

Meteorología

PUBLICACIÓN ESPECIALIZADA
EN TEMAS METEOROLÓGICOS

Versión en línea

ISSN 1850-468X

Volumen 37

Número 1

Año 2012

CONTENIDO:

Laura E. Venegas y Nicolás A. Mazzeo:

**EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE MODELOS DE DISPERSIÓN DE
CONTAMINANTES APLICADOS A CAÑONES URBANOS**

3

Kelen Martins Andrade, Gabriela V. Müller, Iracema F. A Cavalcanti, María E. Fernandez Long, Mario Bidegain y Guillermo Berri:

**AVALIAÇÃO DE MUDANÇAS NA FREQUÊNCIA DE SISTEMAS
FRONTAIS SOBRE O SUL DA AMÉRICA DO SUL EM PROJEÇÕES DO
CLIMA FUTURO**

15

Gustavo Naumann, María P. Llano y Walter M. Vargas:

**CLIMATOLOGÍA DE LA PRECIPITACIÓN DE TRES DÍAS EN LA
CUENCA DEL PLATA**

27

Roberto De Ruyver, María J. Denegri y Patricio Oricchio:

**MAPA DE RIESGO DE TEMPERATURAS EXTREMAS FRÍAS PARA EL
SUR DE LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES USANDO DATOS
SATELITALES Y DE SUPERFICIE**

37

Meteorología

PUBLICACIÓN SEMESTRAL DEL CENTRO ARGENTINO DE METEORÓLOGOS

DIRECTORA

ANDREA FABIANA CARRIL

EDITORES EJECUTIVOS

YANINA GARCÍA SKABAR
OLGA PENALBA

CONSEJO EDITORIAL

E. KALNAY - U. MARYLAND/USA
V. R. BARROS - UBA/CONICET
H. FUENZALIDA - U. CHILE/CHILE
J. N. PAEGLE - U. UTAH/USA
M. N. NUÑEZ - UBA/CONICET
E. R. LICHTENSTEIN - UBA
N. A. MAZZEO - UBA/CONICET
W. M. VARGAS - UBA/CONICET
D. KAROLY - MONASH U./ AUSTRALIA
E. H. BERBERY - U. MARYLAND/USA
S. HASTENRATH - U. WISCONSIN/USA
M. E. SELUCHI - CPTEC - INPE/BRASIL
A. M. GRIMM - U. F. PARANA/BRASIL
M. A. F. SILVA DIAS - U. SAO PAULO/BRASIL
H. LE TREUT - LMD-CNRS/FRANCIA
G. RAGA - UNAM/MEXICO
T. AMBRIZZI - U. SAO PAULO/BRASIL

J. PAEGLE - U. UTAH/USA
H. CIAPPESONI - SMN/CONICET
I. VELASCO - UBA
J. RUTLLANT - U. CHILE/CHILE
G. NECCO - IAI/BRASIL
P. ACEITUNO - U. CHILE/CHILE
J. B. VALDES - U. ARIZONA/USA
P. L. SILVA DIAS - U. SAO PAULO/BRASIL
C. NOBRE - CPTEC - INPE/BRASIL
J. L. MINETTI - U. TUCUMAN/CONICET
V. KOUSKY - NCEP/USA
M. L. ALTINGER - UBA/CONICET
B. SCIAN - U. NAC. DEL SUR
P. WAYLEN - U. FLORIDA/USA
J. ZAWADSKI - MCGILL U./CANADA
R. D. GARREAU - U. CHILE/USA
R. GARCIA - NCAR-ACD/USA

Objetivo de la revista: Meteorologica publica y difunde trabajos y resultados de investigación teórica y aplicada en todas las áreas de las ciencias atmosféricas.

Sistema de arbitraje: Para que los trabajos sean incluidos en la revista deberán ser evaluados por, al menos, dos referís independientes. Todas las decisiones tomadas por la Dirección serán finales.

Indizada en Meteorological & Geostrophysical Abstracts
Incluida en el catálogo del sistema LATINDEX



Forma parte del Núcleo Básico de Revistas Científicas Argentinas

© 2012 Centro Argentino de Meteorólogos. Propietario
Intendente Güiraldes 2160
Ciudad Universitaria, Pabellón II, 2° Piso
C1428EHA Buenos Aires, Argentina

Queda hecho el depósito legal que marca la ley 11723.
Registro de la Propiedad Intelectual en trámite
ISSN: Versión en línea 1850-468X

Editorial

Estimados lectores, tenemos el agrado de presentar un nuevo volumen de la revista Meteorologica, el cual incluye ocho artículos en temáticas de particular interés para la comunidad científica del cono sur de Sudamérica.

Seguimos trabajando en pos de jerarquizar nuestra revista. Meteorologica está cobrando mayor visibilidad a partir de su incorporación al portal Scielo Argentina (Scientific Electronic Library Online: www.scielo.org.ar) y al continuo trabajo en pos de actualizar y optimizar su página web (www.cenamet.org.ar/cam/meteorologica). Asimismo, Meteorologica está en proceso de evaluación por Thomson Reuters para ser potencialmente incluida en el "Citation Index".

Invitamos nuevamente a todos los profesionales e investigadores que se desempeñan en áreas relacionadas con las ciencias de la atmósfera, a enviar los resultados de sus trabajos para ser considerados como potenciales publicaciones en Meteorologica. Les recordamos que las normas para el envío de manuscritos han sido ampliamente simplificadas. La descripción de las mismas se encuentra al final de este volumen y en la página web de la revista.

El Comité Editorial agradece la contribución de los autores, quienes con sus aportes garantizan la continuidad de la revista, y la participación de numerosos científicos argentinos y extranjeros como revisores, quienes avalan la calidad científica de Meteorologica. Asimismo, agradecemos al Centro Argentino de Meteorólogos por su permanente apoyo a este Comité Editorial.

La Dirección

EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES APLICADOS A CAÑONES URBANOS

Laura E. Venegas y Nicolás A. Mazzeo

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas
Departamento de Ingeniería Química. Facultad Regional Avellaneda.
Universidad Tecnológica Nacional. Avellaneda. Prov. Buenos Aires. Argentina.

(Manuscrito recibido el 7 de marzo de 2010, aceptado el 31 de marzo de 2011)

RESUMEN

En los cañones urbanos, frecuentemente, se presentan concentraciones de contaminantes en aire varias veces superiores a la contaminación de fondo urbana. En este trabajo, se comparan valores de concentraciones de monóxido de carbono (CO) en aire medidas dentro de un cañón urbano con las estimadas mediante algunos modelos de dispersión atmosférica aplicables a procesos que se verifican en los cañones: STREET, STREET-BOX, OSPM y AEOLIUS. Se presenta la evaluación para condiciones de sotavento, barlovento y para direcciones intermedias del viento. En la comparación, se utilizaron los valores horarios de concentraciones de CO en aire medidas durante un año en el interior de un cañón urbano de Göttinger Strásse (Hannover, Alemania) y en el techo de un edificio lindero, de velocidad y dirección del viento observadas en el techo del mismo edificio y de flujo de tránsito vehicular en la calle del cañón. Los resultados generados por el modelo STREET con una constante empírica $k=7$, subestimaron las concentraciones observadas, obteniéndose un mejor desempeño con $k=12,1$. El modelo STREET-BOX es adecuado para condiciones de sotavento y direcciones intermedias, pero presenta diferencias importantes con las concentraciones observadas a barlovento. En general, los resultados aportados por los modelos OSPM y AEOLIUS fueron los que menos se apartaron de los valores observados.

Palabras Clave: calidad de aire; cañón urbano; modelos de dispersión atmosférica.

EVALUATION OF THE PERFORMANCE OF ATMOSPHERIC DISPERSION MODELS APPLIED TO URBAN STREET CANYONS

ABSTRACT

Air pollutant concentrations inside street canyons are usually several times background concentrations in urban areas. In this paper, carbon monoxide (CO) concentrations observed in a street canyon are compared with estimated values obtained using four atmospheric dispersion models: STREET, STREET-BOX, OSPM and AEOLIUS. Results for leeward, windward and intermediate wind directions are analyzed. Data used in the model evaluation include one year of hourly CO concentrations measured inside a street canyon of Göttinger Strásse (Hannover, Germany) and at the roof of a nearby building, wind speed and direction data registered at the roof of the nearby building and traffic flow in the street. Each model performance was evaluated for leeward, windward and intermediate wind directions. Results obtained with the STREET model considering the empirical constant $k=7$ (default value), underestimated observed concentrations. A better performance of the STREET model was obtained with $k=12,1$. The STREET-BOX model gave acceptable results for leeward and intermediate wind directions. The results of this model showed great differences with observed windward concentration values. In

general, the concentrations estimated by OSPM and AEOLIUS showed the best agreement with observed values.

Key words: air quality; urban street canyon; atmospheric dispersion models.

1. INTRODUCCIÓN

La contaminación del aire es un problema de dominio público debido a su impacto directo sobre la salud humana y la economía de los países. En las grandes ciudades, los vehículos son las principales fuentes de contaminantes del aire, contribuyendo con más del 50% de óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono y compuestos orgánicos (Fenger, 1999). Estos gases son emitidos a nivel del suelo y su remoción de la canopia urbana es compleja debido, entre otros aspectos, a la configuración de las fuentes, al ancho de las calles, la interferencia de los edificios, la velocidad y dirección del viento y la radiación solar. Considerando un cañón urbano en dos dimensiones constituido por dos edificios laterales y una calle, Oke (1988) distinguió tres tipos de flujos de aire interno. Para ello, se basó, principalmente en el régimen de viento ambiental observado en cañones urbanos con distintos coeficientes de aspecto (cociente entre la altura (H) y el ancho del cañón (W)). Esos tres tipos de flujos son: a) aislado ($H/W < 0,3$), b) en estela interferida ($0,3 \leq H/W \leq 0,7$) y c) en vórtice ($H/W > 0,7$). La característica más distintiva del flujo de aire en un cañón urbano es la formación de un vórtice interno, determinando que la dirección del viento en el nivel de la calle sea opuesta a la del flujo del aire ambiental perpendicular a la calle. Cuando la altura del cañón (H) es mucho mayor que su ancho (W), el vórtice interno principal del aire no se extiende hasta el nivel de la calle y puede existir cerca del suelo otro remolino secundario de menor dimensión que rota en sentido opuesto al del remolino principal. Si el ancho del cañón es apreciablemente mayor que su altura, el vórtice principal puede no abarcar completamente la distancia entre los edificios ubicados a ambos lados de la calle. Por supuesto, pueden existir variaciones de estos esquemas, por ejemplo en los casos en que el viento ambiental no tiene componente normal al eje del cañón; cuando el eje longitudinal del cañón no es rectilíneo; cuando la altura de los edificios no es uniforme; si existe influencia del calentamiento diferencial en la estructura del cañón urbano; o cuando son

importantes los efectos de la turbulencia inducida por el movimiento de los vehículos (Pavageau y otros, 2001). Las mediciones del flujo del aire en cañones urbanos son poco frecuentes y los resultados de las mismas, algunas a veces, no son definitivos. La principal causa de ello es que sólo se efectúan algunas mediciones de la turbulencia del aire en pocos niveles y en lugares no totalmente representativos. A menudo, los valores resultantes pueden estar afectados por estructuras (molduras, balcones, árboles) existentes en el ámbito del cañón. De esta manera, en la mayoría de los casos los datos provenientes de esas mediciones no permiten el conocimiento completo de la estructura tridimensional del flujo del aire en el interior de un cañón urbano "típico". Debido a ello y con el objeto de visualizar más adecuadamente el movimiento del aire en un cañón urbano, las mediciones con sensores ubicados "in situ", se complementan con otras técnicas observacionales. Un experimento de este tipo fue realizado por DePaul y Sheih (1986). Mediciones del flujo del aire en un cañón urbano fueron realizadas por Nakamura y Oke (1988). Perfiles verticales de la velocidad media del viento y de la turbulencia del aire dentro y fuera de un cañón urbano fueron presentados por Rotach (1995) y Louka y otros (2000).

Los contaminantes emitidos desde los vehículos, inicialmente son afectados por las características propias de su emisión, luego son influidos por la turbulencia generada por el movimiento de los automóviles y finalmente, por la turbulencia propia del aire en el interior del cañón urbano. Estos fenómenos, también, pueden actuar simultáneamente. Cuando el viento ambiental es normal al eje longitudinal del cañón, el torbellino transporta los contaminantes emitidos cerca del suelo hacia la pared del edificio ubicado a sotavento (en relación con el viento ambiental), donde se detectan las mayores concentraciones. También, existen flujos del aire en el interior del cañón, inestabilizados térmicamente por la insolación y por el calor generado en los edificios y por los vehículos. La concentración de contaminantes en el aire en un cañón urbano puede considerarse como el resultado del balance

entre las emisiones de contaminantes provenientes de los vehículos y el intercambio de contaminantes entre el cañón y la capa límite urbana. Este intercambio vertical es un proceso que se presenta en dos sentidos (entrando o saliendo en el tope del cañón) y posibilita la mezcla de contaminantes emitidos dentro del cañón con sustancias originadas por fuentes localizadas fuera del mismo.

En las dos últimas décadas se realizaron estudios relacionados con la dispersión de contaminantes en cañones urbanos (Berkowicz y otros, 1996; Kastner Klein y otros, 2001; Wehner y Weidensohler, 2003; Kim y Baik, 2004; Mazzeo y Venegas, 2005, 2008, 2010; Mazzeo y otros, 2007; Weber y otros, 2006; Li y otros, 2008; Kumar y otros, 2008; Cheng y otros, 2009). Asimismo, se han desarrollado modelos de dispersión de contaminantes en cañones urbanos, que incluyen desde expresiones analíticas hasta modelos basados en la dinámica de los fluidos (Huang y otros, 2000; Chu y otros, 2005). Los modelos que simulan estos procesos pueden ser paramétricos, o estar basados en relaciones empíricas o semi-empíricas, o aplicar métodos numéricos. Por lo tanto, las aplicaciones de los modelos pueden variar desde estimaciones de "sondeo simple" hasta la utilización de modelos numéricos. Desde el punto de vista regulatorio, generalmente las reglamentaciones establecen la necesidad de realizar estimaciones de valores horarios de la concentración de contaminantes. La aplicación de modelos complejos es muy limitada. En la actualidad, existen pocos modelos de dispersión que permiten realizar evaluaciones rutinarias del impacto de las emisiones vehiculares sobre la calidad del aire en los cañones urbanos.

El objetivo de este trabajo, es evaluar el desempeño de cuatro modelos de dispersión atmosférica para cañones urbanos: STREET (Johnson y otros, 1971), STREET-BOX (Mensink y Lewyckij, 2001), OSPM (Berkowicz, 2000) y AEOLIUS (Buckland, 1998) comparando las estimaciones de la concentración de contaminantes obtenidas aplicando los mismos, con datos observacionales horarios de monóxido de carbono (CO) medidos durante un año, en un cañón urbano de Göttinger Strasse (Hannover, Alemania).

2. BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS DE DISPERSIÓN ATMOSFÉRICA UTILIZADOS

2.1. El Modelo STREET

Johnson y otros (1971) desarrollaron el modelo STREET de dispersión atmosférica aplicable a cañones urbanos utilizando los datos del experimento Cañón Urbano San José (California). Este modelo ha sido ampliamente aplicado (Vardoulakis y otros, 2003, Mensink y otros, 2006). Se basa en la suposición de que la concentración de contaminantes en el interior de un cañón urbano, está compuesta por la contaminación "de fondo" y la contaminación "local" originada por las emisiones provenientes de los vehículos que circulan por la calle. La concentración se calcula en ambos costados de la calle.

El modelo STREET está integrado por las siguientes ecuaciones que permiten obtener la concentración "local" de contaminantes en aire dentro de un cañón urbano en las diferentes situaciones, de acuerdo con la dirección del viento sobre los edificios:

a) Para receptores ubicados a *sotavento* se supone que la concentración "local" (C_s) es inversamente proporcional a la distancia entre la fuente lineal y el receptor y se calcula mediante

$$C_s = k Q / \left\{ (U+0,5) \left[(x^2 + z^2)^{1/2} + L_D \right] \right\} \quad [1]$$

donde k es una constante empírica, Q es el caudal másico de emisión de los contaminantes por unidad de longitud, x y z son las distancias horizontal y vertical entre la fuente de emisión y el receptor, U es la velocidad del viento determinada encima de los edificios (o viento ambiental) y L_D es un parámetro representativo de la escala de longitud del volumen inicial de mezcla de los contaminantes (generalmente, $L_D = 2m$).

b) Para receptores ubicados a *barlovento* la expresión debida a Johnson y otros (1971) fue adaptada para tener en cuenta la disminución vertical de la concentración dentro del cañón, debida a la mezcla del aire contaminado existente en el interior del cañón con aire menos contaminado que ingresa por el tope del cañón urbano. La concentración "local" (C_b) se estima mediante

$$C_b = k Q (H-z) / [W(U+0,5) H] \quad [2]$$

donde W es el ancho del cañón urbano y H es la altura media de los edificios.

c) En condiciones con viento ambiental paralelo o casi paralelo a la dirección de la calle (es decir, las otras direcciones de viento o direcciones “intermedias”), la concentración “local” de contaminantes en aire (C_i) es calculada promediando los valores obtenidos para sotavento y barlovento,

$$C_i = 0,5(C_s + C_b) \quad [3]$$

Originalmente, el STREET incluyó un valor de $k=7$, obtenido utilizando los valores experimentales del Cañón Urbano San José (California). Sin embargo, es aconsejable calibrar el modelo para ser utilizado en un cañón urbano con diferentes características.

2.2. El Modelo STREET-BOX

El STREET-BOX (Mensink y Lewyckij, 2001; Mensink y otros, 2002) es un modelo analítico que estima la concentración de contaminantes en un cañón urbano a partir del balance entre la variación temporal de la masa transportada horizontalmente, la dispersada verticalmente y la emitida desde los vehículos. Utiliza la hipótesis de Prandtl–Taylor (Pasquill, 1974) para representar la dispersión turbulenta de los contaminantes. Este modelo no supone recirculación del aire en el interior del cañón y considera una distribución uniforme de la concentración en la calle. Es un modelo de caja, cuyas dimensiones son la longitud y el ancho de la calle y la altura de las construcciones laterales. La expresión para estimar la concentración “local” dentro del cañón urbano está dada por

$$C = Q / [U_{II} (H/L)W + (D + l U_{\perp}) (W/H)] \quad [4]$$

donde Q es el caudal másico de emisión de los contaminantes por unidad de longitud, H es la altura media de los edificios, W es el ancho del cañón, L es la longitud del cañón, D es el coeficiente de difusión molecular del aire, U_{II} es la velocidad del viento ambiental paralelo al eje de la calle (responsable de la “ventilación” del aire en el cañón) y U_{\perp} es la velocidad del viento ambiental perpendicular al eje de la calle (responsable del intercambio vertical de contaminantes sobre la longitud característica l). Esta longitud característica l puede asociarse con una longitud de mezcla típica vinculada con los torbellinos en el tope del cañón y en el modelo se

considera $l=1$ m. Un análisis de la sensibilidad del modelo a la variación de este parámetro se presenta en Mensink y otros (2002). El coeficiente de difusión (D) adquiere mayor importancia para vientos débiles y su valor se supone $1,5 \text{ m}^2/\text{s}$ (Coppalle, 2001).

2.3. El Modelo OSPM

El modelo OSPM (Operational Street Pollution Model) (Berkowicz, 2000) se basa en una descripción simplificada del flujo del aire y de la dispersión de contaminantes en aire dentro de un cañón urbano. Las concentraciones de los contaminantes en aire son calculadas utilizando una combinación de un modelo de pluma para estimar la contribución directa proveniente de los automotores que circulan por la calle y un modelo de caja para determinar la concentración de contaminantes que recirculan en el aire dentro del cañón. La parametrización del flujo de aire y de la dispersión atmosférica fueron obtenidas y comprobadas utilizando datos experimentales. La emisión de contaminantes generados por los vehículos que circulan por la calle del cañón es considerada como un número de infinitas fuentes formando diferentes líneas. La contribución desde cada línea de fuentes dada por:

$$\delta C_d = \left(\sqrt{2/\pi} \right) \delta Q / [u_b \sigma_z(x)] \quad [5]$$

donde u_b es la velocidad del viento en el nivel de la calle, $\sigma_z(x)$ es el parámetro de dispersión vertical a la distancia x en la dirección del viento, δC_d es la contribución a la concentración proveniente de las emisiones de contaminantes de una fuente lineal y δQ es la densidad de emisión de una fuente lineal. Cada fuente lineal está ubicada perpendicularmente a la dirección del viento en el nivel de la calle.

El tamaño del vórtice de recirculación depende de la altura del edificio ubicado a barlovento. Esto permite aplicar el modelo a calles con edificios extensos o a edificios erigidos en un solo lado de la calle. Otros parámetros, tales como la velocidad del viento ambiental, las dimensiones de los edificios y la forma de los techos, pueden influir sobre la extensión de la zona de recirculación. Un procedimiento muy simplificado es adoptado en el modelo, suponiendo que la longitud máxima de la zona de recirculación está dada por:

$$L_r = 2 H r \quad [6]$$

donde H es la altura del edificio y r es un factor que posibilita la reducción de la zona de recirculación en el caso de que la velocidad del viento sea débil. Se considera que la zona de recirculación tiene forma trapezoidal, con la longitud del lado superior igual a $5L_r$. Cuando $L_r > W$, los lados del trapecio terminan en las paredes ubicadas a barlovento de la calle.

Para un receptor ubicado a sotavento, se estima la contribución directa considerando las emisiones del tránsito en la zona de recirculación. Si el receptor se encuentra a barlovento, la contribución directa se evalúa considerando las emisiones fuera de la zona de recirculación. Si la zona de recirculación se extiende a todo el cañón, no se considera contribución directa en el receptor situado del lado de barlovento. Por otra parte, la concentración generada por la recirculación (C_r) se estima mediante un balance de masa dentro de la zona de recirculación. De este balance forman parte el flujo de contaminantes que ingresa en la zona de recirculación y el flujo que egresa de la misma. Se considera que los contaminantes están bien mezclados dentro de esa zona.

2.4. El Modelo AEOLIUS

El AEOLIUS (Assessing the Environment Of Locations In Urban Streets) es un modelo semi-empírico que calcula la concentración de contaminantes en aire en el interior de un cañón urbano, suponiendo tres contribuciones: a) el aporte directo de las emisiones vehiculares, b) el aporte indirecto debido a los contaminantes que recirculan en el cañón por acción del vórtice desarrollado dentro de la zona de recirculación de aire y c) la contaminación de fondo (Buckland, 1998).

Para estimar la contribución directa (C_d) de las emisiones, el modelo considera que los contaminantes se distribuyen en una pluma, ajustándose a una forma gaussiana

$$C_d = F \left(\frac{\sqrt{2/\pi}}{\sigma_w} \right) Q / (W \sigma_w) \quad [7]$$

donde F es un factor que depende del viento ambiental, W es el ancho del cañón urbano y σ_w es la desviación estándar de las fluctuaciones de la velocidad vertical del aire originada por la turbulencia mecánica generada por el viento dentro del cañón y al tránsito automotor en la calle. El valor de σ_w puede obtenerse mediante,

$$\sigma_w = \sqrt{(\alpha u)^2 + \sigma_{wo}^2} \quad [8]$$

donde u es la velocidad del viento en el nivel de la calle, α es una constante de proporcionalidad empírica ($\approx 0,1$) y σ_{wo} es la turbulencia inducida por el movimiento de los vehículos, definida como

$$\sigma_{wo} = b \left(NVS^2 / W \right)^{1/2} \quad [9]$$

donde b es un factor empírico relacionado con el arrastre aerodinámico ($\approx 0,3$), N es el número de vehículos que circulan por hora, V es la velocidad media de los vehículos y S^2 es la superficie de la calle ocupada por un solo vehículo. Por otra parte, para estimar el aporte indirecto de los contaminantes que recirculan (C_r) dentro del cañón, en el modelo AEOLIUS se supone que los contaminantes se encuentran bien mezclados, y por lo tanto, utiliza un modelo de caja expresado por

$$C_r = (Q/W) \left[L_T / (\sigma_{wt} L_t + U L_{S1} + u L_{S2}) \right] \quad [10]$$

donde U es la velocidad del viento ambiental, L_T , L_t , L_{S1} y L_{S2} son las dimensiones de la zona de recirculación en el interior del cañón, la cual tiene forma trapezoidal, σ_{wt} es la desviación estándar de las velocidades de "ventilación" del cañón, dada por

$$\sigma_{wt} = \sqrt{(\lambda U)^2 + \beta \sigma_{wo}^2} \quad [11]$$

donde $\lambda (=0,1)$ y $\beta (=0,4)$ son constantes empíricas. La dimensión de la zona de recirculación L_T está dada por

$$L_T = \gamma H r \sin(\theta) \quad [12]$$

donde γ es una constante considerada igual a 2, H es la altura media de los edificios del cañón, r es un factor relacionado con la intensidad del vórtice y depende de la velocidad del viento, y θ es el ángulo de la dirección del viento ambiental, respecto del eje longitudinal de la calle. El modelo relaciona las velocidades del viento ambiental (U) y del viento dentro del cañón (u) utilizando una función logarítmica.

La concentración a "sotavento" resulta de la suma de las contribuciones directa e indirecta (debida a la recirculación), mientras que a "barlovento" sólo es importante el aporte indirecto. Cuando las situaciones son de viento casi paralelo al eje de la calle, las

concentraciones a ambos lados de la calle son iguales.

3. DATOS UTILIZADOS

En la evaluación de los resultados obtenidos por los modelos de dispersión atmosférica descritos en el punto anterior, se utilizaron los valores horarios (N.L.Ö., 2000) de la velocidad y dirección del viento ambiental medidas en el techo de uno de los edificios laterales, de la concentración en aire de CO determinada por muestreadores instalados a un 1,5m de altura en el lado occidental (C_c) y en el techo de un edificio lateral (concentración de fondo, C_f) y del flujo vehicular, en un cañón urbano de Göttinger Strässe en Hannover (Alemania). La orientación del eje longitudinal de la calle de este cañón es 163° respecto del norte y tiene cuatro carriles de circulación vehicular, dos en un sentido y dos en el opuesto. El ancho medio del cañón es 25m y la altura media de los edificios es 20m. Por lo tanto, su coeficiente de aspecto es $H/W=0,8$. Como se mencionó anteriormente, de acuerdo con este valor y con la clasificación de la circulación del aire en el interior de un cañón urbano propuesta por Oke (1988), cuando el viento ambiental es aproximadamente perpendicular al eje longitudinal de la calle, se desarrolla un vórtice principal en el aire interior de este cañón urbano.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Se aplicaron los modelos descritos anteriormente considerando los valores horarios de la emisión y de los parámetros meteorológicos, obteniéndose los valores horarios de la concentración “local” dentro del cañón urbano de Göttinger Strässe, para un período de un año. Para realizar la evaluación de los resultados obtenidos, se calcularon los valores de la concentración “local” (C) de CO observada ($C = C_c - C_f$) restando la concentración de fondo (C_f) de los valores observados en el interior del cañón (C_c) de Göttinger Strässe.

Los casos fueron agrupados, teniendo en cuenta la orientación del cañón de Göttinger Strässe (163° - 343°) y la posición del muestreador (ver Figura 1) en, condiciones de “sotavento”: direcciones del viento del sector (208° - 298°), de “barlovento”: vientos del sector (28° - 118°) e intermedias: restantes direcciones.

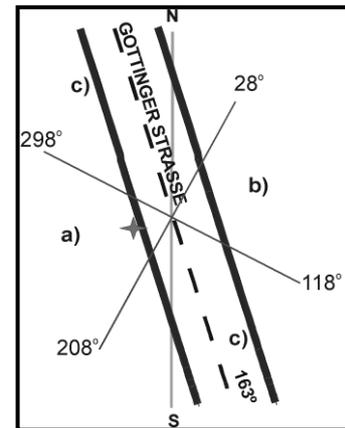


Figura 1: Esquema del cañón urbano de Göttinger Strässe (Hannover, Alemania). Sectores: a) sotavento; b) barlovento y c) direcciones intermedias (♦ posición del muestreador de CO dentro del cañón urbano)

La Figura 2 presenta las rosas de contaminación media “local” de CO para valores observados y calculados por los cuatro modelos. Comparando los valores calculados por los modelos STREET, STREET-BOX, AEOLIUS y OSPM con los observados, se encuentra que, para situaciones a “sotavento” los resultados del STREET-BOX y del OSPM se aproximan más a los valores medidos.

El STREET (con $k=7$) difiere en más de un factor 2. El STREET (con $k=12,1$, obtenido del mejor ajuste a los datos medidos), el AEOLIUS y el OSPM se apartan algo menos que la versión original del STREET. Para situaciones a “barlovento”, el modelo STREET-BOX calcula valores comparativamente muy altos, resultando insensible a la dirección del viento ambiental perpendicular al eje longitudinal de la calle; el STREET ($k=7$) subestima, mientras que el STREET ($k=12,1$), el AEOLIUS y el OSPM sobreestiman levemente.

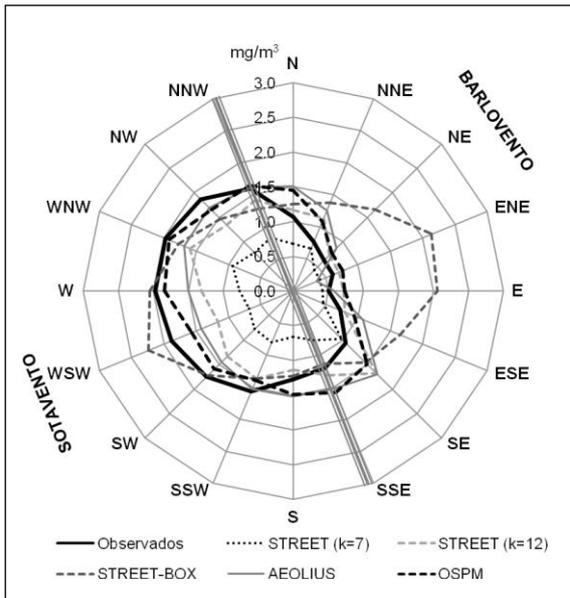


Figura 2: Rosas de contaminación de CO (mg/m³)

Para las direcciones del viento “intermedias” (incluyendo vientos paralelos al eje del cañón), los modelos STREET (k=12,1), STREET-BOX, AEOLIUS y OSPM se aproximan bastante a los valores observados, mientras que el STREET (k=7) subestima.

Para evaluar cuantitativamente las estimaciones de la concentración local de CO en el cañón urbano, se calcularon los valores medios observados y estimados y los siguientes parámetros estadísticos comúnmente utilizados en la verificación de modelos de dispersión atmosférica (Hanna, 1993):

- desvío

$$= \overline{(C_o - C_e)}$$

- error cuadrático medio normalizado (ECMN)

$$= \overline{(C_o - C_e)^2} / (\overline{C_o} \overline{C_e})$$

- error fraccional (FB)

$$= (\overline{C_o} - \overline{C_e}) / [0,5 (\overline{C_o} + \overline{C_e})]$$

donde C_e y C_o son los valores estimados y observados de la concentración, respectivamente. La barra superior indica valor medio.

Se presenta el análisis para las tres situaciones: sotavento, barlovento y direcciones intermedias y para todos los datos. Para un modelo “perfecto”, el desvío, el error cuadrático medio normalizado y el error fraccional serán nulos.

En la Figura 3 se comparan los valores medios correspondientes a las estimaciones de cada uno de los modelos con el observado para cada situación.

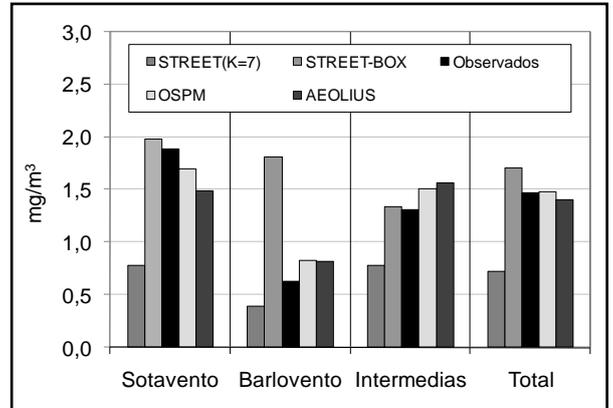


Figura 3: Valores medios de las concentraciones observadas y de las estimadas por cada modelo de dispersión, para cada situación.

El valor medio de los datos medidos a “sotavento” resultó 1,89 mg/m³. En estos casos, los mejores resultados se obtuvieron aplicando el STREET-BOX (1,98 mg/m³) y el OSPM (1,70 mg/m³). Para las situaciones a “barlovento”, el valor medio observado fue 0,63 mg/m³ y los mejores valores medios estimados se obtuvieron aplicando el AEOLIUS (0,82 mg/m³) y el OSPM (0,83 mg/m³). En las situaciones “intermedias” el valor medio observado fue 1,31 mg/m³. En estas situaciones la estimación del STREET-BOX (1,34 mg/m³) resultó la mejor. Los valores medios obtenidos mediante el AEOLIUS (1,57 mg/m³) y del OSPM (1,51 mg/m³) pueden considerarse aceptables. Considerando el total de los casos, el valor medio estimado que más se aproxima al valor observado (1,47 mg/m³) se obtuvo aplicando el modelo OSPM (1,48 mg/m³) y el AEOLIUS (1,41 mg/m³).

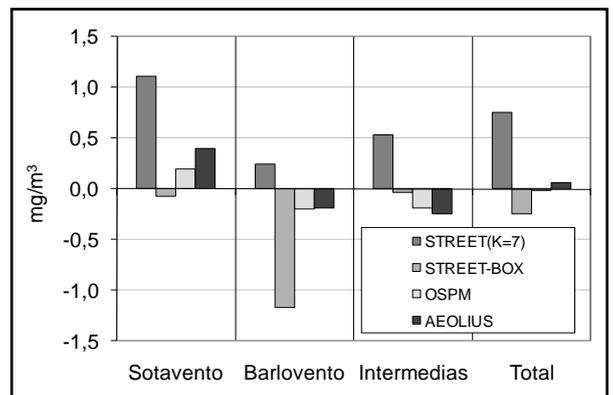


Figura 4: Valores del desvío para cada modelo de dispersión correspondiente a cada situación

En la Figura 4 se presentan los desvíos obtenidos para cada uno de los modelos de dispersión atmosférica, correspondiente a cada situación considerada.

En general, se observa que los resultados del modelo OSPM presentan desvíos relativamente pequeños, en todas las situaciones y el menor desvío ($-0,02 \text{ mg/m}^3$) si se consideran todos los casos. El modelo STREET original ($k=7$) subestima los valores observados presentando los mayores desvíos a sotavento, en las situaciones intermedias y en el total de los casos. En situaciones de barlovento, el modelo STREET-BOX tiene un desvío de $-1,17 \text{ mg/m}^3$.

En la Figura 5 se grafican los errores cuadráticos medios normalizados de las estimaciones de cada uno de los modelos, correspondientes a cada situación. En general, se observa que las estimaciones de los modelos OSPM y AEOLIUS son las que presentan los errores cuadráticos medios normalizados más pequeños. Los errores cuadráticos medios normalizados obtenidos en las estimaciones del OSPM son: 0,27 (sotavento), 0,62 (barlovento), 0,25 (intermedias) y 0,29 (total).

La Figura 6 presenta los valores del error fraccional calculados para las estimaciones de cada uno de los modelos en las condiciones de sotavento, barlovento, intermedias y todos los casos.

En general, los menores errores fraccionales están asociados a las estimaciones obtenidas por los modelos STREET-BOX (excepto a barlovento), AEOLIUS y OSPM. En el caso del modelo OSPM, los valores del error fraccional variaron entre $-0,28$ (a barlovento) y $-0,013$ (todos los casos) y los del modelo AEOLIUS entre $-0,26$ (a barlovento) y $0,04$ (todos los casos). Las estimaciones del modelo STREET-BOX presentan pequeños errores fraccionales ($-0,04$ a sotavento; $-0,03$ en intermedias y $-0,15$ para todos los casos). Pero, para barlovento ($-0,96$) este modelo no resulta recomendable.

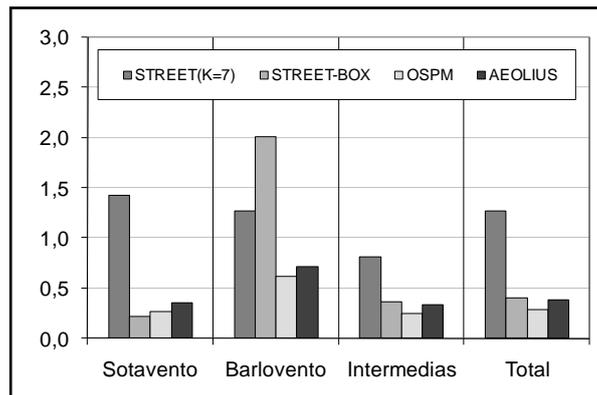


Figura 5: Valores del error cuadrático medio normalizado obtenido para cada modelo de dispersión correspondiente a cada situación

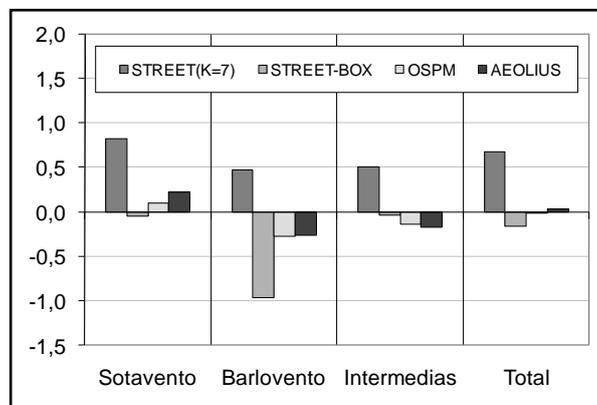


Figura 6: Valores del error fraccional obtenido para cada modelo de dispersión correspondiente a cada situación

En la Figura 7 se presentan las variaciones cuantil-cuantil de los valores estimados y observados de la concentración "local" (C), para cada uno de los modelos. Se observa que, excepto el modelo STREET($k=7$), los otros modelos sobreestiman los valores más bajos de la concentración de CO y subestiman los mayores. La distribución de los valores estimados por el OSPM es la que más se acerca a la de los valores observados.

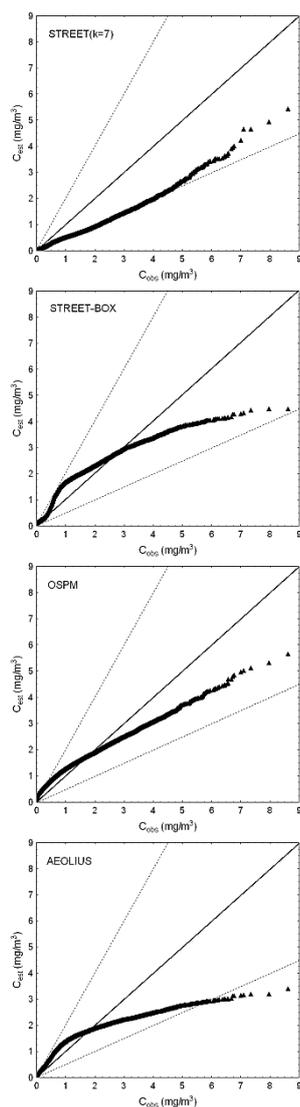


Figura 7: Representación gráfica cuantil-cuantil, entre los valores estimados y observados de la concentración “local”.

U < 2m/s				
	Promedio (mg/m ³)	Desvío (mg/m ³)	ECMN	FB
Observados	1,67	---	---	---
STREET(k=7)	1,18	0,49	0,55	0,35
STREET-BOX	1,40	0,27	0,48	0,18
OSPM	1,89	-0,22	0,25	-0,12
AEOLIUS	1,62	0,05	0,41	0,03
U ≥ 2m/s				
	Promedio (mg/m ³)	Desvío (mg/m ³)	ECMN	FB
Observados	1,41	---	---	---
STREET(k=7)	0,59	0,82	1,71	0,82
STREET-BOX	1,80	-0,39	0,38	-0,24
OSPM	1,37	0,04	0,31	0,03
AEOLIUS	1,35	0,06	0,37	0,04

Tabla I: Parámetros estadísticos obtenidos en la evaluación del desempeño de los modelos de dispersión con las condiciones del viento.

Por otra parte, teniendo en cuenta que la dispersión de los contaminantes dentro de un cañón urbano está influenciada por procesos turbulentos diferentes en condiciones de viento débil, se analizó el desempeño de los modelos de dispersión considerados para $U < 2\text{m/s}$ y $U \geq 2\text{m/s}$ (Kastner-Klein y otros, 2001). Los resultados de los estadísticos obtenidos en estos casos se incluyen en la Tabla I.

Se observa que los modelos OSPM y AEOLIUS presentan el mejor desempeño en ambas condiciones de viento. Sus resultados mejoran para vientos ambientales $U \geq 2\text{m/s}$.

El análisis de los resultados obtenidos para diferentes condiciones de flujo vehicular (N) se presenta en la Tabla II. Los parámetros estadísticos fueron calculados considerando condiciones de poco flujo vehicular ($N < 1000\text{veh/h}$) y de flujo vehicular intenso ($N \geq 1000\text{veh/h}$).

N < 1000veh/h				
	Promedio (mg/m ³)	Desvío (mg/m ³)	ECMN	FB
Observados	0,63	---	---	---
STREET(k=7)	0,26	0,37	1,98	0,82
STREET-BOX	0,55	0,08	0,75	0,13
OSPM	0,90	-0,27	0,61	-0,35
AEOLIUS	0,77	-0,14	0,80	-0,20
N ≥ 1000veh/h				
	Promedio (mg/m ³)	Desvío (mg/m ³)	ECMN	FB
Observados	1,84	---	---	---
STREET(k=7)	0,92	0,92	1,06	0,67
STREET-BOX	2,23	-0,39	0,33	-0,19
OSPM	1,69	0,09	0,24	0,05
AEOLIUS	1,75	0,15	0,31	0,08

Tabla II: Parámetros estadísticos obtenidos en la evaluación del desempeño de los modelos de dispersión en diferentes condiciones de flujo vehicular.

En condiciones de pocos vehículos, las estimaciones de los modelos STREET-BOX y AEOLIUS se aproximan mejor a los valores observados, mientras que en las situaciones de un mayor número de vehículos por hora, las mejores estimaciones de la concentración son obtenidas con el OSPM y el AEOLIUS.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se comparan los valores obtenidos mediante la aplicación de los modelos de dispersión atmosférica STREET, STREET-BOX, OSPM y AEOLIUS con las concentraciones horarias de CO en aire medidas

durante un año en un cañón urbano de Göttinger Straße (Hannover, Alemania).

El modelo STREET con el factor original $k=7$, subestima para las condiciones de sotavento, barlovento y direcciones intermedias. Para mejorar su desempeño en este cañón se propone utilizar $k=12,1$.

El STREET-BOX es adecuado para aplicar a situaciones de sotavento y direcciones intermedias, pero tiene grandes errores a barlovento.

En general, los resultados de los modelos OSPM y AEOLIUS, son los que menos difieren de los valores observados. El mejor desempeño de estos modelos se debe a que ambos incorporan la parametrización de: a) la contribución directa de las emisiones vehiculares y el aporte indirecto debido a los contaminantes que recirculan en el cañón por acción del vórtice desarrollado dentro de la zona de recirculación del aire; y b) la influencia de la turbulencia inducida por los vehículos sobre la dispersión de los contaminantes dentro del cañón urbano. Estos modelos resultan ser los más adecuados para su aplicación en cañones urbanos. Sin embargo, dado que el coeficiente de aspecto del cañón considerado es $H/W=0,8$, se espera que los modelos recomendados sean adecuados para cañones casi simétricos. Otros estudios son necesarios para evaluar la aplicabilidad de estos modelos en cañones asimétricos o irregulares.

Agradecimientos: Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. Los autores agradecen al Proyecto TRAPOS la información utilizada en este trabajo.

REFERENCIAS

- Berkowicz, R. 2000. OSPM – A parameterised street pollution model. *Environ. Monit. Assess.*, 65, 323-331.
- Berkowicz, R., Plamgren, F., Hertel, O. y Vignati, E. 1996. Using measurements of air pollution in streets for evaluation of urban air quality-meteorological analysis and model calculations. *The Science of the Total Environ.*, 189, 259-265.
- Buckland, A.T. 1998. Validation of a street model in two cities. *Environ. Monit. Assess.*, 52, 255-267.
- Cheng, W. C., Liu, Ch-H. y Leung, D.Y.C. 2009. On correlation of air and pollutant exchange for street canyons in combined wind-buoyancy-driven flow. *Atmos. Environ.*, 43, 3682-3690.
- Chu, A.K.M., Kwok, R.C.W. y Yu, K.N. 2005. Study of pollution dispersion in urban areas using Computational Fluid Dynamics (CFD) and Geographic Information System (GIS). *Environ. Mod. & Soft.*, 20, 273-277.
- Coppalle, A. 2001. A street canyon model for low wind speed conditions, *Int. J. Environ. Poll.*, 16, 417-424.
- DePaul, F.T. y Sheih, C.M. 1986. Measurements of wind velocities in a street canyon. *Atmos. Environ.*, 20, 455-459.
- Fenger, J. 1999. Urban air quality. *Atmos. Environ.* 33, 4877-4900.
- Hanna, S.R. 1993. Uncertainties in air quality model predictions. *Boundary-Layer Meteorol.* 62, 3-20.
- Huang, H., Akutsu, Y., Arai, M. y Tamura, M. 2000. A two-dimensional air quality model in an urban street canyon: Evaluation and sensitivity analysis, *Atmos. Environ.*, 34, 689-698.
- Johnson, W.B., Ludwig, F.L., Dabberdt, W.F. y Allen, R.J., 1971. Development and initial evaluation of an urban diffusion model for carbon monoxide. Sixty fourth annual meeting, American Institute of Chemical Engineers.
- Kastner Klein, P., Fedorovich, E. y Rotach, M.W. 2001. A wind tunnel study of organized and turbulent air motions in urban street canyons. *J. of Wind Eng. and Industrial Aerodynamics*, 89, 849-861.
- Kim, J.J. y Baik, J.J. 2004. A numerical study of the effects of ambient wind direction on flow and dispersion in urban street canyons using the RNG $k-\epsilon$ turbulence model. *Atmos. Environ.*, 38, 3039-3048.
- Kumar, P., Fennell P. y Britter, R. 2008. Effect of wind direction and speed on the dispersion of nucleation and accumulation mode particles in an urban street canyon. *The Science of the Total Environment*, 402, 87-94.
- Li, X-X., Leung, D.Y.C., Liu, C-H. y Lam, K.M. 2008. Physical modeling of flow field inside urban street canyons. *J. of Appl. Meteorol. and Climatology*, 47, 2058-2067.
- Louka, P., Belcher, S.E. y Harrison, R.G. 2000. Coupling between air flow in streets and the well-developed boundary layer aloft. *Atmos. Environ.*, 34, 2613-2621.
- Mazzeo, N.A. y Venegas, L.E. 2005. Evaluation of Turbulence from traffic using experimental data obtained in a street canyon. *Inter. J. of Environ. and Poll.*, 25, 164-176.

- Mazzeo, N.A., Venegas, L.E. y Martin, P.B. 2007. Analysis of full-Scale data obtained in a street canyon. *Atmósfera*. 20 (1), 93-110.
- Mazzeo, N.A. y Venegas, L.E. 2008. Evaluation of natural and traffic-producing turbulences using full-scale data from four street canyon. *Hrvatski Meteoroloski Casopis*. 43, 2, 662-666.
- Mazzeo, N. A. y Venegas L. E. 2010. Air pollution dispersion inside a street canyon of Göttinger Strasse (Hannover, Germany): new results of the analysis of full scale data. *Inter. J. of Environ. and Poll.*, 40, 195-209.
- Mensink, C. y Lewyckyj, N. 2001. A simple model for the assessment of air quality in streets. *Int. J. of Veh. Design*, 27, 242-250.
- Mensink, C., Lewyckyj, N. y Janssen, L. 2002. A new concept for air quality modeling in street canyons, *Water, Air & Soil Poll.: Focus*, 2, 339-349.
- Mensink, C., Lefebvre, F., Janssen, L. y Cornelis, J. 2006. A comparison of three street canyon models with measurements at an urban station in Antwerp, Belgium. *Environ. Model. & Soft.*, 21, 514-519.
- N.L.Ö, 2000. Lufthygienische Überwachungssystem Niedersachsen – Niedersächsisches Landesamt für ökologie, Researc Network TRAPOS.
- Nakamura, Y. y Oke, T.R.1988. Wind, temperature and stability conditions in and E-W oriented canyon. *Atmos. Environ.*, 22, 2691-2700.
- Oke, T. 1988. Street design and urban canopy layer climate. *Energy and Building*, 11,103-113.
- Pavageau, M, Rafaildis, S. y Schatzmann, M. 2001. A comprehensive experimental databank for verification of urban car emission dispersion models. *Int. J. Environ. Poll.*, 15, 417-425.
- Pasquill, F. 1974. *Atmospheric Diffusion*, Ellis Horwood, UK.228pp.
- Rotach, M.W. 1995. Profiles of turbulence statistics in and above an urban street canyon. *Atmos. Environ.*, 29, 1473-1486.
- Vardoulakis, S., Fisher, B.E.A., Pericleous, K. y Gonzales-Flesca, N., 2003. Modelling air quality in street canyons: a review. *Atmos. Environ.*, 37, 155-182.
- Weber S., Kuttler, W. y Weber, K. 2006. Flow characteristics and particle mass and number concentration variability within a busy street canyon. *Atmos. Environ.*, 40, 7565-7578.
- Wehner, B. y Weidensohler, A. 2003. Long term measurements of submicrometer urban aerosols: statistical analysis for correlations with meteorological conditions and trace gases. *Atmos. Chem. Phys.*, 3, 867-879.

AVALIAÇÃO DE MUDANÇAS NA FREQUÊNCIA DE SISTEMAS FRONTAIS SOBRE O SUL DA AMÉRICA DO SUL EM PROJEÇÕES DO CLIMA FUTURO

Kelen Martins Andrade ¹, Gabriela V. Müller ², Iracema F.A Cavalcanti ¹, María E. Fernandez Long ³, Mario Bidegain ⁴ y Guillermo Berri ⁵

¹ Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos/Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC-INPE, Cachoeira Paulista, Brasil.

² Centro de Investigación Científica y de Transferencia Tecnológica a la Producción (CICYTTP-CONICET), Diamante, Argentina.

³ Facultad de Agronomía, Cátedra de Climatología y Fenología Agrícolas, Universidad de Buenos Aires (FA-UBA), Argentina.

⁴ Universidad de la Republica - Facultad de Ciencias – Uruguay.

⁵ Servicio Meteorológico Nacional, Buenos Aires, Argentina/CONICET.

(Manuscrito recibido el 11 de marzo de 2010, aceptado el 6 de junio de 2011)

RESUMO

A frequência de sistemas frontais sobre o sul da América do Sul identificada na reanálise do NCEP/NCAR é comparada com as simulações dos modelos GFDL e Hadley e projetadas no clima futuro. As análises para identificar casos de sistemas frontais foram feitas em três regiões que cobrem áreas do Brasil, Uruguai, Paraguai e Argentina. Esta análise foi realizada com o fim de investigar as características de eventos extremos no clima presente e em projeções do clima futuro. Para o clima presente observou-se que os modelos analisados simularam bem as características sinóticas dos sistemas frontais. No entanto, quando se compara a frequência de ocorrência das frentes entre a reanálise e as simulações, observa-se que os modelos GFDL e Hadley superestimam seu número e apenas o GFDL consegue reproduzir a variabilidade mensal. O modelo Hadley superestima ainda mais em relação ao NCEP e GFDL no clima presente. A tendência positiva no número de frentes observada na área 3 (65°W-60°W, 33°S-38°S) nos resultados da reanálise não é simulada pelos modelos. Quando os casos mais intensos são selecionados, o modelo GFDL é o que superestima mais o número de sistemas frontais. Os dois modelos indicam aumento na frequência de sistemas frontais no futuro nas três áreas, porém em menor proporção na área 3.

Palavras-Chave: sistemas frontais, clima futuro, América do Sul.

CHANGES IN FREQUENCY OF FRONTAL SYSTEMS OVER SOUTHERN OF SOUTH AMERICA IN PROJECTIONS OF FUTURE CLIMATE

ABSTRACT

The frequency of frontal systems reaching the south of South America is compared with reanalysis NCEP/NCAR and results of GFDL and Hadley models for the future climate. Three regions were analyzed to identify the frontal systems, in areas of Brazil, Uruguay, Paraguay and Argentina. The following criteria were used: increase of sea surface pressure, reduction of the temperature and change of the meridional wind at 850hPa, in two consecutive days. Selected cases with temperature drop above five degrees, considered the most intense, were also analyzed. For the present climate it was observed that the models simulated well the synoptic characteristics of frontal systems. However, when comparing the frequency of frontal occurrence between reanalysis data and models

simulations, the GFDL and Hadley models overestimated their numbers. The Hadley model overestimates further more than the NCEP and GFDL in present climate. The positive trend observed in area 3 (65°W-60°W, 33°S-38°S) from NCEP reanalysis is not simulated by the models. When the most intense systems are selected, the GFDL model shows higher overestimation in number of frontal systems. Both models indicate an increase of frontal systems frequency in future in the three areas, although less in area 3.

Keywords: frontal systems, climate change, South America.

1. INTRODUÇÃO

A passagem de sistemas frontais em diversas regiões do globo é muito importante na determinação das condições do tempo. Na América do Sul estes sistemas são responsáveis principalmente por acumulados significativos de chuva e incursões de ar frio (Seluchi e Marengo 2000), com impactos na agricultura, recursos hídricos, setor econômico e social. Alguns sistemas se formam associados ao escoamento ondulatório das latitudes médias, cujo cavado se amplifica ao se deslocar sobre a Cordilheira dos Andes. Vários estudos anteriores discutiram o papel dos Andes nas condições associadas a incursões de ar frio sobre a América do Sul (Gan e Rao 1994; Seluchi et al. 1998; Garreaud 2000). Nesses estudos também mostraram a influência das montanhas no deslocamento dos centros de pressão de sudoeste para nordeste ao longo da costa leste da América do Sul (Seluchi et al. 1998, 2006). Os sistemas frontais podem avançar sobre o continente ou deslocar-se para o oceano Atlântico (Cavalcanti 1985; Satyamurty et al. 1998, Seluchi et al. 1998; Andrade 2005; Müller e Berri 2007, 2011; Müller e Ambrizzi 2007). Uma climatologia da passagem de frentes frias bem como o comportamento no deslocamento dos sistemas frontais durante o período de 1980 a 2002, sobre várias áreas da América do Sul, foi apresentada em Andrade e Cavalcanti (2004). Naquele estudo foi observada uma diminuição da frequência desses sistemas das latitudes mais altas para as mais baixas. Em relação à sazonalidade, observou-se que as frentes frias são mais frequentes de maio a setembro e menos frequentes durante o verão no Hemisfério Sul (Cavalcanti e Kousky 2003; Andrade 2005). No inverno, as massas de ar frio penetram sobre o continente na retaguarda das frentes frias, podendo causar geadas fortes ao sul de 30°S e moderadas nos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, Mato Grosso do Sul, São Paulo e sul de Minas Gerais, às vezes, com prejuízos para a agricultura (Marengo et al. 1997).

Na América do Sul as análises de tendência baseadas em índices de extremos diários de temperatura obtidos a partir da temperatura máxima e mínima, indicam um menor número de dias frios e ocorrência de noites mais quentes no leste deste continente (Vincent et al. 2005; Alexandre et al. 2006). Resultados similares foram obtidos para a Argentina (Rusticucci e Barrucand 2004) e para o Uruguai (Rusticucci e Renom 2008). No Brasil as análises indicam aumento das temperaturas do ar à superfície durante o Século XX, compatíveis com o aquecimento global experimentado pelo planeta (Marengo 2007, Ambrizzi 2007, IPCC, 2007). No sul do Brasil, a tendência de temperatura nas últimas décadas indica forte aumento da temperatura mínima comparada com a máxima, resultando em um decréscimo da variação diurna da temperatura (Marengo e Camargo 2007). Recentemente, Marengo et al. (2010) e Rusticucci et al. (2010) analisaram as tendências de alguns extremos durante a segunda metade do século XX. Em Rusticucci et al. (2009) foram comparadas as tendências observadas e simuladas na América do Sul durante 1960-2000 usando alguns dos índices de extremos definidos por Frich et al. (2002) e oito MCGs do IPCC AR4 do WCRP CMIP3 Multimodel Dataset. O índice de temperatura que foi melhor simulado foi o de número de noites quentes, o qual teve um aumento durante o período analisado. Foi notado também que a região da Bacia La Plata foi onde o modelo simulou melhor os índices, provavelmente pela maior quantidade de dados observados na região.

Alguns estudos como Marengo e Camargo (2005) sugerem que nos últimos anos o aquecimento tem sido maior no inverno que no verão. Embora a temperatura média do ar próximo à superfície tenha aumentado no inverno dos últimos anos, casos extremos continuam a ocorrer, com o deslocamento de sistemas frontais acompanhados de massas de ar muito frio. Esses episódios específicos são os que afetam diretamente a agricultura. Tem sido discutido que em uma atmosfera com temperaturas mais altas haveria também mais vapor de água disponível e

as tempestades seriam mais severas (Trenberth, 1999). As projeções climáticas com o efeito estufa indicam um aumento de temperatura principalmente nas regiões de latitudes mais altas (IPCC 2007), o que reduziria o gradiente norte-sul e a baroclinia da atmosfera, mudando a frequência e intensidade dos sistemas frontais.

Neste estudo, o objetivo é comparar a frequência de sistemas frontais sobre o sudeste da América do Sul, áreas 1, 2 e 3 mostradas na Figura 1, em simulações climáticas do clima presente e futuro, com a finalidade de investigar o comportamento destes sistemas no clima futuro. Com os resultados das simulações e projeções dos modelos, é analisado o impacto das mudanças climáticas no número destes sistemas sobre as áreas citadas, bem como a posição das frentes e a configuração dos campos atmosféricos. As configurações dos campos foram obtidas utilizando uma composição dos casos extremos em cada área, para os resultados de reanálise e GFDL no clima presente e projeção do clima futuro.

2. DADOS E MÉTODOS

Neste estudo foram escolhidas três áreas compreendendo regiões do Brasil, Uruguai e Argentina, com a dimensão de 5° latitude X 5° longitude: área 1 (52°W-57°W, 23°S-28°S), área 2 (52°W-57°W; 28°S-33°S) e área 3 (65°W-60°W, 33°S-38°S), como mostrado na Figura 1.

Os dados diários correspondem a períodos do clima presente da reanálise do NCEP/NCAR (Kalnay et al. 1996) e dos modelos GFDL e Hadley (HadCM3) no período 1961- 1990 para os meses de maio a setembro. O modelo acoplado do Hadley Center (HadCM3) tem resolução horizontal de 2.5° latitude × 3.75° longitude para a componente atmosférica e 1.25° latitude × 1.25° longitude no oceano. A resolução vertical do modelo é de 19 níveis (atmosfera) e 20 níveis (oceano). Maiores detalhes estão disponíveis em Gordon et al. (2000).

Foi utilizada a versão CM2.0 do modelo GFDL com resolução horizontal de 2° latitude × 2.5° longitude e 24 níveis na vertical. Outros detalhes deste modelo e os resultados obtidos em experimentos são descritos em Delworth et al. (2006). Para o clima futuro foi considerado o cenário do experimento A2 do IPCC (IPCC 2007), que é o de condições extremas de aquecimento global, do modelo GFDL e Hadley para o período 2081-2100.

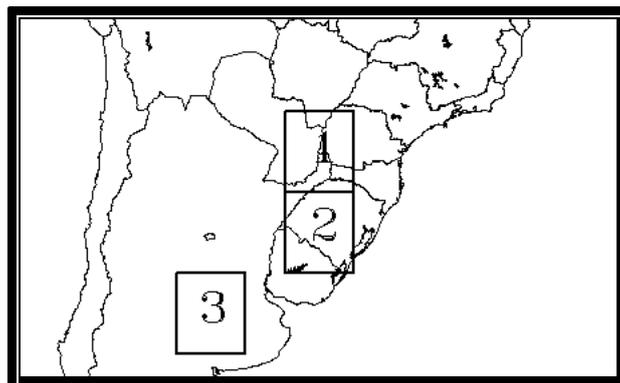
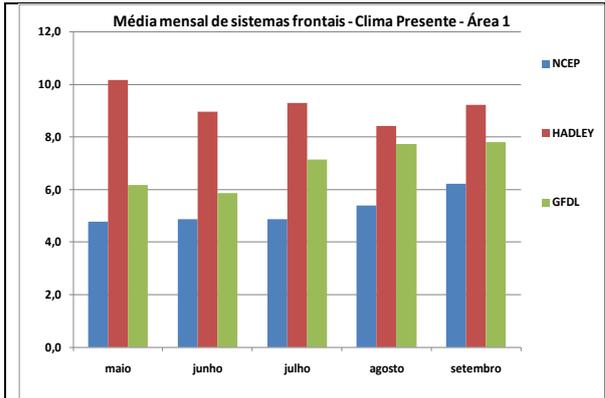


Figura 1: Áreas com as três regiões utilizadas na determinação das frentes

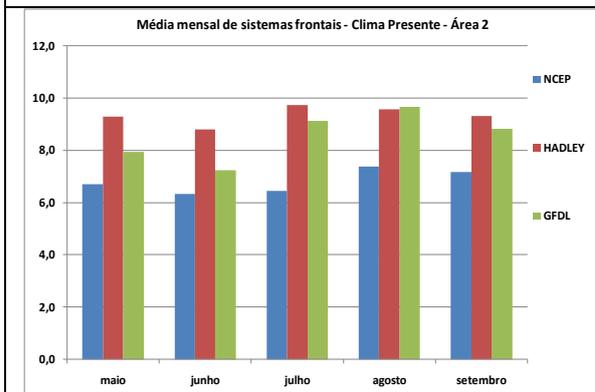
Para a identificação dos sistemas frontais foi utilizado o seguinte critério para as áreas em estudo: aumento da pressão ao nível médio do mar; queda da temperatura e mudança na direção do vento de quadrante norte para quadrante sul em 850 hPa. Essas mudanças devem ser observadas simultaneamente em dois dias consecutivos. Critério semelhante foi utilizado por Cavalcanti e Kousky (2003) e Andrade (2005) em análises climatológicas. Primeiramente foi feita a média mensal da ocorrência de sistemas frontais tanto no presente quanto no futuro utilizando o critério descrito. Neste estudo foram selecionados também casos com queda de temperatura superior a 5 graus no intervalo de 24 horas, para identificar as características dos casos extremos. Casos extremos provocam maiores impactos nas regiões afetadas. Foram feitas composições de campos atmosféricos em superfície, baixos e altos níveis para os cinco casos de sistemas frontais com maiores quedas de temperatura em dias consecutivos escolhidos entre todos os casos identificados.

3. RESULTADOS

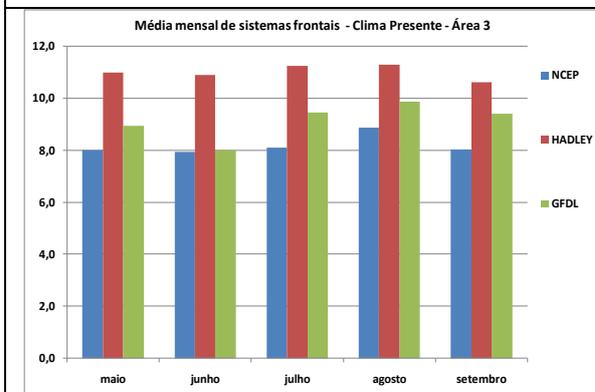
A Figura 2 mostra o número médio mensal de sistemas frontais no período entre 1961 e 1990 para as 3 áreas estudadas. Nota-se que os modelos GFDL e Hadley superestimam o número de sistemas frontais em relação à reanálise, principalmente para as áreas 1 e 2. Na área 3 a diferença entre a reanálise e o modelo GFDL é menor que nas demais regiões analisadas.



(a)



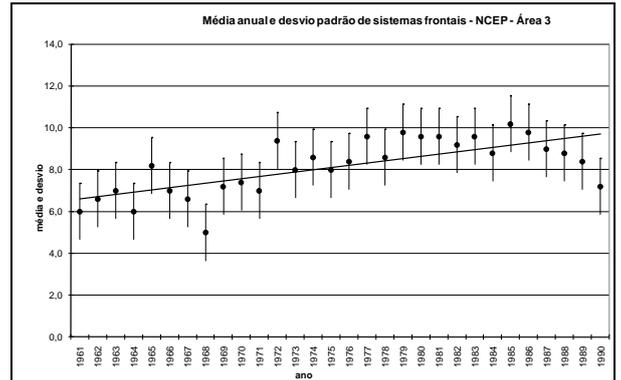
(b)



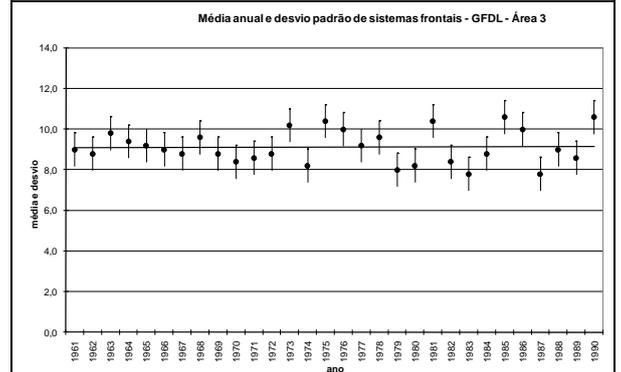
(c)

Figura 2: Média mensal de sistemas frontais nas áreas (a) 1; (b) 2 e (c) 3 para o NCEP, GFDL e Hadley para o clima presente.

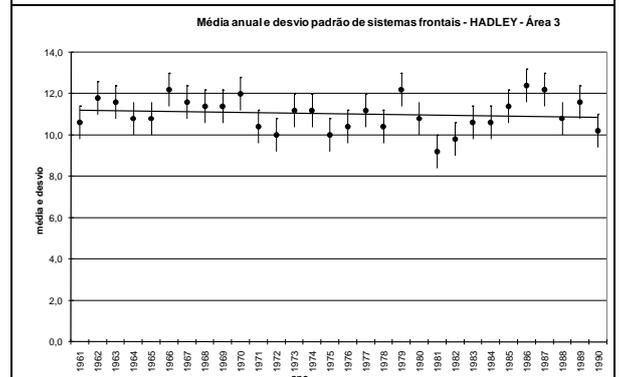
Observa-se também na Figura 2 uma diminuição de sistemas frontais em direção a latitudes mais baixas, ou seja, maior número na área 3 e menor frequência na área 1. Os dois modelos capturam as frequências maiores nas latitudes mais altas, como as observações, porém apenas o GFDL mostra variabilidade mensal semelhante às observações.



(a)



(b)



(c)

Figura 3: Média de sistemas frontais e desvio padrão para o período de maio a setembro de cada ano (em número/mês) para (a) NCEP (b) GFDL (c) Hadley na área 3 no período entre 1961-1990.

Na figura 3 são apresentados a média anual e o desvio padrão do número de sistemas frontais, bem como a linha de tendência apenas para a Área 3 para o NCEP (3a), GFDL (3b) e Hadley (3c), uma vez que as demais áreas (1 e 2) não apresentam grandes diferenças entre o início e final do período. Verifica-se que para a área 3, a reanálise do NCEP apresenta uma tendência positiva, no período de 1961 a 1990, no número médio mensal de sistemas frontais que ocorrem de maio a setembro. Entretanto, nas simulações do GFDL não há uma tendência evidente e o

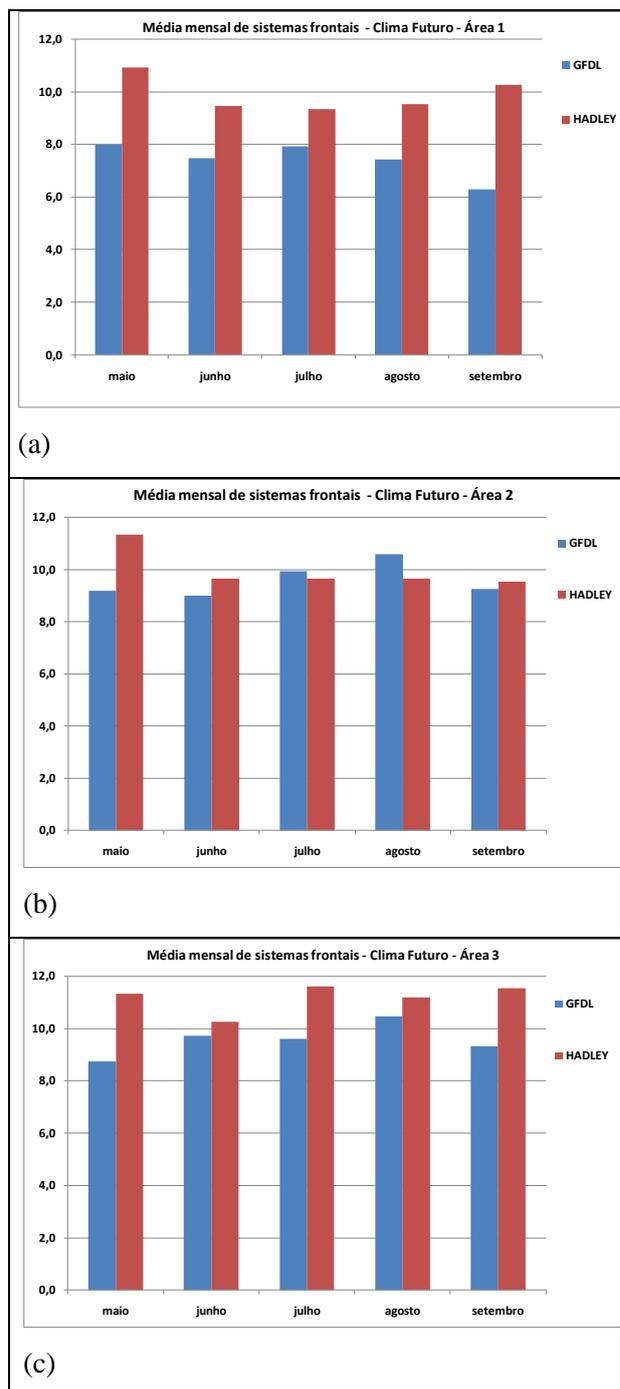


Figura 4: Média mensal de sistemas frontais nas áreas (a) 1; (b) 2 e (c) 3 para o GFDL e Hadley para o clima futuro.

Hadley indica uma ligeira diminuição no número de frentes. A Figura 4 mostra o número médio mensal de sistemas frontais no clima futuro para as 3 áreas estudadas. O modelo Hadley indica um maior número de sistemas frontais que o GFDL em todos os meses, principalmente para as áreas 1 e 3. Na área 2 a frequência de sistemas frontais

do GFDL é superior ao Hadley nos meses de julho e agosto. Assim como no clima presente também é observado no futuro uma diminuição de sistemas frontais em direção a latitudes mais baixas.

A média de ocorrência de sistemas frontais no período entre maio-setembro, no clima presente e futuro, da reanálise do NCEP e das simulações dos modelos GFDL e Hadley para as 3 áreas em estudo é mostrada na figura 5a. Nota-se que o modelo Hadley é o que mais superestima a frequência de sistemas, no clima presente, principalmente na Área 1, onde a diferença no valor médio de frentes frias em relação ao NCEP é de aproximadamente 4 e para as demais áreas o valor fica em torno de 2,5. Na Área 2 não há muita diferença entre as simulações do Hadley e GFDL, embora ainda superestimando o valor obtido pelo NCEP no clima presente. Na Área 3 a diferença entre a reanálise e o modelo GFDL é menor que nas demais regiões analisadas. Os valores projetados para o clima futuro são maiores do que os simulados no clima presente, nos resultados dos dois modelos, para as áreas 1 e 2. Para essas áreas os modelos GFDL e Hadley apresentam um valor médio de cerca de 1 sistema frontal a mais no clima futuro comparado com as simulações no presente. Na área 3 a variação é menor que 1 nas projeções futuras dos dois modelos, em comparação com as simulações do presente.

No entanto, quando se analisa o número de sistemas frontais associados à queda de temperatura maior que 5 graus de um dia para o outro, ou seja, os casos extremos (Figura 5b) o modelo GFDL é o que apresenta a maior estimativa tanto no clima presente quanto futuro em todas as áreas analisadas. O modelo Hadley simula bem os resultados da reanálise no clima presente, para os casos extremos, e apresenta pequeno aumento de casos nas projeções do clima futuro.

Na tabela I são mostrados os 5 valores de queda de temperatura mais intensos que ocorreram em dois dias consecutivos. Nota-se que na área mais ao sul (área 3), a simulação do Hadley no presente é que apresenta maior queda de temperatura. Enquanto, para as áreas 1 e 2 as simulações do GFDL indicam maior queda de temperatura de um dia para o outro. No clima futuro isso fica mais evidente, ou seja, como o modelo indica temperaturas mais altas em um cenário de clima futuro (aquecimento global), pode-se inferir que quando há entrada de um sistema frontal com ar relativamente frio o declínio da temperatura é maior.

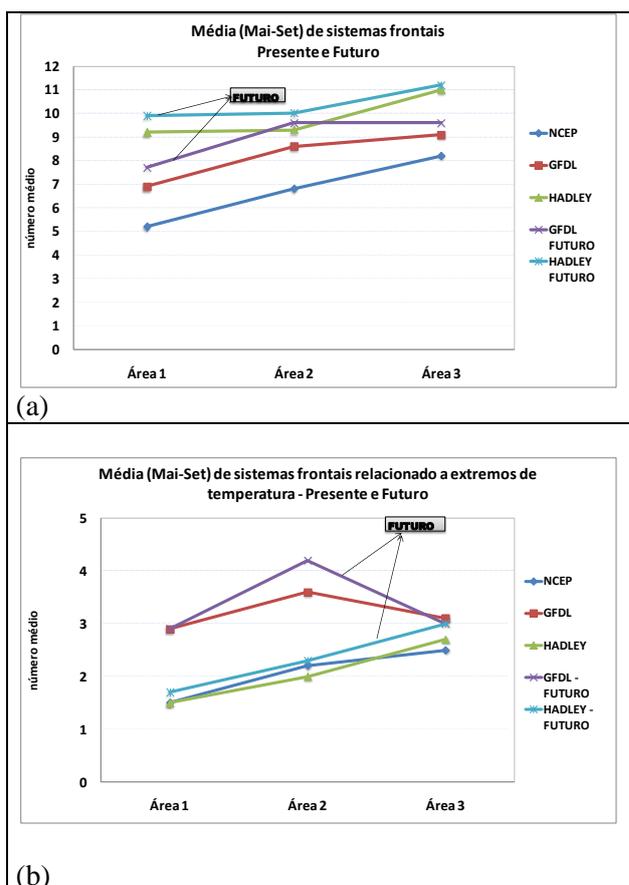


Figura 5: (a) Média do número de sistemas frontais no período entre maio e setembro (n° /mês) no clima presente e futuro. (b) Mesmo que em (a), mas para os casos extremos de temperatura.

	PRESENTE			FUTURO	
	NCEP	GFDL	HADLEY	GFDL	HADLEY
ÁREA 1	12,7	18,4	12,6	19,3	16,1
	12,6	15,7	12,6	18,3	14,9
	11,3	15,3	11,8	15,9	13,6
	11,1	15,2	11,7	13,8	12,3
	10,9	15,2	10,9	13,6	12,2
ÁREA 2	15,1	18,5	14,9	19,5	15,2
	13,7	18,1	13	17,5	14
	13	17	11,5	16,9	12,8
	12,5	16,3	11,4	15,7	12,8
	12,1	15,9	11,3	14,9	12,7
ÁREA 3	12,4	13,6	14,8	17,2	14,7
	12,2	13,5	14	14,6	14,6
	11,8	13,2	13,9	13,7	14,3
	11,8	13	12,7	13,7	14,1
	11,3	12,9	12,5	13,7	13,6

Tabela I: Valores de queda de temperatura (graus) para as áreas 1, 2 e 3 no clima presente (NCEP, GFDL e HADLEY) e clima futuro (GFDL e HADLEY)

Composições foram feitas para os cinco casos de ocorrência de sistemas frontais com maior queda de temperatura em 2 dias consecutivos para todas as áreas em estudo, tanto no clima presente quanto futuro. As análises das composições foram feitas em campos de pressão ao nível médio do mar e anomalias, temperatura e vento em 850 hPa, escoamento e magnitude do vento em 200 hPa. Para as análises dos extremos escolhemos a situação em que as simulações mostram o maior número de extremos tanto para o clima presente como para o futuro, o que ocorre com o GFDL. As discussões se referem às características associadas a um sistema frontal no dia em que o sistema passou em cada área, ou seja, o dia em que a temperatura caiu.

Na passagem de um sistema frontal é esperado um abaixamento de pressão na frente do sistema e um aumento atrás, assim como confluência entre ventos do quadrante norte (noroeste/nordeste) e ventos do quadrante sul (sudoeste/sudeste) em baixos níveis, e advecção de ar frio também em baixos níveis. Em altos níveis um cavado se posiciona a oeste do sistema de baixa à superfície. Essas características são observadas nos campos da reanálise e também das simulações do modelo GFDL para o clima presente e futuro (Figuras 6, 7, 8). As diferenças notadas entre modelo e observação se referem às posições dos centros de alta e baixa pressão, e às intensidades das anomalias das variáveis analisadas. A figura 6 mostra o campo de pressão ao nível médio do mar (PNMM) e anomalias para a reanálise e modelo GFDL presente e futuro. Nos campos da reanálise se destacam os centros de pressão baixa e alta associados aos sistemas, afetando as três áreas. Nota-se que para a área 1 a frente fria encontra-se no Estado de São Paulo e a alta pressão pós-frontal adentrando o continente e atuando em parte da Argentina, Paraguai e sul do Brasil. Essa configuração da alta pressão também foi notada em diversos trabalhos sobre incursões de ar frio como Marengo et. al, 1997, Garreaud, 2000, Seluchi e Marengo, 2000. O sistema frontal na área 2 posiciona-se entre o sul do Estado de São Paulo e o Paraná e na área 3 a frente fria encontra-se no Uruguai. Nos campos do GFDL os centros de pressão estão deslocados para oeste nos resultados das três áreas e a frente fria mais ao sul em relação à reanálise. O modelo apresenta anomalias de PNMM tanto positivas quanto negativas mais intensas e em uma extensão maior que o NCEP. No entanto, os valores de pressão simulados, são em geral da mesma ordem que os observados. Porém, observa-se que o gradiente

de pressão é mais intenso nos campos simulados pelo modelo, tanto no clima presente quanto no futuro.

Nota-se que a confluência dos ventos (Figura 7 a-c e 7 d-f) está bem definida, tanto nos campos do NCEP quanto nos campos GFDL, indicando que a composição está representando bem a posição dos sistemas. Entretanto, assim como nos campos de anomalias de pressão, a confluência dos ventos e advecção de ar frio são simuladas ao sul do mostrado na reanálise, indicando a posição dos sistemas ao sul do observado.

Notam-se também ventos intensos de sudoeste sobre a região sul até as três áreas analisadas, nas composições do NCEP e do GFDL, enquanto fortes ventos de noroeste são simulados pelo GFDL. Nota-se que o modelo simula o escoamento atmosférico da região do oceano Atlântico para o continente, em uma circulação anticiclônica mais intenso do que na reanálise. Em altos níveis (Figura 8 a-c e 8 d-f), os cavados associados aos sistemas frontais nos campos simulados também ficam posicionados a oeste em relação ao NCEP.

Para as projeções do GFDL do clima futuro, as anomalias de PNMM associadas à baixa pressão sobre o continente atingem latitudes mais baixas, nas 3 áreas, e são mais intensas com relação à simulação do clima presente (Figura 6 g-i). Em relação à temperatura (Figura 7 g-h), o modelo GFDL indica advecção de ar frio mais intensa para o clima futuro do que no clima presente e advecção de ar quente associada ao escoamento de norte, menos intenso na projeção para o clima futuro. A magnitude do vento em altos níveis na projeção do clima futuro indica uma maior extensão latitudinal do jato subtropical sobre a América do Sul (Figura 8).

4. CONCLUSÃO

Neste estudo a frequência de sistemas frontais sobre o sul da América do Sul foi identificada na reanálise do NCEP/NCAR e comparada com as simulações dos modelos GFDL e Hadley. As simulações do clima presente também foram comparadas com as projeções do clima futuro.

A frequência mensal de sistemas frontais para o período de maio a setembro é superestimada pelos dois modelos, porém melhor simulada pelo modelo GFDL. O modelo Hadley indica frequências muito acima do observado, superando a simulação do GFDL. O aumento do número de sistemas com o aumento da latitude é bem representado pelo GFDL, enquanto o Hadley apresenta esse aumento só na área 3. A tendência

de aumento no número de frentes na área 3 no período de 1961 a 1990 não é reproduzida pelos dois modelos.

Nas áreas 1 e 2 os dois modelos indicam um aumento de 1 sistema por mês no clima futuro com relação ao clima presente. Isso equivale a 5 sistemas a mais no período de maio a setembro. Na área 3 o aumento é bem menor. Para os casos extremos o modelo GFDL indica uma frequência muito maior do que a reanálise para o clima presente, isso é consequência deste modelo simular a queda de temperatura, associada a passagem de uma frente fria, mais intensa tanto no clima presente quanto futuro. O Hadley indica uma frequência e valores de queda de temperatura em dias consecutivos próximos ao NCEP nas 3 áreas. Nas projeções para o clima futuro, o modelo GFDL não indica mudança no número de sistemas intensos nas áreas 1 e 3, e o Hadley indica uma pequena variação nas 3 áreas. Os campos atmosféricos dos cinco casos com sistemas frontais mais intensos, considerando as maiores quedas de temperatura indicaram configurações semelhantes entre o modelo GFDL e a reanálise. O modelo simulou as principais características atmosféricas que acompanham um sistema frontal, ou seja, no campo de pressão, um par alta/ baixa pressão, confluência dos ventos em baixos níveis, advecção de ar frio, e um cavado em altos níveis, nas 3 áreas estudadas, porém em localizações mais a oeste e sul comparadas com a reanálise. Em baixos níveis o modelo GFDL simulou, principalmente, na área 1 anomalias positivas mais intensas na PNMM, porém não atingindo latitudes mais ao norte como indicada na reanálise, ou seja, a incursão de ar frio embora intensa posiciona-se mais ao sul.

Nas projeções para o clima futuro, os centros de baixa pressão são mais intensos e se estendem para latitudes mais baixas, a advecção de ar frio é mais intensa, e o jato subtropical sobre a América do Sul apresenta uma extensão latitudinal maior do que na simulação para o clima presente. Em uma atmosfera mais aquecida, como indica os modelos de mudanças climáticas, alterações na circulação atmosférica poderia afetar o número de sistemas frontais. Embora a temperatura seja mais alta, com a entrada de um ar mais frio a queda de temperatura seria maior, como mostrado neste estudo, principalmente pelo modelo GFDL. As projeções futuras de maior frequência de sistemas frontais e incursões de ar frio mais intenso nas áreas estudadas iriam produzir um forte impacto na agricultura e consequentemente na economia dessas regiões, a qual é altamente dependente da produção

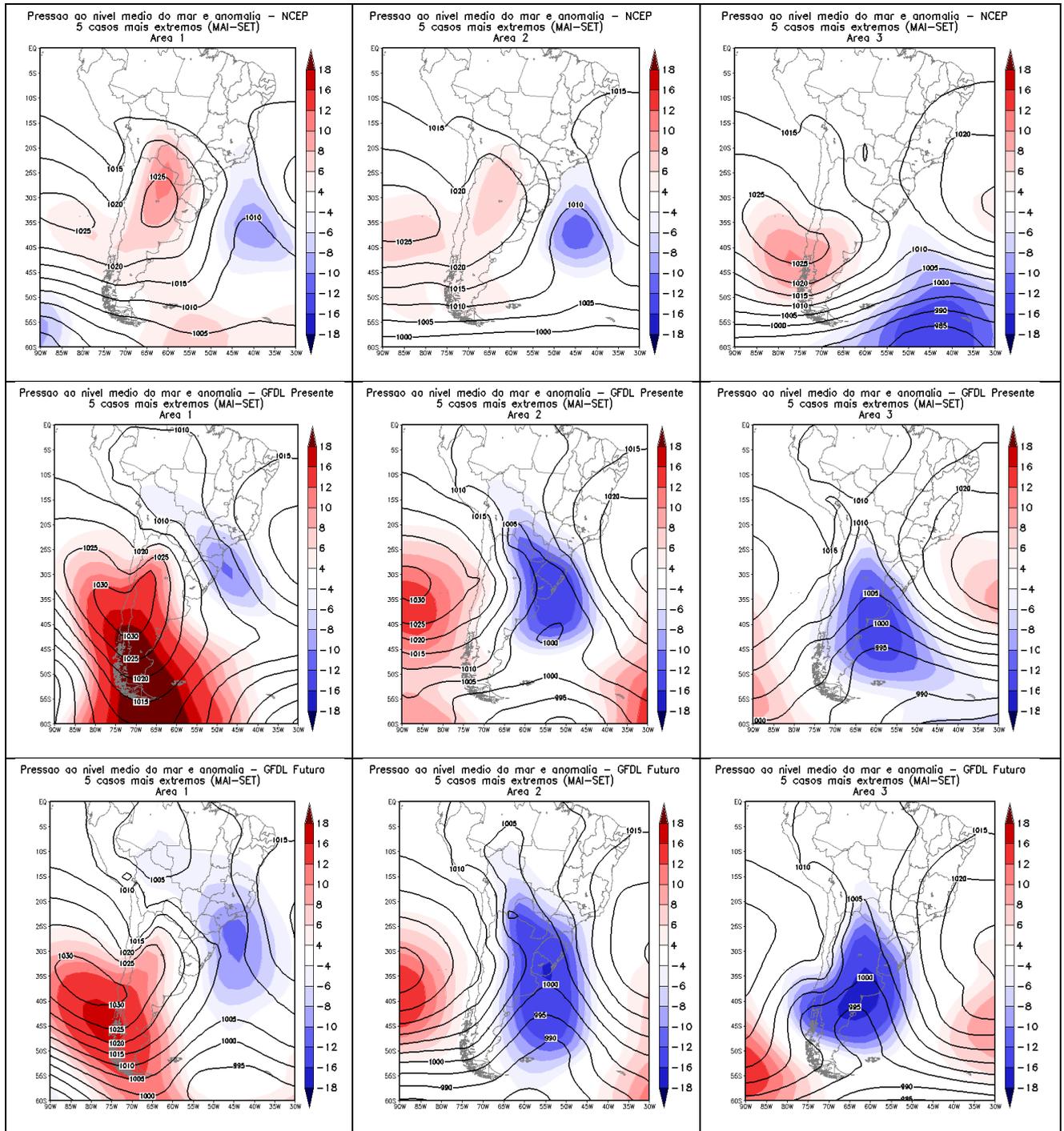


Figura 6: Pressão ao nível médio do mar e anomalia (hPa): área 1 (primeira coluna), área 2 (segunda coluna), área 3 (terceira coluna) para reanálise (primeira linha); GFDL presente (segunda linha); GFDL-Futuro (terceira linha).

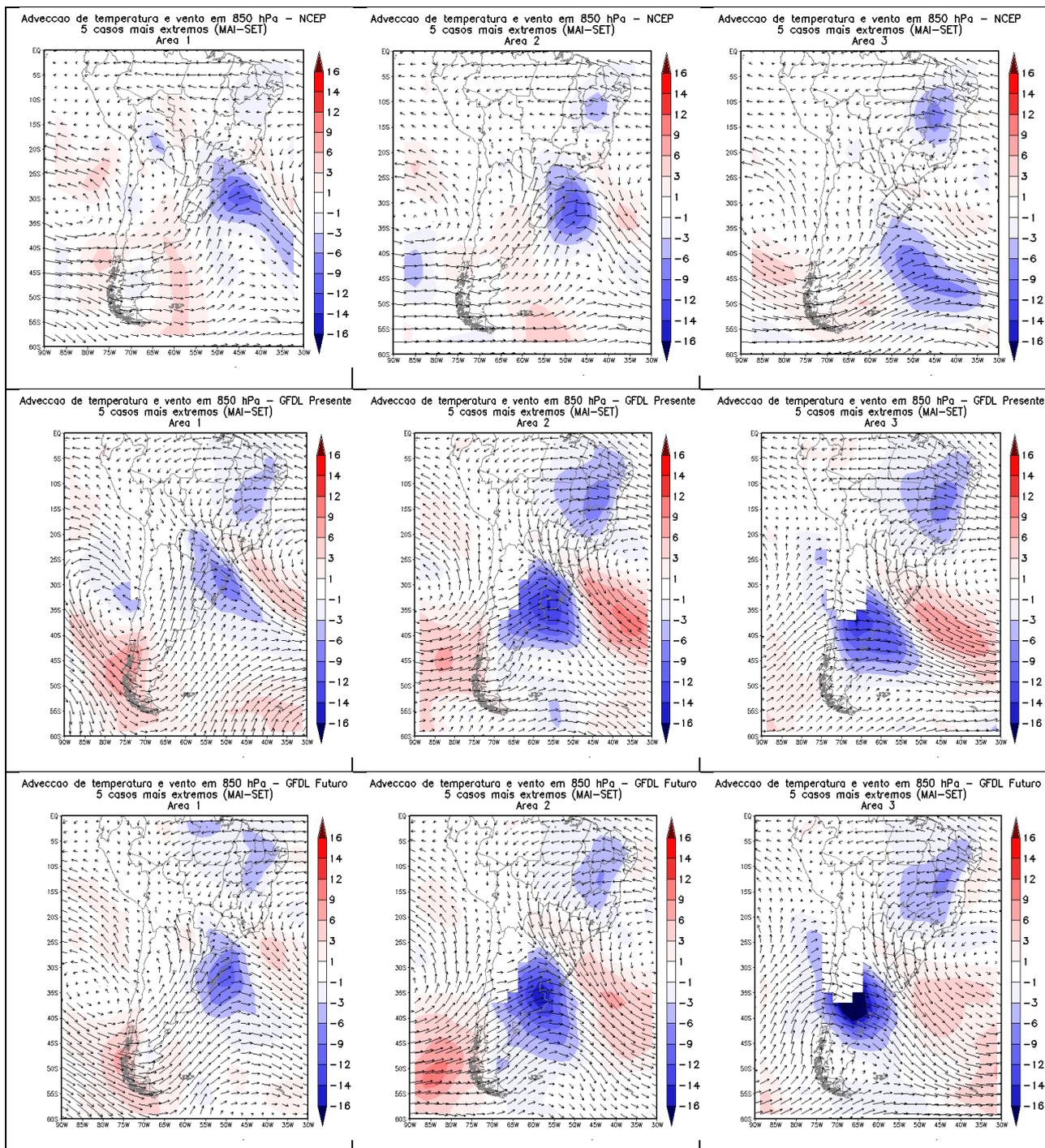


Figura 7: Adveção de temperatura (°C/dia) e vetor vento (m/s) em 850 hPa: área 1 (primeira coluna), área 2 (segunda coluna), área 3 (terceira coluna) para reanálise (primeira linha; GFDL presente (segunda linha); GFDL-Futuro (terceira linha).

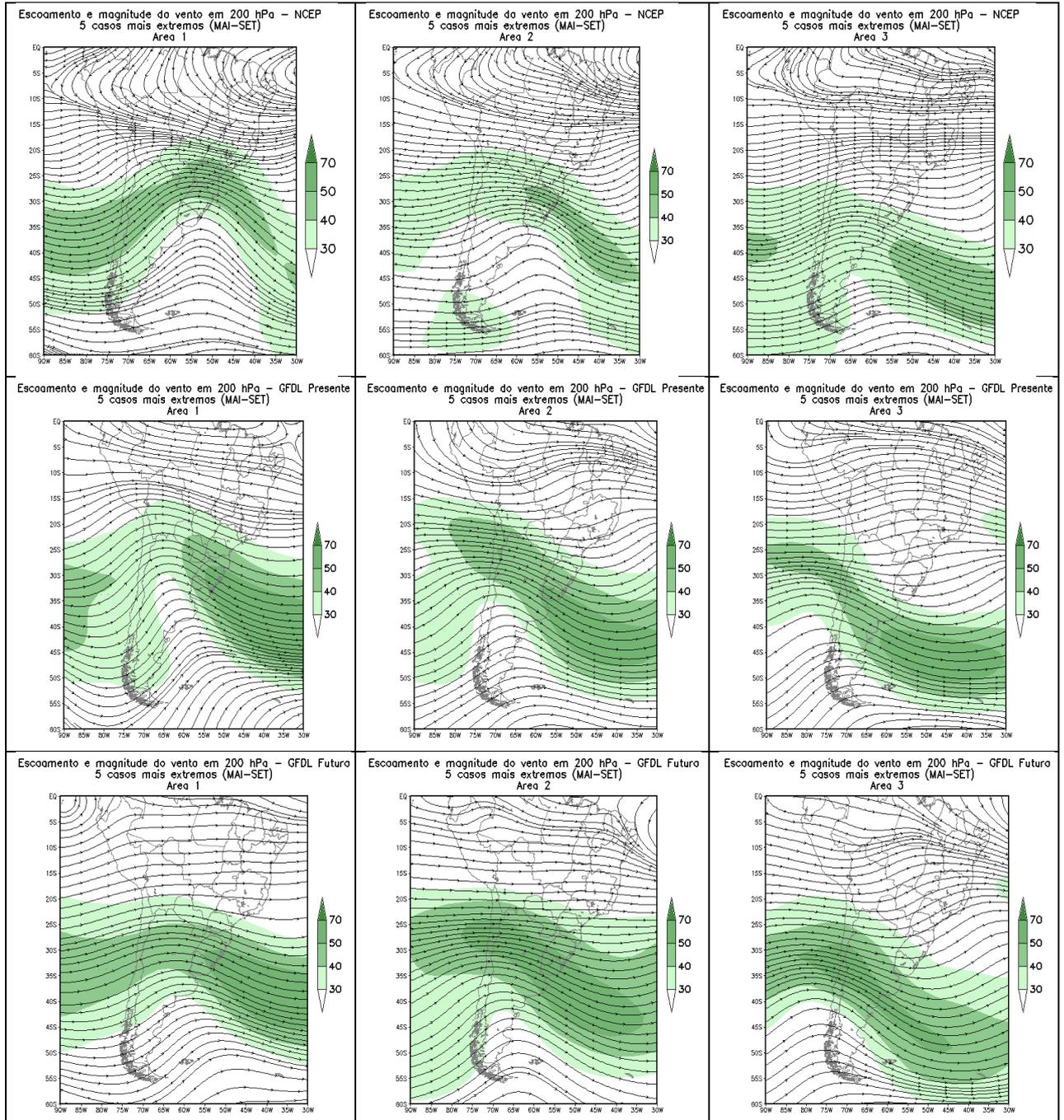


Figura 8: Escoamento e magnitude do vento (m/s) em 200 hPa: área 1 (primeira coluna), área 2 (segunda coluna), área 3 (terceira coluna) para reanálise (primeira linha; GFDL presente (segunda linha); GFDL-Futuro (terceira linha).

agrícola. Outros modelos deverão ser analisados em futuros estudos para análise de incertezas relacionadas aos presentes resultados.

Agradecimentos: International modeling groups for providing their data for analysis, the Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison (PCMDI) for collecting and archiving the model data, the JSC/CLIVAR

Working Group on Coupled Modelling (WGCM) and their Coupled Model Intercomparison Project (CMIP) and Climate Simulation Panel for organizing the model data analysis activity, and the IPCC WG1 TSU for technical support. The IPCC Data Archive at Lawrence Livermore National Laboratory is supported by the Office of Science, U.S. Department of Energy. Esta publicação recebeu auxílio do: European

Community's Seventh Framework Programme (FP7/2007-2013) sob o Grant Agreement N° 212492: CLARIS LPB; CNPq: 490466/2006-0; CONICET: PIP-114-200801-00591; ANPCYT: PICT2005-38193 e PICT2011-0023.

Os autores agradecem também aos revisores anônimos que contribuíram significativamente para o aprimoramento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Alexander, L. V., Zhang, X., Peterson, T. C., Caesar, J., Gleason, B., Klein Tank, A., Haylock, M., Collins, D., Trewin, B., Rahimzadeh, F., Tagipour, A., Ambenje, P., Rupa Kumar, K., Revadekar, J., Griffiths, G., Vincent, L., Stephenson, D., Burn, J., Aguilar, E., Brunet, M., Taylor, M., New, M., Zhai, P., Rusticucci, M. and Vazquez-Aguirre J. L., 2006. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation, *J. Geophys Res.*, 111, D05109, DOI:10.1029/2005JD006290.
- Ambrizzi, T. 2007. Cenários regionalizados de clima no Brasil para o século XXI: Projeções de clima usando três modelos regionais. Relatório 3. Ministério do Meio Ambiente (MMA), Secretaria de Biodiversidade e Florestas (SBF), Diretoria de Conservação da Biodiversidade (DCBio). Mudanças Climáticas Globais e Efeitos sobre a Biodiversidade – Subprojeto: Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI. Brasília, fevereiro 2007.
- Andrade, K. M., 2005. Climatologia e comportamento dos sistemas frontais sobre a América do Sul. INPE-14056-TDI/1067. Dissertação (Mestrado em Meteorologia)-INPE, São José dos Campos.
- Andrade, K. M.; Cavalcanti, I. F. A., 2004. Climatologia dos sistemas frontais e padrões de comportamento para o verão na América do Sul. Congresso Brasileiro De Meteorologia, Fortaleza-CE. Anais. Fortaleza: SBMet, 2004. 1 CD-ROM. (INPE-12090-PRE/7436).
- Cavalcanti, I. F. A., 1985. Casos de intensa precipitação nas Regiões Sul e Sudeste do Brasil no período de inverno de 1979 a 1983. INPE-3743-RPE/498, São José dos Campos.
- Cavalcanti, I. F. A; Kousky, V. E., 2003. Climatology of South American cold fronts. In: VII International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography, AMS. Wellington, New Zealand.
- Delworth, Thomas L., and Coauthors, 2006. GFDL's CM2 Global Coupled Climate Models. Part I: Formulation and Simulation Characteristics. *J. Climate*, 19, 643–674.
- Frich P, Alexander LV, Della-Marta P, Gleason B, HaylockM, Klein Tank AMG, Peterson T., 2002. Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. *Clim Res.*, 19, 193–212.
- Gan, M. A e Rao, V. B., 1994. The Influence of the Andes Cordillera on Transient Disturbances. *Mon. Wea. Rev.*, 122, 1141–1157.
- Garreaud, R. D., 2000. Cold air incursions over subtropical South America: mean structure and dynamics. *Monthly Weather Review*, 128 (7), 2544-2559.
- Gordon C, Cooper C, Senior CA, Banks H, Gregory JM, Johns TC, Mitchell JFB, Wood RA. 2000. The simulation of SST, sea ice extents and ocean heat transports in a version of the Hadley centre coupled model without flux adjustments. *Climate Dynamics*, 16, 147–168.
- IPCC, 2007. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In: HOUGHTON, J.T. (Ed.). *Climate Change*. New York: Cambridge University Press.
- Kalnay E. e co-autores, 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77, 437-471.
- Marengo, J.; Cornejo, A.; Satyamurty, P.; Nobre, C. A.; Sea, W. 1997. Cold surges in tropical and extratropical South America: The strong event in June 1994. *Monthly Weather Review*, 125 (11), 2759-2786.
- Marengo, J., 2007. Mudanças climáticas globais e seus efeitos sobre a biodiversidade – caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI. 2. ed. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, v.1, 214.
- Marengo, J. e Camargo, C. G. C., 2007. Trends in Extreme air temperatures in Southern Brazil. *Int. J. Climatology*, DOI:10.1002/joc.1863.
- Marengo, J. e Camargo, C. G. C, 2008. Surface air temperature trends in Southern Brazil for 1960–2002. *Int. J. Climatology*, 28, 893–904.
- Marengo, J., Rusticucci, M., Penalba, O. and Renom, M., 2010. An intercomparison of observed and simulated extreme rainfall and temperature events during the last half of the twentieth century: part 2: historical trends. *Climatic Change*, 98 (3), 509-529.

- Müller, G. V. and G. J. Berri, 2007. Atmospheric Circulation Associated with Persistent Generalized Frosts in Central-Southern South America. *Mon. Wea. Rev.*, 135 (4), 1268–1289.
- Müller, G. V. and T. Ambrizzi, 2007. Teleconnection Patterns and Rossby Wave Propagation Associated to Generalized Frosts over Southern South America. *Clim. Dyn.*, 29 (6), 633–645.
- Müller, G. V. and G. J. Berri, 2011. Atmospheric Circulation Associated with Extreme Generalized Frosts Persistence in Central-Southern South America. *Clim. Dyn.*, DOI: 10.1007/s00382-011-1113-2.
- Rusticucci, M. and Barrucand, M., 2004. Observed trends and changes in temperature extremes over Argentina, *Journal of Climate*, 17 (20), 4099–4107.
- Rusticucci, M. and Renom, M., 2008. Variability and trends in indices of quality-controlled daily temperature extremes in Uruguay. *Int. J. Climatology*, 28, DOI: 10.1002/joc.1607
- Rusticucci, M., Marengo, J., Penalba, O. and Renom, M., 2010. An intercomparison of model-simulated in extreme rainfall and temperature events during the last half of the twentieth century. Part 1: mean values and variability. *Climatic Change*, 98 (3), 493–508
- Satyamurty, P., C. A. Nobre, P. L. Silva Dias. South America, 1998. In: Karoly, D. J., Vincent, D. G. ed. *Meteorology of the Southern Hemisphere*. American Meteorological Society, 119–139. *Meteorological Monographs*, 27, (49).
- Seluchi, M., Y. V. Serafini, H. Le Treut, 1998. The Impact of the Andes on Transient Atmospheric Systems: A Comparison between Observations and GCM Results. *Mon. Wea. Rev.*, 126, 895–912.
- Seluchi, M. E., Garreaud, R. D., Norte, A. F., Celeste Saulo, A., 2006. Influence of the Subtropical Andes on Baroclinic Disturbances: A Cold Front Case Study. *Mon. Wea. Rev.*, 134, 3317–3335. DOI: 10.1175/MWR3247.1
- Trenberth, K. E., 1999. Atmospheric Moisture Recycling: Role of Advection and Local Evaporation. *J. Climate*, 12, 1368–1381.
- Vincent, L., Peterson, T., Barros, V., Marino, M., Rusticucci, M., Carrasco, G., Ramirez, E., Alves, L., Ambrizzi, T., Berlato, M., Grimm, A., Marengo, M., Molion, L., Moncunill, D., Rebello, E., Anunciacao, Y., Quintana, J., Santos, J., Baez, J., Coronel, G., Garcia, J., Trejo, I., Bidegain, M., Haylock, M., Karoly, D., 2005. Observed trends in indices of daily temperature extremes in South America 1960–2000, *Journal of Climate*, 18 (10) ,5011–5023.

CLIMATOLOGÍA DE LA PRECIPITACIÓN DE TRES DÍAS EN LA CUENCA DEL PLATA

Gustavo Naumann, María P. Llano y Walter M. Vargas

Dpto. Cs. de la Atmósfera y los Océanos –FCEyN– UBA – CONICET

(Manuscrito recibido el 26 de marzo de 2010, aceptado el 30 de mayo de 2011)

RESUMEN

Una climatología de distintas propiedades de la precipitación en intervalos de tres días es desarrollada en el presente trabajo, la cual es de especial importancia para el pronóstico extendido de precipitación. Por lo tanto el objetivo fundamental de esta climatología es el desarrollo y el inicio de pronósticos extendidos de 6 a 10 días en términos de probabilidades divididas en categorías.

Para esto, se analizan las frecuencias de días con precipitación en ventanas de 3 días. Cada frecuencia de cero días de precipitación para el día i es el resultado de la ausencia de precipitación en ventanas móviles de tres días centradas en el día i , de la misma forma se obtienen las frecuencias hasta tres días con precipitación respectivamente.

Se emplean los datos de 94 estaciones en un período común (1959-1998) en el área de estudio. Se estudian las ondas anuales de las propiedades obtenidas para las precipitaciones y su síntesis a través de la descomposición en armónicos. Se propone una representación vectorial de las propiedades que definen el análisis armónico, tales como la fecha de ocurrencia del máximo (su fase) y su amplitud.

Finalmente, se pone especial énfasis en el estudio de las condiciones extremas de eventos de precipitación, como por ejemplo, la marcha anual de los máximos representados por el percentil 90 de precipitación diaria.

Palabras clave: climatología, precipitación diaria, probabilidad.

CLIMATOLOGY OF THREE DAYS PRECIPITATION IN LA PLATA BASIN

ABSTRACT

A climatology of various properties of precipitation in intervals of three days is developed. This climatology has a particular importance for the extended forecast of precipitation. Therefore the main objective of this climatology is the development and the initiation of extended forecasts of 6 to 10 days in terms of probabilities divided into categories.

For this, the frequencies of days with precipitation in three days windows are analyzed. Each frequency of zero days of precipitation for day i is the result of a lack of rainfall in three days moving windows centered on i , in the same way the frequencies are obtained up to three days with precipitation, respectively.

We used data from 94 stations in a common period (1959-1998) in the study area. Annual waves of the properties obtained for precipitation and their synthesis are studied through harmonic decomposition. A vector representation of the defining properties of harmonic analysis is propose, such as date of occurrence of the maximum (phase) and amplitude.

Finally, special emphasis is placed on the study of extreme precipitation events, such as the annual march of the maximum represented by the 90th percentile of daily precipitation.

Keywords: climatology, daily precipitation, probability.

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los requerimientos más importantes y frecuentes que tienen los servicios meteorológicos es la formulación y emisión de pronósticos de lluvia que van desde un día hasta cinco días en adelante. Como se puede verificar, la capacidad de estos pronósticos disminuye cuando aumenta el lapso de tiempo. Esto demanda el desarrollo de otro tipo de pronóstico mediante modelos estadísticos o matemáticos. Para confeccionar estos modelos es necesaria una climatología específica que, en el caso de la precipitación, se denominaría climatología de precipitación en lapsos que van desde cero a tres días.

La elección de los lapsos de tiempo, independientemente de los requerimientos sociales, debe responder al estudio de rachas de días de lluvia y de días secos, así como también a los ciclos que ellas conforman (un ciclo corresponde a la suma de una racha de días secos seguida de una racha de días con precipitación o su inversa). Gattinoni y Naumann (2008) mostraron que el ciclo más probable es el de tres a cinco días en la región sur de la Cuenca del Plata. Estos resultados se pueden extender a toda la Cuenca que comprende al Paraguay, Uruguay y zonas de Brasil y de Argentina.

Un ejemplo importante en este tipo de estudio es lo desarrollado por Epstein y Barnston (1989) para Estados Unidos. Allí se postula un modelo de Markov para probabilidades de 0 a 5 días en un lapso de cinco días como prolegómeno de la estimación de probabilidad de precipitaciones en 0, 1 y más días. En esta clase de pronóstico, se estima la probabilidad de lluvia desde un día hasta tres y cinco días.

En Argentina, Ruiz (2005) estudió las probabilidades a condiciones secas semanales en la ciudad de Buenos Aires y Gattinoni y Naumann (2009) analizaron la aplicabilidad de modelos markovianos a secuencias húmedas en la ciudad de Buenos Aires. El modelo propuesto en este trabajo obtiene la probabilidad de una determinada cantidad de días húmedos en distintos intervalos de tiempo. Se tomaron intervalos desde 3 a 9 días y se observó que los máximos de probabilidades tendieron a ubicarse entre tres y cuatro días húmedos siendo influenciados por el ciclo más común de tiempo entre sistemas frontales.

El objetivo de este trabajo es desarrollar una climatología de las precipitaciones diarias que permita ajustar modelos de días con precipitación. Si se considera que los pronósticos de precipitación basados en modelos dinámicos tienen una buena validez para 5 días, la extensión de estos a partir de modelos markovianos permitiría la prolongación de los pronósticos determinísticos hasta 6 ó 10 días.

El trabajo está diagramado de la siguiente forma: en la sección 2 se presentan los datos y metodologías utilizados. En la sección 3 de análisis y conclusiones, se muestran las marchas anuales de la media, mediana y percentil 90 de la precipitación (sección 3.1) y finalmente se detalla la climatología de la frecuencia de precipitación de tres y cinco días en la sección 3.2.

2. DATOS Y MÉTODOS

Para la realización de este estudio se utilizaron datos diarios de precipitación de 94 estaciones localizadas en la Cuenca del Plata. Las estaciones están ubicadas en Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay, como se puede observar en la Figura 1 y en la Tabla 1. Los datos fueron suministrados por los servicios meteorológicos de estos países y por la base de datos del Proyecto Prosur, Aneel, 2000. Los datos fueron sometidos a diferentes niveles de consistencia, de acuerdo a lo sugerido por una variedad de publicaciones, como por ejemplo la Guía de Prácticas Hidrometeorológicas de la Organización Meteorológica Mundial (1970).

Para un análisis temporal más detallado se seleccionaron estaciones de referencia para la realización de análisis específicos. Estas estaciones tienen registros diarios durante al menos 50 años. Para la realización de estimaciones comparables se seleccionó un período común a todas las estaciones (1959-1998). La elección de este período común se discute en Naumann y otros (2008) donde se desarrolla un análisis sobre el impacto de la utilización de distintas longitudes de series temporales de precipitación.

Para la estimación de las frecuencias de días con precipitación en un período de tres días se procedió de la siguiente manera. Se estiman las frecuencias de cero hasta tres días sin precipitación en ventanas móviles de tres días, centradas en el día i (con $i = 1, \dots, 365$) al que se

le adjudica la frecuencia. Esto se realiza para disminuir la alta variabilidad que tienen las frecuencias de lluvia y no lluvia día a día en la región.

Definición:

-d0 frecuencia relativa de 3 días sin lluvia centrados en el día **i**

-d1 frecuencia relativa de 1 día con lluvia y 2 días sin lluvia centrados en el día **i**

-d2 frecuencia relativa de 2 días con lluvia y 1 día sin lluvia centrados en el día **i**

-d3 frecuencia relativa de 3 días con lluvia centrados en el día **i**

En este trabajo se presentan las estimaciones para un periodo de tres días. Cabe aclarar que los resultados para las estimaciones con ventanas de cinco días son similares, pero las implicancias sobre el alcance del pronóstico objetivo son diferentes.

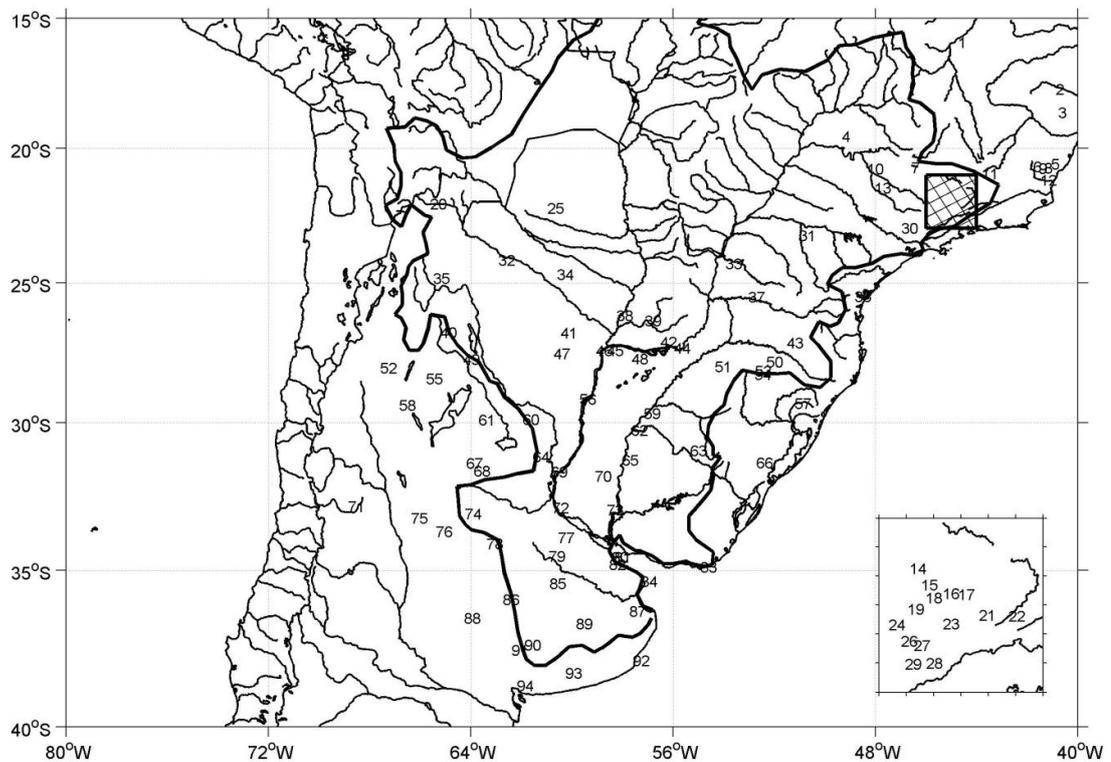


Figura 1: Estaciones utilizadas en el estudio y borde de la Cuenca en negra. En recuadro se muestra la ubicación de las estaciones del sudeste de Brasil.

Nº	estación	long	lat	inicio	fin
1	Sao Francisco	-44.87	-15.95	1938	2003
2	Helvecia (FBM)	-39.67	-17.82	1941	1994
3	Conceição da Barra	-39.75	-18.57	1930	1998
4	Campina Verde	-49.48	-19.55	1941	1998
5	Castelo	-41.2	-20.6	1939	1998
6	Caiana	-41.92	-20.7	1939	1998
7	Itau de Minas	-46.73	-20.73	1941	1998
8	Rive	-41.47	-20.75	1939	1998
9	Guacui	-41.68	-20.77	1939	1998
10	Terra Roxa	-48.33	-20.78	1940	1998
11	Carandai	-43.8	-20.95	1941	1998
12	Ponte Itabapoana	-41.47	-21.2	1937	1998
13	Ponte Guatapara	-48.03	-21.5	1924	1980
14	Paraguacú	-45.67	-21.58	1941	1998
15	Monsenhor Paulo	-45.53	-21.77	1941	1998
16	Fazenda J. Casimiro	-45.27	-21.87	1941	1998
17	Conceição Rio Verde	-45.08	-21.88	1941	1998
18	Usina do Chicao	-45.48	-21.92	1941	1998
19	Careacú	-45.7	-22.05	1941	1998
20	La Quiaca	-65.6	-22.1	1959	1998
21	Usina Congonhal	-44.83	-22.12	1941	1998
22	Ponte do Posta	-44.47	-22.13	1941	1998
23	Cristina	-45.27	-22.22	1941	1998
24	Pouso Alegre	-45.93	-22.23	1941	1998
25	M. Estigarribia	-60.97	-22.25	1950	1999
26	Conceição dos Ouros	-45.78	-22.42	1941	1998
27	Brasopolis	-45.62	-22.47	1941	1998
28	Fazenda da Guarda	-45.47	-22.67	1941	1998
29	Sao Bento do S.	-45.73	-22.68	1941	1998
30	Campinas	-47.12	-23	1890	2003
31	Ibiporá	-51.02	-23.27	1971	1997
32	Rivadavia	-62.9	-24.17	1959	1997
33	Palotina	-53.92	-24.3	1972	1997
34	Las Lomitas	-60.58	-24.7	1959	1998
35	Salta Aero	-65.48	-24.85	1959	1998
36	Morretes	-48.82	-25.5	1966	1997
37	Quedas do Iguazu	-53.02	-25.52	1972	1997
38	Formosa	-58.23	-26.2	1962	1998
39	Vilarica	-57.12	-26.38	1951	1999
40	Tucumán	-65.2	-26.8	1884	2001
41	R. S. Peña	-60.45	-26.82	1959	1998
42	Encarnación	-56.5	-27.14	1950	1996
43	Joacaba	-51.5	-27.17	1943	1998
44	Posodas	-55.97	-27.37	1959	2005
45	Corrientes	-58.77	-27.45	1903	2005
46	Resistencia	-59.05	-27.45	1959	1998
47	Villa Ángela	-60.73	-27.57	1959	1991
48	Gral. Paz	-57.63	-27.75	1959	1995
49	Stgo. Estero Aero	-64.3	-27.77	1959	1998
50	Erebango	-52.3	-27.85	1943	1998
51	Girua	-54.35	-28.03	1943	1998
52	Tinogasta	-67.57	-28.07	1959	1998
53	Colonia Xadrez	-52.75	-28.18	1944	1998
54	Carazinho	-52.78	-28.3	1941	1998
55	Catamarca Aero	-65.77	-28.45	1959	1991
56	Reconquista	-59.7	-29.18	1961	1998
57	Nova Palmira	-51.18	-29.33	1943	1998
58	La Rioja Aero	-66.82	-29.38	1959	1998
59	Paso de los Libres	-57.15	-29.68	1961	2005
60	Ceres	-61.95	-29.88	1959	2005
61	V. María R. Seco	-63.68	-29.9	1959	1998
62	Mte. Caseros	-57.65	-30.27	1959	1998
63	Rivera	-55.48	-30.97	1948	2001
64	Rafaela INTA	-61.55	-31.18	1959	1992
65	Concordia	-58.02	-31.3	1963	2005
66	Cangucu	-52.7	-31.38	1943	1998
67	Córdoba Obs.	-64.18	-31.4	1959	1998
68	Pilar Obs.	-63.88	-31.67	1931	2005
69	Sauce Viejo	-60.82	-31.7	1959	1998
70	Villaguay Aero	-59.08	-31.85	1959	1996
71	Mendoza Obs.	-68.85	-32.88	1959	1998
72	Rosario Aero	-60.78	-32.92	1949	2005
73	Gualeguaychú	-58.62	-33	1961	1998
74	Rio Cuarto	-64.23	-33.12	1961	2005
75	San Luis Aero	-66.35	-33.27	1960	1998
76	Villa Reynolds	-65.38	-33.73	1959	1998
77	Pergamino INTA	-60.55	-33.93	1931	2005
78	Laboulaye	-63.37	-34.13	1959	1998
79	Junin	-60.92	-34.55	1950	2005
80	Aeroparque	-58.42	-34.57	1959	2005
81	OCBA	-58.48	-34.58	1861	2005
82	Ezeiza	-58.53	-34.82	1959	2005
83	Punta del Este	-54.92	-34.91	1948	2000
84	Punta Indio	-57.28	-35.37	1959	1998
85	Nueve de Julio	-60.88	-35.45	1950	2005
86	Trenque Lauquen	-62.73	-35.97	1959	1994
87	Dolores	-57.73	-36.35	1959	2005
88	Santa Rosa	-64.27	-36.57	1937	2005
89	Azul	-59.83	-36.75	1959	1997
90	Cnel. Suárez	-61.88	-37.43	1959	1998
91	Pigüé	-62.38	-37.6	1959	1998
92	Mar del Plata	-57.58	-37.93	1959	2005
93	Tres Arroyos	-60.25	-38.33	1959	2005
94	Bahía blanca	-62.17	-38.73	1959	1998

Tabla 1: Listado de estaciones utilizadas en este estudio, con su período y ubicación geográfica.

3. ANÁLISIS Y CONCLUSIONES

3.1. Climatología de precipitaciones diarias

Para comenzar el estudio y con el objetivo de analizar las diferentes propiedades de la distribución de la lluvia diaria, se estima la onda anual de las medianas, medias y percentil 90 de las series de precipitación con periodo mayor a treinta años.

Dadas las implicancias físicas que puede presentar el cálculo de los promedios diarios de precipitación se proponen y discuten dos tipos de estimaciones de la media diaria de lluvia.

La primer estimación toma en cuenta para el día i del año ($i = 1, \dots, 365$) solamente los años en que el día i registra precipitación. El segundo caso considera todos los años, sin excluir aquellos que no presentan precipitación.

En el primer caso, el tratamiento de los datos está condicionado por distinto número de días de lluvia, pero esos promedios tienen un sentido climatológico e hidrológico explícito (agua disponible). En el segundo caso, la onda anual está constituida por valores homogéneos en cuanto al período de estimación del promedio, en tanto se puede operar sin las restricciones que impone el primer caso.

En la Figura 2 se muestran las marchas anuales de ambos promedios en las estaciones de Observatorio Central de Buenos Aires (O.C.B.A.) y Conceição da Barra y sus promedios móviles de siete días.

Las estaciones utilizadas representan diferentes regiones climáticas y además son las de mayor longitud de observaciones.

En ambas estaciones se conservan las estructuras medias observadas a través de los valores mensuales, con máximos en el otoño y en la primavera, siendo más marcados en la estación Conceição da Barra, en concordancia con lo hallado por Hoffmann (1975) en el Atlas Climático y corroborado con las estadísticas climáticas del Servicio Meteorológico Nacional para el período 1981-1990.

En las marchas se advierten fuertes fluctuaciones interdiurnas, producto de la aleatoriedad en la ocurrencia de la precipitación y la fuerte exigencia en el número de datos necesarios para obtener una marcha suavizada. Por este motivo se estiman los promedios móviles, aunque no consiguen filtrar o suavizar totalmente este efecto. Esto indicaría la necesidad de un análisis armónico para sintetizar las propiedades diarias de la lluvia.

Por otro lado, el segundo tipo de promedio da como resultado una estimación más estable, aunque a expensas de provocar un fuerte suavizado que atenúa la marcha anual. Esto último indica que el ajuste de modelos estadísticos a la previsión de lluvia por cantidades exigiría muestras grandes de información para cada día.

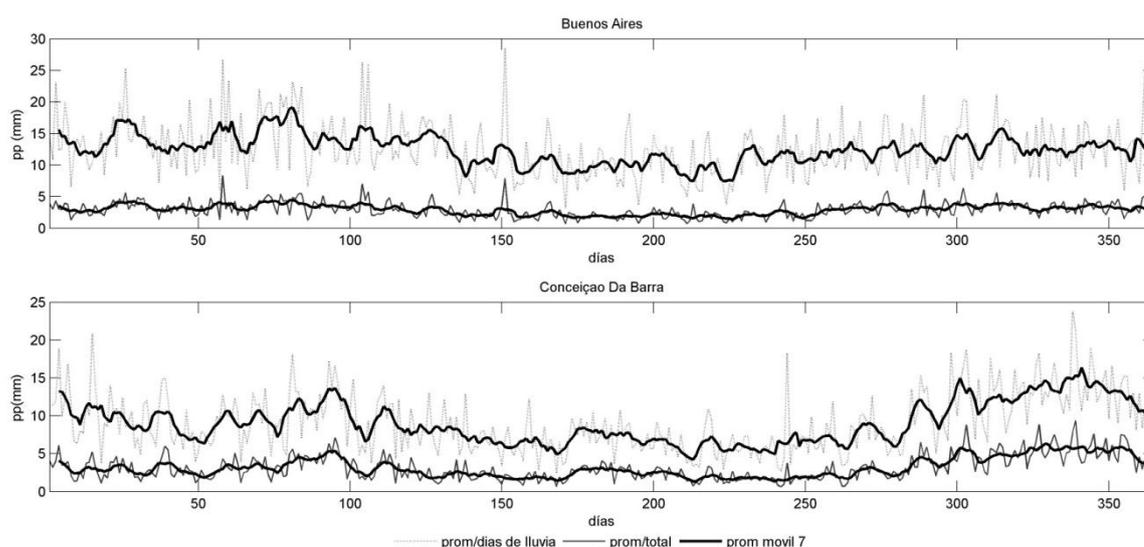


Figura 2: Marcha anual de los promedios de días de lluvia calculados según la muestra de los días de lluvia (línea punteada), el total de los días (línea continua) y sus promedios móviles de 7 días.

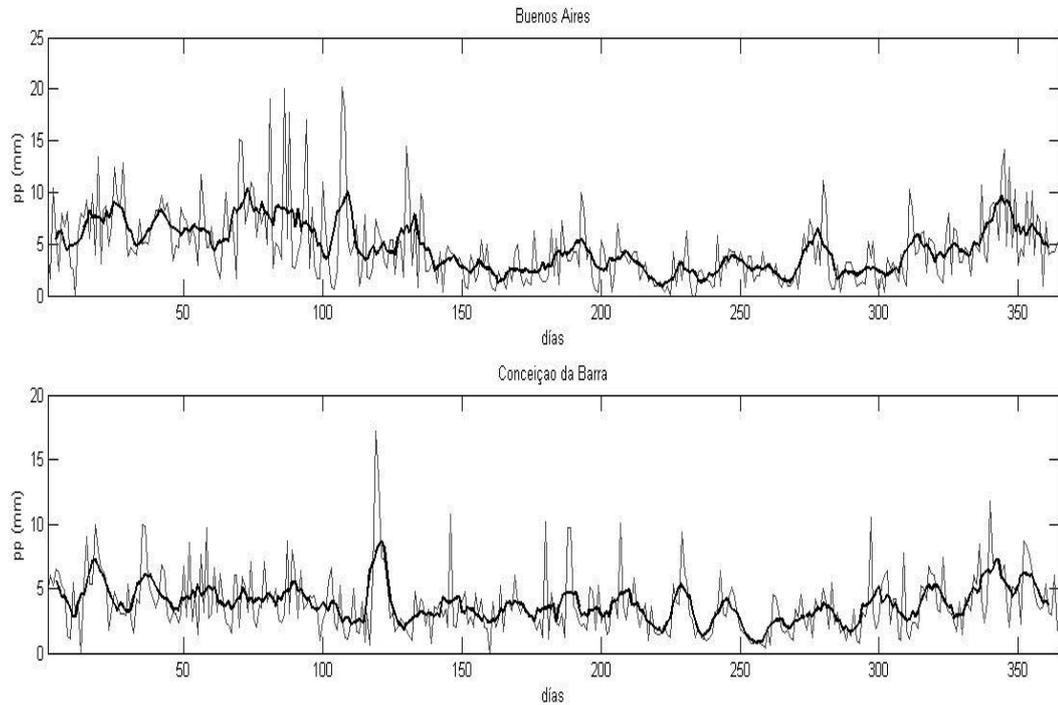


Figura 3: Mediana de precipitación diaria en O.C.B.A. (superior) y en Conceição da Barra (inferior) calculados según la muestra de los días de lluvia y promedio móvil de 7 días en línea en negrita.

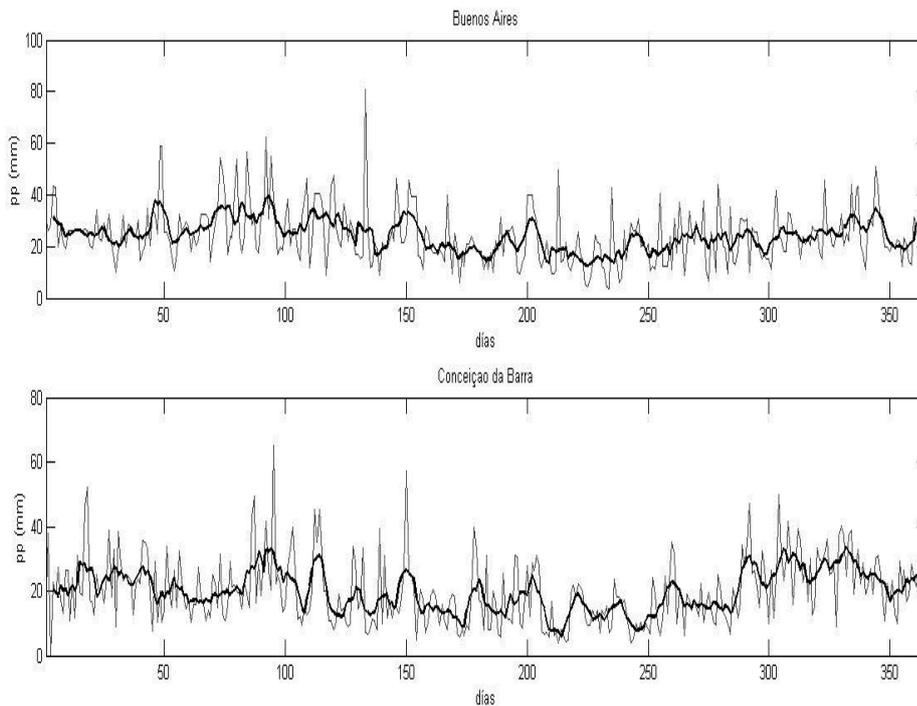


Figura 4: Percentil 90 de precipitación diaria en O.C.B.A. (superior) y en Conceição da Barra (inferior) y promedio móvil de 7 días en línea en negrita.

De cualquier forma hay evidencias de la existencia de la onda anual de lluvia, la cual es definida por los valores diarios. Esto se debe a que los promedios de los días de lluvia conservan la estructura de la onda anual en escala mensual. Por otra parte, la estructura de la onda anual de la lluvia diaria no es alterada por la frecuencia de días de no-lluvia, cuya onda como se verá es inversa.

En el análisis de otros parámetros que caracterizan la distribución de la precipitación diaria se observa que la mediana y el percentil 90 tienen gran semejanza con lo que se muestra para los promedios. Esto indicaría una relación lineal entre estas propiedades (Figuras 3 y 4).

Los valores comparados de la mediana y los promedios de los días de precipitación nos permiten inferir que en todos los casos las distribuciones para cada día son asimétricas.

De estos estadísticos quien refleja mejor la onda anual es el percentil 90, ambas estaciones muestran los máximos estacionales ya señalados. Por otra parte, existe una alta correlación entre los totales mensuales y los máximos diarios mensuales que afectan al percentil 90. Lo que implica que la estructura de la onda anual de lluvia está altamente influenciada por los extremos diarios de la misma. (Naumann y otros, 2009).

3.2. Climatología de la frecuencia de precipitación

En la Figura 5 se muestran los promedios móviles de 7 días de las marchas anuales de d_0 , d_1 , d_2 y d_3 . En primera instancia se advierte que los períodos de mínimos de lluvia mensual representados por la frecuencia de periodos de tres días sin lluvia están en fase opuesta a las marchas de lluvia diaria. Este resultado es esperable dada la definición de los d_i . Este patrón se inhibe en Conceição da Barra donde la onda anual no es perceptible. Esto implica en cierta forma que en la cuenca del Plata y regiones adyacentes los modelos estadísticos de precipitaciones o ausencia de la misma difieren en forma notable.

En estas figuras se advierte la estacionalidad especialmente en d_0 y d_1 , que se va perdiendo en d_3 , en casi todas las estaciones de la Figura 5.

Para d_3 la frecuencia tiene una amplitud pequeña mostrando que ya las rachas de 3 días consecutivos de lluvia tienen una baja probabilidad de ocurrencia a lo largo de todo el año y en todas las estaciones analizadas. Se destaca que en Conceição da Barra y Terra Roxa la frecuencia de d_3 aumenta en primavera y verano probablemente como resultado del movimiento de la zona de convergencia del Atlántico Sur (Nogués-Paegle and Mo, 1997; Liebmann y otros, 1999).

En cambio, en Buenos Aires y Corrientes se advierte el efecto mayoritario de la precipitación asociada a los pasajes frontales, en los que la probabilidad de que al menos un día en tres llueve tiene valores significativos durante todo el año y durante la primavera dicha probabilidad se asemeja a la de tener tres días secos.

Esto permite inferir que el efecto de los frentes se hace perceptible en estas estaciones durante todo el año, posiblemente porque el ciclo medio entre días lluviosos y secos esta alrededor de tres a cinco días.

La precipitación mostrada por la ocurrencia de d_3 en Buenos Aires y en Corrientes responde a sistemas que permanecen tres o más días. Esto se podría deber a las bajas segregadas y las ondas sobre los frentes. Dichos sistemas producen eventos de lluvia persistente y se caracterizan por tener una baja probabilidad de ocurrencia.

Cabe señalar que si se representan las d_i , con $i=5$ días tratando de representar mejor los ciclos de precipitación más frecuentes, las frecuencias de d_0 en primavera y verano son significativamente menores en Buenos Aires y Corrientes que d_1 y aún que d_2 . Esto implica que la presencia de los frentes en un ciclo de 5 días define las formas de las ondas anuales de la precipitación diaria mostrada por los d_i .

Para observar en términos regionales el comportamiento de los d_0 y d_1 como ejemplos de este estudio se presenta la Figura 6. En la misma se presentan la amplitud y la fase del primer armónico de las ondas anuales de d_0 y d_1 a través de una representación vectorial interpoladas en puntos de un enrejado regular.

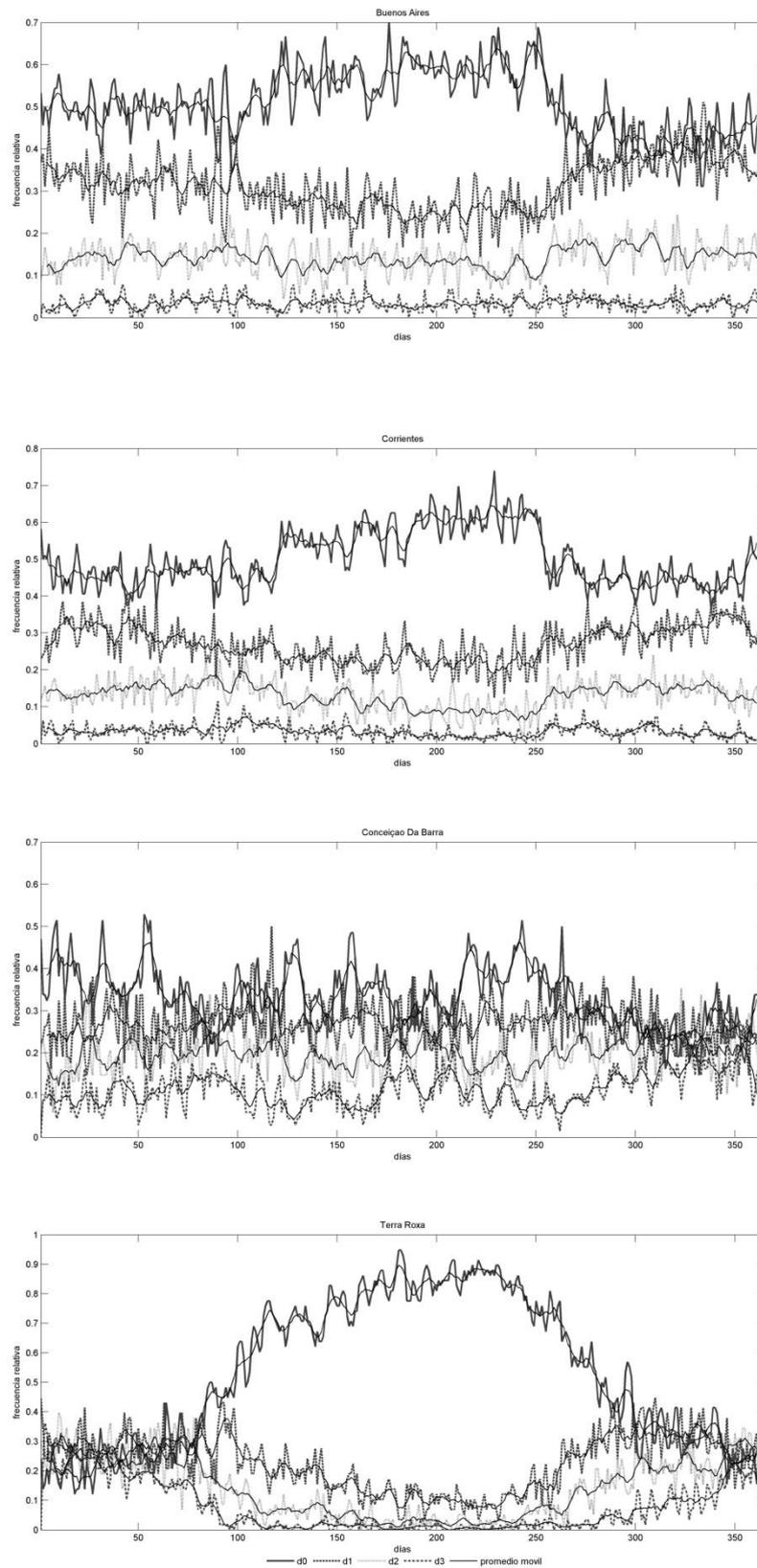


Figura 5: Frecuencias relativas de d_0 , d_1 , d_2 y d_3 , con sus respectivos promedios móviles de 7 días. Para las estaciones: Observatorio Central Buenos Aires, Corrientes, Conceição Da Barra y Terra Roxa.

Esta representación se define en coordenadas polares como:

$$\vec{S} = (L, \theta) \quad [1]$$

Donde L es la longitud del vector y representa la amplitud de la onda anual. El ángulo θ representa la fase. Este ángulo varía entre 0 y 360 donde cada día del año está caracterizado por un ángulo. Este tipo de representación permite sintetizar tanto espacial como temporalmente las marchas anuales de los di. Y permitiría de manera objetiva definir sub-regiones climáticas caracterizadas por los distintos modelos markovianos que las representan.

Se observa que en el norte de la cuenca las amplitudes de $d0$ son mayores, las que describen las sequías estacionales en el oeste y norte argentino (representado en este caso por la estación de Tucumán). En la región del sur de Brasil, Uruguay, el noroeste y este argentino las amplitudes decrecen con fechas de ocurrencia entre primavera y verano. Se advierte la presencia de los frentes ya que estos tienen cuasi-ciclos de aparición entre tres y cinco días durante todo el año.

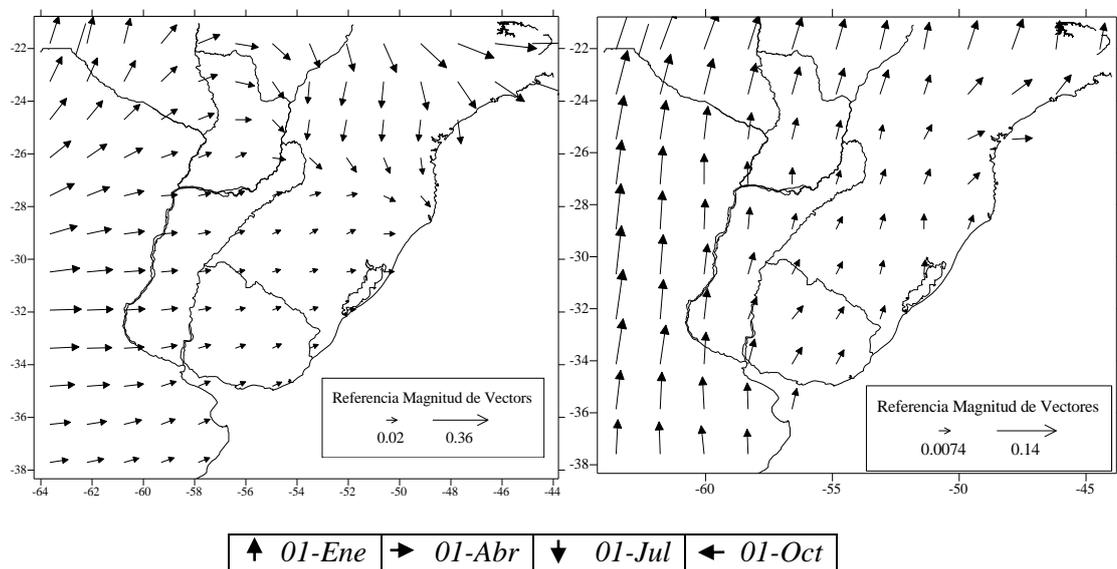


Figura 6: Amplitud y fase del primer armónico de los $d0$ (izquierda) y $d1$ (derecha) con 3 días.

Como inferencia final se advierte que en las estaciones argentinas el régimen diario de precipitación estaría definido por modelos markovianos diferenciados de los modelos que se ajustarían en las estaciones brasileñas, especialmente las de latitudes más bajas de la región de estudio. Esto ocurre porque la persistencia está determinada en forma diferente en ambas regiones. Mientras que en la Argentina la condición fundamental de lluvia y no-lluvia dada por los di es impuesta por los pasajes de frentes y ocasionales bajas segregadas y oclusiones frontales. Así mismo en Brasil los procesos lluviosos también están influenciados por los movimientos de la zona de convergencia del Atlántico Sur.

Agradecimientos: Al Proyecto UBA X228, al Proyecto Conicet PIP 112-200801-00762 y Proyecto Agencia PICT 2008-1820 por la financiación de este trabajo. Los autores desean expresar su gratitud a los revisores y editores cuyas sugerencias han enriquecido la calidad de este trabajo.

REFERENCIAS

- Anonymous, 1970. Guide to hydrometeorological practices. WMO 168 T.P. 82, 2nd Edition.
 ANEEL: Agencia Nacional de Energía Eléctrica, 2000: Base de Datos Hidrológicos, Disponible en Superintendencia de Estudios e informaciones Hidrológicas SGAN – Quadra

- 603 – Modulo J. 1 andar, Brasilia/DF 70830-030.
- Epstein, E. y Barnston, A., 1989. A precipitation climatology of 5-days periods. *J. of Clim.*, 3, 218-236.
- Gattinoni, N. y Naumann, G., 2008. Análisis de las distribuciones de secuencias húmedas en la ciudad de buenos aires y alrededores. *Revista de Geografía* 10, 70-80.
- Gattinoni, N. y Naumann, G., 2009. Modelos De Secuencias De Precipitación Aplicados Al Pronóstico Objetivo en la Ciudad De Buenos Aires. *Anales del X Congreso Argentino de Meteorología (CONGREGMET) y CLIMET XIII*. 16 pp.
- Hoffmann, J. A., 1975. Atlas climático de América del Sur, OMM/UNESCO, 44.
- Liebmann B., Kiladis, G. N., Marengo, J. A., Ambrizzi, T. y Glick, J. D., 1999. Submonthly convective variability over South America and the South Atlantic convergence zone. *J. Climate*, 12, 1877–1891.
- Naumann, G., Vargas, W. y Minetti, J., 2008. Dry Spells In The La Plata Basin. Monitoring and Trend Stability. *Drought Implication. Meteorologica*, 33, 61-85.
- Naumann, G., Llano, M. P. y Vargas, W., 2010. Climatology of the Annual Maximum Daily Precipitation in the La Plata Basin. *International Journal of Climatology*. doi:10.1002/joc.2265.
- Nogués-Paegle, J. y Mo, K.C., 1997. Alternating Wet and Dry Conditions over South America during Summer. *Mon. Wea. Rev.*, 125, 279–291.
- Ruiz, N., 2005. Análisis Climático-estadístico de las probabilidades asociadas a condiciones secas semanales en Buenos Aires. *Anales del IX Congreso Argentino de Meteorología (CONGREGMET)*.

MAPA DE RIESGO DE TEMPERATURAS EXTREMAS FRÍAS PARA EL SUR DE LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES USANDO DATOS SATELITALES Y DE SUPERFICIE

Roberto De Ruyver ¹, María J. Denegri y Patricio Oricchio ¹

¹ Instituto de Clima y Agua - Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA)
Las Cabañas y Los Reseros s/n - 1686 Hurlingham - Buenos Aires - Argentina

(Manuscrito recibido el 16 de abril de 2010, aceptado el 7 de abril de 2011)

RESUMEN

Cerca del 40 % del área sembrada con trigo en Argentina se concentra en el sur de la provincia de Buenos Aires. Los eventos frecuentes de temperaturas extremas frías en la segunda quincena de octubre, coincidentes con un momento fenológico sensible del trigo, provocan daños de importancia en el cultivo. El presente trabajo tiene como objetivo proveer mapas de riesgo de temperaturas extremas frías para el período sensible del cultivo de trigo en esa región. Se utilizó información de los canales 3, 4 y 5 del satélite NOAA de 1,09 km² de resolución espacial, obtenidas en el Instituto de Clima y Agua del INTA-Castelar entre 2005 y 2008, y datos diarios de temperaturas mínimas del período 1961-2008 de 13 estaciones de superficie del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Los resultados muestran que las áreas de mayor riesgo son aquellas que combinan menor altura sobre el nivel del mar y al mismo tiempo mayor distancia al mismo. Esta metodología puede ser extendida a otros cultivos y a otras regiones. Este tipo de análisis constituye una herramienta que puede ser útil en tareas de planificación tanto a nivel estatal como privado.

Palabras clave: Heladas, mapas de riesgo, satélite, trigo.

FROST RISK MAP FOR THE SOUTH OF BUENOS AIRES PROVINCE USING SATELLITE AND SURFACE DATA

ABSTRACT

Cold temperature can cause severe damage in crops when a cold front irruption occurs. This is especially true in some specific periods on the growing crops mainly during spring. This work presents frost risk maps for wheat. The region selected was the south of Buenos Aires province in Argentina. Wheat covers almost 2,2 million ha in south Buenos Aires area which represents 40% of the total wheat cultivated in Argentina. At the same time, south Buenos Aires area suffers the biggest damage on wheat because of frost during spring time. The study was carried out based on channels 3, 4 and 5 of NOAA satellite images (1,09 km² spatial resolution). Images from 2005 to 2008 were available. Minimum daily temperatures from "Servicio Meteorológico Nacional" (SMN) and "Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria" (INTA) were also used. Risk area is increased in areas which combine lower altitudes and higher distance to the Ocean. Areas near the Ocean are associated to areas with lower frost risk. This methodology can be applied for different crops and different areas and It would be a useful tool for management policies.

Keywords: Frost, frost mapping, remote sensing, wheat.

1. INTRODUCCIÓN

Las temperaturas extremas frías provocan alerta y preocupación en las actividades agrícolas especialmente cuando se manifiestan en épocas en las cuales los cultivos se encuentran en etapas sensibles de su desarrollo. En momentos determinados del ciclo de los cultivos, temperaturas aun por encima de cero grado en abrigo meteorológico pueden provocar daños en la planta y afectar su desarrollo y posterior rendimiento.

A partir de los datos de la campaña agrícola 2006/2007 (MAGYP 2011), se observa que Argentina tuvo un área sembrada con trigo que superó los 5,6 millones de hectáreas y una producción total de 14,5 millones de toneladas. La provincia de Buenos Aires contribuyó con gran parte de ese total alcanzando casi 3 millones de hectáreas sembradas (52% del total del país) las cuales produjeron algo más de 9 millones de toneladas (62% del total del país). En particular, la región del sur de la provincia de Buenos Aires, al sur de 36°S, concentra un importante porcentaje del total provincial. Así, y en base a datos de la misma campaña, el área sembrada con trigo en esa región abarcó 2.2 millones de hectáreas (72% del total provincial) con una producción de 5,7 millones de toneladas (63% del total provincial).

El ingreso de masas de aire frío desde el sudoeste que irrumpen en la región pampeana durante la primavera, pueden conducir a situaciones sinópticas meteorológicas que provocan importantes enfriamientos nocturnos y, consecuentemente, la observación de temperaturas extremas frías. Muchos de esos casos resultan en heladas meteorológicas (Snyder y de Melo-Abreu 2005). Dentro de la región pampeana, la ubicación entre los 36 y 40°S de los partidos del sur de Buenos Aires implica una probabilidad mayor de ocurrencia de temperaturas extremas frías ante irrupciones frontales y durante los procesos de enfriamiento radiativo posteriores. En particular, cuando estas irrupciones se observan durante la primavera, pueden en general tener consecuencias perjudiciales sobre los cultivos de la región y, especialmente sobre el trigo, ya que es en el comienzo y la mitad de la primavera el momento en el cual se desarrolla la etapa de la formación de espigas. En dicha etapa, temperaturas de -1°C en el nivel de la planta marcan el umbral de temperaturas críticas a partir del cual el cultivo puede sufrir daños.

En estudios previos realizados en la Región Pampeana de Argentina se buscó la relación entre temperaturas mínimas en estaciones meteorológicas y temperaturas de superficie a partir de imágenes de satélite. Se encontró una alta correlación entre estas variables (Di Bella y otros 1997, De Ruyver y otros 2006). A partir de aquellos resultados, las metodologías como la propuesta por François y otros (1999) para la generación de mapas de riesgo de heladas, que contemplan la utilización de temperaturas mínimas en estaciones meteorológicas y temperaturas de superficie obtenidas mediante satélites, son una alternativa válida para su aplicación sobre la región Pampeana.

El objetivo del presente trabajo es elaborar mapas de riesgo para temperaturas extremas frías para el cultivo de trigo en el período más crítico de su desarrollo (segunda quincena de octubre) en la región del sur de la provincia de Buenos Aires.

2. REGIÓN DE ESTUDIO

La región de estudio se localizó en el sur de la provincia de Buenos Aires y el extremo este de la provincia de Río Negro, Argentina (Fig. 1a). El área total de la región cubre 136.165 km² (Fig. 1b).

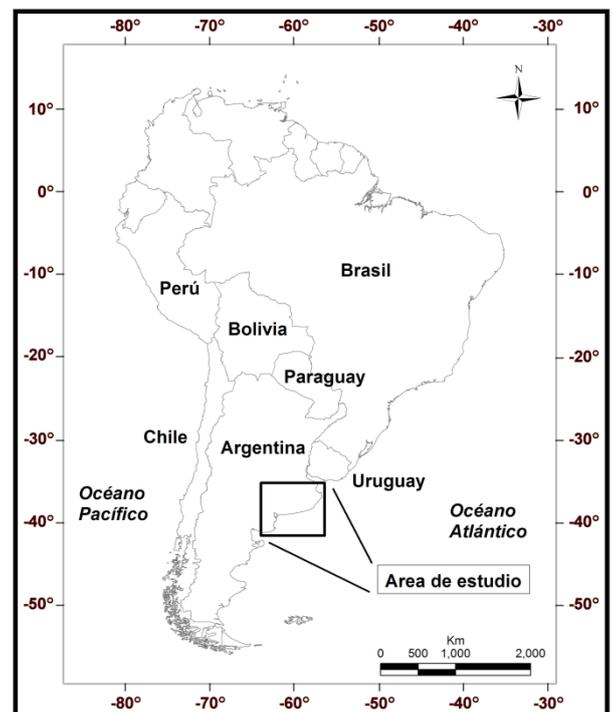


Fig. 1a: Área de estudio en el sur de la provincia de Buenos Aires, Argentina.

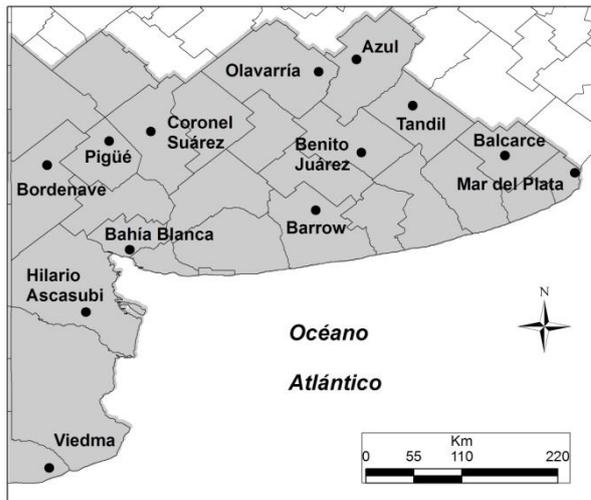


Fig. 1b: Estaciones meteorológicas y localidades del área de estudio (en gris).

El relieve es predominantemente llano con algunas serranías bajas que alcanzan su máximo en las Sierras de la Ventana (Cerro Tres Picos) con 1.239 m.s.n.m. En la geomorfología también se destacan las Sierras de Tandil (Cerro La Juanita, 524 m.s.n.m.) y algunas lagunas en el noroeste y oeste de la región (Fig. 2).

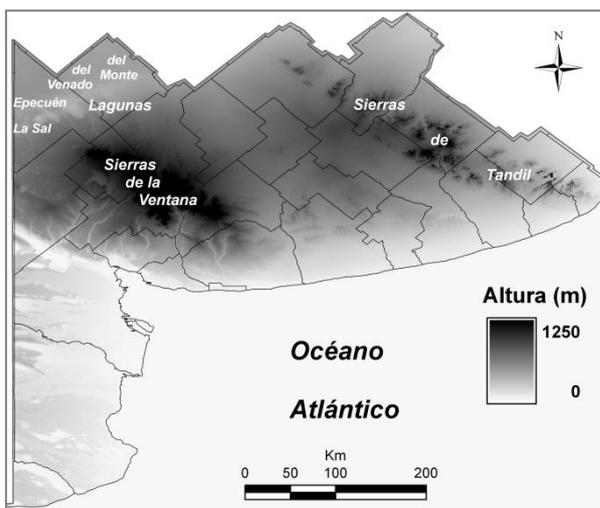


Fig. 2: Relieve del área de estudio representado a través de un Modelo de Elevación Digital (DEM) cuyo píxel tiene una resolución espacial horizontal de 90 m².

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Datos

Se dispuso de los registros de temperaturas mínimas diarias de 13 estaciones de superficie de la región para el período 1961-2008. Las estaciones pertenecen al Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y al Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) (Fig. 1b).

Se definió como día con helada aquel en el cual, al menos, una estación del área bajo estudio tuvo temperatura en abrigo meteorológico inferior a 0°C. Sobre la base de esta clasificación, se analizaron las imágenes del satélite NOAA-AVHRR capturadas con la antena que posee el Instituto de Clima y Agua del INTA-Castelar en el período 2005-2008. En particular se utilizó la información del satélite NOAA-15, canales 3B (3,55 μm – 3,93 μm), 4 (10,30 μm – 11,30 μm) y 5 (11,50 μm – 12,50 μm), con una resolución espacial de 1,09 km² y horarios de pasaje entre las 5,30 y las 7,30 hora local. Para el total de días con heladas, la disponibilidad de imágenes acotó el tamaño de la muestra a 134 días en el período 2005-2008 (Tabla I). La resolución espacial del píxel NOAA determinó un total de 124.351 píxeles en el área de estudio.

Año	Cantidad de días con imágenes NOAA
2005	21
2006	33
2007	40
2008	40
Total	134

Tabla I: Total de días con heladas empleados en este estudio para el período 2005-2008.

3.2 Metodología

3.2.1 Tratamiento de las imágenes de satélite

A cada imagen de satélite se le aplicaron las respectivas correcciones geométricas y atmosféricas por la presencia de los gases atmosféricos y por las influencias terrestres, debidas a humedad del suelo y cobertura vegetal, entre otros. Se usó para ello el método de “split window” (Caselles y otros 1988, Sobrino y otros 1993, Coll y Caselles 1997, Parra y otros 2006). En el presente estudio se

usó el método desarrollado por Coll y Caselles 1997, cuya expresión es:

$$T_{sup}=T_4+ A(T_4-T_5) + \delta + (1-\varepsilon) \alpha - \delta\varepsilon \beta \quad [1]$$

donde T_{sup} es la temperatura de superficie corregida, T_4 y T_5 son las temperaturas de brillo de los canales del sensor AVHRR en 11 y 12 μm respectivamente, A y δ son coeficientes que dependen de las condiciones atmosféricas y α y β son los coeficientes de la corrección por emisividad. Por último, ε y $\delta\varepsilon$ son la emisividad media y la diferencia espectral de la emisividad en los dos canales considerados respectivamente. Este es el procesamiento de rutina que se aplica a todas las imágenes que se capturan con la antena que posee el Instituto de Clima y Agua del INTA-Castelar.

En un procesamiento posterior, se aplicó a las imágenes un filtro en las zonas con presencia de nubes (Saunders y Kriebel 1988). El método emplea, a lo largo de 5 pasos, diferentes relaciones entre los canales 3, 4 y 5 que permiten detectar nubes a distintas alturas de acuerdo a las diferencias radiativas que existen entre las nubes y el suelo en las diferentes bandas del espectro electromagnético. La clasificación resultante (píxel con o sin nube), permitió eliminar los píxeles con nubosidad. Debido a que no existe un método que asegure el filtrado perfecto de nubes, se realizó con posterioridad un análisis de la situación sinóptica meteorológica de cada día en simultáneo con un análisis visual de todas las imágenes en cada uno de los 13 sitios con estación meteorológica de superficie. Se decidió eliminar aquellos píxeles que, habiendo superado exitosamente el filtro de nubes, generaban dudas sobre si el mismo se hallaba libre de nubosidad. Este análisis, si bien pudo generar pérdida de datos de T_{sup} , se realizó con el fin de aumentar el grado de certeza en cuanto a píxeles libres de nubosidad.

3.2.2 Técnica a aplicar

Para la determinación de los mapas de riesgo se aplicó la metodología propuesta por François y otros (1999). Mediante ella se obtuvo un conjunto de relaciones que permitieron crear mapas de riesgo a partir de los valores de temperatura de las 13 estaciones meteorológicas de superficie que se hallan en la región de estudio.

El primer paso consistió en determinar la relación lineal existente entre las temperaturas en abrigo meteorológico a 1,5 m de altura (T_{min}) y las temperaturas de superficie (T_{sup}) obtenidas con las imágenes en los 13 sitios donde hay una estación meteorológica de superficie y, por ende, una medición simultánea de ambas. Para cada uno de los 13 sitios se obtuvieron rectas de regresión entre T_{min} y T_{sup} y se determinaron los coeficientes de correlación. Para determinar T_{sup} de las imágenes satelitales se consideró el valor promedio en ventanas de 3 x 3 píxeles en torno a la estación.

El segundo paso permitió determinar el área de validez de la relación, en torno a las 13 estaciones de superficie, obtenida en el paso anterior. Para ello, se obtuvo la relación lineal de temperatura entre el Píxel 1 y los 13 píxeles correspondientes a los sitios donde se localiza cada estación meteorológica de superficie (Tabla II). Los valores presentados en la tabla describen un ejemplo representativo del procedimiento. La relación lineal se calculó cuando el píxel tuvo al menos 5 observaciones. Esto ocurrió en todos los casos y permitió calcular el coeficiente de correlación (r). La mejor de las 13 correlaciones, con un $r > 0,84$ (valor utilizado por François y otros, 1999), determinó a qué píxel de estación de superficie (P_{Ex} , con $1 \leq x \leq 13$) se asoció el píxel analizado (Píxel 1). En los casos en que las 13 correlaciones tuvieron un valor $r \leq 0,84$, el píxel no fue asignado al píxel de ninguna estación. El procedimiento se repitió para los casi 125.000 píxeles de la región. Se obtuvieron 13 mapas, 1 por cada estación, de los cuales se muestran aquí 2 como ejemplo (Fig. 3 y Fig. 4). Una clasificación de estos 13 mapas condujo a un nuevo mapa (Fig. 5) que asoció la máxima correlación de cada píxel de la región con alguno de los 13 píxeles donde se localizan las estaciones de superficie y determinó las áreas de influencia de cada estación. De este modo se clasificó la región en un número de áreas igual al número de estaciones.

Este proceso fue hecho únicamente con las temperaturas de las imágenes de satélite. Los mapas determinaron una relación entre T_{sup} de cada píxel de la región y T_{sup} en el píxel de una estación y, por lo tanto, una relación con la T_{min} en abrigo meteorológico por lo ya realizado en el primer paso.

Un tercer y último paso consistió en extender la relación hallada entre T_{sup} de cada píxel (paso 2) a una relación entre T_{min} de cada píxel para el área de influencia de cada estación ($r > 0,84$).

Día	T_{sup} (°C)				
	Píxel 1	P_E ₁	P_E ₂	...	P_E ₁₃
1	2,8	2,5	2,7	...	S/D
2	-2,2	0,1	-1,2	...	3,1
3	S/D	1,3	S/D	...	-2,5
4	-3,5	S/D	-1,8	...	-0,4
...
134	-1,0	-1,4	-1,1	...	-4,2
r	0,92	0,81	0,92	...	0,87

Tabla II: Temperaturas observadas en el píxel 1 y en el píxel correspondiente a cada una de las estaciones meteorológicas de superficie (P_E₁ a P_E₁₃). Píxeles con nubosidad están indicados como S/D (sin dato). El coeficiente de correlación r para el píxel 1 resultará del mejor de los 13 calculados.

Esto fue posible mediante la suposición de que la relación lineal entre T_{min} y T_{sup} determinada en el paso 1 (Tabla III) es válida para cualquier píxel dentro del área de influencia de cada estación determinada en el paso 2 e implica utilizar, dentro del área de influencia, los mismos coeficientes de la relación lineal anterior para determinar T_{min} de cada píxel a nivel de abrigo a partir de su correspondiente T_{sup} de la imagen satelital. De este modo, la expresión final de T_{min} para cada píxel dependerá, dentro de cada área de influencia de una estación

meteorológica, de la T_{min} observada en dicha estación y de los coeficientes obtenidos de las relaciones lineales en los tres pasos del desarrollo de la metodología propuesta por François y otros (1999).

La aplicación de esta metodología permitió obtener mapas de temperatura mínima quincenal o mensual en base a los registros de estaciones de superficie entre 1961 y 2004. Estos mapas permitieron calcular el riesgo de heladas a nivel de abrigo meteorológico a escala de píxel.

4. RESULTADOS

4.1 Relación entre T_{min} y T_{sup} en estaciones

La comparación entre T_{min} y T_{sup} obtenida a partir de estaciones meteorológicas de superficie e imágenes NOAA, permitió obtener relaciones entre temperaturas para los 13 sitios donde se localizan las estaciones de superficie. La aplicación del filtro de nubosidad determinó que la cantidad de valores de T_{sup} fuera diferente para cada píxel. En particular, para los píxeles donde se localizan las estaciones meteorológicas de superficie, la cantidad de valores de T_{sup} disponibles varió entre 53 (39%) en Mar del Plata y 93 (69%) en Pigüé y Bordenave sobre el total de 134 posibles (uno por cada imagen). Estos porcentajes de píxeles empleados del total son similares a los porcentajes registrados por François y otros (1999) quienes obtuvieron valores entre 44 y 72 %.

Estación	Ecuación	R ²	Error cuadrático medio (°C)
Azul	$T_{min} = 1,00 T_{sup} + 0,75$	0,83	1,39
Bahía Blanca	$T_{min} = 1,03 T_{sup} + 0,96$	0,86	1,56
Balcarce	$T_{min} = 0,76 T_{sup} + 2,70$	0,73	1,50
Barrow	$T_{min} = 1,08 T_{sup} + 0,83$	0,92	1,22
Benito Juárez	$T_{min} = 0,91 T_{sup} + 1,28$	0,89	1,28
Bordenave	$T_{min} = 1,06 T_{sup} + 1,20$	0,83	1,54
Coronel Suárez	$T_{min} = 1,00 T_{sup} + 0,87$	0,77	1,66
Hilario Ascasubi	$T_{min} = 0,99 T_{sup} + 1,89$	0,92	1,36
Mar del Plata	$T_{min} = 0,82 T_{sup} + 0,03$	0,60	2,11
Olavarría	$T_{min} = 0,85 T_{sup} + 2,03$	0,84	1,17
Pigüé	$T_{min} = 0,95 T_{sup} + 1,98$	0,87	1,31
Tandil	$T_{min} = 0,95 T_{sup} + 0,72$	0,84	1,80
Viedma	$T_{min} = 1,03 T_{sup} + 1,39$	0,84	1,41

Tabla III: Relación lineal entre T_{min} diaria y T_{sup} para cada estación meteorológica estudiada en el período 2005-2008.

El análisis de los coeficientes de determinación entre T_{min} y T_{sup} muestra que en 10 de las 13 estaciones el valor de R^2 fue mayor a 0,83 (Tabla III).

4.2 Mapa de clasificación

El segundo paso de la metodología aplicada permitió generar 13 mapas. A modo de ejemplo se muestra el obtenido para Balcarce (Fig. 3). El mapa, expresado en valores de coeficiente de correlación (r) por píxel, indica la relación entre T_{sup} de cada píxel de la región y T_{sup} del píxel en el cual se encuentra la estación meteorológica de Balcarce. En esta figura se observa que los valores de correlación más altos se localizan en torno a la estación y disminuyen, en general, con el aumento de la distancia a ella. Los valores más bajos se hallan en la región de las lagunas del oeste y noroeste del área de estudio (Fig. 2 y Fig. 3). Este patrón de T_{sup} descrito para Balcarce se repitió de manera similar para cada una de las demás estaciones, donde los valores más altos tienden a observarse en áreas aledañas a la estación. Como ejemplo se muestra lo que ocurre para la estación Coronel Suárez (Fig. 4). Este comportamiento es el esperado para una variable como T_{sup} que, en general, no muestra cambios espaciales abruptos en regiones como la estudiada. Sin embargo, la mayor diferencia se observa en la extensión que tienen las áreas con las más altas correlaciones. Estas áreas tienen mayor extensión en aquellas estaciones que tienen menor influencia marina. Lo expresado queda reflejado al comparar las áreas de influencia de Balcarce (Fig. 3) y Coronel Suárez (Fig. 4) y se repite como característica al considerar el resto de las estaciones en el área de estudio. Es conocido el efecto moderador que tiene el mar en los extremos observados en temperaturas. Por este mismo motivo también las zonas más próximas al mar, y las que reciben mayor influencia de él, son las que presentan un mayor gradiente espacial de cambio en las temperaturas que el que ocurre en una región sin la influencia marina y con mayor homogeneidad en cuanto al tipo de terreno circundante como el caso de Coronel Suárez.

Con los 13 mapas generados (uno por cada estación) se realizó una clasificación que dio origen a un nuevo mapa (Fig. 5). Este mapa se constituyó con el mejor coeficiente de correlación observado en cada píxel, seleccionando aquellos con $r > 0,84$. El nuevo

mapa generado está integrado por un número de zonas igual al número de estaciones meteorológicas que componen este estudio. En aquellos píxeles en los cuales se observó un $r \leq 0,84$ para todas las estaciones, el píxel no fue asignado a ninguna estación y no fue utilizado en ningún procesamiento posterior.

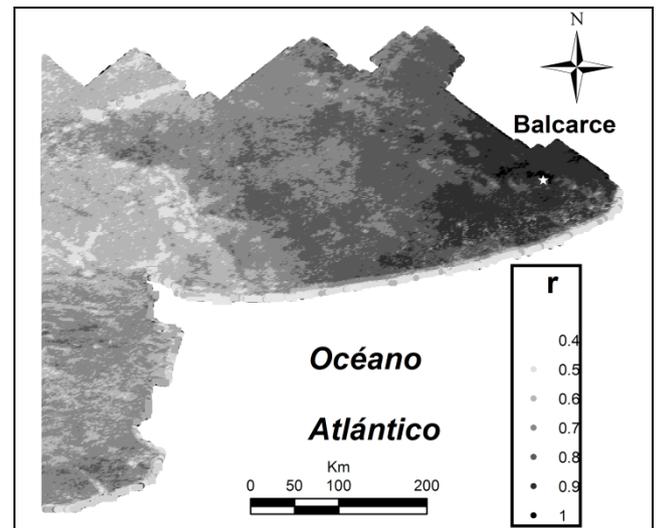


Fig. 3: Mapa del coeficiente de correlación entre T_{sup} de cada píxel y T_{sup} del píxel donde se localiza la estación Balcarce (INTA). Todos los valores observados tuvieron un $r > 0,3$ razón por la que no se consideran los valores en el intervalo $(0,3 > r > -1,0)$

El tamaño de las áreas del mapa de clasificación (Fig. 5), y el porcentaje total que cada una ocupa (Tabla IV), muestra que con esta clasificación la estación que tiene más influencia en la región es Barrow (INTA). En el otro extremo, la estación con menor área de influencia fue Mar del Plata, influencia que se extiende en dirección noroeste y alejándose de la costa. También se destaca, en el caso de Mar del Plata, que el tamaño del área de influencia es coherente con la posición costera de la estación y que se halla en un extremo de la región de estudio. Las zonas que no pudieron ser asignadas a ninguna estación ocupan el segundo lugar en tamaño (14,4% del área) y cubren principalmente todas las zonas costeras con el Océano Atlántico, las lagunas del oeste y noroeste de la región (La Sal, Epecuén, del Venado, del Monte, etc.) y los sistemas orográficos de Sierras de la Ventana y Sierras de Tandil (Fig. 2). En el último de los citados, aunque su altura no llega a ser muy importante,

se extiende a lo largo de muchos kilómetros en dirección noroeste-sudeste.

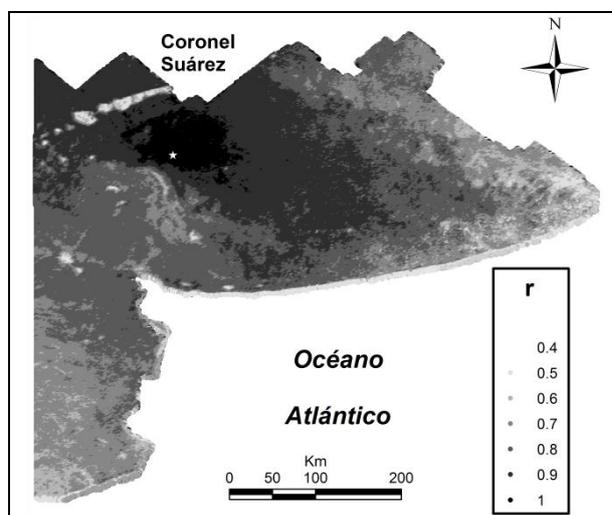


Fig. 4: Mapa del coeficiente de correlación entre T_{sup} de cada píxel y T_{sup} del píxel donde se localiza la estación Coronel Suárez. Todos los valores observados tuvieron un $r > 0,3$ razón por la que no se consideran los valores en el intervalo $(0,3 > r > -1,0)$

Su presencia provoca, a lo largo de los partidos de Olavarría, Azul, Benito Juárez, Tandil y Balcarce, gran cantidad de pequeñas áreas aisladas donde el comportamiento de la T_{sup} no puede asociarse a ninguna T_{sup} de estaciones vecinas ($r \leq 0,84$). Esto genera en el mapa de clasificación una región con mayor heterogeneidad que en cualquier otra zona. Se concluye que el área total de zonas sin asignación exhibe un tamaño acorde a lo esperado por la naturaleza del comportamiento de las temperaturas mínimas en cuerpos de agua y áreas con relieve irregular.

Nº	Estación	Área (km ²)	%
0	Sin asignación	19.576	14,4
1	Azul	5.046	3,8
2	Olavarría	3.243	2,4
3	Tandil	3.042	2,2
4	Coronel Suárez	12.114	8,9
5	Pigüé	2.666	2,0
6	Benito Juárez	13.102	9,7
7	Balcarce	5.006	3,7
8	Bordenave	17.307	12,8
9	Mar del Plata	349	0,2
10	Barrow	21.954	16,2
11	Bahía Blanca	9.098	6,7
12	H. Ascasubi	15.637	11,5
13	Viedma	7.402	5,5
	Total	135.542	100,0

Tabla IV: Área de influencia de cada estación a partir del mapa de clasificación obtenido en el paso 2 (Fig. 5).

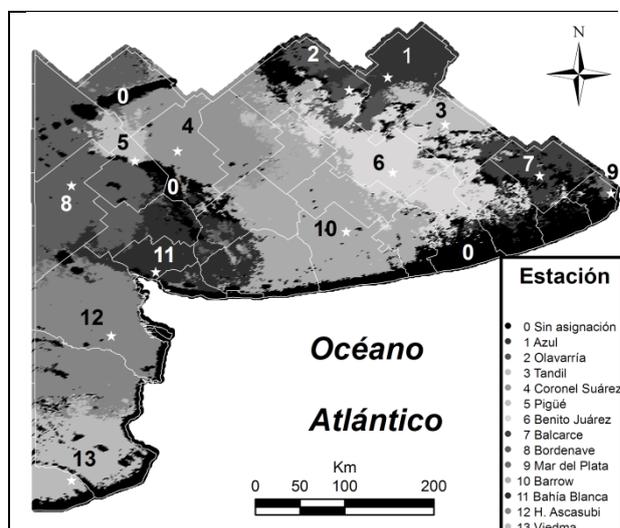


Fig. 5: Mapa de clasificación que determina el área de influencia de cada estación meteorológica (localizadas en los puntos con estrellas) a partir del análisis de T_{sup} . Las áreas que no pudieron ser asignadas a ninguna estación se las identifica con el número 0 (color negro).

En el mismo mapa (Fig. 5), se puede observar que en el oeste dominan las estaciones que tienen grandes áreas de influencia (Coronel Suárez, Bordenave y Bahía Blanca). Sin embargo, junto a ellas se localiza Pigüé con un comportamiento opuesto. Aquí es importante mencionar que cada píxel fue asociado a la estación con la cual tuvo el coeficiente de correlación más alto. De este modo, píxeles cercanos a la estación Pigüé, y que tuvieron una buena correlación con el píxel donde se localiza la estación ($r > 0,84$), alcanzaron una correlación aún mejor con las estaciones Coronel Suárez y Bordenave. Como resultado de esto, el área de influencia de la estación Pigüé en el mapa de clasificación fue pequeña (Fig. 5) en comparación con las áreas de influencia de las estaciones más cercanas, Coronel Suárez y Bordenave (Tabla IV). Una de las razones que

pudo contribuir a este resultado se asocia al relieve. Analizando un Modelo de Elevación Digital y las curvas de nivel en esa zona (datos no mostrados), las Sierras de la Ventana irrumpen de manera algo abrupta la homogeneidad de las alturas de la región (Fig. 2). Desde su punto más alto, el sistema orográfico disminuye su altura en dirección noroeste, primero a lo largo de la Sierra de Cura Malal para cambiar luego su orientación hacia el oeste, atravesando la Sierra de Pigüé, y terminar desapareciendo algunos kilómetros más adelante. En las proximidades de la zona donde el sistema cambia su dirección al oeste, se localiza la estación de Pigüé (304 m.s.n.m) que se recuesta sobre la débil pendiente con orientación al norte de la sierra homónima. La altura de la estación supera por más de 60 m a las más próximas, Coronel Suárez (234 m.s.n.m.) y Bordenave (212 m.s.n.m) que distan de Pigüé 45 y 62 km., respectivamente. Tanto Coronel Suárez como Bordenave se hallan en zonas donde la influencia del sistema orográfico de Ventania (pendiente del terreno y orientación de la misma) es mucho menor a la observada en Pigüé. Es de esperar que la mayor irregularidad y mayor altura del terreno en Pigüé conduzcan a que el área de influencia sea la menor entre las observadas en esa zona. Además, es posible suponer que una de las causas que pudo contribuir a esto sea también la distancia relativamente pequeña entre las tres estaciones. Presumiblemente, de haber existido mayor distancia entre ellas, el área de influencia de Pigüé podría haber resultado mayor.

4.3 Mapas de riesgo

En el último paso de la aplicación de la metodología propuesta por François y otros (1999) se obtuvieron los mapas de riesgo. En el presente trabajo se decidió calcular mapas riesgo para la segunda mitad del mes de octubre. Esta elección se hizo en función de la importancia que en dicho período del mes tienen las temperaturas extremas frías para el desarrollo del trigo en la región, el cual se halla para entonces en la fase de formación de espigas e inicio de la floración (Hugo Conti, comunicación personal). En dicha etapa, temperaturas de -1°C marcan el umbral a partir del cual la planta puede sufrir daños (Snyder y de Melo-Abreu 2005).

Se calcularon dos tipos de mapas de riesgo para la segunda mitad de octubre. En el primero se

tomó el valor mínimo absoluto observado en ese período del mes para cada estación meteorológica de la región entre 1961 y 2004. A partir de las relaciones lineales obtenidas en los dos pasos anteriores, se pudieron obtener valores mínimos extremos de temperatura a nivel de abrigo meteorológico a escala de píxel ($1,09 \text{ km}^2$) en el área de influencia de cada estación (Fig. 6).

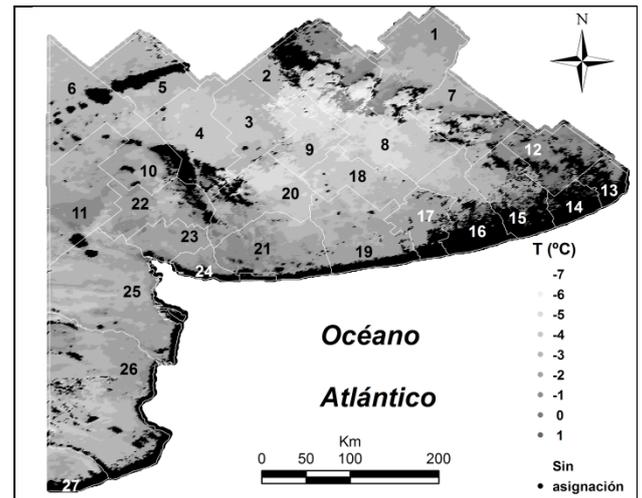


Fig. 6: Mapa de temperatura mínima extrema absoluta a escala de píxel ($1,09 \text{ km}^2$) para la segunda mitad de octubre en base a datos del período 1961-2004. Las áreas en color negro (sin asignación) son aquellas en las cuales se obtuvo un $r < 0,84$ e indican las zonas que no se asocian a ninguna estación meteorológica de superficie.

El mapa resultante (Fig. 6) muestra que las zonas con mayor riesgo de tener los valores mínimos absolutos de temperatura en la segunda mitad de octubre son, en general, zonas alejadas del Océano Atlántico, hacia el centro y norte de la región (Tabla V). Sin embargo, se observa que casi no hay zonas que se encuentren libres del riesgo de ocurrencia de temperaturas mínimas absolutas inferiores a 0°C .

Un segundo mapa fue obtenido a partir de las temperaturas mínimas extremas de cada año (1961-2004) en cada una de las 13 estaciones para la segunda mitad del mes de octubre. Cada una de esas temperaturas fue utilizada para obtener los valores de temperaturas mínimas extremas de cada año a nivel de abrigo meteorológico, a escala de píxel, en el área de influencia de cada estación (Fig. 5). El promedio obtenido en cada píxel dio origen a un mapa de temperaturas mínimas extremas promedio para

la segunda mitad de octubre (Fig. 7). En este mapa la región más fría se encontró ubicada principalmente hacia el centro-norte de la región, aunque con algunas diferencias con respecto al mapa de la Fig. 6.

Nº	Partido	Nº	Partido
1	Azul	15	Lobería
2	Olavarría	16	Necochea
3	Gral. Lamadrid	17	San Cayetano
4	Cnel. Suárez	18	Adolfo G. Chaves
5	Guaminí	19	Tres Arroyos
6	Adolfo Alsina	20	Cnel. Pringles
7	Tandil	21	Cnel. Dorrego
8	Benito Juárez	22	Tornquist
9	Laprida	23	Bahía Blanca
10	Saavedra	24	Cnel. Rosales
11	Puán	25	Villarino
12	Balcarce	26	Patagones
13	Gral. Pueyrredón	27	Adolfo Alsina (Río Negro)
14	Gral. Alvarado		

Tabla V: Partidos de la provincia de Buenos Aires y Río Negro en la región de estudio. Los números corresponden a los que se encuentran en los mapas de las figuras 5 y 6.

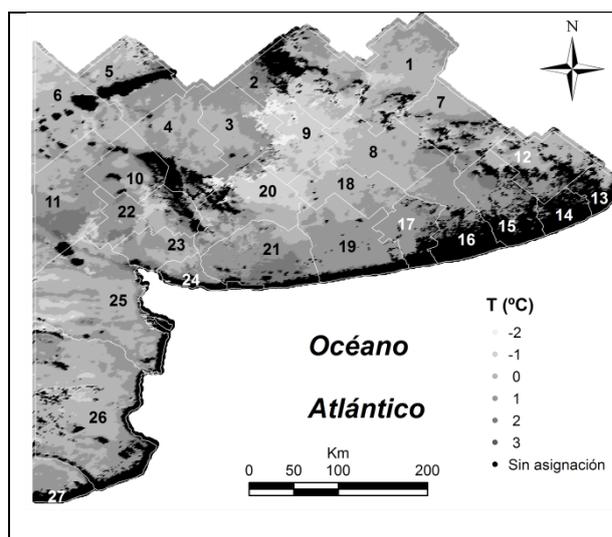


Fig. 7: Mapa de temperatura mínima extrema promedio a escala de píxel (1,09 km²) para la segunda mitad de octubre en base a datos del período 1961-2004.

Temperatura (°C)	Número de píxeles	%
(-3;-2]	755	0,6
(-2;-1]	10.381	8,4
(-1; 0]	43.939	35,3
(0; 1]	42.473	34,1
(1; 2]	8.138	6,6
(2; 3]	705	0,6
Sin asignación	17.960	14,4
Total	124.351	100,0

Tabla VI: Número de píxeles y temperaturas mínimas extremas promedio para la segunda mitad de octubre en base al período 1961-2004. La categoría "Sin asignación" corresponde a los píxeles para los cuales, hallándose dentro de la región, no se encontró asociación con ninguna estación de superficie.

Las temperaturas mínimas extremas medias inferiores a -1°C abarcan el 9,0% del área total y el 10,4% si se excluyen las zonas que no tuvieron asociación con ninguna estación de superficie (Tabla VI).

Si se considera que la planta de trigo se encuentra a una altura inferior a la altura del abrigo meteorológico y que durante las noches en las que ocurren las heladas puede observarse una diferencia de temperatura entre la planta y la medición en abrigo no inferior a 1°C (más frío a nivel de la planta), se puede considerar que el umbral de 0°C en abrigo sería el umbral a partir del cual la planta podría sufrir daños. Así, el área con temperaturas mínimas extremas promedio inferiores a 0°C cubre el 44,3% de la región (Tabla VI). La generación de mapas de riesgo en períodos más cortos a un mes fue una observación ya planteada por François y otros (1999).

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se calcularon mapas de riesgo para temperaturas extremas frías para el sur de la provincia de Buenos Aires utilizando la metodología propuesta por François y otros (1999). Se construyeron funciones espaciales derivadas de la relación observada entre las temperaturas mínimas de estaciones meteorológicas y las temperaturas de superficie. Estas últimas fueron obtenidas a partir de imágenes de satélite en horarios previos y cercanos a la salida del sol. Los mapas de riesgo, en este caso en particular, fueron calculados para el trigo para la segunda mitad del mes de

octubre. Esta elección obedeció a la importancia que tiene el cultivo en la región y por ser dicho período el más sensible en relación a su estado fenológico. El primer mapa determinó la temperatura mínima extrema absoluta y el segundo mapa determinó la temperatura mínima extrema promedio, ambos a escala de píxel (1,09 km²) en base a datos del período 1961-2004. En los dos mapas la mayor parte de los píxeles (85,6 % del total) pudieron ser relacionados a la temperatura mínima de una estación meteorológica del área con un buen grado de asociación medido a través del coeficiente de correlación ($r > 0,84$). A partir de este análisis se pudo concluir que el área con temperaturas mínimas extremas promedio que pueden ser perjudiciales para el cultivo de trigo ($T < 0^{\circ}\text{C}$ en abrigo meteorológico) es importante ya que cubre el 44,3% de la región.

Estos mapas pueden ser utilizados tanto por el sector público como privado para una correcta planificación y manejo de fechas de implantación y el uso de variedades de trigo menos susceptibles en áreas con mayor riesgo. El empleo de esta metodología resulta de gran utilidad para ser aplicada, tanto al trigo como a otros cultivos o frutales, sea que se elija esta misma región o cualquier otra que se considere de interés.

REFERENCIAS

Caselles, V., Sobrino, J. y Melia, J., 1988. Fundamentos físicos de la medida de la temperatura de la superficie del suelo por teledetección. *Revista Española de Física*, 2, 3: 42-46.

Coll, C. y Caselles, V., 1997. A split-window algorithm for land surface temperature from advanced very high resolution radiometer data: Validation and algorithm comparison.

Journal of Geophysical Research, 102, 16697-16713.

De Ruyver, R., Oricchio, P. y Di Bella, C., 2006. Estudio de las heladas invernales de 2005 en Argentina a partir de imágenes NOAA. Congreso Argentino de Agrometeorología. La Plata, Bs. As., Argentina.

Di Bella, C., Oricchio P., Conti, H. y Rebella, C., 1997. Utilización de imágenes satelitales para la zonificación de heladas en la provincia de Entre Ríos, Argentina. *Revista Brasileira de Agrometeorología*, 5, 2: 269-274.

François, C, Bosseno, R., Vacher, J.J. y Seguin, B., 1999. Frost risk mapping derived from satellite and surface data over the Bolivian Altiplano. *Agricultural and Forest Meteorology*, 95, 113-137.

MAGYP. 2011. Series y Estadísticas. Agricultura. Producción Agrícola. Estimaciones Agrícolas 2007. (14 de marzo de 2011; [http: www.sia.gov.ar](http://www.sia.gov.ar))

Parra, J., Sobrino, J. y Morales, L., 2006. Aplicación de un algoritmo de split-window para la estimación de la temperatura de la superficie terrestre desde datos AVHRR-NOAA. *Agric. Tec.* 66, 4: 385-392.

Saunders, R. y Kriebel, K., 1988. An improved method for detecting clear sky and cloudy radiances from AVHRR data. *Int. J. Remote Sensing.* 9, 1: 123-150.

Snyder, R. y de Melo-Abreu, J.P., 2005. Frost protection: fundamentals, practice, and economics. *Environment and Natural Resources Series 10*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Rome. 1, 223.

Sobrino, J., Caselles, V. y Coll, C., 1993. Theoretical split window algorithms for determining the actual surface temperature. II *Nuovo Cim.* 16, 219-236.

NORMAS PARA LA PRESENTACIÓN DE ARTÍCULOS

Los trabajos enviados a Meteorologica no deberán haber sido publicados anteriormente ni enviados a otras revistas para su evaluación en forma simultánea.

La revista cuenta con las secciones, “Artículos” y “Notas y Correspondencia”.

- **Artículos:** son trabajos de investigación completos dentro de la temática general de Meteorologica.
- **Notas:** incluye descripciones breves de técnicas, métodos, datos o contribuciones cortas que merezcan su pronta difusión.
- **Correspondencia:** contiene comentarios y discusión de artículos publicados en volúmenes anteriores y estará acompañada por la respuesta del o los autores.

En todos los casos los autores deberán respetar las siguientes normas:

Los trabajos deberán ser remitidos a la revista por correo electrónico a meteorologica@at.fcen.uba.ar acompañados de una carta de presentación incluyendo el nombre y dirección electrónica del/los autor/es y la sección de la Revista (Artículos, Notas y Correspondencia) a la cual el autor considera más apropiado enviarlas. Los autores podrán sugerir tres revisores potenciales.

Los artículos deberán estar escritos en idioma español o inglés, se recomienda una redacción concisa, simple y coherente a lo largo de todo su desarrollo.

El texto deberá ser transcripto con un procesador de texto, preferentemente Microsoft Office Word 2003 o superior. El trabajo deberá escribirse en una columna, interlineado 1.5, con el tipo de letra Times New Roman de tamaño de 11 caracteres por pulgada.

El trabajo deberá incluir el encabezamiento, los resúmenes y a continuación el cuerpo del trabajo que siempre que sea posible, deberá estar organizado con la siguiente estructura: Introducción, Datos y Métodos, Resultados, Conclusiones, Agradecimientos, Referencias Bibliográficas. Estas secciones deberán estar numeradas correlativamente.

El **encabezamiento** incluirá: a) título del trabajo en mayúscula, b) nombres y apellidos de los autores, c) organismo, institución o entidad a las que pertenecen cada uno de los autores y lugar (ciudad y país), d) dirección electrónica del autor al cuál se deberán dirigir los editores de la Revista.

El trabajo incluirá un **resumen** en español y otro en inglés, este último precedido por el título del trabajo en inglés. Los mismos deberán ser concisos y su extensión máxima será de 200 palabras cada uno. A continuación del resumen (abstract), agregar no más de cinco Palabras clave (Keywords), en español y en inglés, respectivamente.

Las **Figuras, Mapas, Ilustraciones y Tablas** deberán incluirse al final del texto en hojas separadas. Las mismas se mencionarán en el texto, asignándole un número arábigo, excepto las tablas que se numerarán con números romanos. Cada una de ellas deberá contener un texto explicativo (leyenda). Cuando sean reproducciones de otros trabajos publicados anteriormente deberá especificarse la referencia correspondiente y contar con la autorización para reproducir las figuras. La versión final de las figuras, imágenes y fotos deberá tener una resolución de al menos 600dpi.

Las **Fórmulas y Símbolos** se escribirán con claridad. Cuando el número de expresiones matemáticas lo requiera, se numerarán correlativamente, con números arábigos entre corchetes sobre el costado derecho. Se utilizará preferentemente el Sistema Internacional de Medidas. Se deberá emplear coma para indicar las fracciones decimales y punto para las unidades de mil. Ej.: 3,24; 3.900. Se recomienda la utilización de notación científica.

Las **siglas** pueden usarse para no repetir nombres extensos de instituciones, proyectos, etc., pero la primera mención será con el nombre completo y a continuación, entre paréntesis, la sigla correspondiente en mayúsculas y sin puntos entre letras.

Ante cualquier duda por la escritura de palabras o reglas de acentuación el autor deberá tener en cuenta las últimas disposiciones de la Real Academia Española de Letras.

Los **Agradecimientos** se incluirán a continuación de la última sección del texto al margen sin numerar, precedidos por el título "Agradecimientos".

Los **Anexos o Tablas de símbolos y constantes**, si los hubiese, se colocarán antes de las referencias, sin numerar y precedidos del título "ANEXOS".

Las **citas** en el texto señalarán entre paréntesis el apellido del autor o autores y el año correspondiente al trabajo. Si el apellido del autor forma parte de una frase, sólo se colocará entre paréntesis el año de publicación. La forma de cita en el texto dependerá del número de autores de acuerdo con los siguientes ejemplos: ...Matsuno (1970)..., o (Matsuno 1970); dos autores: ...(Hoskins y Karoly 1981); más de dos autores ...(Paegle y otros 1983a); varias citas simultáneas ordenadas cronológicamente: ...(Matsuno 1970, Paegle y otros 1983a).

Las **referencias** se presentarán al final del texto del artículo bajo el título "REFERENCIAS", sin numerar, ordenadas alfabéticamente por el apellido del primer autor. Cuando los trabajos incluyan más de un autor, siendo el primer autor el mismo, se ordenarán alfabéticamente de acuerdo con el apellido de los demás autores. Las referencias de un mismo autor se ordenarán cronológicamente y, si hay varias para un mismo año, se agregará a continuación del año letras minúsculas en orden alfabético (... 1991a,... 1991b,...).

-Libros: Se indicará el apellido e iniciales de los nombres de los autores, año de la publicación, título del libro, volumen, editor, edición, editorial y número de páginas. Para el caso de libros que reúnen trabajos de distintos autores, se indicará el título del artículo o capítulo antes de citar el título del libro.

Ejemplo:

Pasquill A.S y Smith F.B., 1983. Atmospheric diffusion. Third Ed., Ellis Horwood Ltd. 437 págs.

Thom A.S., 1975. Momentum, mass and heat exchange of plant communities. Vegetation and the atmosphere. Vol.I, J.L. Monteith Ed., Academic Press, 57-109.

-Revistas y publicaciones: Se indicará el apellido e iniciales de los nombres de los autores, año de publicación, título completo del trabajo, nombre de la revista, volumen, número y páginas.

Ejemplo:

Bohren C.F. y Battan L.J., 1982. Radar backscattering of microwaves by spongy ice spheres. J. Atmos. Sci., 39, 4, 2623-2628.

Thom A.S., 1975. Momentum, mass and heat Exchange of plant communities. Vegetation and the atmosphere. Vol.I, J.L. Monteith Ed., Academic Press, 57-109.

Meteorología

CENTRO ARGENTINO DE METEORÓLOGOS COMISIÓN DIRECTIVA

PRESIDENTE:	Juan Manuel Hörler
VICEPRESIDENTE:	Alberto L. Flores
SECRETARIA:	Marcela González
PROSECRETARIA:	Mariana Barrucand
TESORERA:	Josefina Blázquez
PROTESORERA:	Marcela Torres Brizuela
VOCALES	
TITULARES:	Ramiro Saurral Matías Bertolotti Lorena Ferreira
SUPLENTE:	Luciano Vidal Vanina Ferrero

TRIBUNAL DE HONOR	
TITULARES:	María Luisa Atinger María Luz Duarte Inés Velasco Ernesto Crivelli
SUPLENTE:	Mónica Marino Beatriz Scian

COMISIÓN REVISORA DE CUENTAS	
	Norma Possía Maria Isabel Gassmann

CENTRO ARGENTINO DE METEORÓLOGOS
CIUDAD UNIVERSITARIA
PABELLÓN II - PISO 2
C1428EHA BUENOS AIRES. ARGENTINA
Tel/Fax: +54-11 4783-4224
e-mail: meteorologica@at.fcen.uba.ar
web: www.cenamet.org.ar/cam/meteorologica

Meteorología

Versión en línea ISSN 1850-468X



**ESTE NÚMERO HA SIDO PARCIALMENTE FINANCIADO POR EL
CENTRO ARGENTINO DE METEORÓLOGOS**