ}\text{C}$ a un presión de 98 hPa (16.72 km aproximadamente). Los datos del radiosondeo y los resultados de modelo se ajustan bien en la tropósfera (Figura 13). Sin embargo, entre 120 hPa y 80 hPa (15.6 km a 17.9 km) los resultados del modelo sobreestiman el valor observado por la radiosonda. En este radiosondeo, la transición entre la tropósfera y la estratósfera no es tan brusca como aquella del radiosondeo del 29 de abril.

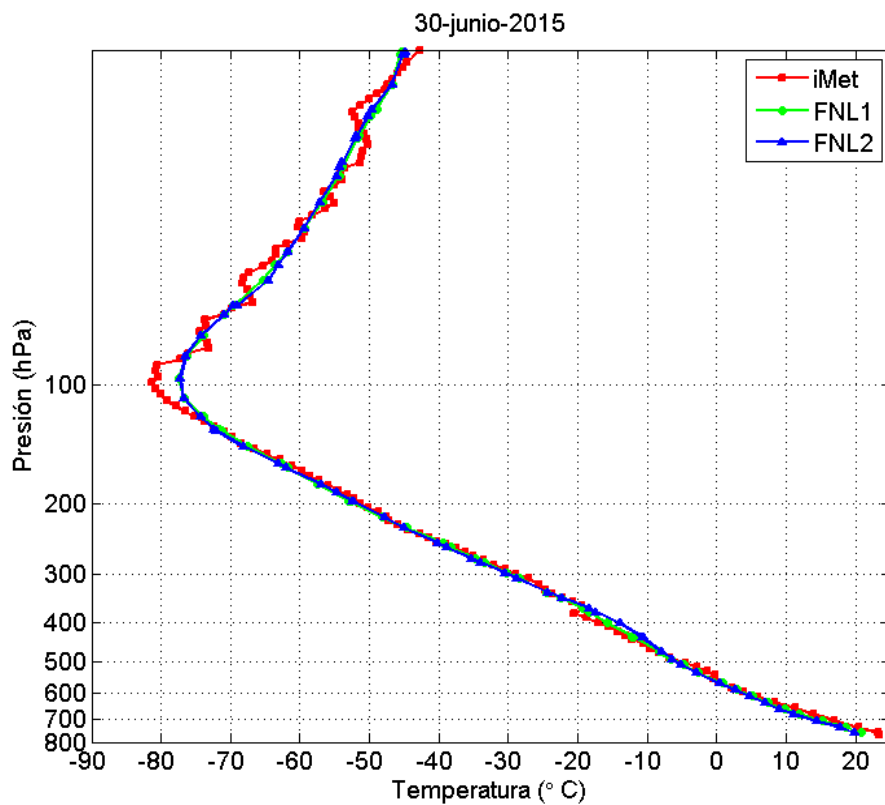


Figura 13. Perfil vertical de la temperatura del día 30-junio-2015. Hora local de lanzamiento 13h00. La línea roja representa el perfil de la radiosonda (iMet), la línea verde el perfil de la configuración FNL1 del modelo WRF y la línea azul el perfil de la configuración FNL2 del modelo WRF.

El 27 de agosto de 2015, el lanzamiento de la radiosonda se realizó a las 09h00. El punto más frío de la tropósfera (CPT) fue de $-79.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ a un presión de 101 hPa (16.5 km aproximadamente). Los datos del radiosondeo y los resultados de modelo se ajustan bien en la tropósfera. Los resultados del modelo WRF logran reproducir la transición entre la tropósfera y estratósfera, y el CPT siendo la configuración FNL1 la que más se acerca a dicho valor ($1\text{ }^{\circ}\text{C}$ mayor que el valor observado por la radiosonda, mientras que la configuración FNL2 presenta una temperatura de $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ más a las observadas por la radiosonda).

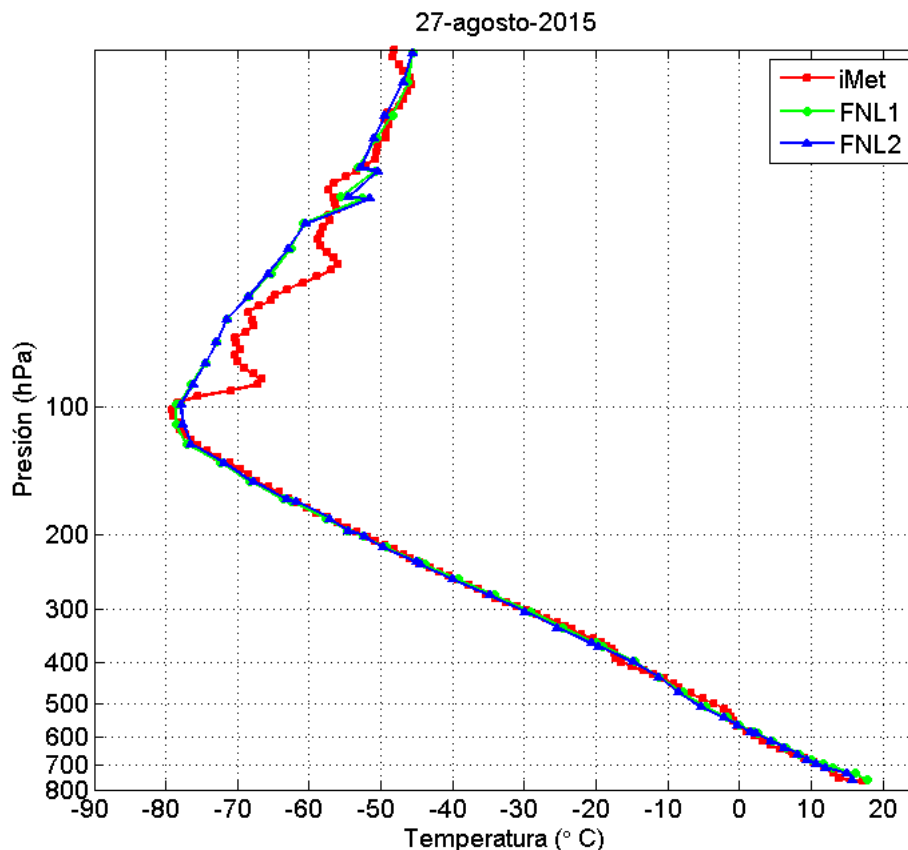


Figura 14. Perfil vertical de la temperatura del día 27-agosto-2015. Hora local de lanzamiento 09h00. La línea roja representa el perfil de la radiosonda (iMet), la línea verde el perfil de la primera configuración (FNL1) del modelo WRF y la línea azul el perfil de la segunda configuración (FNL2) del modelo WRF.

El 30 de septiembre de 2015, el lanzamiento de la radiosonda se realizó a las 07h00. El punto más frío de la tropósfera (CPT) fue de $-78\text{ }^{\circ}\text{C}$ a una presión de 100 hPa (16.6 km aproximadamente). Los datos del radiosondeo y los resultados de modelo se ajustan bien en la tropósfera. Los resultados del modelo WRF logran reproducir la transición entre la tropósfera y estratósfera, pero no el CPT, sobreestimando este valor en $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ aproximadamente.

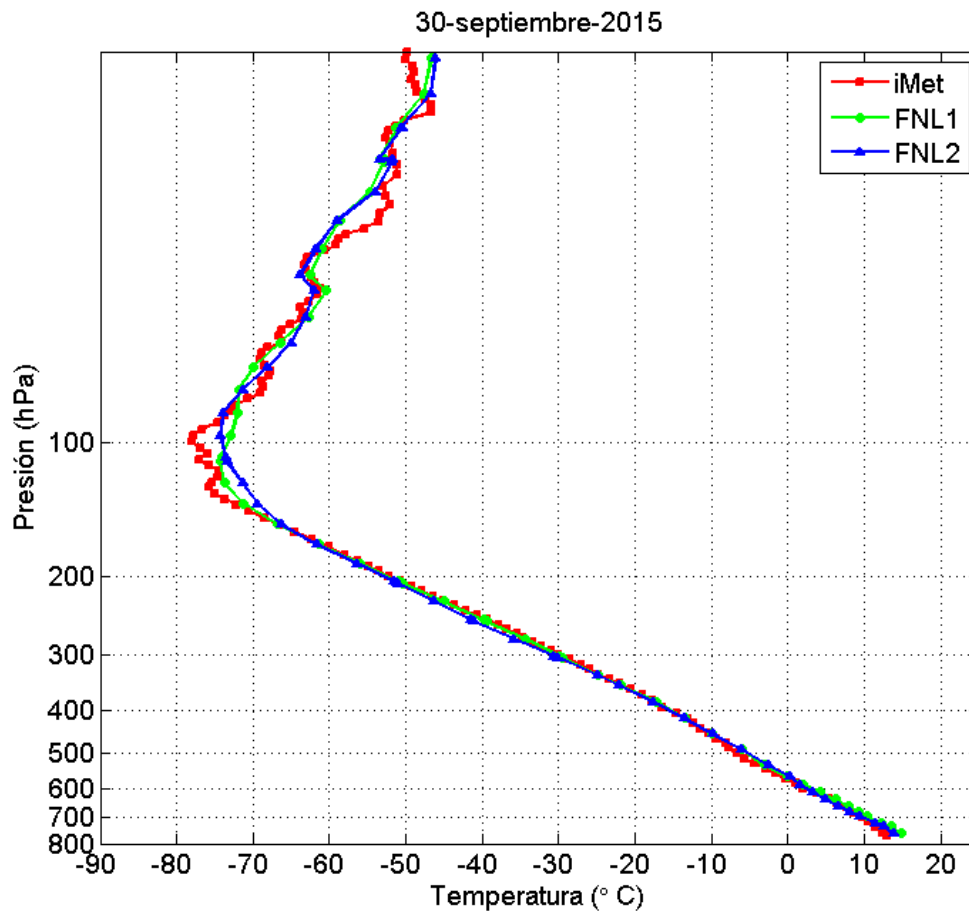


Figura 15. Perfil vertical de la temperatura del día 30-septiembre-2015. Hora local de lanzamiento 07h00. La línea roja representa el perfil de la radiosonda (iMet), la línea verde el perfil de la primera configuración (FNL1) del modelo WRF y la línea azul el perfil de la segunda configuración (FNL2) del modelo WRF.

En la Figura 16 se observa la dispersión de los datos de los 4 radiosondeos y el promedio de dichas observaciones (línea roja con barras de error 1σ), el promedio de los resultados de la configuración FNL1 (línea verde) y los resultados de la configuración FNL2 (línea azul). Se puede concluir que sí existe correlación entre los datos observados y los resultados del modelo en la mayoría de la trayectoria, con la excepción de la transición de la tropósfera y estratósfera, y los CPTs. La transición modelada por los resultados del WRF es suave y sugiere que no existe cambio de temperatura en los primeros metros de la estratósfera (comportamiento teórico esperado), mientras que en las observaciones, dicha

transición es más brusca e indica un incremento de la temperatura desde el principio de la capa estratosférica. Los puntos más fríos de la tropopausa (CPT) fueron subestimados por ambas configuraciones del modelo, lo que sugiere que el modelo tiene problemas para simular temperaturas frías en la vertical.

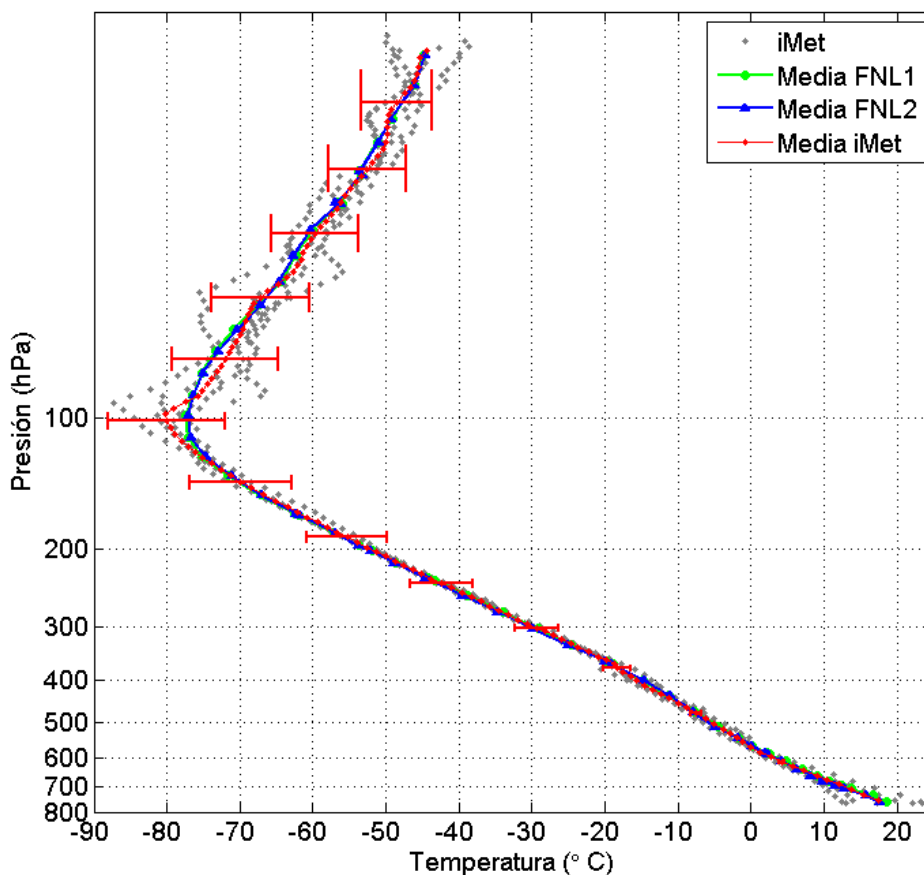


Figura 16. Dispersión de los datos de temperatura medida para los cuatro casos de estudio. Las líneas representan los perfiles promedio de: línea roja: radiosonda iMet, la línea verde: configuración FNL1 del modelo WRF y la línea azul: configuración FNL2 del modelo WRF. Las barras de error son 1σ basadas en la incertidumbre de la radiosonda iMet.

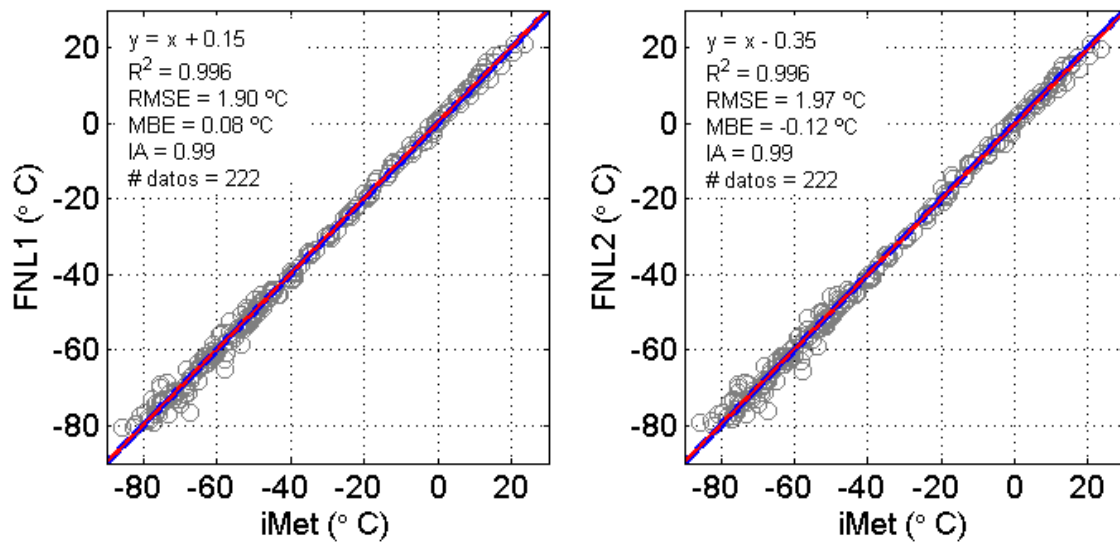


Figura 17. Gráfico de dispersión de puntos de los perfiles verticales de temperatura medida vs. resultados de configuraciones FNL1 y FNL2 del modelo WRF. En ambos gráficos la línea azul es la línea 1:1 mientras que la línea roja es la regresión lineal entre los datos de temperatura medidos y modelados.

La Figura 17 muestra el perfil de dispersión de los datos de la temperatura para los 4 casos de estudio en toda la vertical. Dicha dispersión muestra que los resultados de las configuraciones FNL1 y FNL2 del modelo WRF se ajusta bien a los datos con un R^2 de 0.996 y un índice de aceptación de 0.99 para ambas configuraciones.

En la Figura 18, se puede observar el sesgo medio (MBE) para la configuración FNL1 y FNL2. Para ambos casos el 88 % de los datos presentan sesgos medios menores a $2 \text{ } ^\circ\text{C}$. A una presión de 100 hPa (17 km aproximadamente) se presenta el sesgo más grande con una desviación de $2.6 \text{ } ^\circ\text{C}$ del valor observado. Dicho punto coincide con la altura media del CPT, lo cual reivindica que en este punto, el error del modelo es mayor al observado.

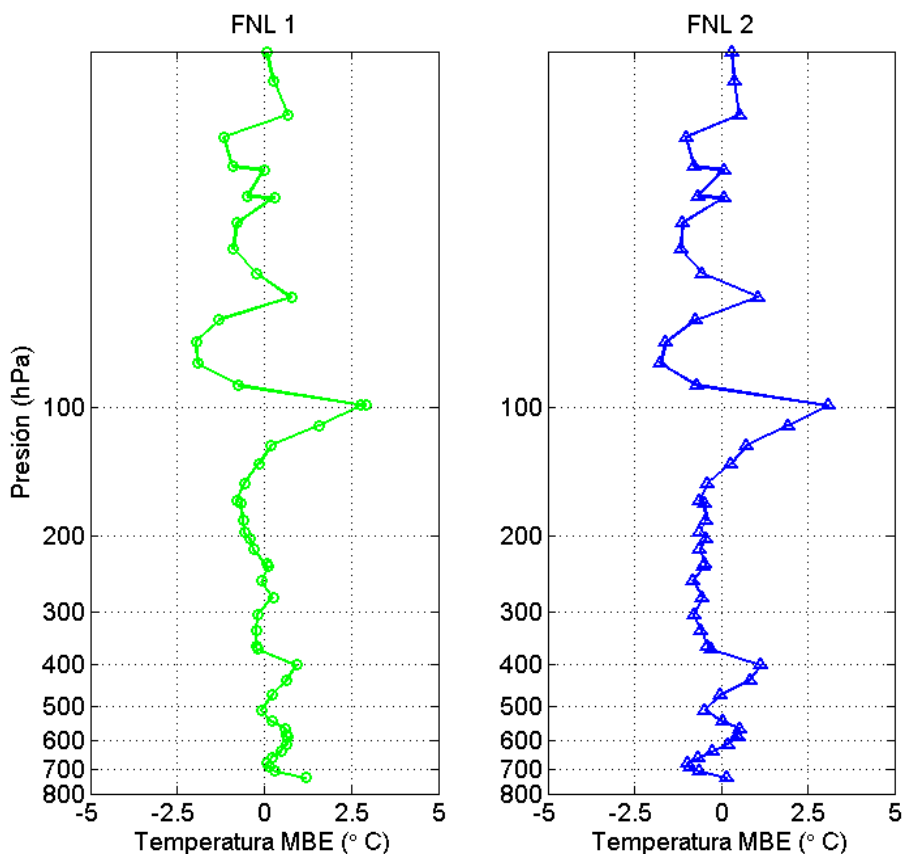


Figura 18. MBE de la temperatura de la configuración FNL1 y FNL2 del modelo WRF.

El análisis del perfil vertical de la temperatura permite ratificar que la altura de la tropósfera en Cumbayá-Ecuador está entre 16.5 y 17 km sobre el nivel del mar, con valores del CPT entre -78 °C y -87 °C . Se concluye que no existe una diferencia significativa entre los resultados de la configuración FNL1 y FNL2 del modelo WRF, y que dichos resultados tienen un sesgo menor a 2 °C hasta los 140 hPa (14.1 km aproximadamente). También se puede concluir que el modelo sobreestima el valor del CPT en 2.6 °C en promedio y que a partir de los 100 hPa el sesgo entre los resultados del modelo y los valores observados está entre -2.1 °C y 1.2 °C .

Humedad en el aire

Series de tiempo de la humedad relativa en superficie.

Las series de tiempo presentadas (Figuras 19-22), muestran el perfil diario de la humedad relativa de la EMA-USFQ, FNL1 y FNL2 para los dos días anteriores al lanzamiento de la radiosonda iMet de los cuatro casos de estudio seleccionados. En los cuatro casos de estudio, el perfil diario de la EMA-USFQ presenta la forma típica de campana invertida inversa a la temperatura (con máximos en horas de la madrugada y mínimos al medio día).

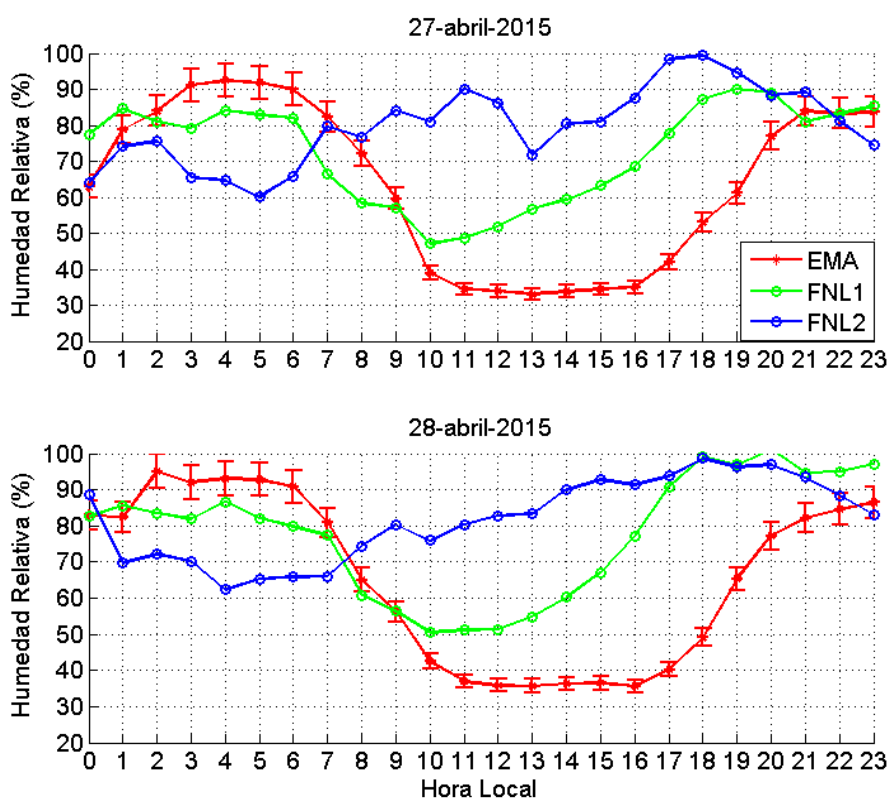


Figura 19. Perfil diario de la humedad relativa de los días 27- y 28-abril-2015. Las líneas representan los perfiles en superficie de, roja: EMA-USFQ, verde: configuración FNL1 del modelo WRF y azul: configuración FNL2 del modelo WRF. Las barras de error son 1σ basadas en la incertidumbre de los instrumentos de medición de la EMA-USFQ.

Para el 27 y 28 de abril de 2015, las observaciones de la EMA-USFQ presentan valores máximos de humedad relativa entre las 02h00 y 05h00 de hasta 95% y valores mínimos al

medio día entre 34% y 38%. Los resultados de la configuración FNL1, presentan valores máximos de hasta 100% entre las 19h00 y 20h00, y valores mínimos entre las 10h00 y 12h00 de hasta 47%. Los resultados de la configuración FNL2, presentan valores máximos entre las 17h00 y 18h00 con valores de hasta 100%, y valores mínimos de apenas 60% entre las 04h00 y 05h00. El perfil de la humedad relativa de la configuración FNL1 si se acerca al perfil de la humedad relativa observado en la EMA-USFQ, mientras que el perfil de la configuración FNL2 no se acerca a dicho perfil (no presenta la forma de campaña invertida con máximos en las horas de la madrugada y mínimos en horas del medio día). La configuración FNL1 sobreestima el valor de la humedad relativa en 40% en horas de la tarde (17h00 a 18h00), mientras que la configuración FNL2 sobreestima este valor en 50% entre las 11h00 hasta las 17h00.

El perfil de la humedad relativa observado en la EMA-USFQ para el 28 y 29 de junio de 2015 presenta máximos de hasta 80% entre las 05h00 y 06h00 y mínimos de hasta 25% en horas del mediodía. Los resultados de la configuración FNL1 presenta valores máximos de humedad relativa en horas de la noche y madrugada que llegan hasta 96%, y mínimos entre las 09h00 y 10h00 con valores de hasta 50%. Los resultados de la configuración FNL2 presentan máximos de hasta 100% entre las 17h00 y 19h00, mientras que los mínimos son de 60% entre las 04h00 y 05h00.

Se observa que los resultados de ambas configuraciones del modelo WRF sobreestiman el valor de la humedad relativa para el 28 y 29 de junio del 2015, siendo esta sobreestimación más pronunciada entre las 09h00 y 19h00.

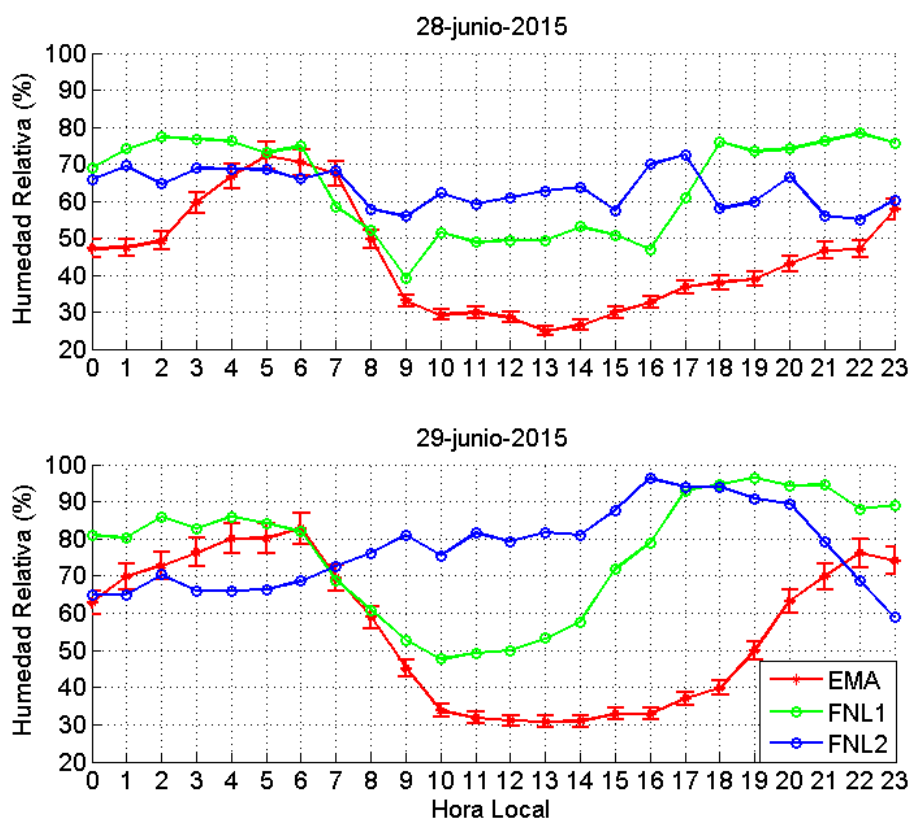


Figura 20. Perfil diario de la humedad relativa de los días 28 - y 29-junio-2015. Las líneas representan los perfiles en superficie de, roja: EMA-USFQ, verde: configuración FNL1 del modelo WRF y azul: configuración FNL2 del modelo WRF. Las barras de error son 1σ basadas en la incertidumbre de los instrumentos de medición de la EMA-USFQ.

Los valores máximos de humedad relativa observados en la EMA-USFQ para el 25 de agosto de 2015 son de hasta 90% entre las 02h00 y 05h00, mientras que para el 26 de agosto de 2015 dicho valor es de 85% a las 22h00. Los valores mínimos de la humedad relativa de la EMA-USFQ se dan al medio día y son de 33% y 26% para el 25 y 26 de agosto respectivamente. Los resultados de la configuración FNL1 del modelo WRF presenta máximos entre 92% y 98% entre las 18h00 y 19h00, mientras que sus mínimos varían entre 45 y 47% entre las 10h00 y 11h00. Los resultados de la configuración FNL2 presenta valores máximos que varían entre 90% y 96% en el intervalo de las 17h00 y 18h00. Los valores mínimos de estos resultados son de 62% entre las 12h00 y 13h00 para el 25 de agosto de

2015 y de 50% a entre las 04h00 y 05h00 para el 26 de agosto de 2015. En este caso de estudio, los resultados de la configuración FNL1 modelan de mejor manera el perfil observado en la EMA-USFQ con subestimaciones de hasta 20% entre las 00h00 y 08h00 y sobreestimaciones máximas de 40% en horas de la noche. La configuración FNL2 presenta subestimaciones entre las 00h00 y 06h00 de 30% y sobreestimaciones entre las 08h00 y 20h00 de hasta 50%.

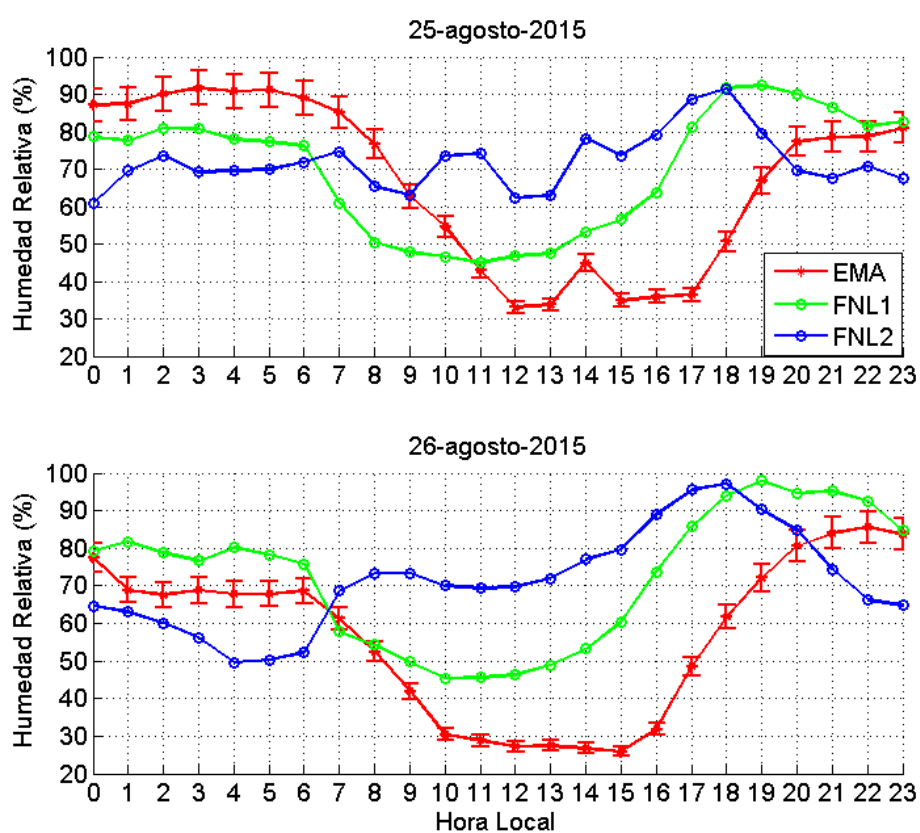


Figura 21. Perfil diurno de la humedad relativa de los días 25 - y 26-agosto-2015. Las líneas representan los perfiles en superficie de, roja: EMA-USFQ, verde: configuración FNL1 del modelo WRF y azul: configuración FNL2 del modelo WRF. Las barras de error son 1σ basadas en la incertidumbre de los instrumentos de medición de la EMA-USFQ.

El perfil de la humedad relativa observado en la EMA-USFQ para el 28 y 29 de septiembre de 2015 presenta máximos de hasta 72% entre las 02h00 y 05h00 y mínimos de hasta 23% en horas del mediodía. Los resultados de la configuración FNL1 presenta valores

máximos de humedad relativa en horas de la noche (19h00 y 21h00) que llegan hasta 98%, y mínimos entre las 08h00 y 11h00 con valores de hasta 30%. Los resultados de la configuración FNL2 presentan máximos de hasta 98% entre las 17h00 y 18h00, mientras que los mínimos van desde 58% en horas de la madrugada (22h00 y 01h00) para el 28 de septiembre y hasta 38% a las 05h00 para el 29 de septiembre. En este caso de estudio, los resultados de la configuración FNL1 del modelo presenta un mejor ajuste al perfil observado entre las 00h00 y 11h00 en la EMA-USFQ, a partir de este punto el modelo sobreestima los valores observados con valores de hasta 45%. Por otro lado, los resultados de la configuración FNL2 subestiman el valor observado en la EMA-USFQ entre las 00h00 y 03h00, y presenta sobreestimaciones a partir de 08h00.

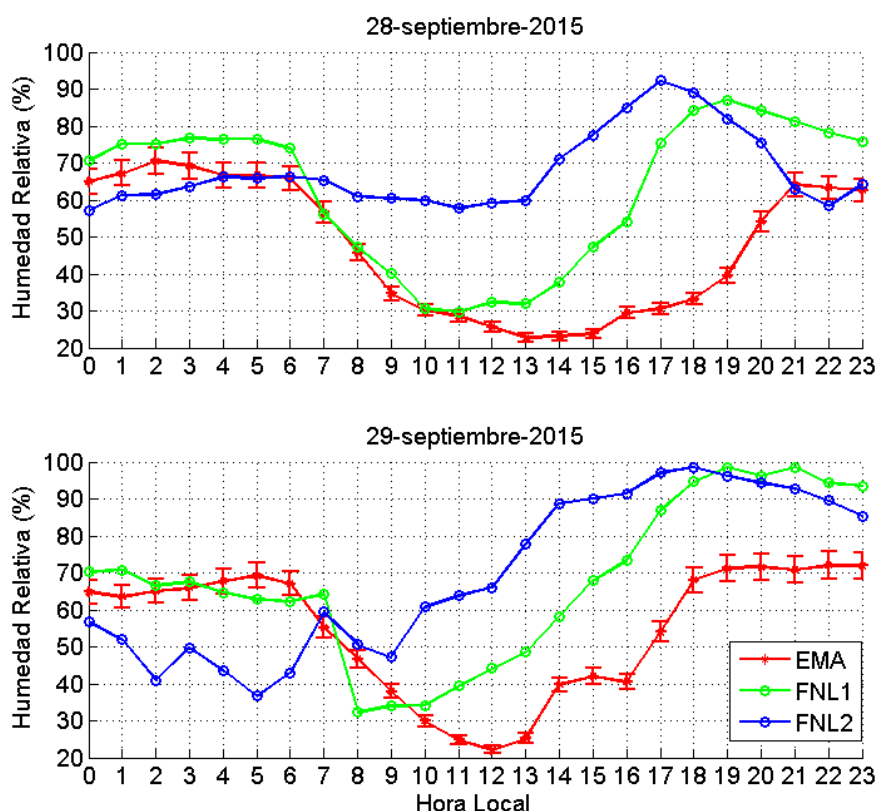


Figura 22. Perfil diario de la humedad relativa de los días 28 - y 29-septiembre-2015. Las líneas representan los perfiles en superficie de, roja: EMA-USFQ, verde: configuración FNL1 del modelo WRF y azul: configuración FNL2 del modelo WRF. Las barras de error son 1σ basadas en la incertidumbre de los instrumentos de medición de la EMA-USFQ.

En la Figura 23 se presenta el error cuadrático medio (RMSE) y el sesgo medio (MBE) para las observaciones de la EMA-USFQ vs. configuración FNL1 y las observaciones de la EMA-USFQ vs. configuración FNL2. El RMSE para FNL1 está entre 8% y 12% entre las 00h00 y 09h00. A partir de las 09h00 el RMSE incrementa hasta alcanzar un RMSE de 40% a las 17h00 y 18h00 (Figura 23). En este punto vuelve a disminuir hasta 12% a las 23h00. El sesgo medio para la configuración FNL1 es cercano a 0 entre las 03h00 y 06h00 y negativo (-8%) entre las 06h00 y 08h00 indicando que los resultados del modelo subestiman el valor observado en este intervalo de tiempo. A partir de las 08h00, los resultados de la configuración FNL1 del modelo, sobreestiman los valores observados por la EMA-USFQ con su pico de 40% entre las 17h00 y 18h00.

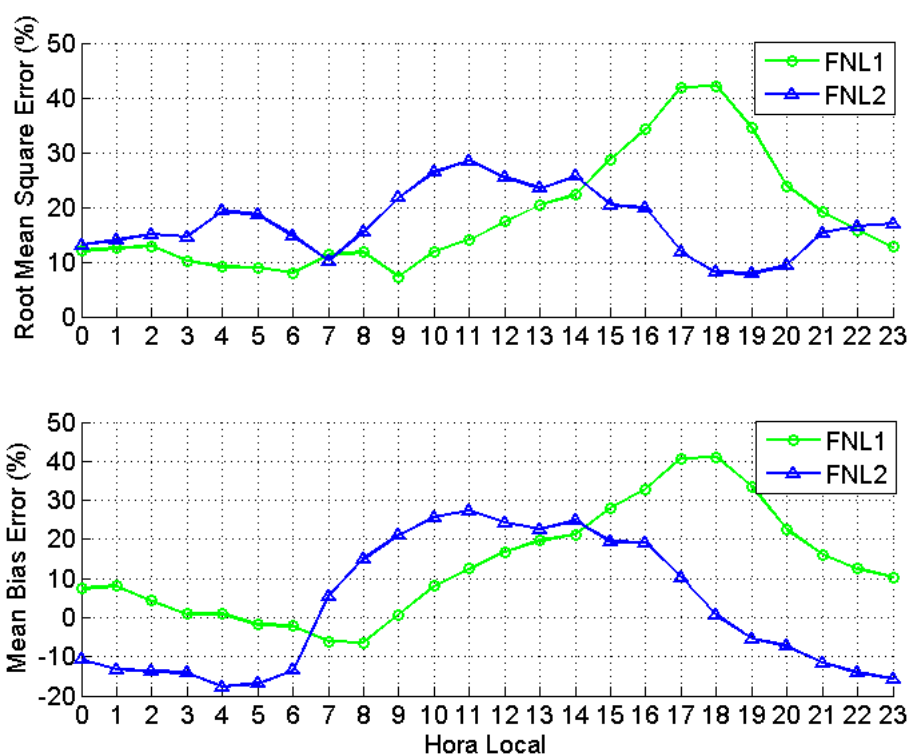


Figura 23. Error cuadrático medio (RMSE) y sesgo medio (MBE) de la humedad relativa en superficie. Observaciones de EMA vs. resultados de la configuración FNL1 (línea verde) y observaciones de EMA vs. resultados de la configuración FNL2 (línea azul).

Por otro lado, el RMSE para FNL2 está entre 10% y 20% entre las 00h00 y 08h00. A partir de las 08h00 el RMSE incrementa con su pico a las 11h00 de 40%, punto en el que vuelve a disminuir hasta alcanzar un RMSE de 8% a las 18h00 y 19h00. El sesgo medio para la configuración FNL2 es de -10% y -20% entre las 00h00 y 06h00. A partir de las 06h00 aumenta hasta llegar a 30% a las 11h00, punto en el que vuelve a disminuir llegando a -15% a las 23h00.

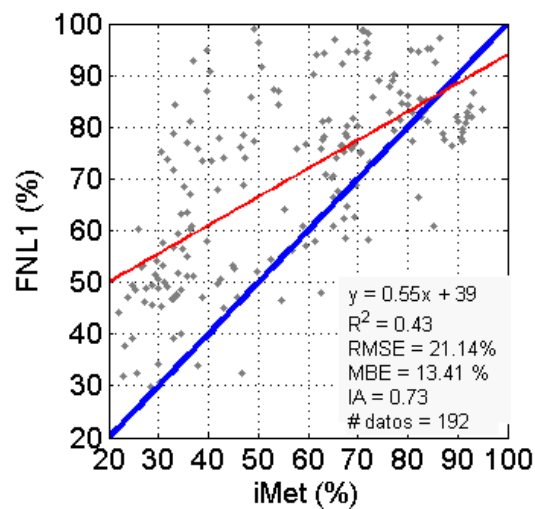


Figura 24. Gráfico de dispersión de puntos de los perfiles diurnos de humedad relativa medida y modelada (FNL1). En ambos gráficos la línea azul es la línea 1:1 y la línea roja es la regresión lineal entre los datos de temperatura medidos y modelados.

En la Figura 24 se muestra el perfil de dispersión de los datos para la humedad relativa en superficie de la configuración FNL1, para los 4 casos de estudio y las 48 horas modeladas. La configuración FNL1 presenta un coeficiente de correlación del 0.43, con una pendiente de 0.55 y un índice de aceptación de 0.73. La dispersión de datos para la configuración FNL2 no se ha reportado debido a la inexistencia de correlación entre las observaciones de la EMA-USFQ y los datos de dicha configuración.

Perfil vertical de la fracción másica de vapor de agua (Q).

En la Figuras 25-28 se muestran los perfiles verticales superpuestos de la fracción másica de vapor de agua para cada caso en estudio.

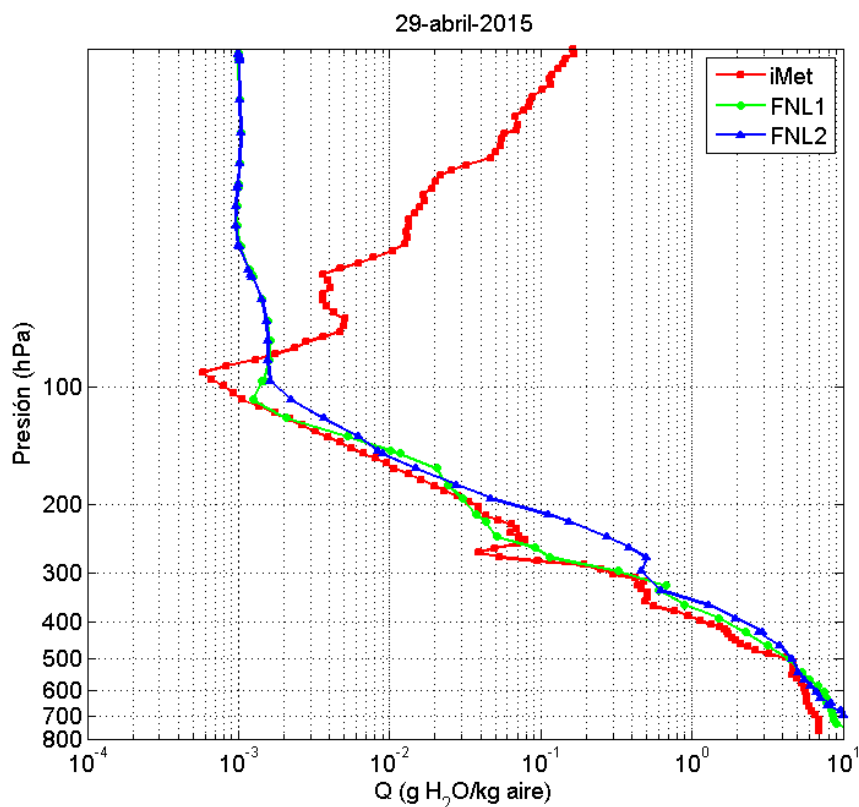


Figura 25. Perfil vertical de la fracción másica de vapor de agua del día 29-abril-2015. Hora local de lanzamiento 12h00. La línea roja representa el perfil de la radiosonda (iMet), la línea verde el perfil de la configuración FNL1 del modelo WRF y la línea azul el perfil de la configuración FNL2 del modelo WRF.

La fracción másica del vapor de agua, tiene un perfil vertical que desciende exponencialmente con la altura. Las observaciones de la radiosonda iMet para el 29 de abril de 2015 (Figura 25) presenta el perfil vertical de la fracción másica de vapor de agua con un mínimo en 100 hPa (17 km aproximadamente), punto que coincide con el punto más frío de la tropósfera. A partir de este punto las observaciones del radiosondeo registran un aumento en la fracción másica de vapor de agua. Los resultados de las configuraciones FNL1

y FNL2 tienen el mismo perfil vertical que los datos observados por la radiosonda en la tropósfera, sin embargo, sobreestiman el valor mínimo de esta variable y no disminuyen a partir de los 100 hPa como lo hace el modelo.

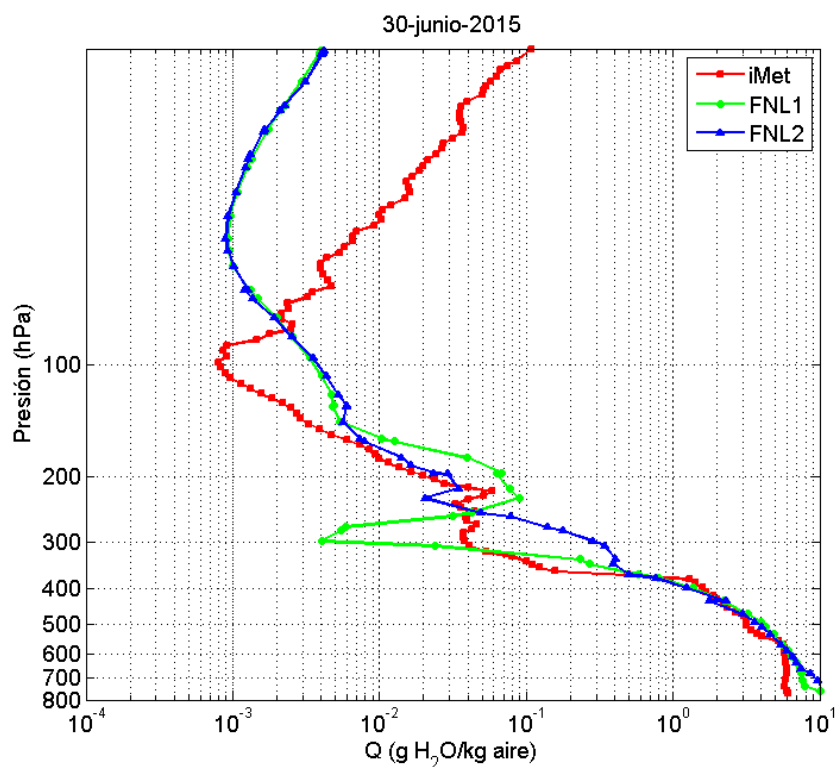


Figura 26. Perfil vertical de la fracción másica de vapor de agua del día 30-junio-2015. Hora local de lanzamiento 13h00. La línea roja representa el perfil de la radiosonda (iMet), la línea verde el perfil de la configuración FNL1 del modelo WRF y la línea azul el perfil de la configuración FNL2 del modelo WRF.

El perfil vertical de la fracción másica de vapor de agua registrado por la radiosonda para el 30 de junio de 2015 (Figura 26) disminuye exponencialmente con la altura, presentando un mínimo alrededor de los 100 hPa (17 km aproximadamente). Los resultados de la configuración FNL1 presentan una disminución importante de la fracción másica del vapor de agua en 300 hPa. Ambas configuraciones sobreestiman el valor mínimo de esta variable y no reproducen el perfil observado por la radiosonda iMet a partir de los 180 hPa (13.7 km aproximadamente).

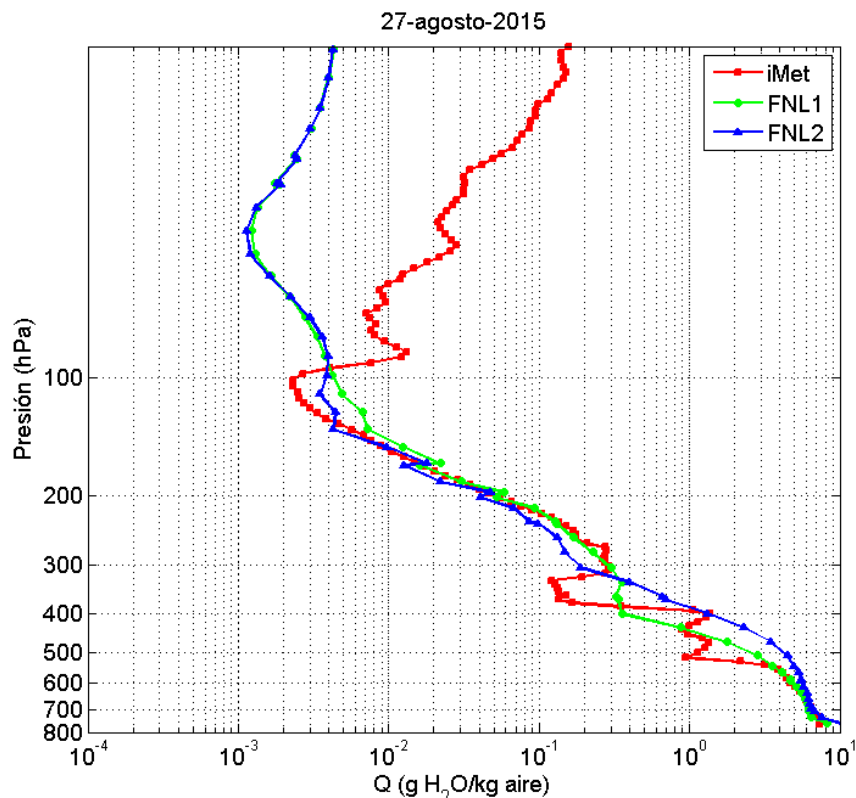


Figura 27. Perfil vertical de la fracción másica de vapor de agua del día 27-agosto-2015. Hora local de lanzamiento 09h00. La línea roja representa el perfil de la radiosonda (iMet), la línea verde el perfil de la configuración FNL1 del modelo WRF y la línea azul el perfil de la configuración FNL2 del modelo WRF.

Las observaciones de la radiosonda iMet del perfil vertical de la fracción másica de vapor de agua para el 27 de agosto de 2015, presenta desviaciones del perfil típico de esta variable entre 500 y 400 hPa y 330 y 340 hPa, dichas desviaciones son simuladas de mejor manera por los resultados de la configuración FNL1. Además, las observaciones de la radiosonda iMet presentan un mínimo alrededor de 100 hPa. Los resultados de la configuración FNL1 y FNL2 no reproducen de manera adecuada este valor, sobreestimándolo al igual que en los otros casos de estudio. A partir de este punto, los resultados de las configuraciones del modelo subestiman el valor observado por la radiosonda iMet.

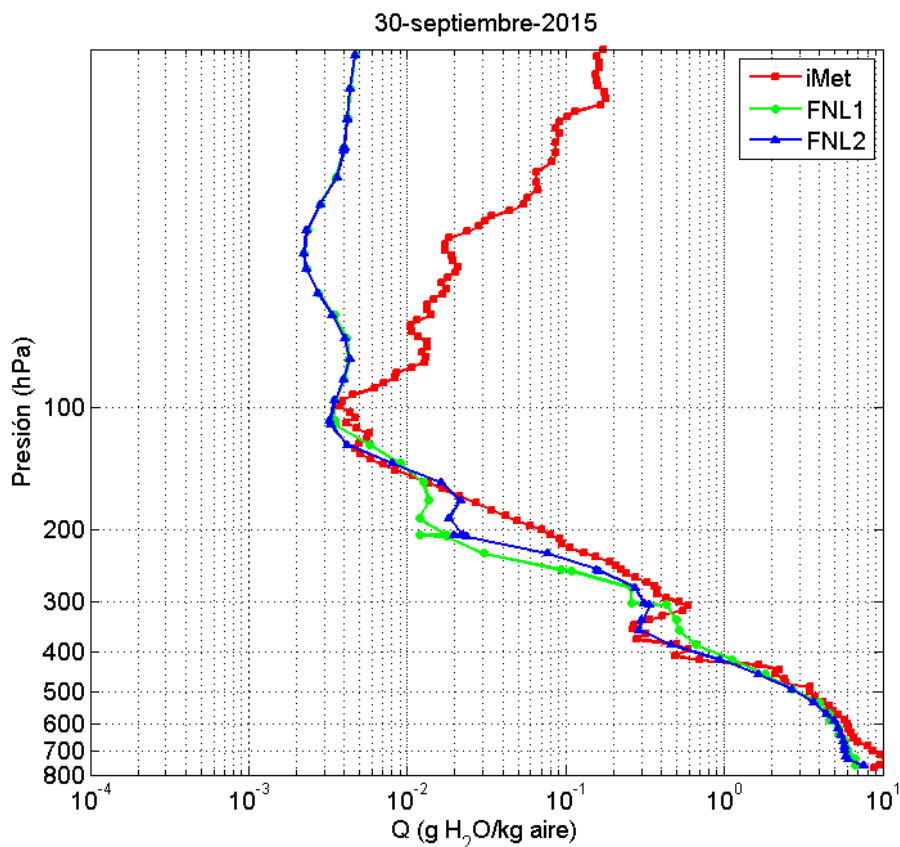


Figura 28. Perfil vertical de la humedad relativa del día 30-septiembre-2015. Hora local de lanzamiento 07h00. La línea roja representa el perfil de la radiosonda, la línea verde el perfil de la primera configuración (FNL1) del modelo WRF y la línea azul el perfil de la segunda configuración (FNL2) del modelo WRF.

Las observaciones de la radiosonda iMet del perfil vertical de la fracción másica de vapor de agua para el 30 de septiembre de 2015 presenta mínimos alrededor de 100 hPa (17 km aproximadamente) que son simulados correctamente por los resultados de las configuraciones FNL1 y FNL2 del modelo. Además, los datos de la radiosonda iMet muestra que entre 350 y 300 hPa se presenta una inversión del perfil típico de esta variable. Dicha inversión es capturada por los resultados de ambas configuraciones del modelo WRF.

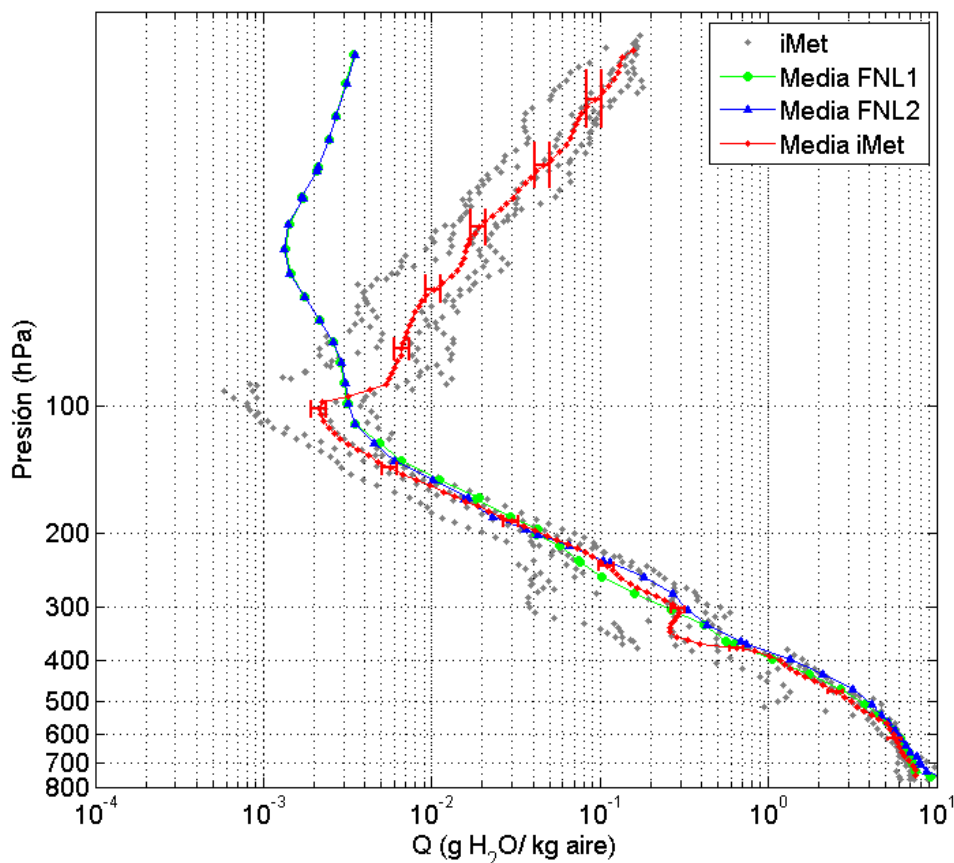


Figura 29. Dispersión de los datos de la fracción másica de vapor de agua medida para los cuatro casos de estudio. Las líneas representan los perfiles promedio de: línea roja: radiosonda iMet, la línea verde: configuración FNL1 del modelo WRF y la línea azul: configuración FNL2 del modelo WRF. Las barras de error son 1σ basadas en la incertidumbre de la radiosonda iMet.

En la Figura 29 se observa la falta de correlación de datos entre los resultados de la configuración FNL1 y FNL2 a partir de 140 hPa. Los resultados del modelo, sobreestiman el punto mínimo de la fracción másica de vapor de agua observado por la radiosonda iMet y subestima en valor observado a partir de 96 hPa.

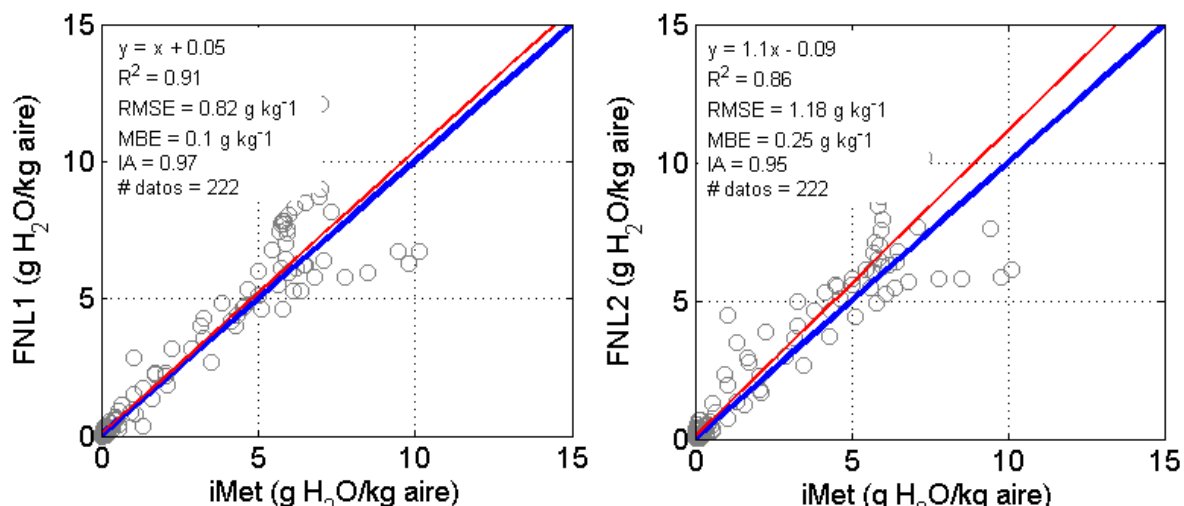


Figura 30. Gráfico de dispersión de puntos de los perfiles verticales de fracción másica de vapor de agua medida vs. resultados de configuraciones FNL1 y FNL2 del modelo WRF. En ambos gráficos la línea azul es la línea 1:1 mientras que la línea roja es la regresión lineal entre los datos de temperatura medidos y modelados.

La Figura 30 muestra el perfil de dispersión de los datos de la fracción másica del vapor de agua para los 4 casos de estudio. El coeficiente de correlación para la configuración FNL1 y FNL2 es 0.91 y 0.86 respectivamente. El índice de aceptación (IA) es de 0.97 y 0.95 para la configuración FNL1 y FNL2 respectivamente. Dichos valores no representan las desviaciones observadas a partir de 96 hPa debido a que los valores a partir de este punto son muy cercanos a cero, por lo tanto su dispersión será mínima.

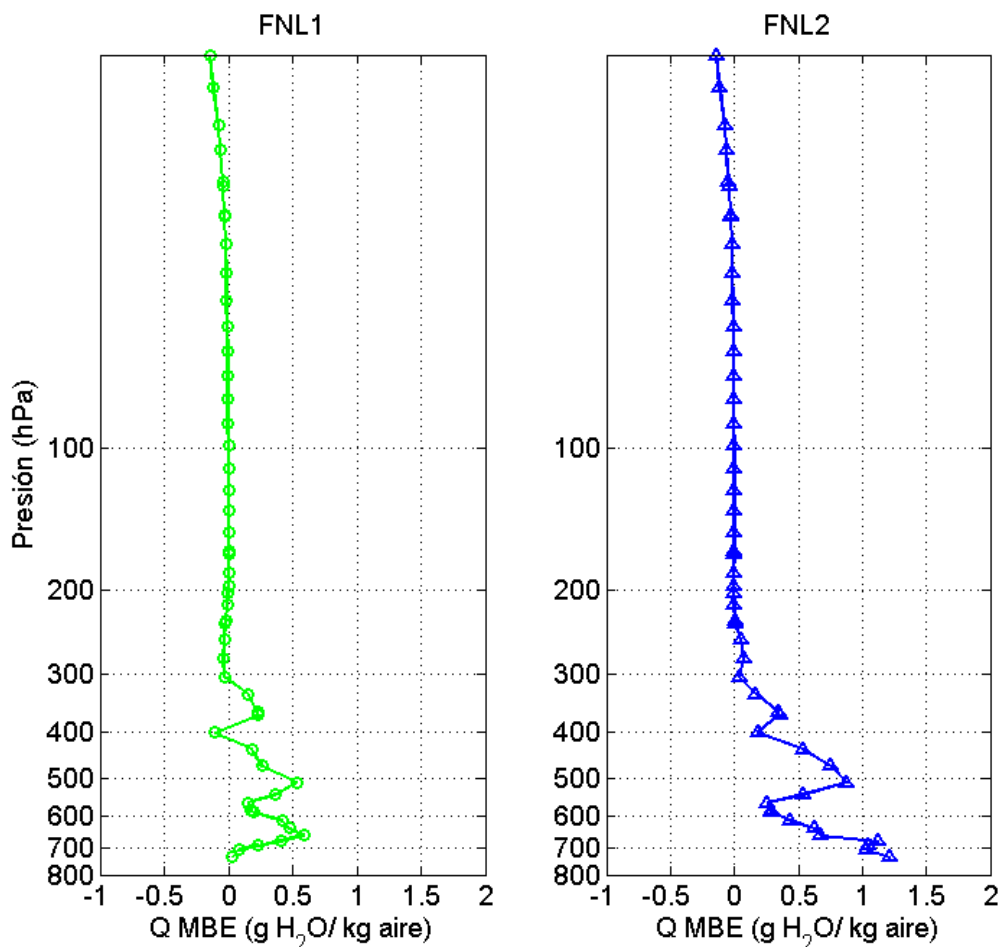


Figura 31. MBE de la fracción másica de vapor de agua de la configuración FNL1 y FNL2 del modelo WRF.

En la Figura 31, se puede observar el MBE para la configuración FNL1 y FNL2 del modelo con respecto al valor obtenido de la radiosonda iMet. Es evidente que el error promedio más grande se da en superficie, con valores de hasta 1.25 g H₂O/kg aire. Los resultados del WRF indican que hasta los 300 hPa (10 km aproximadamente), el modelo sobreestima los valores medidos por la radiosonda mientras que a partir de los 100 hPa (17 km) vemos una leve tendencia a subestimar dichos valores. Esto se evidencia más fácilmente en los perfiles verticales antes expuestos.

Velocidad del viento

Series de tiempo de la velocidad del viento en superficie.

Las series de tiempo presentadas (Figuras 32-35), muestran el perfil diurno de la velocidad del viento de la EMA-USFQ, FNL1 y FNL2. La velocidad presenta un perfil diurno con máximos en las horas de mediodía y mínimos a primeras horas de la mañana y en la noche, dicho perfil tiene relación directa con la temperatura, ya que con el calentamiento de la superficie se promueve el movimiento de masas de aire.

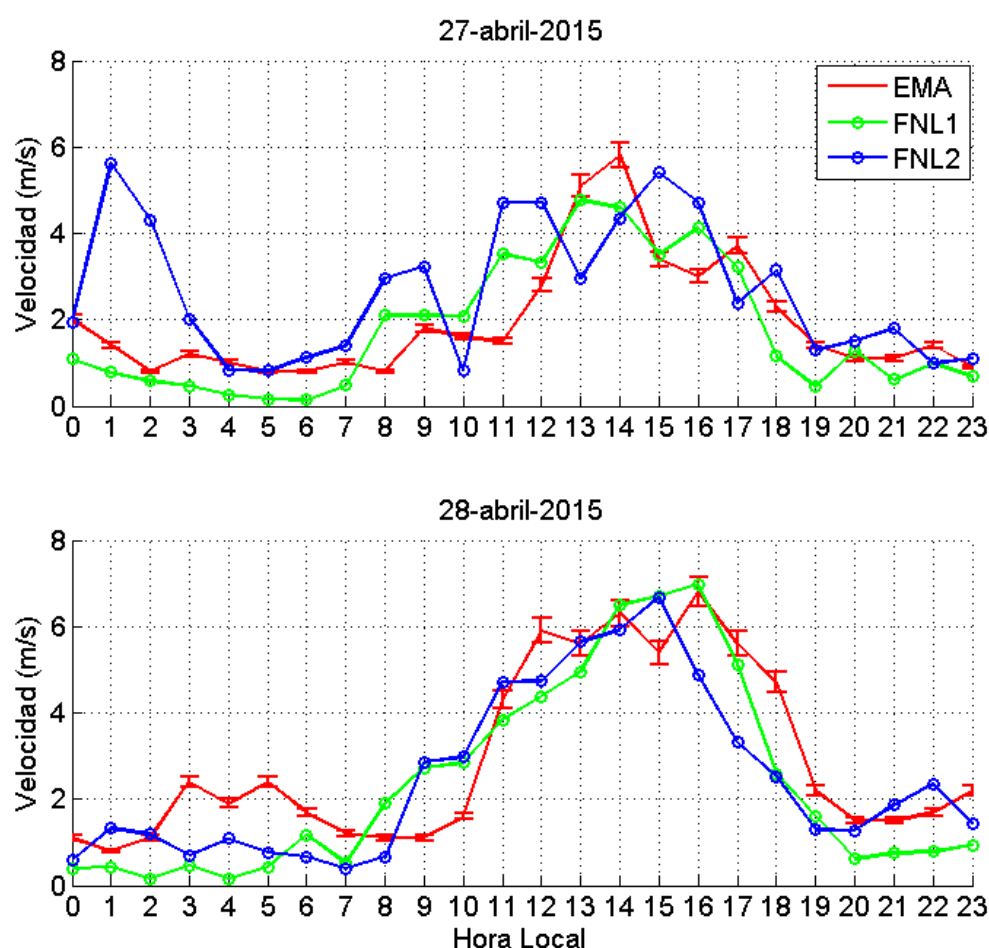


Figura 32. Perfil diurno de la velocidad del viento de los días 27 - y 28-abril-2015. Las líneas representan los perfiles en superficie de, roja: EMA-USFQ, verde: configuración FNL1 del modelo WRF y azul: configuración FNL2 del modelo WRF. Las barras de error son 1σ basadas en la incertidumbre de los instrumentos de medición de la EMA-USFQ.

La Figura 32 muestra los perfiles diurnos de la velocidad del viento para el 27 y 28 de abril de 2015. Los datos de la EMA-USFQ reportan valores máximos de hasta 7 m/s entre las 14h00 y 16h00, y valores mínimos entre las 06h00 y 09h00 cercanos a 1 m/s. Los resultados de la configuración FNL1 presentan valores máximos de 7 m/s entre las 14h00 y 16h00 y valores mínimos de hasta 0.2 m/s entre las 02h00 y 06h00. Por otro lado, los resultados de la configuración FNL2 presentan valores máximos de 6.8 m/s entre las 14h00 y 16h00 y valores mínimos de hasta 0.5 m/s a las 07h00. Los resultados de la configuración FNL2 sobreestima el valor observado registrado en la EMA-USFQ en 3 m/s entre las 00h00 y 03h00. En general, la configuración FNL1 simula bien las observaciones de la EMA-USFQ capturando los máximos y mínimos en los rangos temporales adecuados.

La velocidad del viento registrada en la EMA-USFQ para el 28 y 29 de junio de 2015 presenta máximos entre 7 m/s y 8 m/s entre las 11h00 y 14h00 y mínimos cercanos a 1 m/s entre las 04h00 y 07h00. Por otro lado, los resultados de las configuraciones FNL1 y FNL2 presentan máximos de hasta 14 m/s a las 11h00 y mínimos de 2 m/s entre las 15h00 y 23h00 para el 28 de junio de 2015, el pico de velocidad del viento de los resultados de ambas configuraciones sobreestiman el valor observado en la EMA-USFQ en 6 m/s aproximadamente. Para el 29 de junio de 2015, los máximos y mínimos de los resultados de la configuración FNL1 son 6 m/s entre las 13h00 y 16h00 y 0.3 m/s entre las 03h00 y 06h00, respectivamente. Para los resultados de la configuración FNL2, los máximos van desde 4 m/s hasta 6 m/s entre las 00h00 y 07h00 (período en el que los resultados de esta configuración sobreestiman el valor observado en la EMA-USFQ en 5 m/s aproximadamente) y entre las 13h00 y 15h00. Por otro lado, los mínimos de 1.6 m/s y 1.7 m/s se presentan a las 08h00 y 19h00 respectivamente.

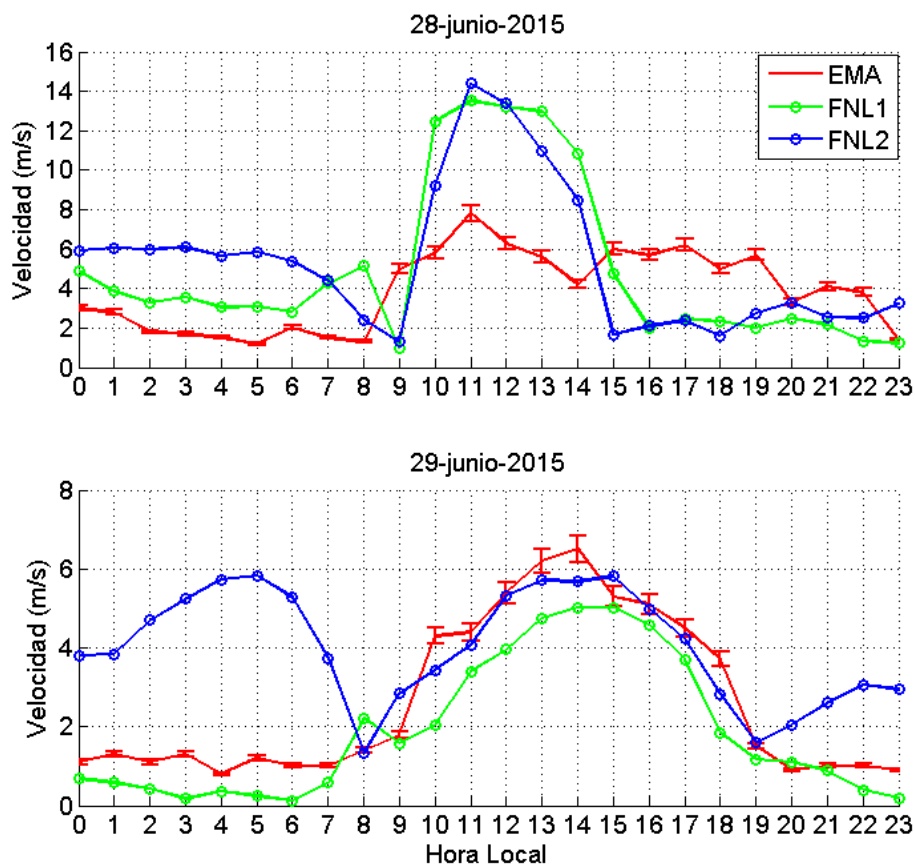


Figura 33. Perfil diario de la velocidad del viento de los días 28 - y 29-junio-2015. Las líneas representan los perfiles en superficie de, roja: EMA-USFQ, verde: configuración FNL1 del modelo WRF y azul: configuración FNL2 del modelo WRF. Las barras de error son 1σ basadas en la incertidumbre de los instrumentos de medición de la EMA-USFQ.

La velocidad del viento registrada en la EMA-USFQ para el 25 y 26 de agosto de 2015 presenta máximos de 6 m/s entre las 11h00 y 15h00 y mínimos cercanos a 1 m/s entre las 02h00 y 07h00 y entre las 18h00 y 23h00. Por otro lado, los resultados de la configuración FNL1 presentan máximos de 5 m/s entre las 14h00 y 16h00 y mínimos entre 1 m/s y 2 m/s entre las 00h00 y 05h00 y entre las 19h00 y 20h00. Por último, los resultados de la configuración FNL2 presentan máximos de 7.5 m/s a las 04h00 y 13h00. Los mínimos de esta configuración se dan entre las 18h00 y 20h00 con valores entre 1.5 m/s y 1.8 m/s. Los

valores de los resultados de la configuración FNL2 entre las 00h00 y 06h00 sobrestiman el valor observado en la EMA-USFQ en 6 m/s.

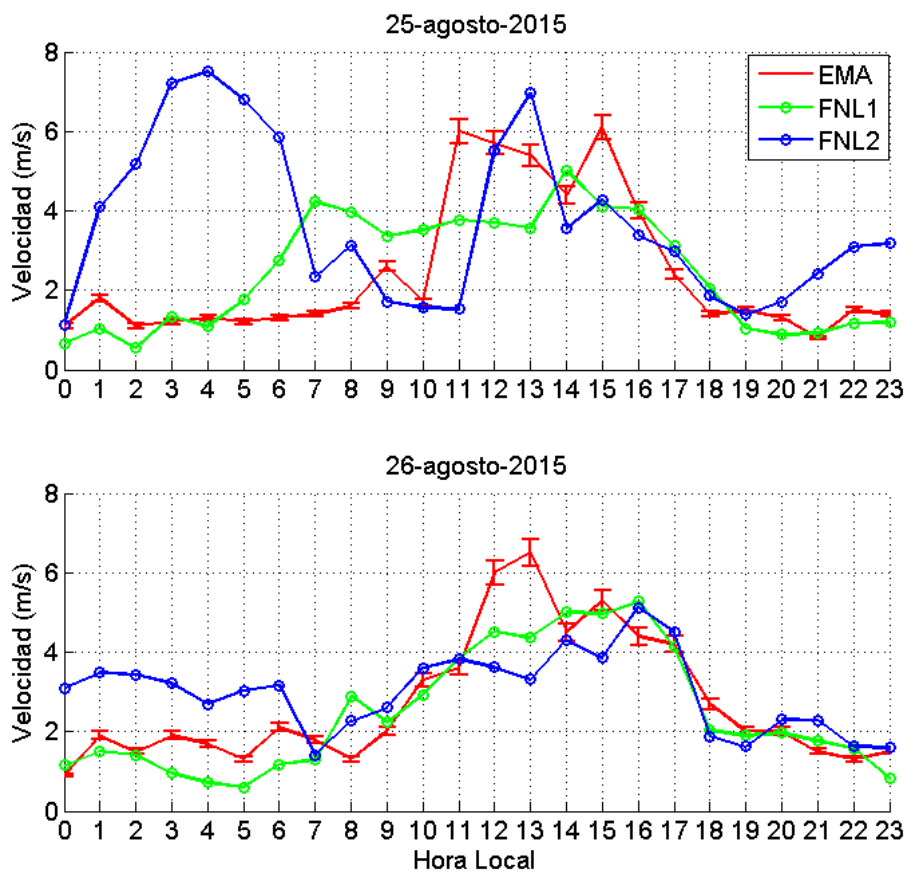


Figura 34. Perfil diurno de la velocidad del viento de los días 25 - y 26-agosto-2015. Las líneas representan los perfiles en superficie de, roja: EMA-USFQ, verde: configuración FNL1 del modelo WRF y azul: configuración FNL2 del modelo WRF. Las barras de error son 1σ basadas en la incertidumbre de los instrumentos de medición de la EMA-USFQ.

Para el 28 y 29 de septiembre de 2015, la velocidad del viento observada en la EMA-USFQ para presenta máximos de 7 m/s entre 11h00 y 16h00 y mínimos cercanos a 1 m/s entre las 00h00 y 07h00 y 21h00 y 23h00. Los resultados de la configuración FNL1 presentan máximos de 7 m/s entre las 13h00 y 16h00 y mínimos de 1 m/s entre las 00h00 y 04h00 y 21h00 y 23h00. Por último, los resultados de la configuración FNL2 presentan máximos de 7.7 m/s a las 13h00 y 17h00. Los mínimos de esta configuración se dan entre las 18h00 y 21h00 con valores entre 1.8 m/s y 2 m/s.

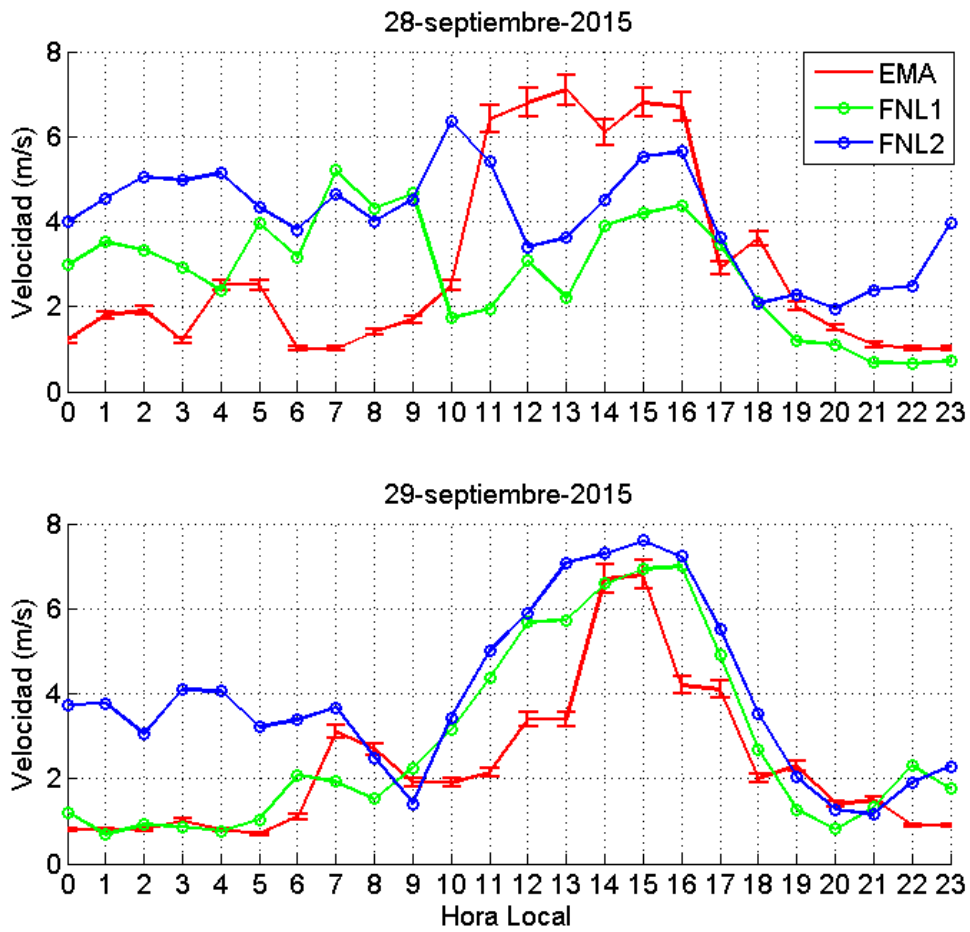


Figura 35. Perfil diario de la velocidad del viento de los días 28 - y 29-septiembre-2015. Las líneas representan los perfiles en superficie de, roja: EMA-USFQ, verde: configuración FNL1 del modelo WRF y azul: configuración FNL2 del modelo WRF. Las barras de error son 1σ basadas en la incertidumbre de los instrumentos de medición de la EMA-USFQ.

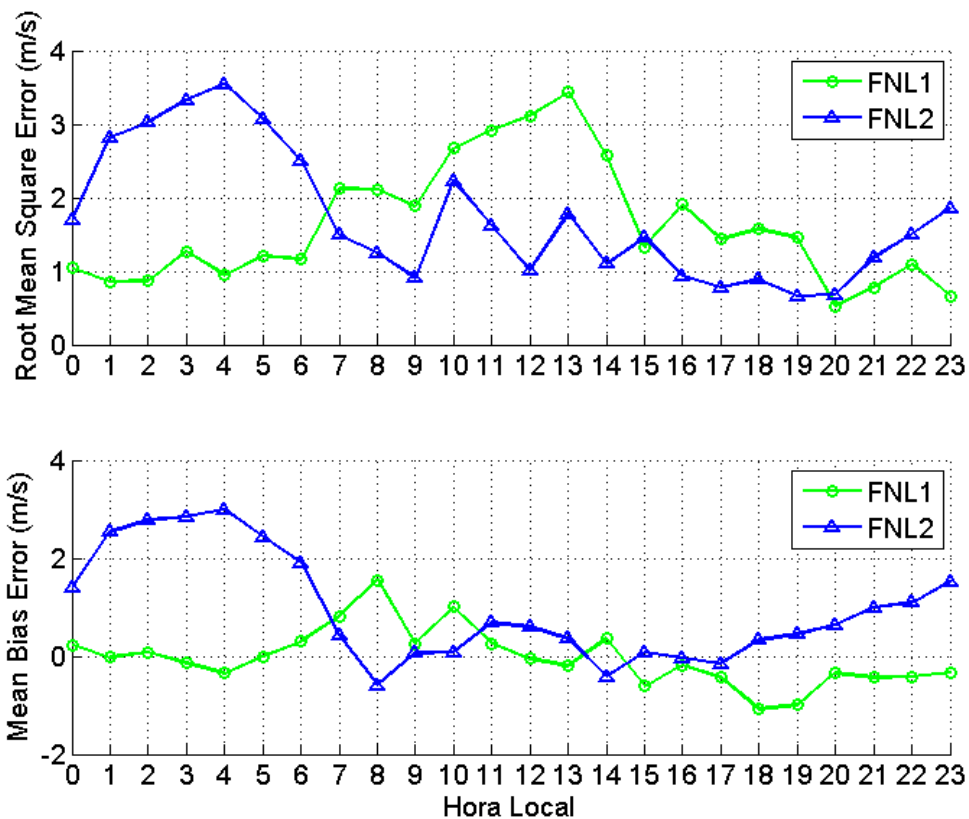


Figura 36. Error cuadrático medio (RMSE) y sesgo medio (MBE) de la velocidad del viento en superficie. Observaciones de EMA vs. resultados de la configuración FNL1 (línea verde) y observaciones de EMA vs. resultados de la configuración FNL2 (línea azul).

En la Figura 36 se observa que el RMSE para los resultados de la configuración FNL1 es de 1m/s aproximadamente entre las 00h00 y las 06h00. A partir de este punto aumenta hasta alcanzar un valor máximo a las 13h00 de 3.5 m/s, en donde empieza a disminuir nuevamente hasta valores menores a 1 m/s a las 23h00. El RMSE para los resultados de la configuración FNL2 es mayor entre la 01h00 y 06h00 presentando valores máximos de 4.5 m/s en este período de tiempo. A partir de las 09h00 el RMSE de estos resultados varía entre 1 m/s y 2 m/s (Figura 36). El sesgo medio para los resultados de la configuración FNL1 son cercanos a 0 m/s entre las 00h00 y 05h00 y llegan a valores máximos de 1.5 m/s a las 08h00 y -1 m/s entre las 18h00 y 19h00. Para los resultados de la configuración FNL2, los sesgos medios más altos se presentan entre las 00h00 y 06h00 horas con valores entre 2 y 3 m/s, lo

que indica que dicha configuración sobreestima los valores de la velocidad en este intervalo temporal, con un perfil que no es típico de la velocidad del viento en superficie. A partir de las 08h00 y hasta las 17h00, los valores de sesgo medio son cercano a 0 m/s, desde las 18h00 estos valores aumente llegando a un máximo de 1.7 m/s a las 23h00.

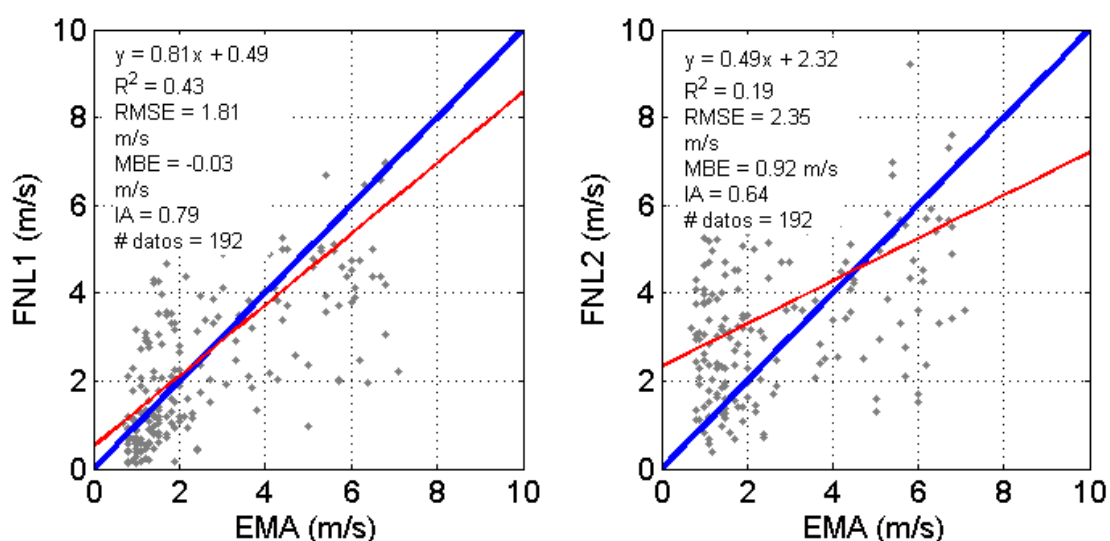


Figura 37. Gráfico de dispersión de puntos de los perfiles diarios de velocidad del viento medida y modelada (FNL1) y velocidad del viento medida y modelada (FNL2). En ambos gráficos la línea azul es la línea 1:1 y la línea roja es la regresión lineal entre los datos de temperatura medidos y modelados.

La Figura 37 muestra el gráfico de dispersión de los datos de la velocidad para los 4 casos de estudio y las 48 horas modeladas. Dicha dispersión muestra que la configuración FNL1 del modelo WRF tiene un mejor ajuste a los datos medidos con un R^2 de 0.43 y una pendiente de 0.81, mientras que la configuración FNL2 del modelo WRF presenta un R^2 de 0.19 y una pendiente de 0.49. El índice de aceptación para FNL1 y FNL2 es 0.79 y 0.64 respectivamente. Dichos resultados, junto con el análisis de los perfiles del RMSE y MBE sugieren que la configuración FNL1 es la mejor opción para la simulación de la velocidad del viento en superficie.

Perfil vertical de la velocidad del viento.

En las Figuras 38-41 se muestran los perfiles verticales de la velocidad para cada caso de estudio. El perfil de la velocidad del 29 de abril, muestra un comportamiento errático de la misma con valores entre 1 y 15 hasta los 50 hPa, altura en la que la temperatura aumenta hasta llegar a 30 m/s. Cerca de 180 hPa, la velocidad del viento registrada por la radiosonda disminuye hasta 1 m/s, valor que no es registrado por los resultados de las configuraciones FNL1 y FNL2 que presentan velocidades de hasta 15 m/s en este punto. A los 100 hPa, los resultados del radiosondeo registran un aumento de la velocidad del viento hasta 16 m/s, valor que tampoco es capturado por los resultados del modelo. Este cambio en la velocidad es importante porque demuestra el esfuerzo cortante del aire en el cambio entre capas atmosféricas.

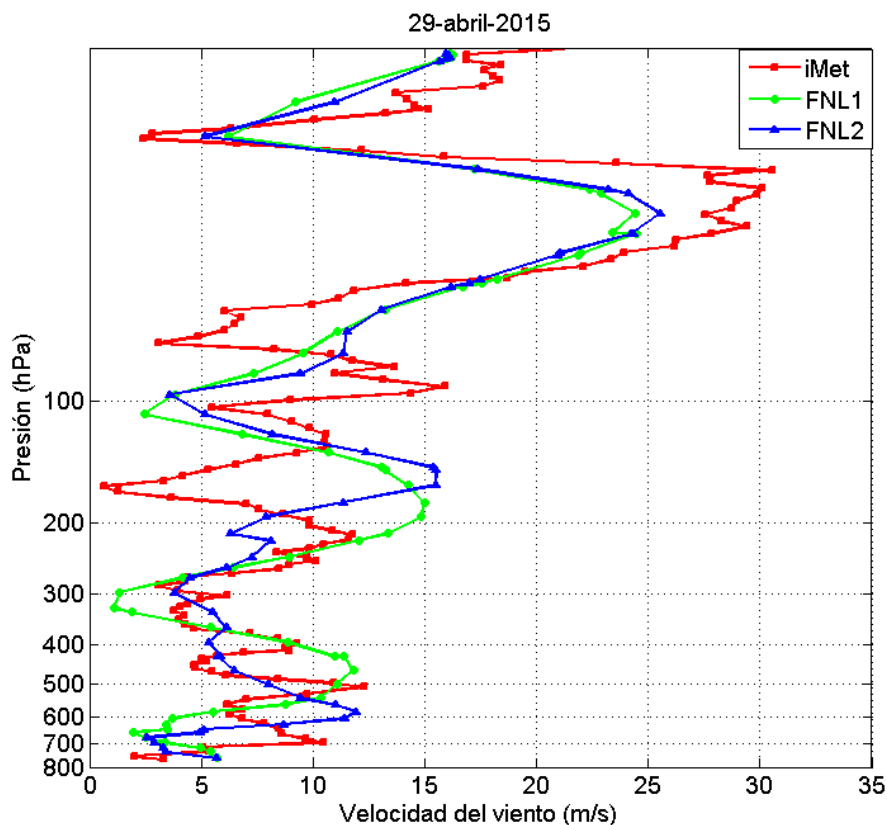


Figura 38. Perfil vertical de la velocidad del viento del 29-abril-2015. Hora local de lanzamiento 12h00. La línea roja representa el perfil de la radiosonda, la línea verde el perfil de la primera configuración (FNL1) del modelo WRF y la línea azul el perfil de la segunda configuración (FNL2) del modelo WRF.

El 30 de junio de 2015 presenta velocidades que van desde 1 m/s hasta 19 m/s en la tropósfera y hasta 23 m/s en la estratósfera. Este día presenta un aumento en la velocidad del viento correspondiente al esfuerzo cortante a los 140 hPa con valores de hasta 19 m/s, dicho cambio en la velocidad del viento es capturado por los resultados de ambos modelos a los 150 hPa con picos de 13 m/s y 17 m/s para la configuración FNL1 y FNL2 respectivamente.

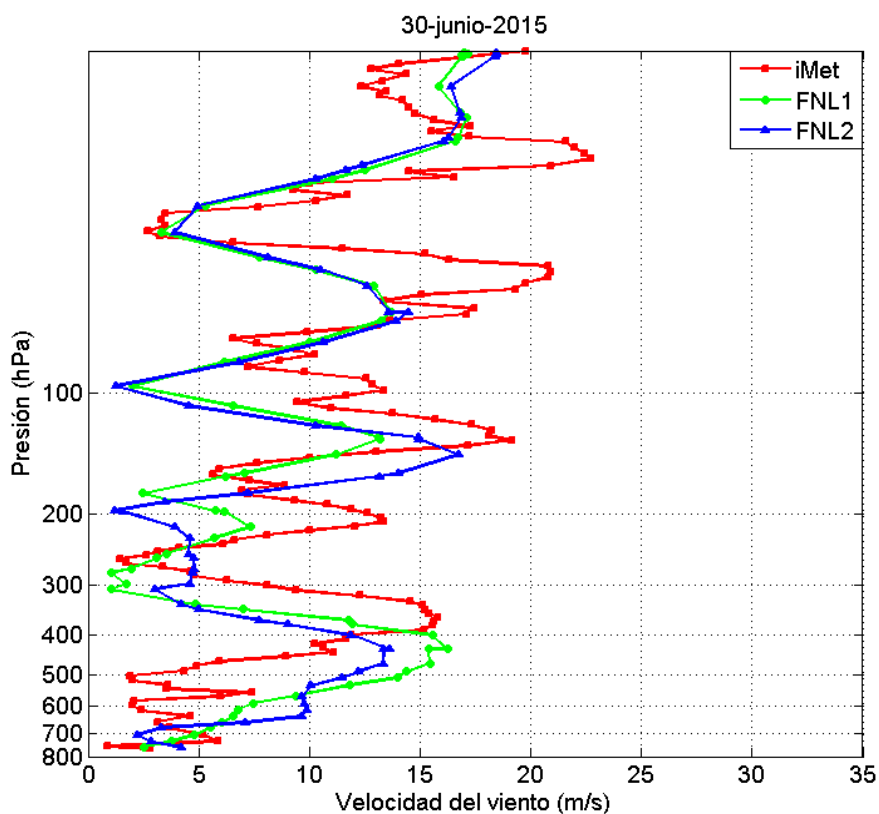


Figura 39. Perfil vertical de la velocidad del viento del día 30-junio-2015. Hora local de lanzamiento 13h00. La línea roja representa el perfil de la radiosonda, la línea verde el perfil de la primera configuración (FNL1) del modelo WRF y la línea azul el perfil de la segunda configuración (FNL2) del modelo WRF.

El 27 de agosto de 2015 muestra velocidades del viento en la tropósfera entre 1 y 15 m/s, llegando hasta 22 m/s en la estratósfera (datos de radiosondeo). Se evidencia el cambio en la velocidad del viento debido al esfuerzo cortante a los 100 hPa con velocidades de viento de 20 m/s. Los resultados del modelo, no capturan bien este aumento en la velocidad del viento con velocidades máximas de apenas 10 m/s.

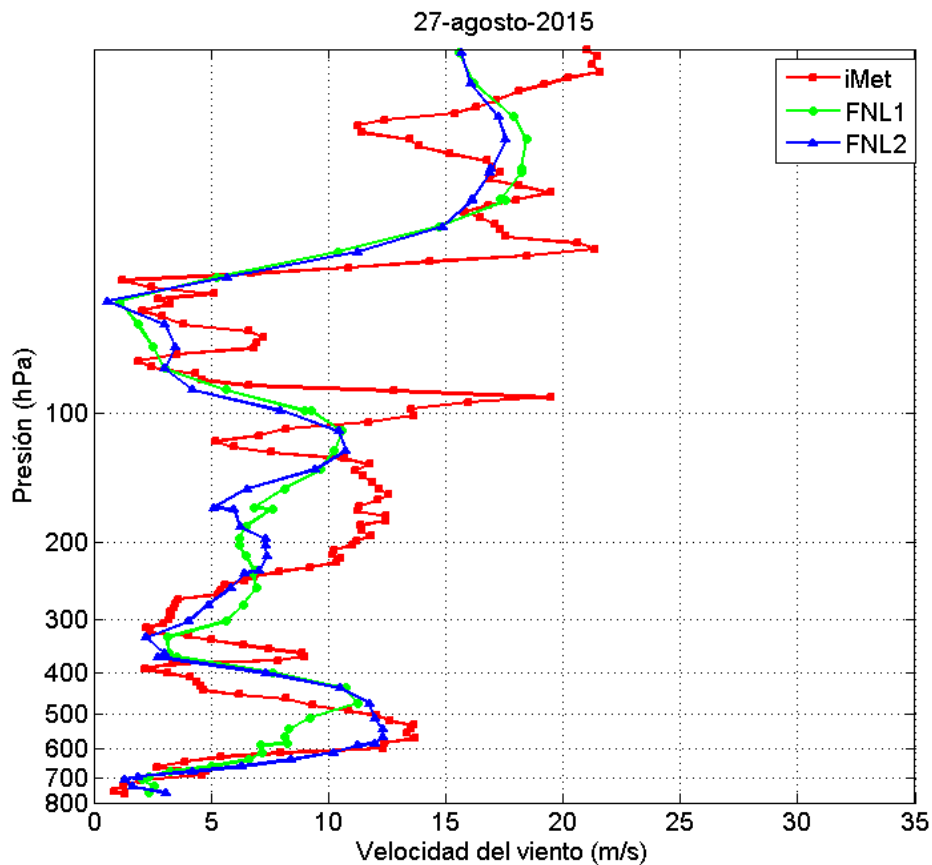


Figura 40. Perfil vertical de la velocidad del viento del día 27-agosto-2015. Hora local de lanzamiento 09h00. La línea roja representa el perfil de la radiosonda, la línea verde el perfil de la primera configuración (FNL1) del modelo WRF y la línea azul el perfil de la segunda configuración (FNL2) del modelo WRF.

Finalmente, el perfil de la velocidad del viento registrado por la radiosonda para el 30 de septiembre de 2015, presenta velocidades entre 1 y 13 m/s en toda la trayectoria. Los resultados de la configuración FNL1 y FNL2 presentan pico de hasta 18 m/s y 21 m/s respectivamente. En este caso de estudio, el aumento de la velocidad del viento debido al esfuerzo cortante sucede cerca de los 100 hPa con valores de 13 m/s (valor registrado por la radiosonda), mientras que los resultados del modelo simulan dicho cambio entre los 200 hPa (FNL1) y 180 hPa (FNL2) con valores máximos de 18 m/s y 21 m/s para la configuración FNL1 y FNL2.

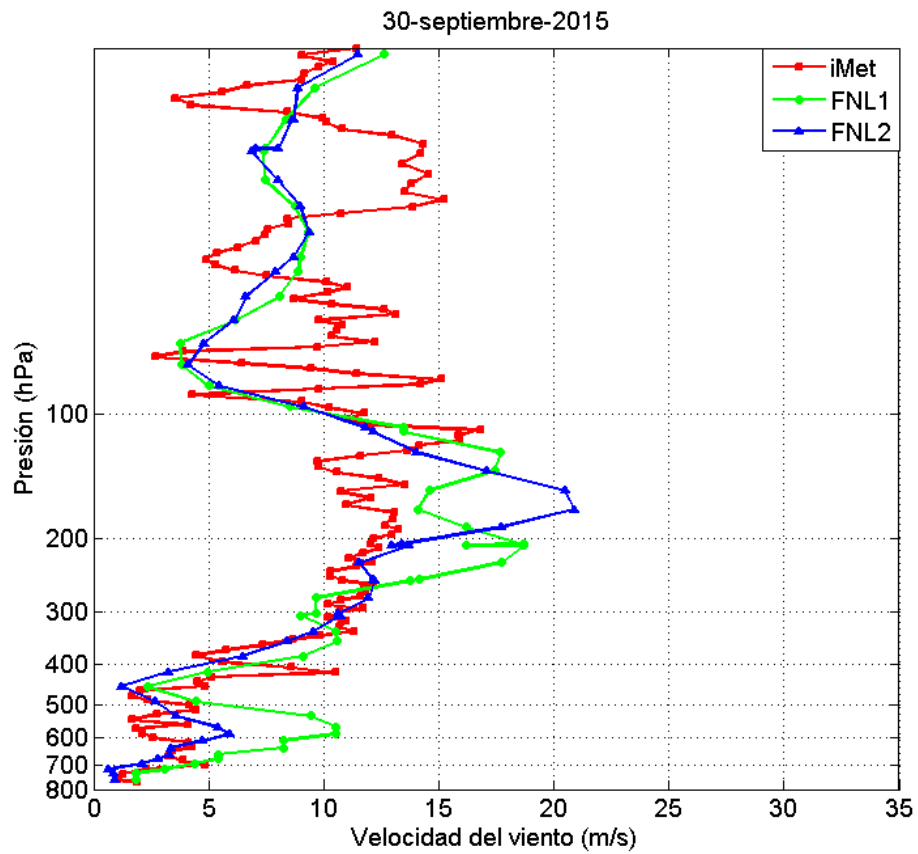


Figura 41. Perfil vertical de la velocidad del viento del día 30-septiembre-2015. Hora local de lanzamiento 07h00. La línea roja representa el perfil de la radiosonda, la línea verde el perfil de la primera configuración (FNL1) del modelo WRF y la línea azul el perfil de la segunda configuración (FNL2) del modelo WRF.

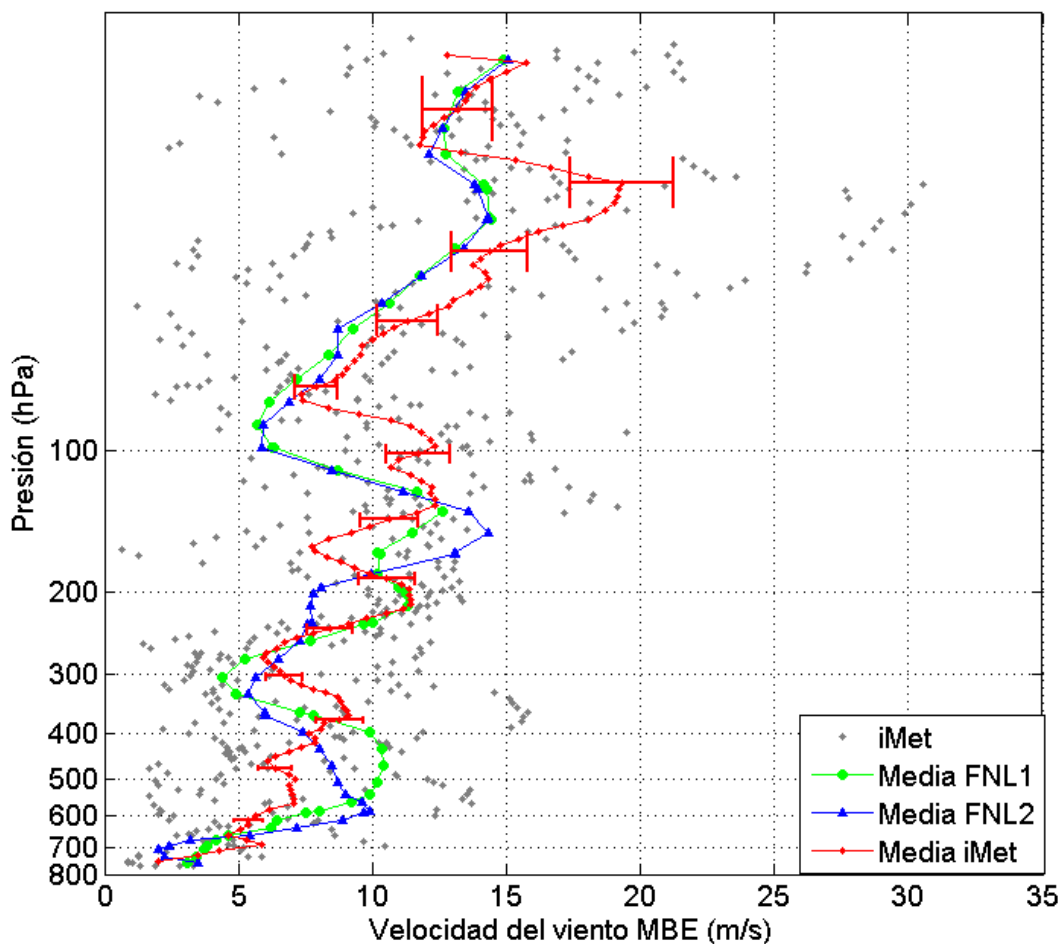


Figura 42. Dispersión de los datos de la velocidad del viento medida para los cuatro casos de estudio. La línea roja representa el perfil promedio de la radiosonda, la línea verde el perfil promedio de la primera configuración (FNL1) del modelo WRF y la línea azul el perfil promedio de la segunda configuración (FNL2) del modelo WRF. Las barras de error son 1σ basadas en la incertidumbre de la radiosonda iMet.

La Figura 42 presenta la dispersión de las observaciones de la radiosonda, el promedio de dichas observaciones (línea roja), el promedio de los resultados de la configuración FNL1 (línea verde) y el promedio de los resultados de la configuración FNL2 (línea azul). Se observa que cerca de la superficie los resultados del modelo simulan correctamente el valor observado por el radiosondeo. Entre los 200 y 80 hPa las líneas de los promedios no coinciden siendo esta diferencia mayor entre los 220 hPa y 100 hPa.

Finalmente, las barras de error de la radiosonda, se solapan con las líneas promedio de las configuraciones FNL1 y FNL2 en casi toda la estratósfera.

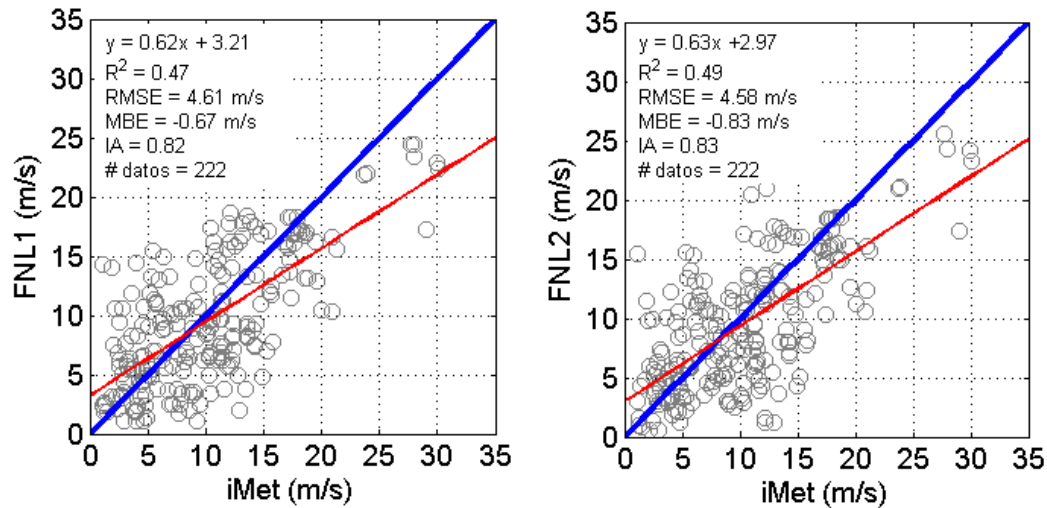


Figura 43. Gráfico de dispersión de puntos de los perfiles verticales de la velocidad del viento medida vs. resultados de configuraciones FNL1 y FNL2 del modelo WRF. En ambos gráficos la línea azul es la línea 1:1 mientras que la línea roja es la regresión lineal entre los datos de temperatura medidos y modelados.

En la Figura 43, se observa el perfil de dispersión de los datos de la velocidad del viento en la vertical para los 4 casos de estudio. Dicha dispersión, muestra que hay una diferencia mínima entre las dos configuraciones (FNL1 y FNL2) del modelo WRF, teniendo mejores resultados la configuración FNL2. El R^2 de la configuración FNL1 y FNL2 es 0.47 y 0.49, mientras que el índice de aceptación (IA) es de 0.82 y 0.83 respectivamente. Cabe destacar que no se ha realizada ninguna prueba estadística para comprobar si la diferencia entre los resultados de ambas configuraciones es significativa.

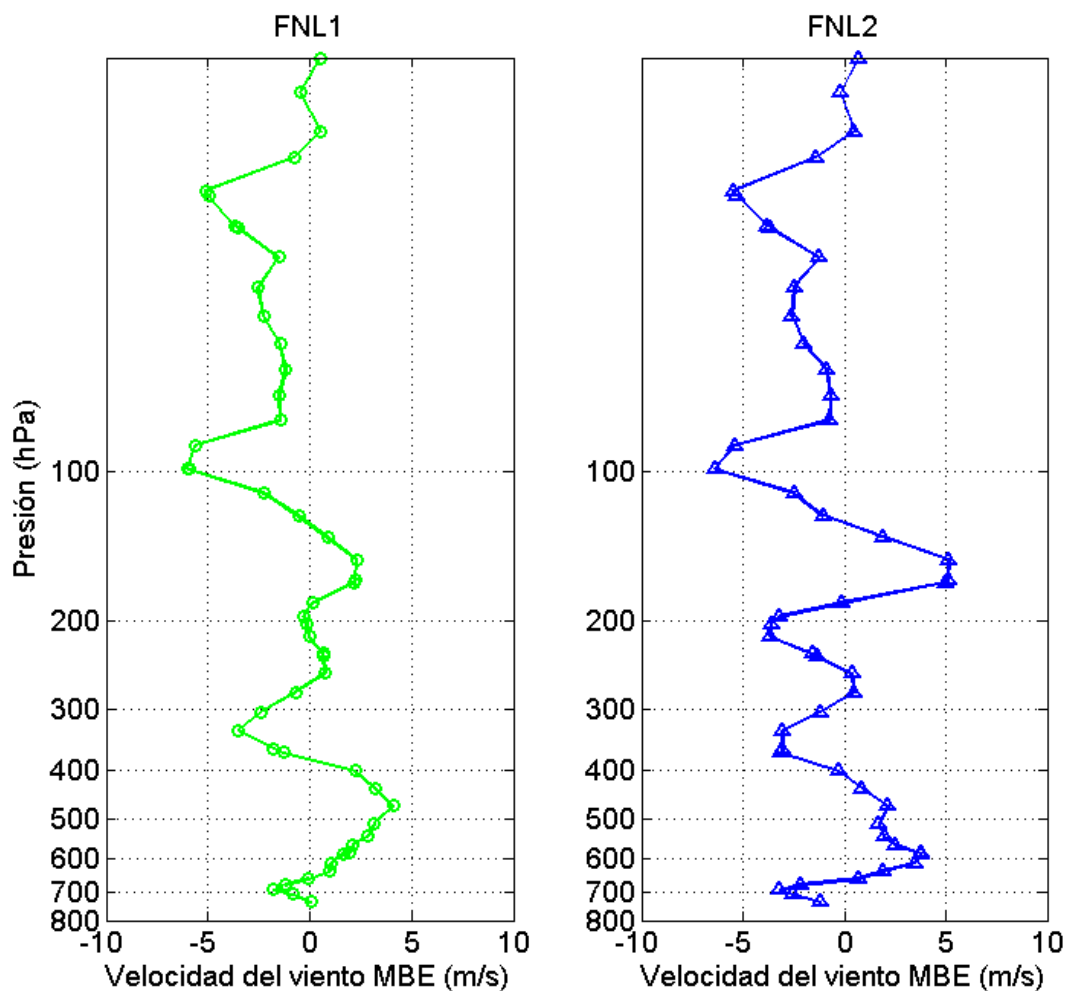


Figura 44. MBE de la velocidad del viento de la configuración FNL1 y FNL2 del modelo WRF.

En la Figura 44, se puede observar el MBE para la configuración FNL1 y FNL2 del modelo con respecto al valor obtenido de la radiosonda iMet. Para ambos casos dicho error no supera los -10 m/s, siendo el punto del error más alto alrededor de los 100 hPa (17 km). Dicho error puede deberse a que a esta altura, existe una transición de capas atmosféricas (de tropósfera a estratósfera), y el esfuerzo cortante aumenta de forma brusca la velocidad del viento, lo cual no es simulado correctamente por el modelo, ya sea por la propia sensibilidad del modelo o porque este no calcula de manera adecuada la altura de dicha transición como se puede observar en el análisis del perfil vertical de la temperatura.

Dirección del viento

Series de tiempo de la dirección del viento en superficie.

Las series de tiempo presentadas (Figuras 45-48), muestran el perfil diario de la dirección del viento de la EMA-USFQ, FNL1 y FNL2. El movimiento global de las masas de aire, indican que el viento en los trópicos viene del este. Además, en horas del mediodía las masas de aire calientes tienden a subir, generando corrientes de aire ascendente en dirección a zonas montañosas.

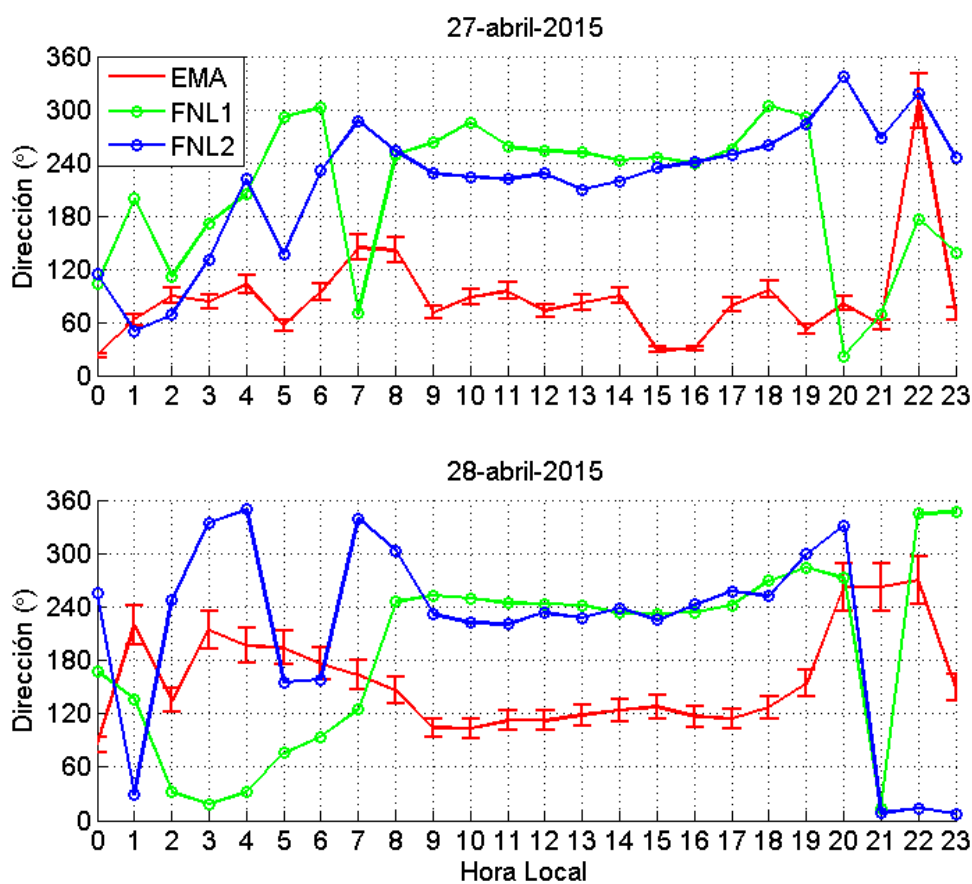


Figura 45. Perfil diario de la dirección del viento de los días 27 - y 28-abril-2015. Las líneas representan los perfiles en superficie de, roja: EMA-USFQ, verde: configuración FNL1 del modelo WRF y azul: configuración FNL2 del modelo WRF. Las barras de error son 1σ basadas en la incertidumbre de los instrumentos de medición de la EMA-USFQ.

Las observaciones registradas en la EMA-USFQ, muestran que la dirección del viento entre las 08h00 y 20h00 proviene del sureste, en concordancia con la teoría de circulación global y calentamiento de masas de aire. Es importante notar que Cumbayá es un valle (2391 msnm) ubicado al este de Quito (2800 msnm), por lo tanto las masas de aire caliente tienden a subir por las montañas que separa Cumbayá y Quito (las masas de aire se mueven hacia el oeste).

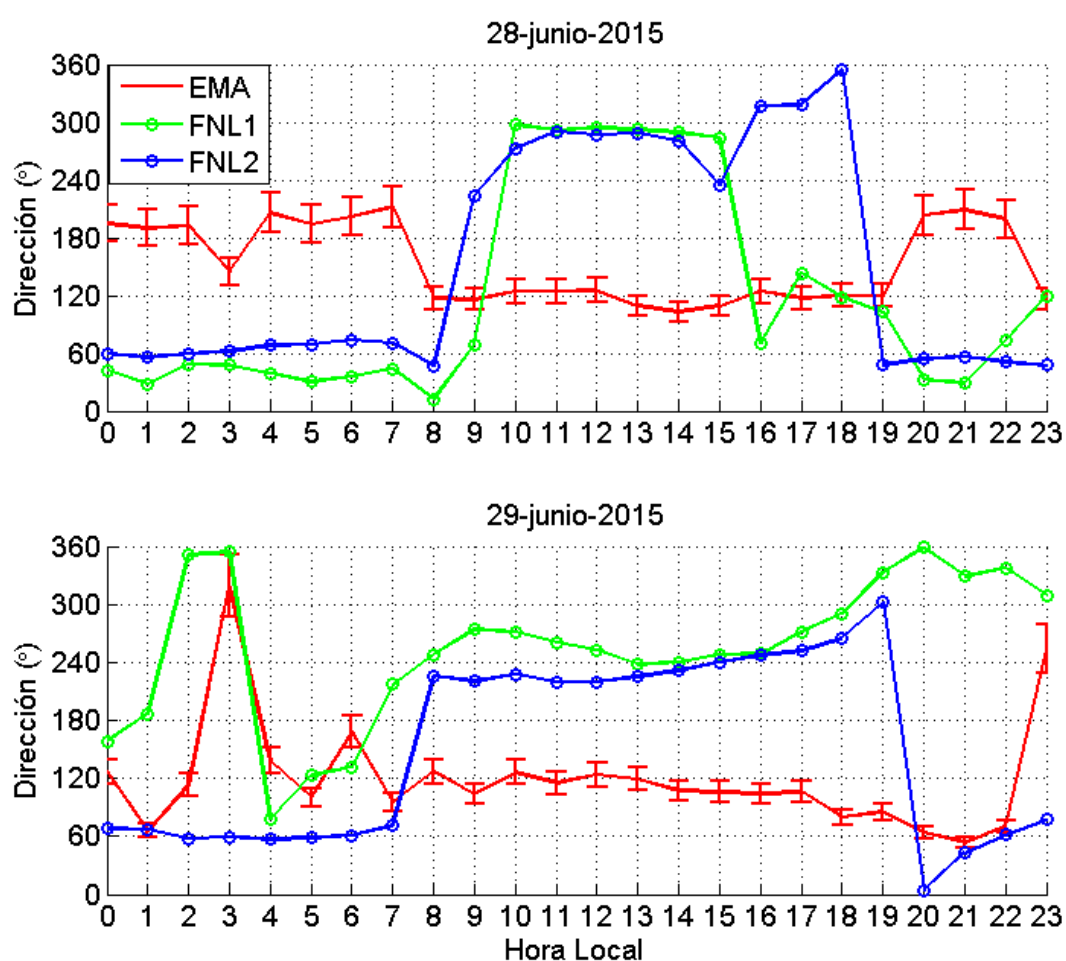


Figura 46. Perfil diario de la dirección del viento de los días 28 - y 29-junio-2015. Las líneas representan los perfiles en superficie de, roja: EMA-USFQ, verde: configuración FNL1 del modelo WRF y azul: configuración FNL2 del modelo WRF. Las barras de error son 1σ basadas en la incertidumbre de los instrumentos de medición de la EMA-USFQ.

Por otro lado, los resultados del modelo sugieren una dirección del viento proveniente de noroeste entre las 08h00 y 20h00. Dicha tendencia es contradictoria con lo explicado anteriormente. Esta dirección del viento, sugiere que las masas de aire (que se están calentando) bajan hacia el valle en lugar de subir hacia las montañas, contrario a la explicación física propuesta anteriormente.

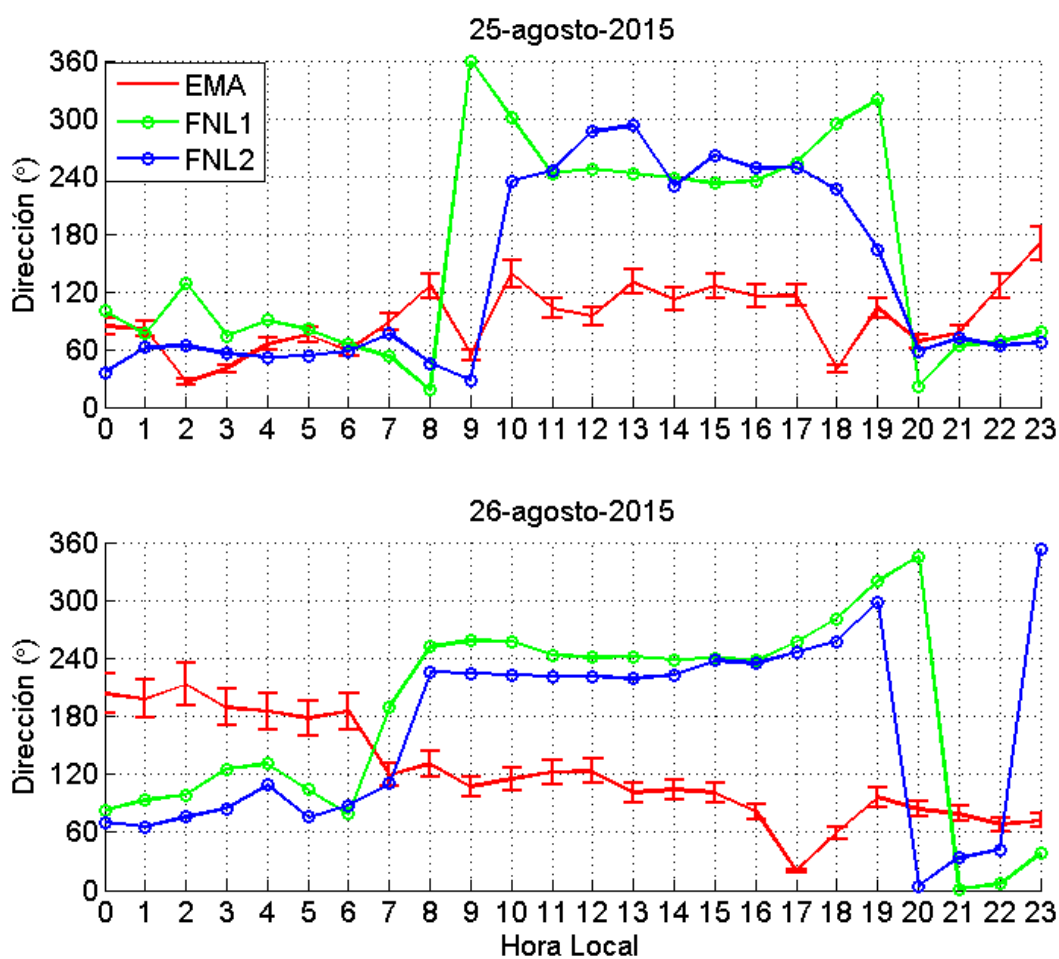


Figura 47. Perfil diario de la dirección del viento de los días 25 - y 26-agosto-2015. Las líneas representan los perfiles en superficie de, roja: EMA-USFQ, verde: configuración FNL1 del modelo WRF y azul: configuración FNL2 del modelo WRF. Las barras de error son 1σ basadas en la incertidumbre de los instrumentos de medición de la EMA-USFQ.

En las primeras horas de la mañana, la tendencia en la dirección es de vientos provenientes de suroeste, tendencia que no es capturada por el modelo, ya que el mismo sugiere vientos provenientes del noreste.

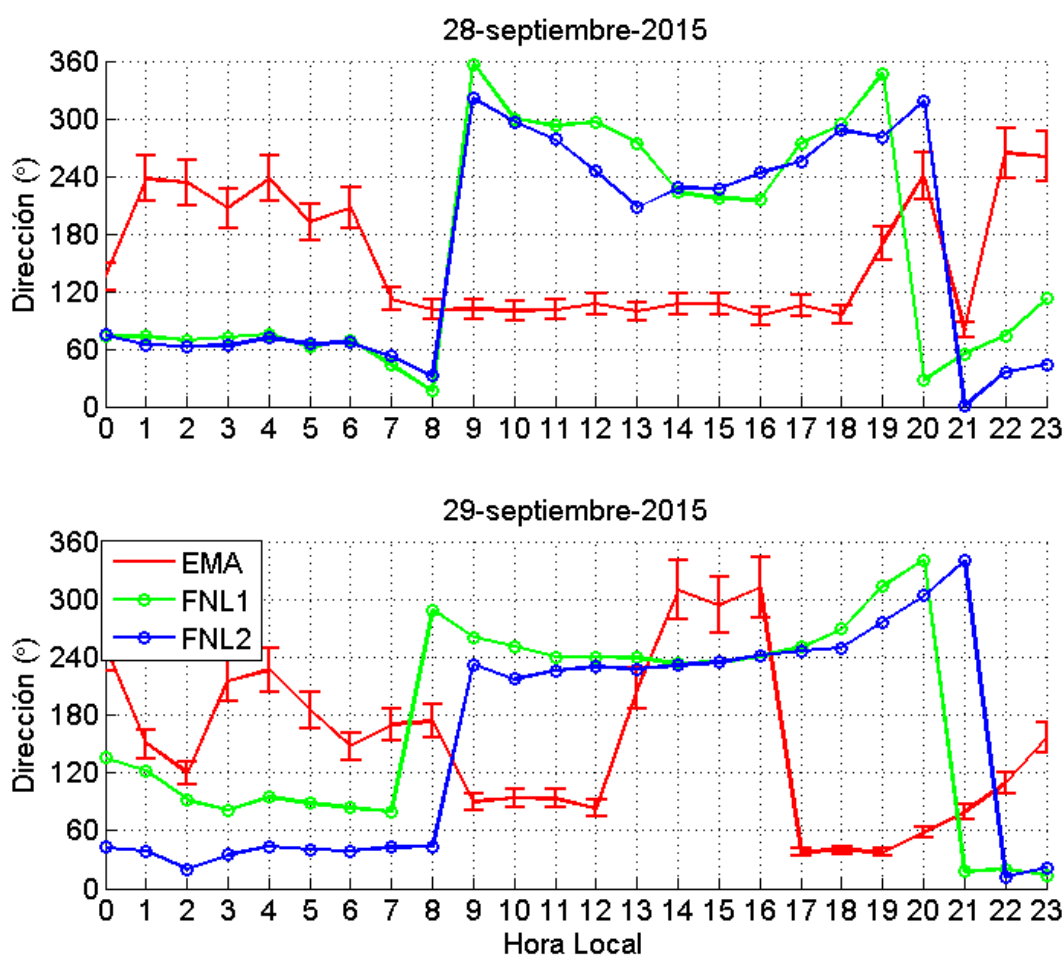


Figura 48. Perfil diario en superficie de la dirección el viento de los días 28- y 29-septiembre-2015. Las líneas representa, roja: el perfil de la temperatura de la EMA-USFQ, verde: el perfil de la primera configuración (FNL1) del modelo WRF y azul: el perfil de la segunda configuración (FNL2) del modelo WRF. Las barras de error son 1σ basadas en la incertidumbre de los instrumentos de medición de la EMA-USFQ.

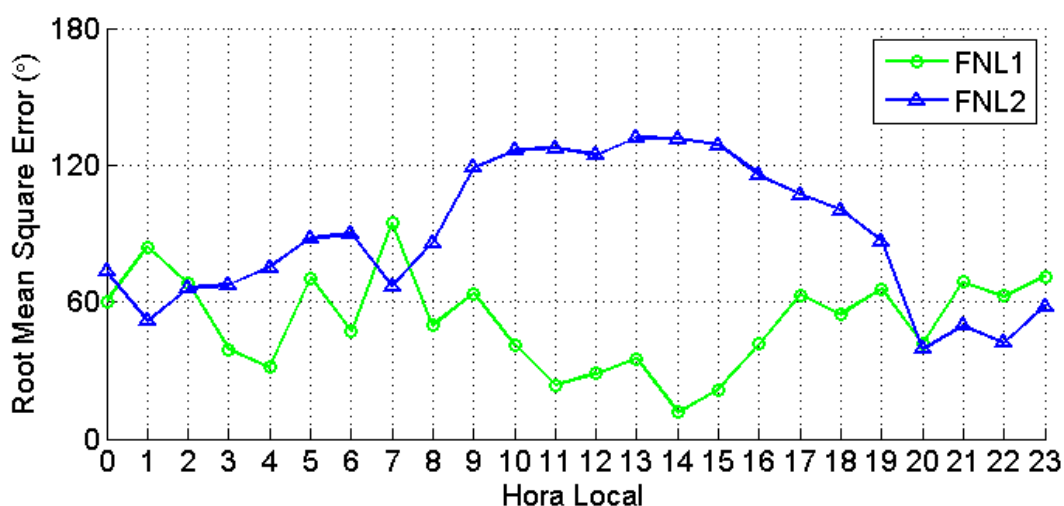


Figura 49. RMSE de la dirección del viento de la configuración FNL1 y FNL2 del modelo WRF.

Finalmente, el error cuadrático medio, evidencia que la configuración FNL1 tiene un error global menor que la configuración FNL2. Los resultados de la configuración FNL2 presentan un error mayor entre las 08h00 y 19h00 (120 °), mientras que la configuración FNL1 presenta un error máximo de 100 ° a las 07h00.

Perfil vertical de la dirección del viento.

En las Figuras 50-53 se muestran los perfiles verticales de la dirección del viento para cada día. Los resultados de ambas configuraciones (FNL1 y FNL2) del modelo WRF capturan adecuadamente el patrón seguido por la dirección del viento en la vertical, logrando modelar correctamente cambios en dirección. Al igual que la velocidad, la dirección modelada representa un valor promedio del valor medido por la radiosonda iMet en la mayoría de la trayectoria.

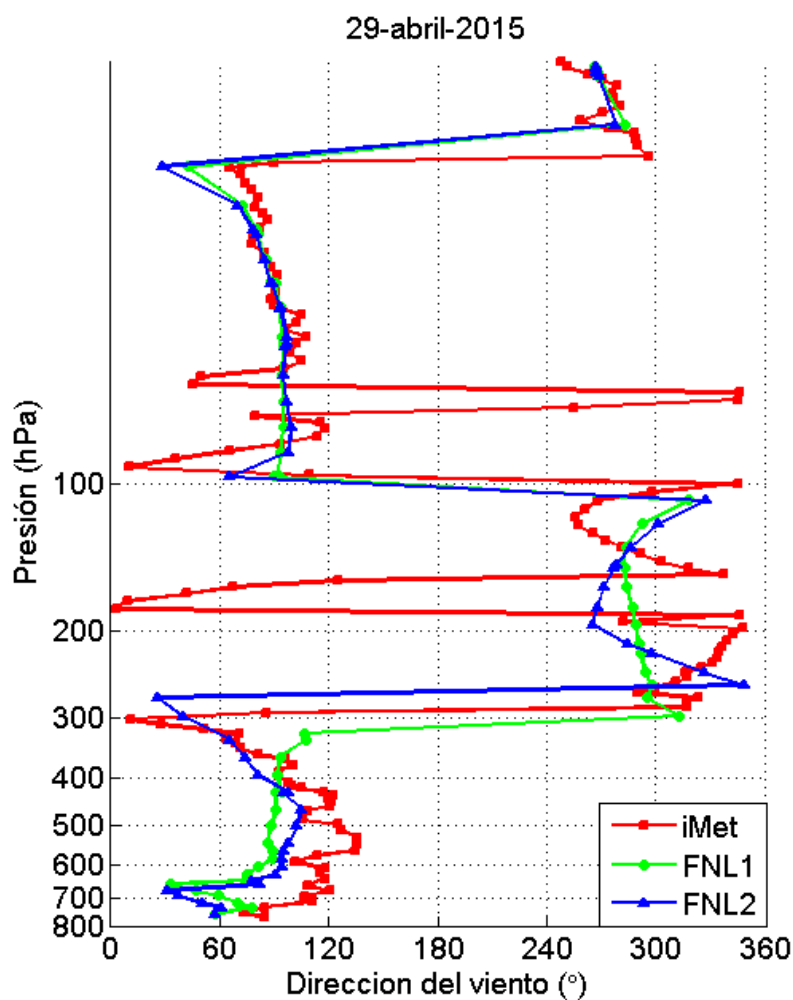


Figura 50. Perfil vertical de la dirección del viento del 29-abril-2015. Hora local de lanzamiento 12h00. La línea roja representa el perfil de la radiosonda, la línea verde el perfil de la primera configuración (FNL1) del modelo WRF y la línea azul el perfil de la segunda configuración (FNL2) del modelo WRF.

El perfil vertical de la dirección del viento para el 29 de abril de 2015 del radiosondeo y de los resultados de las configuraciones FNL1 y FNL2 de modelo WRF se correlacionan de manera adecuada. Los resultados del modelo representan el promedio de los datos observados por la radiosonda, siendo la configuración FNL2 la que mejor se ajusta en este caso.

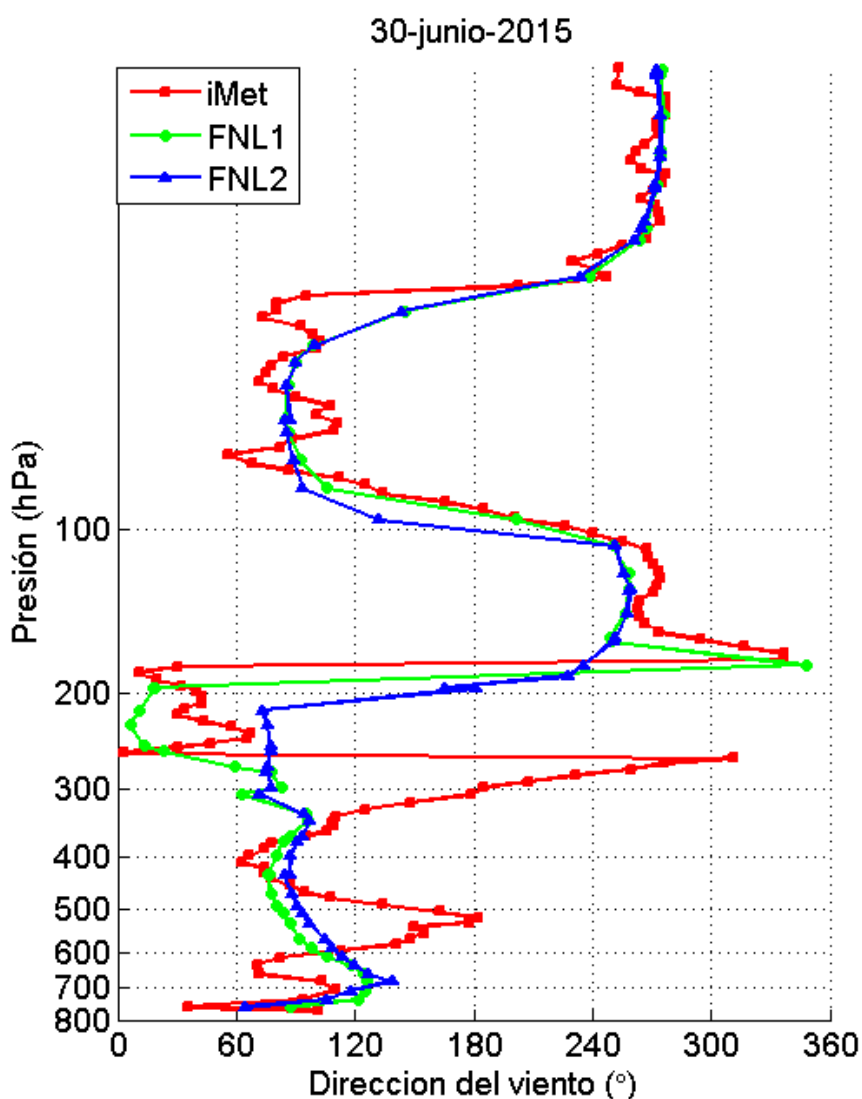


Figura 51. Perfil vertical de la dirección del viento del día 30-junio-2015. Hora local de lanzamiento 13h00. La línea roja representa el perfil de la radiosonda, la línea verde el perfil de la primera configuración (FNL1) del modelo WRF y la línea azul el perfil de la segunda configuración (FNL2) del modelo WRF.

Para el caso de estudio del 30 de junio de 2015 el perfil de la dirección del aire observado por el radiosondeo, se modela de manera adecuada por ambas configuraciones del modelo, siendo la mejor para este caso la configuración FNL1. La correlación entre los datos observacionales y los resultados del modelo mejoran a presiones bajas, ya que los resultados del modelo presentan el promedio de los datos observados.

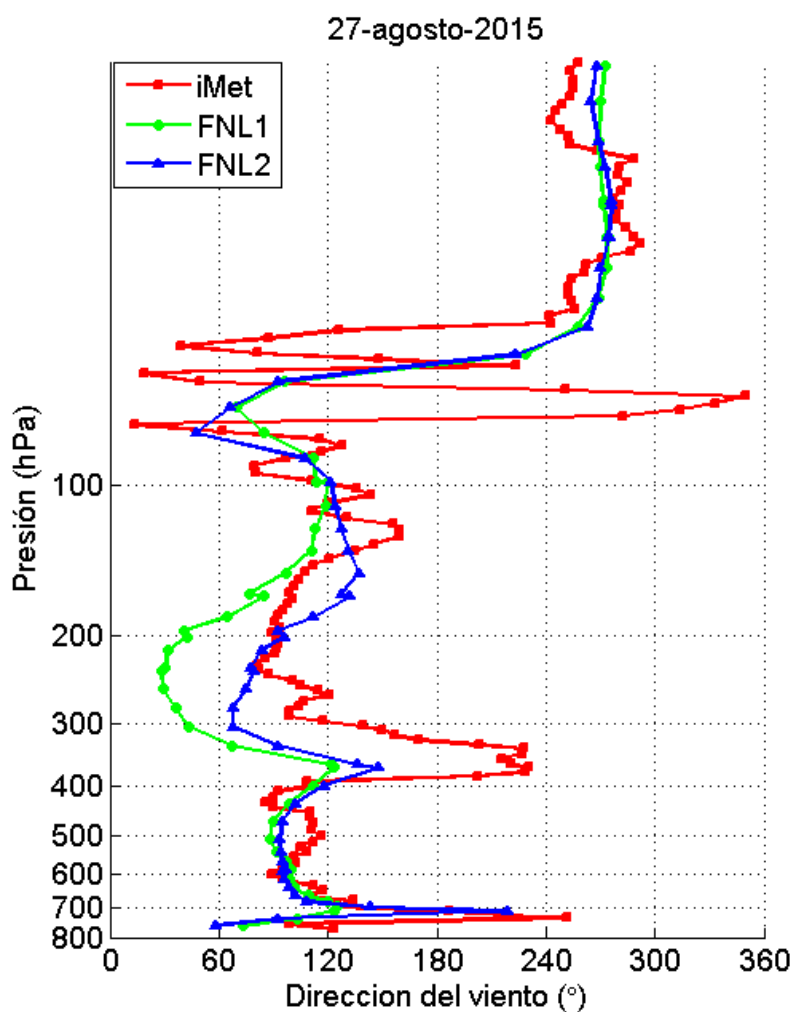


Figura 52. Perfil vertical de la dirección del viento del día 27-agosto-2015. Hora local de lanzamiento 09h00. La línea roja representa el perfil de la radiosonda, la línea verde el perfil de la primera configuración (FNL1) del modelo WRF y la línea azul el perfil de la segunda configuración (FNL2) del modelo WRF.

Para el 27 de agosto de 2015, los resultados de la dirección del viento reproducida por el modelo, capta picos de cambio de dirección registrados por la radiosonda (por ejemplo entre 400 hPa y 300 hPa). Sin embargo, a presiones bajas, los resultados del modelo no reproducen todos los cambios en temperatura pero sí reproducen un valor intermedio de los valores observados por la radiosonda

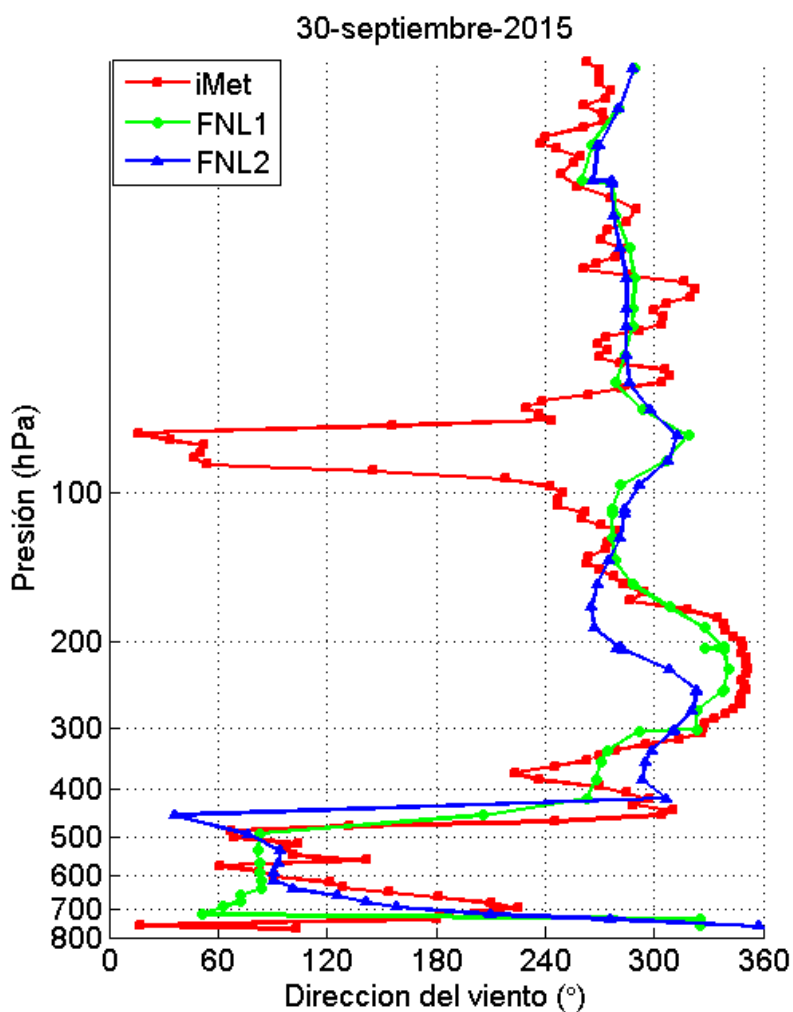


Figura 53. Perfil vertical de la dirección del viento del día 30-septiembre-2015. Hora local de lanzamiento 07h00. La línea roja representa el perfil de la radiosonda, la línea verde el perfil de la primera configuración (FNL1) del modelo WRF y la línea azul el perfil de la segunda configuración (FNL2) del modelo WRF.

Para el 30 de septiembre de 2015, los resultados de la dirección del viento reproducida por el modelo, capta picos de cambio de dirección registrados por la radiosonda (por ejemplo entre 300 hPa y 120 hPa). El pico que se puede observar alrededor de 110 hPa tiene valores de 20 ° aproximadamente, mientras que los resultados del modelo sugieren direcciones de 320 ° lo que significa una diferencia de 60 °. Para presiones bajas, el modelo reproduce el valor intermedio de la observación de la radiosonda.

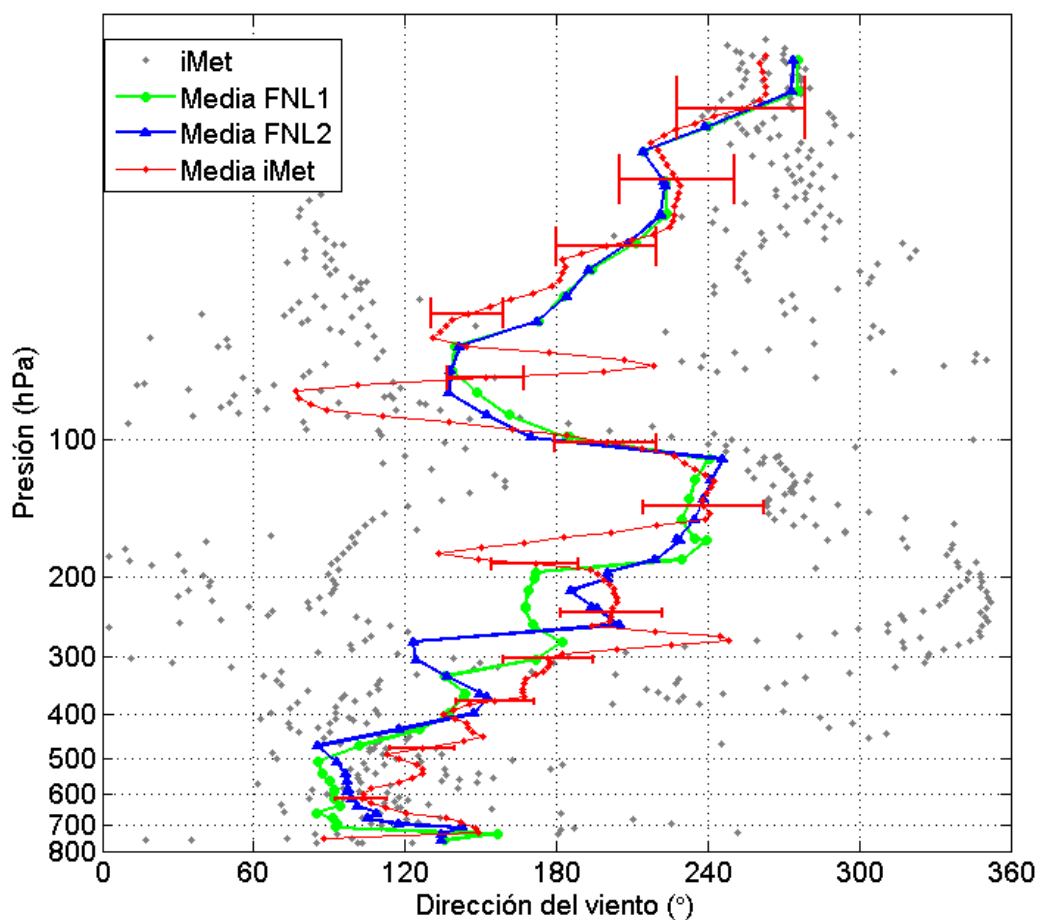


Figura 54. Dispersión de los datos de la velocidad del viento medida para los cuatro casos de estudio. La línea roja representa el perfil promedio de la radiosonda, la línea verde el perfil promedio de la primera configuración (FNL1) del modelo WRF y la línea azul el perfil promedio de la segunda configuración (FNL2) del modelo WRF. Las barras de error son 1σ basadas en la incertidumbre de la radiosonda iMet.

La Figura 54 muestra los promedios de las observaciones y los resultados de la configuración FNL1 y FNL2 del modelo WRF. Se evidencia claramente que en superficie la correlación entre los datos observados y los resultados del modelo es buena. A partir de los 300 hPa dicha correlación desmejora, con diferencias de hasta 120° a los 300 hPa. A presiones bajas las barras de error de las observaciones se solapan con las líneas promedio de los resultados de ambas configuraciones del modelo, lo que significa que el modelo es capaz de reproducir adecuadamente la observación del radiosondeo.

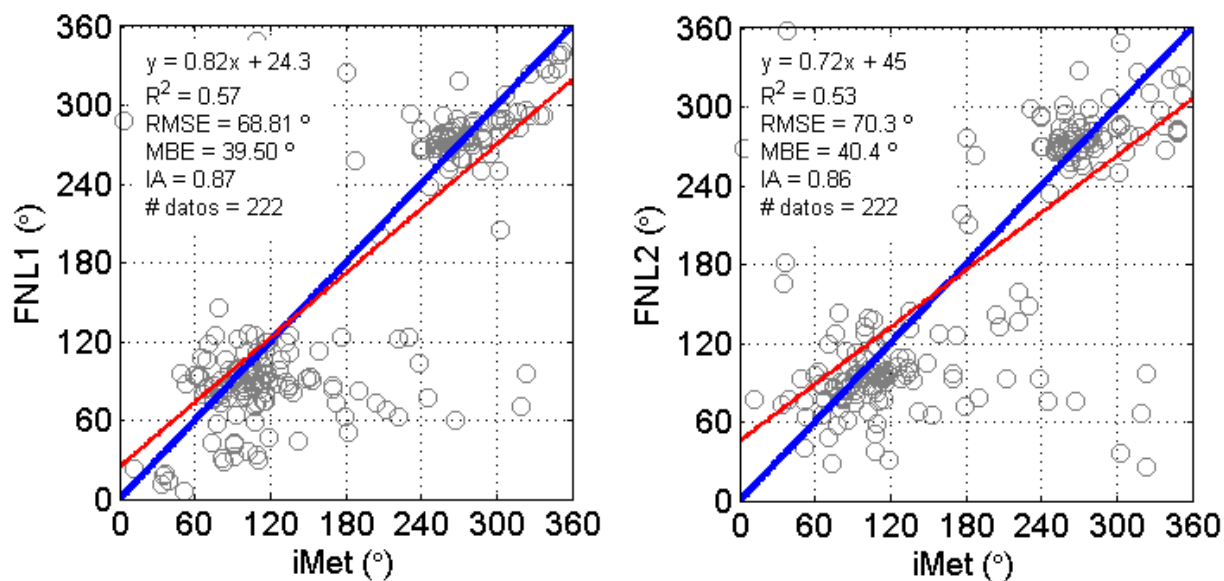


Figura 55. Gráfico de dispersión de puntos de los perfiles verticales de la dirección del viento. (a) Velocidad medida (iMet) y modelada (FNL1) y (b) velocidad medida (iMet) y modelada (FNL2). En ambos gráficos la línea azul es la línea 1:1 mientras que la línea roja es la regresión lineal entre los datos de temperatura medidos y modelados.

La Figura 55 representa el perfil de dispersión de los datos de la dirección del viento en la vertical para los 4 casos de estudio. Dicha dispersión muestra que los resultados de la configuración FNL1 son ligeramente mejores que aquellos de la configuración FNL2 con R^2 de 0.57 y 0.53 respectivamente. Además el índice de aceptación y las pendientes para FNL1 y (FNL2) es de 0.87, (0.82) y 0.86, (0.72) respectivamente.

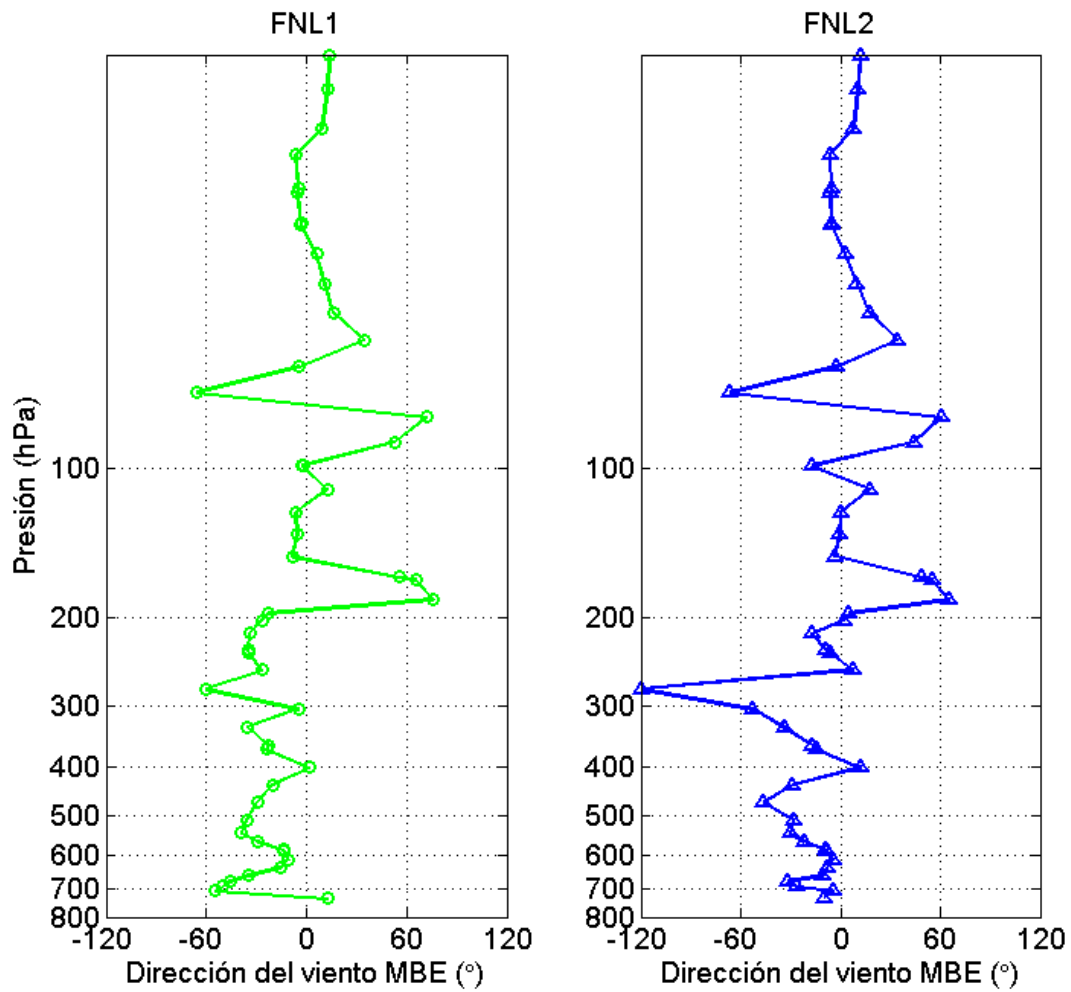


Figura 56. MBE de la dirección de la configuración 1 y 2 del modelo WRF.

En la Figura 56, se puede observar el MBE de la dirección del viento para la configuración FNL1 y FNL2 del modelo con respecto al valor obtenido de la radiosonda iMet. Para la configuración FNL1 dicho error no supera los 90° en toda la trayectoria, mientras que para la configuración FNL2 el único valor que supera los 90° (120°) ocurre a los 300 hPa aproximadamente.

Presión atmosférica

Series de tiempo de la presión atmosférica en superficie.

Para fines de entendimiento general del desempeño del modelo, se han evaluado los resultados de la presión superficial del mismo. A continuación se presentan los perfiles diarios de la presión (Figuras 57-60).

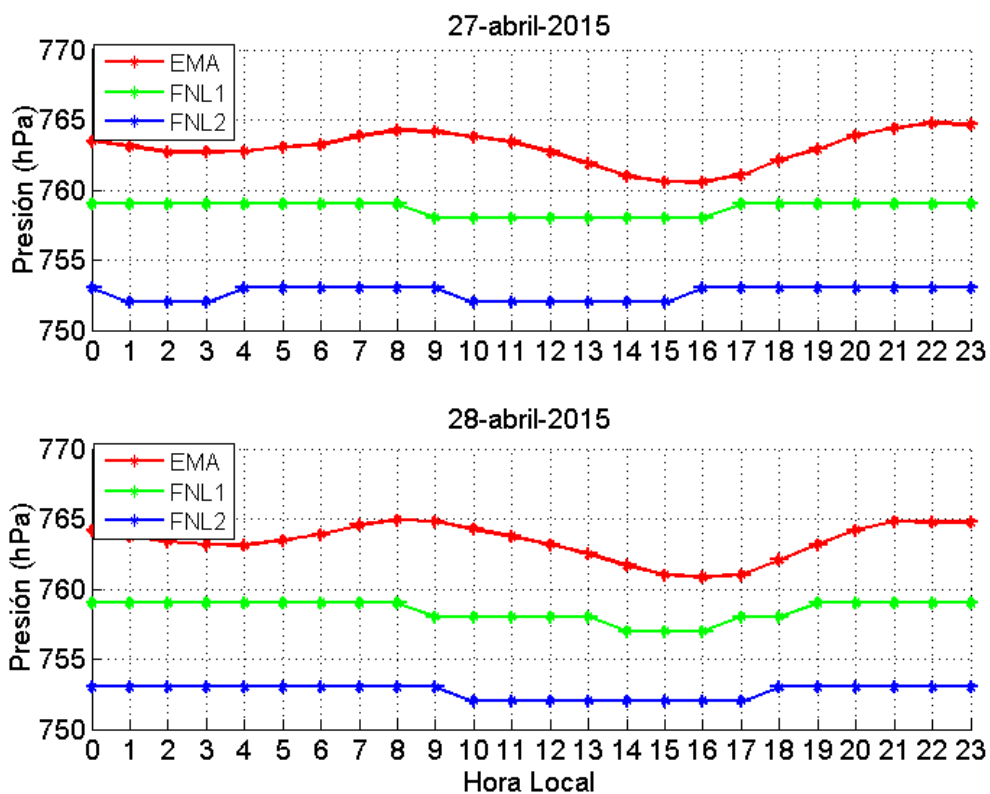


Figura 57. Perfil diario en superficie de presión atmosférica de los días 27- y 28-abril-2015. Las líneas representa, roja: el perfil de la temperatura de la EMA-USFQ, verde: el perfil de la primera configuración (FNL1) del modelo WRF y azul: el perfil de la segunda configuración (FNL2) del modelo WRF.

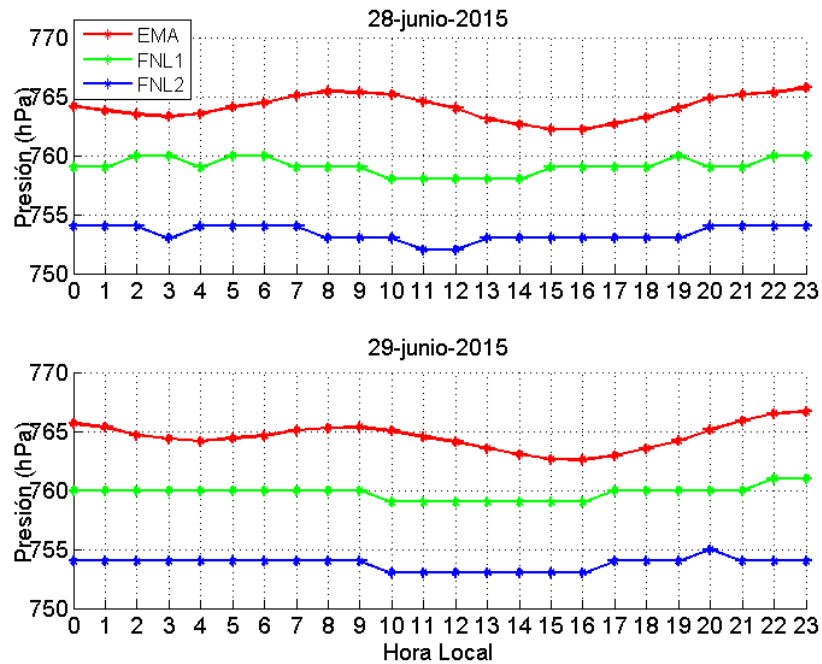


Figura 58. Perfil diario en superficie de presión atmosférica de los días 28- y 29-junio-2015. Las líneas representa, roja: el perfil de la temperatura de la EMA-USFQ, verde: el perfil de la primera configuración (FNL1) del modelo WRF y azul: el perfil de la segunda configuración (FNL2) del modelo WRF.

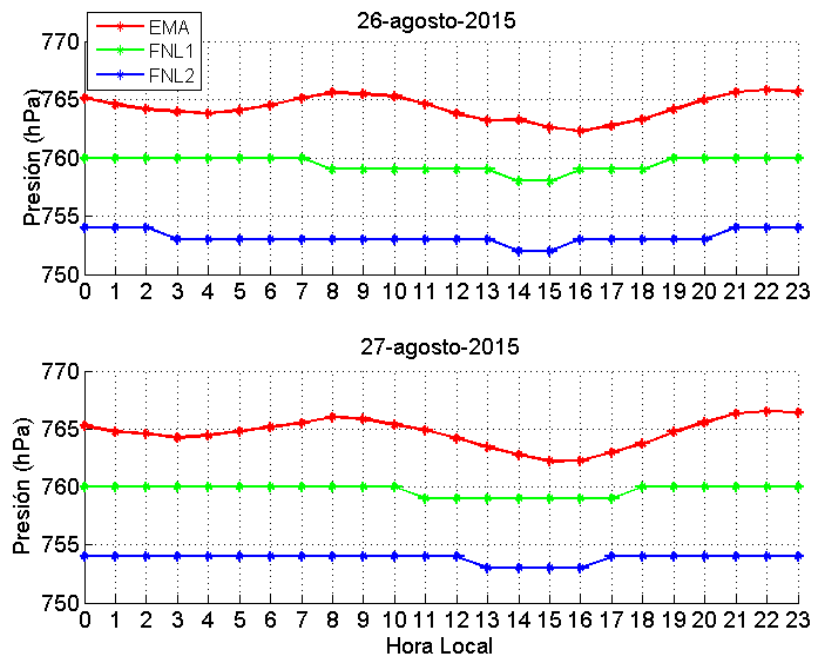


Figura 59. Perfil diario en superficie de presión atmosférica de los días 25- y 26-agosto-2015. Las líneas representa, roja: el perfil de la temperatura de la EMA-USFQ, verde: el perfil de la primera configuración (FNL1) del modelo WRF y azul: el perfil de la segunda configuración (FNL2) del modelo WRF.

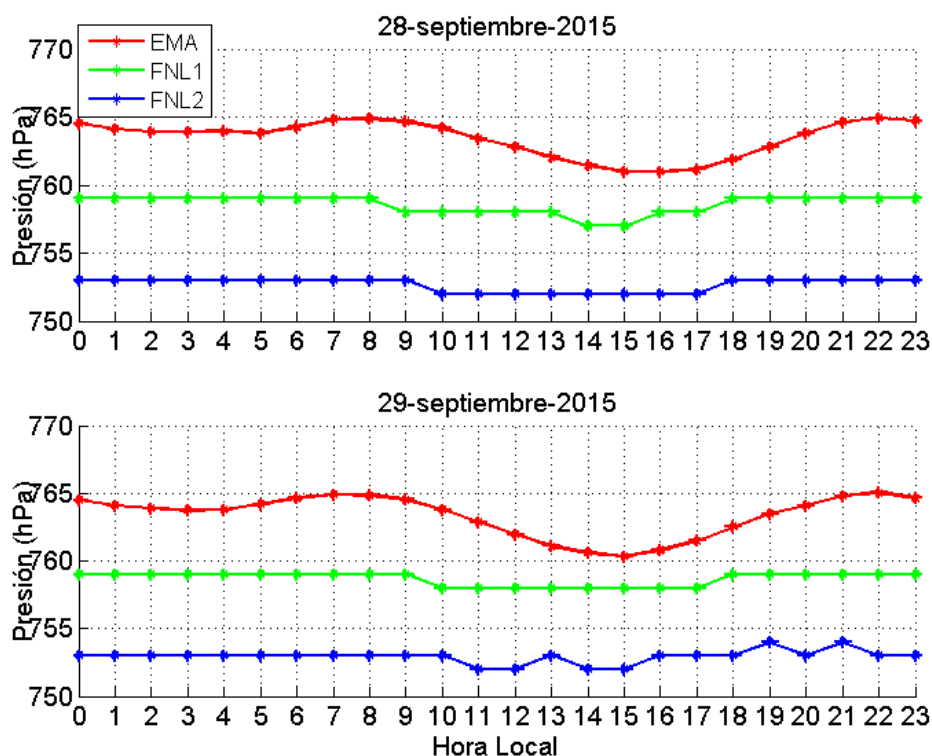


Figura 60. Perfil diario en superficie de presión atmosférica de los días 28- y 29-septiembre-2015. Las líneas representa, roja: el perfil de la temperatura de la EMA-USFQ, verde: el perfil de la primera configuración (FNL1) del modelo WRF y azul: el perfil de la segunda configuración (FNL2) del modelo WRF.

Se puede observar claramente, que los datos reportados de la EMA-USFQ presentan una variación diurna ondular de la presión superficial con una cresta a las 08h00 y un valle a las 16h00.

Los resultados de presión superficial de FNL1 y FNL2 no son capaces de representar de manera correcta dicha variación. Adicionalmente, en la Figura 61 se puede observar que la configuración FNL2 subestima el valor observado en 6 hPa aproximadamente. Mientras que la configuración FNL1 tiene un rango de subestimación entre 3 y 6 hPa siendo dichas subestimaciones mayores a las 08h00 (hora de la cresta) y menores a las 16h00 (hora del valle).

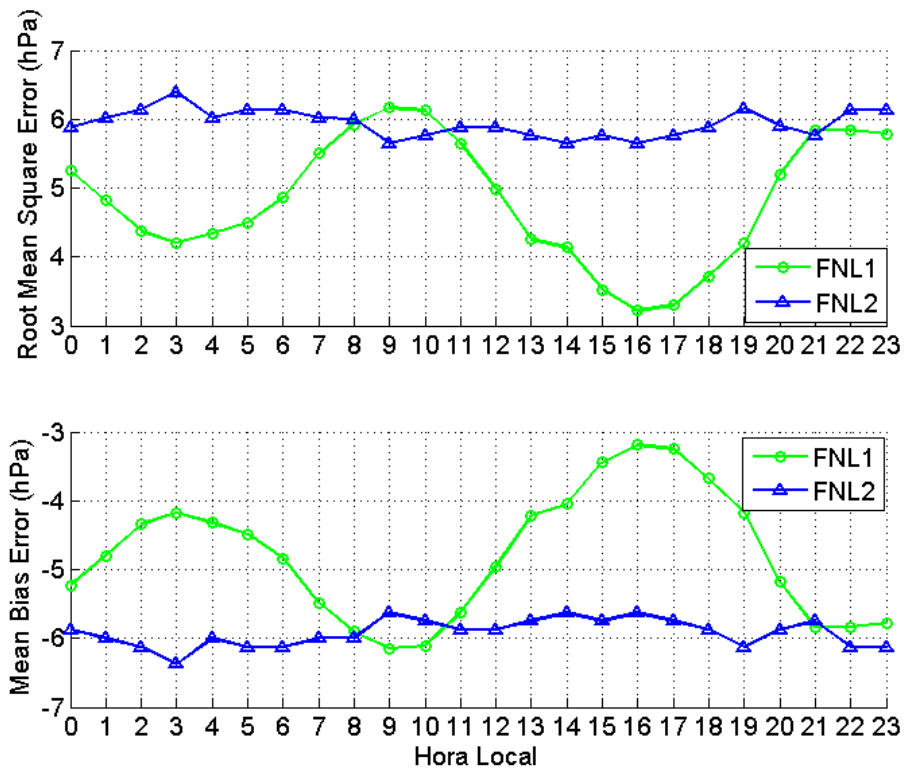


Figura 61. Error cuadrático medio (RMSE) y sesgo medio (MBE) de la presión en superficie. Observaciones de EMA vs. resultados de la configuración FNL1 (línea verde) observaciones de EMA vs. resultados de la configuración FNL2 (línea azul).

CONCLUSIONES

La evaluación de las variaciones diurnas de temperatura y humedad relativa en superficie muestra que los resultados de la configuración FNL1 y FNL2 subestiman el valor de la temperatura y sobreestiman el valor de la humedad relativa. La subestimación de la temperatura es más pronunciada entre las 10h00 y 17h00, en donde se presentan las temperaturas más altas observadas. Además, esta subestimación es más pronunciada para los resultados de la configuración FNL2 con valores de hasta $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$.

En cuanto a la humedad relativa, ninguna de las configuraciones simula de manera correcta el valor observado en la EMA-USFQ, sobreestimando en 30% en horas del mediodía y hasta 50% en horas de la tarde. Los resultados de la configuración FNL2 del modelo son los que menos correlación tiene con los valores observados por la EMA-USFQ, ya que dichos resultados son incapaces de simular el perfil diurno típico, los valores máximos y los valores mínimos de esta variable.

Estos resultados sugieren que el modelo WRF tiene problemas simulando los valores altos de temperatura y bajos de humedad relativa cuando se realiza la comparación superficie. Se puede concluir que la configuración FNL1 modela de mejor manera la temperatura en superficie, mientras que la humedad relativa no fue modelada correctamente por ninguna de las configuraciones estudiadas, siendo ligeramente mejor la configuración FNL1.

En cuanto a la velocidad del viento en superficie, se evidencia que la configuración FNL2 tiende a sobreestimar el valor entre las 00h00 y 07h00 en 3 m/s, mientras que entre las 08h00 y 17h00 existe un valor de sesgo entre -1 m/s y 1 m/s , lo cual indica que el

modelo se ajusta bien en este período de tiempo. A partir de las 18h00 el modelo sobreestima los valores de la velocidad del viento hasta en 2 m/s. Por el contrario, los resultados de la configuración FNL1 tienen sesgo entre 1.8 m/s y -1 m/s durante todo el día, esto sugiere que esta configuración (FNL1) modela mejor la velocidad del viento en superficie.

Para la dirección del viento, los datos observados por la EMA-USFQ muestran que entre las 08h00 y 20h00 los vientos provienen del sureste. Dicho fenómeno se explica por la circulación global de las masas del aire, que en el trópico vienen desde el este; y por la trayectoria de las masas de aire que al calentarse se vuelven menos densas y tienden a subir. Cumbayá es un valle ubicado al este de Quito (2800 msnm), y las masas de aire que se calienta en la zona suben y se dirigen hacia la parte alta de la ciudad de Quito (dirección de este a oeste). En el mismo período de tiempo, los resultados del modelo sugieren que los vientos provienen de terrenos altos hacia terrenos bajos, es decir del oeste (desde Quito hacia Cumbayá), lo cual es contradictorio a la física esperada por el calentamiento de masas de aire.

En cuanto a los perfiles en la vertical, los resultados de las configuraciones FNL1 y FNL2 para la temperatura se ajustaron de manera casi perfecta al perfil observado por la radiosonda iMet. Sin embargo, se sobreestimó el valor del CPT en un promedio de 3 °C, siendo esta subestimación mayor para los días que presentaron CPT más bajos. El coeficiente de correlación R^2 para los resultados del modelo fueron 0.99 para ambas configuraciones.

Los resultados de la fracción másica de vapor de agua, presenta errores más grandes en la superficie y disminuyen con la altura. Los valores de esta variable decrecen

exponencialmente con la altura llegando a valores muy pequeños a los 100 hPa (17 km) donde la diferencia de los datos observados y medidos es casi imperceptible.

Los resultados de la velocidad y dirección del viento en la vertical presentan perfiles que se asemejan al perfil calculado por la radiosonda iMet. Dichos perfiles incluye cambios importante de la velocidad (picos por esfuerzo cortante) y dirección del viento. Además se observa que en los últimos kilómetros de dominio del modelo, los valores de estas variables son el promedio del valor calculado por el radiosondeo.

Finalmente, la comparación de la presión superficial, muestra que los resultados de ambas configuraciones no fueron capaces de capturar el perfil de esta variable en el tiempo. Los resultados de la configuración FNL1 subestima el valor de la presión superficial en, 3 hPa en los valles del perfil de la presión observado en la EMA-USFQ, y en 6 hPa en las crestas del perfil de la presión observado en la EMA-USFQ, mientras que la configuración FNL2 presenta una subestimación constante de 6hPa.

Al ser este estudio una evaluación preliminar del desempeño del modelo WRF, se sugiere realizar más simulaciones que incluyan otras opciones físicas y dinámicas que ayuden a comprender los parámetros que influyen en la simulación de variables meteorológicas en superficie y en la vertical de la zona de estudio. Se sugiere realizar evaluaciones del modelo WRF para más casos de estudio para poder implementar un análisis estadístico más profundo. Además se sugiere realizar una actualización de la topografía y uso del suelo ya que estos parámetros están directamente relacionados con la presión, temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección del viento en superficie. Se sugiere realizar una evaluación del modelo con otras estaciones en superficie para determinar su rendimiento a nivel local.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Appel, K.W., Gilliland, A.B., Sarwar, G. & Giliam, R.C. (2007). Evaluation for the community multiscale air quality (CMAQ) model version 4.5: Sensitivities impacting model performance Part I – Ozone. *Atmos. Environ.*, 41, 9603-9615.
- ARL. (2012). *Global Data Assimilation System (GDAS) Archive Information*. Obtenido el 9 de mayo de 2015 de <http://ready.arl.noaa.gov/gdas1.php>.
- Cazorla, M. & Tamayo, E. (2014). Atmospheric measurement station in Universidad San Francisco de Quito (EMA): ground-based physical meteorology instrumentation and assessment of initial measurements. *Av. Cienc. Ing. (Quito)*, 6 (2), C21 – C30.
- Cheng, W. & Steenburgh, W. (2005). Evaluation of Surface Sensible Weather Forecasts by the WRF and the Eta Model over the Western United States. *Weather and Forecasting*, 20, 812-821.
- Chang, R. (2012). *Química*. 11ra edición, McGraw-Hill Education, 263.
- International Met Systems. (2015). *iMet-2-AB Detail*.
- Mona, L., Amodeo, A., Cornacchia, C., Fabio, M., Pappalardo, G. & O'Connor, E. (2007). *Comparing Water Vapor vertical profiles using CNR-IMAA RAMAN LIDAR and Cloudnet Data*. LIDAR Networks, Automated Operations and Low term climate observations. Third Symposium on LIDAR Atmospheric Applications.
- NCAR. (2012). *CISL Research Data Archive*. Obtenido el 9 de mayo de 2016 de <http://rda.ucar.edu>.
- Parra, R. (2012). Evaluación Preliminar de la Temperatura Media en Superficie del Ecuador para el año 2010, obtenida mediante el modelo Weather Research Forecasting (WRF). *Av. Cienc. Ing. (Quito)*, 4(2), C27-35.
- Petracca, B., et al. (2003). *Analysis of Selected Radiosonde Data from the ARM/NSA Site*. Thirteen ARM Science Team Meeting Proceedings, Broomfield, Colorado.
- Salvador, R. (2015). *Experimento de Sondeo Vertical de la Atmósfera en el Valle de Cumbayá, Ecuador: Protocolo de Lanzamiento de Sondas Meteorológicas y Resultados Preliminares*. Tesis de grado para obtención de título de Ingeniera Ambiental. Universidad San Francisco de Quito. Quito – Ecuador.
- Simpson, M., Raman, S. & Lundquist, J. (2006). *A Study of the Variation of Urban Mixed Layer Heights*. Natural Hazards. Lawrence Livermore National Laboratory.

Skamarock, W., et al. (2008). *A description of the Advanced Research WRF Version 3*. National Center for Atmospheric Research. Boulder, Colorado, USA.

Wagner, R. (1997). *The Weather Sourcebook: Your one-stop resource for everything you need to feed your weather habit*. 2nd Edition. Globe Pequot Press.

Wallace, J. & Hobbs, P. (2006). *Atmospheric Science: An introductory survey*. 2nd Edition. University of Washington: Elsevier.

Wang, W., Barker, D., Bruyère, C., Duda, C., Dudhia, J., Gill, D., Michalakes, J. & Rizvi, S. (2008). *WRF Version 3 Modeling System User's Guide*. Obtenido el 15 de enero 2016 de http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3/.

Willmot, C. J. (1981). On the validation of models. *Phys. Goerg.*, 2, 184-194.