

Meteoro logica

PUBLICACIÓN ESPECIALIZADA
EN TEMAS METEOROLÓGICOS

Versión en línea
Versión en CD-ROM

ISSN 1850-468X
ISSN 2347-0364

Volumen 39

Número 1

Año 2014

CONTENIDO:

- Alberto Ismael Juan Vich, Federico Augusto Norte y Carolina Lauro*
ANÁLISIS REGIONAL DE FRECUENCIAS DE CAUDALES DE RÍOS PERTENECIENTES A CUENCAS CON NACIENTES EN LA CORDILLERA DE LOS ANDES 3
- Adelia Perla Alessandro*
VARIABLES METEOROLÓGICAS Y SU INCIDENCIA EN ENFERMEDADES RESPIRATORIAS DE NIÑOS EN EL GRAN BUENOS AIRES 27
- Gonzalo Díaz, Moira Doyle y Armando Brizuela*
CALIBRACIÓN DE UN MODELO HIDROLÓGICO UNIDIMENSIONAL PARA LAS ESTACIONES DE DIAMANTE Y PARANÁ, ENTRE RÍOS 41
- Notas y Correspondencia
- Norma Possia, Bibiana Cerne y Claudia Campetella*
DESCRIPCIÓN DE LAS VARIACIONES HORARIAS MEDIAS DE PRESIÓN EN LA ARGENTINA Y SU INFLUENCIA EN LOS SISTEMAS BÁRICOS 59

Meteoro logica

PUBLICACIÓN SEMESTRAL DEL CENTRO ARGENTINO DE METEORÓLOGOS

DIRECTORA

YANINA GARCÍA SKABAR. SMN/CONICET, UMI3351-IFAECI/CNRS-CONICET-UBA

EDITORES EJECUTIVOS

ANDREA FABIANA CARRIL. CIMA/CONICET-UBA, UMI3351-IFAECI/CNRS-CONICET-UBA

MARIANA BARRUCAND. UBA/CONICET

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

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, en la biblioteca electrónica de Scielo, en la base de datos EBSCO, SHERPA/ROMEO y DOAJ.



Forma parte del Núcleo Básico de Revistas Científicas Argentinas



Meteorologica por Centro Argentino de Meteorólogos se encuentra bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 3.0 Unported.

©2014 Centro Argentino de Meteorólogos. Propietario

Intendente Güiraldes 2160

Ciudad Universitaria, Pabellón II, 2ºPiso

C1428EHA Buenos Aires, Argentina

Queda hecho el depósito legal que marca la ley 11723.

Registro de la Propiedad Intelectual 5133810.

ISSN: Versión en línea 1850-468X Versión en CD-ROM 2347-0364

Editorial

Estimados lectores, tenemos el agrado de presentar un nuevo volumen de la revista Meteorologica, el cual incluye cinco artículos y tres notas que presentan resultados de trabajos en áreas relacionadas con las ciencias de la atmósfera. En particular en este volumen se presentan distintas aplicaciones en la región en el área hidrológica, de la salud y agropecuaria.

Seguimos trabajando con el fin de jerarquizar nuestra revista y a la vez darle una mayor visibilidad. Una de las noticias destacadas es que el Comité Científico Asesor del CONICET ha confirmado a Meteorologica dentro del Núcleo Básico de Revistas Científicas para el período agosto 2013-julio 2015. El Núcleo Básico de Revistas Científicas Argentinas es un proyecto del CONICET que establece un conjunto de publicaciones científicas y tecnológicas argentinas en los distintos campos del conocimiento que son sometidas a una evaluación exhaustiva con criterios únicos definidos de calidad y trascendencia. La inclusión de la revista dentro del Núcleo Básico constituye una garantía de la excelencia de la publicación y permite acceder sin otra evaluación al Portal SciELO Argentina, donde se pueden encontrar todos los artículos publicados en Meteorologica desde el año 2004 (<http://www.Scielo.org.ar>). Asimismo, desde la página web de la revista (www.cenamet.org.ar) se puede acceder a los últimos volúmenes y también a los trabajos aceptados. De esta manera, los autores pueden referenciar sus trabajos y citar el link correspondiente mientras éstos se encuentran en proceso de edición.

Meteorologica reafirma su compromiso de propiciar el derecho a la información científica, en texto completo y acceso libre y gratuito. Con tal fin se adoptó para Meteorologica una licencia Creative Commons no comercial y se realizaron cambios en el copyright de acuerdo a las políticas de acceso abierto a la información científica. Por otro lado continuando con la política de difusión de la revista, Meteorologica fue subscripta a la base de datos EBSCOhost y estamos comenzado las gestiones tendientes a incorporar a Meteorologica dentro de la base SCOPUS. Finalmente, destacamos que estamos siendo evaluados por Thompson y Reuters, para la potencial inclusión de Meteorologica dentro del Citation Index.

Una vez más 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

ANÁLISIS REGIONAL DE FRECUENCIAS DE CAUDALES DE RIOS PERTENECIENTES A CUENCAS CON NACIENTES EN LA CORDILLERA DE LOS ANDES

Alberto Ismael Juan Vich^{1,2}, Federico Augusto Norte¹ y Carolina Lauro¹

¹Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA-CONICET), Av. Adrián Ruiz Leal s/n, Parque General San Martín, 5500 Mendoza, Argentina

²Instituto de Estudios del Ambiente y Recursos Naturales, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad Nacional de Cuyo, Centro Universitario, Parque General San Martín, 5500 Mendoza, Argentina.

(Manuscrito recibido el 10 de diciembre de 2012, en su versión final el 16 de agosto de 2013)

RESUMEN

El objetivo es determinar la magnitud del caudal anual y estacional, para periodos de retorno mucho mayores que los observados y obtener el cuantil correspondiente en sitios sin información, a partir del Análisis Regional de Frecuencias basadas en la estadística de momentos L ($ARF - LM$).

El área de estudio abarca las cuencas cordilleranas desde el río Bermejo hasta el río Santa Cruz. Los sitios analizados fueron 32 y se determinaron 5 variables: caudal anual ($Q_{año}$) y caudales estacionales: invierno Q_I (julio, agosto, setiembre), primavera Q_P (octubre, noviembre, diciembre), verano Q_V (enero, febrero, marzo) y otoño Q_O (abril, mayo, junio), a partir del caudal medio diario observado.

Se verificaron las condiciones de independencia, aleatoriedad, normalidad y homogeneidad. La normalidad es rechazada en el 60% de los casos, particularmente en los caudales de verano y otoño; la ausencia de independencia y aleatoriedad ocurre en el 34% de las series analizadas, destacándose el caudal de invierno y otoño, para un nivel de significancia de $\alpha = 5\%$. Los ríos Los Patos, San Juan, Las Cuevas, Diamante, Atuel, Grande, Valenzuela, Poti Malal, Neuquén y Santa Cruz no mostraron tendencias significativas en ninguna de las variables. Se detectaron tendencia creciente significativa en variables y sitios del noroeste y centro-oeste argentino y tendencia decreciente en variables y sitios de Los Andes patagónicos. Los caudales $Q_{año}$, Q_I y Q_V muestran cambios abruptos en el 65% de los casos, el Q_P , en un 44%. El salto en los valores medios generalmente se produce en la década del 70.

Se identificaron las regiones homogéneas para las 5 variables analizadas. La homogeneidad se verificó mediante pruebas de Discordancia y Heterogeneidad y la adopción de la distribución de mejor ajuste por medio de la medida Z^{DIST} y PUM_T . Las distribuciones empleadas son: Generalizada de Valores Extremos, Logística Generalizada, Generalizada Normal, Normal, Gumbel, Pareto Generalizada, Exponencial y Pearson III. En todos los casos, la región homogénea encontrada incluye solamente estaciones de Los Andes Centrales sur, desde el río Tunuyan al Colorado. La función Pearson III y Gumbel, son las que presentan el mejor ajuste.

Palabras clave: Los Andes, análisis regional de frecuencias, caudal anual, caudal estacional.

REGIONAL FLOW FREQUENCY ANALYSIS OF RIVER BASIN WITH HEADWATERS AT THE ANDES CORDILLERA

ABSTRACT

The aim is to determine the magnitude of flow variables for return periods much longer than the observed and to obtain the correspondent quantil for sites with scarce data using a Regional Frequency Analysis approach based on $L - moment$ statistics ($ARF - LM$). The area under analysis comprises mountain basins between the Bermejo and the Santa Cruz rivers.

Thirty-two gauging stations were analyzed and five variables were determined: annual flow ($Q_{año}$) and seasonal flows: winter Q_I (july, august, september), spring Q_P (october, november, december), summer Q_V (january, february, march) and autumn Q_O (april, may, june), from the average daily flow observed.

Independence, randomness, normalcy, and homogeneity conditions were verified. Normalcy is rejected in 60% of the cases, summer and autumn flows being the variables with the least degree of normalcy. Lack of both independence and randomness occurs in 34% of the series analyzed, notably the winter and autumn flows with a level of significance of 5%.

The Los Patos, San Juan, Cuevas, Diamante, Atuel, Grande, Valenzuela, Poti Malal, Neuquén and Santa Cruz rivers did not show any significant trends in the variables analyzed.

A statistically significant increasing trend was detected in some variables and locations of northwestern and central-western of Argentina while a decreasing trend was observed in some variables and locations in the Patagonian Andes. Flows $Q_{año}$, Q_I and Q_V show abrupt changes in over 65% of the cases while Q_P only in 44%. In general, the jump in mean values took place in the 1970s.

A homogeneous region was identified for each of the five variables. Homogeneity was verified by means of discordance and heterogeneity tests and the best-fit distribution through Z^{DIST} and PUM_T measures. The distributions used were: generalized extreme values, generalized logistic, generalized normal, normal, Gumbel, generalized Pareto, exponential, and Pearson III. In all cases the homogeneous region includes only stations in the southern Central Andes, from the Tunuyan to the Colorado river. The Pearson III and Gumbel distributions exhibit the best fit.

Keywords: Los Andes, regional frequency analysis, annual flow, seasonal flow.

1. INTRODUCCIÓN

La Argentina, a pesar de la importante oferta global de agua que exhibe, presenta grandes desbalances entre la demanda y la oferta natural y sufre las consecuencias de la ocurrencia de fenómenos extremos (crecientes y sequías) cada vez más frecuentes en las últimas décadas (Camilloni y Barros, 2003; Llano y Penalba, 2010; Paoli y Malinow, 2010). Todo ello, afecta de manera severa las actividades agrícolas, ganaderas, industriales y de la sociedad en general, particularmente en el centro oeste, noroeste argentino y producción energética en Patagonia. Como resulta obvio, se trata de un recurso escaso, indispensable para la vida y un elemento esencial para el desarrollo, que es necesario evaluar y utilizar en forma cuidadosa.

Globalmente Argentina dispone de una oferta hídrica media anual de 23.000 m³ hab⁻¹, pero una distribución muy irregular, ya que numerosas provincias de la región árida y semiárida se ubican muy por debajo del nivel crítico de stress hídrico propuesto por el PNUD. Además, a la variación estacional muy marcada, se le suma una alta variabilidad interanual, que en muchos casos es incrementada por fenómenos climáticos globales o inducidas por la actividad humana (Calcagno y otros, 2000; Camilloni y Barros, 2003; Llano y Penalba, 2010).

El conocimiento del potencial hídrico superficial se realiza a partir de la elaboración y evaluación de la información hidrológica disponible, proveniente de una red de estaciones existentes. Tarea sumamente laboriosa, que solo puede ser realizada con precisión y eficiencia si los antecedentes son suficientemente detallados. Previamente se debe realizar un análisis exploratorio de los datos (AED) y verificar la consistencia de las series hidrológicas.

El comportamiento de las series de variables hidrológicas se describe con la ayuda de funciones de distribución de probabilidades. El análisis de frecuencias es un conjunto de procedimientos utilizados para predecir el

comportamiento futuro de la variable en un sitio particular, a partir de la información histórica existente; es decir, relacionar su magnitud con la frecuencia de ocurrencia o su periodo de retorno T asociado (Kite, 1977), o mejor aún, es estimar la función probabilística completa (Hosking y Wallis, 1997).

La determinación de la probabilidad de ocurrencia de una variable hidrológica, así como la de cualquier otro tipo de variable ambiental registrada cronológicamente, es abordada mediante la hidrología probabilística. Sin embargo, las características del área bajo estudio, con gran variabilidad temporal y espacial de ellas, la influencia de factores externos de variabilidad y la reducida disponibilidad de registros de adecuada extensión, imponen ciertas restricciones en la elección del modelo probabilístico más adecuado. En este contexto, el presente trabajo tiene como objeto determinar la magnitud de las variables de caudal (anual Q_{año}, de verano Q_V, de otoño Q_O, de invierno Q_I y de primavera Q_P), para diferentes periodos de retorno, especialmente a niveles mucho mayores que los observados en el pasado y obtener un cuantil en sitios sin información, a partir de la aplicación de la metodología de Análisis Regional de Frecuencias basadas en la estadística de momentos L (ARF-LM). Dicho procedimiento permite superar las restricciones mencionadas y aumentar la confiabilidad en la estimación de las probabilidades de ocurrencia de las variables. Es considerado como una de las mejores alternativas para abordar los impedimentos mencionados.

2. DATOS Y METODOLOGÍA

2.1. Área de estudio: clima y características físicas

La cordillera de Los Andes, contornea la costa del océano Pacífico a lo largo de 7500 km. Se extiende desde Panamá, a los 11° de latitud N, hasta su extremo meridional a los 56° de latitud S, donde se hunde en el Atlántico, al

este de la isla de los Estados (Argentina). Se formó a finales del Cretácico tardío, por el movimiento de subducción de la placa de Nazca debajo de la placa Sudamericana. Las fuerzas tectónicas que se generaron por esta colisión han configurado el relieve actual, formando elevadas montañas, extensos altiplanos (puna), profundos valles longitudinales y valles transversales en Argentina y Chile (Leanza, 1972).

Los Andes regulan el paso de masas de aire que provienen de los centros de alta presión del océano Atlántico y el océano Pacífico y configuran el régimen fluvial de los ríos que se originan en sus laderas (Prohaska, 1976). La zona bajo estudio, se corresponde con las cuencas que se localizan sobre la vertiente oriental de Los Andes, serranías del noroeste argentino y Patagonia, en un amplio gradiente latitudinal que se extiende prácticamente a lo largo del territorio nacional.

La Diagonal Árida (Figura 1) que atraviesa el continente sudamericano desde el norte del Perú hasta las costas patagónicas, podría considerarse como el límite de las influencias de los anticiclones semipermanentes de los océanos Atlántico y Pacífico sobre Los Andes. Es una franja del territorio sudamericano de escasas precipitaciones (Gonzalez Loyarte, 1995). Representa el máximo alcance de los climas de tipo quasi-monzónico (océano Atlántico) y mediterráneo (océano Pacífico) sobre las laderas oriental y occidental de la cordillera, respectivamente. Presenta fluctuaciones estacionales, anuales y de largo plazo, que responden, entre otros factores, a las variaciones latitudinales en los campos de presión en América del Sur. En los meses de diciembre a febrero, la influencia del océano Atlántico es máxima sobre la vertiente este de Los Andes, desde los 22 a 35° de latitud S, mientras que la influencia del océano Pacífico es máxima en el invierno. Esta dinámica atmosférica da origen a diferentes regímenes de precipitación. Al norte de los 28° S, el régimen de precipitación es quasi-monzónico y presenta un máximo de lluvias entre diciembre

y febrero, donde se concentra más del 50% del total anual (Minetti y Vargas, 1997). En la Cordillera Principal o del Límite, la precipitación en alta montaña es mayormente originada por el anticiclón del Pacífico y se concentra en los meses de mayo a agosto. En la Patagonia el régimen de precipitación es de tipo mediterráneo, posee el mismo origen, concentradas en invierno y con veranos secos. Al sur de los 45° S a 47° S, la precipitación es predominantemente producida por el anticiclón del océano Pacífico y uniformemente distribuida en el año (Miller, 1976; Prohaska, 1976).

Las distintas cuencas cordilleranas, desde el río Bermejo hasta el río Santa Cruz, localizadas a lo largo del territorio continental argentino, exhiben características físicas y ambientales muy diversas, que someramente se describen a continuación (SSRH, 2010). El río Bermejo, presenta una importante cuenca que se desarrolla en Bolivia y Argentina. Las nacientes se encuentran en los contrafuertes de la Cordillera Oriental y Sierras Subandinas. Colecta los excedentes hídricos del frente cordillerano comprendido entre los 21° y 25° S. Presenta intensos procesos erosivos y fuertes crecidas estivales. La estacionalidad e intensidad de las precipitaciones en la alta cuenca, los suelos desprovistos de vegetación y relieve acentuado influyen sobre el grado de erosión.

Las Sierras Pampeanas, reciben sobre la vertiente oriental, valores de precipitación superior a 1800 mm al año. En el arco serrano comprendido entre los 26° y 28° S, con alturas de hasta 5000 msnm, se origina la cuenca endorreica Salí-Dulce, que descarga en el sistema lagunar de Mar Chiquita. Las nacientes presentan una red imbrífera muy densa, con importantes caudales y marcada estacionalidad; el río Las Cañas es una corriente representativa de esta región.

El centro oeste de Argentina, comprendido entre los 28° y 33° S es drenado por el extenso sistema hidrográfico del río Desaguadero-Salado-Chadileuvú o

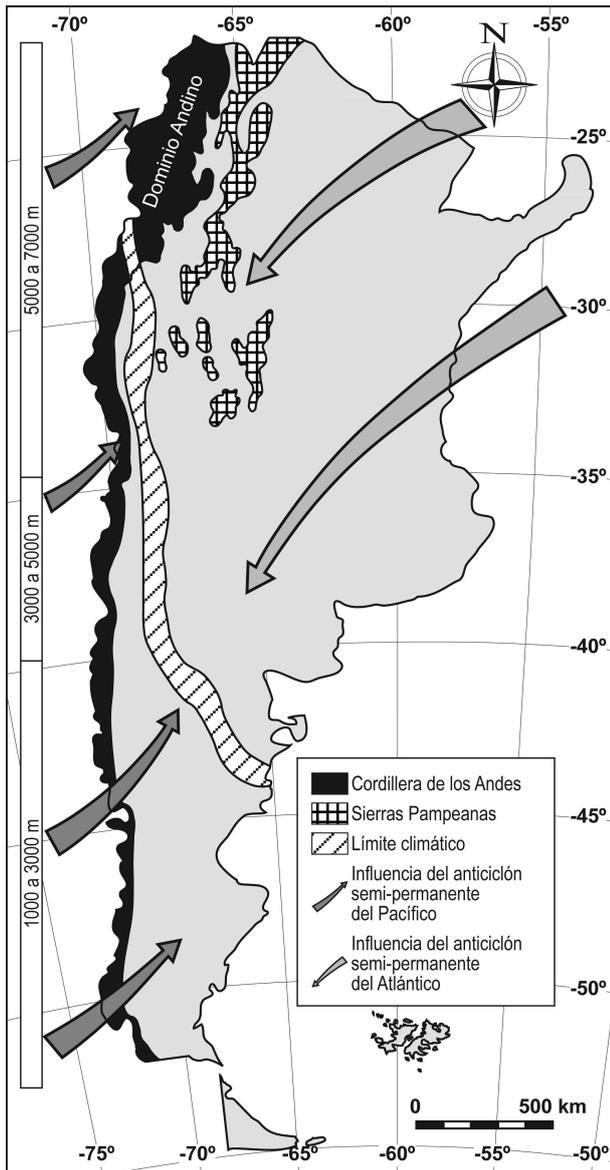


Figura 1: Diagonal árida en el territorio argentino. Influencia atlánticas y pacífica sobre Los Andes en territorio argentino.

Curacó (Marzo e Inchaupé, 1967). De norte a sur está integrado por los ríos Bermejo de La Rioja, Jáchal, San Juan (su principal afluente es el río Los Patos), Mendoza (formado por la confluencia de los ríos Cuevas y Tupungato, inmediatamente hacia aguas abajo recibe el río Vacas), Tunuyan, Diamante y Atuel, que poseen nacientes en la Cordillera Frontal, Precordillera y Cordillera Principal. Todos ellos al abandonar las últimas elevaciones se transforman en ríos

alóctonos. En la llanura, pierden su caudal por infiltración o son aprovechados íntegramente para riego. Debido a la latitud y elevación del sistema montañoso, la Cordillera Frontal y Principal presenta una importante superficie cubierta de glaciares y las aguas de los ríos cuyanos provienen de la ablación glaciaria y la fusión nival. Inserta en el sector suroeste del sistema Desaguadero, se encuentra la cuenca endorreica bañados del Llanquanelo y se encuentra el río Pincheira, el afluente más importante del río Malargüe, principal inmisario de los bañados. El río Pincheira, es representativo de este sector geográfico y se caracteriza por ser un río de una gran riqueza hídrica.

El Colorado es un río alóctono, formado al confluir el río Grande y Barrancas, drena la región de la Cordillera Principal comprendida entre los 35° y 37° S, sobre un frente de 270 km de largo. En su curso medio, recibe temporariamente los escasísimos caudales del Desaguadero-Chadileuvú-Curacó. El río Grande es el más caudaloso de todos los ríos andinos de la región cuyana y sus afluentes más importantes son los ríos Valenzuela, Chico y Poti Malal.

El río Negro formado por dos grandes colectores como el Limay y Neuquén. Recoge las aguas pluviales, de fusión nival y glaciaria de un importante frente cordillerano, que se desarrolla entre los 37° y los 41° S sobre la Cordillera Patagónica y sistema serrano Patagónides. La red de drenaje del Limay es compleja, con 40 lagos de origen glaciario, de extensión y profundidad notable. El río Neuquén se diferencia del Limay por no presentar cuencas lacustres y un régimen de precipitaciones, que acusa una disminución notable y que tiende a ser más estacional.

La cuenca del río Chubut se extiende entre los 41° y 44° S. En sus nacientes recibe numerosos tributarios del sistema serrano Patagónides; aguas abajo se transforma en un río alóctono que se desplaza a través de la meseta patagónica.

El río Santa Cruz es después del Negro, el más importante de la Patagonia. Sus nacientes se hallan en el Hielo Continental Patagónico en la zona cordillerana que se extiende entre los 49° y 51° S. Es el emisario de los grandes lagos: Viedma y Argentino, unidos entre sí por el río La Leona. Las aguas de estos lagos provienen de la fusión nival y de las muchas lenguas glaciarias que confluyen en ellos. Hasta la desembocadura en el mar Argentino es un río alóctono.

2.2. Estaciones de aforos

Las estaciones de aforo utilizadas para el desarrollo del presente trabajo se muestran en la Figura 2, sobre la vertiente oriental de la Cordillera de Los Andes, desde la cuenca del río Bermejo hasta la cuenca del río Santa Cruz, en el sector más austral del continente. La información de base empleada es el caudal diario medio, proporcionado por la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación. En algunos casos las series fueron extendidas por la adición de caudales mensuales publicados en anuarios hidrológicos.

En la Tabla I se indican las coordenadas de la estación de aforos, la extensión de la cuenca drenada, altura de la estación, porcentaje disponible de datos de caudal diario medio y longitud de los registros de observaciones de caudal mensual y caudal diario.

Los puestos de observación analizados fueron 32 (Tabla I) y en cada sitio se determinaron 5 variables: caudal anual, caudal de invierno (julio, agosto, setiembre), primavera (octubre, noviembre, diciembre), verano (enero, febrero, marzo) y otoño (abril, mayo, junio). Las series sujeto de análisis están conformadas de un valor anual, que representa el promedio del conjunto de observaciones que se realizan a lo largo de un año o estación.

El año hidrológico se extiende de septiembre a agosto, para las series de los ríos del norte argentino; de julio a junio, en los ríos correspondientes a la región cuyana, incluido

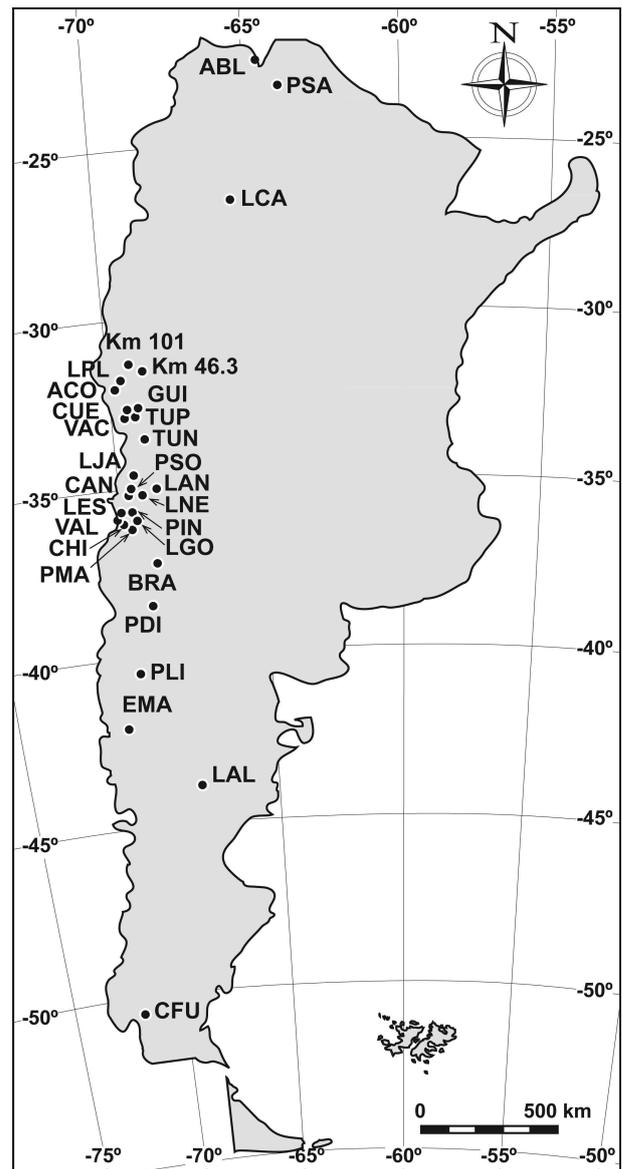


Figura 2: Red de estaciones de aforos.

el Colorado; de abril a marzo para los ríos patagónicos, excepto el Santa Cruz, que posee un comportamiento muy particular y se desarrolla entre septiembre a agosto (Vich y otros, 2011).

2.3. Análisis exploratorio de datos

Previo al análisis regional de frecuencia, se debe realizar un análisis exploratorio de datos (AED), con el objeto de rellenar los vacíos, detectar valores fuera de rango, ordenar y preparar la información disponible, caracterizar

Cuenca	Río	Estación de aforo	Sigla ⁽¹⁾	Coordenadas		Área (km ²)	Cota (m)	Datos ⁽²⁾ presentes (%)	Longitud de la serie	
				Lat.S	Long.O				Caudal ⁽³⁾ Mensual	Caudal Diario
Bermejo Superior	Bermejo	Aguas Blancas Pozo Sarmiento	ABL PSA	22°43'	64°22'	4850	405	100.0	1944-2003	1944-2003
				23°06'	64°13'	25000	296	100.0	1940-2003	1940-2003
Sali-Dulce	Las Cañas	P. del Clavillo	LCA	27°24'	65°59'	1000	1300	100.0	1943-2003	1953-2003
San Juan	Los Patos	A. Condarco La Plateada	ACO LPL	31°57'	69°42'	3710	1950	95.4	1952-2003	1957-2003
				31°53'	69°41'	8500	1950	95.8	1909-2003	1957-2003
	San Juan	Km 101 Km47.3	101 473	31°20'	69°06'	18348	1310	86.5	1971-2003	1971-2003
				31°32'	68°53'	25670	945	99.9	1909-2003	1951-2003
Mendoza	Vacas	Punta de Vacas	VAC	32° 61'	69° 46'	3050	2450	99.5	1949-2003	1949-2003
	Cuevas	Punta de Vacas	CUE	32° 51'	69° 46'	680	2430	95.0	1949-2003	1949-2003
	Tupungato	Punta de Vacas	TUP	32° 51'	69° 46'	1800	2430	95.0	1949-2003	1949-2003
	Mendoza	Guido	GUI	32° 51'	69° 16'	8180	1550	100.0	1956-2003	1956-2003
Tunuyán	Tunuyán	Valle de Uco	TUN	33° 47'	69° 25'	2380	1200	97.7	1944-2003	1944-2003
Diamante	Diamante	La Jaula	LJA	34° 40'	69° 19'	2753	1500	98.5	1970-2003	1970-2003
Atuel	Atuel	Puente Sosneado	PSO	35° 05'	69° 36'	2385	1580	97.6	1972-2006	1972-2006
		Loma Negra	LNE	35°04'	69°07'	3860	1340	100.0	1981-2006	1981-2006
		La Angostura	LAN	35° 02'	68° 52'	3800	1200	99.8	1906-2006	1931-2006
	Salado	Cañada Ancha	CAN	35°13'	69°46'	810	1700	95.5	1939-2006	1939-2006
Llancanelo	Pincheira	Pincheira	PIN	35°31'	69°48'	160	1750	88.3	1967-2006	1967-2006
Colorado	Cobre	Valle Hermoso	COB	35°09'	70°15'	222	2150	67.4	1950-1978	1950-1978
	Tordillo	Valle Hermoso	TOR	35°11'	70°15'	645	2200	59.5	1950-1975	1950-1975
	Grande	La Estrechura	LES	35°19'	70°18'	1070	1690	81.5	1977-06	1977-2006
		La Gotera	LGO	35° 52'	69° 53'	6180	1400	94.8	1971-06	1971-2006
	Valenzuela	Valle Noble	VAL	35°19'	70°18'	243	1680	79.0	1977-2006	1977-2006
	Chico	Las Loicas	CHI	35°48'	70°05'	613	1500	94.4	1991-2006	1991-2006
	Poti Malal	Pto Gendarmería	PMA	35°52'	69°57'	840	1485	93.5	1971-2006	1971-2006
Colorado	Barrancas	BAR	36°44'	69°57'	2900	950	-	1960-2005	-	
	Buta Ranquil	BRA	37°06'	69°44'	15300	850	-	1939-2005	-	
Neuquén	Neuquén	Paso de Indios	PDI	38°32'	69°25'	30843	498	100.0	1903-2003	1903-2003
Limay	Limay	Paso Limay	PLI	40°32'	70°26'	26400	538	100.0	1903-2005	1903-1995
Chubut	Chubut	El Maitén	EMA	42°06'	71°10'	1200	680	99.5	1943-2003	1943-2003
		Los Altares	LAL	43°51'	68°30'	16400	275	97.4	1943-2003	1946-2003
Santa Cruz	Santa Cruz	Charles Fuhr	CFU	50°16'	71°54'	15550	206	94.00	1955-2003	1955-2003

Tabla I: Estaciones de aforos: ubicación, área de drenaje, cota, porcentaje de datos existentes y extensión de las series de caudal mensual y caudal diario medio.

- (1) Denominación sintética de la estación de aforos.
- (2) Porcentaje de datos disponibles de caudal diario medio, proporcionado por la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación.
- (3) La serie de caudales mensuales ha sido extendida con datos provenientes de anuarios.

de manera sintética las variables a analizar y evaluar algunos supuestos básicos subyacentes en el diseño de test estadísticos.

En función de la extensión del vacío o laguna de información, se aplicaron distintos procedimientos para su rellenamiento (Gyau-Boakye, 1993). Para una longitud de tres días de datos perdidos, se empleó un polinomio interpolador de tercer grado. Si la extensión de la laguna, varía entre 4 y 20 días; se usó un

modelo autorregresivo de primer orden, siempre y cuando exista información precedente a la laguna, cuya extensión sea entre dos y tres veces la longitud de la interrupción. Para vacíos mayores de 20 días, se utilizó el método MOVE (Maintenance Of Variance Extension). Se emplea cuando existe información en otro sitio con características similares (estación base) y que posean un registro común, que incluya la interrupción. Este método preserva mejor las características estadísticas de la serie, que

los métodos tradicionales de regresión (Salas, 1992).

A veces se presentan datos fuera de rango, atípicos o dudosos; se trata de medidas muy grandes o pequeñas comparadas con el resto de los valores de la variable bajo análisis y se sospecha que no son representativos de la población de donde se ha extraído la muestra. Su importancia radica en el hecho de que pueden distorsionar los contrastes estadísticos. Para probar la presencia de datos atípicos se empleó el conocido Test de Grubbs (U.S. Army Corps of the Engineers, 2001), el Test de Rosner (EPA, 2000) y el desarrollado por la Interagency Advisory Committee on Water Data (1982) (antiguamente WCR). En general, los métodos de detección son sencillos y directos, pero el tratamiento de cada uno de ellos requiere de la incorporación de condiciones no solo matemáticas, sino también, de consideraciones hidrológicas. De existir valores dudosos, éstos deben ser comparados con la información histórica en sitios cercanos, a fin de excluirlos o no del análisis. El tratamiento de este tipo de información siempre contiene una cuota de subjetividad y prácticamente no existe una metodología de aceptación universal. En general, los caudales atípicos detectados, responden a fenómenos globales de características excepcionales y difícilmente se puedan deber a errores en las mediciones. Por tal razón, en este análisis no se los excluirá.

Para cada variable hidrológica se verificaron las condiciones de: normalidad, independencia y aleatoriedad. Para evaluar la normalidad, se aplicó el Test de Shapiro-Wilks y los Test de Asimetría y Curtosis (Snedecor y Cochran, 1962, cit. Salas y otros, 1980). La independencia entre las observaciones se evaluó mediante el Test de Bartlett y el test de Von Neuman. La medida de la aleatoriedad se realizó mediante el Test de Rachas y Test de Kendall (Kundzewicz y Robson, 2000).

Posteriormente, se analizó si las series son homogéneas y estacionarias, aspecto

fundamental para un posterior análisis de frecuencia. Las series estacionarias son aquellas que provienen de regímenes hidrológicos que no han sufrido alteraciones naturales o artificiales. Las faltas de homogeneidad más frecuentes provienen de la intervención humana (trasvase de cuenca, construcción de embalses, cambios en el uso del suelo, etc.) y de fluctuaciones en el régimen de precipitaciones y temperaturas. En los sistemas naturales, la variabilidad es la condición normal y por lo tanto no existen series estrictamente homogéneas. Pese a ello, a los fines prácticos pueden ser consideradas como series estacionarias, ya que la información hidrológica empleada proviene de cuencas que poseen muy baja intervención humana. Por otra parte, la sola sospecha de cambios a escala planetaria en las condiciones climáticas obliga a evaluar el régimen de escurrimiento en lo relacionado con modificaciones en la tendencia de largo plazo o cambios abruptos en los valores medios.

Para la estimación de la tendencia se emplearon los Test de t de Student (Remington y Schork, 1974), SROC (Spearman Rank Order Correlation) muy usado por la Organización Meteorológica Mundial (Kundzewicz y Robson, 2000), Mann y Kendall (Hirsch y otros, 1982; Westmacott y Burn, 1997) y sus correcciones por varianza (Hamed y Rao, 1998) y pre-blanqueo (Yue y otros, 2002).

Existen numerosos métodos para la detección de cambios abruptos o graduales en una serie de observaciones hidrológicas (Rodionov, 2005). El test más comúnmente usado es el test paramétrico t de Student secuencial. Se basan en la verificación de la igualdad estadística de dos medias muestrales. También, se aplicaron otros test como: Pettitt (Pettitt, 1979), Buishand (Buishand, 1982) o Worsley (Worsley, 1979). Se tratan de test de fácil aplicación y válidos para la detección de un solo punto de cambio. Su principal inconveniente radica en el hecho que en algunos casos previamente debe eliminarse la tendencia en la serie y que las observaciones se encuentren normalmente distribuidas.

2.4. Análisis regional de frecuencias

Ante la preocupación mundial por el cambio y variabilidad climática, la gestión de los recursos hídricos debe incluir un análisis de riesgo, frente a la vulnerabilidad del sector productivo y de la población. Para ello, se debe cuantificar la probabilidad de ocurrencia de las distintas variables hidrológicas que conforman el régimen fluvial en una cuenca particular. Los métodos convencionales de ajuste de una serie de datos a un modelo probabilístico, comúnmente basados en el método de los momentos o máxima verosimilitud, presentan fuertes limitaciones. Ello es debido a numerosos factores, tales como: longitud y calidad de la serie, errores de muestreo o introducidos por el rellenamiento de datos faltantes y la no verificación de los supuestos básicos de normalidad independencia y aleatoriedad (Chow y otros, 1996). El empleo del análisis de frecuencias implica siempre un nivel de riesgo e incertidumbre, ya que no solo se requiere de habilidad para su aplicación, sino de un importante conocimiento de las condiciones de aplicabilidad (Yevjevich, 1972).

Uno de los mayores problemas en el análisis de frecuencia, es realizar inferencias cuando el periodo de retorno es bastante mayor que la longitud de registros disponibles. Con el fin de aumentar la confiabilidad en las estimaciones, se hace uso de toda la información hidrológica disponible en la región.

Mediante el análisis regional de frecuencias se trata de paliar el déficit temporal de información con la abundancia espacial, aumentando la longitud de los registros disponibles mediante la transferencia de información de las diferentes estaciones de la región (Hosking y Wallis, 1993; 1997). El método consiste en combinar los registros de diferentes sitios de una región particular, de manera tal que pueda asumirse que tienen similares características (todas las series de datos de la región proceden de una misma distribución parental). Se estima una distribución de frecuencias para toda la región, que proporciona información en lugares con

datos escasos o carentes de ellos. Se reduce la incertidumbre en las estimaciones de los cuantiles y se asume que M estaciones con N años de registro, equivalen a una estación-año, que proporciona información análoga a una estación con $M \times N$ años. Se asume que la variable aleatoria transformada en adimensional (cociente entre la observación y su valor medio) tiene la misma distribución en todos los sitios de una región particular. Los datos de la región se pueden combinar para producir una curva de frecuencia que es aplicable en cualquier parte de la región, empleando una medida de escala específica (Curmane, 1989; Gabriele y Arnell, 1991; Hosking y Wallis, 1997). Los parámetros de dicha distribución se obtienen mediante la aplicación de momentos L regionalizados (ARF-LM).

Los momentos L son estadísticos de una muestra y un sistema alternativo para describir la relación funcional de una distribución de probabilidad. Son análogos a los momentos convencionales y proporcionan medidas de localización, dispersión, sesgo, curtosis y otros aspectos de la forma de las distribuciones de probabilidad. Se calculan por combinaciones lineales de momentos ponderados por probabilidad (MPP) (Greenwood y otros, 1979), a partir de la serie ordenadas de forma creciente $x_{(N_k)} < \dots < x_{(1)}$, correspondiente a la muestra (x_i con $i = 1 \dots N_k$). El estimador

$$B_r = \frac{1}{N_k} \sum_{i=1}^{N_k} \frac{(i-1) \cdots (i-r)x_i}{(N_k-1) \cdots (N_k-r)} \quad (1)$$

$$r = 0, 1, 2, 3, \dots$$

Donde: x_i observación i -ésima de la serie en el sitio k , el N_k el número de observaciones en el sitio k , B_r estimador insesgado de momentos ponderados por probabilidad de orden r . Los momentos L de la muestra se estiman por:

$$L_1 = B_0 \quad (2)$$

$$L_2 = 2B_1 - B_0 \quad (3)$$

$$L_3 = 6B_2 - 6B_1 + B_0 \quad (4)$$

$$L_4 = 20B_3 - 30B_2 + 12B_1 - B_0 \quad (5)$$

L_1 y L_2 representan la media L y el parámetro de escala L de la distribución, respectivamente. Los cocientes de momentos L adimensionales de la muestra para el sitio k , se definen como:

$$L - CV = T_2^{(k)} = L_2/L_1 \quad (6)$$

$$L - CS = T_3^{(k)} = L_3/L_2 \quad (7)$$

$$L - CK = T_4^{(k)} = L_4/L_2 \quad (8)$$

T_2 , T_3 y T_4 representan el coeficiente de *variación* - L , de *asimetría* - L y *curtosis* - L para el sitio k , respectivamente. Los cocientes de momentos L para la región homogénea se calculan como:

$$T_r^R = \frac{\sum_{k=1}^M N_k T_r^{(k)}}{\sum_{k=1}^M N_k}, r = 2, 3, 4, \dots \quad (9)$$

Los parámetros de la distribución regional elegida se obtienen mediante la aplicación de cocientes de momentos L regionales, calculados con la ecuación (9). En general, para un amplio rango de aplicaciones hidrológicas, especialmente aquellas relacionadas con tamaños de muestras pequeñas, los momentos L proveen de manera simple y razonable, estimadores eficientes de las características poblacionales de las series de los datos y de los parámetros de una gran variedad de distribuciones (Hosking y Wallis, 1997; Norbiato y otros, 2007; Delicado y Gorla, 2007; Ciumara, 2007). También, son más robustos a la presencia de valores anómalos en la muestra y las estimaciones de los momentos L están menos sujetas al sesgo que los momentos convencionales. Como ya se expresara, se asume que los sitios, dentro de una denominada "región homogénea", presentan una distribución de frecuencias idéntica, excepto por un factor de escala específico para el sitio, representado por la media de la variable del sitio, dada por:

$$X(F)_k = L_{1k} \times Y(F) \quad (10)$$

Siendo $Y(F)$ el cuantil adimensional obtenido de la distribución regional para una probabilidad acumulada F , L_{1k} es el

momento L de primer orden equivalente al promedio de la variable en el sitio k y $X(F)_k$ es la magnitud de la variable aleatoria para una probabilidad acumulada F en el sitio k .

El procedimiento de ARF-LM requiere de la aplicación de distintas etapas. La primera, es la preparación de datos, que previamente deben someterse a un exhaustivo AED. Posteriormente, se realiza el establecimiento de regiones homogéneas preliminares, para lo cual existen distintos procedimientos. Entre las técnicas más usuales están: Análisis Cluster o análisis de conglomerados, Análisis de Componentes Principales, Redes Neuronales Artificiales, etc.

La pertenencia o no de un sitio a un agrupamiento particular se mide con la medida de discordancia D_k , que se determina empleando los cocientes de momentos L adimensionales (T_2, T_3, \dots, T_i); la medida de discordancia fue desarrollada por Hosking y Wallis (1993; 1997). Para un sitio determinado el vector ($L - CV, L - CS, L - CK$) constituye un punto en un espacio tridimensional, por lo que un grupo de estaciones, producirá una nube de puntos en este espacio. Cualquier punto que se ubique lejos del centro de gravedad del conjunto, deberá ser considerado como discordante o anómalo. Ello se presenta cuando $D_k > D_{crítico}$, valor que se encuentra tabulado, e indica que el sitio es discordante y no pertenece al grupo. Ello significa que dicha estación debe ser separada del grupo y sometida a un análisis de calidad más profundo. El grado de homogeneidad de los agrupamientos propuestos se basa en la medida estadística H_2 (Hosking y Wallis, 1993; 1997). Ésta es utilizada para analizar la heterogeneidad del grupo, al comparar la dispersión de los momentos L adimensionales de cada sitio que conforman la región o agrupamiento con la esperada para una región homogénea, obtenida de pruebas de simulación. La medida de heterogeneidad H_2 se define como:

$$H_2 = \frac{(V_2 - \mu_{V_2})}{\sigma_{V_2}} \quad (11)$$

$$V_2 = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^M N_k \left[\left(T_2^{(k)} - T_2^R \right)^2 + \left(T_3^{(k)} - T_3^R \right)^2 \right]}{\sum_{k=1}^M N_k}} \quad (12)$$

Donde: T_2 coeficiente de variación-L, T_3 coeficiente de asimetría-L, N_k longitud de registro en el sitio k , M número de sitios de la región, media μ_{V_2} media del estadístico V_2 , σ_{V_2} desvío estándar del estadístico V_2 , exponente k o R indica si se trata de momentos del sitio k o momentos regionales. La determinación de la media μ_{V_2} y desviación estándar σ_{V_2} del estadístico V_2 se logra mediante simulación. Se determinan series sintéticas para cada sitio de la región, se calculan los momentos L regionalizados y se estima V_2 . La generación de series sintéticas para cada sitio, se realiza a partir de la distribución de probabilidad de Kappa o Wakeby y haciendo equivalente la probabilidad acumulada $F(x)$ a números aleatorios uniformemente distribuidos en el intervalo $(0,1)$. El número de simulaciones realizadas es 500. Una región es aceptablemente homogénea si $H_2 < 1$, posiblemente homogénea si $1 < H_2 < 2$ y heterogénea si $H_2 > 2$ (Hosking y Wallis, 1997; Robson y Reed, 1999).

Una vez comprobada la homogeneidad de la región o agrupamiento propuesto, es necesario adoptar una distribución del conjunto de distribuciones candidatas que mejor ajusta. Las distribuciones candidatas que se emplearon en el análisis fueron: Generalizada de Valores Extremos (GEV), Logística Generalizada (GLO), Generalizada Normal (3 parámetros, GNO), Normal (NOR), Gumbel (GUM), Pareto Generalizada (GPA), exponencial (EXP) y Pearson III (PE3).

La siguiente etapa es la adopción de la función de distribución de mejor ajuste a los datos observados. Para ello se empleó una medida de bondad de ajuste ZDIST definida por Hosking y Wallis (1997). Se expresa como:

$$Z^{DIST} = \frac{\tau_4 - T_4^R + B_4}{\sigma_4} \quad (13)$$

$$B_4 = \frac{1}{N_s} \sum_{j=1}^{N_s} \left(T_4^{(j)} - T_4^R \right) \quad (14)$$

$$\sigma_4 = \sqrt{\frac{1}{N_s - 1} \sum_{j=1}^{N_s} \left(T_4^{(j)} - T_4^R - B_4 \right)^2} \quad (15)$$

Donde: T_4 coeficiente de *curtosis* - L del agrupamiento en la simulación j , τ_4 coeficiente de *curtosis* - L teórico para una distribución de frecuencias particular, N_s número de simulaciones (500 es el número empleado), B_4 es la media de las discrepancias entre el coeficiente de *curtosis* - L del agrupamiento en la simulación j y el regionalizado con los datos observados, σ_4 desvío estándar de las discrepancias. Para la determinación de B_4 y σ_4 se emplea un criterio similar al usado en la determinación del estadístico V_2 . Se considera que el ajuste a determinada distribución es la adecuada, si el estadístico Z^{DIST} es cercano a cero, siendo un valor razonable cuando se encuentre entre $-1,64 < Z^{DIST} < 1,64$ (Hosking y Wallis, 1997; Robson y Reed, 1999).

Otra medida del grado de incertidumbre del agrupamiento es la definida como la media ponderada de la diferencia entre la función de distribución regional y los distintos sitios que integran el agrupamiento. Para un cuantil de recurrencia T es:

$$PUM_T = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^M N_k \left(\ln x(T)_k - \ln x(T)_k^R \right)^2}{\sum_{k=1}^M N_k}} \quad (16)$$

Donde el subíndice k indica el k - *enésimo* sitio del agrupamiento, el exponente R denota la región, $x(T)$ es el cuantil adimensional de recurrencia T , N_k longitud de registro en el sitio k y M número de sitios de la región. Para una función específica, un menor valor indica un mejor ajuste entre el cuantil de recurrencia T del sitio k y el cuantil de la misma recurrencia del agrupamiento.

Para el procesamiento de los distintos agrupamientos, la definición de las curvas

de crecimiento para las funciones citadas anteriormente (cuantiles y valor de la función de distribución) y la estimación de sus parámetros sobre la base de los momentos L regionales se elaboró un programa en FORTRAN, empleando algunas rutinas desarrolladas por Hosking (2005).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Análisis exploratorio de datos (AED)

Se han detectado valores atípicos en la cuenca del río San Juan. En las cuencas del Mendoza y Tunuyán, se identifican valores atípicos en, 1982-83 y 1987-88. El Diamante, solo presenta valores fuera de rango en el año 1982-83. En la cuenca del río Atuel, aparecen como valores atípicos, algunas observaciones en los años: 1982-83, 1983-84, 1992-93, 1996-97 y 1999-00. También, en todas las estaciones de la cuenca del río Grande, en: 1979-80, 1982-83, 1985-86, 1987-88, 1990-91, 2000-01, 2005-06 y 2006-07. En la cuenca del río Chubut Superior muestra un valor atípico bajo para el caudal anual en el año 1943-44. En el río Santa Cruz, el caudal anual de 1970-71 es un valor atípico. En general, la gran mayoría de los caudales atípicos detectados, se presentan en años donde el fenómeno El Niño tuvo una intensidad de moderada a severa (Trenberth, 1997; Nicholls, 2008) y difícilmente se puedan deber a errores en las mediciones, dado que las variables hidrológicas empleadas provienen de promedios de un conjunto de observaciones diarias, con escasos vacíos de información.

La Tabla II muestra un resumen del AED, para las variables caudal anual y estacional. La nomenclatura empleada es: A no se rechaza la hipótesis, R se rechaza la hipótesis para un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$. La secuencia es: test de normalidad, independencia y aleatoriedad respectivamente. Como en cada caso, se han aplicado distintos métodos, se ha tomado un criterio restrictivo, basado en el hecho que para asumir estadísticamente la condición de normalidad, o independencia

o aleatoriedad de la serie analizada, ningún método debía rechazar tal hipótesis. La condición de normalidad es rechazada en el 60 % de los casos, siendo el caudal de verano y otoño las variables que más presentan falta de normalidad; la ausencia de independencia y aleatoriedad ocurre en el 34 % de las series analizadas, destacándose las variables; caudal de invierno y otoño.

La homogeneidad de las series, se verifica a partir de la determinación de cambios graduales o abruptos, para un nivel de significancia de $\alpha = 5\%$ (ver Tabla II). También, en este análisis se aplicó el criterio exigente; la sola indicación de no homogeneidad significativa de algún método, se toma como motivo de sospechas de cambios graduales o saltos en la serie analizada. Se indica si la tendencia es creciente o decreciente y los dos últimos dígitos del año de quiebre en los valores medios conjuntamente con el signo del salto.

En el río Bermejo, la mayoría de las variables analizadas muestran tendencia positiva. En el río Las Cañas, el caudal anual, de otoño e invierno muestra pendiente positiva estadísticamente significativa. Los resultados obtenidos son congruentes con el hecho que en el noroeste argentino se observa un aumento generalizado de la precipitación, particularmente en Salta y Santiago del Estero, acompañado de una fuerte variabilidad interanual (Garreaud y Aceituno, 2001; Celis y otros, 2009). La temperatura no presenta cambios apreciables, aunque la mínima media tiende a ser más alta y la máxima media más baja, dando lugar a veranos más largos, otoños cálidos e inviernos suaves (Núñez, 2012) y la interacción entre ambas variables, resultan tendencias positivas en el caudal de los ríos Paraguay (Barros y otros, 2005), y Dulce (Celis y otros, 2009). También, Pasquini y Depetris (2007) encontraron tendencias positivas altamente significativas en todas las series históricas de caudales mensuales (periodo 1941-2003), excepto febrero, para el río Bermejo.

Los ríos cuyanos entre los 30° y 40° de latitud

Cuenca	Río	Estación de aforo	Sigla ⁽¹⁾	Normalidad, independencia, aleatoriedad ⁽²⁾					Tendencia ^{(3) (4)}					Cambios abruptos ⁽⁴⁾⁽⁵⁾ (año de ocurrencia)				
				Q _{año}	Q _I	Q _P	Q _V	Q _O	Q _{año}	Q _I	Q _P	Q _V	Q _O	Q _{año}	Q _I	Q _P	Q _V	Q _O
Bermejo Superior	Bermejo	A. Blancas P. Sarmiento	ABL	AAA	ARR	RAA	RAA	RRR	+	ns	ns	+	+	+71	+72	ns	+71	+71
			PSA	RRR	RRR	RAA	RRR	RRR	+	+	+	+	+	+72	+77	+77	+72	+71
Sali-Dulce	Las Cañas	P.del Clavillo	LCA	RAR	ARR	RAA	RRR	RRR	+	+	ns	+	+	+71	+73	+83	+71	+73
San Juan	Los Patos	A. Condarco La Plateada	ACO	RAA	ARA	RAA	RAA	RAA	ns	ns	ns	ns	ns	+76	+77	ns	+71	+76
			LPL	RAA	RRR	RAA	RAA	RRR	ns	—	ns	ns	ns	-45	-45	ns	-22	-45
	San Juan	Km 101 Km47.3	101	AAA	ARR	RAA	RAA	AAA	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
			473	RAA	RRR	RAA	RAA	RRR	ns	ns	ns	ns	ns	-44	-45	ns	-44	-44
Mendoza	Vacas	Pta de Vacas	CUE	RAA	ARR	RAA	RAA	RAR	ns	ns	ns	ns	ns	+71	+72	+76	+71	+71
	Cuevas	Pta de Vacas	VAC	RRR	RAR	RAA	RAR	RRA	ns	+	ns	ns	ns	+71	+72	+76	+71	+71
	Tupungato	Pta de Vacas	TUP	RRR	RRR	RRA	RRR	RRA	+	ns	+	+	ns	+76	+78	+76	+77	+76
	Mendoza	Guido	GUI	RRR	RRR	RRR	RRR	RRR	+	+	+	+	+	+76	+77	+76	+77	+77
Tunuyán	Tunuyán	Valle de Uco	TUN	RAA	RAR	AAA	RAR	RAA	ns	+	ns	+	ns	+71	+79	ns	+71	+70
Diamante	Diamante	La Jaula	LJA	RRR	ARR	ARA	RAA	RRR	ns	ns	ns	ns	ns	ns	+79	ns	ns	ns
Atuel	Atuel	P. Sosneado Loma Negra La Angostura	PSO	AAA	AAA	AAA	RAA	ARA	ns	ns	ns	-	ns	-87	ns	ns	-87	ns
			LNE	RAR	AAA	AAA	RAA	AAR	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
			LAN	RRR	RRR	RRA	RRR	RRR	ns	+	+	ns	+	+72	+77	+76	+71	+54
Salado	Ca. Ancha	CAN	RRR	RRR	RRA	RRR	RRR	ns	+	+	ns	+	+72	+77	+76	+71	+54	
Llancanelo	Pincheira	Pincheira	PIN	AAA	ARR	ARA	AAA	ARA	ns	+	ns	ns	+	+78	+79	+77	ns	+78
Colorado	Cobre	V. Hermoso	COB	AAA	RRA	AAA	RAA	ARA	ns	ns	ns	—	ns	ns	ns	ns	-43	-46
	Tordillo	V. Hermoso	TOR	RAA	RRR	RAA	RAA	RAA	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	Grande	La Estrechura La Gotera	LES	AAA	RAA	AAA	RAA	RAA	ns	ns	ns	ns	ns	-87	+91	-87	-87	ns
			LGO	AAA	AAA	AAA	RAA	AAA	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	-87	ns
	Valenzuela	Valle Noble	VAL	AAA	AAA	AAA	RAA	AAA	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	Chico	Las Loicas	CHI	AAA	RAA	AAA	RAA	RAR	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	-86
	Poti Malal	P.Gendarmería	PMA	AAA	ARR	AAA	RAA	RAA	ns	ns	ns	ns	ns	ns	+97	ns	ns	ns
Colorado	Barrancas Buta Ranquil	BAR	ARR	RRR	ARR	RAA	RRR	ns	+	ns	ns	+	+72	+72	+71	+72	+71	
		BRA	ARA	RRR	ARA	RAA	RRA	ns	+	ns	ns	ns	+77	+79	ns	ns	+79	
Neuquén	Neuquén	Paso de Indios	PDI	AAA	AAA	AAR	RAA	RAR	ns	ns	ns	ns	ns	+13	+13	+19	-54	ns
Limay	Limay	Paso Limay	PLI	AAA	RAA	RRR	RAA	RAA	—	ns	ns	—	ns	-52	-13	-85	-76	-22
Chubut	Chubut	El Maitén Los Altares	EMA	AAA	AAA	AAA	RAA	RAA	ns	ns	ns	ns	—	-84	+52	-84	-76	ns
			LAL	AAA	AAA	AAA	AAA	RAA	ns	ns	ns	—	ns	-84	ns	ns	-84	ns
Santa Cruz	Santa Cruz	Charles Fuhr	CFU	RAA	AAR	RAA	AAA	RAA	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

Tabla II: Resultados del análisis exploratorio de datos (AED).

(1) Denominación sintética de la estación de aforos.

(2) Nomenclatura: A=no se rechaza la hipótesis, R=se rechaza la hipótesis para un nivel de significancia $\alpha = 5\%$, para las pruebas de normalidad, independencia y aleatoriedad, respectivamente.

(3) ns no se detecta tendencia estadísticamente significativa, + tendencia creciente, - tendencia decreciente para un nivel de significancia $\alpha = 5\%$.

(4) Q_{año} caudal anual, Q_I caudal de invierno (julio, agosto, septiembre), Q_P caudal de primavera (octubre, noviembre, diciembre), Q_V caudal de verano (enero, febrero, marzo), Q_O caudal de otoño (abril, mayo, junio).

(5) ns no se detecta cambio estadísticamente significativo, + valor medio mayor para el periodo que se extiende desde el año indicado hasta el final de la serie, - valor medio inferior para un nivel de significancia $\alpha = 5\%$.

sur, se caracterizan por la gran variabilidad interanual. En la cuenca del río San Juan, la serie del río Los Patos, indicaría que los caudales

de estiaje (invierno) serían cada vez menores. Aguas abajo, en dos sitios (Km 101 y Km 47,3), las series históricas del río San Juan, no

poseen tendencias significativas en ninguna de las variables analizadas. Dichos resultados son concordantes con los hallados por Boninsegna (2009); por otra parte, Celis y otros (2009) señalan que hay indicios de una leve tendencia negativa en el caudal anual, correspondientes a las series históricas de los ríos Los Patos, San Juan y Atuel.

En la cuenca del río Mendoza, se observan tendencias positivas en distintas variables, excepto en el río Las Cuevas. En el Tupungato existen evidencias de tendencias crecientes en el caudal anual, primavera y verano. El río Mendoza muestra tendencias crecientes en todas las variables analizadas. La tendencia al aumento de la temperatura (Boninsegna y Villalba, 2006), hace que el periodo de fusión nivea comience más temprano, lo que explica el incremento de los distintos caudales estacionales y probablemente que el pico de caudal se anticipe. El Tunuyán únicamente presenta tendencia positiva para los caudales de invierno y verano.

El Salado, principal afluente del Atuel posee una marcada tendencia creciente en el caudal de otoño, invierno y primavera. Aguas arriba de la confluencia, el Atuel solo exhibe tendencia decreciente en el caudal de verano; aguas abajo las variables muestran tendencias significativas. Ello resulta consistente con lo planteada por Boninsegna (2009), que expresa que no se observan tendencias significativas en el caudal anual histórico del Atuel, pese a la importante disminución de la superficie cubierta por glaciares (Le Quesne y otros, 2009). El pequeño río Pincheira, presenta valores crecientes en el caudal de invierno y otoño. En un trabajo anterior Vich y otros (2007) estudiaron las tendencias observadas en el caudal anual de los ríos de la provincia de Mendoza para un periodo más corto y encontraron resultados similares, excepto en el Atuel donde existían evidencias de cambios graduales, que los nuevos datos y otros métodos no la corroboraron.

En las nacientes del río Grande, sobre

los afluentes que le dan origen: Tordillo y Cobre, solo se detectó tendencia en algunas variables. Las observaciones poseen numerosas interrupciones y dejaron de realizarse en la década del 70, por lo que sus resultados no son muy confiables. En el resto de los sitios de observación ubicados sobre el cauce principal y sus afluentes (Valenzuela, Chico y Poti Malal), no presentan tendencias estadísticamente significativas en ninguna de las variables analizadas. El río Barrancas ostenta tendencia creciente en el caudal de invierno y verano. Para el río Colorado en Buta Ranquil, solamente el caudal de invierno manifiesta tendencia positiva estadísticamente significativa para la serie histórica 1939-2005. Celis y otros (2009), para una longitud de serie menor, señalan que hay evidencias de cambios en las variables de caudal anual y extremos. Masiokas y otros (2010) encontraron que para algunos ríos cuyanos (San Juan, Mendoza, Tunuyán, Diamante, Atuel y Colorado), el caudal anual no presenta cambios graduales significativos en las series históricas, excepto en el río Diamante; estos resultados son parcialmente coincidentes con los hallados.

La temperatura media de la región patagónica presenta evidencias de aumento, intensificándose el fenómeno hacia el sur (Núñez, 2012). También, se observan tendencias negativas en la precipitación para el periodo 1967-98, que se explica por el desplazamiento hacia el sur del anticiclón semipermanente del Pacífico Sur (Vera y Camilloni, 2006). Su manifestación más visible es la retracción del frente glaciar, aunque no es notorio un incremento de los caudales. En el río Neuquén, la serie histórica (1903-2003) no muestra tendencias en ninguna de las variables analizadas; sin embargo, se observa una declinación en el caudal anual a partir de la década de 1980. Celis y otros (2009), advierten que los caudales extremos (máximos y mínimos) del Neuquén presentan tendencias positivas y negativas, respectivamente.

El río Limay, presenta evidencias de tendencia

decreciente en el caudal anual y en el caudal de verano. Es conveniente señalar que en el periodo de 1997 a 2003 el caudal anual en los principales ríos patagónicos muestra una tendencia negativa no significativa (Seoane y López, 2006).

En la cuenca del río Chubut los mayores caudales se presentan a fines del invierno, comienzo de la primavera. Sus variaciones responden a las variaciones en la intensidad de la corriente del oeste e independiente de la oscilación ENOS (El Niño Oscilación del Sur) (Caviedes, 1998). En las estaciones localizadas en el Alto Chubut y Chubut Medio, no se detectan cambios en las series analizadas, excepto por algunas evidencias de variaciones decrecientes en el caudal de otoño y verano, respectivamente. Pasquini y Depetris (2007), en el Chubut medio encontraron evidencias de tendencias negativas en las series históricas (1943-2003) de caudales mensuales de enero a julio, con cambios significativos para los meses estivales, en coincidencia con lo hallado.

En la cuenca del río Santa Cruz, los escurrimientos presentan baja sensibilidad frente a las fases de ENOS (El Niño Oscilación del Sur) en las tres condiciones (El Niño, La Niña y años normales) (Caviedes, 1998). Un análisis de los registros en la estación El Calafate (1937-1990) muestra una ligera tendencia al alza de la temperatura y una tendencia a la disminución de las precipitaciones (Ibarzabal y otros, 1996). Como antes se mencionara, el río Santa Cruz se alimenta de los lagos Viedma y del lago Argentino, que a su vez reciben el aporte de los glaciares provenientes del campo de Hielo Patagónico Sur. Presenta una gran regulación lacustre y la máxima variabilidad interanual está dada por la obstrucción y rotura del glaciar Perito Moreno. En Charles Fuhr, el régimen fluvial histórico no muestra evidencia estadísticamente significativa de tendencia en cualquiera de las variables analizadas. Reyna y otros (2010) y otros, arribaron a un resultado similar, al no detectar tendencia en la serie de caudal anual. Por otra parte, Pasquini y Depetris (2007) encontraron tendencias

positivas significativas en los caudales mensuales de septiembre, octubre y diciembre.

En síntesis, los ríos Los Patos, San Juan, Cuevas, Diamante, Atuel, Grande, Valenzuela, Poti Malal, Neuquén y Santa Cruz no mostraron tendencias significativas en ninguna de las variables de caudal analizadas. Solo se detectaron tendencia creciente estadísticamente significativa en algunas variables y sitios del noroeste y centro oeste argentino y tendencia decreciente en algunas variables y sitios de Los Andes patagónicos.

En relación a la detección de cambios abruptos en las series históricas, el test t de Student Secuencial señala puntos de quiebre estadísticamente significativos de manera más frecuente que los otros test. Muchas veces se presentan saltos múltiples, que ningún test de los empleados los identifica. El test de Pettitt en ningún caso identificó cambios abruptos. Debe recordarse que los test empleados, requieren la condición de normalidad en la distribución, aspecto que solo se cumplen en el 40

En las estaciones ubicadas sobre el río Bermejo y en Las Cañas, la mayoría de las variables analizadas, poseen evidencias de cambios abruptos en los valores medios a comienzo de la década del 70, que resulta en concordancia con las tendencias positivas de las precipitaciones en la cuenca del Plata a partir de dicha década (Núñez, 2012).

En la cuenca del río San Juan, el caudal de primavera no muestra cambios abruptos. En las otras variables, hay evidencias de saltos a mediados de la década del 40 y 70. En la cuenca del río Mendoza, la mayoría de los sitios de medición de caudales, manifiestan cambios abruptos alrededor del año 1977, particularmente en el río Tupungato, destacándose que la presencia de un cambio abrupto no necesariamente indica cambios en la tendencia de la serie histórica. En el Tunuyán, el caudal de primavera no presenta cambios significativos. Los ríos cuyanos han registrados

caudales bajos, particularmente en la década de 1960 a 1970, que luego se han recuperado asociado al evento El Niño (Carril y otros, 1997), como se demuestra al detectar cambios abruptos positivos en los valores medios, a partir de los años 70. Para algunos ríos cuyanos localizados entre los 30° y 37° de latitud sur se han identificados cambios abruptos en los años 1945 y 1976, aproximadamente (Masiokas y otros, 2010).

En el río Diamante, la hipótesis de homogeneidad es rechazada en el caudal de invierno que presenta salto positivo. En la cuenca del Atuel, a la salida del ámbito montañoso (Puente Sosneado), el caudal anual y de verano presentan evidencias de cambio negativo a fines de la década de 1980; en Loma Negra, antes de la confluencia con el Salado, no se detectaron cambios en ninguna de las variables; aguas abajo el Atuel y Salado presentan puntos de quiebre prácticamente coincidente en las distintas variables, con saltos positivos a mediados de los 70 y 1953. En la cuenca del Pincheira, el salto es positivo para todas las variables, excepto en el caudal de verano y ocurre alrededor de 1978. En la cuenca del río Grande, solo un sitio muestra evidencias estadísticamente significativas de cambios bruscos a un escalón menor, a fines de los 80. En el Barrancas los cambios abrupto significativos en dan a comienzos de los 70 en todas las variables. En el río Neuquén y Limay, el año de quiebre en los valores medio de las variables analizadas, muestran resultados muy disímiles entre sí, algunos en la década del 20 y otros en los 50 y 70. En la cuenca alta del río Chubut, los cambios abruptos son dispares en todas las variables, excepto en el caudal de otoño. En el río Santa Cruz no hay saltos. En general los caudales Qaño, QI y QV muestran cambios abruptos en más del 65 % de los casos, el QP, solo en un 44 %; además, no debe olvidarse que los métodos empleados son paramétricos y las condiciones de normalidad, independencia y aleatoriedad juegan un rol muy importante.

3.2. Análisis regional de frecuencias

Inicialmente, se plantearon distintos conjuntos de estaciones como regiones homogéneas. El primero de ellos fue todos los sitios bajo análisis. Luego se agruparon en base al régimen hidrológico de la corriente (distribución temporal de los caudales mensuales medios), que es determinada por las variaciones estacionales de precipitación y temperatura (Bruniard, 1992; 1994). También, se realizaron agrupamientos en base a la localización de las distintas estaciones con respecto al límite entre las cuencas de los ríos Colorado y Neuquén; esto coincide con una importante disminución en la altura media de la Cordillera y la posición del anticiclón semipermanente del océano Pacífico Sur (Compagnucci y Araneo, 2007). Luego se tomaron las estaciones localizadas en los Andes Centrales, Andes Patagónicos y distintas combinaciones de ellas. La selección del agrupamiento se realizó en base a la metodología ya explicitada de Hosking y Wallis (1997), en base a las medidas de discordancia D_k y heterogeneidad H_2 .

Luego de un exhaustivo análisis de los agrupamientos, que incluyó un proceso iterativo, se encontró la región homogénea para cada una de las 5 variables analizadas. Para el caudal anual se incluyen las 15 estaciones de las cuencas de los ríos Tunuyán, Diamante, Atuel, Pincheyra, Grande y Colorado; se excluye del agrupamiento a la estación sobre el Valenzuela, afluente del Grande. Para el caudal de verano, el agrupamiento posee 20 estaciones, que se localizan en las cuencas de los ríos: Mendoza, Tunuyan, Diamante, Atuel, Pincheyra Grande y Colorado. El agrupamiento del caudal de otoño incluye 19 estaciones, de las cuencas de los ríos: Mendoza, Tunuyan, Diamante, Atuel, Pincheyra, Grande y Colorado, excluyendo la estación Valenzuela porque se trata de un sitio discordante. La serie caudal anual y caudal de otoño del Valenzuela son discordantes porque presentan observaciones que difieren notablemente del resto, sin que ellas puedan ser consideradas como valores atípicos. El

Cuenca ⁽¹⁾	Variable ⁽²⁾				
	Q _a	Q _v	Q _o	Q _i	Q _p
Mendoza		VAC CUE TUP GUI	VAC CUE TUP GUI		
Tunuyán	UCO	UCO	UCO	UCO	UCO
Diamante	LJA	LJA	LJA	LJA	LJA
Atuel	PSO	PSO	PSO	PSO	PSO
	LNE	LNE	LNE	LNE	LNE
	CAN	CAN	CAN	CAN	CAN
	LAN	LAN	LAN	LAN	LAN
Pincheyra	PIN	PIN	PIN	PIN	PIN
Colorado	COB	COB	COB		COB
	TOR	TOR	TOR		TOR
	LES	LES	LES		LES
		VAL			VAL
	CHI	CHI	CHI		
	PMA	PMA	PMA		PMA
	LGO	LGO	LGO		LGO
	BAR	BAR	BAR		BAR
BRA	BRA	BRA		BRA	
T₂⁽³⁾	0.185	0.245	0.166	0.147	0.200
T₃	0.121	0.232	0.162	0.110	0.074
T₄	0.139	0.160	0.154	0.129	0.124
H₂⁽⁴⁾	-0.02	0.03	-0.07	0.94	1.03

Tabla III: Estaciones que conforman la región homogénea para las variables analizadas, momentos L adimensionales y heterogeneidad H_2 .

agrupamiento correspondiente al caudal de invierno es pequeño, solo 7 estaciones de los ríos Tunuyan, Diamante, Atuel y Pincheyra. Para la variable caudal de primavera, el agrupamiento es ligeramente heterogéneo y está constituido por 15 estaciones de las cuencas de los ríos: Tunuyán, Diamante, Atuel, Pincheyra, Grande y Colorado, excepto el sitio sobre el río Chico, afluente del Grande. Las estaciones que componen las distintas regiones homogéneas y sus respectivos momentos L adimensionales y medida de heterogeneidad, se muestran en la Tabla III.

Es conveniente aclarar que una región homogénea no presupone que se corresponda con una región geográfica particular (por

(1) Ver Tabla I para identificar el nombre de la estación de aforos. La región homogénea se halla integrada por los sitios señalados en las columnas, que representan las variables analizadas.

(2) $Q_{año}$ caudal anual, Q_I caudal de invierno (julio, agosto, septiembre), Q_P caudal de primavera (octubre, noviembre, diciembre), Q_V caudal de verano (enero, febrero, marzo), Q_O caudal de otoño (abril, mayo, junio).

(3) T_2 , T_3 y T_4 representan el coeficiente de *variación* - L , de *asimetría* - L y *curtosis* - L , respectivamente.

(4) Medida de heterogeneidad del agrupamiento o región, aceptablemente homogénea si $H_2 < 1$, posiblemente homogénea si $1 < H_2 < 2$ y heterogénea si $H_2 > 2$.

ejemplo, Andes Centrales, ríos patagónicos, etc.); este procedimiento solamente agrupa sitios con similar comportamiento estadístico. Los agrupamientos hallados para las variables caudal anual y de primavera, resultan parcialmente coincidentes, con la subregión Cuyo Sur (ríos Tunuyan, Diamante, Atuel y Colorado), una de las cuatro subregiones identificadas por Compagnucci y Araneo (2007), realizada en base a la variabilidad de los caudales y su vinculación con las fluctuaciones de la temperatura superficial del mar (TSM) y el ciclo ENOS (El Niño Oscilación del Sur), para 13 estaciones de ríos cordilleranos localizados entre los paralelos de 28° a 50°.

Posteriormente, en cada agrupamiento, se seleccionan las 4 funciones de distribución que presentan los valores más pequeños de ZDIST y los valores de PUMT para las recurrencias de 50, 100, 500 y 1000 años correspondientes. La adopción de una función particular, se basa en la asignación de un nivel de jerarquía a las 5 medidas de bondad (ZDIST y 4 valores de PUMT), estipulando el valor 1 para la más pequeña, 2 al segundo valor más bajo y así sucesivamente hasta 5. Posteriormente,

la función que presente simultáneamente los valores más bajo de jerarquías de ZDIST y PUMT es la que se adopta. La función Pearson III fue la elegida para las variables de caudal: Qaño, QI y QP y Gumbel para QV y QO. La Tabla IV muestra los valores de ZDIST, PUMT para 4 recurrencias y los parámetros de curva de crecimiento adimensional $Y(F)$ para cada una de las variables analizadas.

parámetros	Variable ⁽¹⁾				
	Qaño	QV	QO	QI	QP
FDR ⁽²⁾	PE3	GUM	GUM	PE3	PE3
Z ^{DIST} ⁽³⁾	-0.87	0.86	-0.39	-0.20	-0.06
localización ⁽⁴⁾	1.0000	0.7960	0.8614	1.0000	1.0000
escala ⁽⁵⁾	0.3345	0.3534	0.2402	0.2640	0.3566
forma ⁽⁶⁾	0.7396		0.6740	0.4554	
PUM ₅₀ ⁽⁷⁾	0.286	0.401	0.320	0.255	0.355
PUM ₁₀₀	0.320	0.437	0.355	0.276	0.404
PUM ₅₀₀	0.387	0.496	0.416	0.315	0.501
PUM ₁₀₀₀	0.412	0.516	0.437	0.330	0.537

Tabla IV: Medidas de bondad de ajuste ZDIST y PUMT para recurrencia T de 50, 100, 500 y 1000 años.

Los modelos de crecimiento adimensional para Pearson III (PE3) y Gumbel (GUM) son: GUM, Gumbel; 2 parámetros; ξ (localización) y α (escala):

$$F(x) = \exp \left[- \exp \left\{ - \frac{(x - \xi)}{\alpha} \right\} \right] \quad (17)$$

$$Y(F) = \xi + \alpha \ln(-\ln F(x)) \quad (18)$$

PE3, Pearson tipo III; G , es la integral Gamma Incompleta; 3 parámetros; μ (localización), σ (escala) y γ (forma):

$$F(x) = G \left(\frac{x - \mu + \frac{2\sigma}{\gamma}}{\left| \frac{\sigma\gamma}{2} \right|, \frac{4}{\gamma^2}} \right), \gamma > 0 \quad (19)$$

$$F(x) = 1 - G \left(- \frac{x - \mu + \frac{2\sigma}{\gamma}}{\left| \frac{\sigma\gamma}{2} \right|, \frac{4}{\gamma^2}} \right), \gamma < 0 \quad (20)$$

$$Y(F) = \text{no posee definición explícita} \quad (21)$$

La ecuación (21) carece de solución directa y para ello se aplica un algoritmo desarrollado por Hosking (2005). Los cuantiles para las estaciones de la región homogénea se obtienen del producto entre las ordenadas de la curva de crecimiento

regionalizada adimensional y la media de cada sitio. La Figura 3 y Figura 4 muestran la curva regional adimensional de frecuencias y la de cada sitio del agrupamiento, para cada una de las variables analizadas. En abscisas se coloca la variable reducida de Gumbel, estimada como $-\ln(-\ln(F))$ y en ordenadas el cuantil adimensional, donde F es la frecuencia acumulada.

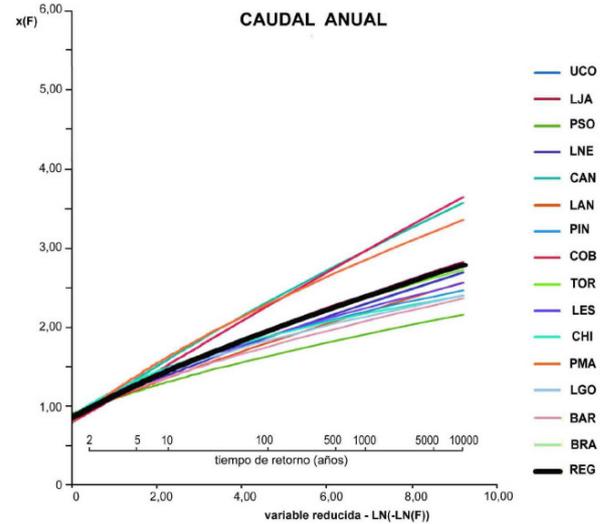


Figura 3: Caudal anual. Curva de crecimiento o curva de frecuencia adimensional para cada sitio y agrupamiento. Función de distribución Pearson III.

Es conveniente destacar que resulta importante cuantificar el rango de incertidumbre dentro del cual se enmarcan los cuantiles estimados, aspecto que es inherente a todo análisis estadístico. En los métodos tradicionales (momentos, máxima verosimilitud, etc.) se consigue determinando el intervalo de confianza para los valores de los cuantiles obtenidos con la función de distribución adoptada. En el análisis regional de frecuencias, la construcción de los intervalos de confianza es solo aproximada y tiende a evaluar el grado de cumplimiento de los supuestos asumidos por el modelo (Rosberg y Madsen, 1995; Hosking y Wallis, 1997; Eslava, 2011). En este contexto, los intervalos de confianza son de poca utilidad, ya que muy pocas veces se puede asegurar que el modelo

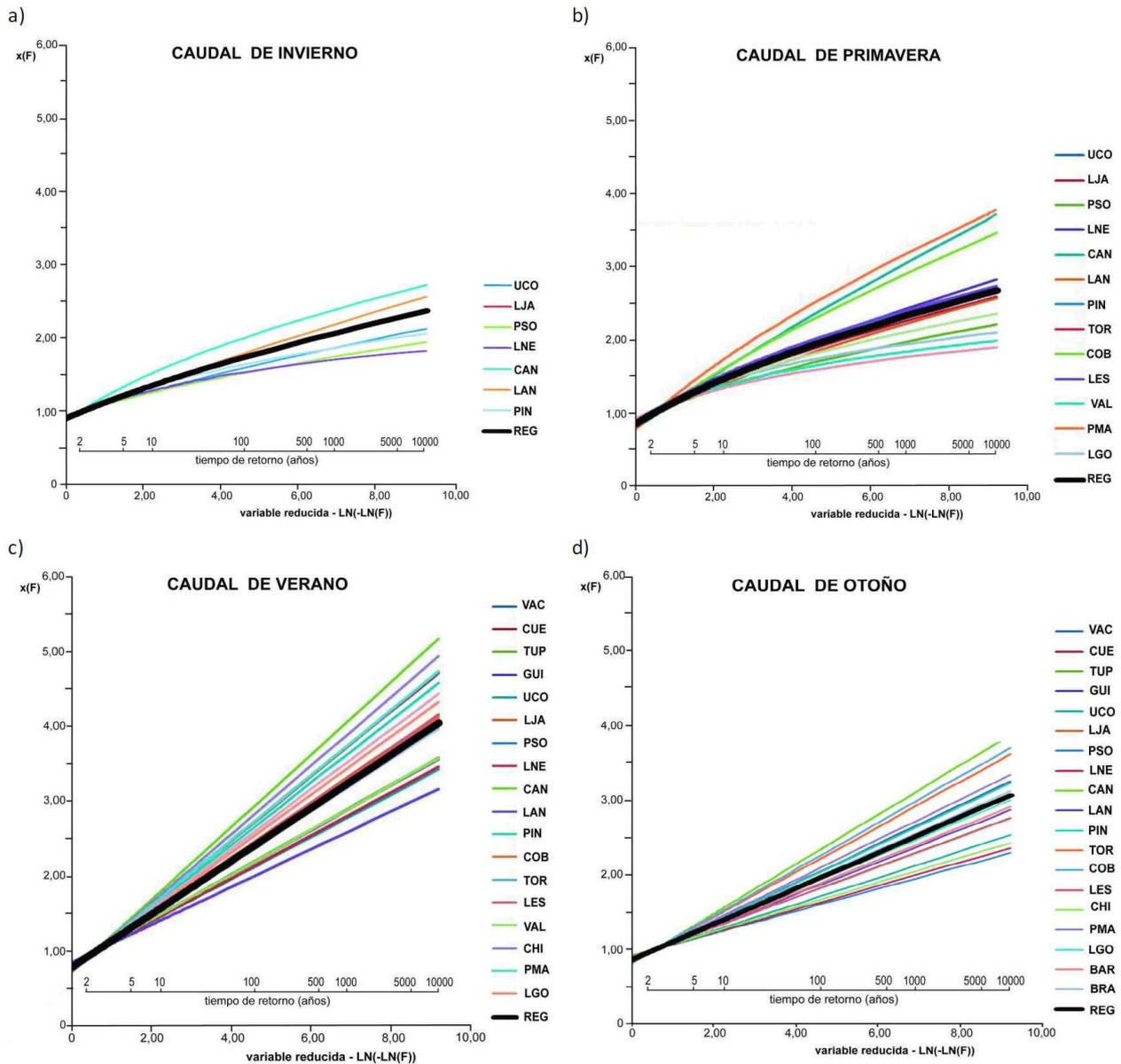


Figura 4: Curva de crecimiento o curva de frecuencia adimensional para cada sitio y agrupamiento: A caudal estacional de invierno (julio, agosto y septiembre), función de distribución Pearson III; B caudal estacional de primavera (octubre, noviembre y diciembre), función de distribución Pearson III; C caudal estacional de verano (enero, febrero y marzo), función de distribución: Gumbel; y D caudal estacional de otoño (abril, mayo y junio), función de distribución Gumbel.

empleado es del todo correcto, es decir, que se cumplan todos los supuestos. Además, según Hosking y Wallis (1977), el análisis regional de frecuencias con momentos L es válido, aunque las suposiciones no se cumplan totalmente

4. CONCLUSIONES

Desde épocas coloniales, el desarrollo y la producción agrícola en la vertiente oriental de la cordillera de Los Andes del Noroeste, Cuyo y Patagonia, pudo ser posible gracias al

agua utilizada para el riego y producción de energía, proveniente de los ríos con nacientes en la Cordillera y algunas serranías del oeste. La gestión del recurso hídrico requiere de estimaciones de la probabilidad de ocurrencia de variables hidrológicas para la toma de decisiones. El Análisis Regional de Frecuencias basadas en la estadística de momentos L (ARF-LM) es un procedimiento que permite aumentar la confiabilidad en la predicción de periodos de retorno de caudales con baja frecuencia y en sitios sin observaciones, con un análisis exhaustivo previo de datos utilizados.

El Análisis Exploratorio de los Datos (AED) es imprescindible para la detección de errores, valores atípicos, verificación de supuestos básicos o faltas de homogeneidad en las series. En las estaciones del noroeste argentino, en Pincheira, Barrancas, Colorado, Neuquén y Limay, no se han detectado valores atípicos en ninguna de las variables analizadas. Aparecen valores atípicos, para algunas variables, en las observaciones de los años: 1921-22, 1941-42, 1972-73, 1973-74, 1979-80, 1982-83, 1983-84, 1987-88, 1992-93, 1996-97, 1998-99 y 1999-00. Años donde el fenómeno ENSO tuvo una intensidad de moderada a severa y difícilmente se puedan deber a errores en las mediciones, dado que la gran mayoría de las variables hidrológicas empleadas provienen de promedios de un conjunto de observaciones más o menos importantes. Por lo expuesto, no fueron excluidos en este trabajo.

La condición de normalidad es rechazada en el 60% de los casos, siendo el caudal de verano y otoño las variables que más falta de normalidad presentan; la ausencia de independencia y aleatoriedad ocurre en el 34% de las series analizadas, destacándose el caudal de invierno y otoño, para un nivel de significancia de $\alpha = 5\%$.

Los ríos Los Patos, San Juan, Cuevas, Diamante, Atuel, Grande, Valenzuela, Poti Malal, Neuquén y Santa Cruz no mostraron tendencias significativas en ninguna de las variables de caudal analizadas. Solo se

detectaron tendencia creciente estadísticamente significativa en algunas variables y sitios del noroeste y centro oeste argentino y tendencia decreciente en algunas variables y sitios de Los Andes patagónicos. Las tendencias en algunas series históricas del caudal estacional podrían estar indicando variaciones en los procesos hidrológicos de generación de los caudales en las cuencas. Las tendencias en el caudal anual de dichas series representan comportamiento hidrológico promedio.

En general, el test t de Student Secuencial señala puntos de quiebre estadísticamente significativos de manera más frecuente que los otros test. Muchas veces se presentan saltos múltiples que ningún test de los empleados identifica. Debe recordarse que los test usados requieren la condición de normalidad en la distribución, aspecto que solo se cumple en el 40% de los casos, lo que introduce un importe nivel de incertidumbre en los resultados. En general los caudales Qaño, QI y QV muestran saltos en más del 65% de los casos, el QP, solo en un 44%. El cambio abrupto en los valores medios generalmente se produce en la década de los 70.

La detección de cambios graduales o abruptos de largo plazo en los ríos cordilleranos es un proceso difícil de evaluar desde el punto de vista físico, ya que pueden ser causados por fenómenos bien diferenciados como el calentamiento global, la variabilidad climática, la variabilidad hidrológica (cambios en las entradas, salidas y almacenamientos), o la superposición de ellos. Su efecto se manifiesta por el aumento de la incertidumbre asociado al diseño de estructuras hidráulicas y de oferta hídrica. Sumado a ello, es probable que el sistema de observación sea insuficiente para explicar físicamente los cambios, ya que la variabilidad enmascara las tendencias estables.

En general, la estimación de los parámetros de las funciones de distribución empleando momentos regionales adimensionales es a menudo más eficiente que los métodos tradicionales de estimación en base a

observaciones en un sitio, sobre todo cuando las series son relativamente cortas. Admite aumentar la longitud de los registros disponibles mediante la transferencia de información de las diferentes estaciones que componen una supuesta región homogénea y permite la posibilidad de realizar estudios de frecuencia más certeros.

El método de momentos L es un método de estimación de parámetros y cuantiles eficiente y computacionalmente conveniente. La región homogénea para la variable caudal anual incluye 15 estaciones de las cuencas de los ríos Tunuyán, Diamante, Atuel, Pincheyra, Grande y Colorado; se excluye a la estación sobre el Valenzuela. Para el caudal de verano, la región posee 20 estaciones, que se localizan en las cuencas de los ríos: Mendoza, Tunuyan, Diamante, Atuel, Pincheyra Grande y Colorado. El del caudal de otoño incluye 19 estaciones, de las cuencas de los ríos: Mendoza, Tunuyan, Diamante, Atuel, Pincheyra, Grande y Colorado, sin considerar la estación del Valenzuela. Para el caudal de invierno, el agrupamiento es pequeño, solo 7 estaciones de los ríos Tunuyan, Diamante, Atuel y Pincheyra. Para la variable caudal de primavera, el agrupamiento es ligeramente heterogéneo y está constituido por 15 estaciones de las cuencas de los ríos: Tunuyán, Diamante, Atuel, Pincheyra, Grande y Colorado, excepto el sitio sobre el río Chico. Sobre la base del empleo de los estadísticos ZDIST y PUMT las distribuciones Pearson III y Gumbel son las que presentan el mejor ajuste y son las adoptadas. También, las funciones de distribución Generalizada Normal y Generalizada de Valores Extremos mostraron buenos indicadores en todas las variables analizadas.

La predicción de caudales anuales y estacionales de baja frecuencia requiere de series extensas y homogéneas. La presencia de cambios graduales o abruptos introduce un alto nivel de incertidumbre en la predicción. Resulta más conveniente trabajar con las series que reflejen

el comportamiento actual y el futuro previsto, lo que aumenta aun más el grado de disyuntiva en el pronóstico.

REFERENCIAS

- Barros, V. y otros, 2005. El cambio climático y la costa argentina del Río de la Plata. Fundación Ciudad. Buenos Aires. ISBN 987-1032-04-8.
- Boninsegna, J., 2009. Impacto del Cambio Climático en la región Centro Oeste de Argentina y posibles medidas de adaptación. Foro: Escenarios climáticos y medidas de adaptación. 25 – 26 de febrero de 2009. Secretaria de Ambiente de la Nación. Buenos Aires. www.ambiente.gov.ar/archivos/web/AdCC/File/09_boninsegna.pdf
- Boninsegna, J. y Villalba, R., 2006. Los escenarios de Cambio Climático y el impacto en los caudales. Documento sobre la oferta hídrica en los oasis de riego de Mendoza y San Juan en escenarios de Cambio Climático. SAyDS, Fundación e Instituto Torcuato Di Tella.
- Bruniard, E., 1992. Hidrografía. Procesos y tipos de escurrimientos superficial, con la colab. de Clelia O. Moro, Juan A. Alberto y Daniel González. Buenos Aires, CEYNE. (Colección Geográfica, dir. Ricardo Capitanelli, vol. 4).
- Bruniard, E., 1994. Los regímenes fluviales de alimentación sólida en la República Argentina. Publicación Especial No 7. Academia Nacional de Geografía.
- Buishand, T. A., 1982. Some methods for testing the homogeneity of rainfall records. *J. Hydrology* 58:11-17.
- Calcagno, A.; Mendiburu, N.; Gaviño Novio, M., 2000. Informe sobre la gestión del agua en la Republica Argentina. World Water Visión.
- Camilloni, I. y Barros, V., 2003. Extremes discharges in the Paraná River and their climate forcing. *J. Hydrology* 278:94-106.
- Carril, A.; Doyle, M.; Barros, V.; Núñez, M., 1997. Impacts of climate change on the oases of the Argentinean cordillera. *Climate Reserch* 9:121- 129.

- Caviedes, C., 1998. Influencia de ENOS sobre las variaciones interanuales en ciertos ríos de América Sur. *Bull. Inst. fr. études andines* 27(3):627-641.
- Celis, A.; Ostuni, F.; Kisilevsky, G.; Schwartz, E.; Fernández Bouzo, S.; Lopresti, L., 2009. Documento País: Riesgos de desastres en Argentina. CAPITULO 5: Cambio climático: variabilidad pasada y una prospectiva de las amenazas de acuerdo a los escenarios futuros. Cruz Roja Argentina, Centro Estudios Sociales y Ambientales. Buenos Aires.
- Chow, V.T.; Maidment, D.; Mays, L., 1996. *Hidrología Aplicada*. Bogota McGraw-Hill.
- Ciumara, R. 2007.; L-moments evaluation for identically and nonidentically weibull distributed random variables. *Proc. Romanian Academy, Series A*, 8(3):175-180.
- Compagnucci, R. y Araneo, D., 2007. Alcances de El Niño como predictor del caudal de los ríos andinos argentinos. *Ingeniería Hidráulica en México*. XXII(3):23-35.
- Curmane, C. 1989. Statistical distributions for flood frequency analysis. *Operational Hydrology Report no. 33*, WMO (series) no. 718, World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland.
- Delicado, P. y Goría, M., 2007. A small sample comparison of maximum likelihood, moments and L-moments methods for the asymmetric exponential power Distribution. *Computational Statistics & Data Analysis* 52:1661-1673.
- EPA, 2000. Guidance for data quality assessment. Practical methods for data analysis. EPA QA/G-9. QA00 Update.
- Eslava, J., 2011 Análisis regional de las precipitaciones diarias extremas en la Cuenca del río Arga con R. Universidad Pública de Navarra, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos. Pamplona.
- Garreaud, R.D., Aceituno, P., 2001. Interannual Rainfall Variability over the South American Altiplano. *American Meteorological Society. J. Climate* 14(12):2779-2789.
- Gabriele S., and Arnell, N.; 1991. A hierarchical approach to regional flood frequency analysis. *Water Resources Res.* 27 (6): 1281-1289.
- Greenwood, J.A.; Landwehr, J.M.; Matalas, M.C.; Wallis, J.R., 1979. Probability weighted moments: Definitions and relation to parameters of several distributions expressible in inverse form. *Water Res. Res.* 15:1049-54.
- Gonzalez Loyarte, M., 1995. La diagonale aride Argentine: une réalité écologique oscilante. *Sécheresse*, 1(6), 35-44.
- Gyau-Boakye, P., 1993. Filling gaps in hydrological runoff data. *Series in West Africa*.
- Hamed, K. H. and Rao, A. R., 1998. A Modified Mann-Kendall Trend Test for Autocorrelated Data. *J. of Hydrology* 204:182-196.
- Hirsch, R., Slack, J. and Smith, R., 1982. Techniques of Trend Analysis for Monthly Water Quality data. *Water Resources Res* 18(1):107-121.
- Hosking, J., 2005. FORTRAN routines for use with the method of L-moments, Version 3.04. IBM Research Report RC12822, IBM Research Division, Yorktown Heights, New York.
- Hosking, J. and Wallis, J., 1993. Some Statistics Useful in Regional Frequency Analysis. *Water Resources Res.* 29(2): 271-281.
- Hosking, J. and Wallis, J., 1997. *Regional Frequency Analysis. An approach based on L-Moments*. Cambridge University. U K.
- Ibarzabal, T.; Donangelo, T.; Hoffmann, J.; Naruse, R., 1996, Recent climate changes in southern Patagonia, *Bulletin of Glacier Research* 14:29-36.
- Interagency Advisory Comité on Water Data (USACE), 1982. Guidelines for Determining Flood Flow Frequency. Bulletin 17 B. U.S. Department of Interior. Geological Survey. Office of Water Data Coordination.
- Kite, G. W., 1977. Frequency and risk analyses in hydrology. *Water resource Publications*. Colorado.
- Kjeldsen, T. R. and Jones, D., 2004. Sampling variance of flood quantiles from the generalised logistic distribution estimated using the method of L-moments. *Hydrology and Earth System Sciences* 8(2):183-190,

- 2004.
- Kundzewicz, Z. and Robson, A., 2000. Detecting trend and other changes in hydrological data. WCDMP-45. WMO/TD No 1013. Geneva.
- Landwerh, J.M.; Matalas, N.C.; Wallis, J.R., 1979. Probability-weighted moments compared with some traditional techniques in estimating Gumbel parameters and quantiles. *Water Resources Research* 15:1055-64.
- Leanza, A. (ed.), 1972. Geología regional Argentina. Academia Nacional de Ciencias. Córdoba. INGRAF.
- Le Quesne, C.; Acuña, C.; Boninsegna, J.; Rivera, A.; Barichivich, J.; 2009. Long-term glacier variations in the Central Andes of Argentina and Chile, inferred from historical records and tree-ring reconstructed precipitation. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 281(2009) 334-344.
- Llano, M. y Penalba, O., 2011. A climatic analysis of dry sequences in Argentina. *International Journal of Climatology*. 31(4):504-513.
- Marzo, M. e Inchauspe, O., (1967). Geografía de Mendoza. Mendoza, Editorial Spadoni.
- Masiokas, M.; Iba, R.; Luckman, B.; Mauget, S., 2010. Intra- to Multidecadal Variations of Snowpack and Streamflow Records in the Andes of Chile and Argentina between 30° and 37°S. *J. of Hydrometeorology* 11:822-831.
- Miller, A., 1976. The climate of Chile. En: W. Schwerdtfeger, (ed.), *World Survey of Climatology. Climates of Central and South America*. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
- Minetti, J. y Vargas, W., 1997. Trends and jumps in the annual precipitation in South America, south of the 15° S. *Atmósfera* 11: 205-222.
- Nicholls, N., 2008. Recent trends in the seasonal and temporal behaviour of the El Niño-Southern Oscillation, *Geophys. Res. Lett.* 35, L19703, doi:10.1029/2008GL034499.
- Norbiato, D.; Borga, M.; Sangati, M.; Zanon, F., 2007. Regional frequency analysis of extreme precipitation in the eastern Italian Alps and the August 29, 2003 flash flood. *J. Hydrology* 345:149- 166.
- Nuñez, M., 2012. Cambio climático observado y esperado en Argentina. En: *Foro Ambiente y Ciudad de Buenos Aires*. Organizado por AIDIS Argentina y Fundación Ciudad. Buenos Aires. www.fundacionciudad.org.ar/pdf/Foro_Amb_y_CABA/NUEZ.pdf o www.cadicaa.com.ar/medioambiente/innoforo/03_DrNunez.pdf
- Paoli, C. y Malinow, G., 2010. Criterios para la determinación de crecidas de diseño en sistemas climáticos cambiantes. Santa Fe. EdicionesUNL.
- Pasquini, A. y Depetris, P., 2007. Discharge trends and flow dynamics of South American rivers draining the southern Atlantic seaboard: An overview. *J. Hydrology* (2007) 333:385- 399.
- Pettitt, A. N., 1979. A nonparametric approach to the change-point problem. *Applied Statistics* 28:126-135.
- Prohaska, F., 1976. The climate of Argentina, Paraguay and Uruguay', En . W. Schwerdtfeger, (ed.), *World Survey of Climatology. Climates of Central and South America*. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
- Remington R. y M. Schork., 1974. *Estadística Biométrica y Sanitaria*. Prentice Hall Internacional.
- Reyna, S; Reyna, T; Fulginitti, F; Labaque, M; Giovanini, L; Toselli, L., 2010. Sistema Cóndor Cliff – La Barrancosa: Diseño de presas y operación de embalses ajustados por condicionantes ambientales. *Anales del VI Congreso Argentino de Presas y Aprovechamientos Hidroeléctricos*. Comité Argentino de Presas. Neuquén.
- Robson, A. and Duncan, R., 1999. Volume 3. Statistical procedures for flood frequency estimation. En: *Institute of Hydrology (ed.) Flood estimation handbook*. Wallingford, Gran Bretaña.
- Rodionov, S., 2005. A brief overview of the regime shift detection methods. *Joint*

- Institute for the Study of Atmosphere and Ocean. University of Washington. www.beringclimate.noaa.gov/regimes/Regime_shift_methods_list.htm
- Rosberg, D. and Madsen, H., 1995. Uncertainty measures of regional flood frequency estimators. *J. of Hydrology* 167:209-224.
- Salas, J., 1992. Analysis and modelling of hydrologic time series. Maidment, David (ed) *Handbook of Hydrology*. MacGraw-Hill.
- Salas, J.; Delleur, J.; Yevjevich, V.; Lane, W., 1980. Applied modeling of hydrologic time series. Water Resources Publications. Colorado.
- Seoane, R y López, P., 2006. Capítulo 4: Recursos hídricos y sus tendencias. En: Vulnerabilidad de la Patagonia y sur de las provincias de Buenos Aires y La Pampa. Fundación e Instituto Torcuato Di Tella. Cap 4, pp. 89-146.
- SSRH., 2010. Atlas de cuencas y regiones hídricas de la República Argentina. Edición 2010. www.hidricosargentina.gov.ar/info_mapas.php
- Trenberth, K.E., 1997. The definition of el niño. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 78: 2771-2777.
- U.S. Army Corps of the Engineers, 2001. Performance Evaluation (PE) Program. Engineer Manual 200-1-7.
- Vera, C y Camilloni, I., 2006. Tendencias climáticas: precipitación. En: Vulnerabilidad de la Patagonia y sur de las provincias de Buenos Aires y La Pampa. Fundación e Instituto Torcuato Di Tella. Cap. 3, pp. 54-88.
- Vich, A.; Lopez, P. y Schumacher, M., 2007. Trend detection in the water regime of the main rivers of the Province of Mendoza, Argentina. *GeoJournal* 70:233-243.
- Vich, A.; Bizzotto, F., Vaccarino, E., Correas, M. y Manduca, F., 2011. Quantifying changes (gradual and abrupt) in the hydrologic regime of the cordilleran basin. UGI 2011 Regional Geographic Conference. Conference Proceedings. Santiago de Chile. Noviembre de 2011.
- Westmacott. J. and Burn, D., 1997. Climate Change Effects on the Hydrologic Regime within the Curchill Nelson River Basin. *J. Hydrology* 202:263-279.
- Worsley, K., 1979. On the likelihood ratio test for a shift in location of normal populations. *J. Am. Statistic As.* 74, 365-367.
- Yevjevich, V., 1972: *Stochastic Processes in Hydrology*. Water Resources Publications. Colorado.
- Yue, S.; Pilon, P. and Cavadias, G., 2002. Power de Mann-Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series. *J. Hydrology* 259:254-271.

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo la licencia Creative Commons, que permite el uso ilimitado, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada.

VARIABLES METEOROLÓGICAS Y SU INCIDENCIA EN ENFERMEDADES RESPIRATORIAS DE NIÑOS EN EL GRAN BUENOS AIRESAdelia Perla Alessandro¹¹Dto de Cs. de la Atmósfera y los Océanos.Fac. Cs. Ex. y Nat.,UBA

(Manuscrito recibido el 20 de diciembre de 2012, en su versión final el 24 de septiembre de 2013)

RESUMEN

Este trabajo tiene como objetivo conocer la distribución de pacientes menores o iguales de 14 años con enfermedades respiratorias (N) en el gran Bs. As., en el periodo 08/2004 -08/2011 y realizar una primera aproximación de la relación existente entre las condiciones atmosféricas y dichas patologías. Se utilizaron los registros de pacientes de una empresa médica y los datos diarios de temperatura (temperatura máxima, temperatura mínima, temperatura de rocío), presión y humedad relativa de la Estación Meteorológica Ezeiza (34,49-58,32). El mayor número de pacientes se produce en menores de 1 año y en el rango de pacientes menores o iguales de 4 años. El análisis realizado arrojó una fuerte relación estacional, con un máximo en los meses de bajas temperaturas y un mínimo estival. Las variables que mejor se correlacionan con los datos diarios y mensuales de todas las edades de los pacientes son las temperaturas (media, máxima, mínima y de rocío). A través de las expresiones de correlación múltiple, obtenidas por el método de Stepwise, se pueden determinar valores esperados de pacientes diarios y mensuales, con un error entre 15.9-19.9 y entre 11,8-13.3, respectivamente. En el Gran Bs As y para los niños de edades menores o iguales a 4 años, los campos medios de alturas geopotenciales en 1000 hPa correspondientes a los días con menor número de pacientes (0 ó 1 paciente) presentan condiciones normales de presión, mientras que aquellos compuestos por los días con máximos registros de pacientes (mayores o iguales a 69) presentan anomalías de presión positivas de 20 a 60 mgp. Estas últimas diferencias se van debilitando a medida que disminuye la frecuencia de pacientes diarios.

Palabras clave: afecciones respiratorias, temperatura, campos neopotenciales

METEOROLOGICAL VARIABLES AND THEIR INCIDENCE IN RESPIRATORY DISEASES OF CHILDREN IN GREATER BUENOS AIRES**ABSTRACT**

This paper aims at improving knowledge on the distribution of patients less or equal than 14 years with respiratory diseases (N) in the greater Buenos Aires in the period 08/04 -08/11, and providing a preliminary assessment of the relationship between atmospheric conditions and those pathologies. To this effect, medical records from a medical services firm were examined, as well as temperature data (daily, maximum, minimum, 2 dew point), pressure and relative humidity, measured

at the meteorological station of Ezeiza (34,49-58,32). The largest number occurs in patients younger than 1 year and the range of patients less or equal than 4 years. The analysis revealed a strong seasonal relationship, with a peak in winter (low temperatures) and a minimum in summer. The best correlations were observed between daily and monthly values of all ages of patients and temperature data (average, maximum, minimum, dew point). Multiple correlation equations obtained with the Stepwise method made it possible to estimate the expected number of patients on daily and monthly scales with errors between 15.9-19.9 and 11,8-13.3 respectively. Over the greater Buenos Aires and surrounding areas, and for children of up to 4 years of age, mean geopotential height fields at 1000 hPa corresponding to days with the lowest number of patients (0 or 1 patient) respond to the mean field, while the composite of the maximum registry of patients (greater or equal to 69) present a positive geopotential height anomalies between 20 and 60 mgp. These differences weaken as the frequency of daily patients decreases.

Keywords: respiratory diseases, temperature, geopotential fields

1. INTRODUCCIÓN

Todos los años en todo el mundo, diversos factores climatológicos y meteorológicos ocasionan –directa o indirectamente– la muerte prematura a millones de personas y enfermedades o incapacidades a cientos de millones más. A pesar de ello, se observa un escaso grado de prioridad política y económica brindado a la prevención de las enfermedades meteorotrópicas, existe poca conciencia del riesgo atribuible a los factores ambientales en Salud Pública. El estudio de los factores ambientales, incluidos los meteorológicos, constituye un aporte fundamental (Kashiwabara et al, Santic et al, Wardman et al, 2002) para interpretar mejor lo que ocurre en el proceso salud – enfermedad.

En dos trabajos anteriores (Alessandro y otros, 2006; Alessandro, 2011 b)), se realizó una primera aproximación, sobre la influencia que algunas variables meteorológicas ejercen sobre las enfermedades respiratorias y, en particular, sobre el asma. Ambos análisis fueron realizados en el gran Buenos Aires, con datos obtenidos a través de la empresa Ayuda Médica

En el segundo trabajo tomó una muestra de tres años (08/ 2004-08/ 2007) y pudo observar que

los grupos más afectados fueron el de menores de 10 años y el de mayores a 71 años. De acuerdo a estos resultados, se ampliará el período estudiado hasta agosto de 2011 y se tomará la muestra constituida por niños menores a 14 años, con énfasis sobre el grupo formado por niños menores o iguales a 4 años, por ser estos más sensibles a las afecciones citadas.

Entre las enfermedades respiratorias, el asma (Torcachier y otros, 1997) constituye una enfermedad meteorotrópica paradigmática, casi todos los afectados asocian la exacerbación de sus síntomas con variaciones del estado del tiempo. Esta enfermedad es una patología dinámica que se ve permanentemente modificada, ya sea estacionalmente, periódicamente o aperiódicamente.

Algunos investigadores realizaron estudios experimentales controlados, para describir los efectos respiratorios provocados por los cambios de tiempo o por factores meteorológicos, ya sean aislados o interactuando entre sí. Pero estas experiencias no pudieron reproducir lo que ocurre bajo las condiciones naturales de carácter mucho más complejas, en las que la acción de esos fenómenos puede verse potenciada por los distintos contaminantes del aire, agentes infectantes, partículas alergógenas o irritativas.

Si bien el factor contaminante es muy importante en el desarrollo de las enfermedades respiratorias, en este trabajo no se tendrá en cuenta por no haber disponibilidad de datos que lo evalúen en el lugar y período elegido.

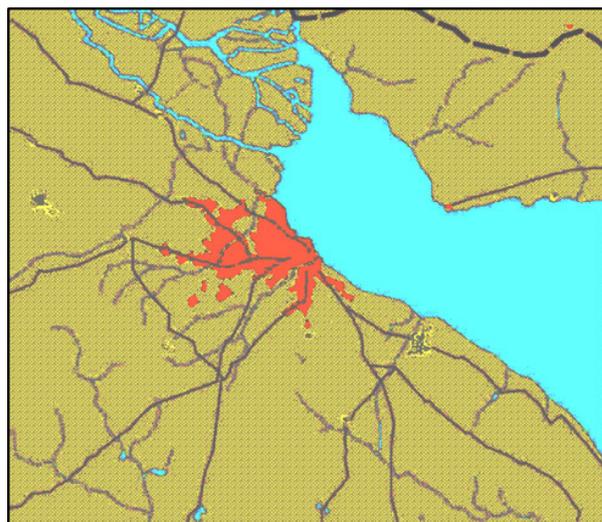
Un buen pronóstico de eventos atmosféricos inminentes, asociado a medidas preventivas eficaces, podrían frenar la morbilidad no solo de enfermedades respiratorias, sino de un buen número de enfermedades meteorotrópicas.

2. DATOS

Se utilizan los registros diarios de pacientes del período agosto 2004 -agosto 2011. Estos datos fueron proporcionados por la empresa Ayuda Médica, que posee socios propios y a su vez es prestador de obras sociales, empresas y colegios, por lo que no cuenta con un padrón fijo de posibles pacientes. La empresa tiene un sistema de atención domiciliaria que cubre todo el área del Gran Buenos Aires.

De acuerdo al instituto Nacional de Estadísticas y Censos de Argentina (INDEC), el Gran Buenos Aires incluye a la Ciudad de Buenos Aires (34°36' S, 58°26'O) y a los 19 partidos que la rodean. Es la zona urbana más importante de la Argentina y su población representa casi el tercio de la población total (aproximadamente 40.106).

Los diagnósticos son los aportados por los médicos que realizan las visitas, y se respetaron los mismos tal como fueron informados. Sin embargo, una misma patología como, por ejemplo, el asma, puede ser interpretada por un médico como bronquitis espasmódica, broncoespasmo, bronquitis alérgica, espasmo bronquial, bronquitis obstructiva recurrente, etc; tratándose de eufemismos diagnósticos que, según una definición operativa propia, son tomados como asma aún cuando algunas no lo sea, como por ejemplo las bronquitis virales o bacterianas. Es decir, los datos aportados en un día determinado podrían estar sesgados según el sesgo diagnóstico del médico de guardia.



Coordenadas de borde: 59,55 $\left\langle \begin{array}{c} \uparrow \\ \downarrow \end{array} \right\rangle$ 57,20
33,66
35,60

Centro del mapa: 34°37'48" S 58°22'30" O

Ubicación del gran Buenos Aires (rojo)

Otro inconveniente es que en estos datos no se halla registrado el momento exacto del comienzo de la afección, por ello en este trabajo se consideró que la misma se produjo el mismo día del registro. Aunque se estima que, durante los primeros años de vida de los pacientes, sus padres recurren a la consulta con mayor rapidez durante el mismo día del síntoma. Por otra parte, debido a la falta de la citada información, no se trabajó con los datos meteorológicos horarios, ni con otras variables de más difícil tratamiento como por ejemplo, el viento. A pesar de estas dificultades, la cantidad de datos es significativa para realizar una primera aproximación.

Debido a que en este trabajo no se ha realizado una discriminación zonal de los pacientes, ni se conoce la hora del comienzo de la enfermedad y por ser la región considerada climáticamente homogénea, se ha tomado a la estación meteorológica Ezeiza como única referencia de los valores utilizados. La elección de esta estación en especial, se debe a que aporta datos mas completos y confiables, con mediciones horarias que cubren las 24 hs (y no menos como otras pertenecientes al gran Buenos

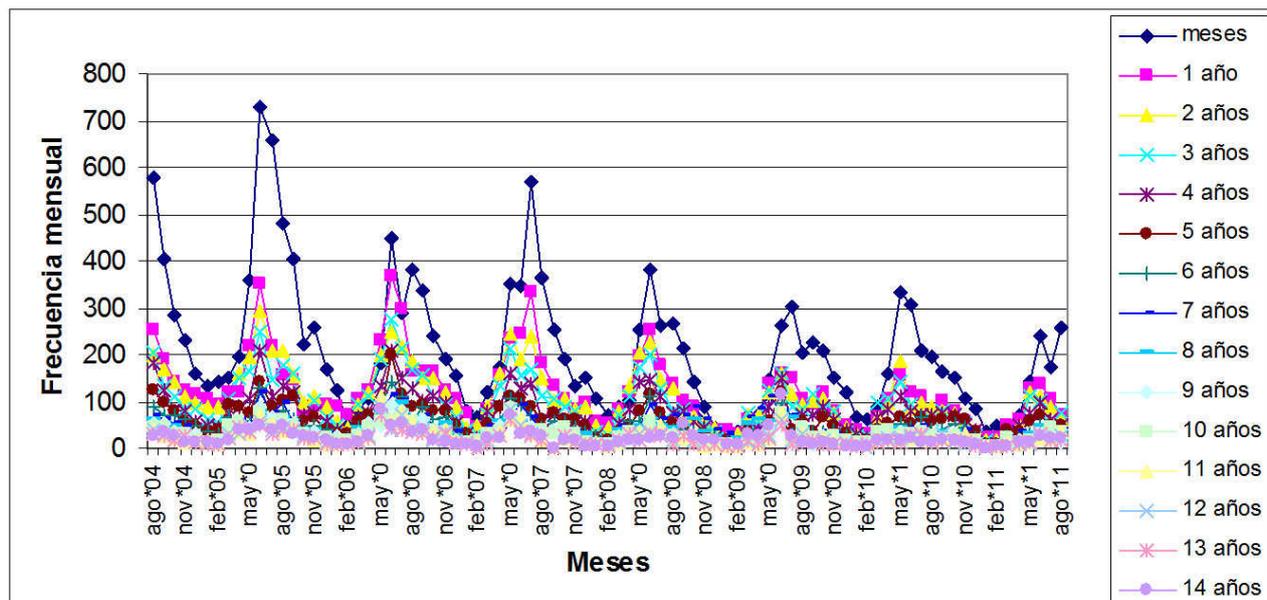


Figura 1: Distribución mensual de pacientes con enfermedades respiratorias (N) de diferentes edades agrupados por año de edad.

Aires).

En un trabajo posterior, con la misma muestra, se prevee agrupar a los pacientes por zonas según la dirección proporcionada por los mismos. Con esta nueva distribución, se podría determinar qué zonas agrupan al mayor número de afectados y analizar la relación entre algunas variables y elementos alérgicos como, por ejemplo, el polen, así también como estudiar la asociación entre la enfermedad y el aspecto socioeconómico de los pacientes. .

En Ezeiza (34.49°S , 58.32°O) se toman los valores diarios de: temperatura (T), temperatura máxima (T_{max}), temperatura mínima (T_{min}), temperatura de rocío (T_d), humedad relativa ($H\%$) y presión atmosférica en superficie (P_r). Todos suministrados por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN).

Los campos medios y las anomalías de alturas geopotenciales en 1000 hPa tomados a las 12 Z, se obtienen a partir de las salidas gráficas del National Center of Environmental Protection (NCEP) (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/composites/day/>)).

Los valores se hallan determinados sobre puntos de grilla de $2,5 \times 2,5$ grados. El período utilizado para calcular las anomalías de alturas neopotenciales es el correspondiente a 1980-2010.

3. RESULTADOS

3.1. Distribución temporal de las series utilizadas compuestas por los pacientes registrados

Series mensuales. Con el objeto de conocer la distribución de la serie formada por los niños con enfermedades respiratorias (N) en los distintos meses del año, en la Figura 1 se representa para cada mes, la frecuencia de los pacientes que no llegan al primer año de vida (meses) y al resto de niños agrupados en períodos de un año de edad (1 a 14 años). En la variación estacional de la serie se evidencia un predominio de los casos producidos en los meses invernales (Figura 2). También es notable el mayor número de niños menores de 1 año, respecto al resto. A medida que la edad aumenta, los extremos se suavizan, es decir, disminuye la amplitud. Los niños de 0 meses a 4 años ($N(0 - 4)$) llegan anualmente y

en todo el periodo al 65% (54557) de los casos comprendidos entre 0 y 14 años (83610) y en invierno el número de pacientes $N(0 - 4)$ es mayor al 71%. El 29% restante corresponde a los pacientes entre 5-14 años.

En la Figura 1, se observa una disminución del número de casos en los años calendarios mas recientes, especialmente para los pacientes más pequeños. Antes de conocer las posibles influencias de las variables meteorológicas relacionadas con esta disminución, se calcularon las frecuencias mensuales relativas de los niños de 0 a 14 años de edad respecto al número total de pacientes que llamaron a la empresa de Ayuda Médica con distintos síntomas, donde se incluyen los respiratorios. Estas frecuencias mensuales relativas no se tomaron respecto al número total de socios de la empresa, debido a la imposibilidad de obtenerlos por lo mencionado en DATOS. La Figura 3 muestra las frecuencias relativas y la tendencia lineal; en ella se observan los mayores casos invernales y los menores estivales. La tendencia no significativa denota una falta de variabilidad interanual de las frecuencias relativas, es decir que también ha disminuido la cantidad de pacientes del resto de las enfermedades. Muy posiblemente, debido a la renuncia por factores económicos de quienes utilizan el servicio de la empresa médica o por otras causas ajenas a este análisis.

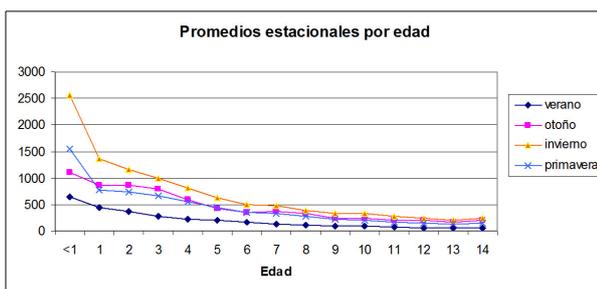


Figura 2: Distribución estacional de pacientes con enfermedades respiratorias (N) según la edad tomadas en períodos de un año.

Distribución relativa a la población. Para comparar las distribuciones halladas con las de la población de la Ciudad de Buenos Aires y

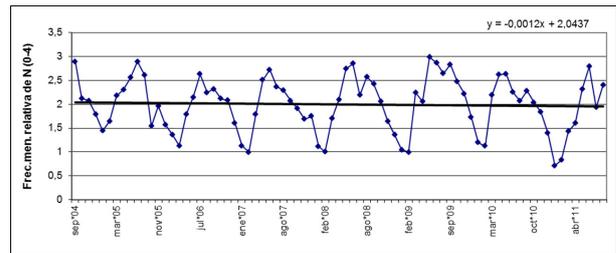


Figura 3: Frecuencias relativas de niños de 0 a 14 años en los años del período considerado y su tendencia lineal.

alrededores, se toma el censo realizado en 2001. No se tomó el último censo de 2010, por no estar disponible en el momento de la realización de este trabajo. Debido a que en el citado censo los pobladores fueron agrupados cada cuatro años, se agrupa de igual manera a los pacientes, es decir, la serie analizada se divide en tres intervalos.

Para cada uno, se calcula la frecuencia. relativa respecto al total de pacientes de 0 a 14 años. De igual manera se procede con los datos del censo 2001 en iguales períodos de edades

Luego se calcula el cociente entre ambas frecuencias relativas (R). Si esta relación es mayor a 1, significa en un determinado rango, que la cantidad de pacientes es mayor en relación a la población de ese mismo rango de edad. Este resultado ($R > 1$) se obtiene para el período de 0 a 4 años, a través del cual se puede confirmar la predominancia de los niños más pequeños. Los coeficientes R se grafican en la Figura 4.

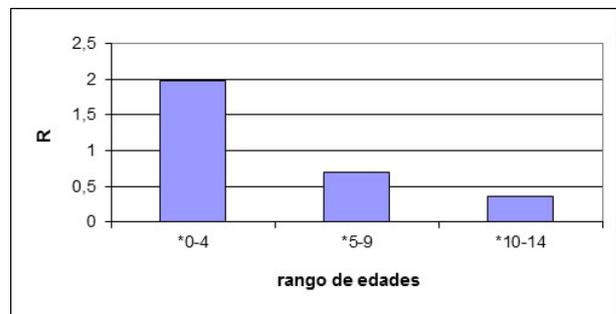


Figura 4: Coeficiente R para distintos rangos de edades.

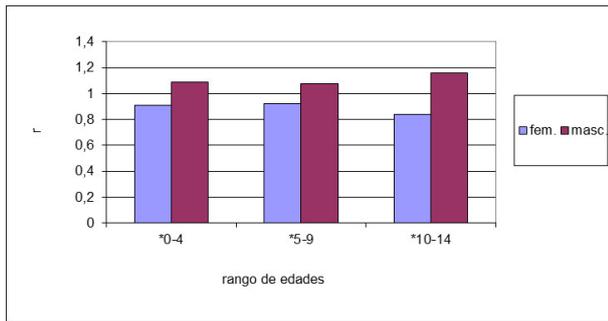


Figura 5: r según sexo y edad.

Con el objeto de determinar si los pacientes masculinos y femeninos son afectados de forma similar, en la Figura 5 se presenta el porcentaje de pacientes masculinos en los distintos rangos de edad, apreciándose que el sexo masculino supera al femenino. De igual manera que para el cálculo de R , se procede con las frecuencias de pacientes según el sexo y se obtiene r ; estos valores reafirman la mayor sensibilidad masculina.

Frecuencia diaria de pacientes menores o iguales a 4 años, según T , T_{max} , T_{min} , T_d , $H\%$ y P_r . Las figuras 6 a), c), e), g) e I) presentan la distribución diaria de pacientes, según los intervalos elegidos de valores diarios de cada variable.

Las Figuras 6 b), d), f), h) y J) representan la frecuencia diaria de pacientes por día, en cada intervalo de cada variable; los intervalos son iguales a los utilizados en a), c), e), g) e I). El objetivo de estos últimos es tener en cuenta la cantidad de días que cumplen con las condiciones determinadas por cada intervalo de clase. Así, por ejemplo, para T en el rango de temperatura entre $2,9$ y $7,8^\circ\text{C}$ se producen menos casos (7152) que en el rango entre $7,9$ y $12,8^\circ\text{C}$ (15557) pero hay 216 días con temperaturas del primer rango y para el segundo 526 días, entonces para el primero la cantidad de pacientes por día es mayor que para el segundo. Nuevamente, en estos últimos valores se puede observar el decrecimiento del número de pacientes por día, con el aumento de las distintas temperaturas y un aumento más suave

con la humedad relativa y la presión.

3.2. Distribución mensual de las variables meteorológicas

En la Figura 7 se muestran las marchas mensuales de las temperaturas (a) y de la humedad y presión (b), en ella se puede observar que las temperaturas medias no presentan una tendencia en los valores invernales, Se advierte un mínimo más pronunciado en el año 2007 y uno secundario en el 2009. En el período analizado no se observa un aumento de las temperaturas, así tampoco como una disminución de la presión o de la humedad relativa, que puedan estar relacionados con la disminución de la frecuencia de pacientes graficadas en el inciso A.

Por otra parte, las menores temperaturas de los meses fríos, a excepción del 2007, no se ven reflejados en el aumento del número de pacientes.

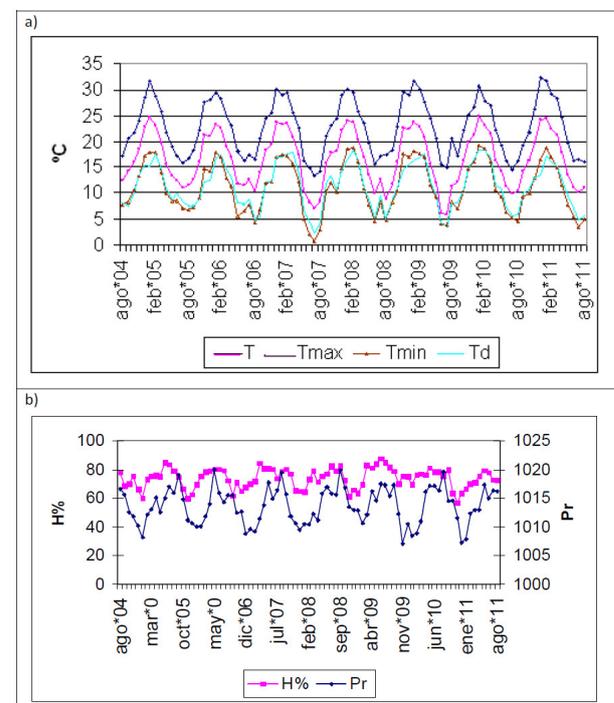


Figura 7: Distribución del valor medio mensual de a) T , T_{max} , T_{min} , T_d de b) $H\%$ y P_r .

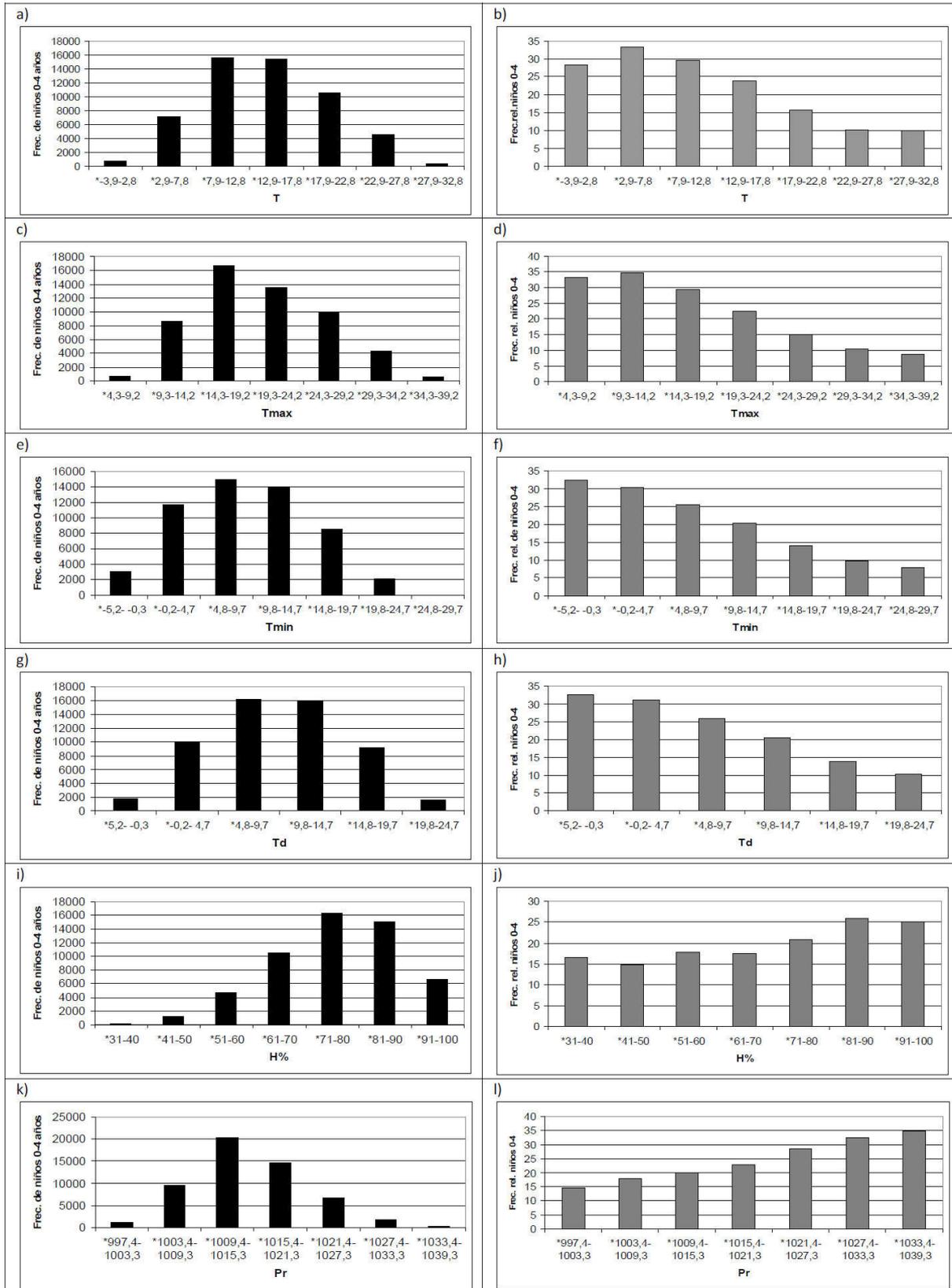


Figura 6: Distribución de pacientes menores o iguales de 4 años de edad según los valores de T (a), Tmax (c), Tmin (e), Td (g), H%(h) y Pr (j) de la serie 08/2004 a 08/2011. Frecuencia relativa de niños en igual rango de edad y variables (b, d, f, h, j, l).

Correlación Lineal. Se correlacionan los valores medios diarios y mensuales de T , T_{max} , T_{min} , T_d , $H\%$ y P_r , con el número de pacientes de distintos rangos de edad (Tabla I).

Datos	Edad	Coeficientes de correlación					
		T	Tmax	Tmin	Td	H%	Presión
Diarios	0-14	-0,55	-0,59	-0,50	-0,48	0,22	0,02
	0-4	-0,51	-0,52	-0,51	-0,52	0,22	0,02
	5-14	-0,46	-0,48	-0,42	-0,40	0,19	0,03
Mensuales	0-14	-0,72	-0,76	-0,72	-0,69	0,44	0,59
	0-4	-0,71	-0,75	-0,71	-0,69	0,42	0,57
	5-14	-0,72	-0,74	-0,71	-0,67	0,47	0,59
Mens.relativos	0-14	-0,81	-0,82	-0,79	-0,74	0,59	0,71

Tabla I: Correlaciones diarias y mensuales entre el número de pacientes de distintos rangos de edad y las variables meteorológicas.

A excepción de la presión, todas las correlaciones diarias son significativamente diferentes de cero, al nivel del 95 % ($\pm 0,19$, Brooks and Carruthers, 1953).

Además, se correlacionan las frecuencias relativas mensuales de los niños 0-14, calculadas en el inciso 1-a) y los valores medios de las variables. Se puede notar un aumento importante en el valor de las mismas.

Con el fin de investigar si un cambio brusco entre días consecutivos de alguna de las variables, sería la causa de un número mayor de pacientes, para cada una de ellas (V) se calcula la diferencia entre el valor del día anterior i (V_i) y el valor del día $i + 1$ (V_{i+1}) en que se produjo el registro. Estas diferencias ($V_i - V_{i+1}$) se correlacionan con el número de pacientes (P) del día $i + 1$ (P_{i+1}). Estos resultados no han variado significativamente, respecto a los calculados con $lag = 0$.

En la Figura 8 se grafican los coeficientes de correlación entre cada una de las variables elegidas y el número de pacientes según cada año de edad; en ella se observa que las mejores correlaciones corresponden a las vinculadas con las temperaturas y a los niños menores de 4 años. A medida que la edad de los niños aumenta, los coeficientes disminuyen. Se calculan también las

correlaciones según el sexo (no se muestran) pero éstas difieren poco entre sí.

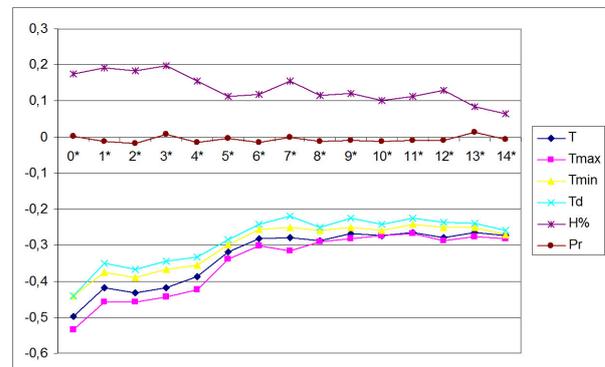


Figura 8: Coeficientes de correlación entre T , T_{max} , T_{min} , T_d , $H\%$ y P_r y los pacientes en períodos de 1 año de edad.

Los coeficientes mensuales de correlación resultan, aproximadamente, un 40 % mayores que los coeficientes diarios para los primeros años de vida. Estos resultados varían poco cuando se toman a los de mayor edad.

Por otra parte, para cada variable, se consideran todos los meses de mayo, junio, julio y agosto de la serie y se los correlaciona con N y $N(0 - 4)$. De acuerdo a los resultados, a excepción de la correlación significativa entre $N(0 - 4)$ y la presión (0,52), las diferentes temperaturas de esos meses no influyen en el número los pacientes. Es decir, que los años cuyos meses fríos poseen temperaturas más bajas, no coinciden con los de mayor frecuencia de pacientes.

Correlación Múltiple. En el inciso anterior se calcularon las correlaciones simples entre el número de pacientes y cada una de las variables elegidas. Si bien la correlación entre N y las variables meteorológicas presentan mayormente valores significativamente distintos de cero en el nivel del 95 %, se quiere ver cual de ellas contribuye más al aumento del número de pacientes.

La Tabla II muestra los resultados de las correlaciones diarias y mensuales, realizadas con

Rango de edades	Ecuaciones de Stepwise	ρ	ξ	DS	D I A R I A M E N S.
0-14	474,1-1.85Tmax -0.39Pr -0.31Tr	0.61	15.9	20	
0-4	53.49-1.28Tmax-0.48Tr-0.03Pr	0.59	17.4	35	
<1	104.98-.32Tmax-0.8Tr	0.59	19.9	41	
0-14	100.5-2.7T	0.78	13.3	20	M
0-4	1971.5-90.2Tmax+42T	0.76	12.1	24	E
<1	28.4-0.6T	0.78	11.8	14	N S.

Tabla II: Ecuaciones de correlación múltiple, obtenidas por el método de Stepwise.

el método de Stepwise (Sw), procedimiento recomendado por Draper and H. Smith (1981), Debido a los altos valores de las correlaciones entre las temperaturas elegidas como variables, las variaciones en una de ella estarán reflejadas en cualquiera de las otras tres.

Se aplica este método para tres períodos de edades. Los resultados se transcriben en la Tabla II, así también como los coeficientes de correlación (ρ), el error cuadrático medio (ξ) y la desviación estándar de la serie que conforma a cada subgrupo. Los ξ resultaron menores a las desviaciones standard (DS) de las series, por ello el ajuste realizado a través del método se puede considerar bueno (Rao V. B. at al , 1997).

Para el rango de pacientes entre 0-4 de edad, en la Figura 9 se representan los datos diarios y mensuales reales de la serie utilizada (rosa) y los determinados por el método Sw (azul). Se advierte que los máximos y mínimos están en fase pero los máximos son más pronunciados que los de la aproximación realizada. Ambos sexos (no se muestra) presentan características similares a las obtenidas para toda la muestra. En los mensuales existe una suavización de las series y un aumento de la correlación respecto a los valores diarios.

3.3. Situaciones sinópticas medias

Si bien se ha mostrado que la onda anual de la temperatura es la de mayor incidencia sobre la cantidad de pacientes, se quiere ver cómo es la situación media sinóptica en que se produce el mayor o menor porcentaje de pacientes diarios. Se presentan solo los campos

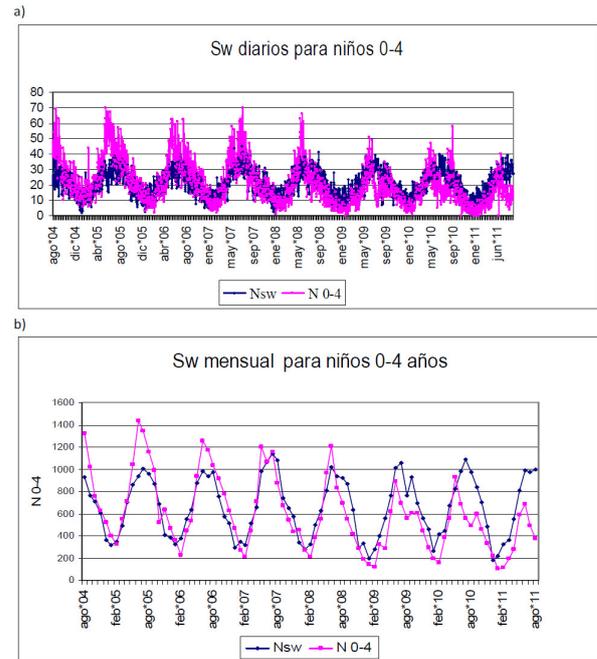


Figura 9: Distribución de valores diarios (a) y mensuales (b) calculados según Stepwise (Nsw) para niños de 0-4 años de edad (N 0-4).

medios de alturas geopotenciales de 1000 hPa, por ser este nivel el que mejor puede explicar los valores de temperatura.

La Figura 10 representa, para el rango de edad más sensible ($N(0 - 4)$), el campo medio de alturas geopotenciales de los días en que no se registró ningún paciente o solo 1 (42 días, con un total de 26 casos), correspondientes a los meses de verano (a), la situación media de todos los días durante los cuales el número de casos fue mayor o igual a 69 (48 días, con un total de 3219 casos) (b) y el caso de 14 días consecutivos de junio de 2005 con 69 o mas pacientes diarios (14 días, con 1021 casos) (c). Con el fin de ver el apartamiento de las situaciones medias respecto a la normal y de quitar la estacionalidad para poder compararlas, a la derecha (a', b', c') se muestran los respectivos campos de anomalías de alturas geopotenciales.

En las figuras 10 a) y b) y en la zona elegida se observan anomalías positivas entre

10 y 60 mgp respectivamente, indicando la presencia de un cinturón y de un sistema de alta presión mas intenso, especialmente para el correspondiente a la secuencia de altos valores en días consecutivos. Estas anomalías no son significativas para la primera muestra seleccionada y lo son para la segunda, si se tiene en cuenta la media y varianza invernal del período 58/71 de Ezeiza en 1000 hPa de $146 \text{ mgp} \pm 51 \text{ mgp}$, respectivamente (Inés Velazco y otros, 1980). Si bien los resultados muestran mayor presión en la región analizada para los casos de mayor frecuencia diaria, esta característica se debilita cuando se analizan los campos medios correspondientes a valores diarios de pacientes menores a 69. Dicha característica se refleja en la baja correlación diaria con la presión halladas anteriormente.

Además, se advierte un debilitamiento de la depresión del noroeste argentino (DNOA), que normalmente provee aire cálido y húmedo del norte.

Hay que destacar, que debido a la asimilación de datos realizados por el modelo del NCEP, muchas veces el máximo positivo espúreo representado por las salidas del mismo en el NW produce un desplazamiento de la DNOA hacia el este. Por lo tanto, la influencia de la DNOA sobre las variables meteorológicas se distorsionan, como fue demostrado por Alessandro (2008).

En el campo medio (Fig. 10 c)) que representa a los casos en que se registró diariamente un solo paciente o ninguno, las condiciones de presión son normales, con predominio de bajas presiones en el resto del territorio argentino.

3.4. Índices de circulación

Para poder describir a la circulación atmosférica vinculada a la frecuencia de pacientes en forma cuantitativa, se utilizan índices de circulación.

Muchos investigadores han usado distintos índices como, por ejemplo, el Southern

Oscillation Index (SOI \rightarrow (Tahití- Darwin)), el Trans-Polar Index (Jones P. D et al, 1999), el Antarctic Oscillation index (Jones J. M. et al, 2003), el Monsoon Index (Kinter III J. L et al, 2002; Lee et al, 2005; Kajikawa et al, 2010).

Anteriormente, la autora (Alessandro, 1998 a) y b), 2003, 2008, 2011a)) utilizó tres índices de circulación: Zonal, Meridional y de Curvatura. En el trabajo del año 2003, estudió la vinculación de la circulación con el stress humano en la Ciudad de Buenos Aires, con el fin de poder alertar a la población de la posibilidad de un incremento de esta afección a partir del conocimiento de la misma. El 67 % de los casos estudiados de stress correspondieron a una combinación de los índices.

En este trabajo se utilizan los índices Meridional y de Curvatura. Se aplican en los 35°S y en los niveles de 1000 y 500 hPa. El índice meridional R presenta una buena asociación con la temperatura; si $R > 0$ indica mayor presión sobre el Océano Pacífico que en el Atlántico. En 500 hPa, R se comporta de forma similar respecto a la temperatura. Si $R < 0$ estas condiciones se invierten y se puede producir advección de aire caliente

El índice de curvatura (C) describe a la circulación ciclónica o anticiclónica. $C > 0$ (< 0) representa un sistema de baja presión (alta) en el territorio argentino.

Los índices se definen como:

$$R(\text{mgp}) = h(35, 75) - h(35, 50)$$

$$C(\text{mgp}) = h(35, 75) + h(35, 50) - 2 * h(35, 62,5),$$

donde h es la altura geopotencial en 1000 hPa tomado en 35° de latitud sur y en 75° , 50° y 62.5° de longitud oeste.

Índice	Diario	Mensual
R	0.17	0.53
C	-0.25	-0.61

Tabla III: Correlaciones diarias y mensuales entre N (0-4) y el índice meridional R y el de curvatura C .

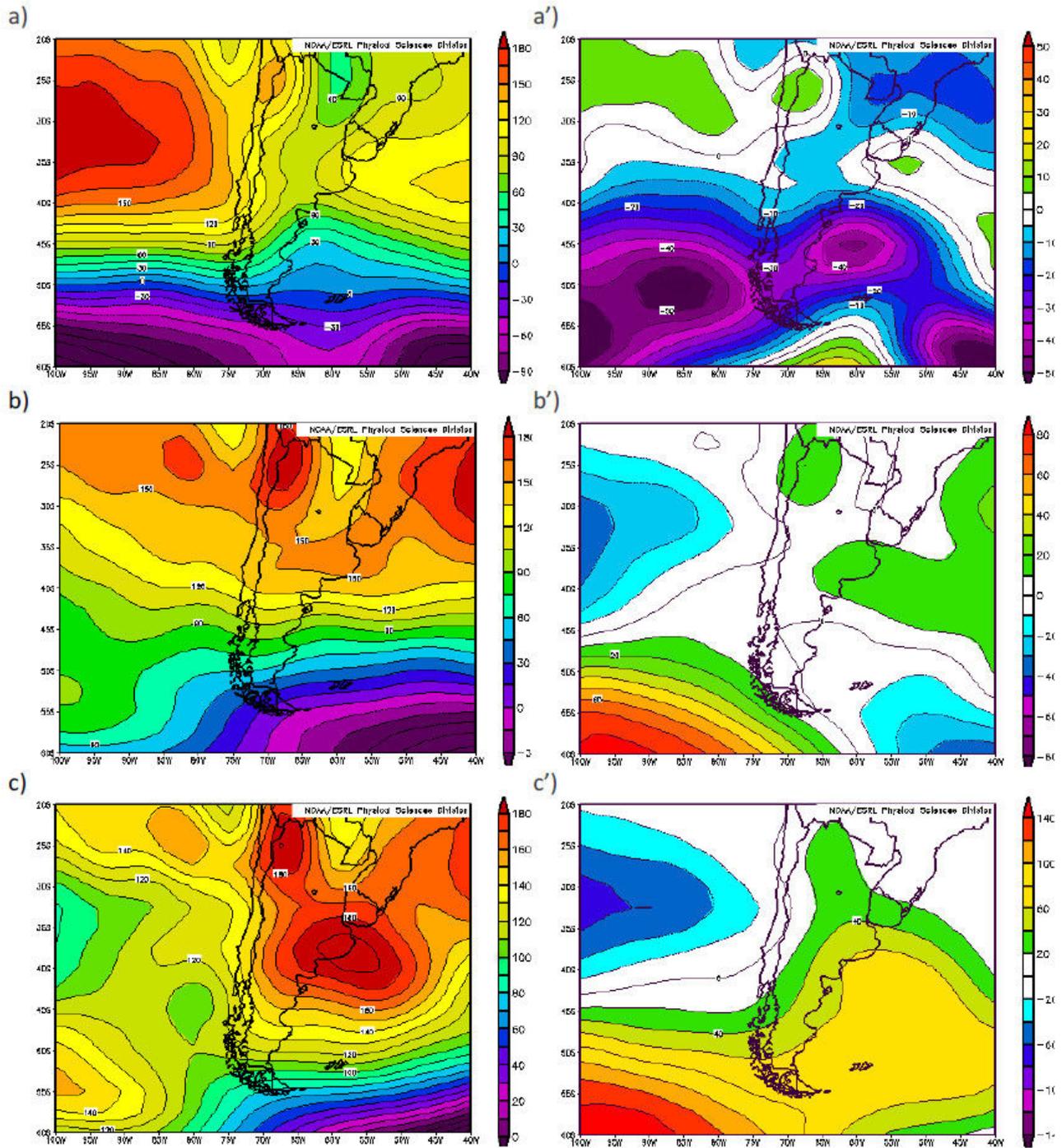


Figura 10: Campos medios de alturas geopotenciales en 1000 hPa correspondientes al rango 0-4 años cuando: a) es menor o igual a 1 caso por día, b) mayor a 69 casos por día, c) para el mes de junio de 2005 donde se dieron mas días consecutivos de valores mayores a 69 y (a',b' y c') los campos de anomalías respectivos.

La Tabla III muestra las correlaciones diarias y mensuales entre $N(0 - 4)$ y los índices R y C . $R > 0$ se asocia con advección de aire frío y

$C < 0$ con el dominio de una alta en el país. A excepción de R aplicado a los valores diarios, las correlaciones fueron significativamente distintas

de cero, en el nivel del 95 % (0.19, 0.33- diario, mensual). El índice C representa la mejor relación con los valores mensuales de pacientes, mientras que con los diarios es baja. Estos resultados son consistentes con los valores de las correlaciones entre N y las temperaturas así también como con las situaciones medias mostradas en el inciso anterior.

4. CONCLUSIONES

- El mayor porcentaje de pacientes corresponde a los niños menores de 4 años ($N(0-4)$) y, dentro de este rango, a los niños menores de 1 año. El sexo masculino es más sensible frente a las enfermedades respiratorias.

- Existe una fuerte relación estacional en la serie formada por los niños menores o iguales de 14 años (N), con máximos valores en los meses más fríos y mínimos en los más cálidos.

- Las correlaciones lineales mensuales entre N y temperatura (T), temperatura máxima (T_{max}), temperatura mínima (T_{min}), temperatura de rocío (T_d), presión (P_r) y humedad relativa ($H\%$) resultan significativamente distintas de cero en el nivel de confianza del 95%. Las correlaciones diarias con la presión no resultan significativas, tampoco son significativas cuando se tienen en cuenta cambios bruscos entre los valores de 2 días consecutivos. para cada una de las variables.

- De la comparación entre los meses fríos (mayo, junio, julio y agosto) de cada año y los pacientes mensuales de 0-14 años, se deduce que los años cuyos meses fríos poseen temperaturas más bajas, no coinciden con las mayores frecuencias de pacientes. Las correlaciones entre los meses más fríos de los 7 años estudiados y $N(0-4)$ arrojan solo una correlación significativa de 0,52 con la presión.

- A través del método de Stepwise, se determinan los valores de N diarios (mensuales) esperados con un error entre 15.9 y 19.9 (11,8 y 13.3), pero no detecta a los casos extremos. Se

estima que estos son producidos por otras causas ajenas a las variables meteorológicas utilizadas.

- Para $N(0-4)$, la situación sinóptica media formada por los días correspondientes a casos de máxima cantidad de pacientes diarios (mayor o igual de 69) y la formada por la mayor cantidad de días consecutivos de alta frecuencia (junio de 2005), presentan características opuestas a la determinada por los días de menor número de pacientes (1 o ninguno). Las dos primeras presentan sobre Bs. As., o en sus proximidades, un cinturón o un sistema de alta presión con anomalías de 20 a 60 mgp, respectivamente. Sólo este último valor es significativo al 68% de una distribución normal. Estas anomalías se debilitan, al considerar los campos medios formados por las frecuencias diarias de pacientes menores a 69. La situación media formada por los días en que se registra un solo paciente o ninguno, presenta valores normales de presión.

- Las correlaciones entre el índice de circulación C y los valores diarios (-0.25) y mensuales (-0.61) de pacientes $N(0-4)$ son significativamente distintas de cero en el nivel del 95%. La correlación con el índice R solo es significativa con los valores mensuales (0.53).

- Los resultados obtenidos son una primera aproximación del problema propuesto. Es necesario tener una base de datos, donde se especifique la hora del comienzo del síntoma y, si es posible, hacer el seguimiento de un conjunto de pacientes voluntarios sensibles a estas afecciones.

Agradecimientos: A la UBA quien a través del subsidio Ex228 ha financiado este trabajo y a la empresa Ayuda Médica por los datos proporcionados.

REFERENCIAS

Alessandro, A. P., 1998 a). Contribuciones al estudio de la climatología sinóptica en la Argentina. Tesis Doctoral de la Universidad

- de Bs As. Capítulos, 3, 5 y 6.
- Alessandro, A. P., 1998 b). A meridional circulation index and the precipitation in Argentina. *Austr. Met. Mag.* 47 . 167-170.
- Alessandro A. P. - Alicia de Garín, 2003. A study on predictability of human discomfort in Buenos Aires city. *Meteorological Applications*, 263-271,. ISSN 1450-4827.
- Alessandro, A. P. y Tolcachier A., 2006. Influencia de los parámetros meteorológicos sobre el asma en la Ciudad de Buenos Aires. Presentado en el XIV Congreso Brasileiro de Meteorología. 27/ 11 al 1/12/06 Florianópolis y en CD. noviembre 2006. Brasil.
- Alessandro, A. P., 2008. Anomalías de la circulación atmosférica en 500 y 1000 hPa asociada a la sequía producida en la Argentina durante Enero de 2003 a Marzo de 2004. *Revista Brasileira da Meteorología* 23(1): 12-29.
- Alessandro, A. P. 2011 a). Relationship between values and trends of two circulation indices and temperature and rainfall in Argentina. *Meteorological Application* (2011). Published online in Willey Online Library. DOI:10.1002/met 274.
- Alessandro, A. P. 2011 b). Respiratory diseases in the greater Buenos Aires and meteorological variables. *Meteorological Application* (2011). Published online in Willey Online Library. DOI:10.1002/met 278.
- Brooks, C. E. and Carruthers, N., 1953. *Handbook of Statistical Methods in Meteorology.* 237-239.
- Draper, N. R. and Smith, H. ,1981: *Applied Regression*, 181.Pags. 307-311.
- Jones, P. D, Salinger, M. J. and Mullan, A. B. , 1999. Extratropical circulation indices in the Southern hemisphere based on station data. *International Journal of Climatology* Vol. 19, 1301-1317.
- Jones, J. M. and Widmann, M., 2003. Instrument- and Tree-Ring-Based Estimates of the Antarctic Oscillation. *Journal of Climate*, Vol. 16, 3511-3524. Issue 21
- Kajikawa, Yoshiyuki; Bin Wang and Jing Yang, 2010. A multi-time scale Australian monsoon index. *International Journal of Climatology*, Vol. 30, 1114-1120. Issue 8.
- Kashiwabara, K. , Kohrogi, H. , Ota, K and Moroi, T. , 2002. High frequency of emergency room visits of asthmatic children on misty or foggy nights. *J Asthma.* 2002 misty or foggy nighths. *Asthma.* Dec; 39(8):711-7.
- Kinter, III J. L and Miyakoda, K., 2002. Recent Change in the Connection from the Asian Monsoon to ENSO. *Journal of Climate*, Vol.15. n°10. 1203-1215.
- Lee Eun-Jeong, Jong-Ghap Jhun and Chung-Kyu Park, 2005. Remote Connection of the Northeast Asian Summer Rainfall Variation Revealed by a Newly Defined Monsoon Index . *Journal of Climate* Vol. 18(21), 4381-4393.
- Rao, V. B., Sá, L. D. A., Franchito, S. H., Kioshi Hada, 1997. Interannual variations of rainfall and corn yields in Northeast Brasil. *Agricultural and forest Meteorology* 85. 63-74.
- Tolcachier, A. J. y colaboradores, 1994. Distribución y frecuencia de casos de Asma bronquial en consultas pediátricas de urgencia en la Capital Federal durante 1992. *Archivos argentinos de Alergia e Inmunología clínica-* Vol. 26, N° 2..Pags: 82-90.
- Santic Z. , Santic, K. , Ondza, D. and Bogut S. , 2002. The relationships between the asthma and weather. *Med Arh*;56(3).
- Wardman, A. E., Stefani D, and Mac Donald J. C., 2002. Thunderstorm-associated asthma or shortness of breath epidemic: A Canadian case report. *Can Respir J.* Jul-Aug;9(4):267-70.

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo la licencia Creative Commons, que permite el uso ilimitado, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada.

CALIBRACIÓN DE UN MODELO HIDROLÓGICO UNIDIMENSIONAL PARA LAS ESTACIONES DE DIAMANTE Y PARANÁ, ENTRE RÍOS

Gonzalo Díaz^{1,2}, Moira Doyle^{1,2} y Armando Brizuela³

¹Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CONICET-UBA, UMI-IFAECI)

²Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, FCEN – UBA. Intendente Guiraldes 2160, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.

³Facultad de Ciencias Agropecuarias UNER – CICyTTP CONICET.

(Manuscrito recibido el 31 de marzo de 2013, en su versión final el 9 de octubre de 2013)

RESUMEN

Dado el impacto que tiene el contenido de humedad en el suelo en meteorología y en distintas actividades como la agricultura y la ganadería, es de importancia desarrollar métodos que mejoren la estimación de la misma. Esta tarea puede llevarse a cabo mediante la ubicación de sensores de humedad en el terreno, a través del uso de información satelital o utilizando Modelos Hidrológicos. Este trabajo presenta los resultados de la calibración del modelo hidrológico CLASS U3M 1D para las estaciones de Diamante y Paraná, provincia de Entre Ríos. A partir de las cartas de suelo de Argentina y de las funciones de edafotransferencia, se estimaron algunos de los parámetros hidráulicos del modelo. Los resultados obtenidos fueron estadísticamente significativos al 99 %, con valores de correlación entre la serie observada y simulada, en general, del orden de 0.6 y 0.7 para Diamante y entre 0.3 y 1 para Paraná. El Error Cuadrático Medio se mantuvo aproximadamente en 0.06 m³/m³ para Diamante y entre 0.03 m³/m³ y 0.18 m³/m³ para Paraná según la simulación. Al correlacionar las simulaciones de la humedad del suelo obtenidas a partir de modificar el método de estimación de la evapotranspiración, usada como variable de entrada al modelo hidrológico, se obtuvieron valores cercanos a 1. Esto permite utilizar métodos más sencillos en la estimación de la evapotranspiración con resultados igualmente robustos.

Palabras clave: Modelos Hidrológicos, humedad del suelo, Funciones de Edafotransferencia, evapotranspiración.

CALIBRATION OF AN UNIDIMENSIONAL HYDROLOGICAL MODEL FOR DIAMANTE AND PARANA STATIONS, ENTRE RIOS

ABSTRACT

It is important to develop methods to improve the estimation of the soil moisture content, because of the impact in the weather and in various activities, such as agriculture and livestock. This task may be done by placing moisture instruments in the ground at different points and levels, through the use of remote sensing information, or running Hydrological Models. This work shows the results of the hydrological model CLASS U3M 1D calibration for Diamante and Parana

stations in the province of Entre Rios. The hydraulic parameters were estimated through the information obtained from Argentina Soil Maps and the Pedotransfer Functions. The results were statistically significant at 99 %, with correlation values between the observed series and the simulated series, in general, on the order of 0.6 and 0.7 for Diamante and between 0.3 y 1 for Parana. The root mean square error remained approximately in 0.06 m³/m³ for Diamante and between 0.03 m³/m³ and 0.18 m³/m³ for Parana depends on the simulation. After applying a variation in the evapotranspiration input variable, correlation values close to 1 were obtained when the models results were compared.

Keywords: Hydrological Models, soil moisture, Pedotransfer Functions, evapotranspiration.

1. INTRODUCCIÓN

Se ha comprobado a través de los años la importancia de estimar el movimiento del agua dentro del suelo, tanto para la agricultura como para la prevención de eventos severos, como inundaciones o sequías. El monitoreo de la humedad del suelo es fundamental para estudiar estos eventos y existen diversas formas de obtener registros de esta variable, ya sea mediante sensores de humedad ubicados a diferentes profundidades en el suelo, a través del uso de información satelital o como el resultado de aplicar Modelos Hidrológicos (MH). Actualmente en la Argentina, el método que menos se utiliza es el de los sensores de humedad, hay muy pocas estaciones meteorológicas en el país que cuenten con sensores de este tipo que realicen mediciones en forma continua, esto se debe a su alto costo de instalación y de calibración. A diferencia de este método, el uso de imágenes satelitales es una técnica más usual en nuestro país, pero existe un problema de escala temporal, ya que los tiempos de revisita de los satélites suelen ser muy grandes y esto hace difícil llevar un registro continuo de la humedad del suelo con este procedimiento. Por lo tanto, la utilización de MH para obtener información de la humedad del suelo en todo momento, es una de las opciones que se podría utilizar.

En general los modelos de balance hidrológico se basan en la implementación de la ecuación

de Richards trabajando en la zona no saturada del suelo. Algunos de los modelos existentes han sido evaluados por Alexander y otros (1986) y Leij y otros (1997). Para el transporte de agua y de diferentes sustancias químicas y minerales dentro del suelo, es importante simular las propiedades hidráulicas del suelo cerca de la saturación (Borgesen et al. 2006); como la curva de retención de agua y la función de la conductividad hidráulica, por ello los MH generalmente vienen acoplados con modelos hidráulicos como los desarrollados por Van Genuchten (1980); Brooks y Corey (1966); Vogel y Cislserova (1988).

Asimismo, la cantidad de agua almacenada en el suelo depende de diversas variables. Las meteorológicas que influyen en gran medida en el contenido de agua del terreno son la precipitación y la evaporación. De estas, la evaporación y la evapotranspiración (ET) siempre han sido variables difíciles de calcular o estimar, por lo tanto se han ideado diferentes metodologías para estimarlas. Estos procedimientos se basan en calcular la evaporación o la ET en función de variables meteorológicas más usuales, como temperatura, humedad del aire, viento, radiación, etc.

Desde los años 70 se ha intentado mejorar el cálculo para la estimación de ET ya que, por ejemplo, el método de Penman producía con frecuencia sobreestimaciones del valor de ET. En este sentido, en los años 90, la FAO llevó a cabo una consulta a expertos

e investigadores, con la colaboración de la Comisión Internacional de Riego y Drenaje y la Organización Meteorológica Mundial, para revisar las metodologías de estimación. Esto dio como resultado la adopción del método combinado de Penman – Monteith como el nuevo procedimiento estándar para la estimación de la ET que utiliza para el cálculo las variables de temperatura, humedad, viento y radiación. Cuando no se cuenta con la mayoría de estas variables, se puede utilizar un método alternativo, como el propuesto por Hargreaves y Samani (1985), donde se reducen las variables necesarias a temperatura y radiación extraterrestre. En principio, esta ecuación es aplicable a una escala de tiempo diario, pero si es necesario, puede ser calibrada para utilizarse a escala mensual o anual. La FAO propone varios métodos que toman en cuenta la base temporal y los datos disponibles para las estimaciones de ETo (FAO, 2006).

La motivación de este trabajo se basa en la aplicación de un MH en la provincia de Entre Ríos. Se busca adaptar esta herramienta a la región y poder utilizarla para el análisis de eventos severos, como inundaciones. Asimismo, se aplica el modelo en regiones donde se cuenta con datos medidos de humedad del suelo, como es Entre Ríos, y luego extenderlo a regiones con perfiles de suelo sean similares a los de las estaciones de esta provincia donde no se cuentan con mediciones.

El trabajo está organizado de la siguiente manera. En la sección 2 se indican los datos de las estaciones utilizadas y la metodología a seguir para llevar a cabo la calibración del MH, también se discuten los parámetros del modelo y los ajustes para obtener los mejores resultados. En la sección 3, se muestran los resultados de humedad del suelo obtenidos por el modelo, contrastados con los datos observados. Además, se expone un análisis de la influencia de la ET sobre los resultados del MH. Sobre esta base se realizaron diferentes simulaciones, una en la cual una de las variables de entrada se obtiene del método de Penman – Monteith y otra que

utiliza el método de Hargreaves. Por último, en la sección 4, se presentan las conclusiones.

2. DATOS Y MÉTODOS

Se utilizaron series de datos diarios de estaciones automáticas de Diamante y Paraná en Entre Ríos. La estación meteorológica de Diamante se encuentra ubicada en el Departamento de Diamante en la provincia de Entre Ríos siendo sus coordenadas geográficas 32° 03' S y 60° 39' O. La misma cuenta con sensores para medir temperatura, humedad, viento, precipitación, energía solar y humedad del suelo a distintas profundidades (7 cm, 20 cm. y 60 cm.) mientras que la evapotranspiración es estimada a partir de la ecuación de Penman - Monteith. La estación meteorológica de Paraná se encuentra ubicada en el Departamento de Paraná en la provincia de Entre Ríos con coordenadas geográficas 31° 43' S y 60° 31' O. La misma cuenta con sensores de temperatura y precipitación en superficie y humedad del suelo a distintas profundidades (5 cm, 10 cm, 20 cm. y 60 cm.) y la estimación de la evapotranspiración se realiza como en Diamante. Tanto el sensor de Diamante como el de Paraná son sensores de resistencia eléctrica (Watermark Soil Moisture Sensor). La serie de datos de Diamante se extiende desde el 01 de enero del 2008 hasta el 30 de abril del 2010, mientras que la serie de datos de Paraná, abarca el período desde el 01 de junio del 2009 hasta el 31 de marzo del 2010. La estación de Diamante pertenece al CICYTTP-CONICET y la de Paraná a la Dirección de Hidráulica de la provincia de Entre Ríos.

El modelo hidrológico utilizado en este trabajo es el CLASS U3M 1D (Unsaturated Moisture Movement Model). Fue desarrollado en Australia por el Departamento de Infraestructura, Planeamiento y Recursos Naturales (Tuteja et al. 2004) para resolver la ecuación de Richards en una dimensión, trabajando en la zona no saturada del suelo y con un modelo hidráulico acoplado.

Para cada punto donde se desea ejecutar el modelo es necesario disponer, para el período de tiempo a analizar, no solamente de las condiciones meteorológicas que afectan directamente el balance de agua en el suelo, es decir precipitación y evapotranspiración diaria, sino también de información sobre la cubierta vegetal del lugar y las propiedades del suelo. El modelo permite establecer valores de espesores para el perfil del suelo, pudiendo discriminarse hasta 4 niveles, con sus correspondientes características texturales. En base al tipo de suelo, se deben ajustar los parámetros hidráulicos, entre ellos el potencial matricial de los puntos de Capacidad de Campo (CC) y de Punto de Marchitez Permanente (PMP) y otros que dependerán del modelo hidráulico escogido. CLASS U3M 1D incluye 3 tipos de modelos hidráulicos, ampliamente utilizados, elaborados por Van Genuchten, Brooks - Corey y Vogel - Cislérova. En cuanto al uso del suelo, es necesario determinar el correspondiente Índice de Área Foliar (IAF) según el tipo de cobertura vegetal (pasto, cultivo o bosque). Con esta información, el modelo devolverá resultados sobre las condiciones de humedad de suelo en los distintos niveles, como así también los excesos de agua producidos en cada paso de tiempo.

En el proceso de obtener el mejor ajuste entre la humedad del suelo observada y la estimada por el modelo, se analizaron por separado los impactos sobre los resultados al modificar las 3 principales componentes del modelo: el modelo hidráulico y sus parámetros, el uso del suelo y las variables meteorológicas.

Los valores de los parámetros hidráulicos de los suelos utilizados en el modelo para las estaciones de Diamante y Paraná fueron estimados a partir de relaciones empíricas. Estas relaciones se definen como Funciones de Edafotransferencia o Pedotransferencia. (FET o FPT), ideadas inicialmente por Briggs y McLane (1907). La ventaja de estas funciones se encuentra en utilizar variables de suelo mayormente conocidas (como la textura del suelo, densidad aparente y materia orgánica, las

cuales fueron obtenidas a partir de las Cartas de Suelo de los Departamentos de Diamante y Paraná elaboradas por INTA) para lograr obtener variables más complejas (en este caso, para obtener los parámetros hidráulicos).

Se utilizaron diversas FET, entre ellas las de Rawls y Brakensiek (1989), Vereecken (1989) y luego reformulada en Weynants et al. (2009), Tomasella et al. (2000) y por último, Wösten (1997) y Wösten et al. (1999), de ahora en más indicadas como Wösten 1 y Wösten 2 respectivamente. También, se utilizaron los valores propuestos por Carsel y Parish (1988), definidos para cada textura de suelo particular. Para definir algunas de estas funciones, se contó con información de las determinaciones de CC, PMP y densidad aparente de las estaciones analizadas, utilizadas por Passadore y Wendler (2011), las mismas fueron realizadas en la Estación Experimental Agropecuaria Paraná del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA).

Los ajustes obtenidos para Diamante, fueron utilizando las funciones de Rawls y Brankensiek y Wösten et al. (1999), mediante el modelo hidráulico de Van Genuchten; mientras que para Paraná se consiguieron al utilizar los parámetros definidos por Carsel y Parish (1988), y el modelo hidráulico de Brooks - Corey. Los perfiles de suelo utilizados por el modelo tanto para Paraná como para Diamante se presentan en la Tabla 1 mientras que las FET utilizadas para las mejores estimaciones de cada estación y para cada parámetro hidráulico se resumen en la Tabla 2. En la Tabla 3 se indican los valores numéricos de los parámetros obtenidos según el nivel considerado, vale destacar que el cambio de los parámetros entre un nivel y otro es debido a la diferencia en los porcentajes de textura de suelo, materia orgánica y densidad aparente que existe entre las distintas profundidades del modelo.

El modelo incluye valores de IAF por defecto para pasto, cultivo o bosque, pero en este caso se optó por utilizar el módulo CLASS PGM

Estación	Nivel	Textura de Suelo	Espesor (cm)
Diamante	Superior	Franco limoso	5
		Franco limoso	10
		Franco limoso	20
	Inferior	Franco limoso	20
Paraná	Superior	Franco arcillo limoso	13
		Franco arcillo limoso	10
		Arcillo limoso	34
	Inferior	Arcillo limoso	6

Tabla I: Perfiles de suelo para la simulación del modelo CLASS U3M 1D. Se definieron cuatro niveles distintos. La textura de suelo de Diamante se definió a través de un análisis del perfil sobre la estación (es decir, que se contó con la información sobre el porcentaje de arena, limo y arcilla). La textura de suelo de Paraná se definió mediante la Carta de Suelo de Entre Ríos, en particular, del Departamento de Paraná.

(Pasture Growth Model) para el modelado de diferentes cultivos, por cuanto las estaciones se encontraban en áreas principalmente con cobertura de pasto. Además, los ajustes obtenidos se lograron al ajustar el IAF anual de Diamante con un mínimo en los meses fríos (con un mínimo absoluto en junio) y un máximo en los meses cálidos (con un máximo absoluto en enero). En el caso de Paraná, fue al utilizar el IAF anual que el modelo usaba por defecto, con un máximo en invierno y un mínimo en verano. De todas maneras, se encontró que las simulaciones realizadas no eran fuertemente dependientes del IAF, a diferencia de los parámetros hidráulicos, los cuales influyen fuertemente en los resultados obtenidos.

Con el objetivo de encontrar el mejor ajuste del modelo a los datos de humedad del suelo, se realizaron una serie de simulaciones con el modelo CLASS U3M 1D para cada una de las estaciones, de las cuales se presentarán 3 (definidas como simulación 1, 2 y 3 a lo largo del trabajo, Tabla 2). En las mismas se modificaron

Estación	Simulación	Modelo	alpha	n	Ksat	I
Diamante	1	VG	R & B y DEFAULT	R & B y DEFAULT	DEFAULT	DEFAULT
	2	VG	WOSTEN 2	WOSTEN 2	WOSTEN 2	DEFAULT
	3	VG	R & B	WOSTEN 2	WOSTEN 2	DEFAULT
Paraná	1	VG	DEFAULT	DEFAULT	DEFAULT	DEFAULT
	2	BC	DEFAULT	DEFAULT	DEFAULT	DEFAULT
	3	BC	C & P (*)	C & P (*)	C & P (*)	DEFAULT

Tabla II: Parámetros de las constantes hidráulicas estimadas mediante FET y mediante la clasificación de suelos de Carsel y Parish (1988). La primera columna indica la estación en la cual se produjo la calibración. La segunda columna indica el número de simulación en cuestión. La tercera columna indica el modelo hidráulico utilizado (VG: Van Genuchten, BC: Brooks - Corey). La cuarta y quinta columna indican parámetros específicos de los modelos hidráulicos (alpha y n), R & B indica que se utilizó la FET de Rawls y Brakensiek, C & P indica que se utilizó la clasificación de Carsel y Parish y Wösten 2 que se utilizó la FET de Wösten de 1999. La sexta columna indica las FET que se utilizaron para estimar la conductividad hidráulica. La última columna muestra que se usaron los valores por default de la constante I de los modelos.

(*) En estos casos los parámetros que se utilizaron fueron tomados textualmente de la bibliografía.

los parámetros del modelo relacionados con las variables hidráulicas del suelo y en algunos casos el modelo hidráulico acoplado.

Por último, se llevó a cabo una comparación de los resultados obtenidos con el mejor modelo para la estación de Paraná al estimar la ET mediante dos métodos diferentes. Vale destacar que los datos de entrada ingresados al modelo son de evaporación y no de ET. Sin embargo, el CLASS U3M 1D cuenta con un parámetro de transformación, el cual relaciona la variable de evaporación con la variable de ET. Para la simulación del modelo se utilizaron los valores de

Estación	Simulación	Nivel de profundidad	alpha (1/cm)	n	Ksat (cm/día)	I	
Diamante	1	Superior	0.004	2.073	10.800	0.5	
		Inferior	0.020	1.410	10.800	0.5	
	2	Superior	0.026	1.145	27.930	0.5	
		Inferior	0.017	1.182	20.858	0.5	
	3	Superior	0.004	1.145	27.930	0.5	
		Inferior	0.008	1.182	20.858	0.5	
	Paraná	1	Superior	0.068	1.322	62.16	0.5
			Inferior	0.005	1.090	0.480	0.5
		2	Superior	0.068	1.322	62.16	0.5
Inferior			0.029	0.127	2.160	1	
3		Superior	0.030	0.151	3.600	0.5	
		Inferior	0.029	0.127	2.160	1	

Tabla III: Los valores numéricos de los parámetros de las constantes hidráulicas utilizadas en cada una de las simulaciones y discriminadas por nivel de profundidad.

ET estimados en la estación y sus resultados se cotejaron con los resultados obtenidos al utilizar la ET calculada según Hargreaves (FAO, 2006).

3. RESULTADOS

3.1. Análisis del Modelo Hidráulico obtenido

Mediante las diferentes variantes de FET se estimaron los parámetros hidráulicos del modelo. Los resultados obtenidos de humedad del suelo para la estación de Diamante durante el periodo 1 de enero de 2008 al 30 de abril de 2010 se muestran en la Figura 1, Figura 2 y Figura 3. Las figuras superiores [a)] muestran la serie de humedad del suelo, en la estación Diamante, más cercana a la superficie que representa el contenido de agua en los primeros cm. De forma similar, se encuentra el segundo nivel de profundidad de 20 cm [b)] y por último, para el nivel de 60 cm [c)].

En la simulación 1, los resultados del nivel de 7 cm [Figura 1. a)], muestran que los máximos se encuentran totalmente sobreestimados por el modelo en todo los tiempos de simulación. En el caso del nivel de 20 cm [Figura 1. b)], los máximos son, en general, subestimados por

el modelo. Al final del segundo período de simulación, también se aprecia una importante subestimación de los valores mínimos de humedad del suelo. Por último, en el nivel de 60 cm [Figura 1. c)], se observa un comportamiento adecuado de la representación de humedad del suelo por parte del modelo, pero con picos máximos muy subestimados por CLASS.

En la simulación 2, los resultados obtenidos en el nivel de 7 cm [Figura 2 a)], muestran un mejor ajuste, sobre todo en el primer período de simulación. El modelo ajusta mejor los máximos en este período. Sin embargo, en el segundo nivel [Figura 2 b)], la serie modelada queda muy replegada hacia abajo. Tanto los picos máximos como mínimos se encuentran fuertemente subestimados por el modelo. Finalmente, el nivel de 60 cm [Figura 2 c)], muestra resultados poco satisfactorios. El modelo no llega a representar en ningún sentido, el comportamiento de la humedad del suelo.

En la simulación 3, los resultados correspondientes al nivel de 7 cm [Figura 3. a)], indican que el modelo tiende a sobreestimar tanto los valores mínimos como los máximos, fundamentalmente en el segundo período, pero se prevé un mejor ajuste con respecto al obtenido en la simulación 2. No obstante, se puede observar una importante correlación al final del primer período. En el segundo nivel de profundidad [Figura 3. b)], los resultados parecieran no mostrar un buen ajuste en el primer período. Si bien este no muestra una correspondencia óptima entre las observaciones y el modelo, en el segundo período se nota una mejoría. El ajuste obtenido al final de este período resulta ser mejor a los obtenidos en la simulación 1 y 2. Al final del segundo período, se puede observar una mayor discrepancia entre la serie modelada y las observaciones. Por último, en el nivel de 60 cm [Figura 3. c)], hay una leve tendencia del modelo a representar los máximos de humedad, pero con picos menos marcados. En este caso, el resultado obtenido en la segunda simulación fue más satisfactorio que este.

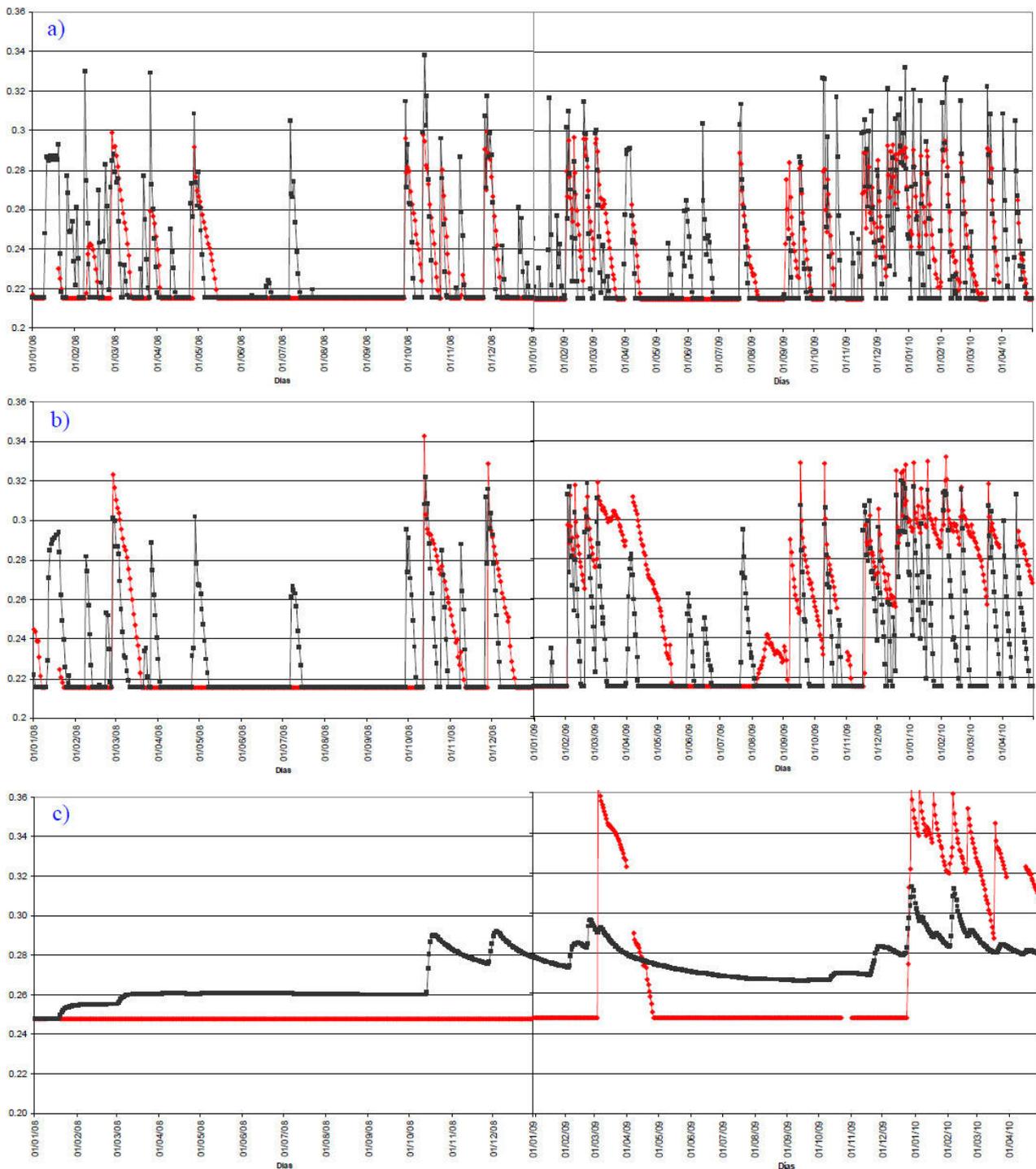


Figura 1: Valores observados (rojo) y simulación 1 de CLASS (negro). a) Profundidad de 7 cm. b) Profundidad de 20 cm. c) Profundidad de 60 cm. Los valores de humedad del suelo se encuentran expresados en contenido volumétrico (m^3/m^3). Las zonas sin valores de la serie observada corresponden a ausencias en las observaciones.

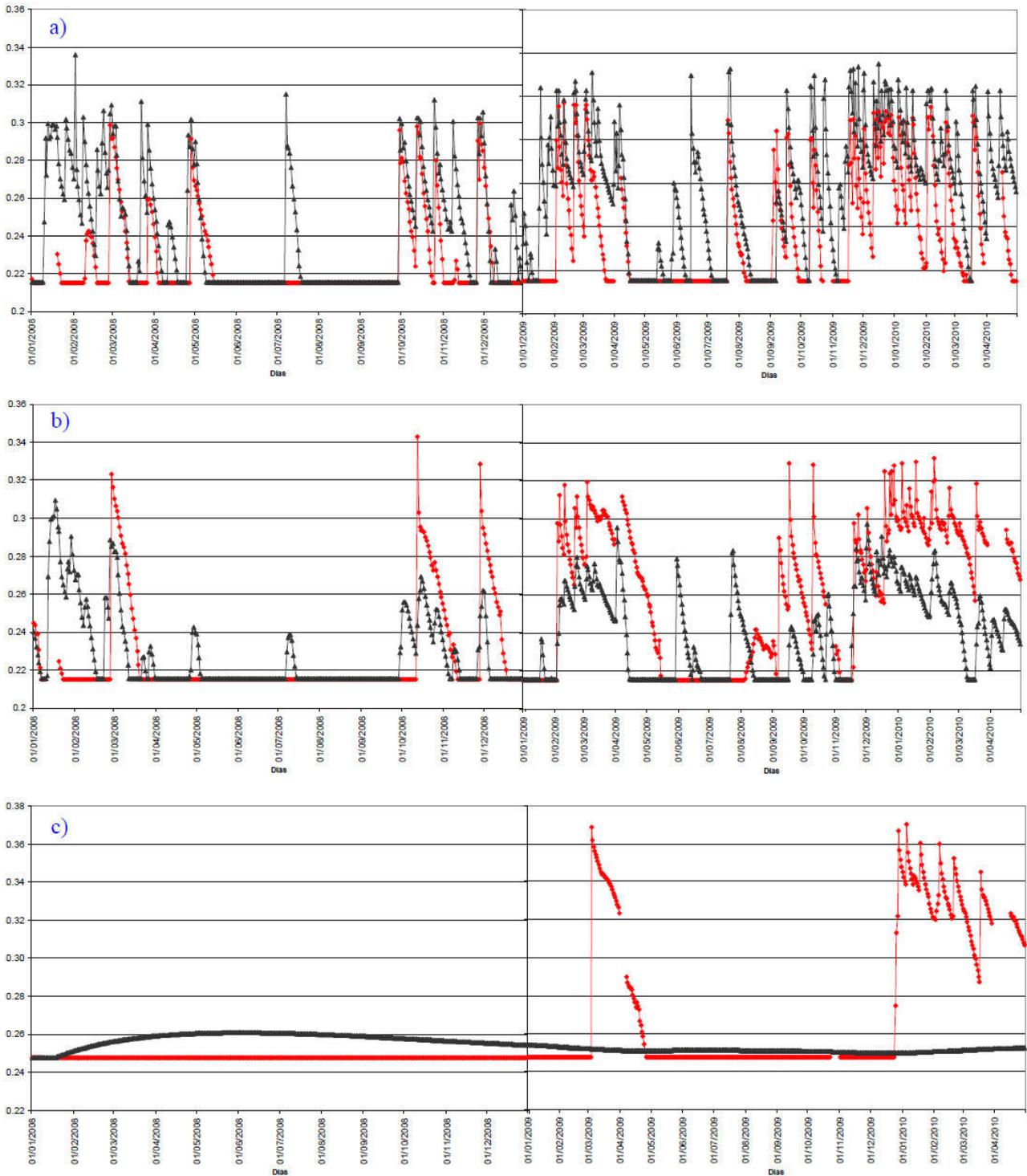


Figura 2: Valores observados (rojo) y simulación 2 de CLASS (negro). a) Profundidad de 7 cm. b) Profundidad de 20 cm. c) Profundidad de 60 cm. Los valores de humedad del suelo se encuentran expresados en contenido volumétrico (m^3/m^3). Las zonas sin valores de la serie observada corresponden a ausencias en las observaciones.

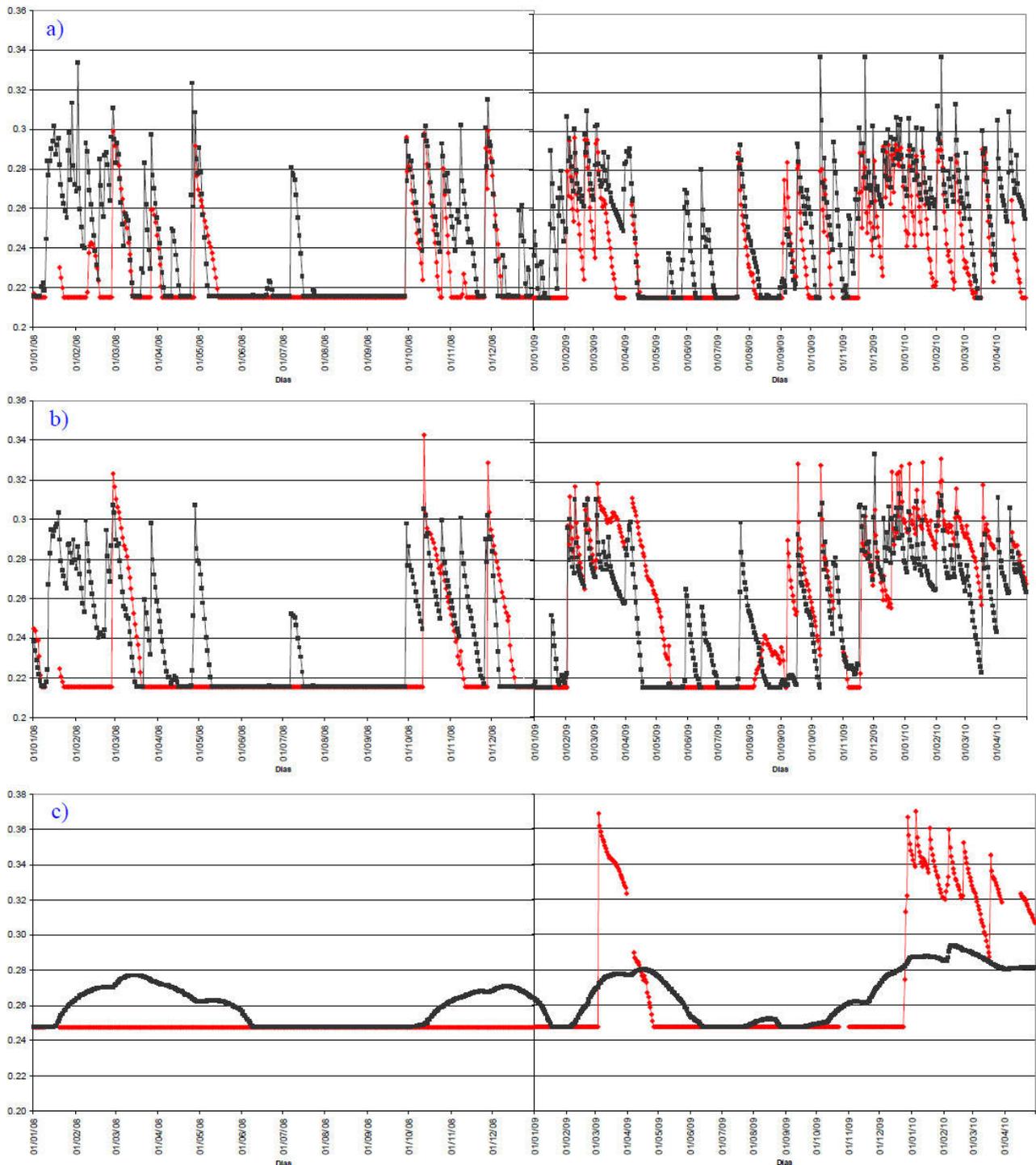


Figura 3: Valores observados (rojo) y simulación 3 de CLASS (negro). a) Profundidad de 7 cm. b) Profundidad de 20 cm. c) Profundidad de 60 cm. Los valores de humedad del suelo se encuentran expresados en contenido volumétrico (m^3/m^3). Las zonas sin valores de la serie observada corresponden a ausencias en las observaciones.

Para resumir la relación entre las observaciones y la humedad simulada por el modelo, presentadas en los gráficos de la Figura 1, Figura 2 y Figura 3, se muestran en la Tabla 4, los valores de correlación y de Error Cuadrático Medio (ECM) entre observaciones y simulaciones. El cálculo de ECM se llevó a cabo considerando la siguiente ecuación:

$$ECM = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (y'_i - y_i)^2} \quad (1)$$

donde N representa el número de observaciones, y_i son los valores de las observaciones e y'_i representa los valores de humedad del suelo de la simulación. Valores de ECM cercanos a cero son indicativos de que hay un buen ajuste entre la serie observada y simulada.

Simulación	Nivel 7 cm		Nivel 20 cm		Nivel 60 cm	
	R	ECM	R	ECM	R	ECM
1	0.7405	0.0606	0.5722	0.0648	0.6526	0.0659
2	0.7281	0.0668	0.6471	0.0640	-0.3534	0.0653
3	0.7415	0.0655	0.6843	0.0667	0.7020	0.0642

Tabla IV: Correlaciones y Error Cuadrático Medio para cada profundidad de la estación de Diamante entre datos observados y simulados por CLASS de cada una de las simulaciones.

Simulación	Nivel 5 cm		Nivel 10 cm		Nivel 20 cm		Nivel 60 cm	
	R	ECM	R	ECM	R	ECM	R	ECM
1	0,3996	0,0582	0,3074	0,0688	0,5648	0,0779	-1	0,1678
2	0,5912	0,0495	0,5436	0,0483	0,6867	0,0526	0	0,1872
3	0,7195	0,0329	0,7011	0,0419	0,7743	0,0543	0	0,1691

Tabla V: Correlaciones y Error Cuadrático Medio para cada profundidad de la estación de Paraná entre datos observados y simulados por CLASS de cada una de las simulaciones.

Todos los coeficientes de correlación de Tabla 4 son estadísticamente significativos al 99 %, en todos los casos la serie estimada con el modelo explica más del 50 % de la varianza de la serie observada para el primer nivel de profundidad y para todas las simulaciones y mayor al 40 % para el resto de los casos, con excepción de la profundidad de 20 cm para la simulación 1 (la varianza explicada es del orden del 30 %) y para la profundidad de 60 cm para la simulación

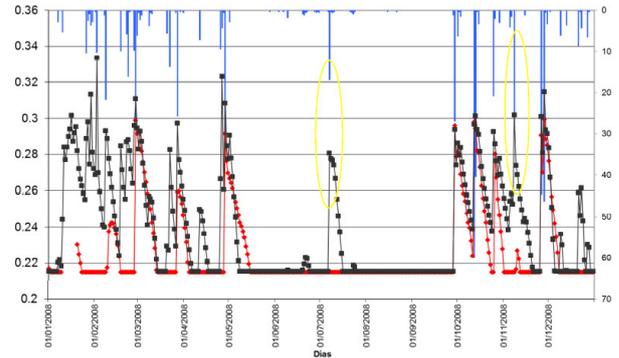


Figura 4: Humedad del suelo observada (rojo), humedad del suelo simulada (negro) y datos de precipitación (azul) para la profundidad de 7 cm en la estación de Diamante y para el primer período de la Figura 3. En el eje a la izquierda se indican los valores de humedad del suelo en contenido volumétrico (m^3/m^3) y en el eje de la derecha los valores de precipitación (mm). Los círculos amarillos representan las zonas de alta sensibilidad del modelo.

2 (la cual es del orden del 10 %). Asimismo, los ECM en cada nivel y para cada simulación son pequeños y de magnitudes similares. En particular, se puede apreciar que los resultados obtenidos en el nivel de 7 cm son superiores a los obtenidos en los niveles inferiores, con respecto a la correlación.

Es interesante observar la respuesta en la estimación del contenido de agua en el suelo frente a episodios de precipitación, poniéndose de manifiesto de esta manera la sensibilidad del modelo respecto a la ocurrencia de precipitación. En la Figura 4, se muestran los datos observados y simulados de humedad del suelo para la simulación 3 de Diamante, junto con los datos observados de precipitación.

Los dos días en los que se puede notar claramente la sensibilidad del modelo a la precipitación, son el 07 de julio y 08 de noviembre, indicados con un círculo amarillo en la Figura 4. En estas ocasiones el suelo se mantiene casi inmutable a la precipitación,

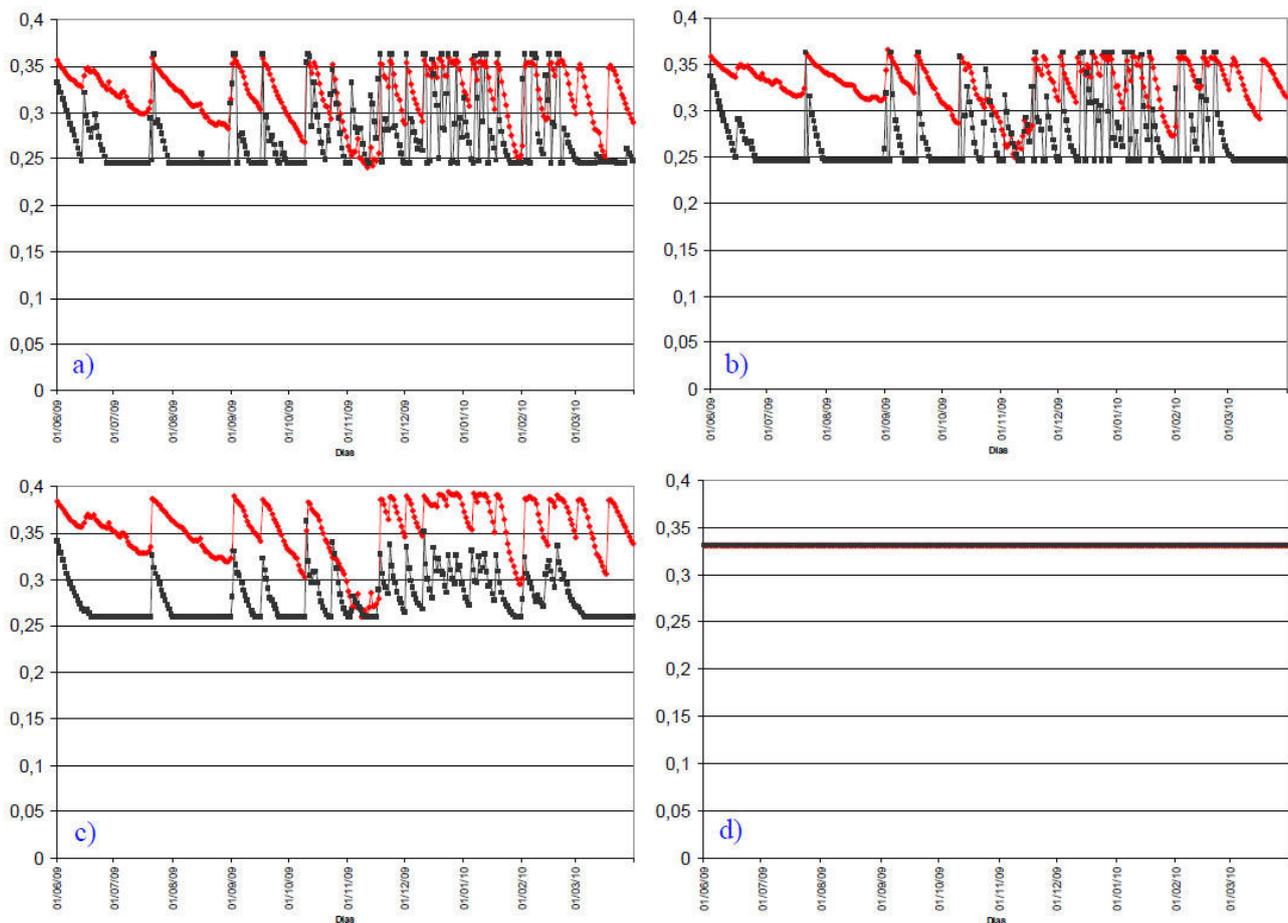


Figura 5: Valores observados (rojo) y simulación 1 de CLASS (negro). a) Profundidad de 5 cm. b) Profundidad de 10 cm. c) Profundidad de 20 cm. d) Profundidad de 60 cm. Los valores de humedad del suelo se encuentran expresados en contenido volumétrico (m^3/m^3). Las zonas sin valores de la serie observada corresponden a ausencias en las observaciones.

mientras que el modelo registra dos picos bien marcados de contenido de agua en el suelo.

En el caso de la estación de Paraná, los resultados de cada una de las simulaciones se muestran en las Figura 5, Figura 6 y Figura 7. Las figuras superiores izquierda [a)] muestran la serie de humedad del suelo más cercana a la superficie, que representa el contenido de agua en los primeros cm. De forma similar, se encuentra el segundo nivel de profundidad de 10 cm [b)], el tercer nivel de 20 cm [c)] y por último, para el nivel de 60 cm [d)].

El período de tiempo analizado para Paraná es desde el 01 de junio de 2009 hasta el 31 de

marzo de 2010. En general, la humedad de suelo simulada en las tres profundidades, tienen el mismo patrón temporal que las observaciones y se puede notar que al final del período, existe una tendencia del CLASS U3M 1D a homogeneizar el comportamiento y mantener constante el valor de humedad del suelo hasta el final.

En la simulación 1, los mínimos en el primer y segundo nivel [Figura 5. a) y b)] de profundidad se encuentran subestimados por el modelo. El mismo representa una fuerte variabilidad de la humedad del suelo entre máximos y mínimos. En el tercer nivel de profundidad de 20 cm [Figura 5. c)], tanto los valores mínimos como

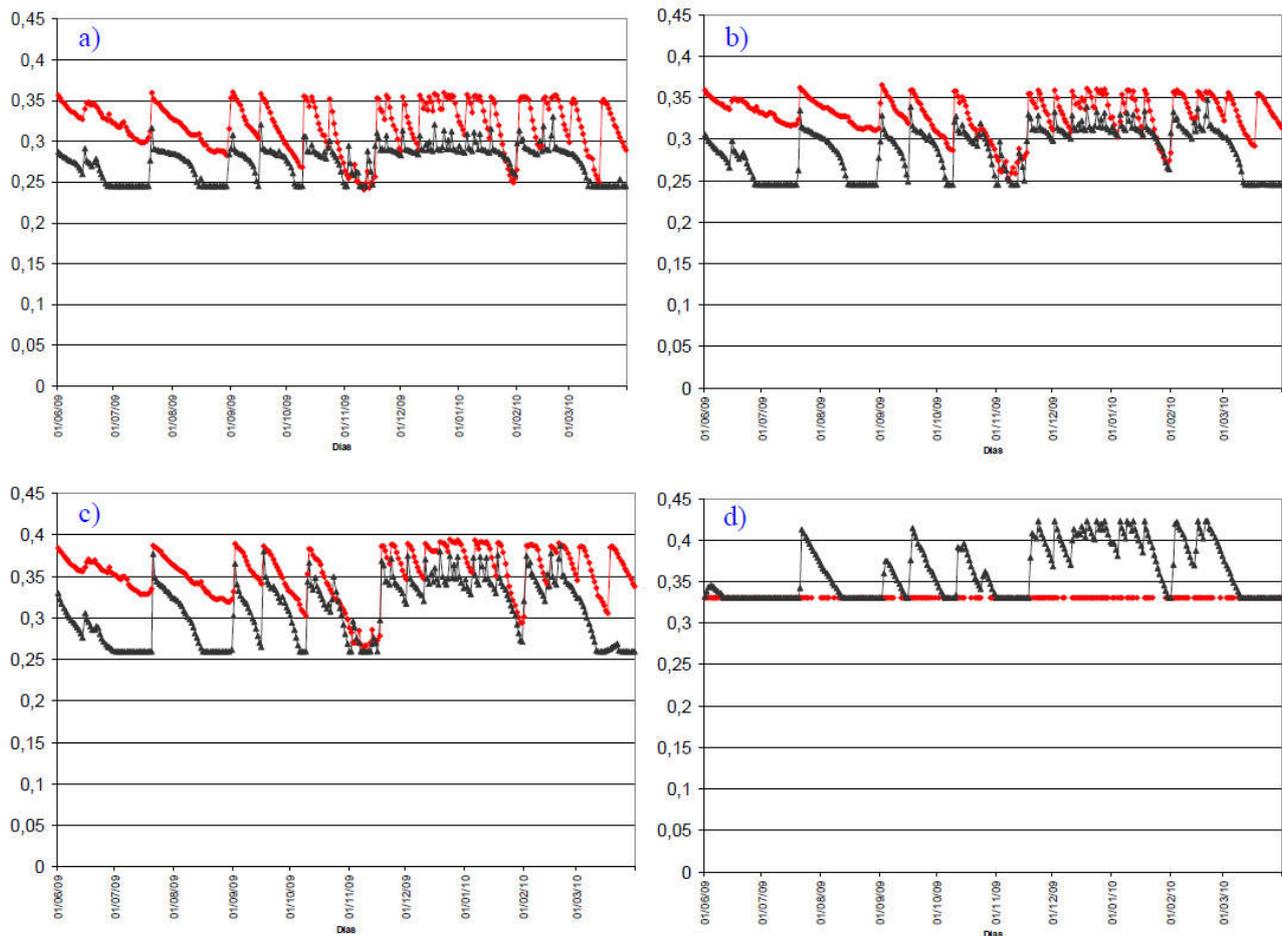


Figura 6: Valores observados (rojo) y simulación 2 de CLASS (negro). a) Profundidad de 5 cm. b) Profundidad de 10 cm. c) Profundidad de 20 cm. d) Profundidad de 60 cm. Los valores de humedad del suelo se encuentran expresados en contenido volumétrico (m^3/m^3). Las zonas sin valores de la serie observada corresponden a ausencias en las observaciones.

los máximos se encuentran subestimados por el CLASS y nuevamente la variabilidad de la serie es muy grande. Por último, en la Figura 5. d), se muestra la serie observada y simulada para el nivel de 60 cm. La misma representa correctamente las características del suelo.

En la simulación 2, en términos generales, se aprecia una mejoría en los tres primeros niveles de profundidad [Figura 6. a), b) y c)]. Algunos mínimos se encuentran bien representados por el modelo y la variabilidad de la humedad del suelo representada por el modelo es menos intensa, es decir, tiene una variación más gradual. El último nivel de profundidad de 60 cm [Figura 6. d)], no se representa de forma adecuada,

las observaciones muestran que el suelo no tiene variabilidad y el modelo representa una importante variación, diferente a lo que se aprecia en las observaciones.

En la simulación 3, en términos generales, las condiciones de humedad del suelo en el primer nivel se encuentran muy bien representadas por la simulación [Figura 7. a)], excepto por algunos picos que quedan minimizados o maximizados. Por otro lado, en el segundo nivel de profundidad [Figura 7. b)], se observa que los resultados son similares al primer nivel, pero con una menor cantidad de picos óptimamente representados. En el tercer nivel de profundidad [Figura 7. c)], se representa de

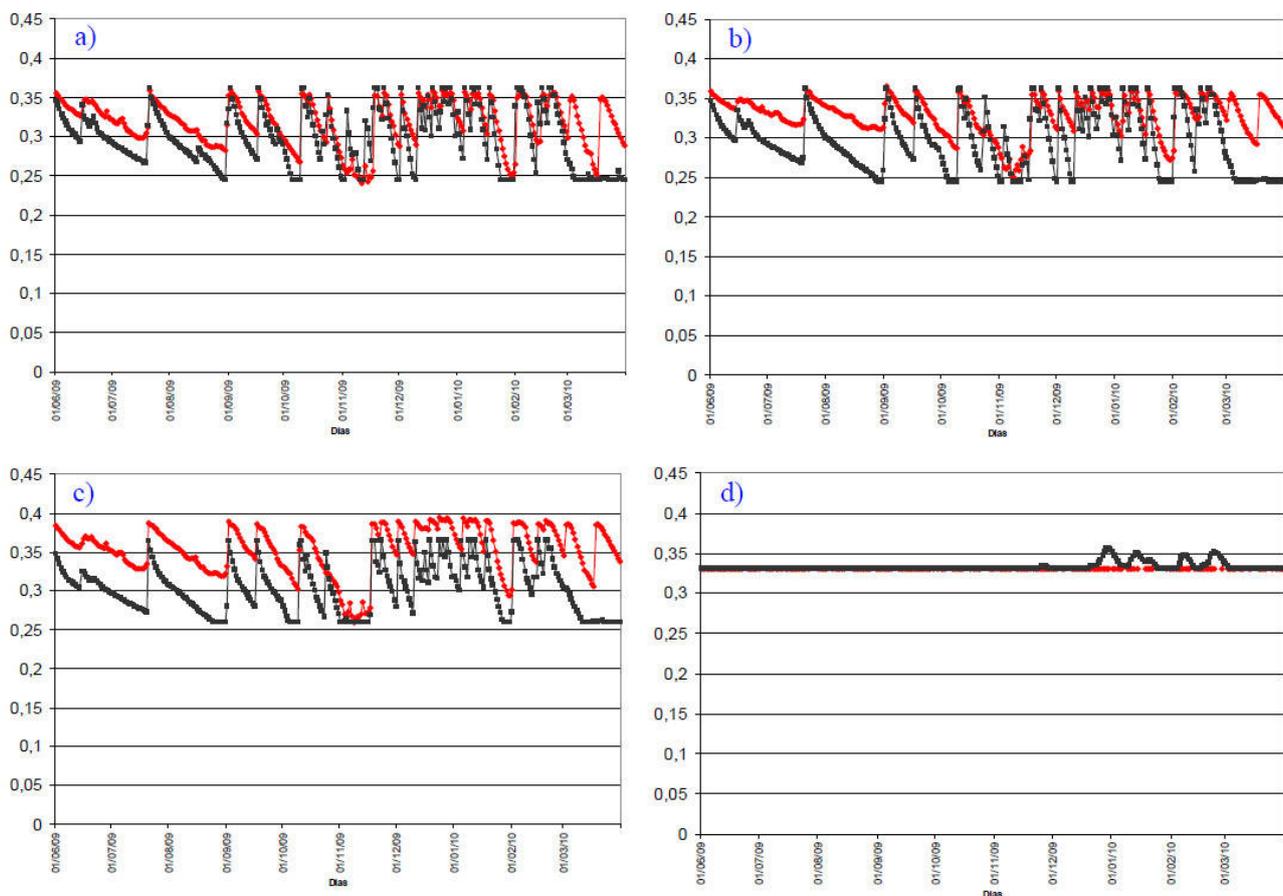


Figura 7: Valores observados (rojo) y simulación 3 de CLASS (negro). a) Profundidad de 5 cm. b) Profundidad de 10 cm. c) Profundidad de 20 cm. d) Profundidad de 60 cm. Los valores de humedad del suelo se encuentran expresados en contenido volumétrico m^3/m^3). Las zonas sin valores de la serie observada corresponden a ausencias en las observaciones.

forma eficaz a los datos observados, pero con un desfase de la serie simulada con respecto a la observada. Por último, el nivel de 60 cm. [Figura 7. d)], muestra un suelo homogéneo con respecto a la humedad del suelo. Durante todo el período, el contenido de agua en el suelo no varía. El modelo representa de forma similar este comportamiento, excepto por algunos picos cerca del final del período. Tanto el primer nivel como el segundo y el tercero, presentan una gran mejoría con respecto a las simulaciones 1 y 2.

Al igual que Diamante, se muestra el resumen de los resultados hallados de correlación y de ECM en la estación de Paraná (Tabla 5). Se aprecia una importante mejoría de simulación en simulación, siendo la simulación 3 la que

mejor ajusta a la serie de Paraná. Existe una importante correlación en los tres niveles superiores de la simulación 3, con valores superiores a 0.7 en cada caso y estadísticamente significativos al 99%. Sin embargo, se observa un aumento de los valores de ECM con la profundidad, es decir, que la serie de menor diferencia entre los puntos observados y simulados, es la del nivel de 5 cm. Al comparar los valores de ECM entre simulaciones, se puede apreciar que los valores de ECM de la simulación 3 son los más pequeños con respecto a los de las simulaciones 1 y 2, excepto por el nivel de 20 cm, en el cual la simulación 2 tiene por poco un valor menor al de la simulación 3. El resto de los valores de R también son estadísticamente significativos al 99%, excepto por los valores del

nivel de 60 cm para las simulaciones 2 y 3, los cuales son aproximadamente 0.

3.2. Análisis de ET

Por último, se llevó a cabo un análisis del impacto de la estimación de la ET en los resultados obtenidos para la estación de Paraná. La Figura 8 muestra la serie de evapotranspiración obtenida en la estación (mediante el método de Penman – Monteith) y la estimada por Hargreaves. Este análisis se llevó a cabo únicamente sobre la simulación 3 de la estación de Paraná.

Se observa que la onda principal de ET está presente tanto en los valores obtenidos a través de Penman – Monteith como en los valores estimados por Hargreaves. Sin embargo, hay una notoria tendencia en el cálculo de Hargreaves de subestimar los máximos y sobreestimar los mínimos. En principio, se podría esperar que los resultados obtenidos para la simulación 3 de Paraná variaran con respecto a los de la Figura 7, ya que las diferencias de ET son relativamente importantes. Pero, como se puede observar en la Figura 9, los resultados entre una simulación y otra no varían de forma significativa. Es decir, que en particular, para este tipo de suelo y con la calibración propuesta, la variación de ET no influye en los resultados del modelo para la variable de humedad del suelo. Los valores de correlación entre la simulación generada con la ET de la estación y la ET de Hargreaves para el nivel de 5cm, el de 10cm, el de 20cm y el de 60cm son 0.9728, 0.9675, 0.9867 y 0.9762 respectivamente.

4. CONCLUSIONES

El estudio de la humedad del suelo puede ser muy relevante a la hora de explicar o entender el comportamiento hidrológico de una región. En este trabajo se utilizó el modelo CLASS U3M 1D, que a pesar de sus limitaciones en su resolución espacial, es una herramienta clara y simple para llevar a cabo un estudio del balance de agua en el suelo.

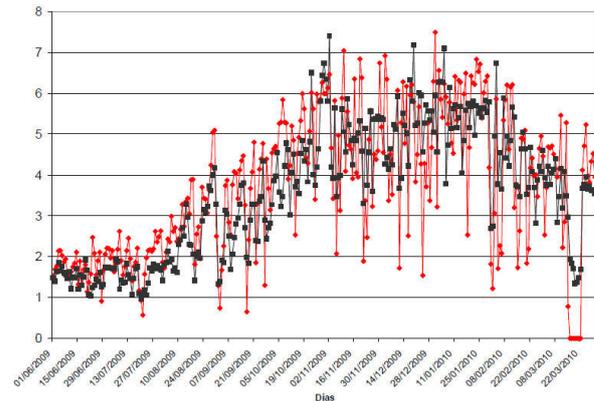


Figura 8: ET obtenida en la estación (rojo) y ET estimada mediante la ecuación de Hargreaves (negro). Los valores de ET se encuentran expresados en unidades de mm. El período equivale al de los datos de la estación Paraná.

En términos generales, en el caso de la estación meteorológica de Diamante, la simulación que mejor representa el contenido de humedad en el suelo, en función del R, para los niveles de 7 cm, 20 cm y 60 cm es la simulación 3. Observando los estadísticos calculados para esta estación (Tabla 4), no se puede definir un patrón particular entre los resultados de ECM de las diferentes profundidades, todos los valores son aproximadamente del orden de 0.06 m³/m³. A partir de los valores de R, también se puede apreciar una importante mejoría en el nivel de 20 cm con respecto a las simulaciones. Esta mejoría es fuertemente visible al final del segundo período de simulación, en donde se aprecia que la simulación 3 es la que mejor representa el comportamiento del suelo. En función de esto, se puede afirmar que los mejores resultados obtenidos de calibración para la estación de Diamante son los de la simulación 3.

Luego, la calibración para la estación de Paraná produjo resultados más significativos que los obtenidos en Diamante, mayormente en los niveles de 10 y 20 cm. También se observa que el error, medido a través del ECM, crece a medida que aumenta el nivel de profundidad (Tabla 5). Esto se aprecia en todas

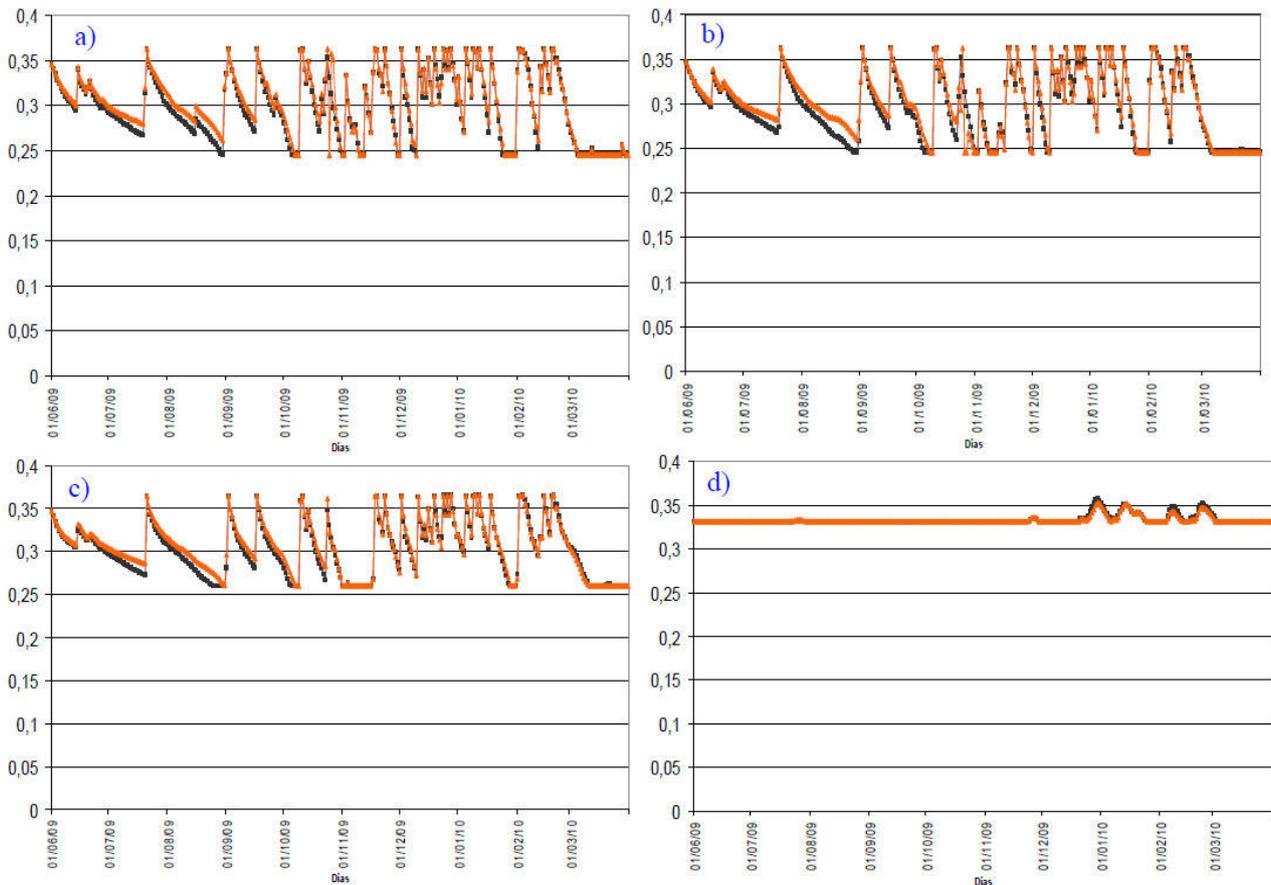


Figura 9: Humedad del suelo simulada de CLASS para la estación de Paraná. Utilizando la ET estimada en la estación (negro) y utilizando la ET propuesta por Hargreaves (naranja). a) Profundidad de 5cm. b) Profundidad de 10 cm. c) Profundidad de 20 cm. d) Profundidad de 60 cm. Los valores de humedad del suelo se encuentran expresados en contenido volumétrico (m^3/m^3).

las simulaciones, excepto en la simulación 2, en la cual se observa una pequeña disminución del ECM entre el nivel de 5 cm y el de 10 cm. En función de los estadísticos obtenidos de R y ECM en la Tabla 5, se puede afirmar que los mejores resultados obtenidos de calibración para la estación de Paraná son los de la simulación 3. A pesar de no haber grandes diferencias entre los valores de correlación de la simulación 3 entre una estación y otra, podemos notar una clara disminución del ECM en Paraná con respecto a Diamante, que tiene un valor de ECM, para el primer nivel de profundidad, doble al valor obtenido en Paraná.

Vale destacar que en el caso de la simulación 1 y 2 para Diamante, las funciones de Edafotransferencia utilizadas fueron las de Rawls y Brakensiek y Wösten 2 respectivamente. Sin embargo, los mejores resultados obtenidos se consiguieron una vez que se utilizó una combinación entre ambas funciones, la de Rawls y Brakensiek para el parámetro alpha y la de Wösten 2 para n y Ksat. En el caso de Paraná, a diferencia de Diamante, el mejor resultado se obtuvo al modificar el modelo hidráulico utilizado, en este caso fue el de Brooks – Corey, pero considerando los parámetros hidráulicos propuestos por Carsel y Parish (Tabla 2).

Por último, se hizo un análisis de la influencia de la ET en los resultados obtenidos por el modelo. A pesar de que claramente se apreciaba una importante diferencia entre la ET obtenida de Penman – Monteith y Hargreaves (Figura 8), los resultados obtenidos de humedad del suelo para la estación de Paraná fueron muy similares. Se obtuvieron valores de correlación cercanos a 1 entre las simulaciones hechas con Penman – Monteith y las hechas por Hargreaves. Por lo tanto, se puede asegurar que para la zona de la estación de Paraná o para alguna estación con perfil de suelo similar a esta, el uso de la ecuación de Hargreaves puede ser útil si no se cuenta con información suficiente para estimar el valor de ET a través de la ecuación de Penman – Monteith.

Se concluye que el modelo representa adecuadamente las condiciones de humedad del suelo en las estaciones consideradas (más que nada en los niveles superiores) y que puede ayudar en el monitoreo y en el pronóstico del agua almacenada en el suelo. Asimismo, los resultados del análisis de la ET muestran que es posible obtener buenos resultados aun en ocasiones en las que no se cuenta con toda la información meteorológica necesaria para aplicar la ecuación de Penman - Monteith, permitiendo el uso de relaciones más simples con menor cantidad de información.

Es propósito para futuras investigaciones calibrar el modelo para otras estaciones de la provincia de Entre Ríos y si es posible, para otras estaciones de Argentina. Hay que tener en cuenta que la calibración del modelo fue exclusivamente para la variable de humedad del suelo, debido a esto, también se propone llevar a cabo la calibración del modelo para los excesos de humedad en el suelo, sumando una herramienta en el análisis de eventos severos significativos sobre la región de la Pampa Húmeda y el Litoral, como las inundaciones. Una vez logrado esto, se podrán considerar escenarios futuros de inundaciones. La aplicación de un MH puede ser de gran utilidad en estos escenarios, los que son

obtenidos a través de los Modelos de Circulación Global (MCG), y así obtener información del rol hidrológico de estos eventos.

Agradecimientos: El presente trabajo fue realizado como parte del proyecto CLARIS LPB del European Community's Seventh Framework Programme (FP7/2007-2013) financiado por el Grant Agreement N°212492. Los datos de las estaciones meteorológicas fueron brindados por el proyecto PICT 06/1221-PIDUNER 2128 (ANPCyT – UNER).

REFERENCIAS

- Alexander K.R. & Skaggs W.R., 1986. "Predicting unsaturated hydraulic conductivity from soil water characteristics". *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 29, pp 176 – 184.
- Borgesen C., Jacobsen O., Hansen S. & Schaap M., 2006. "Soil hydraulic properties near saturation, an improved conductivity model". *Journal of Hydrology*, 324, pp 40 – 50.
- Briggs L.J. & McLane J.W., 1907. "The moisture equivalent of soils". *USDA Bureau of Soils Bulletin* 45, pp 1 - 23.
- Brooks R.H. & Corey A.T., 1966. "Properties of porous media affecting fluid flow". *Journal of the Irrigation & Drainage Division* 2 (June), *American Society of Civil Engineers*, pp 61 – 88.
- Carsel R. & R. Parish., 1988. "Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics". *Water Resour. Res.* 24: 755-769.
- FAO, 2006. *Estudio FAO Riego y Drenaje* 56, "Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos", 323 pp.
- Hargreaves G.H. & Samani Z.A., 1985. "Reference crop evapotranspiration from temperature". *Applied Eng. in Agric.*, 1(2): 96-99.
- Leij F.L., Russel W.B. & Lesch S.M., 1997. "Closed form expression for water retention

- and conductivity data". *Ground Water*, 35, pp 848 – 858.
- Passadore L. & Wendler G., 2011. "Calibración de sensores de humedad del suelo y estimación de almacenaje diario de agua en el suelo en sitios con estaciones meteorológicas instaladas de la provincia de Entre Ríos". Trabajo final de graduación. Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Entre Ríos.
- Rawls, W.J. & Brakensiek, D.L., 1989. "Estimation of soil water retention and hydraulic properties". Morel-Seytoux (ed.), *Unsaturated Flow in Hydrologic Modeling—Theory and Practice*. Kluwer Academic Publishing, Dordrecht, pp. 275–300.
- Tomasella J., Hodnett M.G. & Rossato L., 2000. "Pedotransfer Functions for the Estimation of Soil Water Retention in Brazilian Soils". *Soil Sc. Soc. Am. J.*, 64, pp 327 – 338.
- Tuteja N., Vaze J. & Teng J., 2004. "The CLASS Modelling Framework: A platform for distributed eco-hydrological modelling". NSW Department of Natural Resources, Queanbeyan, Australia.
- Van Genuchten M., 1980. "A Closed Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils". *Soil Sc. Soc. Am. J.*, 48, pp 703 – 708.
- Vereecken H., Feyen, J., Maes, J. & Darius, P., 1989. "Estimating the soil moisture retention characteristic from texture, bulk density, and carbon content". *Soil Sci.* 148, pp 389–403.
- Vogel T. & Cislerova M., 1988. "On the Reliability of Unsaturated Hydraulic Conductivity Calculated from the Moisture Retention Curve". *Transport in Porous Media*, 3, pp 1 – 15.
- Weynants M., Vereecken H. & Javaux M., 2009. "Revisiting Vereecken Pedotransfer Functions: Introducing a Closed – Form Hydraulic Model". *Vadose Zone J.*, 8, pp 86 – 95.
- Wösten J.H.M., 1997. "Pedotransfer functions to evaluate soil quality". Gregorich, E.G., Carter, M.R. Eds., *Soil Quality for Crop Production and Ecosystem Health*. Developments in Soils Science, 25, Elsevier, Amsterdam, pp. 221 – 245.
- Wösten J.H.M., Lilly A., Nemes A. & Le Bas C., 1999. "Development and use of a database of hydraulic properties of European soils". *Geoderma*, 90, pp 169 – 185.

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo la licencia Creative Commons, que permite el uso ilimitado, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada.

NOTAS Y CORRESPONDENCIA

DESCRIPCIÓN DE LAS VARIACIONES HORARIAS MEDIAS DE PRESIÓN EN LA ARGENTINA Y SU INFLUENCIA EN LOS SISTEMAS BÁRICOS

Norma Possia, Bibiana Cerne y Claudia Campetella

Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales,
UBA
Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA) - CONICET-UBA UMI IFAECI/CNRS,
Argentina

(Manuscrito recibido el 31 de marzo de 2013, en su versión final el 28 de agosto de 2013)

RESUMEN

La presión atmosférica horaria media mensual presenta una variación semidiurna regular de unos pocos hectopascuales (entre 4 y 2 hPa aproximadamente), efecto conocido como marea barométrica. Si bien la existencia de esta oscilación es ampliamente conocida, en este trabajo se la documenta en forma mensual para algunas estaciones de Argentina.

La variación semidiurna es más importante durante los meses cálidos que fríos. Los máximos y mínimos principales tienen lugar entre las 12 y 14 UTC y 20 y 21 UTC, y presenta tres tipos de comportamientos. La región Centro y Este donde la amplitud disminuye con el aumento de la latitud y muestran un ciclo estacional marcado. La región Patagónica con menor amplitud pero con mayor diferencia entre verano e invierno que la región anterior. Y la región Oeste, que presenta la amplitud de onda más importante y además la mayor diferencia entre verano e invierno. La longitud de onda es 5 horas mayor en verano que invierno en las estaciones estudiadas. La amplitud de estas oscilaciones estaría modulada no sólo por el efecto de térmico del sol sino también por otros efectos locales.

La marea barométrica afecta de distinta forma a la profundidad de los sistemas béricos según la hora en que ellos tengan lugar, por lo que este resultado debería ser tenido en cuenta en el momento de definir y caracterizar la profundidad de los ciclones/anticiclones para realizar cualquier estudio y/o pronóstico del tiempo.

Palabras clave: : variación horaria media de la presión, marea barométrica.

DESCRIPTION OF HOURLY MEAN VARIATIONS OF PRESSURE IN ARGENTINA AND ITS APPLICATION TO PRESSURE SYSTEMS

ABSTRACT

The hourly monthly mean atmospheric pressure variation has a semidiurnal oscillation of few hectoPascals (between approximately 4 and 2 hPa), an effect known as barometric tide. The existence of this oscillation is well known but not well

documented, so this work describes the monthly barometric tide for some synoptic stations from Argentina.

The semidiurnal variation of pressure is more important during the warm months. The principal maximum and minimum take place between 12 and 14 UTC and 20 and 21 UTC and presents three types of behaviors. The Central and East regions, where the amplitude decreases as the latitude increase and show an important seasonal cycle. The Patagonia region, with smaller amplitude but showing a greater difference between summer and winter than the previous region. And the West region, which has the largest wave amplitude and also the largest difference between summer and winter. The wavelength is 5 hours greater in summer than in winter for the whole synoptic stations studied. The amplitude of these oscillations would modulated not only by the effect of heat from the sun but also for other local effects. Depending of the time of the day, the barometric tide affects in a different way the depth of pressure systems. So this result should be taken into account when defining and characterizing the depth of cyclones / anticyclones for the analyses and weather forecast.

Keywords: hourly variations of pressure, barometric tides.

1. INTRODUCCIÓN

Si se quiere estudiar la dinámica de los sistemas del tiempo no se puede prescindir de estudiar a la presión de superficie. Las variaciones de esta variable meteorológica condensan el comportamiento de la temperatura, la precipitación y el viento.

El valor promedio de la presión a nivel medio del mar es 1.013,25 hPa pero puede sufrir modificaciones de hasta 30 hPa en un día como consecuencia de los sistemas del tiempo en latitudes medias (Wallace y Hobbs, 2006). Además presenta una variación diurna y otra semidiurna, regular y de unos pocos hectopascales (aproximadamente 2,5 hPa en promedio según Lindzen y Chapman, 1970) conocida como efecto de la marea barométrica.

El calentamiento de la atmósfera debido a la radiación solar combinado con los procesos turbulentos de calentamiento desde el suelo, generan ondas de gravedad internas con períodos diurno y semidiurno. Estas ondas, causan oscilaciones regulares en los campos de viento, temperatura y presión, las cuales se conocen como mareas en la atmósfera, que para

el caso de la presión recibe el nombre de marea barométrica (Dai y Wang, 1999 y las referencias allí mencionadas). La marea barométrica es una característica importante de la estructura y la circulación de la atmósfera media y alta (Lindzen y Chapman, 1970).

Las oscilaciones en la presión además de tener un forzante térmico, están sometidas a uno gravitacional debido a la influencia del Sol y de la Luna. En el océano, el efecto de la marea gravitatoria se conoce desde 300 años antes de JC (Lindzen y Chapman, 1970), pero fue Newton (1687) quien dijo que la fuerza de las mareas afecta tanto al océano como a la atmósfera, pero en esta última su efecto es mucho menor. En la atmósfera, por sus características de fluido compresible y sin condiciones de contorno, la marea gravitatoria es casi despreciable, alrededor de 20 veces menor que la térmica (Lindzen y Chapman, 1970). Por lo tanto es el Sol el responsable de estas variaciones diarias de la presión (Dai y Tremberth 2004, Woolnough y otros 2004). Si se remueven las ondas baroclínicas al campo de presión, se observa claramente un ciclo semidiurno (Covey y otros, 2011).

La teoría clásica (Lindzen y Chapman, 1970)

propone que, en superficie, la marea atmosférica que predomina en todo el globo es la semidiurna y esta regularmente distribuida tanto en amplitud como en fase. Estudios recientes muestran que la variación diurna es comparable a la semidiurna en muchas partes del globo, excepto sobre el océano y en algunas regiones continentales en bajas latitudes (Dai y Wang 1999). El efecto de las mareas es más notorio en la región ecuatorial que en las regiones polares (Lindzen y Chapman, 1970). Dai y Wang (1999) señalan que en las regiones polares es siempre más importante la componente semidiurna de la oscilación.

Si bien estas oscilaciones producen variaciones de muy pocos hectopascales tienen importancia en la profundidad de los sistemas sinópticos. Por ejemplo, hay autores (Rogers y Bosart, 1986 entre otros) que analizan la condición de “ciclón explosivo” considerando la profundidad de los sistemas en 12 horas en lugar de en 24 horas como lo sugieren Sanders y Gyakum (1980). En estos casos dependiendo del momento del día en que tenga lugar la tendencia negativa de la presión por efectos de la escala sinóptica, ella se podría ver incrementada o disminuida por el efecto de la marea.

En Argentina este efecto no ha sido documentado en detalle a pesar de la importancia que reviste en favorecer o no la profundidad de los sistemas béricos, en especial en la región de mayor ocurrencia de ciclones sobre el continente en el sur de Sudamérica (Necco, 1982; Gan y Rao, 1991; Mendes y otros, 2007; Possia, 2004; entre otros). Es por esa razón que el objetivo del presente estudio es describir las variaciones horarias de la presión de superficie y de la presión a nivel medio del mar y explorar su posible influencia en la profundidad de algunos sistemas de presión de superficie.

2. DATOS Y METODOLOGÍA

En el presente estudio se utilizaron los datos horarios de presión de superficie

(ps) y de presión a nivel medio del mar (pm) correspondientes a los años 1991 a 2010 provenientes de las observaciones de las estaciones meteorológicas de la red del Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Se utilizó dicho período ya que a partir de 1991 aumentó considerablemente la cantidad de estaciones sinópticas que realizan observaciones horarias. No se realizó un exhaustivo control de calidad de la información ya que el SMN realiza el control de calidad sugerido por la Organización Meteorológica Mundial (OMM, Nro 8, 1966) para las distintas variables. Solamente se verificó el rango de valores aceptables para la presión de acuerdo a la altura de cada estación según lo sugerido por la OMM (Nro 8, 1966) y la cantidad de información horaria faltante.

Para describir el comportamiento horario de ps y pm se seleccionaron las estaciones mostradas en la Figura 1. Las mismas están localizadas en una latitud que representa al centro del país (estaciones 4 a 8 de la Figura 1, 33°S aproximadamente) y sobre dos longitudes en el este (estaciones 1, 7, 10, 13, 14 y 15) y en el oeste del país (estaciones 2, 3, 9, 11 y 12), para comparar las diferencias entre latitudes subtropicales y medias según lo sugieren Lindzen y Chapman (1970). Cabe destacar que estas estaciones presentaron no más de 14 % de datos faltantes sobre un total de 175.320 registros horarios en 20 años. La Figura 1 muestra que sólo 3 estaciones superaron el 10 % de datos faltantes y en todas las restantes este valor es inferior al 6 %. Es de destacar que Mendoza Aero es la serie casi completa con el 99,5 % de los datos. Esto permite realizar una buena estimación de la variación horaria de la presión de superficie y a nivel medio del mar.

Como el objetivo del presente estudio es documentar la variación horaria de la presión, se utilizó para calcularla una metodología sencilla que consistió en calcular el valor medio horario anual y mensual de la presión a nivel medio del mar y de superficie.

	Estación Meteorológica	Altura	Longitud	Latitud	Faltante (%)
1	Resistencia Aero	52 m	-59,03	-27,27	5,59
2	Catamarca Aero	454 m	-65,46	-28,36	13,44
3	San Juan Aero	598 m	-68,25	-31,34	2,77
4	Mendoza Aero	704 m	-68,47	-32,5	0,52
5	San Luis Aero	713 m	-66,21	-33,16	5,65
6	Río Cuarto Aero	420 m	-64,14	-33,07	5,95
7	Rosario Aero	25 m	-60,47	-32,55	10,87
8	Gualectuaychú Aero	21 m	-58,37	-33	13,51
9	San Rafael Aero	748 m	-68,24	-34,35	1,18
10	Bahía Blanca Aero	83 m	-62,1	-38,44	5,55
11	Neuquén Aero	271 m	-68,08	-38,57	5,82
12	Esquel Aero	797 m	-71,09	-42,56	2,60
13	Trelew Aero	43 m	-65,16	-43,12	6,34
14	San Julián Aero	62 m	-67,45	-49,19	5,62
15	Ushuaia Aero	57 m	-68,19	-54,48	10,5

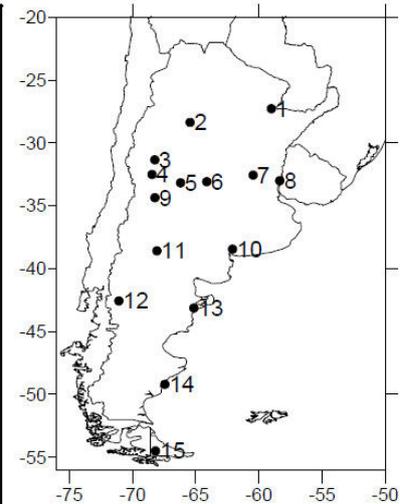


Figura 1: Ubicación de las estaciones utilizadas en el presente estudio y porcentaje de datos faltantes en cada una de ellas en el período 1991-2010.

Se calcularon los promedios horarios anuales (pha) de ps y pm según la ecuación 1:

$$pha(h) = \frac{1}{N_1} \sum_a \sum_m \sum_d p(h, d, m, a) \quad (1)$$

$a = \text{año}, m = \text{mes}, d = \text{día}, h = \text{hora}$

donde N_1 es el producto entre el número de días, el número de meses y el número de años. Los promedios horarios mensuales (phm) según la ecuación 2:

$$phm(h, m) = \frac{1}{N_2} \sum_a \sum_d p(h, d, m, a) \quad (2)$$

donde N_2 es el producto entre el número días y el número de años.

Con el fin de explorar si la marea barométrica desempeña algún rol en la profundidad de los sistemas de superficie, se utilizó la base de datos cuatri-diurnos reanalizados del NCEP (Physical Sciences Division, Earth System Research Laboratory, NOAA, Boulder, Colorado, from their Web site at <http://www.esrl.noaa.gov/psd/>).

3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Para realizar este estudio se empleó la presión medida a nivel de la estación, es decir ps, pero para poder realizar una discusión comparativa entre estaciones fue necesario considerar la presión reducida a nivel medio del mar (pm).

En la Figura 2 se muestran pha de ps y pm para 8 de las estaciones meteorológicas analizadas. En todas ellas se observa claramente una doble onda diaria. Los máximos principales se presentan entre las 12 y las 14 UTC y los secundarios entre las 3 y las 4 UTC, mientras que el mínimo más profundo se da entre las 20 y 21 UTC y el menos profundo entre las 7 y las 9 UTC. Para los promedios horarios anuales tanto la presión a nivel de la estación como la presión a nivel medio del mar presentan un comportamiento similar.

La mayor caída de presión se produce entre las 13 y las 21 UTC y las mayores variaciones se observan en las estaciones ubicadas en el norte y centro del país concordando con lo señalado por Lindzen y Chapman (1970). Los valores de pm entre las 12 y las 21 UTC varían desde 4,3

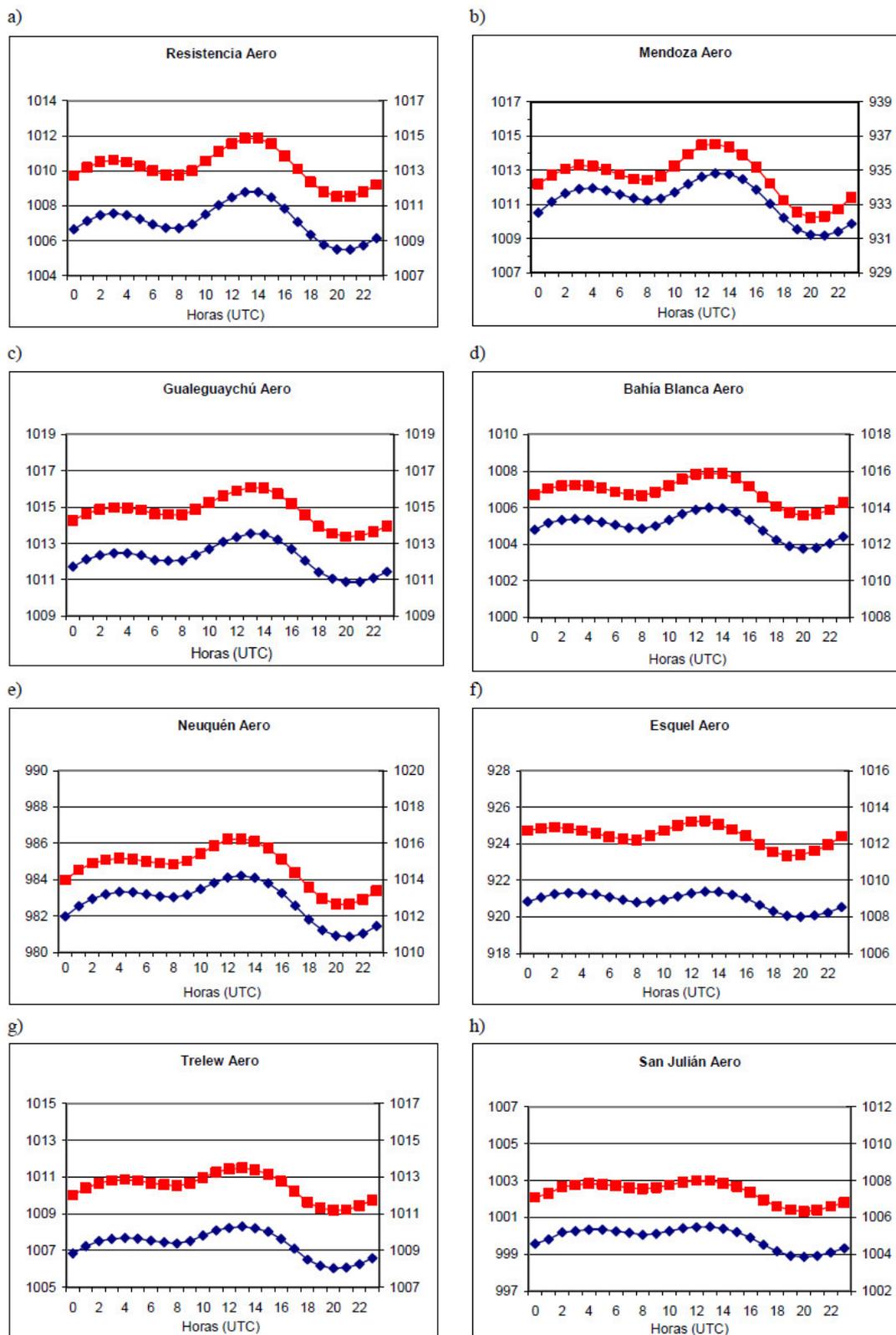


Figura 2: Marcha horaria anual de la presión de superficie (azul, eje izquierdo) en hPa y de la presión a medio nivel medio del mar (rojo, eje derecho) en hPa, para las estaciones meteorológicas: a) Resistencia Aero, b) Mendoza Aero, c) Gualeguaychú Aero, d) Bahía Blanca Aero, e) Neuquén Aero, f) Esquel Aero, g) Trelew Aero y h) San Julián Aero.

hPa, en las estaciones ubicadas en el norte y centro de la Argentina, hasta 1,7 hPa en las del sur, por ejemplo San Julián Aero. Se aprecia en dicha figura una marcada disminución del efecto diurno con el aumento de la latitud.

Debido a los valores importantes de las variaciones de presión horaria anual, se analiza cómo varía a lo largo del año la diferencia entre la presión horaria media mensual máxima y mínima (ecuación 2), de aquí en más amplitud de la onda de presión (Fig. 3). En todas las estaciones se observa que la amplitud de la onda de presión es más grande en los meses más cálidos que en los meses más fríos (mayo, junio y julio). En las estaciones de la Región Centro y Este, la amplitud de la onda de presión disminuye con el aumento de la latitud y muestran un ciclo estacional marcado ya que las diferencias entre verano e invierno son de alrededor de 1 hPa (Fig. 3.a, c y d y las figuras no mostradas correspondientes a las estaciones Rosario Aero y Río Cuarto Aero). Las estaciones de la Región Patagónica presentan un comportamiento similar a las estaciones de la región anteriormente descrita en cuanto a la relación del valor de la amplitud con el incremento de la latitud, pero muestran un leve incremento en la variación entre el verano e invierno de más de 1,5 hPa. (Fig. 3, e y f). Pertenece también a esta región Esquel Aero y Ushuaia Aero. Mendoza, como estación representativa de Región Oeste, (Fig. 3.b) muestra una importante amplitud de la onda de presión y además una diferencia entre verano e invierno de 2 hPa, aproximadamente. La estación meteorológica que presentó una mayor variación de la phm fue San Juan Aero, donde la diferencia llegó a 6,7 hPa en el mes de diciembre (Fig. 4.b). Estas grandes variaciones caracterizan a las estaciones ubicadas en la Región Oeste analizadas en el presente estudio, San Juan Aero (Fig. 4.a), Mendoza Aero (Fig. 3.b), San Rafael Aero, Neuquén Aero, San Luis Aero y Catamarca Aero (figuras no mostradas). Otra característica de esta región es la diferencia de intensidad entre las amplitudes de ps y pm que se registra en invierno y primavera. Para

ejemplificar, en las Figuras 3.b y 4.a (Mendoza Aero y San Juan Aero respectivamente) se observa una diferencia que alcanza 0,8 hPa en los meses de agosto y septiembre. En San Rafael Aero (figura no mostrada) esta diferencia llega 1 hPa en los meses de mayo y junio.

Al encontrar que el comportamiento anual de la amplitud de la onda diaria media mensual de la presión no es uniforme en todas las regiones, se decidió explorar con más detalle la longitud de la onda media horaria mensual (Ec. 2). En la Figura 5 se graficaron las marchas horarias de los meses de enero y julio, como representativos de los meses cálidos y fríos, para las estaciones meteorológicas de Mendoza Aero, Gualeguaychú Aero y Trelew Aero como representativas de los 3 distintos comportamientos en cuanto a la amplitud de onda de presión ya descritos. Además se calculó, para estas estaciones, la desviación estándar (DE) respecto a dichos promedios horarios mensuales con el fin de utilizarlos como parámetros comparativos de la amplitud de la onda y de esta forma estimar, en primera aproximación, la importancia de dicha amplitud en la evolución horaria de los sistemas del tiempo. Para cada estación, la DE horaria mensual es casi constante.

La amplitud de la onda de presión en Mendoza, durante el verano, es de aproximadamente 5 hPa, mientras que la DE no supera los 3,6 hPa durante todas las horas del día, mientras que en julio, la amplitud es inferior a los 3 hPa y la DE es aproximadamente 6 hPa (Fig. 5.a y b). Esto nos estaría indicando cuán importante es el aporte del campo medio en la evolución diaria de la presión en las estaciones de la Región Oeste durante el período estival. En invierno la amplitud de la onda de presión representa la mitad de la DE, si bien es menos importante su aporte que en el verano no por eso es despreciable. Con respecto a la estación representativa de Región Centro y Este en ambos meses la amplitud es menor que la DE, con una diferencia de 1 hPa en el verano y aproximadamente la mitad en el invierno, o

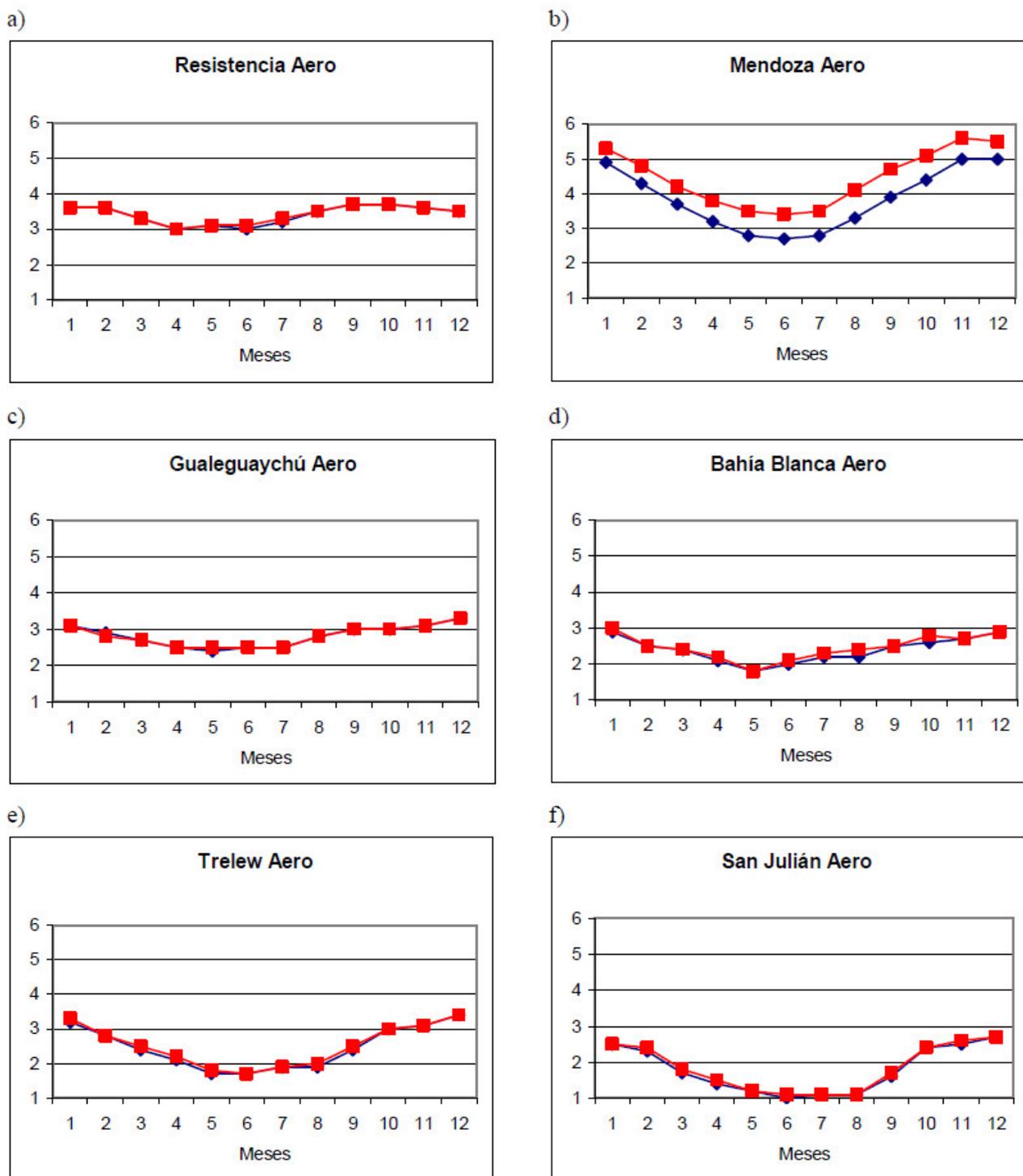


Figura 3: Variación mensual de la diferencia entre el máximo y el mínimo de p_m de ps (azul) en hPa y de p_m de pm (rojo) en hPa para las estaciones meteorológicas: a) Resistencia Aero, b) Mendoza Aero, c) Gualeguaychú Aero, d) Bahía Blanca Aero, e) Trelew Aero y f) San Julián Aero.

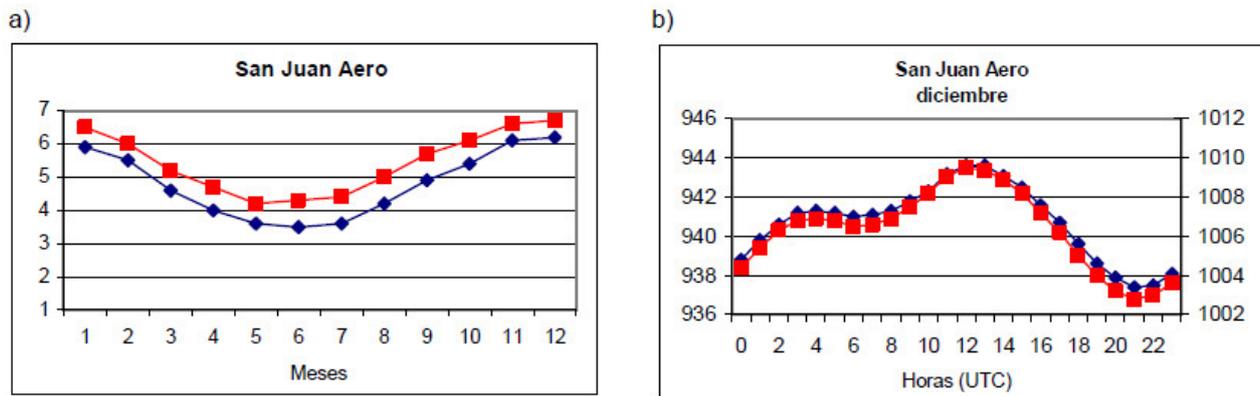


Figura 4: Para la estación meteorológica de San Juan Aero a) Variación mensual de la amplitud de ps y de pm (hPa) y b) Marcha horaria para el mes de diciembre de ps (eje izquierdo, hPa) y pm (eje derecho, hPa). El color azul muestra los resultados de ps y el rojo los de pm.

sea que al igual que en la Región Oeste, el comportamiento medio de la presión en verano tiene un rol relevante en la evolución de los sistemas béricos. Finalmente, si se observa la Figura 5.e y f, en la Región Patagónica, las diferencias entre la amplitud de la onda de presión es de 3 hPa mientras que la DE es de 7,5 hPa para verano e invierno respectivamente, lo cual nos está indicando que la variabilidad diurna de la presión en el período frío se debe principalmente a otros efectos.

Finalmente se analiza la longitud de onda diaria (ld). Para enero en Gualeguaychú (Figura 5c), el mínimo relativo se encuentra a las 06 UTC y el mínimo más profundo a las 21 UTC, con una ld de 15 horas, mientras que en julio dicha longitud se reduce a 10 horas, ya que el mínimo relativo ocurre a las 09 UTC mientras que el mínimo más profundo a las 19 UTC (Fig. 5d). En Trelew (Fig. 5e y f), 10.12° hacia el sur de Gualeguaychú, se mantienen similares variaciones en las longitudes de de la onda diaria a pesar de tener amplitudes distintas. El tercer tipo, representado por Mendoza (Fig. 5a y b), también responde al mismo patrón. Como se comentó previamente, las estaciones de la región oeste, como por ejemplo Mendoza Aero (Fig 5.a y b), muestran diferencias en el comportamiento de phm de ps y pm. Entonces se podría decir que la longitud de la onda diaria de la presión se

relaciona con la marea barométrica mientras que su amplitud estaría modulada por otros efectos tales como la ocurrencia de la baja del noroeste de Argentina (Lichtenstein, 1980, Seluchi y otros, 2003, Ferreira y otros 2010). El desarrollo de dicho sistema de baja presión, su evolución y su ciclo diurno, en especial durante el período estival cuando su presencia es casi permanente, presenta una influencia importante en el campo medio de la presión, en especial en las estaciones de la zona oeste. Como en el presente estudio se utilizó una metodología muy simple para computar la onda diaria media de la presión, la misma no permite aislar distintos efectos los cuales serán estudiados con mayor profundidad en trabajos futuros utilizando metodologías más específicas.

Con el fin de explorar la influencia de la caída de la presión debido a la onda diaria media mensual se examinaron algunas situaciones del tiempo ciclónicas y anticiclónicas.

En la Figura 6.a se muestra la trayectoria del mínimo de presión de un ciclón que se desplazó entre 23 y 25 de agosto del 2005 en la región del Río de la Plata (Possia y otros, 2011). En ella se observa que el mayor descenso de presión en ese ciclón se registró entre las 12 y las 18 UTC del día 23 con una tendencia negativa de 6 hPa en 6 horas (Figura 6, puntos 1 y 2).

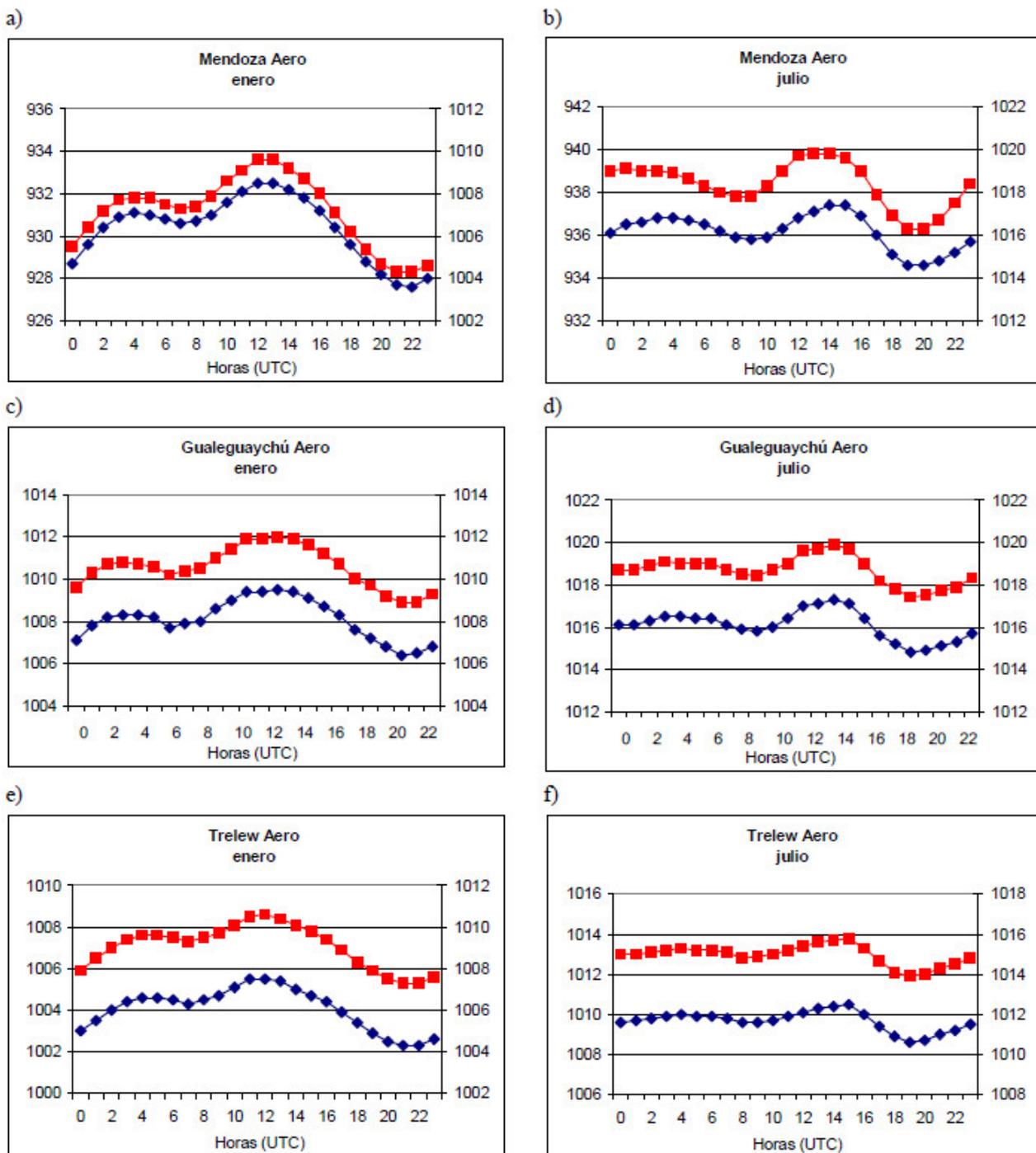


Figura 5: Marcha horaria mensual de la presión de superficie (azul, eje izquierdo) en hPa y de la presión a nivel medio del mar (rojo, eje derecho) en hPa para las estaciones meteorológicas: Mendoza Aero a) enero, b) julio, Guaquaychú Aero c) enero, d) julio y Trelew Aero e) enero, d) julio.

Para analizar el efecto de la variación semidiurna de la presión en la tendencia negativa de dicho ciclón, se computó la presión diaria media para el mes de agosto de la estación meteorológica de Gualeguaychú, por ser la más próxima al centro del sistema (Figura 6.b). En dicha figura puede observarse que la variación de la presión media entre las 12 y las 18 UTC (6 horas) es de -2,1 hPa, lo que significa que la profundidad del ciclón por otros procesos fue de 4 hPa durante ese período. Por lo tanto si se considera el comportamiento medio horario de la presión, este ciclón no califica como explosivo.

El segundo caso presentado corresponde al ciclón que tuvo lugar entre el 15 y 17 de mayo de 2000 en la región del litoral (Possia y otros 2003). La Tabla I muestra la trayectoria del mínimo de presión y la variación de la presión cada 3 horas así como las variaciones trihorarias de phm en Gualeguaychú para el mes de mayo. Se puede observar que entre las 3 y las 6 UTC el ciclón se profundizó 4,2 hPa mientras que phm presentó una variación de sólo -0,4 hPa aportando un 10% a la profundidad del ciclón. Entre las 15 y las 18 UTC del mismo día, la marea aporta -2,1 hPa dando lugar a una variación negativa de medio hectopascal al sistema.

En la Tabla II se presenta la ubicación y las variaciones cuatridiurnas de la presión y de phm en un sistema ciclónico que se desarrolló entre el 8 y 9 octubre de 2011. Claramente se puede apreciar que entre las 12 y 18 UTC del día 8, la presión disminuyó 3,6 hPa en 6 horas mientras que el efecto producido por phm es de -2,5 hPa, o sea que si se considera su efecto, la profundidad debida a los procesos ciclogénéticos fue mucho menor.

Se examinó el aporte de la marea barométrica al ciclón del 22 y 23 junio de 2011. En la Tabla III se observa que la mayor caída de presión en el ciclón ocurrió entre las 12 y 18 UTC del día 23 (-5,3 hPa) y phm aportó -1,8 hPa a dicha profundidad.

Fecha	Hora (UTC)	Latitud (°)	Longitud (°)	Presión (hPa)	ΔP_s (hPa)	$\Delta_{E\text{ phm}}$ (hPa)
15-may	18	-29,11	-59,42	999,1		
15	21	-29,41	-57,9	997,9	-1,2	0,2
16-may	0	-30,16	-57,39	997,6	-0,3	0,6
16	3	-30,2	-57,2	998,8	1,2	0,7
16	6	-31,4	-57,9	994,6	-4,2	-0,4
16	9	-32,6	-57,5	993,5	-1,1	0
16	12	-33	-58,37	992,3	-1,2	0,8
16	15	-32,4	-58	994,5	2,2	0,2
16	18	-33	-58,37	994,0	-0,5	-2,1
16	21	-32,4	-54,2	993,6	-0,4	0,2
17-may	0	-31,4	-57,9	997,0	3,4	0,6
17	3	-31,4	-57,9	999,0	2,0	0,7

Tabla I: Sistema ciclónico en mayo de 2000: la columna ΔP_s muestra la diferencia de presión en el sistema entre las horas consecutivas indicadas y las posiciones Latitud y Longitud. La columna $\Delta_{E\text{ phm}}$ muestra la diferencia para phm de mayo de la estación de Gualeguaychú Aero.

Fecha	Hora (UTC)	Latitud (°)	Longitud (°)	Presión (hPa)	ΔP_s (hPa)	$\Delta_{E\text{ phm}}$ (hPa)
15-may	18	-29,11	-59,42	999,1		
15	21	-29,41	-57,9	997,9	-1,2	0,2
16-may	0	-30,16	-57,39	997,6	-0,3	0,6
16	3	-30,2	-57,2	998,8	1,2	0,7
16	6	-31,4	-57,9	994,6	-4,2	-0,4
16	9	-32,6	-57,5	993,5	-1,1	0
16	12	-33	-58,37	992,3	-1,2	0,8
16	15	-32,4	-58	994,5	2,2	0,2
16	18	-33	-58,37	994,0	-0,5	-2,1
16	21	-32,4	-54,2	993,6	-0,4	0,2
17-may	0	-31,4	-57,9	997,0	3,4	0,6
17	3	-31,4	-57,9	999,0	2,0	0,7

Tabla II: Sistema ciclónico en octubre 2011: la columna ΔP_s muestra la diferencia de presión en el sistema entre las horas consecutivas indicadas y las posiciones Latitud y Longitud. La columna $\Delta_{E\text{ phm}}$ muestra la diferencia para phm de octubre de la estación de Resistencia Aero.

Por último se examinó el efecto de la variación de phm en la trayectoria de un anticiclón que tuvo lugar el 20 y 21 de agosto de 2011 (Tabla IV). Entre las 6 y 12 UTC del día 20 la presión aumentó 2,4 hPa con un aporte de phm de 1,1 hPa, mientras que entre 12 y 18 UTC del mismo

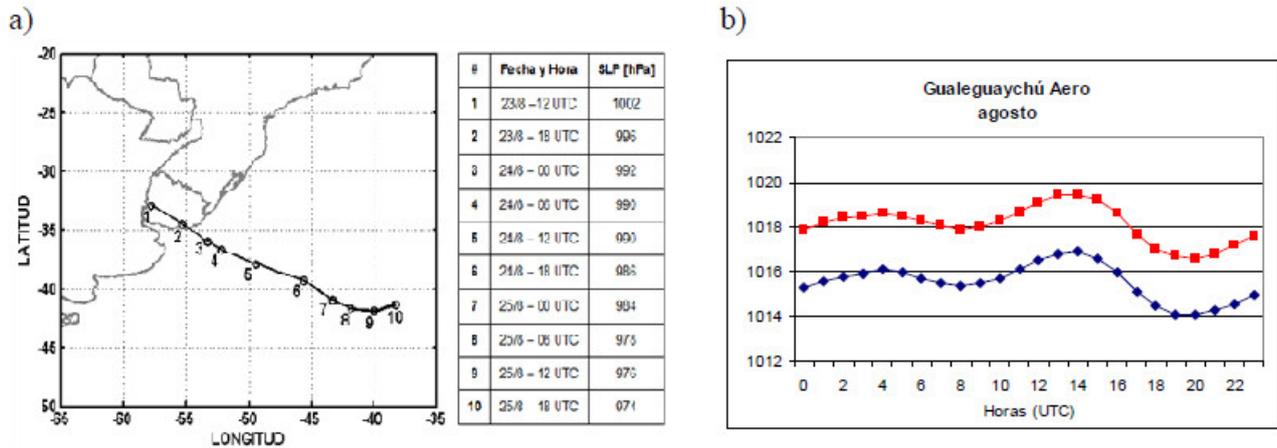


Figura 6: a) Figura 1 de Possia y coautores, 2011: Trayectoria del centro del ciclón entre las 12 UTC de 23 de agosto y las 12 UTC del 25 de agosto de 2005 y b) Marcha horaria media mensual de la presión de superficie (azul) en hPa y de la presión a nivel medio del mar (rojo) en hPa para el mes de agosto en Guaguaychú Aero.

Fecha	Hora (UTC)	Latitud (°)	Longitud (°)	Presión (hPa)	ΔP_s (hPa)	$\Delta_E phm$ (hPa)
22-jun	12	-27,5	-57,5	1013,9		
22	18	-27	-57,5	1012,2	-1,7	-2,1
23-jun	0	-28,5	-57	1010,8	-1,4	1
23	6	-32,5	-57	1008,0	-2,8	0
23	12	-34,5	-55	1007,5	-0,5	0,8
23	18	-37	-53,5	1002,2	-5,3	-1,8

Tabla III: Sistema ciclónico en junio 2011: la columna ΔP_s muestra la diferencia de presión en el sistema entre las horas consecutivas indicadas y las posiciones Latitud y Longitud. La columna $\Delta_E phm$ muestra la diferencia para phm de junio de las estaciones de Resistencia Aero (filas 1 y 2) y Gualeguaychú Aero filas (3, 4 y 5).

día, la presión disminuyó - 4,2 hPa y phm lo hizo en -1,5 hPa. Estos valores indican que la oscilación media de la presión aportó casi el 37% al debilitamiento del sistema mientras que entre las 0 y 6 UTC su efecto contribuyó alrededor de un 46% al aumento de la presión.

Durante la génesis de un sistema de presión, la marea barométrica desempeñan un rol importante incrementando o disminuyendo la profundidad del mismo dependiendo de la hora en que ocurra el desarrollo. Por lo tanto,

Fecha	Hora (UTC)	Latitud (°)	Longitud (°)	Presión (hPa)	ΔP_s (hPa)	$\Delta_E phm$ (hPa)
20-ago	0	-39,5	-71	1032,8		
20	6	-39	-70	1035,6	2,8	-0,9
20	12	-39	-70	1038,0	2,4	1,1
20	18	-40	-70	1033,8	-4,2	-1,5
21-ago	0	-40	-70	1033,5	-0,3	1,3
21	6	-40	-71	1036,2	2,7	-0,9
21	12	-40	-70	1035,0	-1,2	1,1

Tabla IV: Sistema anticiclónico en agosto 2011: la columna ΔP_s muestra la diferencia de presión en el sistema entre las horas consecutivas indicadas y las posiciones Latitud y Longitud. La columna $\Delta_E phm$ muestra la diferencia para phm de agosto de la estación de Esquel Aero.

esta oscilación debería ser considerada en los pronósticos de los sistemas del tiempo.

4. CONCLUSIONES

El comportamiento horario medio anual de la presión a nivel medio del mar en Argentina presenta los máximos principales entre las 12 y las 14 UTC y los secundarios entre las 3 y las 4 UTC. El mínimo más profundo ocurre entre las 20 y 21 UTC mientras que el menos profundo

ocurre entre las 7 y las 9 UTC. La mayor caída de presión se produce entre las 13 y las 21 UTC y las más importantes variaciones se observan en las estaciones ubicadas en el norte y centro del país (4,3 hPa) disminuyendo hacia latitudes más altas (1,7 hPa). Aunque para un mes particular los valores medios mensuales pueden ser aún mayores (6,7 hPa en San Juan Aero para el mes de diciembre).

La amplitud de la onda de presión es mayor en los meses más cálidos y presenta tres tipos de comportamientos. La región Centro y Este donde la amplitud disminuye con el aumento de la latitud y muestran un ciclo estacional marcado. La región Patagónica con menor amplitud que la región anterior pero con mayor diferencia entre verano e invierno. Y por último la región Oeste, que es la que tiene la más importante amplitud de onda y además la mayor diferencia entre verano e invierno. Los resultados sugieren que es muy relevante el aporte del campo medio en la evolución diaria de la presión en las estaciones de la Región Oeste durante el período estival. Por otro lado, las tres regiones presentan un comportamiento similar en cuanto a la longitud de onda de la presión con una diferencia de 5 horas entre invierno y verano. La longitud se relaciona directamente con la marea barométrica mientras que la amplitud estaría modulada por otros efectos locales.

El efecto de la caída/aumento de la presión debido a la marea barométrica afecta de distinta forma a la profundidad de los sistemas béricos según la hora en que ellos tengan lugar. Este resultado debería ser tenido en cuenta en el momento de definir y caracterizar la profundidad de los ciclones/anticiclones para realizar cualquier estudio y/o pronóstico del tiempo. La importancia del presente estudio radica en que es el primero en que se documenta en la bibliografía local el efecto de la variación semidiurna de la presión, y en especial para algunas estaciones de la región ciclogénica del

litoral.

Agradecimientos: Las autoras agradecen al SMN por facilitar la información meteorológica utilizada y a los revisores por sus sugerencias para enriquecer el trabajo. El presente estudio fue financiado con los proyectos UBACyT: 20020100100434, 20020120100284 y 20020110100122 y ANPCyT: PICT-2010-2110.

REFERENCIAS

- Covey C., A. Dai, D. Marsh y R. Lindzen, 2011. The Surface-Pressure Signature of Atmospheric Tides in Modern Climate Models. *J. Atmos. Sci.*, 28, 495-514.
- Dai, A. y K. E. Trenberth, 2004. The diurnal cycle and its depiction in the Community Climate System Model. *J. Climate*, 17, 930-951.
- Dai A., y J. Wang, 1999. Diurnal and semidiurnal tides in global diurnal pressure fields. *J. of Atmospheric Sciences*. Vol 56. , 3874-3891.
- Ferreira L., C. Saulo y M. Seluchi, 2010. Análisis de la frecuencia de ocurrencia y de la variabilidad estacional de eventos de baja presión en el noroeste argentino. *Meteorologica*, vol 35, nro 1, 17-28
- Gan, M. A. y Rao, V. B., 1991. Surface cyclogenesis over South America. *Mon. Wea. Rev.* 119: 1293-1301.
- Lichtenstein E.R., 1980. La Depresión del Noroeste Argentino. Tesis Doctoral. 133 pp. [Disponible en el Departamento de Ciencias de la Atmosfera, Ciudad Universitaria (1428)]
- Lindzen R. y S. Chapman, 1970. Atmospheric Tides. D. Reidel 200 pag
- Mendes, D., E. Souza, I. Trigo y P. Miranda, 2007. On precursors of South American cyclogenesis. *Tellus*, 59A, 114-121.
- Necco, G., 1982. Comportamiento de vórtices ciclónicos en el área sudamericana durante el FGGE: Trayectorias y desarrollos. *Meteorologica*, 13, 21-34.
- Newton, I., 1687. *Philosophiae Natural & Principia Mathematica*, (a) Bk. 1, Prop. 66,

- Cor. 19, 20; Bk. 3, Prop. 24, 36, 37, (b) Bk. 2, Prop. 48-50.
- Organización Meteorológica Mundial (OMM), 1966. Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos Nro 8. 6ta edición.
- Possia, N., B. Cerne y C. Campetella, 2003. A Diagnostic Analysis of the Río de la Plata Superstorm of May 2000. *Meteorological Applications*, 10, 1, pág. 87-99.
- Possia, N. E., 2004. Estudio de los ciclones explosivos sobre la región sur de Sudamérica. Tesis doctoral, Universidad de Buenos Aires.
- Possia, N, L.Vidal y C. Campetella, 2011. Un temporal de viento en el Río de la Plata. 2009 *Revista Meteorologica* 36 (2), 95-110. ISSN 1850-468X
- Roger, E. y L. F. Bosart, 1986. An Investigation of Explosively Deepening Oceanic Cyclones. *Mon. Wea. Rev.*, 114, 702 – 718.
- Seluchi M.E., Saulo C., Nicolini M., y Satyamurty P., 2003. The Northwestern Argentinean Low: A Study of Two Typical Events. *Mon. Wea. Rev.*, 131, 2361-2378.
- Sanders, F. & Gyakum, J. R., 1980. Synoptic-dynamic climatology of the 'bomb'. *Mon. Wea. Rev.* 108: 194–201.
- Wallace J. y Hobbs P, 2006. *Atmospheric Science, An Introductory Survey. INTERNATIONAL GEOPHYSICS SERIES, Vol 92, Second edition.* Academic Press is an imprint of Elsevier. 478 págs.
- Woolnough, S. J., J. M. Slingo, and B. J. Hoskins, 2004. The diurnal cycle of convection and atmospheric tides in an aquaplanet GCM. *J. Atmos. Sci.*, 61, 2559–2573.

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo la licencia Creative Commons, que permite el uso ilimitado, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada.

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. 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 350 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. Una vez aceptado el manuscrito, la versión final de cada figura, imagen, foto y/o tabla deberá ser enviada separadamente en formato jpg y eps..

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
TESORERO:	Cristian Waimann
PROTESORERO:	Alejandro Aníbal Godoy
VOCALES TITULARES:	Vanesa Pántano Matías Bertolotti Lorena Ferreira
SUPLENTES:	Ricardo Vidal María Soledad Osores María Eugenia Dillon

TRIBUNAL DE HONOR

TITULARES:	María Luisa Altinger María Luz Duarte Inés Velasco Ernesto Crivelli
SUPLENTES:	Mónica Marino Beatriz Scian

COMISIÓN REVISORA DE CUENTAS

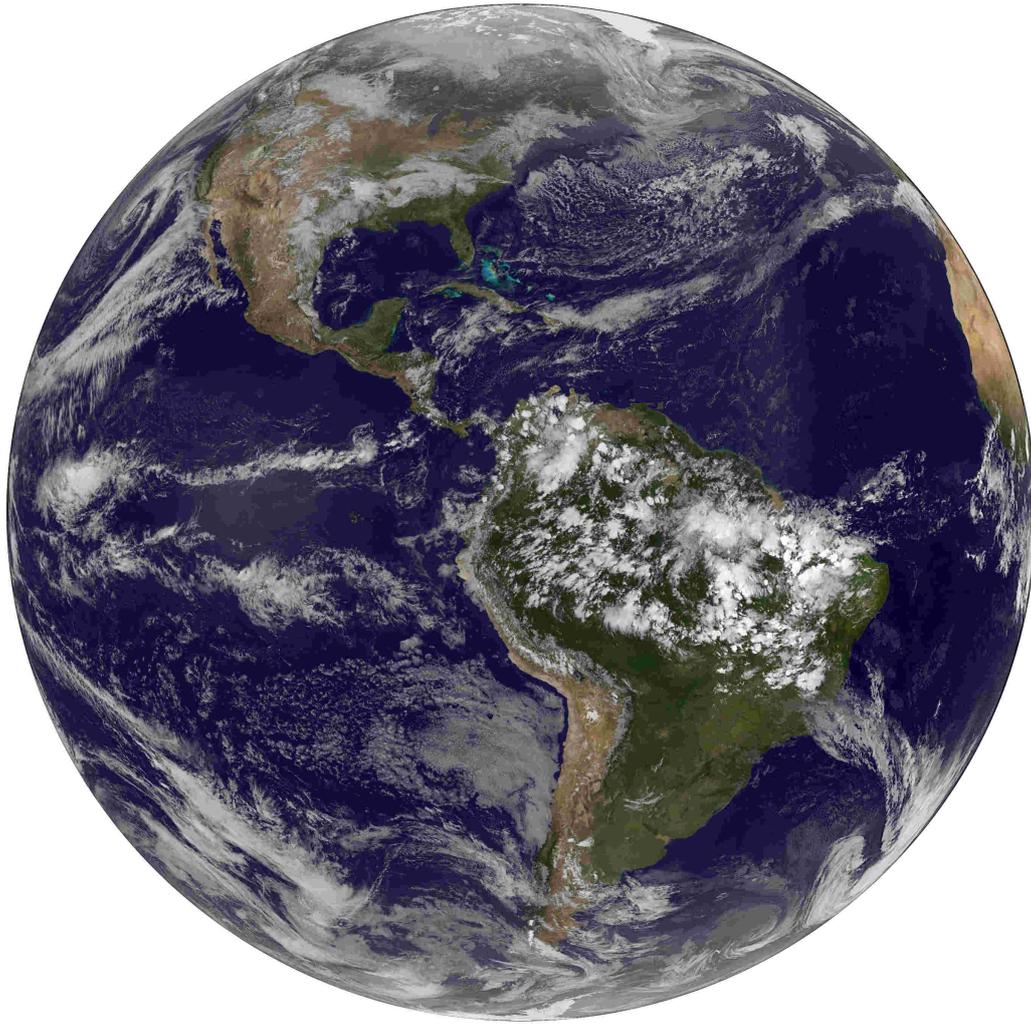
Norma Possía
Maria Isabel Gassmann

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

Meteoro logica

Versión en línea
Versión en CD-ROM

ISSN 1850-468X
ISSN 2347-0364



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