

Evolución del exceso de agua edáfica anual en la Región Pampeana (Argentina)

Evolution of annual soil water surplus in Pampean Region (Argentina)

Olga Eugenia Scarpati¹ y Alberto Daniel Capriolo²

RESUMEN

Las inundaciones y sequías son una constante en la Región Pampeana (Argentina). Casi todos los años uno de estos eventos hidrológicos extremos tiene lugar y, a veces, ambos. La evolución temporal del exceso de agua en el suelo, durante sesenta años se analiza en nueve estaciones meteorológicas localizadas en importantes áreas cuyos usos del suelo tienen impacto económico y social. Ellas se ubican en las provincias de Córdoba, Santa Fe, Entre Ríos, La Pampa y Buenos Aires. Los datos meteorológicos diarios fueron provistos por Servicio Meteorológico Nacional para el período 1951-2010. El modelo de balance de agua en el suelo fue el utilizado por Forte Lay *et al.* que está basado en el de Thornthwaite-Mather y la evapotranspiración diaria de referencia normal media fue estimada con la fórmula de Penman-Monteith. En el presente trabajo al parámetro exceso de agua en el suelo se lo utiliza como indicador del riesgo de inundación. La metodología Makesens se usó para el análisis estadístico, el mismo se basa en el test no paramétrico de Mann-Kendall para el estudio de la tendencia y el método no paramétrico Sen para su magnitud. Todas las estaciones analizadas mostraron diferente evolución del exceso de agua en el suelo y experimentaron riesgo de inundación en algún momento del período estudiado.

¹ Centro de Estudios Farmacológicos y Botánicos (CEFyBO-CONICET) y Facultad de Humanidades y Ciencias de la Educación (FaHCE), Universidad Nacional de la Plata (UNLP) oes-carpat@gmail.com ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-8810-6904>.

² Facultad de Humanidades y Ciencias de la Educación (FaHCE), Universidad Nacional de la Plata (UNLP) albertocapriolo@yahoo.com.ar ORCID iD: <http://orcid.org/0000-0001-8543-8068>.

PALABRAS CLAVE: región oriental de Argentina; riesgos de inundación; exceso de agua en el suelo; variabilidad climática; eventos extremos.

ABSTRACT

Floods are a constant in the central eastern region of Argentina as well as droughts. Almost every year, one of these two extreme hydrologic events takes place and sometimes, both of them. The temporal evolution of soil water surplus, during sixty years, is studied in nine meteorological stations. These are located in important areas whose land uses have economic and social impact. They are localized in the provinces of Córdoba, Santa Fe, Entre Ríos province, La Pampa and Buenos Aires. Daily meteorological data were provided by the National Meteorological Service and the period considered was 1951-2010. Soil water balance was performed according the model used Forte Lay *et al.* which is based on Thornthwaite-Mather method and the normal daily mean reference evapotranspiration was estimated by the Penman-Monteith formula. In the present paper the parameter soil water surplus is used as an index of flood risk. Makesens methodology was used for the statistical analysis; this is based in non parametric test Mann-Kendall for the trend study and the non parametric method Sen for the magnitude. All the analyzed stations showed different evolution of soil water surplus and have experienced flood risk in some moment of the studied period.

KEY WORDS: eastern region of Argentina; flood risk; soil water surplus; climate variability; extreme events.

CÓMO CITAR ESTE ARTÍCULO / CITATION: Scarpati, O. E. y Capriolo, A. D. (2018): "Evolución del exceso de agua edáfica anual en la Región Pampeana (Argentina)", *Estudios Geográficos*, LXXIX/285, pp. 375-395. <https://doi.org/10.3989/estgeogr.201814>.

INTRODUCCIÓN

El *cambio climático* se refiere a la diferencia entre los valores medios de un parámetro climático, que se aleja del rango normal de la variabilidad climática. En cambio la *variabilidad climática* se refiere a la desviación o anomalía de un parámetro climático durante un periodo de tiempo. Sin embargo, en un sentido amplio la *variabilidad climática* se puede comprender por diferencias entre estadísticos de elementos meteorológicos obtenidos con largos periodos de tiempo calculados para distintos periodos de tiempo (Arnell, 1996).

Adams (2004) especificó que «los estimadores de cambios en la producción agrícola dependen de:

- a) cuánto cambió el clima a escala regional;
- b) suposiciones con respecto a la adaptación de productores y consumidores;
- c) tecnologías futuras;

- d) crecimiento de la población y de los ingresos;
- e) degradación de la tierra;
- f) condiciones macroeconómicas;
- g) cambios en las barreras comerciales internacionales y
- h) cambios en las condiciones sociales y políticas.

Los resultados son sensibles a los métodos de medición y a los modelos empleados en estas estimaciones».

Según el mismo autor, los impactos agronómicos y económicos del *cambio climático* dependen principalmente de dos factores:

- 1) la tasa y magnitud de cambio de las variables climáticas y los efectos biofísicos de esos cambios y
- 2) la habilidad de los sistemas agrícolas para adaptarse a las nuevas condiciones.

La flexibilidad de los sistemas agrícolas sugiere que hay un potencial humano importante para adaptarse al *cambio climático*. Las elecciones apropiadas, de parte de los tomadores de decisiones podrían disminuir las pérdidas de rendimiento resultantes del cambio climático o mejorar los rendimientos. Las variaciones de estos últimos generarían mejores precios y mayor suministro de alimentos, lo que significaría oportunidades económicas interesantes de adoptar. De ahí se desprende que el clima influye en el desarrollo vegetal y en la producción de los cultivos en forma directa e indirecta.

La mayor fuente de agua para la vegetación natural y los cultivos es la precipitación, el agua adicional se torna disponible gracias al ascenso capilar del agua subterránea y de la humedad almacenada en el suelo durante la época de lluvias. La importancia del ascenso capilar se estima en 1-2 mm por día, dependiendo de la profundidad del agua subterránea, de la textura del suelo y de la humedad del aire. El almacenaje de agua en el suelo depende principalmente de la profundidad del suelo, su textura y el contenido de material orgánica; y puede variar aproximadamente entre 30-50 mm en suelos arenosos a más de 200 mm en suelos arcillosos (Verheye, 2004).

La precipitación media anual es el elemento climático más común y sencillo para caracterizar el estado de humedad de un área. Pero es incompleto y no muy relevante como expresión de la disponibilidad de agua para la agricultura o la forestación, porque no informa sobre la distribución de la misma y la eventual presencia de períodos secos.

En Argentina, los cultivos de verano son sensibles principalmente a la precipitación del semestre cálido (Octubre-Marzo) y lo más importante es la

cantidad de lluvia recibida en la época de la floración; por ejemplo, Enero para el cultivo de maíz (Forte Lay y Scarpati, 2004).

Cuando se supera la capacidad de campo se produce el exceso de agua en el suelo.

En ocasiones hay dificultades para que el agua infiltre debido a la poca profundidad de la napa (capa de agua en la superficie de la tierra o subterránea), situación que es frecuente en áreas deprimidas de la Región Pampeana.

Los flujos hídricos verticales, como son la precipitación y la evapotranspiración, son más importantes en una región de escaso relieve como es la que se estudia. La napa freática se eleva en los períodos con excesos de agua, que pueden llegar a la superficie e incrementar la posibilidad de inundación y el tamaño de lagos, estanques y embalses superficiales.

Este escenario ha sido común en la región en las últimas décadas como resultado de un aumento de las precipitaciones, como se explica más adelante.

Kruse et al. (2001) explican la relación entre precipitación, evapotranspiración, almacenaje de agua en el suelo, exceso de agua en el suelo, napa freática y escurrimiento superficial bajo distintos escenarios en el noroeste de la provincia de Buenos Aires. Ellos observaron una buena relación temporal entre las alturas de la napa y el exceso de agua en el suelo.

Capriolo y Scarpati (2012) utilizaron el valor anual de exceso de agua en el suelo como indicador del riesgo de inundación y en base a él elaboraron una clasificación. Un valor medio anual de 300 mm se considera «umbral» por encima del cual puede ocurrir una inundación. Este valor empírico surge del conocimiento de la región y de los sucesos de eventos hidrológicos extremos.

Dicha clasificación es:

Excesos de agua en el suelo (mm)	≤ 100	> 100 and ≤ 200	> 200 and ≤ 300	> 300
	Leve	Moderado	Severo	Grave

Región en estudio

La Región Pampeana se caracteriza por largos períodos con falta de agua en el suelo, sequías persistentes y altas temperaturas alternados con períodos de intensas precipitaciones que dan lugar a serias inundaciones. Estos procesos periódicos limitan la producción ganadera y agrícola en tierras potencialmente aptas y ponen en peligro zonas urbanas. Esto causa incertidumbres que limitan las inversiones, la adopción de modernas técnicas agrícolas y el desarrollo integral de la región que, de otra forma podría llegar a su máximo potencial. Desde el punto

de vista económico, es el territorio argentino más importante con características de clima y suelo que lo transforman en un área agrícola y ganadera por excelencia.

La Región Pampeana es una de las principales productoras de alimentos del país. La mayoría de las actividades agrícolas se desarrollan en condiciones de secano, y por ello, los cultivos dependen de la precipitación durante las épocas de crecimiento y de desarrollo y son muy susceptibles a la variabilidad climática.

Los productores agropecuarios, a pesar de las situaciones económicas poco favorables de las últimas décadas, han hecho posible el incremento de los rendimientos intensificando sus sistemas de producción.

La Región está formada por parte de distintas provincias: sur de Entre Ríos, sur de Córdoba, este de La Pampa, sur de Santa Fe, casi por completo la de Buenos Aires. En ella se ubican ciudades tan importantes como Buenos Aires, Rosario, La Plata, Mar del Plata, Santa Fe y Bahía Blanca.

La provincia de Buenos Aires constituye una importante integrante de la Región Pampeana, es una extensa planicie cuya altura no supera los 300 m, con las excepciones de las sierras de Tandilia y Ventania, ubicadas en su área sur, que alcanzan los 520 m y 1.240 m respectivamente.

En la provincia de Córdoba las características de relieve y circulación atmosférica determinan su clima (Murphy y Hurtado, 2013). La aridez aumenta de este a oeste y determina una amplia zona árida al noroeste. Un bioma xerófito domina la provincia, pero al sudeste el clima permite la presencia de extensos pastizales. De ahí, que las dos estaciones meteorológicas analizadas, en terreno cordobés, Marcos Juárez y Río Cuarto, representan, cada una diferentes escenarios.

El clima del área de estudio es templado, con veranos cálidos e inviernos frescos. La temperatura media anual oscila entre 13 °C y 16 °C. El mes más cálido (Enero) tiene una temperatura media de 20 °C a 23 °C y el más frío (Julio) varía entre 7 °C y 9 °C. La precipitación anual media en el área oriental es de 1.000 mm mientras que en la zona sudoeste alcanza a 700 mm. La misma se genera principalmente por el encuentro de una masa templada y húmeda proveniente del anticiclón semipermanente del Océano Atlántico y una masa fría originaria del sudoeste del país. La precipitación en la principal fuente de agua del sistema hidrológico de la región.

El clima de las provincias de Santa Fe y Entre Ríos es muy similar al de la parte norte de la provincia de Buenos Aires.

La provincia de La Pampa se sitúa en un área de transición, entre el clima sub húmedo seco y el clima árido del noreste a sudoeste, y presenta, además un área con clima semiárido. El desarrollo de las actividades agrícolas en estas zonas está limitado por la presencia de agua y su existencia y dinámica está asociada a la variabilidad espacio temporal de la precipitación.

En las últimas décadas del siglo XX se registraron buenos rendimientos de los cultivos en la Región Pampeana debido al aumento de las precipitaciones en las áreas sub húmedas (Castañeda y Barros, 1994; Minetti y Vargas, 1997; Rusticucci y Penalba, 2000; Penalba y Vargas, 2004; Forte Lay, Scarpati y Capriolo, 2008).

Burgos y Vidal (1951) y Forte Lay, Quintela y Scarpati (1992) aplicaron la clasificación climática de Thornthwaite para el área de estudio y estos últimos verificaron cambios cuando se utilizan series con distintos períodos. Los principales cambios encontrados, debido a lo explicado en el párrafo anterior, se observan en el Índice Hídrico (IH) ($IH = 20$, $IH = 0$ e $IH = -20$ que indican clima húmedo; subhúmedo húmedo y subhúmedo seco respectivamente). Todos estos índices tuvieron un desplazamiento hacia el oeste, lo que significó que áreas anteriormente marginales para la actividad agrícola se constituyeron en zonas cultivables. O sea, hubo un cambio en el uso de la tierra.

Varios autores, entre ellos a Forte Lay, Scarpati y Aiello (2005), señalaron los beneficios experimentados por los rendimientos agrícolas en las zonas anteriormente más secas a pesar de otras consecuencias no tan positivas, como ser la remoción de pastizales naturales y la intensificación del cultivo de soja que en algunos casos llegó a ser un monocultivo.

En el mencionado trabajo de Forte Lay, Scarpati y Capriolo (2008) los autores compararon la precipitación media de los períodos 1947-1976 y 1977-2006 y encontraron diferencias positivas en la misma. Las lluvias experimentaron aumentos mayores a 50 mm y hasta 100 y 150 mm en un área importante que incluye al noroeste y el oeste de la provincia de Buenos Aires, el sur de la provincia de Córdoba y el noreste de la provincia de La Pampa. Estos incrementos se registraron principalmente en el semestre cálido. En esta amplia área la actividad ganadería fue reemplazada por la agricultura, por los mayores beneficios económicos de esta última. En el mismo trabajo los autores analizaron el contenido de agua en suelo de los dos períodos estudiados y observaron que el último presentaba condiciones de mayor humedad por la mayor cantidad de agua ingresada al sistema.

MATERIALES Y MÉTODOS

En este trabajo se utilizaron datos diarios de precipitación correspondientes al período 1951-2010 provenientes del Servicio Meteorológico Nacional. Las estaciones meteorológicas de esta institución se eligieron por la larga longitud de sus series de datos, su homogeneidad y desarrollo histórico.

La Figura 1 muestra el área de estudio y la ubicación geográfica de las estaciones meteorológicas cuyo listado se puede observar en el Tabla 1.

FIGURA 1

ÁREA DE ESTUDIO Y ESTACIONES METEOROLÓGICAS UTILIZADAS.

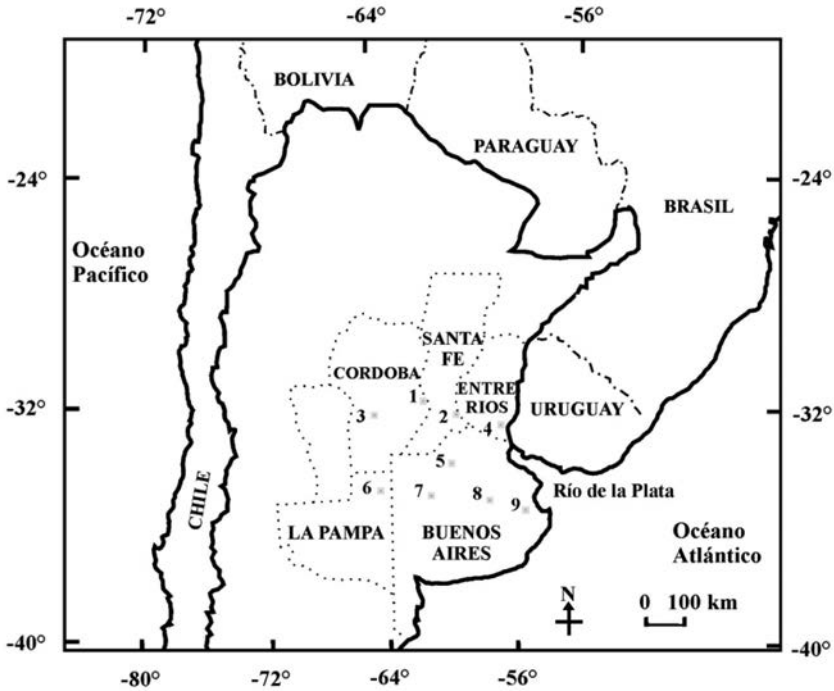


TABLA 1

ESTACIONES METEOROLÓGICAS

	Estación	Latitud S	Longitud W	Altura (m)
1	Marcos Juárez	32° 41'	62° 07'	110
2	Rosario	32° 55'	60° 47'	25
3	Gualeduaychú	33° 00'	58° 37'	21
4	Río Cuarto	33° 07'	64° 14'	421
5	Junín	34° 43'	60° 55'	81
6	General Pico	35° 42'	63° 45'	145
7	Pehuajó	35° 52'	61° 52'	87
8	Las Flores	36° 02'	59° 06'	33
9	Dolores	36° 21'	57° 44'	9

El balance de agua en el suelo se realizó usando la metodología aplicada en Scarpati *et al.* (2011). La variabilidad espacio temporal del almacenaje de agua en el suelo fue estudiada utilizando el modelo de Forte Lay, Scarpati y Capriolo (2008), el cual se basa en el método de Thornthwaite-Mather con datos de precipitación diaria y con evapotranspiración de referencia obtenida con la fórmula de Penman-Monteith (Allen *et al.*, 2004).

Las constantes hidrológicas del suelo: Capacidad de Campo (CC) y Coeficiente de Marchitez Permanente (CM) fueron calculados con datos obtenidos *in situ*. La CC varía entre 140 y 320 mm y el CM está entre 60 y 174 mm considerando una profundidad de suelo de 50 cm.

El balance agua en el suelo fue realizado para todas las estaciones meteorológicas y para cada año del período considerado o sea los 60 años.

Se procedió al análisis estadístico para todas las series de datos obtenidas con la metodología Makesens que se basa en el test no paramétrico de Mann-Kendall para calcular la tendencia y en el método Sen's para la magnitud de la misma (Salmi *et al.*, 2002; Liu *et al.*, 2009).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El exceso de agua en el suelo correspondiente a cada año del período estudiado y cada estación meteorológica es resultado del balance anual de agua en el suelo.

La evolución anual del exceso de agua en el suelo, para todo el período 1951-2010 y para cada localidad, se puede observar en las siguientes figuras que permiten comprender los distintos escenarios. A cada una de ellas se le ha agregado el valor medio anual de exceso de agua en el suelo. A la vez, ellas permiten observar las ocasiones en que el «umbral» de riesgo de inundación (300 mm) fue alcanzado y/o superado.

En Marcos Juárez (al este de la provincia de Córdoba) el exceso solamente alcanzó 313 mm en 1993 en ocasión de una importante inundación que se registró en la región. En 1973, 1977, 1978, 1981, 1990 y 1991 los valores superaron los 200 mm o sea sólo en seis oportunidades.

En Rosario (Provincia de Santa Fe) el exceso de agua en el suelo fácilmente excede los 200 mm y el mencionado umbral de 300 mm fue alcanzado en diez ocasiones: 1961, 352 mm; 1966, 369 mm; 1969, 312 mm; 1971, 382 mm; 1972, 304 mm; 1978, 311 mm; 2000, 551 mm; 2001, 439 mm; 2002: 386 mm; y en 2007 con 471 mm.

FIGURA 2

EVOLUCIÓN DEL EXCESO DE AGUA EN EL SUELO EN MARCOS JUÁREZ.
MEDIA 67,7 MM

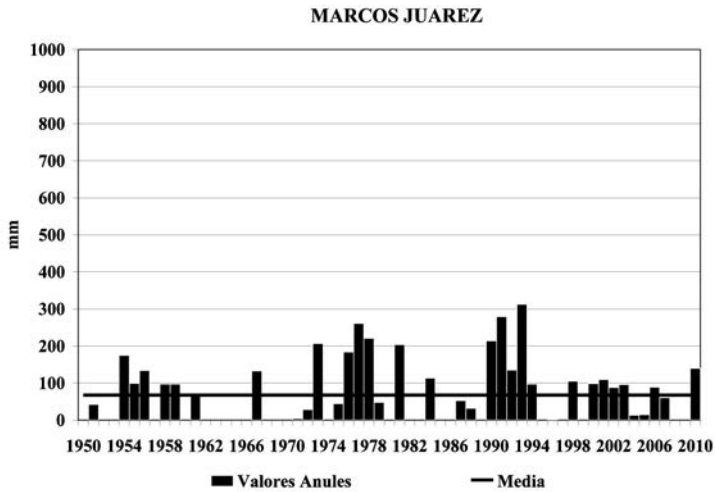
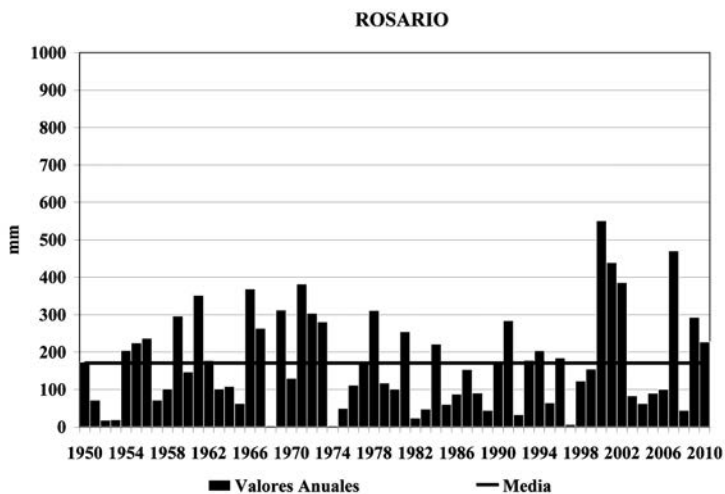


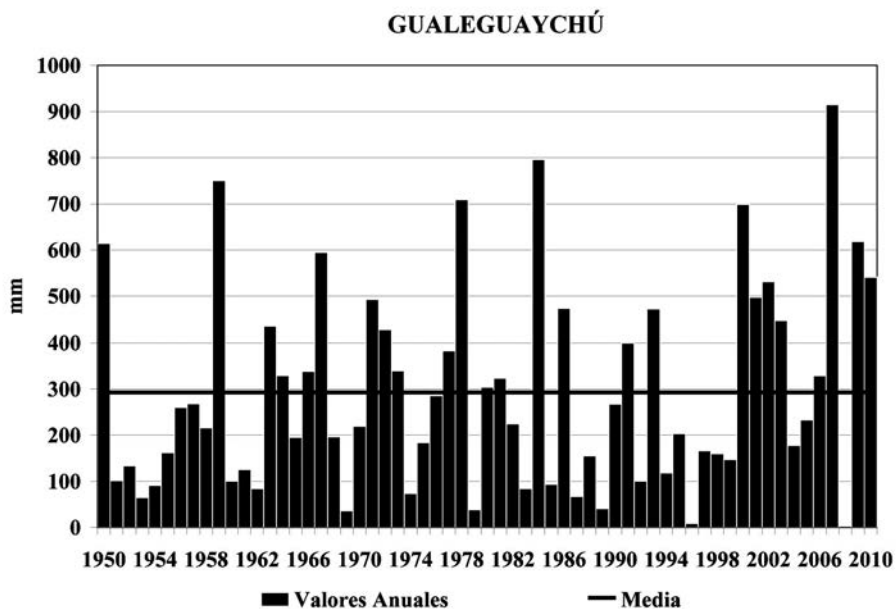
FIGURA 3

EVOLUCIÓN DEL EXCESO DE AGUA EN EL SUELO EN ROSARIO.
MEDIA 170,8 MM



En la localidad de Gualaguaychú en la provincia de Entre Ríos, el exceso de agua en el suelo ha superado el umbral en veintidós años; 1950, 614 mm; 1959, 750 mm; 1963, 436 mm; 1964, 329 mm; 1966, 338 mm; 1967, 595 mm; 1971, 493 mm; 1972, 429 mm; 1973, 339 mm; 1978, 709 mm; 1981, 324 mm; 1984, 796 mm; 1986, 474 mm; 1991, 400 mm; 1993, 473 mm; 2000, 699 mm; 2001, 498 mm; 2002, 531 mm; 2003, 447 mm; 2007, 915 mm; 2009, 618 mm; y 2010, 541 mm. Razzetto (2008) señaló que aquí las inundaciones han causado daños y pérdidas de importancia.

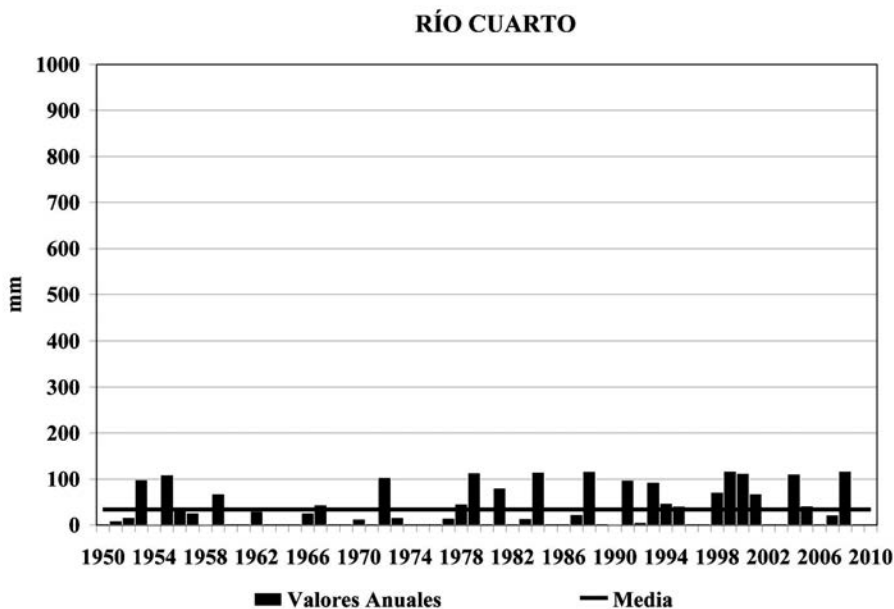
FIGURA 4
EVOLUCIÓN DEL EXCESO DE AGUA EN EL SUELO EN GUALEGUAYCHÚ.
MEDIA 292,6 MM



En Río Cuarto, localidad situada al oeste de la provincia de Córdoba, el exceso de agua en el suelo sólo en dos oportunidades superó los 100 mm (en 1999 y en 2007) y en ellas alcanzó idéntico valor: 117 mm. Con ello demuestra claramente su clima seco.

FIGURA 5

EVOLUCIÓN DEL EXCESO DE AGUA EN EL SUELO EN RÍO CUARTO.
MEDIA 33,9 MM



La ciudad de Junín está situada en el norte de la provincia de Buenos Aires y cercana a la cuenca del Río Salado. El exceso de agua en el suelo ha llegado a valores elevados en varias ocasiones, en: 1953, 304 mm; 1956, 398 mm; 1958, 315 mm; 1959, 301 mm; 1967, 307 mm; 1980, 304 mm; 1990, 424 mm; 1993, 510 mm; 2000, 425 mm; 2001, 703 mm; y 2002, 328 mm.

La localidad de General Pico está ubicada al este de la provincia de La Pampa desde 1969 experimenta casi todos los años exceso de agua en el suelo. Los mayores valores encontrados fueron 266 mm en 1976, 280 mm en 1992, 376 mm en 1999, 301 mm en 2001 y 386 mm en 2004, de ahí en más los valores han disminuido.

FIGURA 6
EVOLUCIÓN DEL EXCESO DE AGUA EN EL SUELO EN JUNÍN.
MEDIA 162,2 MM

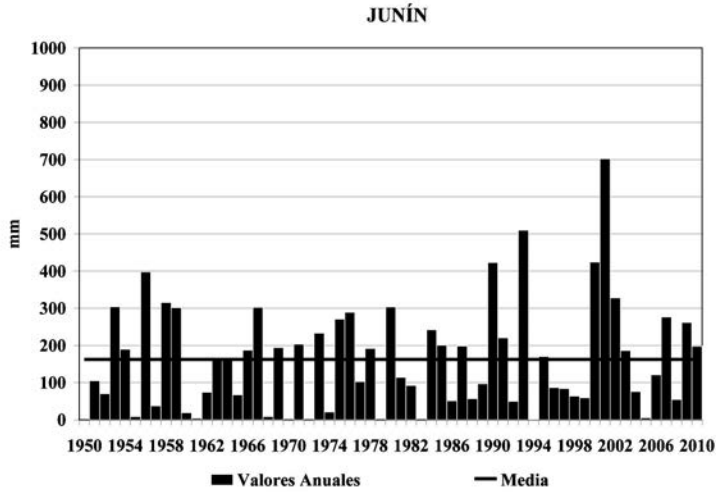
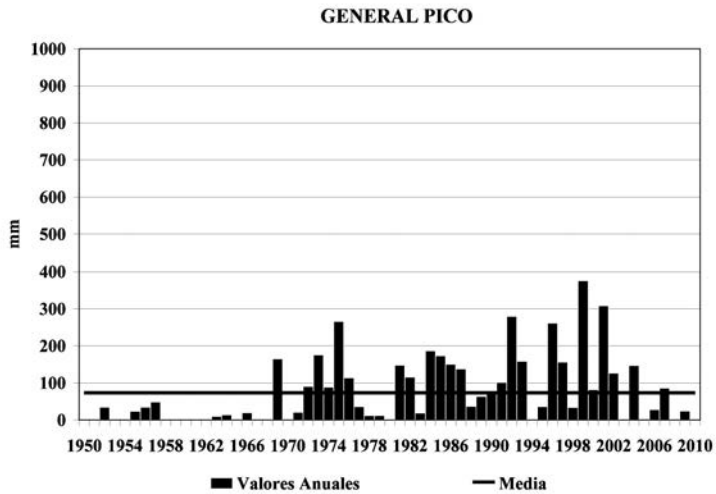
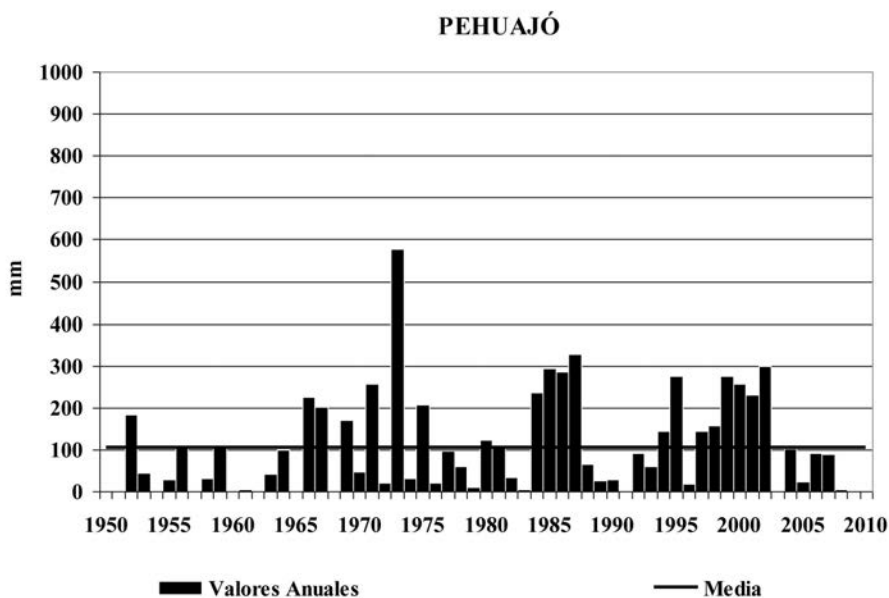


FIGURA 7
EVOLUCIÓN DEL EXCESO DE AGUA EN EL SUELO EN GENERAL PICO.
MEDIA 73,9 MM



La localidad de Pehuajó, situada en el centro oeste de la provincia de Buenos Aires, tiene exceso de agua en el suelo casi todos los años. Al inicio del período estudiado, en algunos años los valores pocas veces superaron los 200 mm, pero posteriormente, la evolución muestra variaciones. En 1973 fue 578 mm, durante la década del 80 (1984, 1985 y 1986) el exceso de agua en el suelo fue muy cercano a los 300 mm llegando en 1987 a 328 mm. En ocasión de la inundación de 2002, su valor fue 299 mm.

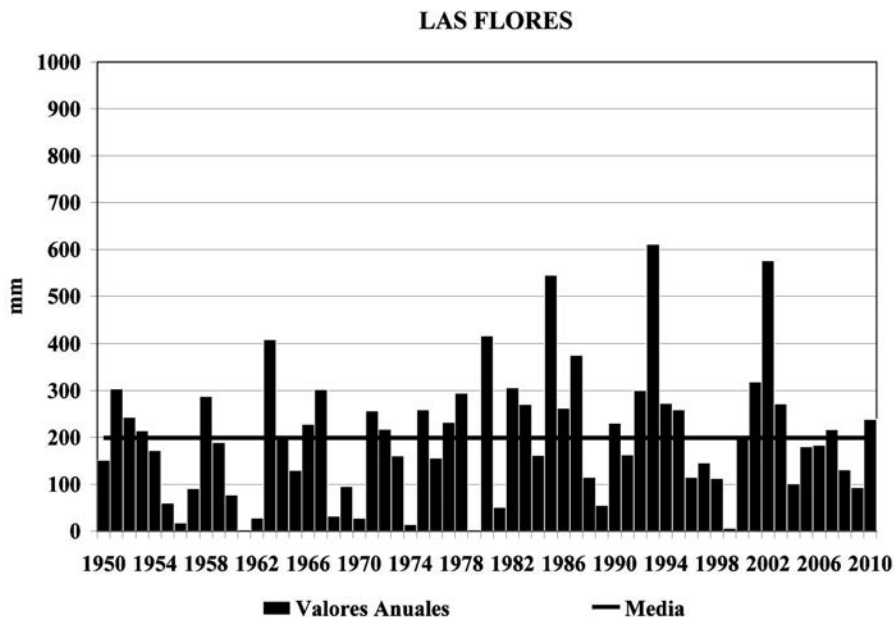
FIGURA 8
EVOLUCIÓN DEL EXCESO DE AGUA EN EL SUELO EN PEHUAJÓ.
MEDIA 104,8 MM



En Las Flores (provincia de Buenos Aires) el umbral de 300 mm ha sido superado en muchas ocasiones en: 1953, 304 mm; 1963, 409 mm; 1967, 302 mm; 1980, 417 mm; 1982, 306 mm; 1987, 375 mm; 1992, 301 mm; y 2001, 319 mm. Los mayores valores alcanzados en eventos de graves inundaciones fueron en 1985, 545 mm; 1993, 611 mm; y 2002 con 576 mm.

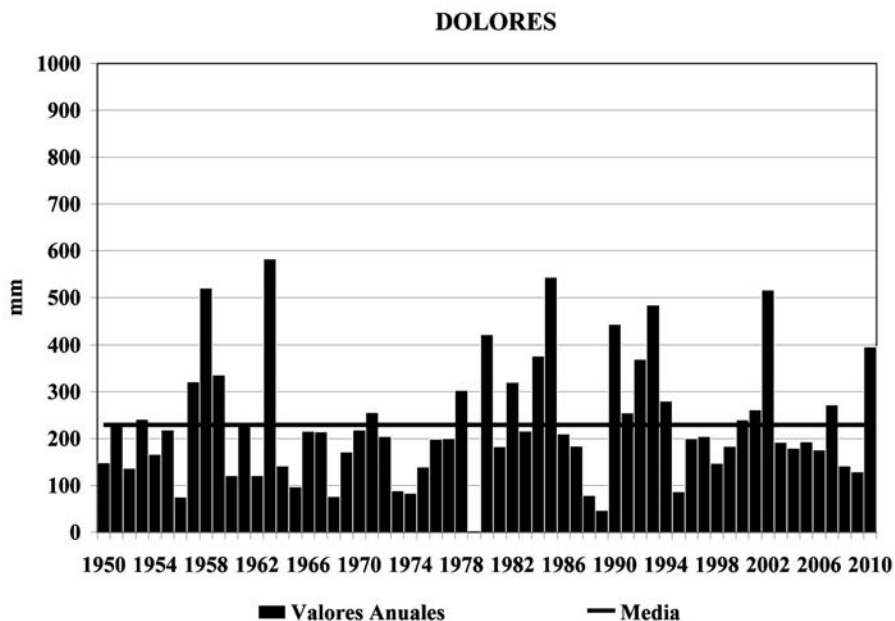
FIGURA 9

EVOLUCIÓN DEL EXCESO DE AGUA EN EL SUELO EN LAS FLORES.
MEDIA 199,1 MM



La localidad de Dolores está ubicada en la Cuenca del Río Salado y cercana a la desembocadura de este río en el Océano Atlántico en un área deprimida de la provincia de Buenos Aires y ha experimentado muchas inundaciones, por lo que valores elevados de exceso de agua en el suelo son frecuentes (Scarpati, Spescha y Capriolo, 2002). Se encontraron valores superiores a 300 mm en 1957 (321 mm), 1959 (335 mm), 1978 (303mm), 1982 (320 mm), 1984 (378 mm), 1992 (370 mm) y 2010 (393 mm). En 1980 (422 mm), 1990 (442 mm) y 1993 (484 mm) superaron los 400 mm y en 1985 y en 2002 fueron mayores a los 500 mm con 543 mm y 516 mm, respectivamente. En esta localidad el único año sin presencia de exceso de agua en el suelo fue 1979.

FIGURA 10
 EVOLUCIÓN DEL EXCESO DE AGUA EN EL SUELO EN DOLORES.
 MEDIA 229,3 MM



Las Figuras 11 a y 11 b permiten visualizar la evolución el exceso de agua en el suelo considerando todas las estaciones estudiadas utilizando rangos de 50 mm. La primera de ellas, muestra la frecuencia del exceso considerando valores entre 0 y 300 mm, mientras que la Figura 11 b, permite observar la frecuencia de valores mayores a 300 mm. Estas dos figuras permiten ver fácilmente las estaciones con valores bajos de exceso de agua en el suelo y que todas ellas están ubicadas en la zona occidental de la región estudiada.

FIGURA 11A

FRECUENCIA DE VALORES DE EXCESO DE AGUA EN EL SUELO
COMPREDIDOS ENTRE 0 Y 300 MM

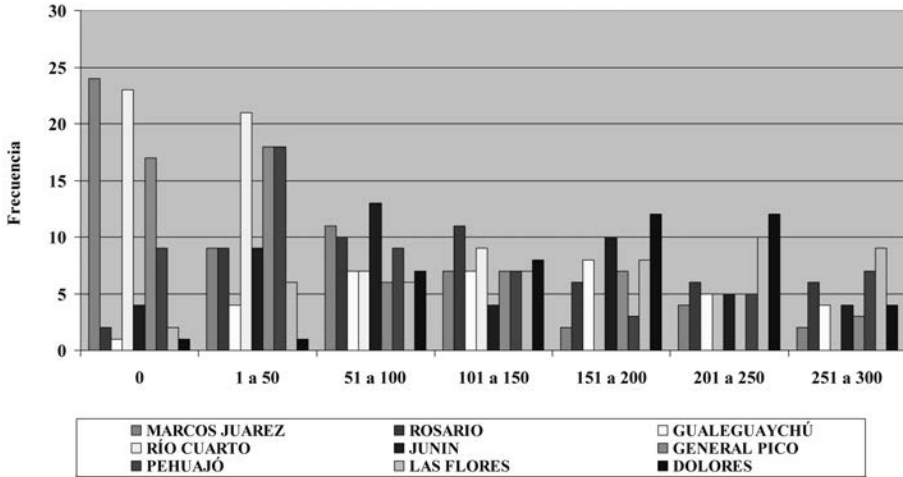
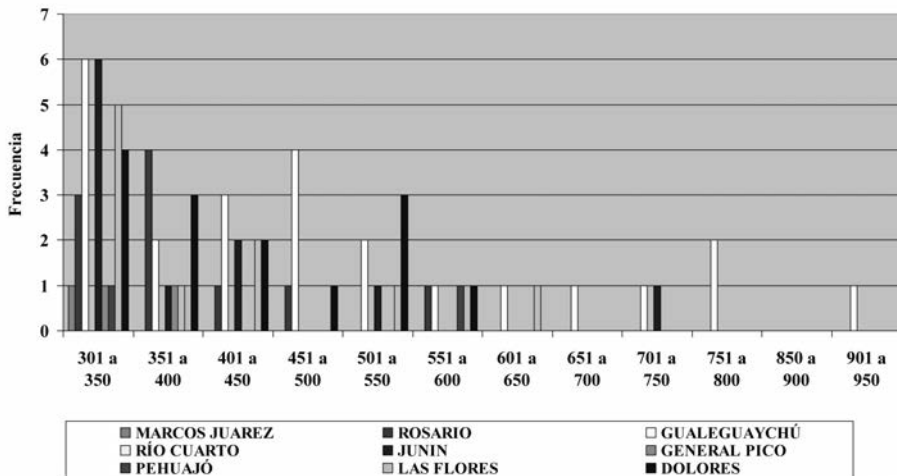


FIGURA 11B

FRECUENCIA DE VALORES DE EXCESO DE AGUA EN EL SUELO
MAYORES A 300 MM



Marcos Juárez, Río Cuarto y General Pico son las que tienen mayores frecuencias de valores bajos de exceso de agua en el suelo mientras que Dolores, Gualeguaychú y Rosario tienen las mayores frecuencias para los valores más altos.

La Tabla 2 presenta la cantidad de eventos extremos experimentado, en el período de sesenta años, analizado para cada localidad y el tipo de riesgo de inundación según la clasificación mencionada en Introducción.

TABLA 2
CLASIFICACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIÓN

Estación	Riesgo de inundación			
	Bajo	Moderado	Severo	Extremo
Marcos Juárez	44	9	6	1
Rosario	22	16	12	10
Gualeguaychú	14	3	9	24
Río Cuarto	51	9	0	0
Junín	26	15	8	11
General Pico	41	14	3	2
Pehuajó	36	10	12	2
Las Flores	16	14	20	10
Dolores	9	20	17	14

La localidad de Gualeguaychú experimentó 24 eventos extremos, Dolores 14, Junín 11, Rosario 10 y Río Cuarto ninguno. En Las Flores ocurrieron 20 eventos severos y en Dolores 17 mientras que Río Cuarto ninguno. Se debe considerar que todas las localidades han tenido eventos leves y moderados.

La Tabla 3 muestra los resultados de la aplicación del modelo Makesens para cada localidad de los valores de exceso de agua en el suelo para el período completo de años estudiados y para períodos más cortos o sea muestra la distribución temporal y la tendencia de exceso de agua en el suelo. Los períodos analizados fueron: 1951-2010, 1961-2010, 1971-2010, 1981-2010, 1991-2010 y 2001-2010. La mayoría de las series de datos no señalan variaciones a pesar de su larga longitud, con las excepciones General Pico y Gualeguaychú.

La tendencia en General Pico se incrementó en el período completo (1951-2010) con un nivel de significancia igual a $\alpha = 0.01$ y ha sido decreciente con un nivel de significancia $\alpha = 0.05$ para los lapsos 1981-2010 y 1991-2010, para

finalmente presentar un nivel de $\alpha = 0.1$ en el periodo 2001-2010.

Gualeguychú sólo presentó tendencia creciente con significancia estadística ($\alpha = 0.01$) en el período 1991-2010.

Las localidades Pehuajó, Las Flores, Dolores, Río Cuarto, Marcos Juárez, Rosario y Junín no mostraron resultados con significancia estadística.

TABLA 3

TENDENCIAS Y DISTRIBUCIÓN TEMPORAL DE EXCESO DE AGUA EN EL SUELO

Estación	Período					
	1951-2010	1961-2010	1971-2010	1981-2010	1991-2010	2001-2010
Marcos Juárez	=	=	=	=	=	=
Rosario	=	=	=	=	=	=
Gualeguachú	=	=	=	=	+↑	=
Río Cuarto	=	=	=	=	=	=
Junín	=	=	=	=	=	=
General Pico	**↑	=	=	*↓	*↓	+↓
Pehuajó	=	=	=	=	=	*↓
Las Flores	=	=	=	=	=	=
Dolores	=	=	=	=	=	=

Referencias: ↓ disminución, ↑ incremento y = no hay variación. Significancia estadística: + = $\alpha = 0.1$, * = $\alpha = 0.05$ y ** = $\alpha = 0.01$.

CONCLUSIONES

Se estudió el comportamiento del exceso anual de agua en el suelo en la Región Pampeana para el período 1951-2010.

Las nueve estaciones meteorológicas analizadas pertenecen a distintos subclimas y se hallan distribuidas en cinco provincias.

Se ha podido explicar una de las principales causas del cambio de uso del suelo en el área comprendida entre el este de la provincia de La Pampa y el oeste de la de Buenos Aires. En esta zona, la precipitación se ha incrementados entre 100 y 150 mm, principalmente en la época estival. De ahí que se expandió la frontera agrícola hacia el oeste de la Región Pampeana o sea hacia climas anteriormente más secos. Los cultivos de soja y maíz experimentaron un aumento importante en su superficie sembrada y en sus rendimientos.

Los mayores valores de exceso anual de agua en el suelo se encontraron en diferentes años en las distintas estaciones: Rosario (2000), Gualeguachú (2007), Junin (2001), General Pico (2004), Pehuajó (1973), Las Flores (1993) y Dolores (1963).

Marcos Juárez y Río Cuarto nunca alcanzaron el valor de 300 mm considerado «umbral» para el riesgo de inundación al considerar el exceso anual de agua en el suelo.

Gualeguachú, Junin y Dolores son las que presentaron mayores posibilidades de inundaciones y experimentaron este evento en numerosas oportunidades en el período estudiado.

El aumento de las precipitaciones en las últimas décadas del siglo XX fue claramente detectado mediante el valor del exceso anual de agua en el suelo. En el presente siglo, en su primera década se observa una disminución del índice, a pesar de algunos valores altos.

Hay indicios de que se volvería a las originales características climáticas de la región existentes al inicio del período analizado, lo que implicaría variabilidad climática.

Se vislumbra como necesario planear un uso más intensivo del suelo con dos cosechas anuales: un cultivo de invierno (avena, cebada, etc.) que ayudaría a bombear agua y continuar en verano con otro cultivo como ser soja, maíz o sorgo. Esto bien puede ser interesante económicamente y, aún más, si se acompaña con un sistema de riego complementario, que responda a un monitoreo constante del balance de agua en el suelo.

Se debe aclarar que el valor de exceso anual de agua en el suelo no es la única causa de inundación en la región, a él se debe sumar el crecimiento del caudal de los ríos, el aumento de la planicie de inundación de los mismos y la construcción de canales clandestinos con que algunos productores envían agua a zonas más bajas.

BIBLIOGRAFÍA

- Adams, R. M. (2004): "Climate Change and Agriculture", en Antoaneta Yotova (ed.), *Climate Change, Human Systems and Policy. Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)*, vol. 1, Developed under the Auspices of the UNESCO, Oxford, Eolss Publishers, pp. 309-327.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. y Smith, M. (2004): *Crop Evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements*, Irrigation and drainage Paper 56, Roma, FAO.

- Arnell, N. W. (1996): *Global Warming, River Flows and Water Resources*, Wiley, Chichester.
- Burgos, J. y Vidal, A. (1951): "Los climas de la República Argentina según la nueva clasificación de Thorntwite", *Meteoros*, 1, pp. 3-33.
- Capriolo, A. D. y Scarpati, O. E. (2012): "Extreme Hydrologic Events in North Area of Buenos Aires Province (Argentina)", *International Scholarly Research Network ISRN Meteorology*, article ID 415081, <https://doi.org/10.5402/2012/415081>
- Castañeda, M. y Barros, V. (1994): "Las tendencias de la precipitación en el cono sur de América al este de los Andes", *Meteorológica*, 21, pp. 23-32.
- Forte Lay, J. A., Quintela, R. M. y Scarpati, O. E. (1992): "Variación de las características hidrometeorológicas de la llanura pampeana Argentina", en *Memoria Encuentro Meteo 92*, vol. II, Madrid, [Instituto Nacional de Meteorología], pp. 142-146.
- Forte Lay, J. A. y Scarpati, O. E. (2004): "El ENOS y las diferencias en la distribución estival (Diciembre-Enero) de la disponibilidad de agua en el suelo en la Región Pampeana", comunicación presentada en *X Reunión Argentina y IV Latinoamericana de Agrometeorología. Agrometeorología y seguridad alimentaria en América Latina. Mar del Plata 13 al 15 de Octubre de 2004*.
- Forte Lay, J. A., Scarpati, O. E. y Aiello, J. L. (2005): "El ENOS y su relación con el agua en el suelo en períodos críticos para el cultivo de maíz en la región pampeana". *RADA Revista Argentina de Agrometeorología*, 3-4, pp. 77-83.
- Forte Lay, J., Scarpati, O. E. y Capriolo, A. D. (2008): "Precipitation variability and soil water content in pampean flatlands (Argentina)", *Geofísica Internacional*, 47(4), pp. 341-354.
- Kruse, E., Forte Lay, J. A., Aiello, J. L., Basualdo, A. y Heinzenknecht, G. (2001): "Hydrological processes on large flatlands: case study in the northwest region of Buenos Aires Province (Argentina)", *IAHS*, 267, pp. 531-535.
- Liu, S., Mo, X., Zhao, W., Naeimi, V., Dai, D., Shu, C. y Mao, L. (2009): "Temporal variation of soil moisture over the Wuding River basin assessed with an eco-hydrological model, in-situ observations and remote sensing", *Hydrology and Earth System Sciences*, 13, pp. 1375-1398.
- Minetti, J. y Vargas, W. (1997): "Trends and jumps in the annual precipitation in South America on the 15°S", *Atmósfera*, 11, pp. 204-221.
- Murphy, G. M. y Hurtado, R. H. (2013): *Agrometeorología*. Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires.
- Penalba, O. y Vargas, W. M. (2004): "Interdecadal and interannual variations of annual and extreme precipitation over central-northeastern Argentina", *International Journal of Climatology*, 24, pp. 1565-1580
- Razzetto, S. A. (2008): "La inundación de 1959: sus efectos en el sur entrerriano", *Mundo Agrario*, 8(16), <http://www.mundoagrario.unlp.edu.ar/article/view/v08n16a11/968> (Fecha de consulta: 12/11/2018).
- Rusticucci, M. y Penalba, O. (2000): "Interdecadal changes in the precipitation seasonal cycle over Southern South America and their relationship with surface temperature", *Climate Research*, 1(16), pp. 1-15

- Salmi, T., Mata, A., Anttila, P., Ruoho-Airola, T. y Amnell, T. (2002): *Detecting trends of annual values of atmospheric pollutants by the Mann-Kendall Test and Sen's slope estimates. The Excel template application MAKESENS*. Helsinki: Ilmatieteen laitos/Meteorologiska Institutet/Finnish Meteorological Institute, http://cdn.fmi.fi/legacy-fmi-fi-content/documents/MAKESENS_MANUAL.pdf (Fecha de consulta: 12/11/2018).
- Scarpati, O. E., Spescha, L. y Capriolo, A. (2002): "The impact of the heavy floods in the Salado River basin, Buenos Aires province, Argentina", *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 7(3), pp. 285-301.
- Scarpati, O. E., Spescha, L. B., Forte Lay, J. A. y Capriolo, A. D. (2011): "Soil Water Surplus in Salado River Basin and Its Variability during the Last Forty Years (Buenos Aires Province, Argentina)", *Water*, 3, pp. 132-145, <https://doi.org/10.3390/w3010132>
- Verheye, W. H. (2004): "Agro-Climate-Based Land Evaluation Systems", en W. H. Verheye (ed.), *Land Use and Land Cover. Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)*, vol. 2, Developed under the Auspices of the UNESCO, Oxford, Eolss Publishers, pp. 130-159.

Fecha de recepción: 25 de mayo de 2018.

Fecha de aceptación: 25 de julio de 2018.