

Distribución espacial de la evapotranspiración del cultivo de referencia y de la precipitación efectiva para las provincias del centro-noreste de Argentina

Spatial distribution of reference crop evapotranspiration and effective rainfall in the central-northeastern provinces of Argentina

José Morábito ^{1,2}, Santa Salatino¹, Rocío Hernández ^{1,2}, Carlos Schilardi ², Alisa Álvarez ¹, Paula Rodríguez Palmieri ¹

Originales: *Recepción:* 08/05/2014 - *Aceptación:* 19/03/2015

RESUMEN

Este trabajo se enmarca en el Acuerdo FAO-INA (Instituto Nacional del Agua) *"Identificación de potenciales nuevas áreas de regadío y áreas de riego complementario en las cuencas de la zona noreste de Argentina"*. Sus objetivos: conocer la evapotranspiración mensual del cultivo de referencia (ET_o), analizar su variabilidad y representarla espacialmente. El estudio comprendió el centro-noreste de Argentina, utilizó el programa CROPWAT 8.0 - FAO y los datos climáticos fueron obtenidos de la base CLIMWAT 2.0. La información se volcó en formato gráfico utilizando Arc View 3.2^a y las variables de interés se interpolaron mediante el método Kriging. Los resultados muestran: (a) la estación con mayor ET_o anual es Santiago del Estero: 1767 mm.año⁻¹; la mínima ET_o (1150 mm.año⁻¹) se observa en Loreto (Misiones), (b) la ET_o media del área de estudio para enero varía entre 160 y 200 mm.mes⁻¹ y la de julio está comprendida entre 35 y 90 mm.mes⁻¹, (c) en el NE de Córdoba la ET_o media de enero varía entre 165 y 185 mm.mes⁻¹, mientras que en julio, la variabilidad es menor y (d) la lluvia para un año hidrológico medio varía entre 605 y 1825 mm.año⁻¹ con una precipitación efectiva comprendida entre 500 y 1400 mm.año⁻¹ aumentando hacia el noreste.

Palabras clave

necesidad de riego • demanda hídrica de los cultivos • planificación del uso del agua • riego complementario/suplementario • productividad

1 Centro Regional Andino. Instituto Nacional del Agua. Belgrano 2010 Oeste (M55500FIF). Mendoza. Argentina. jmorabito@ina.gov.ar

2 Facultad de Ciencias Agrarias- Universidad Nacional de Cuyo. Almirante Brown 500- Luján. C. P. M5528AHB. Mendoza. Argentina

ABSTRACT

This paper falls within the framework of the FAO-INA Agreement that was entered into to "identify new potential irrigated and supplementary-irrigated areas in the basins of northeastern Argentina". The agreement seeks to collect information on monthly reference crop evapotranspiration (ET_o), analyze its variability, and show it on isoline maps. The study comprised the central northeastern part of Argentina; the program used was CROPWAT 8.0 – FAO; and climate data were obtained from CLIMWAT 2.0. The information was plotted with ArcView 3.2^a and the variables of interest were interpolated with the Kriging method. Results show that: a) Santiago del Estero is the station with the highest annual ET_o: 1767 mm.year⁻¹, while the lowest ET_o value is found in Loreto (Misiones) with 1150 mm.year⁻¹; b) the average ET_o in January ranges between 160 to 200 mm.month⁻¹, while in July it is between 35 - 90 mm.month⁻¹; c) the average ET_o in January in the northeastern part of Cordoba ranges between 165 - 185 mm.month⁻¹ while in July the variability is less pronounced; and d) rainfall in an average hydrological year ranges between 605 and 1825 mm.year⁻¹ with an effective rainfall of 500 and 1400 mm.year⁻¹ that tends to increase towards the northeast.

Keywords

irrigation requirements • crop water demand • water use planning • complementary/supplementary irrigation • productivity

INTRODUCCIÓN

Es sabido que la actividad agropecuaria de nuestro país, especialmente en las zonas áridas de riego integral, necesariamente debe transitar el sendero del aprovechamiento cada vez más eficiente del escaso recurso hídrico disponible. Si bien el uso agrícola sigue siendo uno de los más importantes y sobre él se asienta el crecimiento de la economía, otros autores han avanzado en el estudio de la reducción del consumo a través de la selección de especies de bajo requerimiento hídrico para arbolado público en ciudades (19) y en la cuantificación del uso agroindustrial (10) con el objeto de disminuir la demanda. Paralelamente, como consecuencia del crecimiento de la población y el desarrollo de sociedades emergentes, la demanda de alimentos, fibras y biocombustibles va en aumento, lo que incrementará la demanda de agua para

riego y consecuentemente las perspectivas de escasez hídrica serán mayores (13). Bajo este escenario la actividad agropecuaria sigue expandiendo cada vez más sus fronteras acentuando la necesidad de realizar un uso más eficiente y sostenible del agua. A su vez, las zonas húmedas y sub-húmedas (tradicionalmente de secano) frente a escenarios globales de demanda sostenida de granos y cultivos industriales (*commodities*) y de la mano de precios atractivos para los productores locales se incorporan a esta expansión. Sumado a esto, la escasez hídrica en diversas regiones podría agravarse por los efectos del cambio climático global ya que los pronósticos climáticos además de predecir el aumento de la temperatura del planeta, predicen cambios en el patrón de precipitaciones que podrían ocasionar

episodios de sequía más frecuentes Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC), 1992 citado en la bibliografía (14).

Muchos autores -en el mundo y en Argentina- han demostrado el impacto de pequeñas láminas de riego sobre el incremento de la producción en zonas de riego complementario, así como la importancia de un adecuado servicio de control y gestión del riego (25). En un ensayo realizado en algodón, "donde se monitorizó la cantidad de agua aplicada, el crecimiento, el estado hídrico del suelo y el rendimiento", comparando tres dosis de fertirriego, concluyen que la aplicación del 80% del agua que consumiría el cultivo con pleno desarrollo condujo a rendimientos máximos, en fecha de recolección segura y que la dosis del 60% mejoró la productividad del agua (7). En la provincia del Chaco se observó que, en general, las condiciones de producción potencial (con riego) originan algodón con fibra de mayor longitud, resistencia, uniformidad, madurez y refractancia. Las pérdidas de rendimiento de algodón en bruto para el tratamiento sin riego, fueron del 57 al 65% según la variedad analizada (30). En el INTA Reconquista- Santa Fe, mencionan aumentos de 17% del rendimiento final de algodón bajo riego, respecto de secano (22). En experimentos realizados en el noroeste de Brasil, para investigar los efectos de diferentes láminas de riego sobre la eficiencia del uso del agua y el rendimiento de algodón marrón demostraron una mayor eficiencia del uso del agua cuando se riega con el 80% de la evapotranspiración del cultivo y el máximo rendimiento del algodón en rama ocurre cuando se aplica una lámina de riego equivalente al 120% de la evapotranspiración del cultivo (9). En los EEUU, en un trabajo cuyo objetivo fue cuantificar la productividad del agua e

identificar oportunidades para aumentar el rendimiento en los sistemas de maíz de regadío del centro de Nebraska, demostraron que podría mantenerse el rendimiento actual reduciendo hasta un 32% el volumen anual asignado (16). En nuestro país, Dardanelli, J. *et al.*, mencionan que en "la región pampeana durante 95 años han ocurrido 21 fases Niño (las precipitaciones tienden a ser mayores a las normales) y 23 fases Niña (precipitaciones menores a las normales). En años "Niña" se reduce sensiblemente el rendimiento de maíz, soja y trigo, éste último en el sudoeste de la región pampeana, pero no hay mayor efecto sobre girasol. También mencionan que en Córdoba se han observado menores IC (índices de cosecha) en "diferentes cultivos de secano con respecto a testigos bajo riego". Por ello, el riego aseguraría mayor rendimiento y menor variabilidad de la producción en los años "Niña".

Giaveno *et al.*, 2002 evaluaron la respuesta productiva del maíz para silaje a la aplicación de riego suplementario y fertilización estratégica en Argiudoles del centro de la provincia de Santa Fe (15).

El ensayo vinculó tres épocas de siembra, dos condiciones - riego y secano - y diferentes híbridos. Para todas las variables estudiadas fueron encontradas diferencias significativas entre riego y secano, destacándose la producción de granos que se incrementó entre 130 y 285% y la biomasa total, con aumentos que variaron entre 52 y 155%, dependiendo de la época de siembra de los híbridos. Por su parte (Rivetti, A., 2007), obtuvo en maíz, resultados donde el rendimiento de materia seca manifestó diferencias significativas entre los distintos tratamientos regados y entre estos y el testigo. Los valores extremos de producción fueron de 34.628 kg.ha⁻¹ en el tratamiento con riego

y 20.414 kg.ha⁻¹ en el tratamiento sin riego (el rendimiento del T1 fue 70% mayor). En promedio el rendimiento en grano fue 72% mayor que el del tratamiento sin riego. La cantidad de agua aplicada varió entre 360 y 300 mm.

En trigo con riego suplementario y para el área centro-norte de Córdoba, Salinas, A., *et al.*, afirman "que se trata de una tecnología que permite no solo aumentar la producción, sino también disminuir la acentuada variabilidad interanual de los rendimientos". En condiciones óptimas de disponibilidad de agua y nutrientes es posible alcanzar rendimientos medios de entre 4.900 y 6.200 kg/ha⁻¹ (rendimientos potenciales inferiores a los de la zona "núcleo" triguera del país). Las ventajas son una mayor posibilidad productiva y económica del doble cultivo y la calidad obtenida. No obstante, los autores coinciden en que "la tecnología empleada implica un costo de producción elevado por lo que se requiere un análisis económico criterioso para asegurar la rentabilidad del sistema". En el mismo cultivo y para la zona central de la provincia de Santa Fe, el uso de riego suplementario permitió incrementar significativamente en un 38% la producción de grano. Observaron diferencias significativas ($P < 0,05$) de 1338 kg ha⁻¹ entre tratamientos, a favor del riego. Dichas diferencias se debieron a que el riego en la etapa de elongación del tallo permitió la supervivencia de un mayor número de macollos, y por lo tanto de más espigas que en el tratamiento sin riego (5). Se mencionan también incrementos de producción de 111 al 127% en trigo (con cultivo antecesor de soja y maíz respectivamente), 30% en soja de 1^a, 23% en soja de 2^a, 52% en maíz de 1^a y 46% en maíz de 2^a, en ensayos realizados en la estación INTA Manfredi

de Córdoba durante los años 1996/2011, con distintas dosis de riego (27). En soja de segunda en Santa Fe, encontraron que los tratamientos con riego superaron ampliamente (31% en grano) a los de secano (18). Por su parte en Santiago del Estero observaron que para el tratamiento con reposición del 100 % de la ETo se obtuvieron incrementos de rendimiento del 18,5% y 45% en relación al secano (23).

Por último, en Santa Fe, encontraron para la variedad de girasol KD 3940 una diferencia de producción de 1064 kg ha⁻¹ promedio de grano entre los tratamientos *riego fertilizado* y *secano fertilizado*. De similar manera DK 4045 -bajo riego- fue superior en 1112 kg ha⁻¹ con respecto a secano fertilizado (20).

La adecuada gestión del riego es la que determina cuándo y cuánto regar, sobre la base de las necesidades de agua de los cultivos, las características del suelo y las condiciones climáticas del entorno, para optimizar la calidad y cantidad de la producción. Las necesidades de agua de las plantas varían entre especies, dependiendo de la genética y la adaptación a diferentes condiciones de cultivo. Si bien en las regiones áridas, la decisión de cuándo y cuánto regar es relativamente simple, cuando se trata de riego suplementario, su programación se convierte en una tarea compleja, debido principalmente a la ocurrencia de precipitaciones (6). En ese sentido, los servicios de monitoreo y gestión de riego, son una herramienta de apoyo a la toma de decisiones, donde los criterios de cuándo regar y cuánta agua aplicar basados en parámetros agronómicos del cultivo y características del suelo y clima se combinan con un modelo matemático que permita determinar la ETo.

El desafío aquí es utilizar riego complementario o suplementario especialmente

en aquellos momentos críticos de los diferentes cultivos que permitan estabilizar o incrementar significativamente los rendimientos medios de secano, considerando la justificación socio-económica de las inversiones.

En este trabajo el primer paso fue la delimitación de la zona de estudio, provincias de Chaco, Formosa, Corrientes, Misiones, Entre Ríos, Santa Fe, Córdoba y Santiago del Estero. Fue necesario diseñar una adecuada planificación que permitiera conocer la demanda hídrica de los cultivos para diferentes situaciones de probabilidad de ocurrencia de la lluvia anual (años medios, secos y húmedos).

La disponibilidad de modelos computacionales (ETo-calculator, CROPWAT, entre los principales) permite el cálculo preciso de la ETo, que se obtiene utilizando distintas variables provenientes de las bases meteorológicas pertenecientes al Servicio Meteorológico Nacional (28) y a INTA. A partir del dato de ETo, se estima la evapotranspiración ETc de cada cultivo utilizando para ello coeficientes únicos de cultivo (kc) según el procedimiento descrito (1).

Para la elección de los kc se debe realizar un análisis previo de las distintas etapas fenológicas de cada cultivo destinado a obtener un adecuado ajuste de los coeficientes a las particularidades del lugar. Esta información, junto con la lluvia efectiva (Pe), permite determinar las necesidades de riego netas y brutas (en función de las eficiencias extra e intra-prediales dependientes de la infraestructura de transporte, distribución y aplicación), para distintas probabilidades de ocurrencia, con el objeto de definir los caudales proyecto de las obras de riego (17, 21).

El conocimiento de los valores de ETo, ETc y Pe resulta fundamental para el

cálculo del dimensionamiento de las obras de riego y para el diseño de equipos y/o métodos de riego intra-prediales.

El presente trabajo surge como resultado del estudio enmarcado en la Componente B (Determinación de demandas hídricas de modelos productivos) del Acuerdo para la *"Identificación de potenciales nuevas áreas de regadíos y áreas de riego complementario en la cuencas de la zona noreste de Argentina"* realizado en el año 2013 (12).

OBJETIVOS

- Conocer la evapotranspiración mensual del cultivo de referencia (ETo), información de base para el cálculo de la demanda de riego de los cultivos en la zona centro noreste de la Argentina (provincias de Chaco, Formosa, Misiones, Corrientes, Entre Ríos, Santa Fe, Córdoba y Santiago del Estero) y su respectiva variabilidad.
- Representar espacialmente los valores obtenidos mediante mapas de isolíneas que permitan extrapolar dichos valores puntuales a cualquier localidad del área de estudio.
- Orientar la labor de técnicos y productores en la planificación del riego, tanto en las áreas ya existentes como en posibles nuevas áreas productivas a incorporar en el futuro.

MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio comprende las provincias de Chaco, Formosa, Corrientes, Misiones, Entre Ríos, Santa Fe, Córdoba y Santiago del Estero.

En base a la información disponible en CLIMWAT 2.0 (2009) se representó la distribución espacial de sesenta y nueve (69) estaciones meteorológicas situadas en el área de estudio y en áreas periféricas, con el fin de interpolar sus registros climáticos.

Para el cálculo de la ETo y de la precipitación efectiva (Pe) se utilizó el programa CROPWAT 8.0 - FAO (29).

Los datos climáticos fueron obtenidos de la base CLIMWAT 2.0 (2009) para las mencionadas 69 estaciones meteorológicas. Resulta útil aclarar que la recopilación de datos realizada utilizando la base CLIMWAT cubre -en general- el período 1971-2000. Cuando no fue posible obtener dicha información se incluyeron series con fechas próximas que finalizasen *a posteriori* de 1975 y que -por lo menos- presentaran 15 años continuos de registros.

Según la metodología de FAO (1), para el cálculo de las necesidades netas de riego de los cultivos se necesita conocer las siguientes variables, analizadas mensualmente: temperatura máxima media, temperatura mínima media, humedad relativa media, velocidad del viento, heliofanía efectiva (para la estimación de la radiación solar) y lluvia.

La variable velocidad del viento se transformó a una altura de 2 metros, en los casos en que la medición fuese realizada a

10 metros, mediante la siguiente ecuación:

$$u_2 = u_z \frac{4,87}{\ln(67,8 Z - 5,42)} \quad (1)$$

Donde:

u_2 = velocidad del viento a 2 m de altura.

u_z = velocidad del viento a la altura z.

Z = altura de medición del viento.

En 1948, Penman combinó el balance energético con el método de transporte de masa y derivó una ecuación para calcular la evaporación de una superficie libre de agua, a partir de registros climatológicos normalizados de heliofanía, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento. Esto se llamó método combinado y fue luego desarrollado por numerosos investigadores, quienes lo aplicaron a superficies cultivadas, mediante la introducción de factores de resistencia.

El modelo CROPWAT 8.0 (29) utiliza la fórmula de Penman-Monteith para el cálculo de la ETo (ecuación 2).

$$ET_o = \frac{0,408\Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} \mu_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34\mu_2)} \quad (2)$$

Donde:

ET_o = evapotranspiración de referencia [mm día⁻¹].

R_n = radiación neta en la superficie del cultivo [MJ m⁻² día⁻¹].

G = densidad del flujo de calor del suelo [MJ m⁻² día⁻¹].

T = temperatura diaria media del aire a 2 m de altura [C°].

μ₂ = velocidad del viento a 2 m de altura [m s⁻¹].

e_s = presión de vapor a saturación [kPa].

e_a = presión de vapor actual [kPa].

e_s - e_a = déficit de presión de saturación [kPa].

Δ = pendiente de la curva de presión de vapor.

γ = constante psicrométrica.

La radiación neta (R_n) ha sido obtenida partiendo de la radiación solar (R_s), calculada a través de la aplicación de la fórmula de Angstrom (1):

$$R_s = \left(a_s + b_s \frac{n}{N} \right) R_a \quad (3)$$

Donde:

R_s = radiación solar o de onda corta [MJ m⁻² día⁻¹].

n = duración real de la insolación [horas].

N = duración máxima posible de la insolación [horas].

n/N = duración relativa de la insolación [-].

R_a = radiación extraterrestre [MJ m⁻² día⁻¹].

a_s = constante de regresión, que expresa la fracción radiación extraterrestre que llega a la tierra en días muy nublados ($n = 0$).

$a_s + b_s$ = fracción de la radiación extraterrestre que llega a la tierra en días despejados ($n = N$).

Para el cálculo de P_e , el programa CROPWAT 8.0 (29) presenta varias opciones. Ellas son: a) porcentaje de sustracción fijo; b) fórmula de FAO/AGLW (Water Resources, Development and Management Service), c) fórmula empírica de calibración regional, d) fórmula empírica del Departamento de Agricultura de EEUU (USDA) y e) opción de precipitación considerada nula. En este estudio se usó la ecuación empírica de USDA:

$$P_e = (P * (125 - 0,2 * P)) / 125 \quad (4)$$

para $P < 250$ mm

$$P_e = 125 + 0,1 * P \quad (5)$$

para $P > 250$ mm

Para determinar la variabilidad de ETo y a los fines de acotar el estudio, se seleccionaron dieciséis estaciones meteorológicas distribuidas espacialmente en el área de estudio. Sobre la base de un análisis estadístico de las precipitaciones para la serie 1971-2010 se identificaron tres años representativos: seco, medio y húmedo (alta, media y baja ETo respectivamente) (12).

En el análisis estadístico, para verificar la normalidad de las series, se realizaron gráficos de histogramas, box-plot y de las series muestrales en papel probabilístico normal.

Mediante el programa estadístico AFMOM, se aplicó la distribución Normal (Gauss) para identificar los valores teóricos que corresponden a cada clasificación (4).

El año "seco" fue definido como aquél que tiene una probabilidad de excedencia igual al 80%; "húmedo" el que presenta una probabilidad de excedencia del 20% y "medio o típico" el que se acerca a la media estadística (probabilidad de estar comprendido entre el 45 y el 55% de los casos). Para ellos se calcularon los valores de ETo y P_e .

Los resultados de ETo , junto con los valores de precipitación (P_p) y P_e se volcaron a un formato gráfico mediante el empleo de Arc View 3.2^a, a través de su módulo Spatial Analyst (11).

Se interpolaron las variables de interés mediante el método Kriging y se confeccionaron los distintos mapas de isolíneas de las variables expresados en forma mensual y anual.

RESULTADOS

Área de estudio: distribución de las estaciones meteorológicas

En la figura 1 se observa la distribución espacial de las 69 estaciones meteorológicas evaluadas, 35 en el área de estudio y 34 en su periferia, individualizando en la misma figura las 16 elegidas para el estudio de la variabilidad de ETo.

Cálculo de ETo y Precipitación efectiva (Pe)

Cálculo de ETo

La tabla 1 (pág. 117) presenta los valores de ETo (media mensual y anual) para las 35 estaciones analizadas incluidas en el área de estudio. Los valores de ETo media diaria, pueden obtenerse dividiendo cada valor por los días del mes correspondiente.

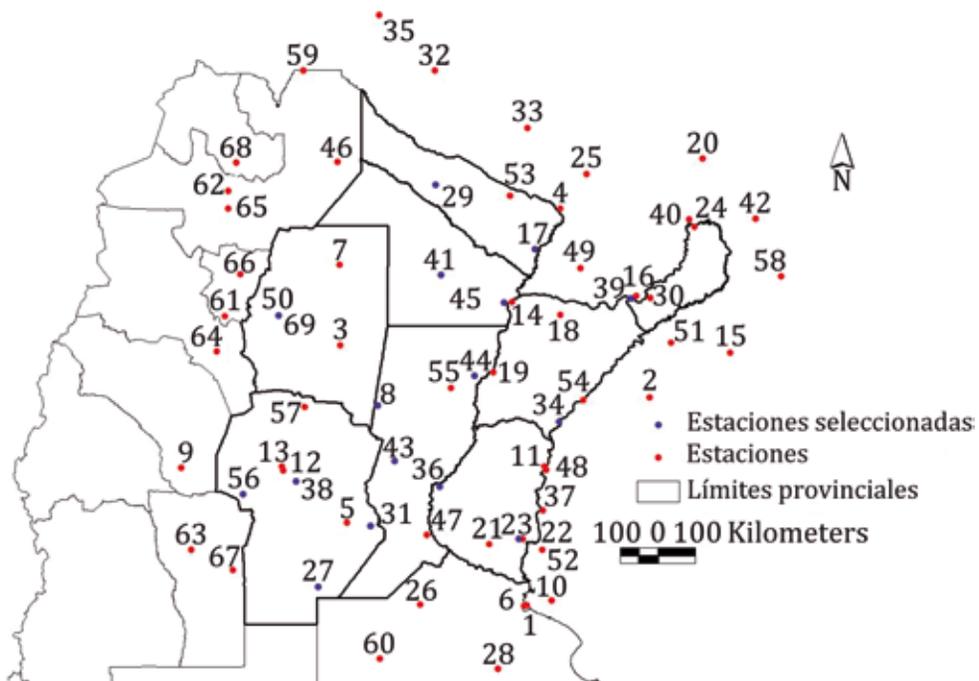


Figura 1. Distribución espacial de las estaciones meteorológicas (base: CLIMWAT-FAO, 2009).

Figure 1. Spatial distribution of weather stations (database: CLIMWAT-FAO, 2009).

Tabla 1. Valores de ETo media mensual y anual (mm mes⁻¹ y mm año⁻¹).
Table 1. Mean monthly and annual ETo values (mm month⁻¹ and mm year⁻¹).

Nº-Estación / mes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Anual
03-ANATUYA	206	154	156	104	79	53	75	114	143	165	193	213	1.657
05-BELL VILLE	175	144	117	84	57	39	37	64	95	117	140	168	1.241
07-CAMPO GALLO	184	151	143	112	89	68	89	118	143	167	180	188	1.632
08-CERES AERO	169	139	124	86	63	41	57	81	102	135	156	174	1.329
11-CONCORDIA AERO	166	137	119	81	55	34	42	64	80	116	139	165	1.201
12-CORDOBA OBS	165	136	113	81	60	43	50	78	106	140	158	169	1.299
13-CORDOBA AERO	182	147	124	102	79	56	69	105	128	157	172	187	1.511
14-CORRIENTES AERO	168	137	123	89	64	44	56	80	94	127	152	169	1.307
17-FORMOSA AERO	166	139	127	96	67	51	66	82	96	125	142	173	1.332
18-GENERAL PAZ	157	132	127	86	66	48	54	79	88	107	142	165	1.256
19-GOYA	176	151	136	92	62	43	50	79	91	115	150	169	1.314
21-GUALEGUAY	183	146	132	82	60	39	45	67	91	113	146	170	1.278
22-GUALEGUAYCHÚ	192	153	122	85	58	37	41	60	80	109	148	183	1.270
23-GUALEGUAYCHÚ AERO	187	144	119	80	55	38	42	62	84	117	145	175	1.252
24-IGUAZÚ	132	117	116	90	61	45	51	76	92	99	125	154	1.161
27-LABOULAYE	166	133	111	80	52	33	38	65	89	116	136	162	1.183
29-LAS LOMITAS	198	165	158	116	92	63	96	135	150	184	200	197	1.756
30-LORETO	137	120	113	79	61	47	54	75	82	106	128	144	1.150
31-MARCOS JUÁREZ	176	157	127	77	60	36	43	65	95	117	140	175	1.274
34-MONTECASEROS	185	152	137	94	67	44	51	81	92	116	158	187	1.365
36-PARANÁ AERO	166	139	119	77	55	38	45	66	86	115	143	162	1.215
38-PILAR OBSERVATORIO	160	129	110	81	60	45	51	82	100	126	148	163	1.256
39-POSADAS AERO	152	130	115	86	62	43	60	75	83	118	141	160	1.226
41-ROQUE SAENZ PEÑA	186	146	136	100	74	55	78	107	129	162	175	189	1.537
43-RAFAELA INTA	183	153	132	99	74	46	58	83	107	136	161	178	1.413
44-RECONQUISTA AERO	188	150	132	94	68	44	53	81	101	133	158	186	1.391
45-RESISTENCIA	171	139	121	85	64	50	60	84	95	129	149	163	1.310
47-ROSARIO AERO	173	139	117	77	52	31	40	61	86	118	143	163	1.201
50-SGO. DEL ESTERO	211	162	151	114	82	56	79	119	155	203	210	222	1.767
53-TACAAGLE	201	171	165	117	93	66	86	124	137	153	176	200	1.690
54-URUGUAYANA	157	122	108	68	46	35	35	51	65	103	126	145	1.062
55-VERA	176	143	128	89	64	43	53	80	102	113	155	167	1.318
56-VILLA DOLORES AERO	192	157	144	115	87	56	58	93	125	164	198	214	1.602
57-VILLA MARÍA DEL RÍO	155	123	108	81	61	43	50	80	104	126	141	157	1.230
69-SGO. DEL ESTERO AERO	211	162	151	114	82	56	79	119	155	203	210	222	1.767

Se mencionan a continuación las 34 estaciones ubicadas en la periferia del área: 01-Aeroparque, 02- Alegrete, 04- Asunción Aeropuerto, 06- Buenos Aires Observatorio Central, 09- Chepes, 10- Colonia, 15- Cruz Alta, 16- Encarnación, 20- Guaira, 25- Itacurubi, 26- Junín Aeropuerto, 28- Las Flores Aeropuerto, 32- Mariscal Estigarribi, 33- Misión Inglesa, 35- Nueva Asunción, 37- Paysandú, 40- Puerto Presidente Stroessner, 42- Quedas Do-Iguacu, 46- Rivadavia, 48- Salto, 49- San Juan Bautista, 51- Sao

Luis Gonzaga, 52- Soriano, 58- Xanxere, 59- Yacuiba, 60- Pehuajo, 61- La Cocha, 62- Salta Aeropuerto, 63- San Luis Aeropuerto, 64- Catamarca Aeropuerto, 65- Coronel Moldes, 66- Tucumán Observatorio, 67- Villa Reynolds Aeropuerto, 68-San Salvador De Jujuy.

Con todas estas estaciones se confeccionaron los distintos mapas de isolíneas de ETo mensuales y anual. La figura 2 presenta la ETo anual (mm año⁻¹) de toda el área de estudio.

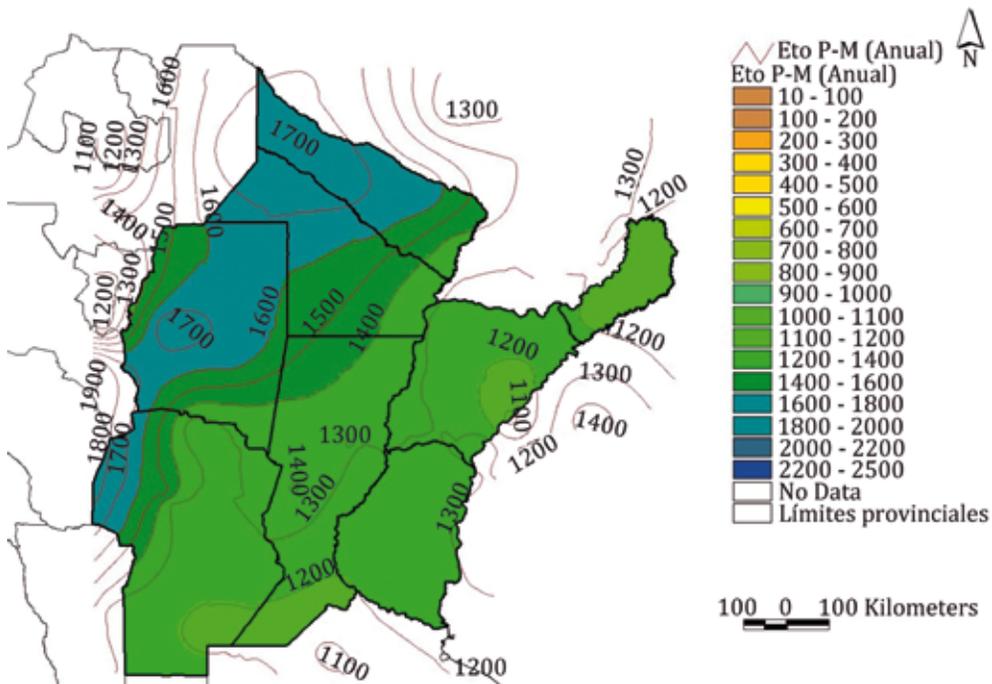


Figura 2. Evapotranspiración anual del cultivo de referencia (ETo mm año⁻¹).

Figure 2. Annual reference crop evapotranspiration (ETo mm year⁻¹).

Determinación de la precipitación efectiva (Pe)

En la figura 3 se muestran las isolíneas correspondientes a los valores medios anuales de Pe (mm año⁻¹) obtenidos según el método del USDA de EEUU, disponible en CROPWAT 8.0 (29).

Precipitación (Pp), probabilidad de ocurrencia y variabilidad de ETo

La tabla 2 (pág. 120) resume los valores mensuales y anuales de Pp en las estaciones seleccionadas para el año medio.

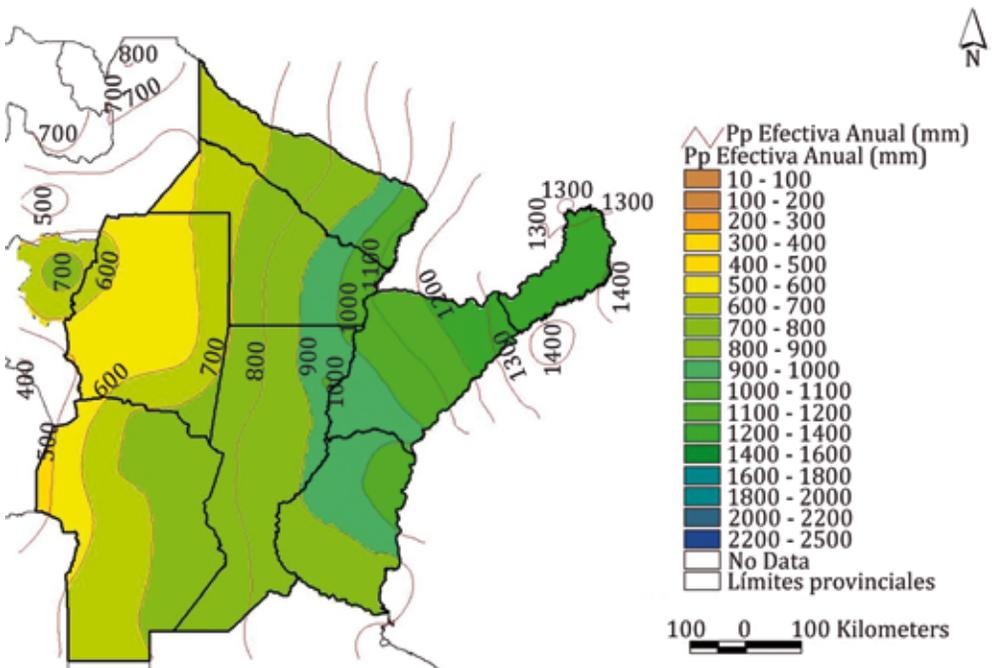


Figura 3. Lluvia efectiva media anual (Pe mm año⁻¹).
Figure 3. Annual mean effective rainfall (Pe mm year⁻¹).

Tabla 2. Precipitación (mm mes⁻¹ y mm año⁻¹) para el año hidrológico medio de las estaciones seleccionadas.**Table 2.** Rainfall (mm month⁻¹ and mm year⁻¹) for the mean hydrological year at each weather station.

Año	Estación	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
1989	LAS LOMITAS	119	6	201	117	66	55	8	13	89	65	99	113	952
2001	FORMOSA	195	125	215	175	13	40	21	64	101	137	109	154	1350
1989	PR. SAENZ PEÑA	68	36	263	218	6	8	16	53	32	50	103	195	1048
1975	POSADAS	170	134	227	240	59	170	62	128	188	236	64	148	1825
1987	RESISTENCIA	177	269	58	242	66	47	133	41	27	56	202	129	1447
1971	SGO. DEL ESTERO	184	167	46	35	2	0	6	0	10	74	73	8	605
1987	RECONQUISTA	284	79	275	160	32	4	94	32	61	13	122	66	1221
1987	CERES AERO	129	92	247	50	47	1	9	14	3	51	210	104	958
1972	MONTECASEROS	79	94	71	131	151	77	150	218	100	158	95	125	1449
1985	RAFAELA	30	199	58	89	15	114	72	27	105	112	76	82	981
1989	PILAR OBS.	68	161	117	45	39	33	0	3	24	23	43	214	771
1983	PARANÁ AERO	73	293	100	77	178	46	30	46	47	149	129	54	1220
1996	VILLA DOLORES	161	135	82	31	4	7	0	0	28	10	25	134	619
1987	MARCOS JUÁREZ	86	118	158	61	109	0	40	17	2	98	59	198	945
1980	GUALEGUAYCHÚ	38	95	99	243	114	93	41	36	56	81	170	44	1109
1985	RÍO CUARTO	124	61	41	40	1	43	113	32	21	152	79	110	816
1987	LABOULAYE	26	197	170	79	12	1	38	29	12	95	63	136	858

Esta misma información puede analizarse en forma gráfica.

En la figura 4 (pág. 121) se presenta la lluvia mensual para los años representativos (seco, medio y húmedo) tomando como ejemplo la estación meteorológica Las Lomitas (Prov. de Formosa), si bien aquí en algunos meses no se cumple la tendencia de la lluvia anual.

La figura 5 (pág. 121) presenta los valores de ETo (mm día⁻¹) alta, media y baja para sus respectivos años: seco, medio y húmedo para la estación Las Lomitas.

Se confeccionaron -además- mapas mensuales de valores de ETo (baja, media y alta), para evidenciar la variabilidad del parámetro.

En la figura 6 (pág. 122) se presentan las isolíneas para el mes de enero. En ellas puede verse -por ejemplo- que la ETo media del mes de enero varía entre 160 y 200 mm mes⁻¹ y que en los meses de enero y febrero -si bien las diferencias fueron pequeñas- la ETo resultó menor en el noreste que en el sureste del área de estudio. Esto puede ser atribuido a altos valores de humedad relativa registrados en el NE, lo que reduce la transferencia de vapor de agua del cultivo a la atmósfera.

Así también, en el NE de Córdoba la ETo media del mes de enero varía entre 165 y 185 mm mes⁻¹, pero en el mes de julio, la variabilidad es baja (para los tres casos el valor es prácticamente de 50 mm mes⁻¹ o 1,6 mm día⁻¹).

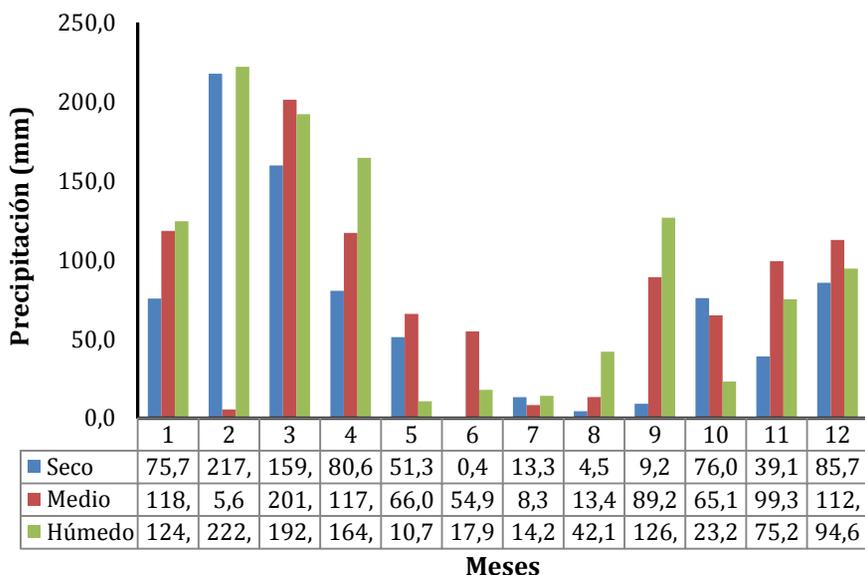


Figura 4. Lluvia mensual: años seco, medio y húmedo. Estación Las Lomitas (Formosa).

Figure 4. Monthly rainfall: dry, mean and wet years. Las Lomitas Weather Station (Formosa).

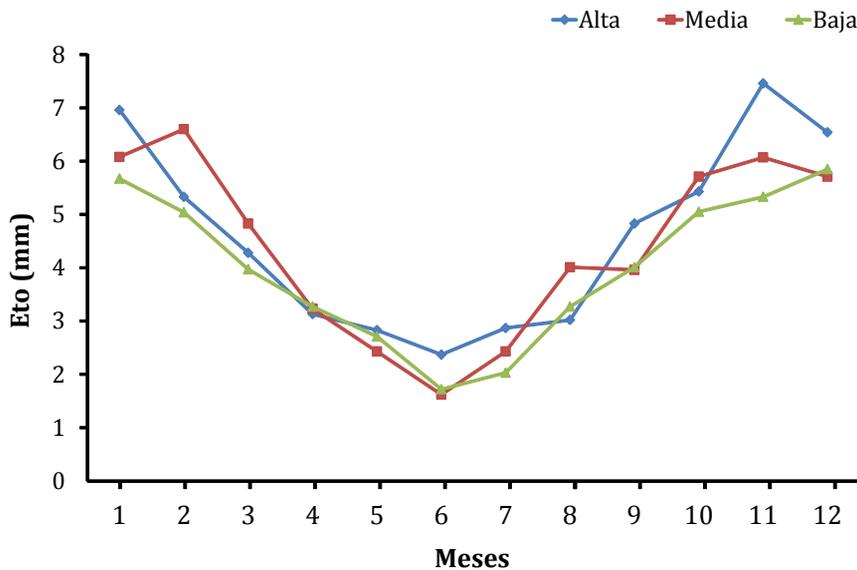


Figura 5. ETo baja, media y alta. Estación Las Lomitas (Formosa).

Figure 5. ETo: low, mean and high years. Las Lomitas Weather Station (Formosa).

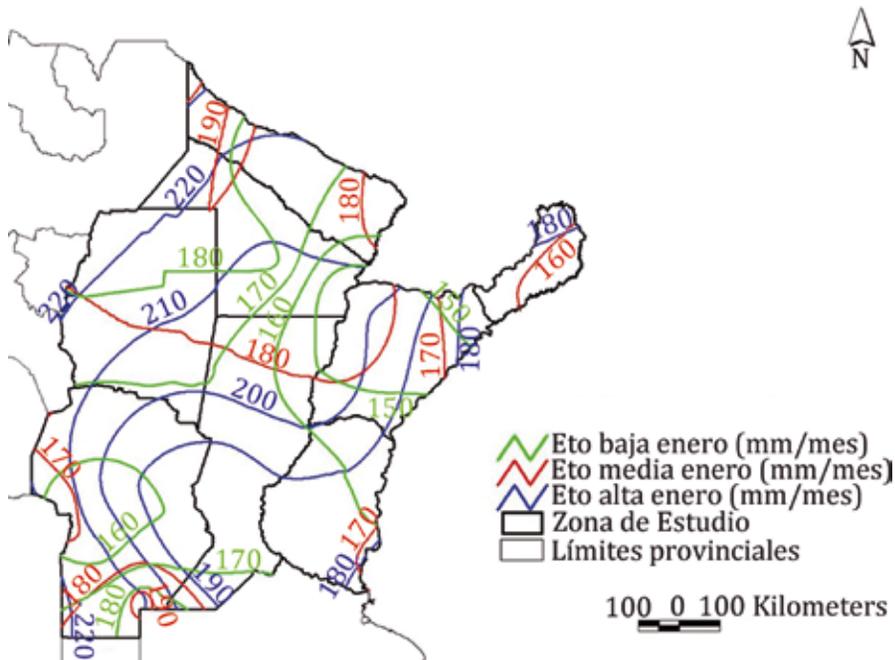


Figura 6. ETo para el mes de enero (valores bajos, medios y altos).

Figure 6. January ETo (low, mean and high values).

Respecto a ETo, al comparar los resultados obtenidos en el Programa Nacional de Eco-regiones de INTA (3) -publicado como Atlas Climático Digital de Argentina y donde la evapotranspiración potencial ha sido calculada con la fórmula de Thornthwaite- puede verse en estos últimos una subestimación de la ETo del orden del 10 al 20%.

Los métodos para la determinación de ETo basados en la temperatura del aire -al ser empíricos- requieren cuidadosas calibraciones locales para alcanzar resultados satisfactorios, "una excepción posible es el método de Hargreaves (1985) que ha producido resultados razonables de

ETo con cierta validez global" (1); criterio también compartido (2).

Dado el comportamiento y consistencia del método FAO Penman-Monteith en el ámbito global, es el único que se recomienda como método estándar de cálculo debido a que existe una elevada probabilidad de que pueda predecir correctamente los valores de ETo para una amplia gama geográfica y climática, contando además con previsiones para su uso en situaciones de falta de datos. En este sentido, se desaconseja el uso de las antiguas ecuaciones de FAO y de cualquier otra ecuación para el cálculo de ETo.

CONCLUSIONES

Entre los productos obtenidos en el presente trabajo puede mencionarse: (a) la confección de una base de datos meteorológicos para las 16 estaciones seleccionadas como representativas del área de estudio; (b) los valores anuales de ETo y Pe; c) los valores mensuales de ETo y su variabilidad y (d) la lluvia media mensual (Pp).

Los mapas de isolíneas permiten estimar valores de ETo y Pe para aquellos sectores del área de estudio que no cuenten con información meteorológica más precisa.

Cuando se comparan los resultados obtenidos con el mapa de lluvia media anual del Programa Nacional de Eco-regiones del INTA se observa una alta coincidencia, con excepción del límite noreste (provincia de Misiones) donde estos últimos son un poco más elevados.

Por último, es interesante destacar que los resultados del presente estudio permiten disponer -para un lugar determinado (dentro de la zona considerada)- de un rápido acceso a los valores de las variables analizadas y hacen posible la toma de decisiones tanto para la elaboración de calendarios preliminares de riego ajustados a la evolución de las condiciones climáticas de un año dado como para el adecuado dimensionamiento de futuras obras de riego y la acertada selección de métodos y maquinarias de riego, contribuyendo al uso racional del recurso hídrico en la región. La información está disponible en <http://www.fao.org/americas/programas-y-proyectos/utf017arg/es/>

BIBLIOGRAFÍA

1. Allen, R.; Pereira, L.; Raes, D.; Smith, M. 2006. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Servicio de Recursos, Fomento y Aprovechamiento de Aguas. FAO. Roma, Italia.
2. Almorox, J.; Elisei, V.; Aguirre, M. E.; Commegna, M. 2012. Calibración del modelo de Hargreaves para la estimación de la evapotranspiración de referencia en Coronel Dorrego, Argentina. Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza. Argentina. 44(1): 101-109.
3. Bianchi, A.; Cravero, S. 2010. Atlas Climático Digital de Argentina. Programa Nacional de Eco-regiones del INTA
4. Cacik, P.; Paoli, C.; Bolzicco J. 1990. "Programa AFMOM". FICH-UNL, Santa Fe, Argentina.
5. Camussi, G. F.; Marano, R. P. 2008. Respuesta del trigo al riego suplementario en la región central de Santa Fe. Revista FAVE - Ciencias Agrarias. 7: 1-2.
6. Carlesso, R. 2008. La agricultura de precisión y los sistemas de riego. Cyted, Perú. Disponible en: <http://ceer.isa.utl.pt/cyted/peru2008/>
7. Carmona Graciano, M.; Íñiguez, L.; Ferreres Castiel, E. 2008. Riego deficitario del algodón. Asociación española de riegos y drenajes. España. Disponible en: http://www.geoscopio.com/est/gmms/aeryd/a2_riego_deficitario_del_algodon_62722.htm
8. Dardanelli, J.; Collino, D.; Otegui, M.; Sadras, V. 2010. En Satorre, E.; Benech, R.; Slafer, G.; de la Fuente, E.; Miralles, D.; Ortegui M.; Savin R. Producción de granos. Bases funcionales para su manejo. Facultad de Agronomía. UBA. Argentina.

9. De Azevedo, P.; Bezerra, J.; Da Silva, V. 2014. Evapotranspiration and water-use efficiency of irrigated colored cotton cultivar in semiarid regions. *Agricultural Sciences* [serial online]. Publisher Provided Full Text Searching File, Ipswich, MA. 3(5): 714.
10. Duek, A. E.; Fasciolo, G. E. 2014. Uso de agua en industrias de elaboración de conservas de tomate y de durazno de Mendoza, Argentina. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza. Argentina.* 46(1): 59-72.
11. ESRI, I. ArcView, versión 3.2. 1999. Software: Sistema de Información Geográfica. 380 New York Street Redlands, USA.
12. FAO-INA. 2013. Carta acuerdo: Identificación de potenciales nuevas áreas de regadíos y áreas de riego complementario en las cuencas de la zona noreste de Argentina. Componente B: Determinación de demandas hídricas de modelos productivos. Morábito, J.; Salatino, S.; Hernández, R.; Schilardi, C.; Mastrantonio, L.; Mirabile, C.; Álvarez, A.; Rodríguez, P. P.
13. Fereres, E.; Orgaz, F.; Gonzalez-Dugo V. 2011. Reflections on food security under water scarcity". *J. Exp. Bot.* 62, 4079-4086 p.
14. FICH-UNL, Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral. 2006. Actividades habilitantes para la 2ª Comunicación nacional del gobierno de la República Argentina a las partes de la convención marco de ONU sobre cambio climático. TF 51287/ar. Componente "Vulnerabilidad de los recursos hídricos en el Litoral - Mesopotamia". Argentina. 1-3.
15. Giaveno, C.D.; Pilatti, M. A.; Marano, R. P. Parte I y II. 2002. Riego suplementario en el centro de Santa Fe: maíz para silaje. Respuesta productiva en diferentes épocas de siembra. *Revista FAVE - Ciencias Agrarias.* 1: (2).
16. Grassini, P.; Haishun, Y.; Suat, I.; John, T.; Charles, B.; Kenneth, G. C. 2014. High-yield irrigated maize in the Western U.S. Corn Belt: II Irrigation management and crop water productivity. *Field Crops Res.* [serial online]. n.d.; 120:133-141. Available in: Science Direct, Ipswich, MA.
17. Iñiguez-Covarrubias, M.; Ojeda-Bustamante, W.; Rojano-Aguilar, A. 2011. Metodología para la determinación de la evapotranspiración integrada y la capacidad de canales en una zona de riego. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza. Argentina.* 43(2): 175-191.
18. Marano, R. P.; Hermann, M.; Carnevale, I. 2006. Estudio de la dinámica hídrica del cultivo de soja de segunda en la región central de Santa Fe. Argentina. MERCOSOJA, 2006.
19. Martinez, C. F.; Cavagnaro, J. B.; Roig Juárez, J. A.; Cantón, M. A. 2013. Respuesta al déficit hídrico en el crecimiento de forestales del bosque urbano de Mendoza. Análisis comparativo en árboles jóvenes. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza. Argentina.* 45(2): 47-64
20. Mieres, L.; Marano, R. 2010. Respuesta productiva del cultivo de girasol (*Helianthus annuus*) a riego suplementario en el NE santafesino. IV Jornadas Riego y Fertirriego. Mendoza, Argentina.
21. Morábito, J.; Hernández, R.; Salatino, S.; Mirábito, C. 2008. Cálculo de las necesidades de riego de los principales cultivos del Oasis sur. IV Jornadas Riego y Fertirriego. Mendoza, Argentina.
22. Paytas, M.; Mieres, L.; Longhi, T.; Agretti, S. 2012. Evaluación de diferentes estrategias de riego y su efecto en los componentes de rendimiento de algodón INTA Reconquista, Argentina.
23. Prieto Angueira, S.; Prieto Garra, D. R.; Angella G. A. 2012. Evaluación de diferentes estrategias de riego deficitario controlado en el cultivo de soja [*Glycine max* (L.) Merrill]. INTA EEA Santiago del Estero. Universidad Nacional de Santiago del Estero, Facultad de Agronomía y Agroindustrias.
24. Rivetti, A. R. 2007. Producción de maíz bajo diferentes regímenes de riego complementario en Córdoba, Argentina. II. Producción de materia seca. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza. Argentina.* 39(1): 29-39.
25. Roldán Cañas, J.; Pérez Arellano, R.; Díaz Jiménez, M.; Moreno Pérez, M. F. 2009. Mejora de la gestión del agua de riego mediante el uso de indicadores de riego. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza. Argentina.* 42(1): 107-124.

26. Salinas, A.; Martellotto, E.; Giubergia, J.; Salas, H.; Lovera, E. 2009. Producción de trigo con riego suplementario en el área Centro Norte de la provincia de Córdoba. INTA-Manfredi, Argentina.
27. Salinas, A.; Martellotto, E.; Giubergia, J.; Álvarez, C.; Bocardo, M.; Severina, I.; Arce, A. 2012. INTA-EEA Manfredi. Resultados de 17 años de experiencia en el módulo demostrativo de riego de INTA Manfredi – Córdoba. 3º Reunión Internacional de Riego. Rendimientos potenciales con uso eficiente de agua e insumos. Manfredi –Córdoba - Argentina.
28. Servicio Meteorológico Nacional de la República Argentina (SMN). 2013. Base de datos: serie 1971-2000. Argentina.
29. Smith, M. 1999. CROPWAT Windows versión 8.0. FAO. Italia.
30. Solé, L. 2012. Determinación del rendimiento potencial de tres variedades de algodón (*Gossypium hirsutum*) en el Sud oeste chaqueño. Tesina de grado. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional del Nordeste.