

## MODELACIÓN DE UN EVENTO METEOROLÓGICO DE MESOESCALA UTILIZANDO EL MODELO WRF

Fernandez, Rafael<sup>1,2\*</sup>; Lakkis, Gabriela<sup>3,4</sup>; Allende, David<sup>1</sup>; Santos, Ruben<sup>2</sup>; Cremades, Pablo<sup>1</sup>; Puliafito, Enrique<sup>1</sup>

1: Grupo de Estudios Atmosféricos y Ambientales  
Facultad Regional Mendoza  
Universidad Tecnológica Nacional  
Rodríguez 273 (5500) Mendoza, Argentina  
e-mail: rpfernandez@uncu.edu.ar  
web: <http://www.frm.utn.edu.ar/geaa/>

2: Instituto de Ciencias Básicas (ICB)  
Universidad Nacional de Cuyo (UNCuyo)  
Centro Universitario s/n, Parque Gral. San Martín, Mendoza, Argentina

3: Facultad de Ciencias Agrarias  
Pontificia Universidad Católica Argentina (UCA)  
Cap. Gral. Ramón Freire 183, Buenos Aires, Argentina

4: Equipo Interdisciplinario para el estudio de procesos atmosféricos en el Cambio Global -PEPACG  
Alicia Moreau de Justo 1600, Buenos Aires, Argentina

**Palabras clave:** Modelo WRF, viento Zonda, Mesoescala, Análisis Sinóptico, Validación.

**Resumen** *El modelo Weather Research and Forecasting (WRF) es un modelo meteorológico de última generación que permite obtener campos de viento, presión, temperatura y humedad con alta resolución espacio-temporal, los cuales son de suma importancia como datos de entrada de los modelos de calidad de aire. El modelo WRF tiene la particularidad de poder ser configurado localmente para representar dominios espaciales en diferentes escalas de acuerdo al estudio que desee realizarse. Para ello deben seleccionarse de manera adecuada tanto las bases de datos como las condiciones iniciales y de contorno que mejor permitan describir los fenómenos deseados. En este trabajo se describe la mejor configuración local obtenida para WRF tendiente a simular la evolución de un evento de mesoescala, i.e. un viento Zonda que afectó la región de Cuyo en Febrero de 2007. Los grandes cambios mostrados por las principales variables atmosféricas fueron comparados con las mediciones superficiales provistas por el Servicio Meteorológico Nacional, mostrando un excelente acuerdo. La metodología presentada, partiendo de un análisis de las condiciones sinópticas, permite obtener una completa descripción del viento Zonda en escala regional, haciendo posible presentar un análisis de la evolución temporal y espacial del fenómeno a nivel de mesoescala.*

## 1. INTRODUCCIÓN

La calidad del aire en una región determinada está influenciada por diversos factores, entre los cuales la meteorología es de suma importancia. Es por ello que en la actualidad, los modelos de calidad de aire han evolucionado para incluir una representación 3-D y de alta resolución de los campos de viento, temperatura y presión que afectan el área de estudio [1]. Esto permite obtener una correcta descripción de la variación espacial y temporal de la capa límite planetaria, de suma importancia en el cómputo del volumen de dilución de los contaminantes atmosféricos. Si bien un estudio de calidad de aire típico suele considerar las condiciones atmosféricas más frecuentes de una localidad, los eventos de elevada contaminación puntual, suelen estar relacionados con fenómenos meteorológicos severos que alteran la climatología propia de la región.

El Grupo de Estudios Atmosféricos y Ambientales (GEAA) viene trabajando desde hace un par de años en la implementación y configuración de modernos modelos meteorológicos y de calidad de aire con alta resolución espacial y temporal. En particular hemos conseguido configurar localmente el modelo meteorológico WRF (*Weather Research and Forecasting*) [2] y acoplarlo con la extensión química modular WRF/Chem (*WRF with Chemistry*) [1]. Con WRF hemos realizado varios estudios de calidad de aire en escala regional para Mendoza, Buenos Aires, Bahía Blanca y Tucumán [3-5], así como generar campos meteorológicos de alta resolución adaptables a modelos de calidad de aire locales como CALPUFF [6] y de trayectorias como HYSPLIT [7]. Sin embargo, pese a todos los avances alcanzados, resta aún continuar con la validación de la configuración local del modelo WRF, siendo necesario evaluar su comportamiento para diferentes situaciones meteorológicas.

En este trabajo se presenta el estudio de un evento meteorológico severo de mesoescala como es un viento Zonda que afectó la región de Cuyo el día 15 de Febrero de 2007. Para ello se seleccionaron condiciones atmosféricas de contorno que permitieran reproducir la generación del evento, y se compararon las simulaciones con las mediciones provistas por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN). El trabajo incluye una descripción detallada de la configuración local del modelo y de las principales parametrizaciones y esquemas físicos utilizados. Se analiza la evolución espacio-temporal de las principales variables meteorológicas que permiten caracterizar el viento Zonda (temperatura, punto de rocío y humedad relativa), las cuales también son muy relevantes en los estudios de calidad de aire.

## 2. DESCRIPCIÓN FENOMENOLÓGICA DEL VIENTO ZONDA

La generación del viento Zonda que afecta los valles ubicados al Este de los Andes puede describirse de la siguiente manera [8,9]: Una masa de aire fría y húmeda procedente del Oeste, se ve forzada a ascender sobre el cordón montañoso, encontrando menores presiones, que dan lugar a su expansión y, por consiguiente, a su enfriamiento, a razón de 0,65°C cada 100 metros. Esto produce la condensación del vapor de agua contenido, generando nubes y precipitación (nievas y lluvia) sobre las laderas a barlovento. Una vez superado el obstáculo orográfico, el aire desciende y, por compresión, aumenta su temperatura a razón de 1°C cada 100 metros, pero ahora seco, por lo que no pierde calor por evaporación. La diferencia entre las velocidades de calentamiento y enfriamiento se debe a la condensación del vapor de agua durante el ascenso, que libera una cierta cantidad de calor denominada calor latente de condensación. La dirección predominante del zonda presenta una fuerte componente del Oeste y la velocidad del mismo se

caracteriza por su elevada rafagosidad. Esto provoca que se levante gran cantidad de polvo, disminuyendo notoriamente la visibilidad horizontal. Este tipo de fenómeno es conocido como *Zonda en Superficie*.

Análisis realizados en San Rafael muestran que cuando una parcela de aire que tiene una temperatura de 15°C en la costa chilena, llega al paso Cristo Redentor (3832 m) con una temperatura de -10°C; luego al descender hasta las ciudades de San Juan (630 m) y Mendoza (703 m), alcanza temperaturas de 22°C y 21°C, respectivamente. Existe además un marcado descenso de la humedad relativa, la cual alcanza valores muy bajos, a menudo inferiores al 10% [10]

Un evento de Zonda en Superficie termina, en la mayoría de los casos, tan abruptamente como comenzó, por invasión de aire frío proveniente del Sur. No obstante, en la tropósfera alta, el *Zonda en Altura* continúa soplando sobre el aire frío hasta que el espesor del frente frío es igual a la altura de la cordillera. Debido a que la variación de las corrientes atmosféricas a escala sinóptica es generalmente lenta pero permanente, un par de días más tarde comienza un nuevo ciclo con Zonda en Altura [11]. Los pobladores de la región andina suelen decir "*está zondeando en altura*", cuando observan ciertos fenómenos típicos tales como, el aspecto del cielo, el comportamiento de los animales o ciertos síntomas en el organismo humano.

## 2.1. Caracterización meteorológica del viento Zonda

Las variaciones higo-térmicas y el viento máximo alcanzado son los elementos que mejor identifican al día de viento Zonda, junto con el calentamiento superficial y la disminución de la humedad. Para determinar los cambios relacionados con el comienzo, la duración y el fin del Zonda, se puede analizar la variación inter-horaria de las siguientes variables meteorológicas: temperatura de aire; temperatura de punto de rocío; humedad relativa; dirección e intensidad del viento [8]. Existen en bibliografía dos métodos indirectos de detección del fenómeno: el del *Zonda Térmico* y el del *Zonda Hígrico* [9].

El primer método tiene como objetivo determinar el incremento de temperatura que ocurre en un intervalo de tiempo dado, teniendo en cuenta la onda climática diaria. El segundo método es semejante al anterior, pero considera la variación de humedad relativa existente en un intervalo de tiempo fijo. Dada esta situación, existe un conjunto de elementos meteorológicos que caracterizan al Zonda, o más precisamente, la variación inter-horaria de este conjunto es lo que permite reconocer una situación de Zonda. Además, es importante reconocer y ver en qué medida coinciden ambos métodos.

- *Zonda Térmico*: Al restar la variación de la temperatura media de la variación de la temperatura real se obtiene un valor superior a 1,5°C (las variaciones son consideradas entre una hora y la siguiente).
- *Zonda Hígrico*: Al restar la variación de la humedad relativa media de la variación de la humedad relativa real (entre esa misma hora y la siguiente), se obtiene un valor mayor o igual que -6% (siempre que la humedad sea inferior a 48%).

## 3. METODOLOGÍA

Esta sección está orientada a describir los esquemas de modelado y parametrizaciones físicas que conforman la "*configuración local*" del modelo WRF. La selección de las

distintas opciones se realizó considerando *i*) el fundamento físico de cada aproximación, y *ii*) la sensibilidad sobre las variables de salida del modelo. La configuración local incluye también la disposición de los dominios de modelado así como la selección de las condiciones iniciales y de contorno (CIC) sinópticas existentes durante la generación del viento Zonda.

### 3.1. Análisis de la situación sinóptica del evento

La Figura 1 muestra la situación sinóptica existente el día 15 de Febrero de 2007 a las 00:00 hs y 12:00 hs, obtenidas a partir de los datos de re-análisis FNL del *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) [12]. El panel muestra un mapa en escala sinóptica de la velocidad de presión vertical para un nivel de presión de 500 mb. Este tipo de mapas son normalmente utilizados por los servicios meteorológicos para realizar sus pronósticos operativos (e.g. *COLA Weather and Climate Data*, <http://wxmaps.org/>).

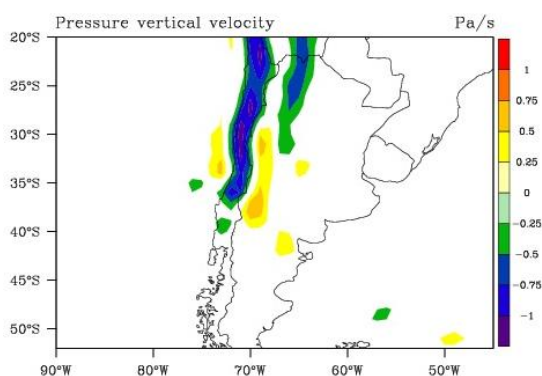


Figura 1. Análisis de la situación sinóptica existente para el día 15 de Febrero de 2007.

La situación sinóptica se caracteriza por una vaguada existente y el pasaje de un frente frío que se desplaza desde la cordillera con dirección Oeste-Sudoeste. En estos casos, puede asumirse con fiabilidad que existe un ascenso y posterior descenso orográfico de una masa de aire pre-frontal fuertemente baroclínica, generando en la cúspide de la cordillera un viento frío que se calienta adiabáticamente al descender. La componente zonal del viento es significativamente mayor a ambos lados de la máxima altura de la cordillera. Además, la troposfera media presenta una mayor cortante vertical del viento, y por ende mayor baroclinicidad, lo que señala el acercamiento de un sistema frontal.

### 3.2. Descripción del área de estudio y dominios de modelado

El dominio de modelado de alta resolución se encuentra centrado en la ciudad de Mendoza (32° 53' Sur, 68° 50' Oeste), posee una dimensión de 200 km Norte/Sur × 160 km Este/Oeste, abarcando las Ciudades de San Juan y San Rafael. El *downscaling* se realizó considerando 3 dominios anidados con resolución de 36, 12 y 4 km, respectivamente, con una extensión vertical de 28 niveles e incorporando las bases de datos estáticos de alta resolución sólo para el dominio externo. El tipo de anidado utilizado es *one-way-nesting*, que implica que las CIC de los dominios más pequeños son interpoladas a partir de los dominios mayores sin modificarlas. Las CIC del dominio mayor se obtuvieron del NCEP.

En la Figura 2 se muestran los 3 dominios anidados junto a una ampliación del dominio más pequeño, donde puede apreciarse la complejidad orográfica de la precordillera y cordillera, la cual tiene una fuerte influencia en la meteorología y calidad de aire local.

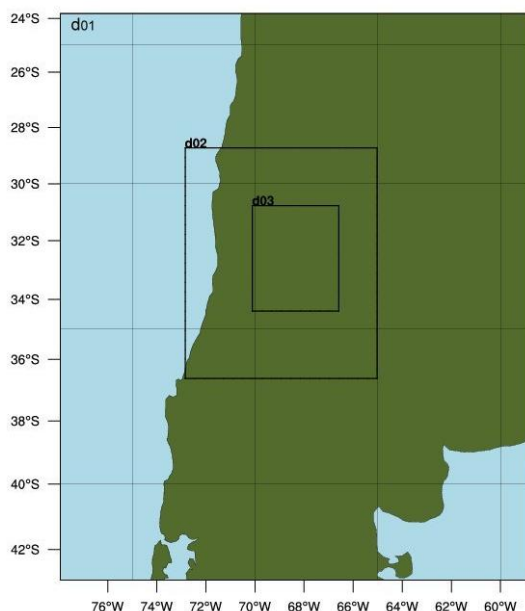


Figura 2. Dominios de modelado anidados utilizados en la configuración local de WRF.

### 3.3. Configuración local del modelo WRF

En la Tabla 1 se muestran las opciones que definen la mejor configuración local de WRF obtenida para la región de Cuyo. A continuación se presenta una breve descripción de los fundamentos físicos de los esquemas más relevantes [1,2].

**Microfísica de la Atmósfera:** Se utilizan tanto el esquema WSM (*WRF Single Moment*) de 5 clases como el propuesto por *Purdue Lin* y colaboradores. Ambos incluyen vapor de agua, nubes líquidas y de hielo, lluvia, nieve y granizo; pero el primero adiciona agua superenfriada y derretimiento de granizo.

**Transferencia Radiativa de Onda Larga:** Incluye radiación térmica e infrarroja absorbida y emitida por la superficie y los gases. El modelo RRTM (*Rapid Radiative Transfer Model*) está basado en el utilizado por el modelo MM5, y posee un esquema de banda espectral que utiliza el método de correlación-*k*.

**Transferencia Radiativa de Onda Corta:** Incluye explícitamente la radiación ionizante y fotoquímica proveniente del Sol, incluyendo absorción, reflexión y dispersión. El esquema *Goddard* realiza un cómputo *2-stream* basado en 11 bandas espectrales, mientras que el esquema *Dudhia*, tomado del modelo MM5, utiliza *look-up tables*.

**Física Superficial:** Considera la forma en que los forzantes radiativos y forzantes latentes de precipitación afectan a los distintos tipos y usos de suelo. El esquema *Noah* incluye 4 niveles superficiales, considera temperatura y humedad del suelo, evapotranspiración, drenaje, rugosidad del suelo y fracción total cubierta por nieve y hielo.

**Capa Límite Planetaria (PBL):** El esquema de la *Yonsei University* (YSU) sucede al esquema MRF y utiliza los calores latentes y sensibles superficiales para determinar los flujos y difusión verticales de manera independiente de los horizontales.

	Esquema Utilizado	Nombre en WRF	Valor en WRF
<b>WPS</b>			
Elevación de Terreno	SRTM3	-	-
Tipos y Usos de Suelo	GEAA	-	-
CIC	FNL	FNL	1
<b>&amp;time_control &amp;domain</b>			
Resolución Temporal	$\Delta t$ (seg)	time_step	216
Resolución Espacial	$\Delta x, \Delta y$ (km)	dx,dy	36,12,4
Resolución Vertical	$\Delta z$ (ETA levels)	e_vert	27 niveles
Datos de Entrada	Anidado	input_from_file	.T.,.F.,.F.
<b>&amp;physics</b>			
Microfísica	5-class WSM y Lin et al.	mp_physics	4,2,2
Radiación Larga	RRTM	ra_lw_physics	1,1,1
Radiación Corta	Goddard y Dudhia	ra_sw_physics	2,1,1
Física Superficial	Unified NOAH	sf_surface_physics	2,2,2
niveles superficiales	NOAH	num_soil_layers	4,4,4
PBL	YSU	bl_pbl_physics	1,1,1
Cúmulos	Grell G3	cu_physics	5,5,0
<b>&amp;dynamics</b>			
Integración	Runge-Kutta 2° orden	rk_ord	3
Velocidad vertical	Damping Habilitado	w_damping	1
Turbulencia y mezclado	Difusión de 2° orden	diff_opt	1
Coeficiente Eddy	Smagorinsky	km_opt	4
Prognosis	Anulada	progn	0

Tabla 1. Selección de esquemas y parametrizaciones utilizadas en la configuración local de WRF.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Validación puntual de las variables meteorológicas

En la Figura 3 se muestra la variación temporal de la temperatura ( $T_a$ ) y la humedad relativa ( $HR$ ), ambas a 2 metros, medidas por el SMN y simuladas con WRF. Puede verse como la simulación predice correctamente la variación diaria de los máximos y mínimos diarios de  $T_a$  y  $HR$ , los cuales están directamente relacionados entre sí. El día 15 de Febrero aproximadamente a las 12:00 UTC (9:00 hora local) se observa una caída abrupta de la  $HR$ , como consecuencia de la llegada del Zonda. Si bien en la simulación la caída inicial de  $HR$  sigue el comportamiento observado, el posterior incremento luego de la culminación del Zonda es mayor de lo esperado. Estas diferencias son de esperar, ya que la variación de RH es un fenómeno altamente localizado y que siempre presenta grandes dificultades en su simulación. Es más, WRF predice la saturación atmosférica las 2 noches siguientes al Zonda, lo cual es una sobreestimación. Cabe destacar que la cantidad de eventos de saturación atmosférica simulados se redujo notablemente utilizando las opciones dinámicas  $w\_damping = 1$  y  $diff\_opt = 1$ .

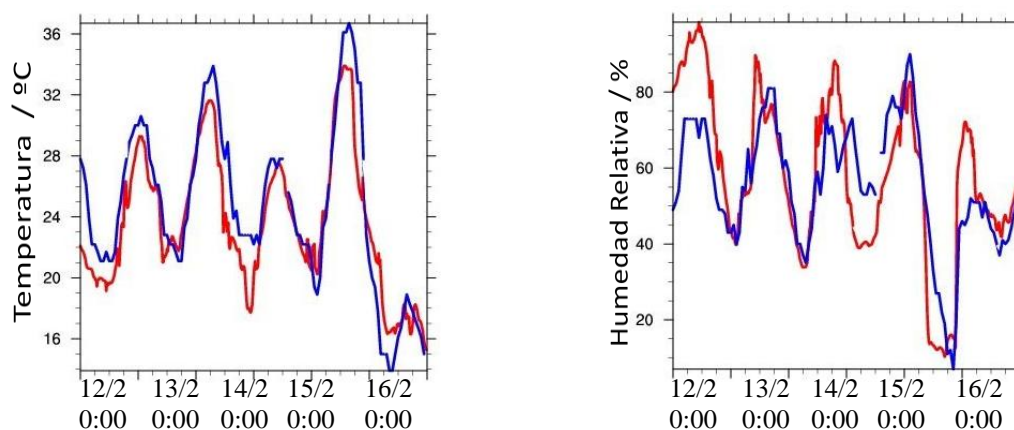


Figura 3. Comparación temporal de las simulaciones de WRF (rojo) con los datos del SMN (azul):  
a) temperatura a 2 m ( $T_a$ ); b) humedad relativa ( $RH$ )

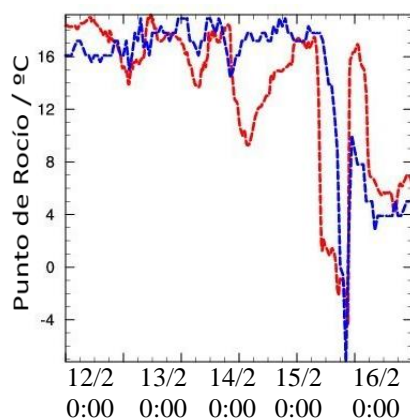


Figura 4. Variación temporal de  $T_a$  para WRF (rojo) y SMN (azul).

La Figura 4 muestra los valores de Temperatura o Punto de Rocío ( $T_d$ ) para el mismo período, en una representación que hace más evidente el cambio abrupto que provoca la llegada del Zonda. Es importante notar que la caída inicial de  $T_d$  ocurre alrededor de 3 horas antes de lo observado, sobrestimando el incremento luego del Zonda. Estas diferencias posiblemente se deban a que el modelo WRF posee una limitación intrínseca, permitiendo el anidado horizontal pero no vertical. Esto provoca que el descenso a superficie del viento Zonda ocurra más rápido y con más fuerza. [13] han recalcado la importancia de incluir una elevada resolución vertical de todos los dominios en WRF, principalmente en las capas más bajas de la atmósfera.

#### 4.2. Evolución Temporal del viento Zonda en Superficie

Los paneles de la Figuras 5 muestran los mapas superficiales de  $T_d$  y líneas de contorno de  $T_a$  cada 3 horas a partir del 15 de Febrero a las 09:00 UTC. Además se muestran los vientos superficiales de alta resolución obtenidos con WRF.



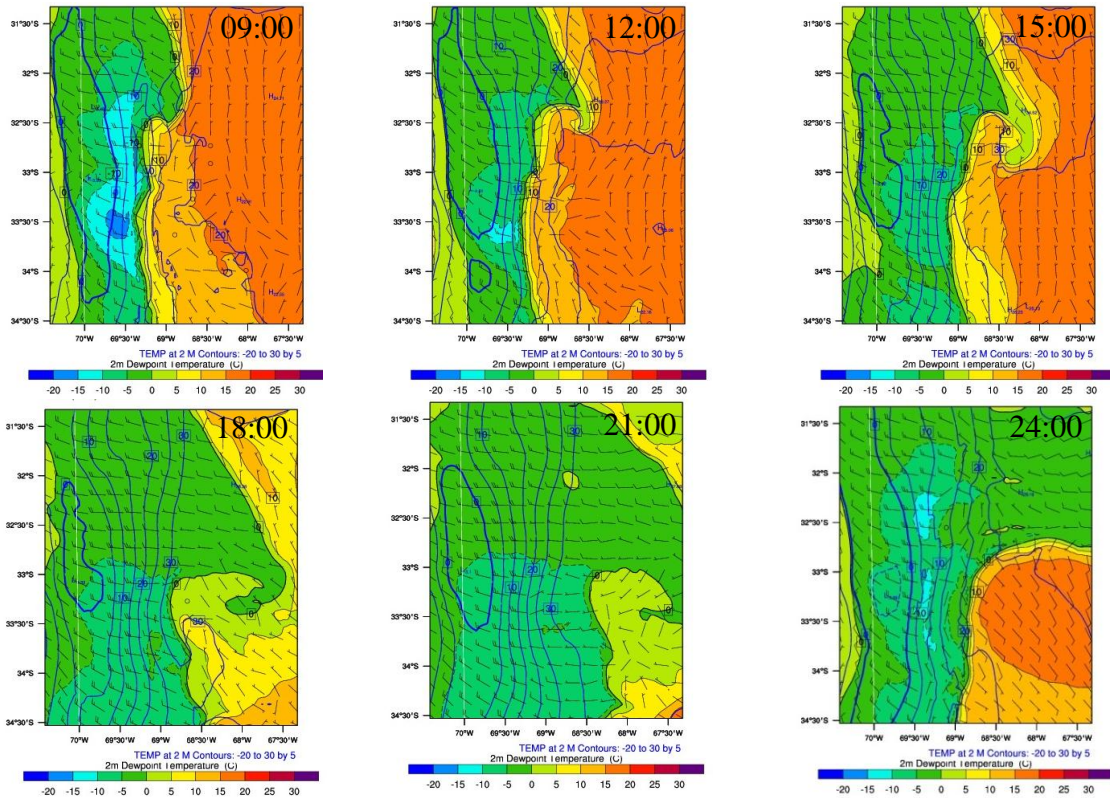


Figura 5. Mapas de punto de rocío ( $T_d$ ), temperatura a 2 m ( $T_a$ ) y campos de viento cada 3 hs.

Aquí puede verse como el Zonda cruza la cordillera y avanza sobre la región de Cuyo a las 12:00 UTC, permaneciendo hasta las 24:00 UTC cuando comienza a entrar un frente frío y húmedo desde el Sur. La irrupción abrupta ocurre justo entre los límites de las provincias de San Juan y Mendoza, observándose su máxima fuerza a las 18:00 UTC. Si bien  $T_a$  a ambos lados de la cordillera posee valores equivalentes, del lado chileno la temperatura ambiente es mucho menor, por lo que poseen una elevada  $HR$  (ver Figura 6). Es importante notar que a partir de las 24:00 UTC empieza a ingresar un frente frío con un alto contenido de humedad (tanto  $RH$  como  $AH$ ), lo que provoca que a medida que pasan las horas desde la llegada del Zonda, los parámetros atmosféricos evolucionan hasta alcanzar los valores típicos existentes en la región.

En la Figura 6 se muestran los valores de  $RH$  para los instantes más relevantes: 12:00, 18:00 y 24:00 UTC. Es importante notar que del lado Oeste de la cordillera, siempre se observan valores de  $RH$  superiores al 90%, mientras que luego del brusco descenso debajo del 10% en la región de Cuyo, el ingreso del frente frío vuelve a establecer valores de humedad similares a los existentes antes del Zonda.



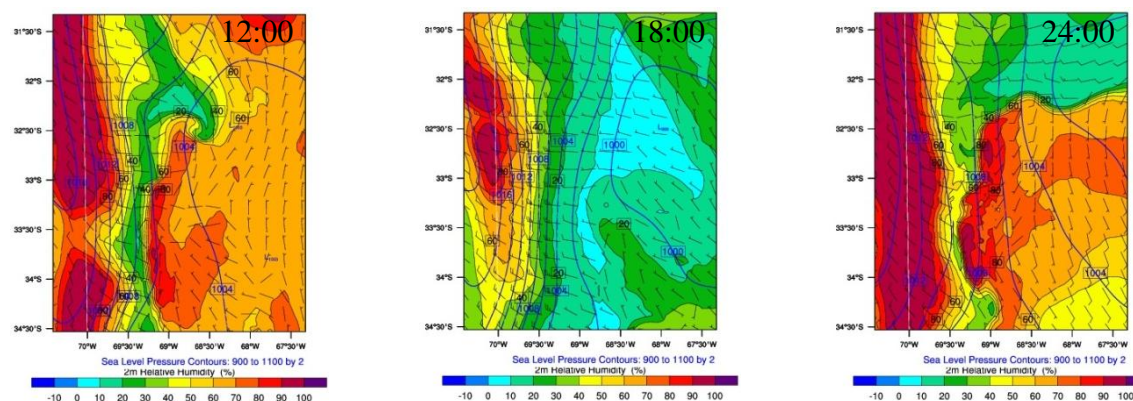


Figura 6. Mapas de humedad relativa ( $RH$ ), presión atmosférica ( $P$ ) y campos de viento cada 3 hs.

## 5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El presente trabajo presenta los resultados de la simulación de un evento meteorológico severo como es el viento Zonda obtenidos con el modelo WRF. Se describe la configuración local del modelo, los esquemas y parametrizaciones utilizados, y se comparan las principales variables meteorológicas con los datos del SMN. Además, se realiza un simple análisis de las CIC que favorecen la simulación de este tipo de fenómenos meteorológicos. Los resultados obtenidos permiten, por un lado, validar la configuración local de WRF con datos superficiales, mientras que por otro, permite obtener una descripción global de la evolución espacial y temporal de un viento Zonda que afecta a la Región de Cuyo. Estos resultados, si bien están concentrados en un análisis netamente meteorológico, son de suma importancia en el estudio de la calidad de aire en Argentina, ya que los campos meteorológicos de alta resolución obtenidos con WRF pueden incorporarse en una amplia gama de modelos de calidad de aire. Además, el continuo desarrollo en la aplicación química WRF/Chem permitirá a futuro, y entre otras cosas, avanzar en el estudio de la química atmosférica y determinar la interacción existente entre la química y la física; en lo que constituye una de las principales líneas de investigación del grupo GEAA en la actualidad.

## 6. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Servicio Meteorológico Nacional por facilitar los datos de la estación de “El Plumerillo”, Mendoza (SAME 87418). Este trabajo fue financiado parcialmente por la ANPCyT (PICT 2005 23-32686 y PRH 2009-0063) y PIP 2-5276 (CONICET).

## REFERENCIAS

- [1] Grell, G., Peckham, S., Schmitz, R., McKeen, S., Frost, G., Skemerock, W., Eder, B. “Fully coupled “online” chemistry within the WRF model”. *Atmospheric Environment*, 39, 6957-6975. (2005). <http://ruc.noaa.gov/wrf/WG11/>.
- [2] Wang, W., Bruyère, C., Duda, M., Dudhia, J., Gill, D., Lin, H-C., Michalakes, J., Rizvi, S., Zhang, X. “*WRF User's Guide*”, Mesoscale & Microscale Meteorology Division, National Center for Atmospheric Research (NCAR). (2009). [http://www.mmm.ucar.edu.ar/wrf/users/docs/arw\\_v3.pdf](http://www.mmm.ucar.edu.ar/wrf/users/docs/arw_v3.pdf).

- [3] Fernandez, R., Allende, D., Castro, F., Cremades, P., Puliafito, E. “Regional Air Quality Modeling using WRF/Chem: implementation of global and local databases for Mendoza, Argentina”. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente (AERMA)*, Vol. 14, pp. 01.43-01.50. 2010. ISSN 0329- 5284. (2010). <http://www.asades.org.ar/>
- [4] Fernandez, R., Allende, D., Castro, F., Cremades, P., Puliafito, E. “Sensitivity analysis of the spatial and altitude distributions of pollutants using the Weather Research and Forecasting model with chemistry (WRF/Chem)”. *Mecánica Computacional*, Vol XXIX, pp. 8087-8108. ISSN 1666-6070. (2010). <http://www.amcaonline.org.ar/>
- [5] Allende, D., Cremades, E., Puliafito, E., Fernandez, R., Pérez Gunella, R. “Estimación de un Factor de Riesgo de Exposición a la Contaminación para la Población de la Ciudad de Buenos Aires”. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente (AERMA)*, Vol. 14, pp. 01.127-01.134. ISSN 0329-5284 (2010). <http://www.asades.org.ar/>
- [6] J.S. Scire, D.G. Strimaitis, and R.J. Yamartino, A User ’ s Guide for the CALPUFF Dispersion Model, (2000).
- [7] Fernandez R. y Puliafito E. “Modelado de la distribución espacio-temporal de la concentración de O<sub>3</sub> troposférico: relación entre la química atmosférica y la meteorología” *XXVIII Congreso Argentino de Química (AQA)*. (2010).
- [8] Norte, F. A., Tesis Doctoral. “Características del viento Zonda en la Región de Cuyo”. Universidad de Buenos Aires, 255 pp. (disponible en Programa Regional de Meteorología, IANIGLA, CCT, Mendoza. (1988).
- [9] Simonelli, S., Tesis Doctoral. “Modelo estadístico de pronóstico de convección para la zona norte de la Provincia de Mendoza”. Facultad de Ciencias. Exactas y Naturales Universidad de Buenos Aires. 158 pag. (2000).
- [10] Norte, F., Simonelli, S. Seluchi, M. “El caso de la temperatura máxima histórica en Mendoza AERO: ¿viento Zonda y/o subsidencia dinámica y forzada?. Boletín Climatológico – Junio 2000. Programa Regional de Meteorología PRM-IANIGLA, CONICET, Argentina (2000).
- [11] Research Data Archive, Computational and Information Systems Laboratory (CISL) at the National Center for Atmospheric Research (NCAR). <http://dss.ucar.edu>.
- [13] Santos, R., García Garino, C., Salinas, S., Martínez, P., “Simulación numérica de eventos convectivos severos en la Provincia de Mendoza”, VI Encuentro de Investigadores y Docentes de Ingeniería, Energía y Medioambiente, p 36, (2011).