

## MAPA DE EROSIONABILIDAD PARA SIMULACIÓN DE EMISIONES FUGITIVAS DE POLVO CON EL MODELO WEATHER RESEARCH AND FORECASTING WITH CHEMISTRY (WRF/CHEM)

**CREMADES, PABLO G.<sup>1,2,\*</sup>; FERNANDEZ, RAFAEL P.<sup>1,2,3</sup> ; ALLENDE, DAVID G.<sup>1</sup>; MULENA, GABRIELA C.<sup>1,3</sup> Y PULIAFITO, SALVADOR E.<sup>1,3</sup>**

1: Grupo de Estudios Atmosféricos y Ambientales (GEAA)  
Facultad Regional Mendoza (FRM)  
Universidad Tecnológica Nacional (UTN)  
Rodríguez 273, (M5502AJE) Mendoza, Argentina.  
e-mail: pablocremades@gmail.com

2: Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (FCEN)  
Universidad Nacional de Cuyo (UNCuyo)  
Padre Contreras 1300 (M5502JMA), Mendoza, Argentina.

3: Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina.

**Resumen.** *Una representación apropiada de las fuentes de polvo es necesaria para predecir adecuadamente la concentración de partículas en simulaciones de resuspensión de polvo. El modelo Weather Research and Forecasting with Chemistry (WRF/Chem) incluye un mapa de erosionabilidad basado en la topografía del terreno, originalmente desarrollado para simulaciones de escala global, y que en consecuencia no representa apropiadamente la distribución geográfica de fuentes de polvo en Argentina. Por lo tanto, en este trabajo se desarrolla un método para obtener un mapa de erosionabilidad de alta resolución, utilizando información de reflectancia de suelo del Moderate Imaging Spectroradiometer (MODIS), apropiado para simulaciones de escala regional o local con el modelo WRF/Chem. Dicho mapa se utilizó la simulación de un evento severo de viento Zonda en la zona árida del centro-oeste de Argentina para analizar estos métodos. La concentración de material particulado simulada se comparó con mediciones realizadas en la ciudad de Mendoza. Además, se utilizó información de espesor óptico de aerosoles (AOD, por sus siglas en inglés) para estudiar el desempeño del modelo para reproducir la distribución espacial de las emisiones de polvo. La simulación realizada con dicho mapa arrojó valores de concentración que coinciden con las mediciones puntuales y la distribución espacial de AOD.*

**Palabras clave:** resuspensión de polvo, calidad de aire, modelo de escala local, viento Zonda.

### 1. INTRODUCCIÓN

Las zonas áridas y semiáridas inyectan anualmente grandes cantidades de polvo a la atmósfera. El polvo mineral tiene un impacto significativo en la salud [1], en la visibilidad en el transporte terrestre [2] y en la dinámica de la atmósfera [3]. Además, las partículas de polvo en suspensión cambian el balance de radiación del sistema atmósfera-tierra por absorción y dispersión de radiación solar, y esto tiene un impacto significativo en el clima a corto y largo

plazo [4]–[6]. Por lo tanto, es esencial entender los procesos de inyección de polvo y el ciclo del mismo en la atmósfera para evaluar y anticipar los efectos locales y globales [7].

Los modelos de calidad de aire son herramientas útiles para entender el transporte de los contaminantes en la atmósfera. El modelo Weather Research and Forecasting acoplado con química (WRF/Chem) [8], [9] incluye un esquema de emisión de polvo adaptado del modelo Goddard Global Ozone Chemistry Aerosol Radiation and Transport (GOCART) [10], [11], y modificado para simulaciones en alta resolución por la United States Air Force Agency (AFWA). En el modelo WRF/Chem, las fuentes de polvo se incluyen mediante un mapa de erosionabilidad que representa la susceptibilidad del suelo a la erosión eólica. Estudios anteriores han desarrollado y probado mapas globales de distribución de polvo en simulaciones de escala global. [10] propusieron la hipótesis que los sedimentos se han depositado a lo largo de los años en las depresiones geográficas y definió la erosionabilidad a partir de la elevación del terreno. Por su parte, [11] estableció que la erosionabilidad está correlacionada con la reflectancia del suelo visto desde el espacio. El mapa de erosionabilidad desarrollado por [10] es el único disponible por defecto para simulaciones de inyección de polvo en WRF/Chem. Dicho mapa funciona bien en regiones con grandes depósitos de sedimentos (esto es, el desierto de Sahara, o la península Arábiga) y en simulaciones de escala regional o global [4]; sin embargo, no representa adecuadamente la distribución espacial de las fuentes de polvo en escala local y en simulaciones con resolución de grilla del orden de los 10km [12]. Con esta resolución de grilla, el mapa de erosionabilidad estándar de WRF/Chem resulta en una subestimación de la emisión de polvo en Argentina, y en particular en zonas topográficamente complejas cerca de los Andes. Dicho problema está relacionado con en parte con la resolución gruesa del mapa ( $1^\circ \times 1^\circ$ ), que no representa correctamente la distribución espacial de las fuentes de polvo en grillas de alta resolución. Por otra parte, los estudios locales sobre desertificación en Argentina indican que las zonas susceptibles de sufrir erosión eólica se extienden desde el noreste hasta el sur, mientras que el mapa desarrollado por [10] muestra índices de erodibilidad altos solamente en el sureste del país. Por lo tanto, las simulaciones de inyección de polvo con WRF/Chem, a escala local en Argentina no reprochen correctamente la distribución temporal y espacial de la concentración de polvo.

Este trabajo propone un método general para generar un mapa de erosionabilidad de alta resolución adecuado para simulaciones de alta resolución en Argentina, utilizando el modelo WRF/Chem. Se desarrollaron 3 mapas de alta resolución basados en 2 hipótesis distintas: una basada en elevación del terreno, y la otra basada en la reflectancia del suelo. Se realizaron simulaciones de un evento de viento severo en la ciudad de Mendoza usando el mapa estándar y los nuevos mapas. Los resultados de las simulaciones se compararon con mediciones de material particulado en la ciudad. Además, se comparó la distribución espacial del espesor óptico de aerosoles (AOD) con datos del Moderate Resolution Spectroradiometer (MODIS).

## 2. ESQUEMA DE EMISIÓN DE POLVO EN WRF/CHEM

La erosionabilidad del suelo representa la forma en la que los sedimentos reaccionan a los agentes de erosión. Por lo tanto, la definición del factor de erosionabilidad ( $S$ ) depende de la formulación utilizada para incluir los procesos de erosión en el modelo [13]. En el caso de

WRF/Chem, el factor de erosionabilidad se define como la relación entre la emisión en un punto determinado respecto a la emisión que tendría lugar en el mismo punto para una superficie perfectamente erosionable [14], [15]. El factor  $S$  va de 0 (cero), para superficies que no emiten polvo (suelo rocoso o muy húmedo), hasta 1 (uno), para suelos con sedimentos sueltos (por ejemplo el desierto). Desde el punto de vista del modelo,  $S$  es un factor de peso que se utiliza para desagregar espacialmente las emisiones totales de polvo.

El esquema de emisión en WRF/Chem se basa en el trabajo de [16]. El modelo calcula la tasa de emisión de polvo ( $F$ ) a partir de la velocidad de viento. El modelo considera 5 tamaños de partículas a saber: 0.5, 1.2, 2.4, 4.5 y 8  $\mu\text{m}$  de diámetro; y calcula el flujo total ( $G$ ) integrando el flujo de los 5 bins:

$$F = G \times S \times \alpha \times CF \quad (1)$$

donde  $S$  es el factor de erosionabilidad en cada punto de grilla,  $\alpha$  es la eficiencia del proceso de erosión estimado a partir del contenido de arcilla del suelo y  $CF$  es un factor de ajuste para que la emisión total coincida con las estimaciones globales de inyección de polvo.

### 3. DESARROLLO DE MAPAS DE EROSIONABILIDAD DE ALTA RESOLUCIÓN

A partir de las formulaciones de [10] y de [11], desarrollamos mapas de erosionabilidad con resolución de 5km. Estos mapas ofrecen una distribución de fuentes de polvo en Argentina mejor que la que se encuentra en el mapa estándar. En las siguientes secciones se describen los métodos utilizados para generar los nuevos mapas.

#### 3.1. Erosionabilidad basada en elevación del terreno

A partir de un modelo digital de elevación del terreno con resolución de  $1^\circ \times 1^\circ$ , [10] propusieron la siguiente definición del factor de erosionabilidad ( $S$ ):

$$S = \left( \frac{z_{\max} - z}{z_{\max} - z_{\min}} \right)^5 \quad (2)$$

donde  $z$  es la elevación del terreno en un punto de grilla,  $z_{\max}$  y  $z_{\min}$  son las elevaciones del terreno máxima y mínima en un región de  $10^\circ \times 10^\circ$  alrededor de dicho punto. El efecto del exponente es aumentar el contraste entre los factores de erosionabilidad.

En el mapa resultante los puntos más elevados influyen áreas muy grandes, enmascarando las fuentes de polvo locales [10]. Por lo tanto, para generar un mapa apropiado para simulaciones de alta resolución se aplicó el mismo algoritmo (Eq. 2) sobre una base de datos de elevación de terreno del Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) con resolución de 90m, previamente interpolados a 5km de resolución de grilla. Se utilizó un kernel con un tamaño de 50km x 50km o 10 x 10 puntos de grilla, tal y como en la base de datos estándar. Los factores de erosionabilidad obtenidos (de ahora en adelante  $S_{\text{SRTM}}$ ) son hasta 6 veces mayores que los de la base de datos estándar ( $S_{\text{Standard}}$ ) (Fig. 1). Además,

se logró mejorar la distribución espacial de las fuentes de polvo con respecto a la base de datos original. Como se puede apreciar en la figura 1b, el mapa muestra valores de erosionabilidad altos cerca de la cordillera de los Andes y resalta la cuenca de los ríos.

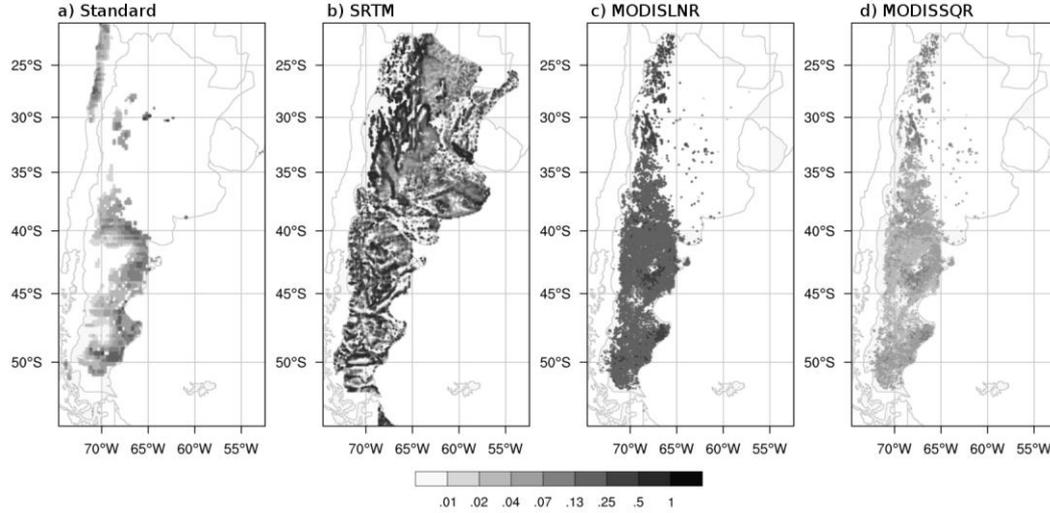


Figura 1. Mapas de erosionabilidad de Argentina: a) base de datos global estándar ( $S_{\text{standard}}$ ); b) usando datos SRTM de elevación de terreno ( $S_{\text{SRTM}}$ ); c) usando relación lineal con reflectancia de suelo ( $S_{\text{MODIS-LNR}}$ ); d) usando relación cuadrática con reflectancia de suelo ( $S_{\text{MODIS-SQR}}$ ).

### 3.2. Factores de erosionabilidad basados en reflectancia de suelo

Una hipótesis alternativa a la distribución de las fuentes de polvo relacionadas con la elevación de terreno, es la correlación entre la erosionabilidad del suelo y la reflectancia del mismo visto desde el espacio [11]. Esto es, un suelo seco y rico en sedimentos es más brillante que un suelo arcilloso y húmedo. Partiendo de este supuesto, construimos dos mapas a partir de datos MOD09 de reflectancia de suelo de MODIS [17]. Las ecuaciones 3 y 4 describen el algoritmo aplicado a los datos de reflectancia de suelo:

$$S_{LNR} = \frac{R}{R_{\max}} \times VegIndex \quad (3)$$

$$S_{SQR} = \left( \frac{R}{R_{\max}} \right)^2 \times VegIndex \quad (4)$$

donde  $R$  es la reflectancia de suelo en un punto de grilla determinado y  $R_{\max}$  es la máxima reflectancia de suelo encontrada en el planeta, en el desierto de Sahara.  $VegIndex$  es un coeficiente que varía linealmente de 0, para valores altos del índice normalizado de vegetación (NDVI), hasta 1 para valores de NDVI cercanos a 0. Este coeficiente enmascara aquellas zonas en las que la reflectancia es alta por las características de la cobertura vegetal. La ecuación 4 es equivalente a la 3, salvo por el exponente que tiene por efecto aumentar el contraste entre zonas de alta y baja reflectancia.

Las figuras 1c y 1d muestran los 2 mapas de erosionabilidad que resultan de aplicar las ecuaciones 3 y 4, llamados  $S_{MODIS-LNR}$  y  $S_{MODIS-SQR}$  respectivamente. Ambos mapas muestran una distribución de fuentes similar, puesto que las expresiones 3 y 4 son equivalentes, pero la ecuación lineal muestra valores más altos. En general, los valores de erosionabilidad son bajos en la zona noreste de Argentina, donde el clima es mayormente húmedo, y son altos en el oeste y sur del país. Este resultado coincide con los estudios de desertificación en Argentina [18], [19].

### 3.3 Distribución de tamaño de partículas

El esquema de emisión de polvo de WRF/Chem requiere información adicional sobre la composición del suelo, esto es, contenido de arena, arcilla y limo. A partir de esta información, el modelo determina la velocidad de viento umbral por encima de la cual las partículas se desprenden de la matriz. La composición del suelo se determinó a partir del mapa de clasificación del suelo más reciente que ofrece el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) [20]. El mapa de uso de suelo se reclasificó para obtener la composición requerida por el modelo siguiendo los lineamientos del United State Department of Agriculture [21].

## 4. SIMULACIÓN DE EMISIÓN DE POLVO CON WRF/CHEM

Para evaluar el desempeño del modelo con los nuevos mapas de erosión se simuló un episodio de viento Zonda [22], [23] que afectó a la ciudad de Mendoza en Mayo de 2013. El viento Zonda levanta y transporta grandes cantidades de polvo afectando principalmente a las provincias de Mendoza y San Juan. El modelo WRF se ha utilizado previamente para simular este fenómeno y se ha establecido una configuración adecuada para el caso [24], [25].

### 4.1. Configuración del modelo

Se definieron 2 dominios anidados para hacer el cambio de escala gradual y resolver la dinámica atmosférica en la región. El dominio exterior tiene una resolución de 36km, con una extensión de  $1800 \times 2160 \text{km}^2$  y cubre la región centro-oeste de Argentina. El dominio interior tiene una resolución de 12km y cubre la provincia de Mendoza (figura 2). Ambos dominios tienen 50 niveles verticales y se extienden hasta los 50hPa. Las condiciones iniciales y de borde se obtuvieron del reanálisis ERA-Interim [26]. Se utilizaron un modelo digital de elevación de terreno y un mapa de uso y cobertura de suelo actualizados para toda la Argentina y de alta resolución [27].

Las condiciones iniciales y de borde químicas para aerosoles se tomaron del modelo MOZART [28]. Se utilizó el mecanismo químico GOCART simplificado ( $\text{chem\_opt}=300$ ) implementado en el modelo WRF/Chem [9].

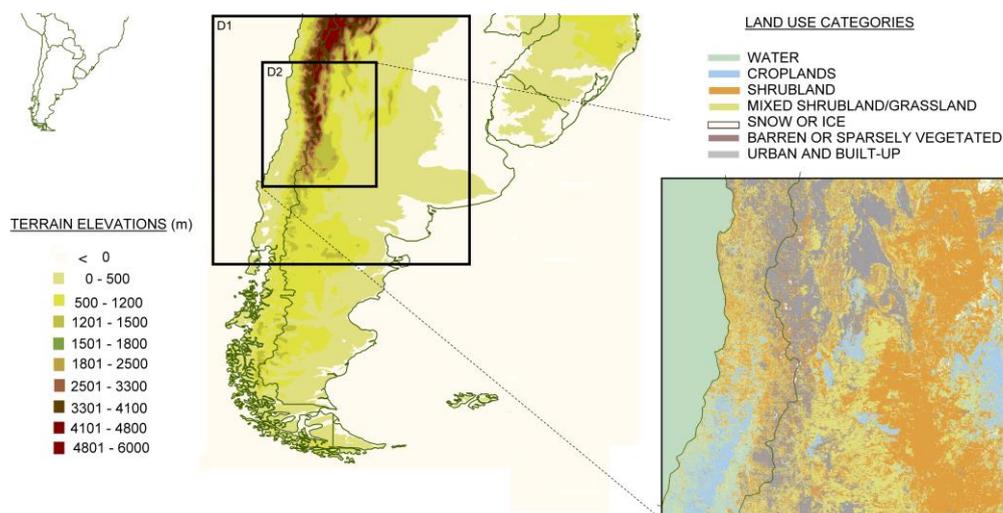


Figura 2. Dominios anidados en WRF/Chem.

## 4.2. Campaña de mediciones

Los resultados del modelo se compararon con mediciones de material particulado (PM10) de una estación de monitoreo continuo GRIMM, ubicada en una zona semi-urbana en la ciudad de Mendoza.

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Dos aspectos relevantes para evaluar los nuevos mapas de erosionabilidad de alta resolución son la distribución temporal de la concentración de material particulado y la distribución espacial de la misma. Para evaluar la capacidad del modelo para reproducir la variabilidad temporal de la concentración de polvo utilizamos las mediciones de PM10. Para evaluar la distribución espacial del polvo, utilizamos datos de espesor óptico de aerosoles (AOD) de MODIS.

### 5.1. Validación

[25] muestran que la configuración del modelo utilizada en este trabajo permite reproducir adecuadamente la velocidad y dirección de viento durante un evento de Zonda. En este caso, el error medio en la velocidad de viento es de 1.2m/s, el error cuadrático medio es de 2.2m/s y la correlación es de 0.8. El índice de acuerdo para las componentes meridional y zonal del viento es de 0.46 y 0.54 respectivamente. Estos resultados concuerdan con los reportados por [25]. La figura 3 muestra la velocidad y dirección de viento medida y simulada entre los días 28 de Mayo y 2 de Junio. A pesar de que el modelo sobrestima la velocidad de viento los días previos al ingreso del Zonda el día 31 de Mayo, reproduce correctamente la velocidad y dirección del viento durante el episodio, con ráfagas que alcanzan los 10m/s.

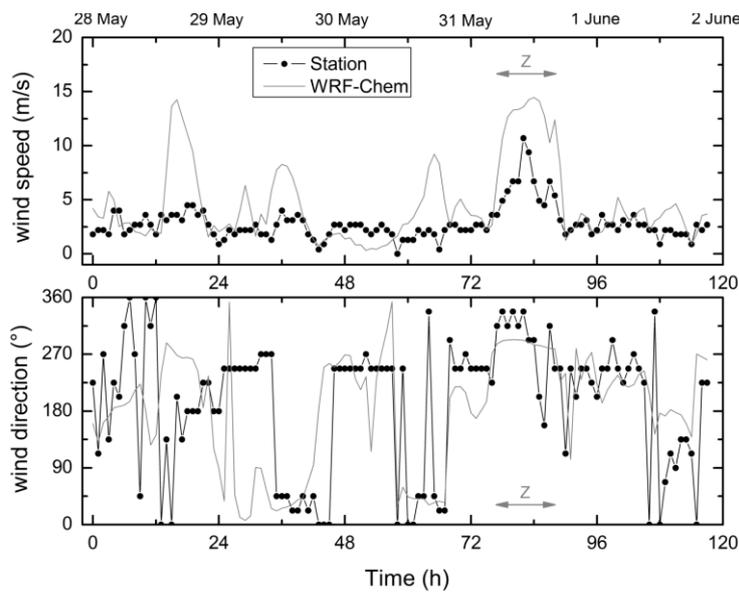


Figura 3. Velocidad y dirección de viento simulada y medida.

## 5.2. Mediciones de materia particulado

Para comparar los datos obtenidos del modelo con las mediciones de PM<sub>10</sub>, integramos la concentración en los 5 bins de la salida del modelo. La figura 4a muestra los valores medidos y simulados de material particulado entre los días 28 de Mayo y 2 de Junio. Las mediciones muestran picos de concentración en la tarde como consecuencia del tráfico vehicular. Sin embargo, el día 31 de Mayo, se registró un pico alrededor de las 4.00 hora local. Este pico es consecuencia de fuertes ráfagas de viento Zonda que ingresó a la región. La figura 4b muestra la relación PM<sub>10</sub>/PM<sub>2.5</sub> durante la campaña. Se puede observar que esta relación se incrementó significativamente por encima de la media horaria, manifestando un marcado aumento de la concentración de partículas gruesas, efecto típico de la resuspensión de polvo.

Con respecto a los valores simulados, la simulación utilizando el mapa de erosionabilidad estándar arroja valores de concentración prácticamente constantes y por debajo de 15  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Este resultado indica que el mapa estándar no representa adecuadamente la distribución de las fuentes de polvo, ni la susceptibilidad del suelo a la erosión eólica en la región de estudio. La concentración de polvo obtenida en la simulación S<sub>SRTM</sub> muestra un pico de 95  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  el 31 de Mayo a las 0.00. Sin embargo, la concentración decae rápidamente unas horas más tarde. Por otro lado, la distribución temporal de la concentración de PM<sub>10</sub> predicha por las simulaciones S<sub>MODIS-LNR</sub> y S<sub>MODIS-SQR</sub> coincide con las mediciones, aunque ambas simulaciones subestiman ligeramente los valores pico. S<sub>MODIS-SQR</sub> no muestra una mejora significativa con respecto a la simulación utilizando el mapa estándar. Las simulaciones S<sub>MODIS-LNR</sub> y S<sub>SRTM</sub> muestran un segundo pico de concentración en la tarde del día 31 de Mayo. A esa hora, se espera una contribución mayormente debida a fuentes vehiculares, lo que se pone de manifiesto en la figura 5b

donde se observa que la relación  $PM_{10}/PM_{2.5}$  retorna a los valores medios normales.

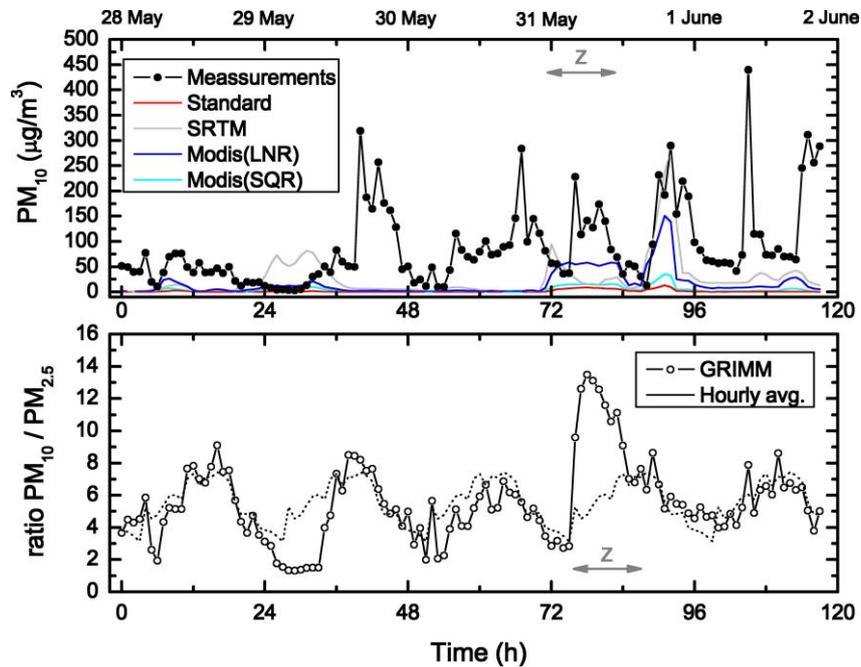


Figura 4. Valores simulados y medidos de  $PM_{10}$  (arriba); relación  $PM_{10}/PM_{2.5}$  medida (abajo):

### 5.3. Distribución espacial de las emisiones

El segundo aspecto relevante para evaluar el desempeño de cada uno de los mapas desarrollados es la distribución espacial de la concentración de material particulado. Comparamos datos de AOD obtenidos del modelo para cada simulación con datos del instrumento MODIS. Desafortunadamente, la región estuvo cubierta de nubes el día 31 de Mayo, limitando la calidad de los datos satelitales. Por lo tanto, centramos el análisis en el día 30 de Mayo (figura 5). Los valores de AOD simulados se derivan del coeficiente de extinción a 550nm dado por el modelo WRF/Chem para cada nivel vertical, el día 30 de Mayo a las 12.00 hora local. En el análisis omitimos la simulación  $S_{MODIS-SQR}$  puesto que la distribución espacial de AOD para ese caso es similar a la de  $S_{MODIS-LNR}$ , pero con valores ligeramente menores.

Las simulaciones  $S_{STRM}$  y  $S_{MODIS-LNR}$  predicen valores de AOD hasta 10 veces más grande la simulación  $S_{Standard}$ , sobre todo en la zona de los Andes. Además, la simulación estándar muestra una distribución prácticamente homogénea de los aerosoles, con valores ligeramente mayores sobre el norte de la costa de Chile (figura 5a). De esto se deduce que el AOD en esta simulación está relacionado con los valores de concentración de fondo de polvo y no con emisiones dentro del dominio. Por su parte, las simulaciones  $S_{STRM}$  y  $S_{MODIS-LNR}$  muestran valores altos de AOD en la parte central del dominio, que decrecen hacia el Este (figuras 5b y 5c). Esta distribución espacial concuerda con los datos del

satélite. La magnitud del AOD para la simulación  $S_{\text{MODIS-LNR}}$  coincide con la de los datos satelitales (figura 5d).

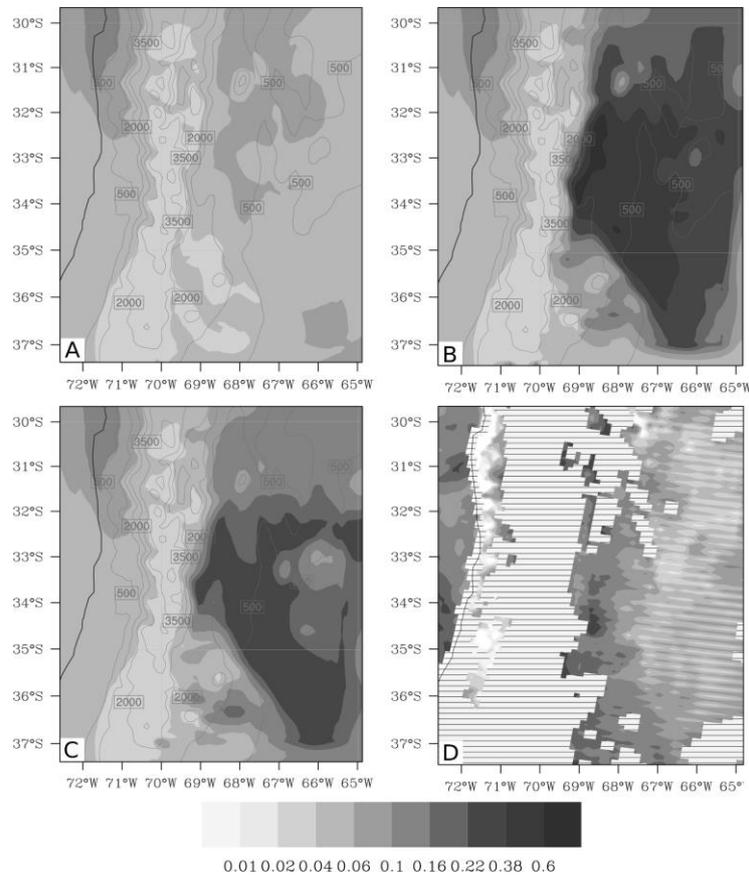


Figura 5. Valores de AOD para los casos a)  $S_{\text{Standard}}$ , b)  $S_{\text{STRM}}$ , c)  $S_{\text{MODIS-LNR}}$  y d) datos de MODIS.

## 6. CONCLUSIONES

Se desarrollaron y probaron 3 mapas de erosionabilidad para Argentina, en alta resolución, apropiados para simulaciones de emisiones fugitivas de polvo con el modelo WRF/Chem. Los métodos propuestos para generar dichos mapas son generales y por lo tanto aplicables a cualquier región del planeta. Hemos demostrado que el mapa incluido por defecto en el modelo resulta en una subestimación de las emisiones de polvo y en una pobre representación de la distribución espacial tanto de las fuentes como de los aerosoles suspendidos. El mapa  $S_{\text{STRM}}$  resulta en una mejora sustancial de la representación de la distribución de fuentes de polvo. Sin embargo, sobrestima la susceptibilidad a la erosión eólica en el noreste del país. Los mapas  $S_{\text{MODIS-LNR}}$  y  $S_{\text{MODIS-SQR}}$  muestran valores de erosionabilidad más bajos que  $S_{\text{STRM}}$ . En general, los métodos basados en reflectancia de suelo representan una distribución de fuentes de polvo que concuerdan más con los trabajos de desertificación en Argentina.

Tanto la simulación  $S_{\text{STRM}}$  como  $S_{\text{MODIS-LNR}}$  predicen valores de concentración de PM10

durante el Zonda, más cercanos a los medidos. Sin embargo, la simulación S<sub>SRTM</sub> arroja valores de concentración menores durante el episodio y sobrestima la concentración luego de que el intenso viento cesa.

La comparación de los valores de AOD simulados y medidos confirma que los mapas basados en reflectancia de suelo dan una mejor representación de la distribución de las fuentes de polvo en la región. En función de los resultados concluimos que el mapa S<sub>MODIS-LNR</sub> provee la mejor representación de la ubicación de las zonas susceptibles de erosión eólica y redundante en una mejor predicción de las emisiones fugitivas de polvo.

## REFERENCIAS

- [1] Y.-S. Chen, P.-C. Sheen, E.-R. Chen, Y.-K. Liu, T.-N. Wu, y C.-Y. Yang, «Effects of Asian dust storm events on daily mortality in Taipei, Taiwan», *Environ. Res.*, vol. 95, n.º 2, pp. 151-155, jun. 2004.
- [2] K. W. Kim, Y. J. Kim, y S. J. Oh, «Visibility impairment during Yellow Sand periods in the urban atmosphere of Kwangju, Korea», *Atmos. Environ.*, vol. 35, n.º 30, pp. 5157-5167, oct. 2001.
- [3] Z. Wang, «Neutralization of soil aerosol and its impact on the distribution of acid rain over east Asia: Observations and model results», *J. Geophys. Res.*, vol. 107, n.º D19, 2002.
- [4] O. A. Choobari, P. Zawar-Reza, y A. Sturman, «The global distribution of mineral dust and its impacts on the climate system: A review», *Atmospheric Res.*, vol. 138, pp. 152-165, mar. 2014.
- [5] M. R. Perrone y A. Bergamo, «Direct radiative forcing during Sahara dust intrusions at a site in the Central Mediterranean: Anthropogenic particle contribution», *Atmospheric Res.*, vol. 101, n.º 3, pp. 783-798, ago. 2011.
- [6] I. Tegen, A. A. Lacis, y I. Fung, «The influence on climate forcing of mineral aerosols from disturbed soils», *Nature*, vol. 380, n.º 6573, pp. 419-422, abr. 1996.
- [7] Y.-J. Choi, P. Hyde, y H. J. S. Fernando, «Modeling of episodic particulate matter events using a 3-D air quality model with fine grid: Applications to a pair of cities in the US/Mexico border», *Atmos. Environ.*, vol. 40, n.º 27, pp. 5181-5201, sep. 2006.
- [8] G. A. Grell *et al.*, «Fully coupled “online” chemistry within the WRF model», *Atmos. Environ.*, vol. 39, n.º 37, pp. 6957-6975, dic. 2005.
- [9] S. Peckham, A. G. Grell, A. S. McKeen, y R. Ahmadov, «WRF/CHEM Version 3.5 User’s Guide». National Center for Atmospheric Research, 24-jul-2013.
- [10] P. Ginoux *et al.*, «Sources and distributions of dust aerosols simulated with the GOCART model», *J. Geophys. Res. Atmospheres*, vol. 106, n.º D17, pp. 20255-20273, sep. 2001.
- [11] A. Grini, G. Myhre, C. S. Zender, y I. S. A. Isaksen, «Model simulations of dust sources and transport in the global atmosphere: Effects of soil erodibility and wind speed variability», *J. Geophys. Res. Atmospheres*, vol. 110, n.º D2, p. D02205, ene. 2005.
- [12] X.-X. Huang, «Studies on a Severe Dust Storm in East Asia and Its Impact on the Air

- Quality of Nanjing, China», *Aerosol Air Qual. Res.*, 2013.
- [13] L. Borselli, D. Torri, J. Poesen, y P. Iaquinta, «A robust algorithm for estimating soil erodibility in different climates», *CATENA*, vol. 97, pp. 85-94, oct. 2012.
- [14] C. S. Zender, «Spatial heterogeneity in aeolian erodibility: Uniform, topographic, geomorphic, and hydrologic hypotheses», *J. Geophys. Res.*, vol. 108, n.º D17, 2003.
- [15] C. S. Zender, «Mineral Dust Entrainment and Deposition (DEAD) model: Description and 1990s dust climatology», *J. Geophys. Res.*, vol. 108, n.º D14, 2003.
- [16] B. Marticorena y G. Bergametti, «Modeling the atmospheric dust cycle: 1. Design of a soil-derived dust emission scheme», *J. Geophys. Res.*, vol. 100, n.º D8, p. 16415, 1995.
- [17] E. F. Vermote, N. Z. El Saleous, y C. O. Justice, «Atmospheric correction of MODIS data in the visible to middle infrared: first results», *Remote Sens. Environ.*, vol. 83, n.º 1-2, pp. 97-111, nov. 2002.
- [18] E. M. Bridges, «World map of the status of human-induced soil degradation, oldeman, L. R., Hakkeling, R. T. A. and Sombroek, W. G. UNEP/ISRIC, Nairobi, Kenya, 1990. isbn 90 6672 042 5, US\$25.00 (paperback), 3 maps and explanatory note + 27 pp.», *Land Degrad. Dev.*, vol. 3, n.º 1, pp. 68-69, abr. 1992.
- [19] Elena María Abraham, *Tierras secas y desertificación en Argentina*. 2011.
- [20] G. Cruzate, «Suelos de la República Argentina», *INTA*, 2007.
- [21] USDA, «Textural soil classification», United States Department of Agriculture, 1987.
- [22] F. A. Norte, A. G. Ulke, S. C. Simonelli, y M. Viale, «The severe zonda wind event of 11 July 2006 east of the Andes Cordillera (Argentina): a case study using the BRAMS model», *Meteorol. Atmospheric Phys.*, vol. 102, n.º 1-2, pp. 1-14, nov. 2008.
- [23] M. E. Seluchi, F. A. Norte, P. Satyamurty, y S. C. Chou, «Analysis of Three Situations of the Foehn Effect over the Andes (Zonda Wind) Using the Eta-CPTEC Regional Model», *Weather Forecast.*, vol. 18, n.º 3, pp. 481-501, jun. 2003.
- [24] Fernandez, Rafael, Castro, Fernando, Cremades, Pablo, y Puliafito, Salvador, «Ozono Troposférico en Mendoza: Mediciones Experimentales y Modelado Computacional», *VI Encuentro Investig. Docentes Ing. EnIDI*, 2012.
- [25] S. E. Puliafito, D. G. Allende, C. G. Mulena, P. Cremades, y S. G. Lakkis, «Evaluation of the WRF model configuration for Zonda wind events in a complex terrain», *Atmospheric Res.*, vol. 166, pp. 24-32, dic. 2015.
- [26] D. P. Dee *et al.*, «The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system», *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, vol. 137, n.º 656, pp. 553-597, abr. 2011.
- [27] P. G. Cremades, «Modelado de emisiones por quema de biomasa y evaluación del impacto a escala regional y local.», Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, Argentina, 2017.
- [28] L. K. Emmons *et al.*, «Description and evaluation of the Model for Ozone and Related chemical Tracers, version 4 (MOZART-4)», *Geosci Model Dev*, vol. 3, n.º 1, pp. 43-67, ene. 2010.